К.М. Антонович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГЕОДЕЗИИ

В двух томах

Том 2

Москва
ФГУП «Картгеоцентр»
2006

УДК 528.2:629.78
ББК 26.1
А11

Рецензенты:
Доктор технических наук,
заведующий геодезическим отделом ЦНИИГАиК
Г.В. Демьянов
Кандидат технических наук,
заведующий отделом геодезического обеспечения
геолого-геофизических работ ФГУП СНИИГГиМС,
заслуженный работник геодезии и картографии РФ
А.Г. Прихода

Антонович, К.М.
А11 Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]. В 2 т. Т. 2. Монография / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.: ил.

ISBN 5-86066-071-5
ISBN 5-86066-077-4 Т. 2

Во 2-м томе монографии дается обоснование методов геодезических наблюдений, анализ погрешностей, технология полевых и вычислительных работ с использованием спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и NAVSTAR GPS.

Для научных и инженерно-технических работников, а также может быть использована аспирантами и студентами.

Научный редактор монографии:
А.И. Каленицкий, доктор технических наук, заслуженный работник геодезии и картографии РФ,
заведующий кафедрой астрономии и гравиметрии СГГА

© К.М. Антонович, 2006
© ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 2006
© Оформление. ФГУП «Картгеоцентр», 2006

СОДЕРЖАНИЕ

8. Спутниковые методы определений координат 6
8.1. Методы определений координат с применением ГЛОНАСС/GPS-технологий 6
8.2. Абсолютный метод спутниковых определений 8
8.2.1. Определение координат по кодовым псевдодальностям 8
8.2.2. Решение системы уравнений при абсолютном определении по псевдодальностям 11
8.2.3. Коэффициенты потери точности 12
8.2.4. Определение координат пункта абсолютным методом по фазовым измерениям 16
8.3. Дифференциальный метод определения координат 18
8.3.1. Дифференциальный метод СРНС 18
8.3.2. Ослабление ошибок в дифференциальном методе 20
8.3.3. Определение координат в локальном дифференциальном методе по кодовым измерениям 22
8.3.4. Определение координат в дифференциальном методе по фазовым измерениям 26
8.3.5. Широкозонные дифференциальные методы 28
8.3.6. Метод WADGPS 29
8.3.7. Глобальные дифференциальные системы 31
8.3.8. Множественные опорные станции 38
8.3.9. Виртуальные опорные станции 41
8.4. Относительное позиционирование 44
8.4.1. Статическое относительное позиционирование 44
8.4.2. Кинематическое относительное позиционирование 46
8.4.3. Статическая инициализация 47
8.4.4. Кинематическая инициализация 50
8.4.5. Псевдокинематическое относительное позиционирование 53
8.4.6. Функциональные модели в относительном позиционировании 54
8.5. Объединение ГЛОНАСС/GPS методов с другими методами позиционирования 56
8.5.1. Объединение GPS и ГИС 57
8.5.2. Объединение GPS с лазерными дальномерами 57
8.5.3. Объединение GPS с навигационными системами счисления 58
8.5.4. Объединение СРНС с инерциальными системами 60
8.5.5. Использование псевдоспутников 62
8.5.6. Объединение GPS/ГЛОНАСС и средств мобильной связи 64
8.5.7. Комплексирование GPS с баровысотомером 65
9. Погрешности спутниковых наблюдений 67
9.1. Источники ошибок 67
9.2. Ошибки аппаратуры 68
9.2.1. Шумы приемника 68

9.2.2. Влияние многопутности и положения фазового центра 68
9.2.3. Влияние ошибок времени 70
9.3. Остаточное влияние атмосферы 70
9.4. Точность позиционирования по кодовым псевдодальностям 79
9.5. Точность позиционирования по фазе несущей 83
9.5.1. Влияние ошибок априорных координат начала базовой линии и ошибок орбиты 83
9.5.2. Взаимное расположение спутников и пункта 85
9.5.3. Зависимость точности позиционирования от положения пункта на Земле 86
9.5.4. Точность определения базовой линии по фазе несущей 88
10. Технология проведения полевых работ 91
10.1. Общий порядок выполнения работ 91
10.2. Проект построения геодезической сети 92
10.2.1. Выбор метода позиционирования 93
10.2.2. Выбор аппаратуры 95
10.2.3. Параметры миссии 101
10.2.4. Форма геодезической спутниковой сети 105
10.2.5. Количество приемников 110
10.2.6. Точность априорных координат начальной точки сети и эфемерид 113
10.2.7. Способ учета метеоданных 114
10.3. Рекогносцировка сети и закладка центров 115
10.4. Планирование доступности спутников 117
10.5. Режимы спутниковых измерений 121
10.5.1. Статические измерения 121
10.5.2. Режим реоккупации 124
10.5.3. Работа в поле при статических измерениях 125
10.5.4. Приведение GPS измерений к центру знака 130
10.6. Кинематический режим в относительном методе 133
10.6.1. Принцип работы в кинематическом относительном режиме. 133
10.6.2. Позиционирование по фазе несущей в реальном времени 135
10.7. Методы сбора данных при статических измерениях 144
10.8. Геодезические сети для мониторинга земной поверхности 147
10.8.1. Геодинамический мониторинг 147
10.8.2. Активные станции и сети 151
10.9. Полевая обработка данных 154
10.9.1. Перевод данных в компьютер 155
10.9.2. Обработка измерений 155
10.9.3. Контроль качества спутниковых наблюдений 164
10.9.4. Отчет об измерениях 169
10.10. Метрологическое обеспечение спутниковых измерений 171
11. Обработка GPS/ГЛОНАСС измерений 178
11.1. Методы, средства и порядок обработки 178
11.2. Выявление и восстановление потерь счета циклов 184

11.2.1. Проблема потерь счета циклов 184
11.2.2. Методы выявления потерь счета циклов 185
11.3. Решение базовых линий 190
11.3.1. Одночастотные решения базовых линий 190
11.3.2. Решения по двухчастотным измерениям 194
11.4. Методы разрешения неоднозначностей фазы 197
11.5. Особенности обработки наблюдений ГЛОНАСС 209
11.5.1. Позиционирование по ГЛОНАСС псевдодальностям 209
11.5.2. Модели фазы несущей ГЛОНАСС 211
11.6. Уравнивание спутниковых векторных сетей 216
11.6.1. Концепция вторичного уравнивания сетей 216
11.6.2. Функциональные модели уравнивания 218
11.6.3. Стохастические модели для уравнивания сети 222
11.6.4. Решение системы уравнений поправок для сети 227
11.6.5. Анализ результатов уравнивания сети 228
11.7. Локальные преобразования координат и высот в спутниковых технологиях 237
11.7.1. Преобразования координат 237
11.7.2. Определение нормальных высот по спутниковым наблюдениям 244
11.7.3. Применение метода конечных элементов в ГНСС технологиях 250
12. Заключение 257
12.1. Модернизация навигационных систем 258
12.2. Прогресс в средствах и методах наблюдений 264
Приложение А Адреса Интернет сайтов для пользователей СРНС 270
Приложение Б Глоссарий 274
Список литературы 290

8. СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЙ КООРДИНАТ

8.1. Методы определений координат с применением ГЛОНАСС/GPS-технологий

Определение координат по наблюдениям спутников навигационных систем выполняется абсолютными, дифференциальными и относительными методами. В *абсолютном методе* координаты получаются одним приемником в системе координат, носителями которой являются станции подсистемы контроля и управления и, следовательно, сами спутники навигационной системы. При этом реализуется метод засечки положения приемника от известных положений космических аппаратов (КА). Часто этот метод называют также *точечным позиционированием*.

В *дифференциальном* и *относительном методах* наблюдения производят не менее двух приемников, один из которых располагается на опорном пункте с известными координатами, а второй совмещен с определяемым объектом. В дифференциальном методе по результатам наблюдений на опорном пункте отыскиваются поправки к соответствующим параметрам наблюдений для неизвестного пункта или к его координатам, то есть наблюдения обрабатываются раздельно. Этот метод обеспечивает мгновенные решения, обычно называемые решениями в реальном времени. В них достигается более высокая точность, чем в абсолютном методе, но только по отношению к опорной станции. В относительном методе наблюдения, сделанные одновременно на опорном и определяемом пункте, обрабатываются совместно. Это основное различие между относительным и дифференциальным методом, которое приводит к повышению точности решений в относительном методе, но исключает мгновенные решения. В относительном методе определяется вектор, соединяющий опорный и определяемый пункты, называемый вектором *базовой линии*.

Наблюдения в *реальном времени* (абсолютные, дифференциальные или относительные) предполагают, что полученное положение будет доступно непосредственно на месте позиционирования, пока наблюдатель находится на станции. При *пост-обработке* результаты получают после ухода с пункта наблюдений.

В каждом из трех указанных методов определений координат возможны измерения как по кодовым псевдодальностям (по фазе кода), так и по фазе несущей. Точность кодовых дальностей имеет метровый уровень, в то время как точность фазовых измерений лежит в миллиметровом диапазоне. Точность кодовых дальностей, однако, можно улучшить, если использовать метод узкого коррелятора или сглаживание по фазе несущей, достигая при этом дециметровый и даже более высокий уровень точности. В отличие от фаз несущих колебаний, кодовые дальности фактически не содержат неоднозначностей. Это делает их невосприимчивыми к потерям счета циклов (то есть изменениям неоднозначностей фазы) и, в некоторой степени, к препятствиям на пункте. Для фазовых же измерений критическим моментом является разрешение их неоднозначностей.

Точность абсолютного метода позиционирования по кодовым GPS измерениям определяется возможностями Службы стандартного позиционирования (SPS) или Службы точного позиционирования (PPS). При выключенном режиме селективного доступа SA гражданским пользователям стандартное GPS позиционирование обеспечивает в 95% случаев точность 15 м. Возможности абсолютного метода по измерениям фазы ограничиваются точностью эфемерид и параметров часов спутников. Использовать бортовые данные спутников при их метровом уровне точности нецелесообразно, а точные апостериорные эфемериды появляются с большой задержкой. Поэтому абсолютное позиционирование по фазе несущей пока применяется редко.

Точность дифференциального и относительного метода значительно выше, чем в соответствующих вариантах абсолютного метода, и может достигать сантиметрового и даже более высокого уровня. Однако следует обратить внимание на два момента. Во-первых, поскольку в этих методах координаты неизвестных пунктов находятся относительно опорного пункта, то погрешности координат этого пункта полностью войдут в координаты определяемых точек, то есть вся развиваемая сеть оказывается смещенной. Во-вторых, поскольку координаты определяемых пунктов используются для вычисления компонент базовых линий, то это также будет сказываться на точности определения приращений координат между опорным и определяемым пунктом.

В каждом из методов возможны наблюдения в режимах *статики* и *кинематики*. При статических наблюдениях оба приемника находятся в стационарном положении относительно Земли, а при кинематическом позиционировании один из приемников является стационарным, а другой – движущимся. Оба приемника одновременно наблюдают одни и те же спутники. Потеря захвата сигнала спутника для статического позиционирования не является настолько важной, как при кинематическом позиционировании. Статическое позиционирование позволяет накапливать данные, добиваясь повышения точности. Относительное позиционирование по фазовым измерениям является наиболее точным методом определения положений и наиболее часто используется геодезистами. Преимуществом кинематического позиционирования является его возможность получать траекторию движения транспортного средства, на котором установлена спутниковая аппаратура.

Техника фазовых наблюдений значительно сложнее техники кодовых измерений. Во-первых, это объясняется необходимостью обеспечивать непрерывность измерений фазы несущей. При наблюдениях кодовым приемником каждое измерение производится независимо от остальных. Потеря захвата сигнала какого-либо спутника, как правило, не влияет на полноту остальных данных. Поэтому, в принципе, можно ограничиться однократным фиксированием координат, если устраивает их точность. При фазовых измерениях для разрешения неоднозначностей фазовых отсчетов наблюдений одной эпохи недостаточно. Поэтому, чтобы набрать необходимый объем данных, наблюдения проводят достаточно длительное время. Во-вторых, разный уровень точности наблюдений по кодам и по фазе предполагает соответствие

вспомогательного оборудования, программного обеспечения, уровня сложности обработки и т. п.

8.2. Абсолютный метод спутниковых определений

8.2.1. Определение координат по кодовым псевдодальностям

В абсолютном методе приемник определяет свои координаты, скорость и время по спутникам СРНС независимо от других приемников (рис. 8.1).

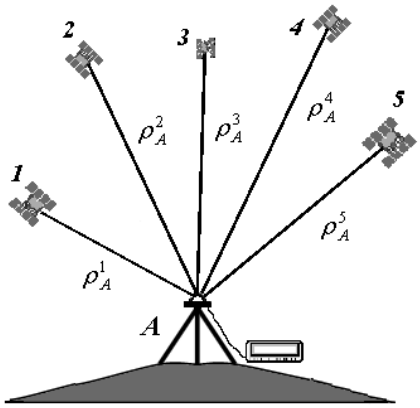


Рис. 8.1. Абсолютный метод спутниковых определений

Основным параметром, по которому находятся координаты, является псевдодальность P_A^i, уравнение которой, полученное в разделе 7.1.1, приведем в виде:

$$P_A^i = \rho_A^i + cdt_A - cdt^i + I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + dm_A^i + e_A^i . \qquad (8.1)$$

Напомним, что нижний индекс A относится к пункту наблюдений, а верхний индекс i – к спутнику, i = 1, 2, …, s, где s – количество наблюдаемых спутников. В правой части находятся: геометрическая дальность ρ_A^i, сдвиги шкал часов dt_A и dt^i (поправки часов), соответственно, для приемника и для спутника, ионосферная I_A^i и тропосферная T_A^i задержки, задержки сигналов в аппаратуре приемника d_A и спутника d^i, влияние многопутности dm_A^i и случайная ошибка измерений e_A^i (шум). Скорость распространения радиоволн в вакууме обозначена через c.

Практическое применение этого уравнения возможно, если в измерение псевдодальности ввести все поддающиеся учету поправки. Поправки за влияние ионосферы и тропосферы вычисляются в соответствии с моделями, приведенными в главе 6. Поправка часов спутников GPS содержится в навигационном сообщении в виде полиномиальной модели:

$$dt^i(t) = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r , \qquad (8.2)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты полинома; t_{oc} – опорное время (время часов) для коэффициентов, а член Δt_r учитывает релятивистские эффекты. В частности, a_0 – сдвиг часов (поправка часов) для эпохи t_{oc}, a_1 – ход часов в эпоху t_{oc} и a_2 – половина ускорения в ходе часов в эпоху t_{oc}. Для спутников ГЛОНАСС в навигационном сообщении ход часов и скорость хода не приводятся.

Задержки сигнала в аппаратуре спутника и в приемнике определяются путем калибровок или вообще не учитываются, то есть входят в шумы измерений. Влияние многопутности сигнала обычно неизвестно.

Геометрическая дальность ρ_A^i представляет собой расстояние между спутником в момент выхода сигнала и приемником в момент приема сигнала и выражается через радиус-векторы спутника $\mathbf{r}^i$ и станции $\mathbf{R}_A$ в общеземной системе координат как модуль разности векторов:

$$\rho_A^i = \left\| \mathbf{r}^i - \mathbf{R}_A \right\| = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} \,. \qquad (8.3)$$

Координаты спутников $\mathbf{r}^i_{нав.сооб.}$ вычисляются по навигационному сообщению на момент выхода сигнала $t - \tau_A^i$, где $\tau_A^i = \rho_A^i / c$. Для спутников GPS применяется аналитический метод вычислений, для спутников ГЛОНАСС – численное интегрирование (см. раздел 3.3). Из-за того, что векторы положений спутников $\mathbf{r}^i_{нав.сооб.}$ задаются в одной из общеземных систем (ПЗ-90, WGS-84), не являющихся инерциальными, их необходимо корректировать поправкой за поворот Земли за время прохождения сигнала τ_A^i:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}_3(\omega_\oplus \tau_A^i) \cdot \mathbf{r}^i_{нав.сооб.} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_\oplus \tau_A^i) & \sin(\omega_\oplus \tau_A^i) & 0 \\ -\sin(\omega_\oplus \tau_A^i) & \cos(\omega_\oplus \tau_A^i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{r}^i_{нав.сооб.}, \qquad (8.4)$$

где $\omega_\oplus$ – угловая скорость вращения Земли. Высота спутников СРНС – 19 – 20 тыс. км, поэтому время прохождения сигнала будет не меньше 63 – 66 мс. Земля поворачивается со скоростью 15″/с, поэтому угловое смещение Земли при вращении вокруг своей оси составит около 1″. Если общеземные координаты применяются без этой поправки, то координаты определяемой станции будут смещены примерно на 1″ по долготе [Teunissen et al., 1998].

Воспользуемся линеаризованным представлением геометрической дальности (раздел 7.1.7), считая, что координаты спутников известны, а в приближенное положение пункта $(\mathbf{R}_A)^0 = \left((dX_A)^0, (dY_A)^0, (dZ_A)^0\right)^T$ требуется отыскать вектор поправок $d\mathbf{R}_A = (dX_A, dY_A, dZ_A)^T$:

$$\rho_A^i = \sqrt{\left\| \mathbf{r}^i - (\mathbf{R}_A)^0 \right\|} - \mathbf{u}_A^i d\mathbf{R}_A = (\rho_A^i)^0 - \mathbf{u}_A^i d\mathbf{R}_A \,, \qquad (8.5)$$

где $(\rho_A^i)^0$ – приближенное значение геометрической дальности;

$$(\rho_A^i)^0 = \sqrt{\left(X^i - (X_A)^0\right)^2 + \left(Y^i - (Y_A)^0\right)^2 + \left(Z^i - (Z_A)^0\right)^2} \,, \qquad (8.6)$$

а вектор $\mathbf{u}_A^i$ является единичным вектором топоцентрического направления на спутник:

$$\mathbf{u}_A^i = \left(\frac{X^i - (X_A)^0}{(\rho_A^i)^0}, \quad \frac{Y^i - (Y_A)^0}{(\rho_A^i)^0}, \quad \frac{Z^i - (Z_A)^0}{(\rho_A^i)^0} \right)^T . \qquad (8.7)$$

Таким образом, в уравнении (8.1) оказывается четыре неизвестных: три координаты станции X_A, Y_A, Z_A и поправка часов приемника dt_A, и уравнение поправок получается в виде:

$$-\mathbf{u}_A^i d\mathbf{R} + c dt_A + l_A^i = v_A^i \qquad (8.8)$$

или

$$-u^i_{X,A}dX_A - u^i_{Y,A}dY_A - u^i_{Z,A}dZ_A + cdt_A + l^i_A = v^i_A, \qquad (8.9)$$

где l^i_A – свободный член;

$$l^i_A = (\rho^i_A)^0 - P^i_A(t) + I^i_A + T^i_A - cdt^i(t-\tau^i_A) + cd_A(t) + cd^i(t-\tau^i_A), \qquad (8.10)$$

а в невязку v^i_A вошли шумы измерений, ошибки координат спутника и все остальные не моделируемые ошибки из-за атмосферной рефракции, многопутности и т. п.

Для определения четырех неизвестных уравнения (8.9) необходимо, чтобы число наблюдений равнялось или было больше, чем число неизвестных. Это условие достаточное, но оно не обязательно дает решение. Причина этого состоит в том, что матрица нормальных уравнений может оказаться плохо обусловленной, что приведет к известному положению, называемому дефектом ранга.

Если число измерений в каждую эпоху одинаковое, то полное число наблюдений $n = s \cdot E$, где через s обозначено число спутников, а через E – число эпох.

При статическом позиционировании неизвестными являются три координаты пункта наблюдений и поправка часов приемника для каждой эпохи наблюдений. Таким образом, число неизвестных равно $3 + E$. Основная конфигурация определяется как

$$s \cdot E \geq 3 + E, \qquad (8.11)$$

откуда получаем явное соотношение

$$E \geq \frac{3}{s-1}. \qquad (8.12)$$

Минимальное число спутников для получения решения равно $s = 2$, что приводит к числу эпох наблюдений $E \geq 3$. Для $s = 4$ решение получается при $E \geq 1$. Это решение отражает возможность мгновенного позиционирования, где четыре неизвестных в любую эпоху находятся, если можно наблюдать, по крайней мере, четыре спутника.

Для кинематического точечного позиционирования основная конфигурация может быть непосредственно выведена из следующего рассмотрения. Из-за движения приемника число неизвестных координат станций равно $3E$. Добавляя E неизвестных поправок часов приемника, получаем, что полное число неизвестных равно $4E$. Следовательно, основное требование также определяется уравнением (8.11)

$$s \cdot E \geq 4E, \qquad (8.13)$$

что дает $s \geq 4$. Иными словами, положение (и скорость) движущегося приемника можно определить в любой момент, когда наблюдаются, по крайней мере, четыре спутника.

Решение при $s = 2$ и $E \geq 3$ для статического позиционирования, к примеру, означает, что теоретически достаточно наблюдений двух спутников в течение трех эпох. Однако на практике эта ситуация не дает приемлемый результат, или вычисления будут неудачными из-за плохо обусловленной системы уравнений наблюдений, если эпохи не будут отстоять на большие промежутки (например, десятки минут). Решение также будет возможно, если сделаны наблюдения в

три эпохи для двух спутников, а за ними сделаны три дополнительные эпохи, но для другой пары спутников. Такое применение будет редким, но его можно представить при некоторых обстоятельствах (например, в районе города) [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

8.2.2. Решение системы уравнений при абсолютном определении по псевдодальностям

Запишем систему уравнений поправок для псевдодальностей как

$$-u^i_{X,A}dX_A - u^i_{Y,A}dY_A - u^i_{Z,A}dZ_A + cdt_A + l^i_A = v^i_A,\ i = 1, 2, \ldots, s. \qquad (8.14)$$

Обозначим:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -u^1_{X,A} & -u^1_{Y,A} & -u^1_{Z,A} & 1 \\ -u^2_{X,A} & -u^2_{Y,A} & -u^2_{Z,A} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -u^s_{X,A} & -u^s_{Y,A} & -u^s_{Z,A} & 1 \end{bmatrix};\quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l^1_A \\ l^2_A \\ \ldots \\ l^s_A \end{bmatrix};\quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} dX_A \\ dY_A \\ dZ_A \\ cdt_A \end{bmatrix};\quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v^1_A \\ v^2_A \\ \ldots \\ v^s_A \end{bmatrix}, \qquad (8.15)$$

тогда систему (8.14) можно записать в матричном виде:

$$\mathbf{AX} + \mathbf{l} = \mathbf{v}. \qquad (8.16)$$

При $s = 4$ вектор поправок в псевдодальности $\mathbf{v} \equiv \mathbf{0}$, а решение системы уравнений (8.16) производится по формуле:

$$\mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{l}. \qquad (8.17)$$

Вектор координат пункта и поправка часов приемника определяются из выражений:

$$\mathbf{R}_A = \mathbf{R}^0_A + \mathbf{dR}_A,\quad dt_A = (cdt_A)/c. \qquad (8.18)$$

Так реализуется режим трехмерных определений (3D), или *навигационное решение*. Для тех ситуаций, когда число спутников $s = 3$, используется дополнительная информация, например, предполагается известной высота приемника над эллипсоидом H_A. Для корабля в океане геодезическую высоту приемника можно точно вывести из высоты приемника над водной поверхностью и высот геоида над эллипсоидом, которые вычисляются по гармоническим разложениям вида (2.41). Уравнение (8.5) можно выразить через эллипсоидальные координаты (широту, долготу и высоты над эллипсоидом), используя преобразования (2.21). В этих преобразованных уравнениях эллипсоидальные высоты рассматриваются как известные величины. Тогда остается три неизвестных: поправки в широту и долготу (плановые координаты) и поправка часов приемника. Таким образом, в принципе, для определений на море достаточно измерить псевдодальности до трех спутников (режим 2D позиционирования). Возможны другие варианты основного решения. Следует иметь в виду, что при получении геодезической высоты по нормальной высоте, взятой, к примеру, с карты, необходимо учитывать высоту квазигеоида над эллипсоидом.

При доступности всего полного спутникового созвездия нужно, естественно, наблюдать все спутники в зоне видимости и выполнять решение по методу наименьших квадратов. Тогда, при $s > 4$ достигается режим

трехмерных переопределенных измерений (overdetermined 3D). Это требует введения весовой матрицы для измеренных псевдодальностей:

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{K}_P^{-1}, \qquad (8.19)$$

где $\mathbf{K}_P$ – ковариационная матрица ошибок псевдодальностей, а σ_0^2 – априорная дисперсия единицы веса. Практически обычно корреляционные зависимости между измерениями не учитываются, а назначение весов выполняется либо в зависимости от синуса угла высоты спутника, либо в зависимости от отношения уровней сигнала и шума, либо в соответствии с пользовательской эквивалентной ошибкой дальности UERE [Tiberius et al., 1999; Misra, Enge, 2001]. Оценка вектора неизвестных при неравноточном уравнивании выполняется под условием $\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v} = \min$, а решение получается как

$$\hat{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l}). \qquad (8.20)$$

Чаще всего решение производится с предположением о том, что измерения равноточные. В соответствии с условием $\mathbf{v}^T\mathbf{v} = min$, по методу наименьших квадратов составляется система нормальных уравнений:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{A}^T\mathbf{l} = \mathbf{0}, \qquad (8.21)$$

откуда получается оценка вектора неизвестных

$$\hat{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T\mathbf{l}). \qquad (8.22)$$

Решение системы (8.16) часто производится методом приближений или с использованием алгоритма Калмановской фильтрации, так как для линеаризации геометрических дальностей (8.5) необходимо иметь априорные координаты приемника, близкие к их истинным значениям в пределах нескольких десятков километров. Для этого, как правило, используют хранящиеся в памяти приемника результаты последнего решения. В работе [Шебшаевич и др., 1993] сообщается, что при ошибке положения в 8 000 км достаточно четырех итераций. Тем не менее, многие модели приемников после перемещения на большие расстояния требуют ввода приближенных координат. Один из алгоритмов решения без априорных координат пункта (метод Банкрофта) описан в книге [Teunissen et al., 1998]. См. также [Awange, Grafarend, 2002; van Leeuwen, 2002].

8.2.3. Коэффициенты потери точности

Оценка точности результатов уравнивания обычно выполняется с помощью ковариационной матрицы $\mathbf{K}_\mathbf{X}$ или корреляционной матрицы $\mathbf{Q}_\mathbf{X}$, которые связаны между собой через апостериорную дисперсию единицы веса σ^2 соотношением:

$$\mathbf{K}_\mathbf{X} = \sigma^2\mathbf{Q}_\mathbf{X}. \qquad (8.23)$$

В ковариационной матрице диагональными элементами являются дисперсии неизвестных σ_i^2, недиагональные элементы (ковариации) равны произведениям стандартных ошибок и коэффициентов корреляции *r*, характеризующих линейную зависимость между уравненными величинами. Ковариационная матрица для навигационного решения имеет вид:

$$\mathbf{K_X} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & r_{XY}\sigma_X\sigma_Y & r_{XZ}\sigma_X\sigma_Z & r_{Xcdt}\sigma_X\sigma_{cdt} \\ r_{YX}\sigma_Y\sigma_X & \sigma_Y^2 & r_{YZ}\sigma_Y\sigma_Z & r_{Ycdt}\sigma_Y\sigma_{cdt} \\ r_{ZX}\sigma_Z\sigma_X & r_{ZY}\sigma_Z\sigma_Y & \sigma_Z^2 & r_{Zcdt}\sigma_Z\sigma_{cdt} \\ r_{cdtX}\sigma_{cdt}\sigma_X & r_{cdtY}\sigma_{cdt}\sigma_Y & r_{cdtZ}\sigma_{cdt}\sigma_Z & \sigma_{cdt}^2 \end{bmatrix}. \quad (8.24)$$

Корреляционная матрица имеет вид:

$$\mathbf{Q_X} = \begin{bmatrix} p_X^{-1} & r_{XY}/\sqrt{p_X p_Y} & r_{XZ}/\sqrt{p_X p_Z} & r_{Xcdt}/\sqrt{p_X p_{cdt}} \\ r_{YX}/\sqrt{p_Y p_X} & p_Y^{-1} & r_{YZ}/\sqrt{p_Y p_Z} & r_{Ycdt}/\sqrt{p_Y p_{cdt}} \\ r_{ZX}/\sqrt{p_Z p_X} & r_{ZY}/\sqrt{p_Z p_Y} & p_Z^{-1} & r_{Zcdt}/\sqrt{p_Z p_{cdt}} \\ r_{cdtX}/\sqrt{p_{cdt} p_X} & r_{cdtY}/\sqrt{p_{cdt} p_Y} & r_{cdtZ}/\sqrt{p_{cdt} p_Z} & p_{cdt}^{-1} \end{bmatrix}, \quad (8.25)$$

где p_i – веса уравниваемых величин.

Рассмотрим случай, когда измерения псевдодальностей принимаются некоррелированными и равноточными, то есть матрица весов измерений **P** определяется как

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2\,\mathbf{I}, \quad (8.26)$$

где σ_0 – априорная средняя квадратическая ошибка единицы веса; **I** – единичная матрица размера $s \times s$ (s – число спутников). Поэтому корреляционная матрица вычисляется через коэффициенты в матрице уравнений поправок $\boldsymbol{A}$:

$$\mathbf{Q_X} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix}. \quad (8.27)$$

Отсюда следует, что оценка точности неизвестных распадается на две части: определение средней квадратической ошибки (или дисперсии) единицы веса, которая зависит от точности измерения псевдодальностей, и нахождение обратной матрицы нормальных уравнений, которая зависит от взаимного расположения определяемого пункта и созвездия спутников, то есть от геометрии засечки.

Дисперсия единицы веса σ^2 находится по результатам уравнивания, если число спутников в созвездии больше, чем четыре:

$$\sigma^2 = \mathbf{v}^T\mathbf{v}/(s-4). \quad (8.28)$$

Для оценки влияния геометрии расположения спутников на точность навигационного решения используются коэффициенты потери точности *DOP* (Dilution of Precision – понижение или потеря точности). Коэффициенты *DOP* являются функциями диагональных элементов ковариационной матрицы уравненных параметров. В общем случае,

$$\sigma_i = \sigma_0 DOP, \quad (8.29)$$

где σ_i – средняя квадратическая (или стандартная) ошибка, например, для положения в плане или по высоте.

Если вектор определяемых параметров **X** и матрица коэффициентов **A** задаются уравнениями (8.15), то оценка точности неизвестных выполняется в соответствии с известными формулами:

$$\sigma_X = \sigma_0\sqrt{q_{11}};\ \sigma_Y = \sigma_0\sqrt{q_{22}};\ \sigma_Z = \sigma_0\sqrt{q_{33}};\ \sigma_{cdt} = \frac{\sigma_0}{c}\sqrt{q_{44}}\,, \qquad (8.30)$$

полная ошибка положения пункта находится по формуле:

$$\sigma_{\mathbf{R}} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} = \sigma_0\sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}}\,, \qquad (8.31)$$

а полная ошибка положения с учетом ошибок времени – по формуле:

$$\sigma_{\mathbf{R},t} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_{cdt}^2} = \sigma_0\sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44}}\,. \qquad (8.32)$$

Обозначим:

$$PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}}\,; \qquad (8.33)$$

$$TDOP = \sqrt{q_{44}}\,; \qquad (8.34)$$

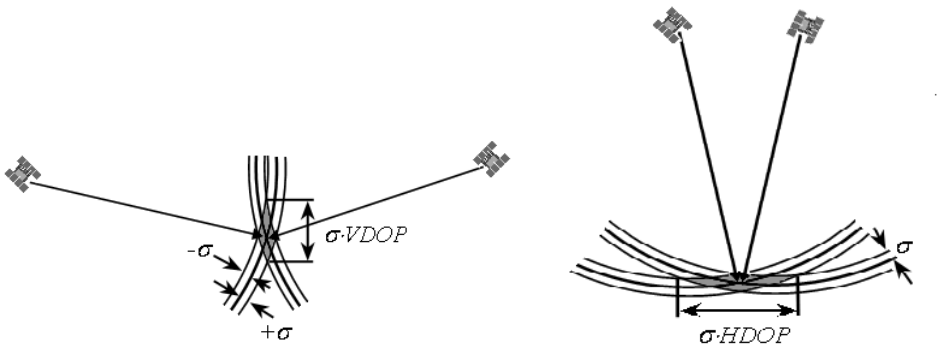
$$GDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44}} = \sqrt{\mathrm{tr}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}\,. \qquad (8.35)$$

Здесь через tr(…) обозначен след матрицы. Коэффициенты потери точности *DOP*, называемые также *геометрическими факторами*, характеризуют:

– PDOP (Position DOP) – понижение точности в положении пункта;

– TDOP (Time DOP) – понижение точности определения времени;

– GDOP (Geometrical DOP) – понижение точности положения и времени из-за геометрии. В данном контексте под геометрией понимается взаимное расположение созвездия спутников и пункта наблюдений (рис. 8.2).



а) б)

Рис. 8.2. Влияние геометрии:

а) при расположении спутников вблизи горизонта увеличивается ошибка определения высоты $\sigma \cdot VDOP$; б) при расположении спутников вблизи зенита увеличивается ошибка определения планового положения $\sigma \cdot HDOP$

Более удобно оценивать точность в топоцентрической координатной системе *ENU*, поскольку ошибка в координате *N* равна ошибке в широте, ошибка в координате *E* равна ошибке в долготе, и ошибка в *U* равна ошибке в геодезической высоте *H*. Корреляционную матрицу $\mathbf{Q_X}$ можно преобразовать в корреляционную матрицу для этой координатной системы $\mathbf{Q'_X}$ с использованием соотношения:

$$\mathbf{Q'_X} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q_X} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (8.36)$$

где матрица **R** определяется формулой (2.78). Теперь, используя матрицу $\mathbf{Q}'_{\mathbf{X}}$, можно сделать априорную оценку точности определения положения в плане и по высоте:

$$HDOP = \sqrt{q'_{11} + q'_{22}}\ ; \qquad (8.37)$$

$$VDOP = \sqrt{q'_{33}}\ , \qquad (8.38)$$

где

– VDOP (Vertical DOP) характеризует понижение точности в геодезической высоте;

– HDOP (Horizontal DOP) – понижение точности в плановом положении пункта.

Коэффициент потери точности GDOP является наиболее общей характеристикой, отражающей геометрию положения и оценку времени. Математически он представляет собой корень квадратный из следа обратной нормальной матрицы $\mathrm{tr}(\mathbf{A}^{\mathbf{T}}\mathbf{A})^{-1} = \mathrm{tr}(\mathbf{N})^{-1}$.

Геометрическая интерпретация величины PDOP при наблюдении четырех спутников связана с объемом тетраэдра, стороны которого соединяют концы единичных векторов топоцентрических направлений на спутники (рис. 8.3). Чем больше объем тетраэдра, тем меньше PDOP. Тетраэдр самого большого объема возможен в случае, когда один из спутников находится в зените, а три остальных спутника расположены с равными по азимуту расстояниями ниже горизонта с углом возвышения 19,47 градусов: GDOP при этом будет составлять 1,581. Естественно, GPS приемник не способен принимать сигналы от спутников, расположенных ниже горизонта, поэтому наименьший GDOP (1,732) достижим в случае, когда один из спутников находится в зените, а три остальных спутника расположены вблизи горизонта через 120° по азимуту. Некоторые ранние модели GPS приемников могли отслеживать одновременно только четыре спутника. Эти приемники использовали такой алгоритм выбора видимых спутников, при котором отслеживались только те четыре, которые обеспечивали наибольший объем тетраэдра, и, следовательно, наименьшее значение DOP [Langley, 1999, русский перевод в Интернете http://www.navgeocom.ru; Phillips, 1984].

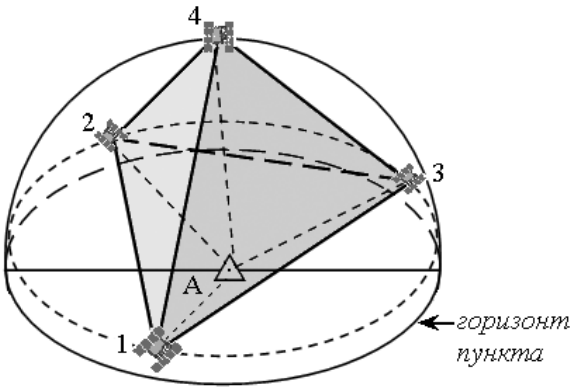


Рис. 8.3. Тетраэдр, вершины которого 1, 2, 3, 4 являются концами единичных векторов направлений на спутники с пункта А. Объем тетраэдра обратно пропорционален величине PDOP

Чем больше используется спутников, тем лучше для точности. Средняя величина HDOP и VDOP – около двух. Как общее правило, значения PDOP больше 5 считаются слабыми, а при PDOP больше 7 ответственные измерения обычно не производятся. Коэффициенты DOP можно вычислять на будущее по приближенному положению приемника и предсказанным эфемеридам спутника. Отсюда ясно, почему матрицу коэффициентов **A** часто называют «матрицей плана»; действительно, можно вычислить корреляционную матрицу заранее, перед сеансом наблюдений, если знать, где будут спутники (которые берутся из альманаха навигационного сообщения). Поэтому можно так «планировать» измерения (в данном случае, выбирать время суток), чтобы точность положения не зависела от «слабой геометрии» спутников [Blewitt, 1997]. Моделирование геометрических факторов в Интернете см. http://www.ualberta.ca/~norris/.

8.2.4. Определение координат пункта абсолютным методом по фазовым измерениям

Псевдодальность можно получить по измерениям фазы несущих колебаний. Упрощенную математическую модель для этих измерений можно представить как

$$\phi_A^i(t) + f^i dt^i(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_A^i(t) + N_A^i + f^i dt_A(t), \qquad (8.39)$$

где $\phi_A^i(t)$ – измеренная фаза несущей, выраженная в циклах; λ – длина волны; N_A^i – целочисленная неоднозначность фазы; $\rho_A^i(t)$ – геометрическая дальность, как и в модели для кодовых измерений. Через f^i обозначена частота сигнала спутника, а через $dt^i(t)$ и $dt_A(t)$ обозначены поправки часов, соответственно, для спутника и приемника.

Как и при позиционировании по кодовым псевдодальностям, если число измерений в каждую эпоху одинаковое, то полное число наблюдений $n = s \cdot E$, где через s обозначено число спутников, а через E – число эпох. Однако число неизвестных здесь больше на число неоднозначностей s.

При статическом точечном позиционировании число неизвестных состоит из 3 координат станции наблюдений, s неизвестных неоднозначностей и E неизвестных поправок часов приемника. Обращение к формуле (8.39) показывает, что имеет место дефект ранга, это означает, что один из неизвестных параметров можно выбирать произвольно. Предположим, что выбрана поправка часов приемника в одну эпоху, тогда вместо E неизвестных поправок часов приемника остается только $E-1$ поправок часов. Поэтому условие для статического точечного позиционирования без дефекта ранга определяется соотношением

$$s \cdot E \geq 3 + s + (E-1), \qquad (8.40)$$

что дает в явном виде необходимое число эпох как

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}. \qquad (8.41)$$

Минимальное число спутников для получения решения $s = 2$, что приводит к числу эпох наблюдения $E \geq 4$, другой случай: $s = 4$, $E \geq 2$.

Для кинематического точечного позиционирования по фазам из-за движения приемника необходимо рассматривать 3E неизвестных координат станций по сравнению с 3 неизвестными в (8.40). Другие условия, включая ситуацию с дефектом ранга, остаются неизменными. Поэтому основное условие наблюдений определяется из соотношения

$$sE \geq 3E + s + (E - 1), \qquad (8.42)$$

что дает в явном виде

$$E \geq \frac{s-1}{s-4}. \qquad (8.43)$$

Минимальное число спутников для получения решения s = 5, их необходимо отслеживать в течение $E \geq 4$ эпох. Другое решение возможно при s = 7, $E \geq 2$.

Заметим, что решения для одной эпохи (то есть E = 1) для точечного позиционирования по фазе несущей не существует. Вследствие этого кинематическое точечное позиционирование по фазам возможно, только если s фазовых неоднозначностей известно из некоторой *инициализации*. В этом случае модель фазовой дальности преобразуется в модель кодовой дальности [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Обратимся теперь к полному уравнению для фазы Φ_A^i в единицах расстояния, которое получено в разделе 7.1.3:

$$\Phi_A^i(t) = \rho_A^i(t, t-\tau_A^i) - I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + c[dt_A(t) - dt^i(t-\tau_A^i)] +$$
$$+ c[\delta_A(t) + \delta^i(t-\tau_A^i)] + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \varepsilon_A^i. \qquad (8.44)$$

Решение уравнения (8.44) с точностью на уровне шума измерений фазы ε_A^i требует значительных усилий. Во-первых, для того, чтобы был максимальный эффект от использования точных фазовых измерений, необходимо иметь координаты спутников и поправки их часов значительно точнее, чем обеспечивает навигационное сообщение. Известно, что точность эфемерид спутников GPS составляет 2-3 м, а ошибки часов могут доходить до 10 нс, то есть также давать погрешность до 3 м. Единственный выход здесь – использование файлов точных эфемерид и поправок часов.

Во-вторых, необходимо иметь очень точные модели тропосферной и ионосферной поправок, а также иметь данные о задержках в аппаратуре. Некоторые параметры, например межканальные сдвиги, целесообразно исключать в процессе обработки путем образования одинарных разностей между спутниками. Для учета тропосферы спутниковые наблюдения необходимо сопровождать отслеживанием метеорологических параметров, а для учета ионосферы с максимально возможной точностью необходимы фазовые двухчастотные измерения, чтобы образовывать комбинацию фаз, свободную от влияния ионосферы. Кроме того, для уверенного разрешения неоднозначностей необходимо, чтобы одновременно с измерениями фаз наблюдались P(Y)-кодовые псевдодальности.

В Лаборатории реактивного движения (США) для повышения надежности обработки больших геодезических сетей был разработан метод абсолютного позиционирования по фазе несущей с точными апостериорными эфемеридами.

Давно было признано, что точные GPS орбиты улучшают качество обработки GPS. Однако ценность информации по точным часам GPS подвергалась сомнению. Авторы метода показали, что совместная информация о точных орбитах и о часах позволяет обрабатывать данные одного приемника, добиваясь за суточный сеанс точности в несколько миллиметров в плановых координатах и в один сантиметр по высоте [Zumberge et al., 1997].

В совместном эксперименте ученых Лаборатории реактивного движения (США) и обсерватории Онсала (Швеция) метод абсолютного позиционирования был использован для определения градиентов в модели тропосферной рефракции [Bar-Sever et al., 1998].

Разработанная в Университете штата Огайо методика обработки абсолютных фазовых измерений позволяет добиваться точности определения координат 2 см за суточный сеанс наблюдений. При этом используются точные апостериорные эфемериды, но поправки часов спутников находятся по измерениям с дискретностью 30 с. Метод был использован также для кинематического режима с дискретностью в 1 с. Однако точность при этом падала до 25 см из-за необходимости в интерполяции поправок часов внутри 30-секундных интервалов, что при режиме выборочной доступности SA было явно недостаточным [Han et al., 2001].

Алгоритмы для абсолютного позиционирования по фазе несущей можно найти в книге [Xu, 2003].

8.3. Дифференциальный метод определения координат

8.3.1. Дифференциальный метод СРНС

В дифференциальном методе позиционирования СРНС (DGPS, DGLONASS) используется не менее двух приемников, измеряющих псевдодальности (или псевдодальности и фазы несущей). Один из приемников постоянно установлен в пункте с известным положением в общеземной системе координат WGS-84 или ПЗ-90. Его называют опорной станцией, коллективной базовой станцией (БС, BS), или контрольно-корректирующей станцией (рис. 8.4). Второй приемник находится в точке, координаты которой необходимо определить. Для этого приемника используются термины: мобильная станция (МС, MS), перемещаемый приемник, удаленная станция, потребитель, транспортируемая аппаратура потребителя.

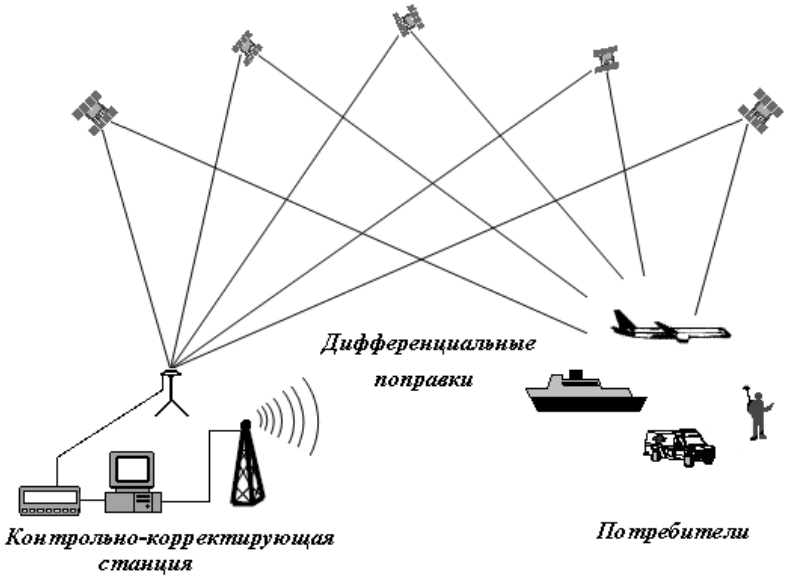


Рис. 8.4. Дифференциальный метод СРНС

Суть дифференциального метода сводится к тому, что приемник БС, используя точные координаты фазового центра своей антенны, определяет из наблюдений спутников поправки для координат или псевдодальностей (или для фаз), которыми приемник МС исправляет свои соответствующие параметры и в результате получает точные координаты. В основе этого приема лежит положение о том, что влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково как для базового, так и для мобильного приемника, то есть используются свойства коррелированных ошибок.

Дифференциальные поправки от базовой станции к полевому приемнику могут передаваться при пост-обработке или в реальном масштабе времени. В первом случае после выполнения наблюдений файлы с результатами измерений переводятся на один компьютер, где и происходит их обработка специальным программным обеспечением. Во втором случае поправки от базовой станции передаются полевому приемнику через радиомодем или другими способами беспроводной связи. Это дает возможность получать координаты МС на участке работ через несколько секунд после очередного измерения. Для оперативной передачи данных применяется формат RTCM 104, разработанный Специальным комитетом 104 Радиотехнической комиссии по мореплаванию США. Версия формата 2.2 позволяет передавать данные как по спутникам GPS, так и ГЛОНАСС. В тех случаях, когда точное положение полевого приемника необходимо знать на базовой станции, используется инверсный (обратный) дифференциальный метод (Inverse Differential GPS IDGPS). В этом методе поток данных измерений идет от полевого приемника к базовой станции. Здесь также может применяться и режим реального времени, и пост-обработка. Такой вариант дифференциального метода широко применяется, например, при диспетчеризации парков транспортных средств.

Передача поправок в дифференциальном методе вместо исходных наблюдений позволяет значительно уменьшить объем передаваемой

информации и повысить оперативность результатов, хотя и без достижения самой высокой точности.

В локальном дифференциальном методе (Local Differential LDGPS) работает одна базовая станция, обслуживающая все ближайшие мобильные приемники на расстояниях до 300 – 500 км (при кодовых определениях). Падение точности из-за уменьшения корреляции между ошибками по мере удаления мобильных приемников от базовой станции привело к идее использования сети базовых станций. В этом методе по данным сети базовых станций создается пространственно-временная модель поправок, то есть учитываются медленные изменения в поправках. На этом основана работа в широкозонном дифференциальном методе (Wide Area DGPS, WADGPS), где размер обслуживаемой области может достигать 5 000 км. Что касается дифференциального метода по наблюдениям фазы несущей, то расстояния от единственной базовой станции обычно находятся в пределах 10 км и редко доходят до 30 км. При использовании метода множественных опорных станций (Multiple Reference Stations, MRS) размер области может достигать нескольких сотен километров. В Лаборатории реактивного движения (США) разработана глобальная подсистема DGPS (Global DGPS, GDGPS).

8.3.2. Ослабление ошибок в дифференциальном методе

Основные виды GPS/ГЛОНАСС измерений состоят из оценок расстояний до спутников по фазе кода или фазе несущей, искаженных систематическими и случайными ошибками. Главный источник систематических ошибок (смещений) – это неизвестная поправка часов приемника относительно системного времени. Другими ошибками являются:

- ошибки моделирования часов спутников и их эфемерид,
- ошибки моделирования ионосферной и тропосферной задержек,
- ошибки из-за многопутности и шумов приемника.

Измерения фазы несущей создают дополнительные сложности из-за целых неоднозначностей. Однако ошибки из-за многопутности и шума приемника для фазовых измерений примерно на два порядка меньше, чем для кодовых измерений.

Поскольку основная идея дифференциального метода заключается в использовании свойств ошибок, связанных с часами спутника, эфемеридами и распространением сигнала в атмосфере, то целесообразно рассмотреть особенности их пространственно-временных изменений.

Ошибки часов спутника. Ошибка моделирования часов сравнительно небольшая ($\sigma_{dt} \approx 7$ нс и даже менее) и изменяется медленно за часы, зависимость от расстояния между базовым и мобильным приемниками почти отсутствует. До 2 мая 2000 г. ошибка от зашумления часов в соответствии с режимом SA была наибольшей и самой важной в методе DGPS, причем быстро изменяющейся ошибкой, от 1 минуты до 5 секунд.

Ошибка эфемерид спутника σ_E – это другая малая ошибка (≈2 м и менее для спутников GPS), которая медленно изменяется в течение минут. При этом опасен только компонент вектора ошибки, лежащий вдоль топоцентрического

радиус-вектора. Поэтому остаточная ошибка после дифференциальной коррекции зависит от угла между линиями визирования на спутник от пользователя и опорной станции. Спутники находятся на высоте более 20 000 км от поверхности Земли, и угловое расстояние при спутнике между линиями визирования на две точки на Земле, отстоящих, например, на 100 км, будет 0.3°. Предельная остаточная ошибка в расстоянии до спутника дается как [Misra, Enge, 2001]

$$\sigma_\rho \le \frac{D \cdot \sigma_E}{\rho}, \qquad (8.45)$$

где ρ – расстояние до спутника; D – расстояние между приемниками. При D = 100 км и σ_E = 10 м нескомпенсированная ошибка в расстоянии будет меньше 5 см.

Ионосферная задержка. Ионосферная задержка зависит от полного содержания электронов *TEC* по пути сигнала. Остаточная ошибка после введения ионосферных поправок будет зависеть от пространственной неоднородности *TEC*. Ионосфера может показывать значительные изменения *TEC* и в пространстве, и во времени, вызванные солнечной активностью и неоднородностями на пути сигнала, особенно при магнитных бурях. У приемников, находящихся на расстоянии 25 км, разность ионосферных вертикальных задержек может достигать 0.1 – 0.2 м. После выполнения дифференциальной коррекции типичная остаточная погрешность для спутников вблизи зенита будет около 0.1 – 0.2 м при расстоянии между пунктами 100 км, но при активной ионосфере может достигать 1 м и даже больше [Misra, Enge, 2001].

Тропосферная задержка. Эта задержка зависит от профиля плотности воздуха вдоль пути сигнала. Два приемника, разнесенных на несколько километров, могут находиться в различных погодных условиях. Содержание паров воды показывает значительную пространственную и временную изменяемость. Остаточная ошибка после введения дифференциальной поправки обычно больше для спутников на малых высотах над горизонтом. При расстояниях между приемниками 10 км остаточная ошибка может быть 0.1 – 0.2 м. Для больших расстояний или при значительной разности высот нужно отдавать предпочтение раздельному введению поправок за тропосферу на опорном и пользовательском приемнике. Для низких спутников остаточная ошибка может составлять 2 – 7 мм на каждый метр в разности высот.

Многопутность и шум приемника. Эти ошибки являются некоррелированными между опорным и мобильным приемниками и не могут исправляться в DGPS. Следовательно, эти ошибки, введенные на опорной станции, будут передаваться пользователю, и поэтому важно их уменьшать путем тщательного выбора и установки оборудования и на опорной станции, и на пользовательской станции.

Проектирование систем DGPS, начавшееся в 1990-х гг., определялось режимом SA, в котором вводились большие и быстро изменяющиеся ошибки. Эти системы обычно вычисляли новые поправки в измерения каждые 5 – 10 секунд. Чтобы увеличить срок действия сообщения с поправками и сократить

объем передаваемых данных, в сообщениях обычно передают и величину поправки, и скорость ее изменения, наблюдаемую на опорной станции в эпоху измерений. После отключения режима SA стало возможным увеличивать интервал обновления поправок с 5 – 10 секунд до 1 минуты, а скорость изменения поправок можно удалять из сообщения.

8.3.3. Определение координат в локальном дифференциальном методе по кодовым измерениям

Запишем уравнения псевдодальностей, измеряемых до спутника *i* мобильной и базовой станцией. Следуя установленной практике, будем использовать нижние индексы *MS* и *BS*, соответственно, для приемников пользователя и базовой станции. С небольшим изменением в обозначениях измеренные приемниками псевдодальности можно представить как

$$\begin{aligned} P_{BS}^i &= \rho_{BS}^i + \Delta\rho_{BS}^i + c(dt_{BS} - dt^i) + I_{BS}^i + T_{BS}^i + e_{BS}^i, \\ P_{MS}^i &= \rho_{MS}^i + \Delta\rho_{MS}^i + c(dt_{MS} - dt^i) + I_{MS}^i + T_{MS}^i + e_{MS}^i. \end{aligned} \qquad (8.46)$$

Здесь величины $\Delta\rho_{BS}^i$ и $\Delta\rho_{MS}^i$ характеризуют влияние ошибок в элементах орбиты спутника по линии визирования на спутник.

Геометрическое расстояние от базовой станции до спутников можно вычислить по их известным геоцентрическим радиус-векторам:

$$\rho_{BS}^i = \left\| \mathbf{r}^i - \mathbf{R}_{BS} \right\|. \qquad (8.47)$$

Радиус-векторы спутников $\mathbf{r}^i$ вычисляются по навигационному сообщению с учетом поворота Земли за время прохождения сигнала (формула (8.4)), а $\mathbf{R}_{BS}$ является радиус-вектором антенны на базовой станции.

Для упрощения, опустим связь с эпохой измерений в (8.46) и (8.47), но будем считать, что измерения сделаны на двух приемниках в пределах одной-двух минут одно от другого. Ошибка ΔP_{BS} в псевдодальности на опорной станции вычисляется как

$$\Delta P_{BS} = \rho_{BS} - P_{BS} = -\Delta\rho_{BS}^i - c(dt_{BS} - dt^i) - I_{BS} - T_{BS} - e_{BS} \qquad (8.48)$$

и транслируется как дифференциальная поправка. С ней вычисляется откорректированное значение псевдодальности $\tilde{P}_{MS}$ у пользователя в районе обслуживания базовой станции:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{MS} &= P_{MS} + \Delta P_{BS} \approx \rho_{MS} + (\Delta\rho_{MS}^i - \Delta\rho_{BS}^i) + \\ &+ c(dt_{MS} - dt_{BS}) + (I_{MS} - I_{BS}) + (T_{MS} - T_{BS}) + e_{MS} + e_{BS} \approx \\ &\approx \rho_{MS} + c(dt_{MS} - dt_{BS}) + e_{MS,BS}. \end{aligned} \qquad (8.49)$$

Ошибка, вводимая поправкой часов спутника (dt^i), у двух приемников будет почти одинаковой. Различие будет за счет флуктуаций хода часов за промежуток времени, равный разности моментов выхода сигналов. Если расстояние между приемниками «не слишком большое» и поправки «не слишком старые», то можно сделать заключение о том, что ошибки эфемерид будут влиять на измерения двумя приемниками одинаковым образом, то есть $\Delta\rho_{MS}^i \approx \Delta\rho_{BS}^i$, и кроме того, $I_{MS} \approx I_{BS}$ и $T_{MS} \approx T_{BS}$. Значительное расстояние и/или разность высот между двумя приемниками (например, при аэрофотосъемке) потребует использовать тропосферную модель для исправления измерений

отдельно для каждого приемника. Однако это не избавит от ошибок из-за многопутности и шума приемника, включенных в член $e_{MS,BS}$, введенных на базовой станции и мобильным приемником.

В формуле (8.49) влияние ошибки часов приемника базовой станции вошло в поправку ΔP_{BS} и передалось пользователю, давая некоторое смещение в поправке часов приемника пользователя. На практике опорная станция должна стараться ограничить размер дифференциальных поправок, учитывая и исключая смещения от своих часов, например, используя высокостабильные генераторы частоты.

И для пользователя, и для базового приемника важно, каким способом определяются координаты. Если опорный приемник перед вычислением поправок использует ионосферную модель из навигационного сообщения, то пользователь должен следовать той же методике. Подобным образом, если опорный приемник использует модель тропосферной задержки, то пользователь должен поступать таким же образом. Оба приемника должны использовать одни и те же параметры эфемерид. Когда эфемериды обновляются, опорная станция транслирует поправки для некоторого периода времени, используя и старые, и новые эфемериды, каждому набору указывая уникальный параметр Issue of Data (IOD).

На практике для получения дифференциальных поправок по кодовым измерениям используются преимущественно два метода вычислений: коррекция по навигационному параметру и коррекция координат [Blackwell, 1985; Morgan-Owen, Johnston, 1995; Шебшаевич, Григорьев, 1989; Синякин, 1996; Болдин и др., 1999].

При *коррекции по навигационному параметру* на опорной станции отыскиваются поправки в псевдодальности для всех наблюдаемых спутников. Метод требует, чтобы базовая станция измеряла псевдодальности P_{BS}^i до всех спутников, а также получала разность ΔP^i между P_{BS}^i и геометрической дальностью ρ_{BS}^i . Последняя вычисляется по формулам (8.3), (8.4) с использованием данных навигационного сообщения и известных координат опорной станции. Дифференциальные поправки ΔP^i вычисляются после исключения из псевдодальностей ошибок часов приемника БС:

$$\Delta P^i = P_{BS}^i - \rho_{BS}^i - cdt_{BS} . \qquad (8.50)$$

Полученные поправки ΔP^i вводятся в псевдодальности P_{MS}^i , измеренные мобильной станцией. Потребитель корректирует их, выбирая из всего объема поправок необходимые, и получает уточненные псевдодальности $\tilde{P}_{MS}^i$:

$$\tilde{P}_{MS}^i = P_{MS}^i + \Delta P^i , \qquad (8.51)$$

с которыми производится вычисление координат потребителя. Строгий алгоритм метода приводится, например, в [Leick, 1995].

При коррекции по навигационному параметру БС не нужно знать, какое созвездие спутников используется любым из участников, поскольку поправки в псевдодальности передаются для всех видимых спутников. Каждый участник,

таким образом, выбирает соответствующий набор поправок и применяет его в обрабатываемой позиции. В этом методе передаются следующие данные:

– поправки в псевдодальности ΔP^i для каждого НС;

– скорость изменения поправок $\dot{P}^i$ для каждого НС;

– возраст эфемерид AODE (ICD-GPS-200c, 2003), используемых опорной станцией.

Параметр AODE включается для того, чтобы убедиться в использовании одних и тех же эфемерид и поправок часов спутника как опорным, так и удаленным приемником, поскольку один из них может считывать и применять вновь загруженные данные. Преимущество этого метода состоит в том, что получать и использовать дифференциальные поправки может любое число приемников, а исправленное положение может быть известно потребителю в реальном времени.

Коррекция координат может производиться в том случае, когда БС и МС наблюдают одно и то же созвездие спутников не менее чем из четырех спутников. Этот метод применяется на сравнительно небольшом удалении от базовой станции и сравнительно небольших интервалах времени, а также при использовании однотипной приемной аппаратуры. Алгоритм получения дифференциальных поправок этим методом:

$$\Delta\mathbf{R} = \tilde{\mathbf{R}}_{BS} - \mathbf{R}_{BS}; \qquad (8.52)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{MS} = \mathbf{R}_{MS} + \Delta\mathbf{R}, \qquad (8.53)$$

где $\mathbf{R}_{BS}, \mathbf{R}_{MS}$ – векторы оценок координат, соответственно, для базовой и мобильной станции по сигналам СРНС; $\tilde{\mathbf{R}}_{BS}$ – эталонные координаты БС; $\Delta\mathbf{R} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ – вектор дифференциальных поправок; $\tilde{\mathbf{R}}_{MS}$ – вектор уточненных координат потребителя.

Данные, передаваемые от БС к МС (или от МС к БС в инверсном режиме) включают в себя:

– вектор поправок $\Delta\mathbf{R}$ для каждого пользовательского набора НС;

– скорость изменения поправок $\Delta\dot{\mathbf{R}}$;

– возраст эфемерид AODE для каждого спутника;

– адреса участников.

Преимущества этого метода при работе в режиме реального времени проявляются в том, что исправленные положения сразу доступны в полевом приемнике. Недостатки же перевешивают его преимущества:

– метод требует наличия как средств связи для передачи поправок, так и средств обработки у всех участников;

– участник вынужден сообщать свое рабочее созвездие из 4 спутников.

Второй недостаток этого метода гораздо существеннее первого, так как ограничивает дальность действия. Потребитель обычно использует оптимальное для своего места созвездие спутников, следовательно, БС тоже должна применять его при измерениях. Поправки, вычисленные БС, относятся к созвездию спутников, оптимальному для нее, и поэтому применять их для потребителя, использующего другое созвездие или даже находящегося на

значительном расстоянии (у спутников сильно различаются высоты над горизонтом) нецелесообразно. При большем количестве пользователей непрактично требовать, чтобы все они использовали одно и то же созвездие из 4 спутников (из-за препятствий у антенн). В противном случае возможно до 70 комбинаций наблюдаемых созвездий из 4 спутников, когда над углом отсечки находятся 8 спутников. Таким образом, проектировщик должен потребовать, чтобы удовлетворялось одно из трёх условий:

– все участники использовали одно и то же созвездие;

– каждый участник сообщает набор спутников, которые он использует, чтобы опорная станция давала соответствующие поправки;

– опорная станция передает поправки для всех возможных комбинаций КА.

Преодоление этого недостатка путем отказа от требования использовать одно и то же созвездие на БС и МС уменьшает возможные требования к точности проведения дифференциальной коррекции.

Есть два основных практических вопроса, связанных с LDGPS. Насколько велика площадь, обслуживаемая опорной станцией? И как часто должны обеспечиваться поправки? Как отмечалось ранее, четких ответов на эти вопросы нет. В принципе, чем короче расстояние и более частые поправки, тем более высокая степень уверенности в получении оценок на метровом уровне точности. Нужно помнить, что ошибки от ионосферы и тропосферы обычно изменяются достаточно медленно в течение минут.

До сих пор мы имели дело с применением локального метода DGPS, в котором опорная станция зафиксирована в точке с положением, известным из геодезической привязки. В этом заключалось требование для вычисления поправок в измерения. Действительно, концепция DGPS полезна, даже если положение опорной станции точно неизвестно. Рассмотрим простой случай, когда опорная станция содержит неизвестную ошибку в оценке своего положения. Ясно, что дифференциальные поправки, вычисленные на опорной станции будут ошибочны, как и положение пользователя, вычисленное по этим поправкам. Последующая ошибка в оцененном положении пользователя будет примерно такой же, что и ошибка на опорной станции. Однако вектор относительного положения между антеннами двух приемников не будет подвержен в такой степени ошибкам. Другими словами, вычисленное пользователем положение является относительным положением от опорной станции. На этом основан *дифференциальный метод в относительных координатах* [Misra, Enge, 2001; Соловьев, 2003]. Метод определения координат кодовым приемником с субметровой точностью предложен в работе [Постнов, Вергунов, 2003]. Суть этого метода сводится к тому, что с приемником обходят все точки, включая опорную, стараясь произвести измерения по одному созвездию. При небольшой продолжительности наблюдений всем измерениям соответствуют одни и те же дифференциальные поправки, величину которых можно найти по опорной точке. Чтобы повысить точность отсчитывания координат, используют режим записи путевых точек, в котором данные записываются в файл с сантиметровой точностью (с экрана приемника можно снимать отсчеты с точностью до метра). Измерения оказываются более

точными, если производятся сразу после загрузки в навигационное сообщение новых эфемерид, что производится в начале каждого четного часа по времени GPST. В сущности это псевдо-дифференциальный режим с одним приемником с коррекцией по координатам.

8.3.4. Определение координат в дифференциальном методе по фазовым измерениям

Вариант локального дифференциального метода с использованием фазовых измерений обычно применяется в режиме кинематики и называется кинематикой реального времени, или RTK. Приведем краткое изложение теории этого метода по книге А. Лейка [Leick, 1995].

Первый шаг при вычислении поправки для фазы несущей заключается в определении из наблюдений первой эпохи на базовой станции целого числа K^i_{BS} как

$$K^i_{BS} = \left[\frac{P^i_{BS}(1) - \Phi^i_{BS}(1)}{\lambda} \right]. \qquad (8.54)$$

В уравнении (8.54) для измеренной псевдодальности P^i_{BS} и фазы Φ^i_{BS} несущей, выраженной в единицах расстояния, используются обычные символы. Квадратные скобки здесь означают оператор округления до ближайшего целого числа. Поскольку неоднозначность $N^i_{BS}(1)$ невозможно определить в процессе измерения фазы, ее величина устанавливается произвольно регистром счетчика. Это и есть показание $\Phi^i_{BS}(1)$. Определим дальность по фазе несущей $\Omega^i_{BS}(1)$ как

$$\Omega^i_{BS}(1) = \Phi^i_{BS}(1) + \lambda K^i_{BS}. \qquad (8.55)$$

Численное значение $\Omega^i_{BS}(1)$ близко к кодовой псевдодальность $P^i_{BS}(1)$ из-за способа, которым определено целое число K^i_{BS} по формуле (8.54).

Для каждого спутника, наблюдавшегося на базовой станции *BS*, можно вычислить дальность $\Omega^i_{BS}(1)$ по фазе несущей и топоцентрическое расстояние $\rho^i_A(1)$. Последнее выводится по принятым (эталонным) координатам опорного приемника и эфемеридному положению спутника по формулам (8.3), (8.4). Невязка для дальности по фазе несущей равна

$$L^i_{BS}(1) = \rho^i_{BS}(1) - \Omega^i_{BS}(1) =$$
$$= \Delta N^i_{BS} + cdt_{BS} - cdt^i - I^i_{BS,\Phi} - T^i_{BS} - d_{BS,\Phi} - d^i_{BS,\Phi} - d^i_{BS}. \qquad (8.56)$$

Член ΔN^i_{BS} присутствует потому, что в (8.54) используется округление. Насколько мало ΔN^i_{BS}, настолько будет мала невязка $L^i_{BS}(1)$. Средняя невязка для всех наблюденных спутников на опорном пункте для эпохи 1 равна

$$\mu_{BS}(1) = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} L^i_{BS}(1), \qquad (8.57)$$

где через *s* обозначено число спутников. Поправка к фазе несущей в эпоху 1 равна

$$\Delta\Phi^i_{BS}(1) = \rho^i_{BS}(1) - \Omega^i_{BS}(1) - \mu_{BS}(1). \qquad (8.58)$$

Изменение невязки от одной эпохи к следующей получается как

$$L^i_{BS}(t,t-1) \equiv L^i_{BS}(t) - L^i_{BS}(t-1) =$$
$$= [\rho^i_{BS}(t) - \rho^i_{BS}(t-1)] - [\Omega^i_{BS}(t) - \Omega^i_{BS}(t-1)]. \qquad (8.59)$$

Средняя невязка в эпоху *t* вычисляется по формуле

$$\mu_{BS}(t) = \mu_{BS}(t-1) + \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} L^i_{BS}(t,t-1), \qquad (8.60)$$

а поправка к фазе для спутника *i* в эпоху *t* равна

$$\Delta\Phi^i_{BS}(t) = \rho^i_{BS}(t) - \Omega^i_{BS}(t) - \mu_{BS}(t) = \rho^i_{BS}(t) - [\Phi^i_{BS}(t) + \lambda K^i_{BS}] - \mu_{BS}(t). \quad (8.61)$$

Вторая часть этого уравнения следует после подстановки (8.56) в формулу для фазовой дальности. Фазовая поправка (8.61) эпохи *t* передается на мобильную станцию *MS*, где измеренная фаза несущей исправляется:

$$\tilde{\Phi}^i_{MS}(t) = \Phi^i_{MS}(t) + \Delta\Phi^i_{BS}(t). \qquad (8.62)$$

Чтобы получить соответствующее выражение для координат приемника *MS*, запишем вначале уравнение одинарной разности между приемниками *BS* и *MS* в виде

$$\Phi^i_{BS}(t) - \Phi^i_{MS}(t) = [\rho^i_{BS}(t) - \rho^i_{MS}(t)] + \lambda N^i_{BS,MS}(1) - c(dt_{BS} - dt_{MS}) +$$
$$+ I^i_{BS,MS,\Phi}(t) + T^i_{BS,MS}(t) + d_{BS,MS,\Phi}(t) + d^i_{BS,MS,\Phi}(t). \qquad (8.63)$$

Из уравнения (8.61) можно найти $\Phi^i_{BS}(t)$ и подставить в (8.63). После преобразования получается:

$$-\Phi^i_{MS}(t) - \Delta\Phi^i_{BS}(t) = -\rho^i_{MS}(t) + \lambda[N^i_{BS,MS}(1) + K^i_{BS}] - [c(dt_{BS} - dt_{MS}) -$$
$$-\mu_{BS}(t)] + I^i_{BS,MS,\Phi}(t) + T^i_{BS,MS}(t) + d_{BS,MS,\Phi}(t) + d^i_{BS,MS,\Phi}(t). \qquad (8.64)$$

Левая часть этого уравнения равна исправленной фазе несущей с обратным знаком $\tilde{\Phi}^i_{BS}(t)$. Вычитание уравнений (8.64) между двумя спутниками дает выражение, соответствующее наблюдению двойной разности как

$$\nabla\tilde{\Phi}^{ik}_{MS}(t) \equiv \tilde{\Phi}^k_{MS} - \tilde{\Phi}^i_{MS} =$$
$$= \rho^k_{MS}(t) - \rho^i_{MS}(t) + \lambda[N^{ik}_{BS,MS}(1) + K^i_{BS} - K^k_{BS}] +$$
$$+ I^{ik}_{BS,MS,\Phi}(t) + T^{ik}_{BS,MS}(t) + d^{ik}_{BS,MS,\Phi}(t). \qquad (8.65)$$

Теперь положение мобильной станции *MS* можно вычислить на самой станции, используя исправленные наблюдения $\tilde{\Phi}^i_{MS}(t)$, по крайней мере, до четырех спутников, образовав три уравнения вида (8.61). Это и есть решение по DGPS для фазы несущей. Оно отличается от обычного решения по двойным разностям тем, что вместо неоднозначностей двойных разностей $N^{ik}_{BS,MS}(t)$ оценивается модифицированная неоднозначность

$$\tilde{N}^{ik}_{BS,MS}(t) = N^{ik}_{BS,MS}(t) + K^i_{BS} - K^k_{BS}. \qquad (8.66)$$

Положение точки *MS*, вычисленное по (8.66), будет получено относительно базовой станции *BS*, поскольку координаты именно этой станции использовались для вычисления поправки к фазе несущей $\Delta\Phi^i_{BS}(t)$. Однако положение движущегося приемника можно определить и без явного знания положения опорной станции *BS*; достаточно знать поправки к фазе несущей. Пользователь на мобильной станции должен использовать те же самые эфемериды и ту же самую методику

вычислений, что и на базовой станции, обеспечивая согласованность в вычислениях топоцентрических расстояний $\rho^i_{MS}(t)$ и $\rho^i_{BS}(t)$.

Одна из целей обработки – получение малых значений для невязок $L^i_{BS}(1)$ и, следовательно, для средней невязки $\mu_{BS}(t)$ и для поправок к фазам несущей $\Delta\Phi^i_{BS}(t)$, что достигается через особый выбор K^i_{BS} в уравнении (8.54). Это свойство будет обеспечивать минимум телеметрической нагрузки. Телеметрическая нагрузка будет еще более снижена, если увеличить время между передачами поправок к фазе несущей. Например, если изменение в невязке от одной эпохи к следующей меньше, чем точность измерений у мобильного приемника, или если изменения в невязке слишком малы для того, чтобы ощутимо влиять на минимально необходимую точность положения движущегося приемника, то можно усреднять поправки к фазе несущей и передавать их средние значения. Можно также передавать скорость изменения поправки $\partial\Delta\Phi/\partial t$. Если через t_0 обозначить опорную эпоху, то пользователь может интерполировать поправки по времени как

$$\Delta\Phi^i_{BS}(t) = \Delta\Phi^i_{BS}(t_0) + \frac{\partial\Delta\Phi^i_{BS}}{\partial t}(t - t_0). \qquad (8.67)$$

Один из способов уменьшения размера и скорости изменения невязки – это использование наилучших доступных координат для фиксированного приемника и наилучших спутниковых эфемерид. Ошибки часов воздействуют на невязки непосредственно, как видно из уравнения (8.59). Ход часов и изменения в поправке часов приемника dt_{BS} можно эффективно контролировать, подключив к приемнику опорной станции рубидиевый генератор. Изменение в поправке часов спутника dt^i из-за режима селективного доступа являлось определяющим фактором, который ограничивал допустимое время для усреднения. После отмены режима SA это ограничение исчезло.

Описанный дифференциальный метод применим к фазе несущей в частотных диапазонах и L1, и L2. См. также [Jin, 1997].

8.3.5. Широкозонные дифференциальные методы

Поправки к фазам $\Delta\Phi^i_{BS}(t)$ и к дальностям $\Delta P^i_{BS}(t)$ представляют суммарный эффект от разных источников ошибок, действие которых усиливается с увеличением расстояния от опорной станции. Удаление от опорной станции в режиме RTK обычно не превышает 10 км, а в локальном дифференциальном методе LDGPS по кодовым измерениям может доходить до 500 км. Потребовалось бы большое число локальных систем LDGPS или опорных станций для RTK, чтобы охватить области в масштабе континента. Альтернативой является широкозонный дифференциальный метод GPS (Wide Area DGPS или WADGPS). Основная идея WADGPS – расширить размеры области, на которой поправки сохраняют приемлемую точность, и уменьшить число опорных станций. В отличие от метода LDGPS, где считается, что ошибки измерений на БС и МС одинаковые, в методе WADGPS предполагается, что эти ошибки медленно изменяются в пространстве и во времени. Это дает возможность строить пространственно-временную модель поправок по

наблюдениям на опорных станциях и с ее помощью исправлять наблюдения МС [Wübbena, 1996].

В зависимости от предполагаемого применения, разработано много способов моделирования в системах WADGPS. Большинство исследований, выполненных с целью расширения дифференциального метода GPS, связывают с точной навигацией по кодовым измерениям и с кинематикой в реальном времени по фазовым измерениям. Метод WADGPS по фазовым измерениям принято называть методом множественных опорных станций (Multiple reference station) или сетевой кинематикой в реальном времени (Network RTK).

8.3.6. Метод WADGPS

Набор опорных станций размещается в нужном регионе, их измерения обрабатываются централизованно таким образом, что ошибки декомпозируются (разделяются) на их составляющие: от часов спутников, от эфемерид и от ионосферы. Поправки передаются для каждого источника ошибок раздельно по линиям связи, чтобы каждый пользователь мог вводить их соответствующим образом в зависимости от своего географического положения. Поэтому в методе WADGPS передают *векторы дифференциальных поправок*, в противоположность скалярным поправкам в методе LDGPS, где поправки не разделяются. Метод WADGPS требует расширения обычного формата (стандарта) RTCM-104.

Как известно, влияние ошибок координат опорных станций и эфемерид повышается с увеличением расстояния между приемниками. Поэтому положения всех опорных станций должны быть хорошо известны. Эфемериды, вычисляемые в реальном времени на главной станции, должны быть точнее, чем бортовые эфемериды. Точные эфемериды в методе WADGPS становятся частью сообщения. Из-за пространственного и временного ослабления корреляции ионосферных поправок было бы важно, чтобы они моделировались, оценивались и передавались пользователю. Чтобы иметь возможность следить за ионосферой, контрольные станции должны быть оборудованы двухчастотными приемниками. Использование внешней базы времени на основе рубидиевых стандартов частоты уменьшило бы ошибки часов приемника и дало возможность лучше оценивать поправки часов спутников.

Коммерческие широкозонные службы DGPS (Omnistar, Racall) уже действуют и широко используются в оффшорных зонах, сейсмических съемках и сельском хозяйстве. Одной из современных систем DGPS является американская система WAAS.

Система WAAS. Система усиления на обширных площадях WAAS (Wide Area Augmentation System) разработана Министерством гражданской авиации США совместно с другими агентствами. Система была создана для усиления GPS дополнительными сигналами с целью повышения надежности, целостности, точности и доступности GPS для навигации воздушных судов на территории США. Система WAAS состоит из наземного и космического сегментов (рис. 8.5). В наземный сегмент входят 25 широкозонных опорных станций (WAAS Reference Station, WRS), распределенных по континентальной части США,

нескольких широкозонных главных станций (WAAS Master Station, WMS) и станции передачи данных. В космический сегмент входит несколько геостационарных спутников (ГСС) типа Инмарсат, передающих GPS-подобный сигнал.

Рис. 8.5. Структура системы WAAS (по книге [Grewal et al., 2001])

Каждая опорная станция WRS имеет по три двухчастотных фазовых приемника. С их помощью измеряются псевдодальности и приращения расстояний от спутников GPS и ГСС, выбранных для слежения. На станциях WRS производится сглаживание измерений и исправление их за атмосферные эффекты, то есть ионосферную и тропосферную задержки. Эти сглаженные и исправленные измерения передаются на главные станции WMS по наземным линиям связи.

Двухчастотные измерения от опорных станций обрабатываются на главных станциях WMS, где оцениваются дифференциальные поправки и границы их ошибок. Дифференциальные поправки раскладываются на три компонента: быстро изменяющийся компонент от ошибок часов спутников и два медленно изменяющихся компонента от ошибок эфемерид и задержек в ионосфере. Поправки генерируются для узлов координатной сетки из параллелей и меридианов. Эти поправки и границы посылаются на станцию засылки, которая передает их на геостационарные спутники.

Дифференциальные поправки, закодированные в навигационном сообщении, передаются со скоростью 250 бит/с на частоте L1 через геостационарные спутники на их область охвата. Эти сигналы принимаются вместе с сигналами GPS и используются для определения положений. У GPS приемника должна быть модифицированная программа, которая обрабатывает дополнительный дальномерный сигнал и демодулирует навигационное сообщение с дифференциальными поправками. Сигнал от ГСС очень похож на сигнал GPS. Он обеспечивает дополнительное измерение расстояния, а также дифференциальную поправку и границы доверия. Система WAAS находит применение не только в авиации, но также в сельском хозяйстве и многих других областях, и все больше не авиационных пользователей находят пользу от этого свободного сигнала. Его преимущества состоят в том, что дифференциальные

поправки принимаются той же самой антенной, что и сигнал от GPS. Не нужно устанавливать дополнительные антенны, не нужны никакие дополнительные опорные станции, и не нужно поддерживать дополнительные каналы связи. Однако пользователи WAAS в своей работе сталкиваются с некоторыми неудобствами. Главное среди них – ограниченная область охвата геостационарными спутниками, которые находятся на небе в одном и том же месте вблизи небесного экватора. К примеру, в Москве, Новосибирске (широта 55°) они будут находиться не выше 35° над горизонтом. Если единственный геостационарный спутник закрывается препятствием, то у пользователя не будет дифференциальных поправок. Для США эти спутники всегда будут в южной части ниже 50° над горизонтом, кроме самых южных частей страны. Однако дополнительные геостационарные спутники с более подходящими положениями должны обеспечивать существенное улучшение почти для всех пользователей.

Сигналы WAAS доступны с 2000 г., и предлагаемая точность позиционирования составляет 1 – 2 м в плане и по высоте. Система готова для гражданского использования с 2003 г.

Системы усиления GPS, подобные WAAS, развертываются в европейских странах и Японии. Эти системы созданы для Европы – EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System), для Японии – MSAS (Multifunction Transportation Satellite (MTSAT)-based Satellite Augmentation System), для Китая и азиатского региона (Satellite navigation augmentation system, SNAS). Общее название для таких систем – SBAS (Satellite-Based Augmentation System – Спутниковые системы усиления). Заключены международные соглашения, по которым WAAS, EGNOS и MSAS вместе будут создавать глобальное обеспечение дифференциальными поправками [Соловьев, 2003; Grewal et al., 2001; Walter, 2002; Misra, Enge, 2001; Beutler et al., 1999; Fruehauf, 2004].

8.3.7. Глобальные дифференциальные системы

В ряде случаев пользователям необходимо иметь возможность позиционирования в любом месте земного шара (иметь «глобальный охват») с наивысшей возможной точностью, при этом получать координаты непосредственно на пункте, то есть в режиме реального времени. Одночастотные системы WADGPS не отвечают этим требованиям. В отличие от них, двухчастотные системы могут обеспечить эти требования, и даже при значительно меньшем количестве пунктов. В настоящее время известны две похожие системы, обеспечивающие дифференциальное позиционирование в глобальном масштабе. Это глобальная дифференциальная система GDGPS Национального управления по аэронавтике (NASA, НАСА) и система StarFire компании NavCom. Обе они разрабатывались в Лаборатории реактивного движения (JPL) Калифорнийского института технологий и имеют много общего. Они способны обеспечивать дециметровый уровень точности в глобальном масштабе с помощью двухчастотной аппаратуры.

Система GDGPS. Двухчастотные приемники, обычно используемые в низкоорбитальных проектах, научных применениях и высокоточной коммерческой деятельности, имеют преимущество в виде возможности

исключения ионосферной задержки как источника ошибок. Поэтому в системе GDGPS главное внимание направлено на получение в реальном времени точных оценок орбит спутников GPS и параметров их часов. Такие оценки могут быть получены из сравнительно редкой сети опорных пунктов, распределенных по земному шару. Другое новшество GDGPS – передача поправок через Интернет.

Опорная сеть в системе GDGPS принадлежит НАСА, а поддерживается и управляется Лабораторией реактивного движения. Эта глобальная GPS сеть (Global GPS Network, GGN) состоит примерно из 60 станций (рис. 8.6), работающих в пакетном режиме через Интернет. На станциях проводятся наблюдения двухчастотными геодезическими приемниками (AOA-ACT Benchmark, Turbo-Rogue, Ashtech Z-12). Посылаемые данные включают двухчастотные измерения фазы с разрешением 0.02 мм и двухчастотные измерения псевдодальностей с разрешением 1 мм, решение приемника на этот момент и информацию о бортовых эфемеридах. Чтобы передавать эти данные в режиме реального времени, потребовалась специальная программа, названная Real-Time Net Transfer, RTNT (передача по сети в реальном времени). С частотой один герц фазовые и кодовые данные посылаются на обработку через открытый Интернет с использованием User Datagram Protocol или TCP. Более 98% данных имеют задержку до 2 с.

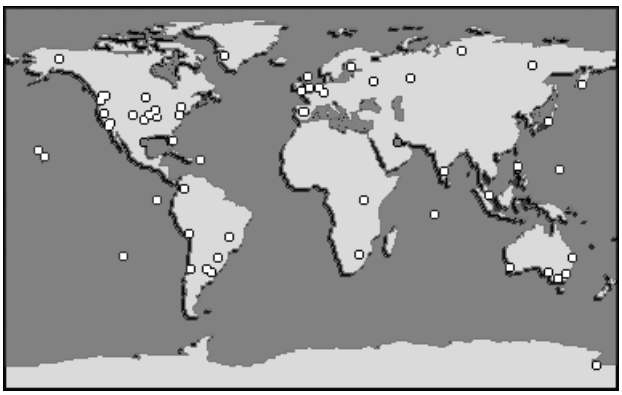


Рис. 8.6. Глобальная GPS сеть НАСА GGN (Global GPS Network) (http://www.gipsy.jpl.nasa.gov/igdg)

В центре обработки эти данные собираются другой программой RTNT, которая управляет состоянием всей системы. Данные сортируются по времени, убирается дублирующая информация, после чего они поступают на обработку в программу RTG (Real-Time GIPSY). Программа RTG обеспечивает в реальном времени оценки динамических орбит спутников GPS и через 1 с поправки часов спутников GPS [Bertiger et al., 1998]. Оценки орбит нужны менее часто, чем у часов, из-за их более медленного физического поведения (изменения со временем). Программа RTG содержит много точных моделей, перешедших из пакета GIPSY OASIS II (GOA II). Пост-обработка глобальных данных GPS с GOA II обычно дает точность в орбитах спутников GPS лучше, чем 10 см. Глобальные дифференциальные поправки упаковываются в сообщение, передаваемое со скоростью 560 бит/с и доступное в Интернете на TCP сервере JPL. Орбиты GDGPS типично обеспечивают среднюю квадратическую ошибку положения спутника не более 20 см, точность поправки часов примерно такая

же (меньше 1 нс). Орбиты GDGPS и поправки часов представляют собой поправки с частотой 1 Гц к положению космического аппарата (координаты X, Y, Z в общеземной системе) и состоянию часов в транслируемом сообщении с эфемеридами. Они действительны по всему земному шару, как и сами бортовые эфемериды. Задержка в поступлении этих данных на сервер JPL равна 4 – 6 с.

Пользовательские программы используют наблюдения фазы как основной тип данных в фильтре позиционирования в приемнике, состояние которого включает, наряду с положением пользователя и его часами, необходимые фазовые смещения и опционально медленно изменяющуюся зенитную тропосферную задержку [Muellerschoen et al., 2000; Misra, Enge, 2001; Blewitt et al., 2002].

Глобальная дифференциальная система StarFire. Система StarFire была разработана компаниями NavCom Technology, Inc. (NavCom) и Ag Management Solutions (AMS), которые входят в холдинг компании John Deere & Co. Управление системой StarFire осуществляется компанией NavCom.

Система StarFire обеспечивает навигацию с субдециметровой точностью почти в любом месте земного шара. Такая точность стала возможна благодаря нескольким важным разработкам. Предшествующая система WADGPS, развернутая на нескольких континентах компанией NavCom for Deere, уже внесла ряд необходимых решений. Они включают:

– разработку высококачественных двухчастотных GPS приемников для использования их в качестве и опорных, и мобильных приемников;

– двухчастотное продолжительное сглаживание кодов по фазе несущей для удаления двух самых крупных источников ошибок в системе WADGPS, то есть ионосферной рефракции и многопутности;

– разработку модуля связи L-диапазона и связанной с ним многополосной антенны с целью одновременного приема сигналов GPS на частотах L1 и L2 вместе с сигналами Inmarsat в L-диапазоне (1525 – 1565 МГц).

Основным источником ошибок в предыдущей версии StarFire, которая ограничивалась решением в масштабе континента, были ошибки в бортовых орбитах спутников GPS. Чтобы преобразовать отдельные региональные WADGPS системы в единую глобальную систему, потребовалась генерация точных орбит GPS в реальном времени. Для этого компания NavCom получила лицензию на методику вычисления в реальном времени орбит и поправок часов от Лаборатории реактивного движения JPL. Эта лаборатория разработала для Национального управления по аэронавтике программное обеспечение Real Rime GIPSY (RTG) для вычислений в реальном времени орбит и поправок часов, необходимых для глобальной системы DGPS. Компания NavCom теперь передает поток поправок через три спутника Инмарсат, создающих почти глобальный охват. В дополнение к программе вычислительного центра JPL для генерирования поправок NavCom по контракту с JPL получает данные от опорных пунктов глобальной сети GGN, принадлежащей JPL/NASA, чтобы усилить опорную сеть NavCom. В результате получилась дифференциальная система, которая может обеспечивать высокоточные результаты по всему миру.

Система StarFire достаточно точная, чтобы решать проблему локальной кинематики в реальном времени Real Time Kinematic (RTK) GPS во многих применениях, она не требует локальных базовых станций, а результаты позиционирования по ней являются абсолютными, не относительными. В то время как точность в пределах 24 часов в сутки не превышает дециметра, изменения за более короткие интервалы могут быть значительно меньше из-за очень малого высокочастотного шума в позиционном решении. Это позволяет использовать систему StarFire в полуавтоматических или вспомогательных процессах управления, которые формально требуют намного более дорогих RTK решений.

Ключевые характеристики системы StarFire, которые обеспечивают очень высокую точность и надежность:

– данные GPS измерений с глобальной сети двухчастотных опорных приемников;

– очень точные вычисления орбит, использующие методику Лаборатории реактивного движения, названную RTG (Real Time GIPSY);

– моделирование всех значительных источников ошибок;

– высокое качество двухчастотных мобильных приемников;

– высокая избыточность данных, структуры обработки и линий связи.

В совокупности эти характеристики обеспечивают уникальное, надежное, в реальном времени глобальное позиционирование с точностью лучше дециметра.

Структура системы StarFire аналогична структурам других широкозонных систем (см. рис. 8.5), таким, как WAAS, EGNOS и MSAS. Главное же отличие заключается в том, что здесь пользователями применяются двухчастотные фазовые приемники. Это позволяет непосредственно удалять влияние ионосферной рефракции и отказаться от использования моделей, которые эффективны лишь частично, а это существенно улучшает точность позиционирования. На рис. 8.7 показана схема обмена данными в системе StarFire.

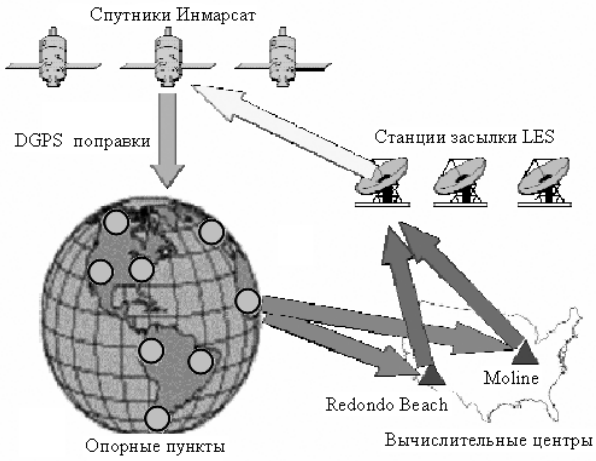


Рис. 8.7. Схема обмена данными в системе StarFire [Hatch et al., 2002]

Система StarFire состоит из семи главных компонент.

– *Опорная сеть* – опорные приемники непрерывно обеспечивают сырыми данными вычислительный центр. Они включают измерения двухчастотных кодовых псевдодальностей и фаз несущей с дискретностью в одну секунду, эфемериды и другую информацию. Оборудование на каждой опорной станции включает компоненты связи различного типа (модемы, маршрутизаторы, компьютеры и т. д.), источники бесперебойного питания и другое оборудование поддержки. На каждом пункте имеется удаленный доступ и контроль. Это очень важно для поддержания системы StarFire в полной рабочей конфигурации. Точное положение каждой антенны определено из геодезической привязки с использованием глобальной сети опорных пунктов JPL, некоторые из которых являются фидуциальными пунктами для поддержания системы отсчета ITRF.

– *Центры обработки данных* (вычислительные центры) – средства, на которых GPS наблюдения перерабатываются в поправки DGPS. Имеется два центра: один в штате Калифорния, другой в штате Иллинойс. Они работают независимо друг от друга, непрерывно принимая все данные измерений и вычисляя поправки, которые отсылают их на станции засылки на спутники. На этих центрах также производится контроль работы и управление всей системой StarFire.

– *Линии связи* – обеспечивают надежную передачу наблюдений от опорных станций на Центры сбора данных и вычисленных поправок от этих Центров к пунктам связи со спутниками Инмарсат. Они включают Интернет, радиорелейные линии, интегрированные цифровые сети связи ISDN, выделенные цифровые каналы и др.

– *Территориальные наземные станции* (Land Earth Stations, LES) – средства засылки принятых поправок от Центров обработки данных на геостационарные спутники. Станции LES создают высоко надежную, избыточную и защищенную среду для засылки данных на спутники связи Инмарсат. Они находятся в Гунхилли (Великобритания), Лорентиды (Канада) и Окленд (Новая Зеландия). Каждая станция засылает данные на спутник Инмарсат, чей глобальный луч покрывает 1/3 земной поверхности. Станция LES в Гунхилли загружает поправки для Европы и Африки, станция в Лорентидах – для Северной и Южной Америки, и станция в Окленде загружает данные для региона Азии и Тихого океана. Каждая станция LES принимает данные от обоих Центров, и принимает решение о том, какая линия должна обеспечивать засылку данных, и какой использовать поток данных. Эти решения основываются на количестве и качестве данных в массивах поправок и автоматически изменяются, когда необходимо.

– *Геостационарные спутники* – используются для распределения дифференциальных поправок пользователям через передачи на частотах L-диапазона. Используется три спутника Инмарсат, их трансляции охватывают почти всю Землю (не охватываются районы от Северного полюса до параллели 76° и от Южного полюса до параллели -76°).

– *Мониторы* – пользовательские приемники, распределенные по земному шару, которые используют передаваемые поправки и обеспечивают навигационную информацию Центрам сбора данных в реальном времени. Мониторы непрерывно используются для контроля работы системы и для обеспечения немедленной автоматической обратной связи при возникновении каких-либо проблем. Они работают так же, как полевые приемники.

– *Пользовательское оборудование* – вводит в местные наблюдения принятые поправки, выполняя очень точную навигацию. Приемники выполняют двухчастотные измерения, из которых удаляются ионосферные эффекты, и объединяет их с принятыми дифференциальными поправками в фильтре Калмана.

Рис. 8.8. Приемник системы StarFire [Hatch et al., 2002]

Разработано несколько типов пользовательского оборудования StarFire. Первый, наиболее общий тип, – это приемник StarFire (рис. 8.8). Используется несколько вариантов, зависящих от применения. Ключевыми компонентами этого приемника, запроектированного и изготовленного компанией NavCom, являются:

– многофункциональный блок антенн, способный принимать сигналы на частотах GPS L1 и L2, а также частоты L-диапазона от спутников связи Инмарсат;

– приемник L-диапазона, который захватывает, отслеживает, понижает частоту и демодулирует поток данных StarFire от геостационарных спутников;

– двухчастотный модуль GPS приемника NCT 2000D с концепцией all-in-view. Приемник NCT 2000D производит GPS наблюдения наивысшего качества, пригодные для использования в приложениях, требующих миллиметровый уровень точности.

Оборудование пользователя системой StarFire принимает поправки, передаваемые спутниками связи, вводит их в собственные, исправленные за ионосферную рефракцию псевдодальности, и выполняет навигационное решение. Полученные DGPS положение, скорость и время представляют выход из пользовательского оборудования в другие подсистемы, поддерживающие требования систем контроля и картирования.

В процессе обработки измерений в приемнике NCT 2000D для формирования сглаженных, исправленных за рефракцию кодовых псевдодальностей используются двухчастотные измерения кода и фазы. При обработке данных в RTG фильтр Калмана в NCT 2000D оказывает большое влияние на измерения фазы несущей, а оценка плавающих неоднозначностей делается по всем неоднозначностям циклов. Все данные измерений по всем спутникам используются, чтобы сделать оценку неоднозначностей как можно точнее. В дополнение, делается оценка тропосферной рефракции с

ограничением по всем спутникам. В этом ограниченном решении удаляются некоторые из немоделируемых эффектов тропосферной рефракции.

Любая широкозонная система вынуждена иметь дело с рядом источников ошибок. Именно то, как будут с ними обращаться, и определяет точность системы. Основные источники ошибок включают:

- орбиты спутников;
- часы спутников;
- ионосферу;
- тропосферу;
- многопутность на опорном пункте;
- локальные ошибки пользовательского приемника.

Некоторые детали обработки Центрами запатентованы, используются алгоритмы и модели, разработанные JPL за много лет и приспособленные к работе в реальном времени различными способами. Самые главные поправки – в элементы орбиты и параметры часов спутников. Точное предсказание орбит спутников – основа для обеспечения точных поправок, и один из Центров ведет обработку с фильтром Калмана, чтобы обрабатывать глобальные измерения от опорных приемников. Это вычисление повторяется каждую минуту для всех спутников GPS. Его точность проверена путем сравнения с точными орбитами МГС. Поправки часов спутников даются значительно чаще, каждые несколько минут для каждого спутника. В системе StarFire есть ряд пунктов с атомными часами, и они используются как основные и запасные часы. Ионосферных поправок обычно не касаются, поскольку их ошибки исключаются при образовании двухчастотных комбинаций и на опорных пунктах, и у пользователей (использование дешевых двухчастотных пользовательских приемников является отличительной характеристикой системы StarFire). Тропосферные ошибки компенсируются при использовании соответствующих моделей. Для достижения высокого уровня точности StarFire использование метеорологических данных не требуется. В дополнение к использованию геодезических антенн типа «заглушающее кольцо» на опорных пунктах используются очень совершенные алгоритмы фильтрации при объединении кодовых и фазовых данных, которые позволяют делать продолжительное сглаживание для уменьшения влияния многопутности и шума измерений.

В программе обработки RTG (Real Time GIPSY) для получения поправок, которые действительны на больших регионах, используются усредненные взвешенные, исправленные за рефракцию ошибки в расстояниях до спутников. Как бы ни была точна эта методика, у нее имеются присущие ей ограничения. Точность, достигаемая путем усреднения, падает с увеличением расстояния от места наблюдения. В частности, основной источник ошибок, который ограничивает региональное решение до размеров континента, – это ошибки в спутниковых орбитах. Обработка по RTG основана на методе пространственного состояния, в котором основными оцениваемыми состояниями являются ошибки в орбитах и в часах. Они непрерывно вычисляются для всех спутников GPS по глобальным наблюдениям. Их

состояния действительны в глобальном масштабе и не зависят от положения наблюдателя. С программой RTG все идентифицируемые источники ошибок измеряются либо моделируются и компенсируются индивидуально.

Указанные Центры сбора данных принимают данные от расширенного набора двухчастотных приемников станций JPL вместе с данными от двухчастотных станций NavCom. По этим данным вычисляются поправки в орбиты и в поправки часов. Каждую минуту вычисляется новый набор орбитальных поправок для каждого спутника GPS и каждые несколько секунд – новый набор поправок часов для каждого спутника GPS.

Средняя квадратическая ошибка позиционирования в реальном времени в навигационном решении по кодовым псевдодальностям, сглаженным по фазе несущей, составляет около 0.3 м. Ошибка позиционирования по фазе не превосходит 0.1 м по каждой из трех координат. Заметим, что геодезическое позиционирование в системе StarFire основывается на системе отсчета ITRF, которая полностью согласуется с WGS-84 [Hatch et al., 2002; Hudson, Sharp, 2001].

Во многом похожая технология реализована компанией OmniSTAR, подразделением корпорации Fugro. В структуру OmniSTAR входит около 100 опорных станций, 3 центра загрузки данных на спутники и 2 контрольных центра. Данные, собранные опорными станциями, передаются в центр управления, где происходит их проверка на целостность и достоверность. Результаты обработки, построенной на использовании программы RTG, загружаются на геостационарные спутники, которые ретранслируют ее на покрываемые области. Это обеспечивает быстрый доступ пользовательских приемников к данным опорных станций и дает возможность использовать всю информацию одновременно, получая один набор дифференциальных поправок, оптимизированный для данного района работ, и формировать виртуальную базовую станцию (см. подраздел 8.3.9) [Visser, de Kuijper, 2006].

8.3.8. Множественные опорные станции

Использование нескольких станций в широкозонном дифференциальном методе WADGPS для улучшения положений, определяемых по кодовым данным (или кодовым данным со сглаживанием по фазе несущей), было с большим успехом использовано и в пост-обработке, и в режиме реального времени. Естественное расширение этой концепции – использование более точных измерений фазы несущей в подобном сетевом методе. Однако переход от кодовых измерений к фазовым является не тривиальной задачей, преимущественно из-за более строгих требований к точности. Например, в большинстве кодовых измерений DGPS ограничивающим источником ошибок является шум измерений и многопутность самого кода (ионосферные эффекты начинают играть роль только на очень больших расстояниях). Таким образом, такие ошибки как от атмосферы, так и от орбиты, влияние которых маскировалось более низкой точностью измерений в кодовом методе DGPS, в наблюдениях по фазе несущей выходят на передний план. Кроме того, для высокоточных определений по фазе требуется точное и надежное разрешение

целых неоднозначностей. Наконец, для расширения этой концепции в отношении требований пользователей, работающих в реальном времени, необходимо решить проблемы, связанные с оптимальными схемами представления (параметризации) поправок и их распространением и передачей потенциальным пользователям в пределах (или вблизи) площади, охваченной сетью.

Применение сети опорных станций для выполнения DGPS по фазе несущей дает несколько преимуществ над обычным методом одиночных базовых линий. Одно из самых важных преимуществ – это расширение надежности и доступности обслуживания. В сетевом методе, если одна или две станции неисправны одновременно, их вклад можно исключить из решения, а остальные опорные станции могут взять его на себя, чтобы обеспечить пользователя поправками, таким образом сохраняя работу службы. Хотя в таких случаях точность положений может несколько пострадать, это не будет настолько плохо, как в методе с одной базовой станцией, что приводит к точечному позиционированию. В дополнение к этому, использование сетевого метода позволяет делать контроль качества поправок, образуемых по каждой опорной станции. Тогда, если отдельная станция генерирует ошибочные поправки, сеть позволяет выявить и исключить эту ошибку из окончательного решения.

Другое весьма важное преимущество сетевого метода состоит в том, что он позволяет моделировать зависящие от расстояния или пространственно коррелированные ошибки, такие, как ионосферные и тропосферные влияния и ошибки орбит. При объединении наблюдений от нескольких постоянных опорных станций влияние упомянутых источников ошибок можно уменьшить посредством применения различных методов параметризации. Таким образом, поправки, компенсирующие эти ошибки, можно генерировать и распределять пользователям, улучшая общую точность положений. Прямой результат от моделирования пространственно коррелированных ошибок – это возможность улучшения в разрешении неоднозначностей фазы несущей (включая очень длинные линии), что необходимо для получения координат потребителя на сантиметровом уровне точности. В действительности разрешение неоднозначностей на длинных базовых линиях приводит к другому важному преимуществу сетевого метода: к большему допустимому расстоянию между опорными станциями. Это непосредственно увеличивает охват площади, на которой можно работать методом DGPS. Например, в большинстве случаев расстояния между станциями увеличиваются от 10 – 15 километров при использовании метода одиночных базовых линий до многих десятков километров при использовании сети опорных станций. Это позволяет значительно уменьшить количество опорных станций (рис. 8.9).

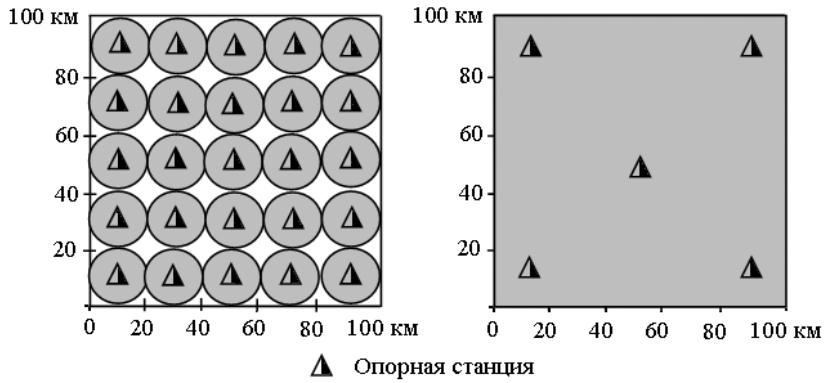


Рис. 8.9. Число опорных станций по концепции одиночных опорных станций (слева) и множественных опорных станций (справа)

Наконец, сетевой метод позволяет образовывать наблюдения для *фиктивной* или *виртуальной опорной станции* (ВОС), которая может располагаться ближе к станции пользователя, чем любая из постоянных реальных опорных станций, что приводит к улучшению позиционирования. Такие преимущества метода виртуальных опорных станций обеспечивают большую гибкость, позволяя пользователю применять его текущие приемники и программы обработки, без приобретения какой-либо «специальной» программы обработки фазовых наблюдений, чтобы заботиться об одновременно принимаемых поправках от серии опорных станций.

Как и в любом методе, здесь также есть некоторые недостатки, связанные с использованием сети опорных станций. В частности, в зависимости от используемого метода, возможно увеличение в объеме передаваемых данных и сложности в применении пользователем по сравнению с обычным методом DGPS по одиночным базовым линиям. Объединение всех наблюдений сети на центральной станции обработки и последующая передача либо поправок для пользователя, либо синтезированных наблюдений для ВОС (либо обоих видов данных) являются предпочтительными методами для преодоления ограничений, связанных с шириной полосы пропускания данных. Наконец, чтобы метод был легко доступным для всех пользователей, необходимо, чтобы соответствующие опорные станции с очень хорошо известными координатами находились, непрерывно работали и распространяли поправки по технологии, которая применяется пользователями на обслуживаемой площади. Для организации метода, вероятно, потребуется диспетчерская (провайдерская) служба, а отсюда следует еще один недостаток сетевого метода – более высокая стоимость применения и поддержания качества обслуживания.

В общем, однако, считается, что основанный на наблюдениях фазы несущей сетевой метод обеспечивает пользователей эффективными и надежными решениями в реальном времени на сантиметровом уровне точности [Fotopoulos, Cannon, 2001; Lachapelle, Alves, 2002; Landau et al., 2002; van der Marel, 1998; Rizos et al., 2000].

Методы параметризации поправок. Первый шаг в сетевом методе RTK – измерение невязок на опорных станциях. В большинстве случаев невязки получаются как разности между наблюдениями фазы несущей (с

зафиксированными неоднозначностями) и расстояниями, вычисляемыми по известным координатам станций. Эти невязки можно вычислить через необработанные наблюдения фазы на L1 и L2. Для того, чтобы изолировать различные источники ошибок и использовать преимущества от их уникальных характеристик, используются линейные комбинации фаз.

Второй шаг в сетевом методе – это доставка поправок пользователю. Поправки могут доставляться одним из двух методов:

– метод трансляции, в котором поправки за ошибки в орбитах и за атмосферные эффекты передаются по линиям связи в специальном формате, который для того, чтобы конвертировать нестандартный формат сообщения в поток данных в формате RTCM, требует соответствующих изменений в аппаратуре и программном обеспечении приемника;

– метод виртуальной станции, который требует двунаправленной связи. Его преимуществом является то, что в нем используются существующие стандарты RTCM и CMR, применяемые в большинстве геодезических приемников.

Для формирования поправок по данным наблюдений на сети опорных станций за последние годы было разработано несколько методов. Главные исследованные разными авторами методы можно классифицировать по алгоритмам, применяемым для формирования поправок: алгоритмы с частными производными, алгоритм с линейной интерполяцией, алгоритм уравнивания условным МНК и метод виртуальной опорной станции. Первые три метода из приведенных выше концентрируют внимание на действительном образовании и последующем представлении поправок, основанных на наблюдениях фазы несущей, в то время как последний метод имеет дело с генерацией наблюдений для виртуальной опорной станции. Алгоритмы вычисления поправок можно найти в работах [Fotopoulos, Cannon, 2001; Rizos, Han, Chen, 2000; Jäggi et al., 2001] и др. Вычисленные по наблюдениям на опорных станциях поправки представляются в виде значений в узлах координатной сетки. Тогда соответствующие поправки для приближенного положения пользователя интерполируются по четырем значениям в ближайших узлах сетки. В реальном времени сетка поправок должна создаваться с предопределенным разрешением (например, 0.5° N × 0.5° E) и в зависимости от временной корреляции моделируемых ошибок (от ионосферы, тропосферы и ошибок орбит), а значения в узлах сетки должны обновляться через равные интервалы в течение суток.

Другой схемой параметризации в методе является аппроксимация поверхности полиномами низкого порядка с двумя переменными, или метод билинейной интерполяции. В этом случае коэффициенты модели поверхности низкого порядка вычисляются через уравнивание по МНК.

8.3.9. Виртуальные опорные станции

Виртуальная опорная станция GPS наилучшим образом имитирует реальную станцию с тем же положением, включая задержки от атмосферы и фазового центра антенны, но исключая многопутность. Задержки исключаются при формировании одинарных и двойных разностей в программном

обеспечении пользователя. Виртуальные данные получают в вычислительном центре. Пользователь может выбрать для виртуальной станции положение и тип антенны. Сетевое решение, учет атмосферных поправок и поправок за фазовый центр производятся вычислительным центром. В вычислительном центре можно использовать точные орбиты, чтобы уменьшить ошибки орбит, в то время как пользователь может использовать бортовые эфемериды.

Виртуальные опорные GPS станции объединяют строгость сетевого решения с комфортом решения одиночной базовой линии. Подобные результаты получаются, когда данные GPS приемника обрабатываются с виртуальной опорной GPS станцией как со всей сетью, в которой зафиксированы положения всех опорных станций. Точность базовой линии с мобильным приемником, выраженная через его стандартные ошибки, улучшается в $\sqrt{(n+1)/2n}$ раз, где n – число опорных станций в сети. Например, для 5 опорных станций этот коэффициент равен 0.77, он близок к максимально возможному улучшению в 0.71 раз, то есть повышение точности незначительное. В связи с этим, преимуществами виртуальной опорной GPS станции над сетевым методом считаются следующие:

– сеть опорных станций должна обрабатываться только один раз;

– необходимо меньше данных, нужны только данные одной виртуальной базовой станции на период измерений;

– атмосферные задержки на опорную станцию можно интерполировать на виртуальную станцию;

– можно использовать стандартное коммерческое программное обеспечение;

– улучшения и новые модели в программном обеспечении должны вводиться только на вычислительном центре.

– По сравнению с решением одиночной базовой линии, в котором используется ближайшая опорная станция, преимуществами виртуальной станции являются:

– качество, доступность и надежность сетевого решения в течение 24 часов за сутки;

– используются данные, которые были проконтролированы; □

– не нужна сложная обработка (можно использовать бортовые эфемериды и простые модели);

– не нужно формировать комбинацию, свободную от влияния ионосферы, достаточно обработать только виртуальные данные для □несущей L1, то есть одночастотным приемником можно работать на больших расстояниях от опорных станций;

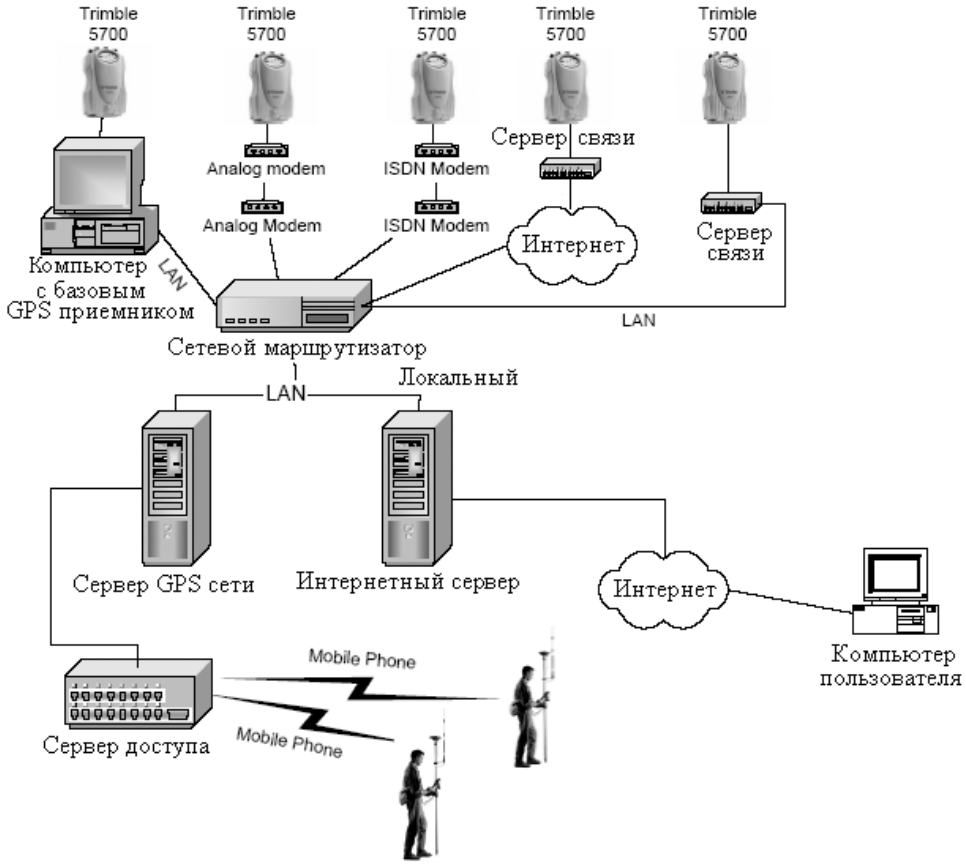
– более надежное разрешение неоднозначностей, достигаемое за более короткий период наблюдений и по меньшему количеству опорных станций;

– для распределения данных виртуальных станций между пользователями хорошо подходит Интернет.

Виртуальные станции представляют очень привлекательную возможность при использовании множества опорных станций. Точность решения отдельной

базовой линии с виртуальной базовой станцией сравнима с сетевым решением универсальным программным обеспечением. Поэтому геодезисты могут использовать постоянные сети GPS без необходимости делать изменения в их текущих установках для GPS обработки [van der Marel, 1998].

Метод множественных опорных станций находит все более широкое применение в различных странах мира [Landau et al., 2002; Petrovski et al., 2001; Rizos et al., 1999; Talbot et al., 2002]. Первый коммерческий продукт, основанный на методе множественных опорных приемников, – это Trimble's Virtual Reference Station. Сеть опорных приемников развертывается на расстояниях 50 – 100 км, что допускает хорошее пространственное моделирование атмосферных смещений. Как можно видеть, это сделано преднамеренно для поддержки RTK операций. Данные опорных приемников и сообщения о поправках, генерируемых из обработки в реальном времени данных опорной сети, передаются пользователю через инфраструктуру телефонной мобильной связи. Заметим, что сообщения с поправками вычисляются на положение пользователя, вычисленное в навигационном решении по кодовым псевдодальностям. Поэтому базовая линия от ВОС до пользовательского приемника оказывается очень короткой. На рис. 8.10 показана одна из возможных схем организации сети опорных станций с использованием Интернета и мобильной телефонной связи.



LAN – Local Area Network – локальная вычислительная сеть
ISDN – Integrated Services Digital Network – интегрированная цифровая сеть связи

Рис. 8.10. Организация сети из опорных станций [Landau et al., 2002]

8.4. Относительное позиционирование

Целью относительного позиционирования является определение координат неизвестной точки по отношению к известной точке, которая в большинстве применений является стационарной. Другими словами, относительное позиционирование нацелено на определение вектора между двумя точками, которые часто называют *вектором базовой линии* или просто *базовой линией*. Пусть A – опорная (известная) точка, B – неизвестная точка, а $\mathbf{D}_{AB}$ – вектор базовой линии. Вводя соответствующие векторы положения $\mathbf{R}_A$, $\mathbf{R}_B$, можно составить соотношение

$$\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_A + \mathbf{D}_{AB}, \qquad (8.68)$$

а компоненты вектора базовой линии есть

$$\mathbf{D}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}. \qquad (8.69)$$

Координаты опорной точки должны даваться в системе WGS-84, для этого обычно используют решение по кодовым дальностям.

Относительное позиционирование может выполняться по кодовым или фазовым дальностям. В дальнейшем мы будем рассматривать только решения по фазе несущей. Относительное позиционирование требует выполнения одновременных наблюдений и на опорной, и на неизвестной точке. Предполагая, что такие одновременные наблюдения имеются на двух пунктах A и B на спутники i и j, можно образовать линейные комбинации, которые приводят к одинарным, двойным и тройным разностям (см. раздел 7.2). Большинство программ для постобработки использует эти три способа, поэтому в следующем разделе показаны их основные математические модели.

8.4.1. Статическое относительное позиционирование

В статической съемке отдельного вектора базовой линии между пунктами A и B два приемника должны оставаться стационарными в течение всего сеанса наблюдений. Исследуем одинарные, двойные и тройные разности в отношении числа уравнений наблюдений и неизвестных. Предполагается, что на двух пунктах A и B можно наблюдать одни и те же спутники i, j в одни и те же эпохи. Здесь не будем касаться практической проблемы блокирования сигналов спутников. Число эпох обозначим через E, а число спутников – через s.

Предположим, что уравнения измеренных фаз (в единицах расстояния) имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_A^i(t) &= \rho_A^i(t) + \lambda N_A^i + cdt_A; \\ \Phi_A^j(t) &= \rho_A^j(t) + \lambda N_A^j + cdt_A; \\ \Phi_B^i(t) &= \rho_B^i(t) + \lambda N_B^i + cdt_B; \\ \Phi_B^j(t) &= \rho_B^j(t) + \lambda N_B^j + cdt_B. \end{aligned} \qquad (8.70)$$

Подразумевается, что параметры часов спутника, тропосферные и ионосферные задержки не определяются, а считаются известными или будут исключаться при обработке. Этот набор данных можно было бы решать для

каждого пункта отдельно, что было бы эквивалентно точечному позиционированию.

Для каждого спутника и для каждой эпохи можно выразить одинарные разности. Поэтому число этих измерений равно *Es*. Число неизвестных записано под соответствующими членами уравнения одинарной разности:

$$\begin{array}{l} \Phi^{i}_{AB}(t) = \rho^{i}_{AB}(t) + \lambda N^{i}_{AB} + c(dt_B(t) - dt_A(t)); \\ E \cdot s \;\geq\; 3 \quad + \quad s \quad + \quad (E-1). \end{array} \qquad (8.71)$$

Число неизвестных поправок часов $E - 1$ указывает на дефект ранга, равный единице. Это означает, что один из неизвестных параметров можно (и нужно) выбирать произвольно. Предположим, что выбрана поправка часов приемника в одну эпоху, тогда вместо E неизвестных поправок часов приемника остается только $E - 1$ поправок часов. Из приведенного выше соотношения можно вывести, что

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}. \qquad (8.72)$$

Хотя это уравнение является эквивалентом уравнения (8.41), полезно повторить (теоретически) минимальные требования для решения. Единственный спутник не обеспечивает решение, потому что знаменатель в неравенстве (8.71) становится нулевым. С двумя спутниками получается результат $E \geq 4$, а в нормальном случае из четырех спутников получается, что $E \geq 2$.

Для двойных разностей соотношение между измерениями и неизвестными достигается с использованием той же самой логики. Заметим, что для одной двойной разности необходимо два спутника. Для s спутников получается $s - 1$ двойных разностей в каждую эпоху, поэтому полное число двойных разностей равно $E \cdot (s - 1)$. Число неизвестных записано под соответствующими членами уравнения двойной разности:

$$\begin{array}{l} \Phi^{ij}_{AB}(t) = \rho^{ij}_{AB}(t) + \lambda N^{ij}_{AB}; \\ E \cdot (s-1) \geq \;\; 3 \quad + \quad (s-1). \end{array} \qquad (8.73)$$

Из приведенного выше соотношения следует, что

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}, \qquad (8.74)$$

что идентично уравнению (8.72), и поэтому основное условие наблюдений дается парой уравнений $s = 2$, $E \geq 4$ и $s = 4$, $E \geq 2$. Чтобы избежать линейно зависимых уравнений при формировании двойных разностей, используется либо метод базового (опорного) спутника, либо метод последовательного спутника. Если наблюдались спутники *i*, *j*, *k*, *l*, *m*, то при выборе опорного спутника *i* образуются разности по парам *ij*, *ik*, *il*, *im*. В методе последовательного спутника образуются разности по парам *ij*, *jk*, *kl*, *lm*. Другие двойные разности являются линейными комбинациями, и, следовательно, линейно зависимы. Например, двойная разность между спутниками *jk* (в первом случае) может быть получена путем вычитания *ij* и *ik*, а разность *ik* (во втором случае) может быть образована путем вычитания *ij* и *jk*.

Модель тройных разностей включает только три неизвестных координаты точки. Для одной тройной разности необходимо две эпохи. Следовательно, в

случае E эпох возможно $E - 1$ линейно независимых комбинаций эпох. Таким образом, число уравнений

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{ij}(t_{12}) &= \rho_{AB}^{ij}(t_{12}); \\ (s-1)(E-1) &\geq 3. \end{aligned} \qquad (8.75)$$

Из приведенного соотношения получается, что

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}. \qquad (8.76)$$

Это уравнение идентично уравнению (8.72), и, следовательно, основная конфигурация вновь дается парами уравнений $s = 2$, $E \geq 4$ и $s = 4$, $E \geq 2$.

Таким образом, в относительном методе может использоваться любая математическая модель: одинарные, двойные и тройные разности.

8.4.2. Кинематическое относительное позиционирование

В кинематическом позиционировании приемник на известной точке A в начале базовой линии остается фиксированным. Второй приемник перемещается, а его положения должны определяться в произвольные эпохи. Движение мобильного приемника отражается в неявной форме в уравнениях для одинарных, двойных и тройных разностей через геометрическую дальность. Возьмем мобильную станцию B и спутник i, геометрическое расстояние в статическом режиме дается как

$$\rho_B^i(t) = \sqrt{(X^i(t) - X_B)^2 + (Y^i(t) - Y_B)^2 + (Z^i(t) - Z_B)^2}, \qquad (8.77а)$$

а в случае кинематического режима

$$\rho_B^i(t) = \sqrt{(X^i(t) - X_B(t))^2 + (Y^i(t) - Y_B(t))^2 + (Z^i(t) - Z_B(t))^2}, \qquad (8.77б)$$

где появляется зависимость положения пункта B от времени. В этой математической модели в каждую эпоху неизвестны три координаты. Таким образом, полное число неизвестных координат пункта для E эпох равно $3E$. Соотношение между числом неизвестных для кинематической съемки следует из моделей одинарных, двойных и тройных разностей для статической съемки (уравнения (8.71), (8.73)):

$$\begin{aligned} &\textit{одинарная разность}: \quad sE \geq 3E + s + (E-1); \\ &\textit{двойная разность}: \quad (s-1)E \geq 3E + (s-1). \end{aligned} \qquad (8.78)$$

Например, соотношение

$$E = \frac{s-1}{s-4} \qquad (8.79)$$

является основным для одинарных разностей, что эквивалентно уравнению (8.43).

Непрерывное движение подвижного приемника ограничивает доступные данные для определения его положения в одну эпоху. Но ни одна из приведенных выше моделей не обеспечивает приемлемое решение при $E = 1$. Поэтому эти модели модифицируются: число неизвестных уменьшается посредством удаления неизвестных неоднозначностей, то есть неоднозначности предполагаются известными. Для одинарных разностей это имеет двойной эффект: во-первых, s неоднозначностей можно удалить, и, во-вторых исчезает дефект ранга из-за известных неоднозначностей, так что

необходимо определять только E неизвестных поправок часов. Поэтому требование к модифицированным наблюдениям для одинарных разностей состоит в том, чтобы $sE \geq 4E$, и для одной эпохи уменьшается до $s \geq 4$. Подобным образом, для двойных разностей $s - 1$ неоднозначностей удаляются в (8.79) так, что в результате $(s - 1) \cdot E \geq 3 \cdot E$, что для одной эпохи уменьшается до $s \geq 4$. Следовательно, модели для одинарных и двойных разностей заканчиваются фундаментальным требованием одновременного наблюдения не менее четырех спутников.

Использование тройных разностей в кинематическом методе сильно ограничено. В принципе, определение тройных разностей с двумя спутниками в две эпохи и двумя станциями при фиксированных позициях по отношению к двум эпохам исключает какое-либо применение, поскольку положение мобильной станции изменяется от эпохи к эпохе. Однако тройные разности можно использовать, если координаты подвижного приемника известны в опорную эпоху. В этом случае, применив (8.74) к кинематическому случаю с $3E$ неизвестными и уменьшив число неизвестных позиций мобильного приемника на 3, из-за его известного положения в опорную эпоху, можно получить соотношение $(s - 1)(E - 1) \geq 3(s - 1)$. Это приводит к $s \geq 4$, что является тем же самым требованием, что и для одинарных и двойных разностей с удалением неоднозначностей.

Удаление неоднозначностей из одинарных или двойных разностей означает, что они должны быть известны. Соответствующие уравнения получаются простой перепиской (8.71) и (8.76) с переносом неоднозначностей в левую часть уравнений. Одинарные разности становятся:

$$\Phi^{i}_{AB}(t) - \lambda N^{i}_{AB} = \rho^{i}_{AB}(t) + c(dt_B(t) - dt_A(t)), \qquad (8.80)$$

а двойные разности становятся

$$\Phi^{ij}_{AB}(t) - \lambda N^{ij}_{AB} = \rho^{ij}_{AB}(t), \qquad (8.81)$$

где неизвестные теперь находятся только в правых частях.

Таким образом, все уравнения могут быть решены, если известна хотя бы одна позиция движущегося приемника. Предпочтительно (но не обязательно), что это будет начальная (стартовая) точка движущегося приемника. Базовая линия, связанная с этой начальной позицией, обозначается как стартовый вектор. С известным стартовым вектором определяются неоднозначности и все последующие позиции движущегося приемника до тех пор, пока не произойдет потеря захвата сигналов, и будет наблюдаться не менее четырех спутников [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

8.4.3. Статическая инициализация

Инициализация на поверхности Земли может выполняться одним из трех методов:

- наблюдение на точках с известными координатами;
- наблюдение базовой линии;
- обмен между приемниками точками установки их антенн.

Простейшая форма инициализации – установить антенны опорной и мобильной станций на точки с известными координатами. Чтобы можно было пренебречь ионосферными и тропосферными задержками, а также для удобства в работе, точки должны быть сравнительно близко. Из уравнения (8.81) следует:

$$N_{AB}^{ij}(1) = \frac{f}{c}[\Phi_{AB}^{ij}(t) - (\rho_A^i(t) - \rho_B^i(t)) - (\rho_A^j(t) - \rho_B^j(t))]. \qquad (8.82)$$

Поскольку положение приемников известно, начальные неоднозначности $N_{AB}^{ij}(1)$ можно вычислить для каждой двойной разности. Нужно определять, по крайней мере, три неоднозначности, то есть наблюдать не менее четырех спутников. Вычисленные $N_{AB}^{ij}(1)$ должны быть округлены до целых значений.

Как только начальные неоднозначности известны, можно начинать кинематические измерения. Пусть индексы A и B относятся, соответственно, к опорному и движущемуся приемникам. Тогда можно легко получить одинарные разности для мобильной станции:

$$\frac{f}{c}\rho_B^{ij}(t) = \frac{f}{c}[\rho_A^i(t) - \rho_A^j(t)] + N_{AB}^{ij}(1) - \frac{f}{\lambda}\Phi_{AB}^{ij}(t). \qquad (8.83)$$

Если 4 спутника наблюдаются одновременно, то существует три уравнения вида (8.83), пригодных для вычисления положения движущегося приемника. Если же спутников больше, чем 4, то возможен подход по МНК. Требования к точности для координат опорной станции такие же, как и в других GPS измерениях. Естественно, что кинематические измерения в большей степени подвержены влиянию ионосферы, тропосферы и многопутности.

Кинематический режим требует, чтобы во время измерений, пока наблюдается созвездие спутников, не было потерь в счете циклов. Если наблюдается 5 спутников, тогда потерю счета циклов по одному из спутников можно легко восстановить. Три двойных разности, которые не имеют срыва, можно использовать для определения положения приемника в соответствии с (8.83), а затем использовать уравнение (8.82) для вычисления новой неоднозначности, на которой имел место срыв цикла. Эта процедура работает, если три оставшихся двойных разности имеют хорошую геометрию. Если наблюдалось 6 спутников, то допускаются не более двух срывов в одну эпоху. Таким образом, случайный срыв цикла не наносит ущерба до тех пор, пока остаются три хороших двойных разности. Подобным образом устанавливается неоднозначность для появившегося над углом отсечки по высоте нового спутника.

Имея в виду кинематический режим, фирмы-производители аппаратуры оборудуют приемники многими каналами на двух частотах. Для получения самой надежной системы возможно объединение GPS приемника с инерциальной системой с целью преодоления мостов (укрытий), когда приемник теряет захват сразу по всем каналам или поддерживает захват только по 1, 2 или 3 спутникам.

Практически для выполнения инициализации на известной точке достаточно 1 – 2 минуты, для инициализации путем наблюдения базовой линии – до получаса [Leick, 1995].

Чтобы уменьшить время, необходимое для выполнения инициализации неоднозначностей, Б. Ремонди и Б. Хофманн-Велленхоф разработали метод инициализации посредством обмена антеннами. Предположим, что в эпоху t_1 приёмник *R1* с антенной *A1* находится на станции *A*, а приёмник *R2* с антенной *A2* – на станции *B* (рис. 8.11). Двойную разность (в циклах) со станций *A*, *B* на спутники *i*, *j* в эпоху t_1 можно записать:

$$\phi_{AB}^{ij}(R2-R1,t_1)=$$
$$=\frac{f}{c}\left[\rho_A^i(R1,t_1)-\rho_A^j(R1,t_1)-\rho_B^i(R2,t_1)+\rho_B^j(R2,t_1)\right]+N_{AB}^{ij}(t_1). \quad (8.84)$$

Если выполняется обмен антеннами, то в эпоху t_2 антенна *A1* устанавливается на станции *B*, а антенна *A2* – на станции *A*, и записываются соответствующие измерения. Тогда, для эпохи t_2 двойная разность равна

$$\phi_{AB}^{ij}(R2-R1,t_2)=$$
$$=\frac{f}{c}\left[\rho_B^i(R1,t_2)-\rho_B^j(R1,t_2)-\rho_A^i(R2,t_2)+\rho_A^j(R2,t_2)\right]+N_{AB}^{ij}(t_1). \quad (8.85)$$

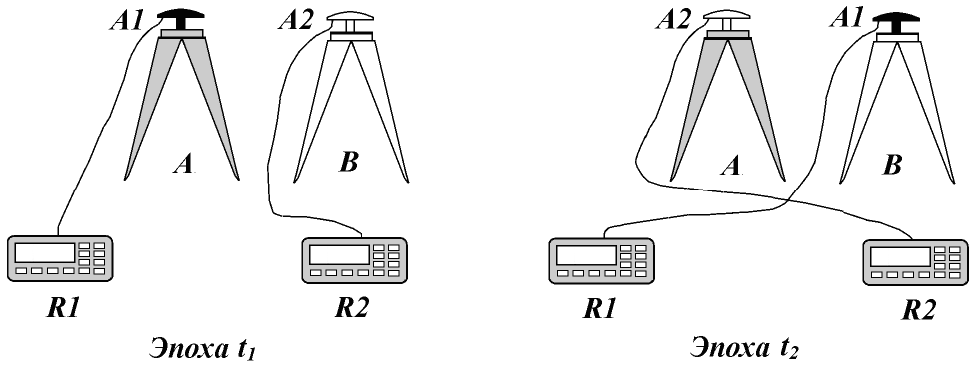


Рис. 8.11. Инициализация путем обмена позициями антенн приемников

Вычитание наблюдений двух эпох дает:

$$\phi_{AB}^{ij}(R2-R1,t_2)-\phi_{AB}^{ij}(R2-R1,t_1)=\frac{f}{c}\left[-\rho_A^i(t_2)+\rho_A^j(t_2)+\right.$$
$$\left.+\rho_B^i(t_2)-\rho_B^j(t_2)-\rho_A^i(t_1)+\rho_A^j(t_1)+\rho_B^i(t_1)-\rho_B^j(t_1)\right]\approx$$
$$\approx 2\frac{f}{c}\left[-\rho_A^i(t_2)+\rho_A^j(t_2)+\rho_B^i(t_2)-\rho_B^j(t_2)\right]. \quad (8.86)$$

Заметим, что соответствующие топоцентрические дальности имеют в (8.86) один и тот же знак. Из-за непрерывного движения спутников эти расстояния изменяются во время операции обмена антеннами. Даже если спутники не двигались бы вообще, уравнение (8.86) можно решить для базовой линии *AB*. Решение требует, как обычно, наблюдений не менее четырех спутников, дающих не менее трех уравнений, которые решаются для положения пункта *B* при фиксированной станции *A*. Как только положение приемника *B* известно, неоднозначности получаются из уравнений (8.82).

Полезно сравнить (8.86) с решением по тройным разностям, если бы антенны не переставлялись. Для линии *AB* тройная разность равна:

$$\phi_{AB}^{ij}(t_1,t_2)=\frac{f}{c}[\rho_A^i(t_2)-\rho_A^j(t_2)+\rho_B^i(t_2)-\rho_B^j(t_2)-$$

$$-\rho_A^i(t_1)+\rho_A^j(t_1)+\rho_B^i(t_1)-\rho_B^j(t_1)]. \qquad (8.87)$$

Соответствующие топоцентрические расстояния в (8.87) имеют противоположные знаки, и для короткого периода времени разности этих расстояний стремятся к нулю, в то время как в уравнении (8.86) эти расстояния складываются [Hofmann-Wellenhof, Remondi, 1988].

Качество кинематического решения по GPS, как всегда, зависит от геометрии спутникового решения и числа спутников. Чем больше спутников, тем строже решение. Поскольку созвездие спутников хорошо предсказуемо заранее, и поскольку положения спутников заранее известны, можно моделировать точность определения заранее, вычисляя ковариационную матрицу положения станции (или вектора от фиксированного до движущегося приемника) на основе выбора спутников и времени наблюдений на станции. Аналогично PDOP, который особенно популярен в навигации, К. Гоадом было введено понятие RDOP (Relative dilution of precision):

$$RDOP=[Trace(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}]^{1/2}, \qquad (8.88)$$

где $\boldsymbol{P}$ – безразмерная весовая матрица двойных разностей; $\boldsymbol{A}$ – матрица плана, состоящая из частных производных по компонентам базовой линии. Размерность RDOP – циклы на метр [Leick, 1995].

8.4.4. Кинематическая инициализация

Очень часто при кинематическом позиционировании невозможно выполнить статическую инициализацию, поскольку объект, чье положение должно вычисляться, находится в постоянном движении (например, самолет при аэрофотосъемке или судно при гидрографической съемке). Этот наиболее сложный для определения случай представляет собой определение неоднозначностей в движении (на лету, On-the-Fly, OTF).

Метод кинематической инициализации требует, чтобы фазовые неоднозначности были надежно разрешены в режиме реального времени, то есть практически за несколько секунд. Пока они неизвестны, сантиметровый уровень точности недостижим. Условия, при которых неоднозначности могут быть успешно разрешены в движении, зависят не только от совершенства программы, но и от целого ряда физических факторов. К ним относятся: расстояние между приемниками, количество спутников, наличие многопутности и других не моделируемых ошибок, доступность фаз на двух частотах и на полной длине волны, а также количество потерь счета циклов.

Все методики инициализации в движении требуют оценки начальной позиции мобильного приемника и ее средней квадратической ошибки для того, чтобы определить физический объем исследования и идентифицировать пробные наборы неоднозначностей. Все методики обычно дают подходящие наборы неоднозначностей и должны обеспечивать такие методы, которые позволяют отличать и отделять самое лучшее и второе лучшее решение. Метод инициализации в движении предполагает, что правильное решение соответствует целым неоднозначностям. Если была потеря в счете циклов, то

неоднозначность для данной последовательности двойных разностей должна определяться заново. Как и при статической инициализации, проблем из-за потерь счета циклов не будет, если поддерживать захват сигналов от 4 и более спутников. Однако если есть срыв сразу по всем спутникам, или если слежение сохранилось на 1-3 спутниках, то исследование неоднозначности должно быть повторено с новой эпохи. Если имеют место постоянные срывы циклов, то неоднозначности разрешить невозможно. Как только неоднозначности разрешены, можно определять положения приемника и вперед, и назад по времени, используя уравнение (8.64).

Оценка начального положения и исследуемого объема наилучшим образом выводится по двойным разностям псевдодальностей, полученным по P(Y)-коду или C/A-коду. Чем выше точность начального положения, тем быстрее работает алгоритм исследования. Если псевдодальности по P(Y)-коду не измеряются, то можно использовать C/A-кодовые псевдодальности современных приемников с узкими корреляторами. Средние квадратические ошибки (стандартные отклонения) этих кодовых решений служат для определения размера исследуемого объема, в котором должно находиться истинное положение мобильной станции. Сглаживание кодовых наблюдений по фазам также может быть полезным в определении меньшего объема исследований.

Объединение кодовых и фазовых решений между эпохами производится в соответствии с формулой:

$$P_{AB}^{ij}(t_1) = P_{AB}^{ij}(t) - \frac{c}{f}[\phi_{AB}^{ij}(t) - \phi_{AB}^{ij}(t_1)]. \qquad (8.89)$$

Она позволяет вычислять двойные разности псевдодальностей эпохи t_1 от более поздних эпох t. Это наблюдение может быть уточнено по нескольким измерениям и использовано для определения начального положения.

Исследование объема и пробных наборов неоднозначностей. Для определения объема иногда используется эллипсоид исследований. Однако, более простая форма исследуемого объема – это куб, размеры которого пропорциональны средним стандартным отклонениям определения начального положения (рис. 8.12). Если положение любого угла куба обозначено как C, то неоднозначности можно вычислить из уравнения:

$$N_{AB,C}^{ij}(t_1) = \phi_{AB}^{ij}(t) - \frac{f}{c}[\rho_A^i(t) - \rho_{B,C}^i(t)] + \frac{f}{c}[\rho_A^i(t) - \rho_{B,C}^j(t)]. \qquad (8.90)$$

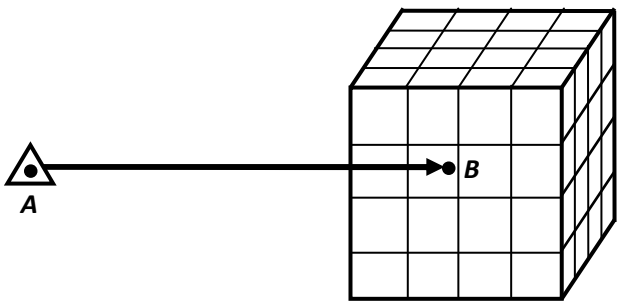


Рис. 8.12. Объем исследований неоднозначностей в виде куба

Значение неоднозначности $N^{ij}_{AB,C}(t_1)$ вычисляется для каждого угла куба, все восемь углов определяют пределы неоднозначностей. Эта процедура дает пределы для неоднозначностей фаз на частотах L1 и/или L2, а также для разностной (широкополосной) и суммарной (узкополосной) комбинаций. Число возможных комбинаций, образующих наборы неоднозначностей, быстро растет с увеличением объема и числа спутников. При реальном внедрении техники OTF необходимо прибегать к специальным методикам, которые дают уверенность в том, что используется только физически значимая комбинация неоднозначностей.

Передача (распространение) пробного положения. Самый общий случай в кинематическом позиционировании заключается в вычислении объема исследований и пробных наборов неоднозначностей для каждой эпохи. Если алгоритм исследования достаточно быстрый, то можно выполнять исследование объема неоднозначностей для каждой эпохи. При условии, что имеются достаточные качество геометрии и объем измерений для получения решения, положение подвижного приемника можно было бы определить независимо в каждую эпоху. При отсутствии указанных условий несколько эпох должны объединяться, и, таким образом, возникает проблема передачи пробных положений от одной эпохи к другой. Передаваться должны только те пробные положения, которые еще не отброшены. Для этого можно воспользоваться уравнением тройной фазовой разности, которое в данном случае записывается следующим образом:

$$[\rho^i_B(t_2)-\rho^i_B(t_1)]-[\rho^j_B(t_2)-\rho^j_B(t_1)]=$$
$$=[\rho^i_A(t_2)-\rho^i_A(t_1)]-[\rho^j_A(t_2)-\rho^j_A(t_1)]-\frac{c}{f}\phi^{ij}_{AB}(t_2,t_1). \qquad (8.91)$$

Через тройные разности для геометрических дальностей это уравнение записывается в компактной форме:

$$\rho^{ij}_B(t_1,t_2)=\rho^{ij}_A(t_2,t_1)-\frac{c}{f}\phi^{ij}_{AB}(t_1,t_2) \qquad (8.92)$$

или

$$\rho^{ij}_B(t_2)=\rho^{ij}_A(t_1)+\rho^{ij}_A(t_1,t_2)-\frac{c}{f}\phi^{ij}_{AB}(t_1,t_2). \qquad (8.93)$$

Если те же самые четыре спутника наблюдаются в последующие эпохи, то можно вычислить три тройные разности и из решения трех уравнений вида (8.93) найти положение движущегося приемника B в эпоху t_2. Каждая пробная позиция распространяется таким образом от одной эпохи к другой. В течение промежутка времени, на котором распространяются пробные позиции, не должно быть срывов циклов.

Методика OTF. Чтобы вникнуть в идею инициализации в движении, рассмотрим следующий сценарий. Для простоты возьмем только 4 спутника, хотя в действительности OTF работает намного лучше по большому числу спутников. Опорный приемник A находится в точке с известными координатами. Шаг 1 данного процесса – определить объем исследования, то есть, как следует из предыдущего подраздела, установить диапазон неоднозначностей, следующих из

уравнения (8.90), и установить пробные наборы (тройки) неоднозначностей двойных разностей. На шаге 2 для каждого элемента испытуемой тройки двойных разностей вычисляются топоцентрические расстояния для эпохи 1:

$$\rho^{ij}_{B,t}(t_1) = \rho^{ij}_{A}(t_1) - \phi^{ij}_{AB}(t_1) + N^{ij}_{AB,t}(1). \qquad (8.94)$$

Индекс t внизу указывает, что вычисления основаны на пробной неоднозначности. Теперь возможно вычислить пробное положение и определить, попадает ли оно в исследуемый объем. Если нет, то этот пробный набор отбрасывается. Все пробные наборы подвергаются этому тесту, чтобы определить физически значимые неоднозначности для дальнейшего рассмотрения. На шаге 3 уравнение (8.93) используется для вычисления разностей топоцентрических дальностей движущегося приемника в эпоху t_2, величин $\rho^{ij}_{B,t}(t_2)$ с использованием тройных разностей и пробных дальностей $\rho^{ij}_{B,t}(t_1)$. Этот шаг не зависит от выбора неоднозначности, потому что использовались тройные разности. На шаге 4 эти разности дальностей используются для перевычисления неоднозначностей как

$$N^{ij}_{AB,t}(2) = \frac{f}{c}[\rho^{ij}_{B,t} - \rho^{ij}_{A}(t_2)] + \phi^{ij}_{AB}(t_2). \qquad (8.95)$$

Шаг 4 выполняется на каждом пробном наборе. Если никаких дополнительных срывов циклов не было, то соответствующий набор, для которого

$$N^{ij}_{AB,t}(1) = N^{ij}_{AB,t}(2), \qquad (8.96)$$

является правильным набором неоднозначностей. Шаги 3 и 4 могут выполняться для нескольких эпох. В каждом случае набор правильных неоднозначностей дает уравнение (8.96). В особо ответственных случаях это уравнение будет только примерно правильным из-за не моделируемых ошибок.

Различие между статической и кинематической техникой становится менее значимым с внедрением современной методики обработки. Это практически возможно, когда доступны соответствующие виды измерений, и когда спутников достаточно для разрешения неоднозначностей. Ясно, что кинематические съемки пригодны для статических ситуаций и являются двигателем, который делает «быструю статику» из «статики». Если объем измерений и качество геометрии недостаточны, чтобы разрешить неоднозначности за одну эпоху, то должны использоваться несколько эпох. Тогда единственное различие между кинематикой и статикой – это распространение пробных положений мобильного приемника [Leick, 1995].

8.4.5. Псевдокинематическое относительное позиционирование

Псевдокинематический метод (реоккупация) можно идентифицировать как статическую съемку с большими пропусками (перерывами) в данных. Математическая модель, например, для двойных разностей, соответствует уравнениям (8.72), где в общем случае должны разрешаться два набора фазовых неоднозначностей, поскольку точка была оккупирована в различное время. Обработка данных должна начинаться с решения по тройным разностям для данных, полученных за несколько минут во время двух посещений пункта.

Основываясь на этом решении, устанавливается связь между двумя наборами неоднозначностей. После успешной связи неоднозначностей выполняется нормальное решение по двойным разностям.

Промежуток времени между двумя посещениями пункта является важным фактором для достижения точности. Практическое правило – промежуток времени должен быть один час [Hofmann-Wellenhof et al., 2001], хотя некоторые программы обработки допускают интервал даже в одни сутки.

8.4.6. Функциональные модели в относительном позиционировании

Двойная разность фаз. В главе 7 были показаны линейные модели и для кодовых дальностей, и для фазы несущей. В случае относительного позиционирования ограничим исследование фазами несущей, поскольку должно быть ясно, как перейти от расширенной фазовой модели к модели по кодам. Более того, линеаризация и установление системы линейных уравнений остается, в принципе, одинаковой для фазы и фазовых комбинаций и может выполняться аналогично для каждой модели. Поэтому для детального исследования здесь выбраны двойные разности фаз. Модель двойной разности фаз Φ_{AB}^{ij}, полученной по наблюдениям с пунктов A и B на спутники i и j и представленной в единицах расстояния, имеет вид

$$\Phi_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} - I_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}, \qquad (8.97)$$

где в правой части находятся двойные разности геометрических дальностей, ионосферных и тропосферных задержек, начальных неоднозначностей фаз и шумов измерений. Член ρ_{AB}^{ik}, отображающий геометрию, расписывается как

$$\rho_{AB}^{ij} = \rho_B^j - \rho_B^i - \rho_A^j + \rho_A^i \qquad (8.98)$$

и отражает факт необходимости для двойной разности не менее четырех измерений. Каждую из четырех геометрических дальностей можно представить в линейном виде как

$$\rho_A^i = \sqrt{\left\| \mathbf{r}^i - (\mathbf{R}_A)^0 \right\|} - \mathbf{u}_A^i d\mathbf{R}_A = (\rho_A^i)^0 - \mathbf{u}_A^i d\mathbf{R}_A, \qquad (8.99)$$

где $(\rho_A^i)^0 = \sqrt{\left\| \mathbf{r}^i - (\mathbf{R}_A)^0 \right\|}$ – значение геометрической дальности, вычисленной по координатам спутника, исправленным за вращение Земли (см. формулу (8.4)) и априорным координатам пункта $(\mathbf{R}_A)^0$. Теперь двойную разность геометрических дальностей можно представить как

$$\rho_{AB}^{ij} = (\rho_{AB}^{ij})^0 - d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + d\mathbf{R}_A(\mathbf{u}_A^j - \mathbf{u}_A^i), \qquad (8.100)$$

где $(\rho_{AB}^{ij})^0$ – априорное значение двойной разности геометрических дальностей. Предположим, что в уравнении (8.97) известно приближенное значение неоднозначности двойной разности $(N_{AB}^{ij})^0$ и требуется найти к ней поправку dN_{AB}^{ij}, то есть

$$N_{AB}^{ij} = (N_{AB}^{ij})^0 + dN_{AB}^{ij}. \qquad (8.101)$$

Тогда подстановка (8.100) и (8.101) в (8.97) и перегруппировка членов приводит к уравнению поправок для двойной разности фаз:

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + d\mathbf{R}_A(\mathbf{u}_A^j - \mathbf{u}_A^i) + \lambda \cdot dN_{AB}^{ij} + l_{AB}^{ij} = v_{AB}^{ij}, \qquad (8.102)$$

в которой свободный член l_{AB}^{ij} представляет собой разность измеренной и предвычисленной двойной разности фаз:

$$l_{AB}^{ik} = (\rho_{AB}^{ik})^0 - I_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda(N_{AB}^{ij})^0 - \Phi_{AB}^{ij}, \qquad (8.103)$$

а v_{AB}^{ij} – остаточная невязка двойной разности, в которую входит шум измерений фазы, влияние многопутности и других не моделируемых ошибок.

Заметим, что координаты одной точки, например, *A*, для относительного позиционирования должны быть известны. Более важно, что известная точка *A* уменьшает число неизвестных на три, поскольку

$$d\mathbf{R}_A = \mathbf{0}, \qquad (8.104)$$

и это приводит к изменениям в левой части (8.102):

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + \lambda \cdot dN_{AB}^{ij} + l_{AB}^{ij} = v_{AB}^{ij}. \qquad (8.105)$$

Рассматривая теперь четыре спутника *i*, *j*, *k*, *l* с опорным спутником *i* и две эпохи t_1 и t_2, получаем матрично-векторную систему, которая является определенной и, следовательно, решаемой:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} dX_B \\ dY_B \\ dZ_B \\ dN_{AB}^{ij} \\ dN_{AB}^{ik} \\ dN_{AB}^{il} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_{AB}^{ij}(t_1) \\ l_{AB}^{ik}(t_1) \\ l_{AB}^{il}(t_1) \\ l_{AB}^{ij}(t_2) \\ l_{AB}^{ik}(t_2) \\ l_{AB}^{il}(t_2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{AB}^{ij}(t_1) \\ v_{AB}^{ik}(t_1) \\ v_{AB}^{il}(t_1) \\ v_{AB}^{ij}(t_2) \\ v_{AB}^{ik}(t_2) \\ v_{AB}^{il}(t_2) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{B,X}^{ij}(t_1) & a_{B,Y}^{ij}(t_1) & a_{B,Z}^{ij}(t_1) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{B,X}^{ik}(t_1) & a_{B,Y}^{ik}(t_1) & a_{B,Z}^{ik}(t_1) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{B,X}^{il}(t_1) & a_{B,Y}^{il}(t_1) & a_{B,Z}^{il}(t_1) & 0 & 0 & \lambda \\ a_{B,X}^{ij}(t_2) & a_{B,Y}^{ij}(t_2) & a_{B,Z}^{ij}(t_2) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{B,X}^{ik}(t_2) & a_{B,Y}^{ik}(t_2) & a_{B,Z}^{ik}(t_2) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{B,X}^{il}(t_2) & a_{B,Y}^{il}(t_2) & a_{B,Z}^{il}(t_2) & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}. \qquad (8.106)$$

Компоненты *a* в матрице **A** в (8.106) являются разностями направляющих косинусов для соответствующих спутников, то есть, например, для пары *i*, *j* в эпоху t_1

$$\mathbf{a}_B^{ij}(t_1) = \mathbf{u}_B^i(t_1) - \mathbf{u}_B^j(t_1), \qquad (8.107)$$

а в координатной форме

$$\begin{aligned} a_{B,X}^{ij}(t_1) &= u_{B,X}^i(t_1) - u_{B,X}^j(t_1); \\ a_{B,Y}^{ij}(t_1) &= u_{B,Y}^i(t_1) - u_{B,Y}^j(t_1); \\ a_{B,Z}^{ij}(t_1) &= u_{B,Z}^i(t_1) - u_{B,Z}^{ij}(t_1). \end{aligned} \qquad (8.108)$$

Заметим, что для одной эпохи система имеет больше неизвестных, чем уравнений наблюдений, для двух эпох и четырех спутников число уравнений и

неизвестных равны между собой, поэтому **v** = **0**, но при большем числе измерений получается переопределенная система:

$$\mathbf{AX + l = v.} \qquad (8.109)$$

Тройная разность фаз. Подобным образом можно получить уравнение поправок для тройных разностей фаз и других видов разностей и комбинаций фазы. Запишем уравнения двойных разностей для эпох t_1 и t_2:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{ij}(t_1) &= \rho_{AB}^{ij}(t_1) - I_{AB}^{ij}(t_1) + T_{AB}^{ij}(t_1) + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1); \\ \Phi_{AB}^{ij}(t_2) &= \rho_{AB}^{ij}(t_2) - I_{AB}^{ij}(t_2) + T_{AB}^{ij}(t_2) + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_2). \end{aligned} \qquad (8.110)$$

Вычитание первого уравнения из второго дает функциональную модель для тройной разности фаз, которая в кратком виде записывается как:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1,t_2) = \rho_{AB}^{ij}(t_1,t_2) - I_{AB}^{ij}(t_1,t_2) + T_{AB}^{ij}(t_1,t_2) + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1,t_2). \qquad (8.111)$$

Соответствующее модели (8.111) уравнение поправок для тройной разности фаз имеет вид

$$-d\mathbf{R}_B\left(\mathbf{a}_B^{ij}(t_1,t_2)\right) + l_{AB}^{ij}(t_1,t_2) = v_{AB}^{ij}(t_1,t_2), \qquad (8.112)$$

где

$$\mathbf{a}_B^{ij}(t_1,t_2) = \left(\mathbf{u}_B^i(t_2) - \mathbf{u}_B^j(t_2)\right) - \left(\mathbf{u}_B^i(t_1) - \mathbf{u}_B^j(t_1)\right); \qquad (8.113)$$

$$\begin{aligned} l_{AB}^{ik}(t_1,t_2) &= (\rho_{AB}^{ik}(t_2))^0 - (\rho_{AB}^{ik}(t_1))^0 - I_{AB}^{ij}(t_2) + I_{AB}^{ij}(t_1) + \\ &+ T_{AB}^{ij}(t_2) - T_{AB}^{ij}(t_1) - \Phi_{AB}^{ij}(t_1,t_2). \end{aligned} \qquad (8.114)$$

Обычно эпохи t_1 и t_2 являются последовательными, но не обязательно, например, разность между эпохами может образовываться всегда по отношению к первой эпохе в наблюдательной сессии [Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Rizos, 1999].

8.5. Объединение ГЛОНАСС/GPS методов с другими методами позиционирования

Спутниковые ГЛОНАСС/GPS технологии показали новые пути во многих приложениях, вследствие своей точности, глобальной доступности и экономической эффективности. Однако, существуют некоторые ситуации, при которых часть сигналов СРНС может быть заблокирована настолько, что приемник не «увидит» достаточно спутников для позиционирования. Примерами таких ситуаций являются районы городов с высокой застройкой, глубокие карьеры, лесные массивы. Другой причиной, вследствие которой приемник может не «услышать» спутники, могут быть помехи разного происхождения. Наконец, встречаются ситуации, при которых, например, точность планового положения устраивает пользователя, а точность определения высоты недостаточная.

Все эти проблемы могут успешно преодолеваться при объединении спутниковых навигационных систем между собой или с другими способами или системами позиционирования. Улучшение геометрии может быть достигнуто за счет увеличения числа спутников, что можно сделать, объединив в одном приемнике возможности наблюдений спутников GPS и ГЛОНАСС (GNSS приемник). Двухсистемные навигационные приемники выпускаются рядом российских производителей. Геодезические двухсистемные

приемники выпускают фирмы Javad, Thales Navigation и некоторые другие. Готовится к выпуску аппаратура, работающая по сигналам GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Однако здесь мы остановимся на других возможностях усиления работы СРНС. Многочисленные исследования показывают, что работа интегрированных систем значительно лучше, чем одной системы. Усиление СРНС не ограничивается комплексированием с соответствующим датчиком (сенсором). Как показано далее, эффективный сбор и обработка данных GPS могут усиливаться средствами, размещенными на компьютере, такими, например, как ГИС [El-Rabbany, 2002; Logsdon, 1995; Антонович, Карпик, 2003].

8.5.1. Объединение GPS и ГИС

Географические информационные системы (ГИС) представляют собой компьютерное средство, способное накапливать, хранить, управлять, анализировать и выводить на экран и другие носители пространственно распределенные данные. Пространственные данные – это данные, которые распознаются в соответствии с их географическим положением (такие объекты, как улицы, дороги, здания, пожарные гидранты и т. д.).

Пространственные или географические данные можно получить из таких разнообразных источников, как, например, существующие карты, снимки из космоса и GPS. Когда информация накоплена, ГИС хранит ее как набор слоев в своей базе данных. После этого ГИС можно использовать для анализа информации и эффективного принятия решений.

Системы СРНС используются для сбора полевых данных ГИС эффективно и точно. С GPS приемником данные могут собираться в цифровом формате в режиме реального времени или в пост-обработке. Сейчас на рынке имеется несколько систем GPS/ГИС, которые обеспечивают уровень точности от сантиметра до метра. Большинство из этих систем позволяют пользователю вводить атрибуты для каждого объекта съемки. Имеются также встроенные навигационные функции, позволяющие повторно определять положение объектов собственности. Некоторыми производителями GPS аппаратуры выпускаются системы с компьютерным пером, позволяющие редактировать данные в процессе сбора.

Многие отрасли, включая службы управления, лесное и сельское хозяйство, общественную безопасность, управление транспортными парками, получают пользу от объединения GPS и ГИС [Карпик, 2004; El-Rabbany, 2002; Sickle, 2001].

8.5.2. Объединение GPS с лазерными дальномерами

В залесенных районах ГЛОНАСС/GPS приемники обычно теряют захват сигналов спутников. В дополнение к этому затрудняется прием поправок при работе в режиме RTK. Чтобы преодолеть эти проблемы, были разработаны системы, объединяющие спутниковый приемник с лазерным дальномером (лазерной рулеткой). В этом способе объединенная система устанавливается на открытом месте, где нормально функционирует GPS приемник без потери

захвата спутников. С помощью цифрового компаса, безотражательного дальномера, расположенного вместе с приемником, можно определять расстояние и азимут до недоступных точек (рис. 8.13). Программа, установленная в ручном компьютере, помогает собирать данные и дальномера, и приемника. В последнее время вся доступная информация обрабатывается программой компьютера, определяя координаты недоступных точек. Сбор и обработка данных могут происходить в реальном времени, в поле, при условии, что обеспечивается прием дифференциальных поправок. Как только обработка сделана, пользователь может экспортировать выходные данные в нужную ГИС или КАД (AutoCAD). Этим исключается необходимость размещать антенну непосредственно на объектах съемки [El-Rabbany, 2002].

Рис. 8.13. Объединение лазерного импульсного дальномера, цифрового магнитного компаса и GPS приемника (http://www.lasertech.com/About GPS Laser Offsets.pdf)

Объединение GPS приемника и лазерного дальномера является привлекательным средством, особенно в лесном хозяйстве. Расстояния до деревьев, их высоту и диаметр можно легко измерять лазерным устройством. С одного места стационарный пользователь на сравнительно открытом месте может произвести съемку любого количества точек. В этом случае положение самого пользователя будет точно определяться из усреднения всех данных GPS, собранных в процессе работы на пункте. Другое применение объединенной системы «GPS/дальномер» включает съемочные точки под мостами, на загруженных шоссейных дорогах, съемку дорожных знаков, картирование береговых линий. При объединении GPS с дальномером можно получать координаты точечных, линейных и площадных объектов [El-Rabbany, 2002].

8.5.3. Объединение GPS с навигационными системами счисления

Разработано несколько видов навигационных систем счисления координат для морского, воздушного и наземного применения. У ряда наземных подвижных объектов имеются одометрические системы счисления координат на основе счета числа оборотов стандартного колеса и проектирования полученных данных на координатные оси с использованием данных курсовой системы. Информация о пройденном расстоянии получается по одометру, а информация о направлении – по гироскопу. Если средство стартует с известного положения, то информацию о расстоянии и направлении можно использовать для определения положения в любой момент. Иными словами, предположив, что средство движется в горизонтальной плоскости, пройденный путь и направление можно проинтегрировать по времени, чтобы вычислить положение судна.

Одометры уже установлены на всех транспортных средствах, главным образом, чтобы оценивать износ машины и необходимость ремонта. Для перевода числа оборотов колеса транспортного средства в пройденное расстояние необходимо знать масштабный коэффициент. Один из способов его определения – калибровка через управление средством на известном расстоянии. К сожалению, масштабный коэффициент одометра изменяется со временем, главным образом из-за буксования и скольжения, изменения давления в шинах, износа шин и скорости машины. Если этот фактор не компенсировать, то ошибка масштаба будет быстро накапливаться, вызывая значительную ошибку положения.

Вибрационный гироскоп является недорогим сенсором, который измеряет угловую скорость, основанную на так называемом кориолисовом ускорении. Гироскоп выдает ток, напряжение которого пропорционально угловой скорости средства. Скорость поворота получается путем умножения выходного напряжения на масштабный коэффициент. Как и в случае с одометром, недостатком гироскопа является накопление ошибки из-за смещения гироскопа и нестабильности коэффициента перехода. Смещение гироскопа чувствительно к температуре, что будет всегда сказываться на точности измерений. Такой гироскоп может показывать не нулевой отсчет, даже когда угловая скорость равна нулю. Это параметр наблюдений, когда судно неподвижно или движется строго по прямой линии. Ошибка масштабного коэффициента гироскопа влияет на измерения, только когда машина поворачивается. Эту ошибку можно значительно уменьшить, если будут одинаковые повороты по часовой стрелке и против нее.

Как видно, каждая из систем, GPS и навигационного счисления положения, имеют разные ограничения. Поскольку сигналы GPS могут оказаться недоступными в условиях блокирования, дрейфы системы счисления за это время накапливают большую ошибку положения, это подтверждает, что можно разработать оптимальное позиционное решение, основанное на двух системах. Обычно для объединения систем используется метод Калмановской фильтрации (рис. 8.14). В интегрированных системах GPS помогает контролировать дрейф компонент системы счисления посредством частых калибровок, в то время как система счисления становится главной позиционной системой при перерывах в работе GPS. Поэтому работа объединенной системы будет лучше, чем работа любой из них в отдельности. Подобные системы находят широкое применение в автоматизированных системах определения положения транспортных средств (Automatic vehicle location system, AVL), в системах контроля окружающей среды в городах [Logsdon, 1995; Ochieng et al., 2003].

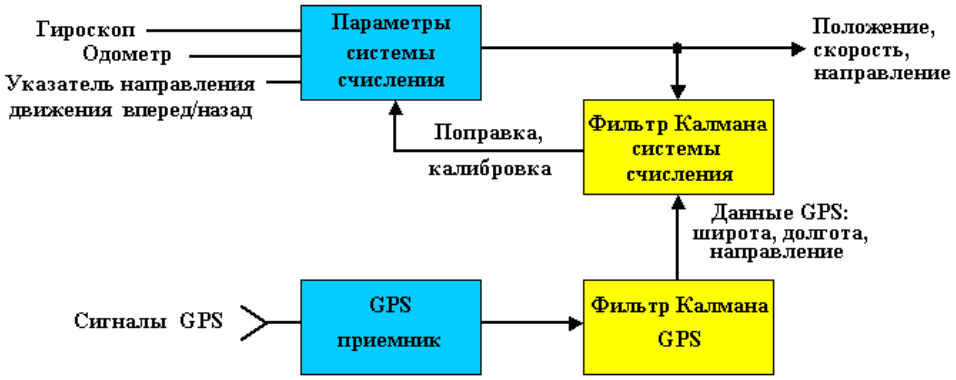


Рис. 8.14. Схема обработки данных в интегрированной системе GPS и системе счисления положений из одометра и гироскопа (www.tycoelectronics.com/gps/deadreckoning.asp)

В последнее время появилось новое многообещающее средство в технике инерциальной навигации, называемое микро-электро-механической системой (Micro-electro-mechanical System, MEMS). Технология MEMS будет обеспечивать угловую информацию и пройденное судном расстояние, заменив традиционную систему счисления положения. Ожидается, что основанные на MEMS гироскопы и акселерометры будут намного компактнее и меньше по стоимости, чем предшествующие технологии [Brown, Lu, 2004].

8.5.4. Объединение СРНС с инерциальными системами

Существует несколько применений, в которых требуется высокоточное позиционирование в закрытых областях или при высоко динамичных условиях. Примерами таких применений являются работы в глубоких открытых разрезах, на улицах города или аэрофотосъемка. Как упоминалось ранее, блокировка сигналов и высокая динамика могут вызывать потерю счета циклов непрерывной фазы несущей. Для преодоления этих ограничений GPS/ГЛОНАСС приемник часто комплексируют с не зависящей от окружения системой инерциальной навигации (Inertial Navigation System, INS). Этой проблеме посвящены многочисленные публикации в отечественной и зарубежной печати, а также сайты в Интернете [Lee et al., 2004].

Инерциальная навигационная система INS представляет собой устройство, состоящее из акселерометров, гироскопов и электронных компонент, а также процессора. Часто встречающееся название системы – блок инерциальных измерений (Inertial Measurement Unit, IMU). Будучи однажды инициализированной (путем накопления информации об исходном положении, скорости и ориентировке), INS становится системой автономной навигации, обеспечивая трехмерное положение, скорость и информацию об ориентировке. Когда система INS установлена на движущемся объекте, акселерометры измеряют ускорение объекта плюс гравитационную силу, а гироскопы обеспечивают информацию об ориентировке инерциальной платформы. Эти наборы информации накапливаются в процессоре сенсора, выводя информацию о скорости и положении. Кроме того, будучи системой, не зависящей от окружения, инерциальная система обеспечивает такую же

высокую точность, как GPS, но за короткий промежуток времени после инициализации. Более того, инерциальные системы обеспечивают очень высокую скорость обновления данных, сопоставимую с GPS. Основной недостаток инерциальных систем состоит в том, что они страдают от дрейфа, если остаются без помощи на больших интервалах времени. В частности, общее исполнение инерциальной системы ограничивает работа гироскопов.

Объединение СРНС и INS позволяет преодолевать ограничения обеих систем, поскольку они дополняют друг друга. В то время как GPS или ГЛОНАСС обеспечивают инициализацию и калибровку инерциальной системы, последняя закрывает бреши в спутниковых измерениях, когда сигналы блокируются или временно теряются. Объединение систем GPS и INS обычно делается в одном из двух способов, а именно: свободное соединение или тесное соединение механизмов. Свободная интеграция выполняется в пространстве (домене) решения, в то время как тесная интеграция выполняется в пространстве необработанных измерений. Кроме того, тесная интеграция требует обширных вычислений, чего не нужно при свободной интеграции. Это приводит, однако, к почти оптимальному интеграционному решению. Подобно при объединении с системой счисления, в интеграции СРНС/INS обычно применяется метод Калмановской фильтрации [Болдин и др., 1999; Соловьев, 2003; El-Rabbany, 2002; Logsdon, 1995; Grewal et al., 2001; Brown, Lu, 2004; Lithopoulos, 1999; Ford et al., 2003].

Примером свободной интеграции спутниковой аппаратуры с инерциальной системой является аппаратно-программный комплекс (АПК), созданный в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС, г. Новосибирск) для мониторинга железнодорожного пути. Аппаратная часть АПК состоит из пары двухчастотных GPS приемников и прецизионного курсо-крено-указателя (ККУ). Недостатком инерциальной аппаратуры является нелинейное смещение нуль-пункта, которое для ККУ доходит до 6′ за час. Но на малых расстояниях такие смещения практически не влияют. На больших же расстояниях уход приводит к большим ошибкам в положении, и инерциальной системе требуется калибровка, которая выполняется по спутниковой системе из пары двухчастотных GPS приемников, работающих в режиме кинематики. Один из приемников находится на опорной точке, другой приемник располагается на платформе, несущей гироскоп ККУ. Работа GPS приемников и гироскопической системы синхронизируется. Съем координат с ККУ производится через каждые 2 см пути. Геометрические параметры пути определяются с точностью 1 – 2 мм, а координаты оси железнодорожного пути определяются с точностью 5 – 10 мм, что превышает точность обычного кинематического позиционирования двухчастотной аппаратурой. Высокая точность определения координат достигается за счет совместной обработки координат, получаемых спутниковой аппаратурой и гироскопической системой, которые имеют различную частотную составляющую изменения погрешности [Щербаков и др., 2003].

Применение интегральных навигационных комплексов GPS/IMU канадской компании Applanix для аэрофотосъемки описано в серии статей Е.М. Медведева [Медведев, 2005].

8.5.5. Использование псевдоспутников

Среди самых быстро растущих применений GPS нужно отметить геодезические работы и управление механизмами на открытых карьерах. Использование GPS на открытых карьерах и разрезах может значительно уменьшить стоимость различных операций. Доступность GPS позиционирования в реальном времени на сантиметровом уровне точности привлекает внимание шахтной индустрии. Это главное, почему точное GPS позиционирование является ключевым компонентом, который ведет к автоматизации тяжелых и дорогих механизмов и машин. К сожалению, как и в предыдущих случаях, сигналы от спутников будут практически блокироваться по мере увеличения глубины карьера. Поэтому надежное позиционирование только по спутникам GPS в глубоких открытых карьерах невозможно. Одна обещающая система для усиления GPS, гарантирующая высокоточное позиционирование, состоит в использовании системы псевдоспутников (или псевдолитов, см. раздел 4.4.5). Псевдоспутник – это электронный прибор наземного базирования, который передает GPS-подобный сигнал (несущая частота, кодовая модуляция и сообщение с данными), который может быть принят GPS приемником. В отличие от спутников GPS, на которых используются атомные генераторы, в псевдолитах для генерации сигналов используются недорогие кварцевые часы.

Добавление сигналов от псевдоспутников улучшает доступность системы и геометрию засечки. Число и положение псевдолитов может быть оптимизировано таким образом, чтобы обеспечить работу всей системы. В частности, можно значительно уменьшить фактор потери точности по высоте VDOP, что приведет к уменьшению ошибки в высоте пункта. Другое преимущество от использования псевспутников состоит в том, что их сигналы не подвержены действию ионосферы. Однако им присущи другие недостатки, которые нужно преодолевать, чтобы обеспечивать высокую точность позиционирования. Первый из них известен как проблема «далекий – близкий», которая происходит из-за изменения мощности принимаемого сигнала псевдоспутника. Чем ближе приемник к передатчику псевдоспутника, тем выше уровень сигнала, и наоборот. Эта проблема не существует при позиционировании только по сигналам GPS, так как мощность принимаемых сигналов остается почти постоянной, поскольку расстояние «спутник – приемник» изменяется незначительно. Следовательно, при объединении GPS с псевдоспутниками более сильный сигнал от псевдоспутника может заглушить другие сигналы. Это проблема близкого сигнала. Однако если сигнал от псевдоспутника намного слабее сигнала GPS, то приемник может не отследить его, это известно как проблема «далекий». Передача сигналов от псевдоспутника короткими импульсами с низким рабочим циклом

(коэффициентом заполнения) может минимизировать влияние в проблеме «далекий – близкий».

Использование неточных часов для генерации сигналов псевдоспутников вызывает ошибку синхронизации сигналов, что приводит к ошибке в расстоянии, которая не исключается, даже если формируются двойные разности. Возможное решение этой проблемы идет через использование сообщения с данными свободного содержания от главного псевдоспутника. Другая проблема, которая требует внимания пользователя псевдоспутника, состоит в ошибке от многопутности. Эта ошибка образуется в результате отражения сигналов от объектов, окружающих антенны и приемника, и передатчика. Многопутность от окружения антенны псевдоспутника вызывает ошибку, инвариантную во времени, поскольку, в отличие от спутника GPS, положение псевдоспутника в сеансе не меняется. Ослабление этой ошибки предлагается производить через калибровку псевдоспутника или использование направленных антенн. В отличие от позиционирования только по GPS, где ошибки эфемерид не влияют значительно на вычисление положения, ошибки координат псевдоспутника будут передаваться в решение, вызывая большие ошибки позиционирования. Это объясняется сравнительно короткими расстояниями между приемником и псевдоспутником. Эта проблема также решается тщательной калибровкой антенны псевдолита.

Параметры наблюдений псевдолитов можно выразить уравнениями, подобными уравнениям для GPS/ГЛОНАСС:

$$P_A^i = \rho_A^i + c \cdot dt^i - c \cdot dt_A + dp^i + T_A^i + dm_A^i + e_A^i; \qquad (8.115)$$

$$\Phi_A^i = \rho_A^i + T_A^i + cdt_A - cdt^i + dp^i + \lambda N_A^i + \delta m_A^i + \varepsilon_A^i. \qquad (8.116)$$

Здесь P_A^i и Φ_A^i – соответственно, наблюдения пседодальности и фазы несущей (в метрах) от псевдоспутника i до приемника A; ρ – геометрическая дальность (то есть истинное расстояние) между псевдоспутником и приемником; dt^i, dt_A, dp^i и T_A^i – поправки часов псевдоспутника, приемника, а также поправка в положение псевдоспутника и тропосферная задержка; dm_A^i, δm_A^i – ошибки из-за многопутности для псевдодальности и фазы; λ – длина волны; N_A^i – целая неоднозначность начальной фазы (в циклах); c – скорость света; e_A^i, ε_A^i – шумы измерений.

Уравнения (8.115), (8.116) не содержат ионосферную задержку, поскольку сигналы от псевдоспутников не проходят через космическое пространство. Однако поправки за положение псевдолита, многопутность, тропосферную задержку, поправки часов (поправки за синхронизацию часов) отличаются от соответствующих поправок в GPS/ГЛОНАСС наблюдениях [Dai et al., 2001].

Необходимо указать, что применение объединенных систем СРНС и псевдоспутников не ограничивается глубокими карьерами. Такие системы успешно используются при точном приземлении воздушных судов, мониторинге деформаций и других применениях. Будучи в принципе средством, подобным GPS, позиционирование только по псевдоспутникам имеет потенциал системы будущего для применений в навигации внутри

помещений, таких, как склады, шахты, туннели. Проблемой, однако, остается определение положений фазовых центров антенн псевдоспутников [El-Rabbany, 2002; Choi et al., 2000; Kee, 2001; Wang et al., 2001b]. Совместное использование GPS, псевдоспутников и инерциальной системы рассмотрено в работе [Lee et al., 2003].

8.5.6. Объединение GPS/ГЛОНАСС и средств мобильной связи

Технология сотовой связи становится широко принятой во всем мире. И количество пользователей, и площади охвата постоянно расширяются. Кроме того, растет покрытие более совершенной цифровой связью, допускающей передачу голоса и данных. Это делает сотовую систему очень привлекательной для ряда рынков, включая службы спасения, системы контроля транспорта и GPS.

Главное ограничение систем мобильной связи – это их невозможность точно определять, откуда произведен вызов. Хотя это ограничение не является критическим для применений, подобных RTK GPS, оно крайне важно для служб спасения и автоматизированных систем контроля транспортных средств. В США, к примеру, почти 1/3 звонков в службу спасения 911 производится с мобильных телефонов. Из них почти 1/4 позвонивших не может точно описать свое местоположение, что создает трудности для операторов при посылке помощи. Поэтому Федеральная комиссия по связи (FCC) в США обязала с октября 2001 г. определять положения абонентов мобильной связи, обращающихся за помощью в службу 911, с точностью 127 м при вероятности 67% или лучше.

Чтобы отвечать требованиям точности комиссии FCC, операторы беспроводной связи определяют местоположение, используя либо сетевой метод, либо по телефонной трубке. В сетевых методах положение абонента определяют либо по разности моментов прихода сигналов (Time difference of arrival, TDOA), либо по углу прихода сигнала (Angle of arrival, AOA). В первом методе измеряется разность моментов прихода сигнала в ячейки сотовой сети или на ее базовые станции. Положение абонента можно определить, если сигнал принимается минимум на три базовые станции. Очевидно, синхронизация часов станций в этом методе является очень важным фактором. Во втором методе используются массивы фазированных антенн, чтобы вычислить угол, под которым сигнал приходит на базовые станции. Чтобы вычислить положение абонента, необходимо минимум две базовых станции. В методах TDOA и AOA имеются и преимущества, и недостатки. Некоторые сети работают, объединяя оба метода.

Технология определения положения с помощью телефонной трубки объединяет GPS с сотовой связью через установку чипа GPS в трубке мобильного телефона. При выключенном режиме селективного доступа в этом методе можно определять положение абонента службы 911 с точностью, которая в 10 раз превосходит требования FCC. В отличие от сетевого метода, технология мобильных трубок очень проста в применении и не требует установки на базовых станциях телефонной сети специального оборудования (например, GPS

приемников, определяющих точное время). Один из недостатков этой технологии состоит в том, что только новые телефоны могут быть оборудованы GPS. Кроме того, сигнал от GPS очень слабый для его приема внутри зданий. Это ограничение можно эффективно преодолеть в ближайшем будущем после разработки объединения GPS/MEMS, описанной в разделе 8.5.3.

В ближайшем будущем будет закончена разработка третьего поколения беспроводных технологий, 3G, широкодиапазонных цифровых сетей. Эта технология поддерживает передачи голосом, высокоскоростные данные и мультимедийные приложения. Кроме того, эта технология использует общие мировые стандарты, которые не только уменьшают стоимость операций, но также делают систему общедоступной по всему миру. Более того, с этой новой технологией приборы могут быть включенными постоянно для передачи данных, поскольку пользователь платит за пакет данных, которые он передает или принимает.

Успехи в беспроводной связи и технологиях определения положения, обсужденные ранее, будут сильно влиять на многие области хозяйства. Ожидается, что рынок навигации судов, к примеру, получит пользу от успехов в развитии систем беспроводной связи и Интернет технологий. В настоящее время суда используют сложные системы, которые объединяют технологии определения положения с системой навигации на компьютере автомашины, в котором содержатся электронные дорожные карты и другая полезная информация. Ясно, что система внутри кабины не будет знать о реальных изменениях в мире в базе данных навигационной системы (например, изменениях в транспортных потоках). С появлением службы беспроводного Интернета оперативное обновление базы данных на центральном сервере могло бы помогать водителям, исключая необходимость в сложных компьютерных системах внутри автомашины, таких, как навигация «поворот за поворотом», транспортная информация и локальные погодные условия. Этот метод прост, экономически эффективен и гибок и имеет потенциал для применения в будущем [El-Rabbany, 2002; Diep Dao et al., 2002].

8.5.7. Комплексирование GPS с баровысотомером

Точность определения высоты кодовым приемником можно повысить, комплексируя его с баровысотомером. К примеру, имеющиеся на российском рынке приборы GARMIN eTrex Vista и GPSMAP 76S являются 12-канальными кодовыми приемниками. Они имеют встроенные в корпус приемника баровысотомер и цифровой компас. Паспортная точность определения высоты составляет 2 – 5 м.

Недостатком измерений барометром является дрейф нуль-пункта, коррелируемый с перемещениями воздушных масс. При начальной точности 1 м через час точность быстро ухудшается до 10 м. По аналогии с DGPS, использование барометрической базовой станции, размещаемой на известной высоте, значительно улучшает результаты, а также их временную стабильность. Согласно [Ladetto et al., 1999], средняя ошибка высоты σ_H изменяется в зависимости от расстояния D как $\sigma_H = 46\,\text{см} + 42 \cdot D \cdot 10^{-6}$. Дифференциальная

барометрия значительно улучшает точность вертикального компонента. Более того, эти дополнительные данные приносят другие преимущества (возможность позиционирования по трем спутникам и появление возможности выявлять ошибки измерений) [Прихода и др., 2002].

Российским производственным предприятием «Центргеокомплекс» Министерства природных ресурсов РФ по утвержденному Сибирским научно-исследовательским институтом геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) техническому заданию на опытно-конструкторские работы создан геодезический трехкоординатный комплекс ИГЗК на базе пьезорезонансных кварцевых преобразователей давления и приемных GPS модулей. Комплексированный прибор позволяет одновременно определять плановые координаты и высоты со значениями средней квадратической ошибки (СКО) плановых координат 5 м, высот 0,3 – 1,5 м. При использовании малогабаритного кодового приемника Garmin GPS MAP 76S и кварцевого датчика давления СКО определения отметок высот находится в пределах 1 – 3 м в зависимости от применяемой методики проложения ходов и учета колебаний атмосферного давления [Прихода, 2003].

9. ПОГРЕШНОСТИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

9.1. Источники ошибок

Одна из самых трудных задач для геодезиста – оценка качества измерений. В спутниковых технологиях это особенно важно, поскольку сама техника измерений не является физически очевидным фактом, в отличие от измерений углов, расстояний или превышений традиционными методами. Геодезист вынужден полностью полагаться на аппаратуру, средства обработки, и надежность их работы не должна вызывать сомнений при выполнении определенных требований.

Как и в обычных геодезических измерениях, в ГЛОНАСС/GPS технологиях можно выделить четыре основных источника ошибок:

– ошибки наблюдателя (неточное измерение высоты антенны, ошибки центрирования, ошибки в показаниях метеоаппаратуры);

– ошибки аппаратуры, к которым относятся ошибки фазовых и кодовых отсчетов, характеризующих шум аппаратуры, ошибки в измеренных временных задержках или поправках часов как на спутнике, так и в приемнике, нестабильность фазовых центров антенн;

– влияние внешних условий по трассе распространения сигнала (неоднородности тропосферы и ионосферы, многопутность, интерференция, ослабление сигналов из-за препятствий, влияние магнитных бурь);

– ошибки математической обработки (слабая геометрия созвездия спутников, ошибки орбит и априорных координат начала базовой линии, ошибки геофизических моделей или стохастических моделей).

Ошибки наблюдателя очевидны и здесь рассматриваться не будут.

Кратко вернемся к классификации ошибок измерений, как шумов (случайных ошибок) или смещений (систематических ошибок). К шумам обычно относят быстро изменяющиеся ошибки, которые усредняются до нуля на «коротком» интервале времени, где понятие «короткое» определяется в сравнении со временем накопления или временем процесса сглаживания измерений в приемнике (разделы 7.4.2 и 7.4.3). Шум приемника отвечает этим требованиям. Ошибки дальности из-за многопутности являются квазисинусоидальными, и их также можно рассматривать как шум на интервалах в десятки минут и более. Для моментальных измерений (кинематические режимы) многопутность будет вносить случайную ошибку. Ошибки из-за задержки в распространении сигнала в ионосфере и тропосфере, исправленные или не исправленные в соответствии с моделями, могут сохраняться десятки минут или дольше. Ошибки от часов спутника (после отмены режима селективного доступа) и эфемерид также изменяются медленно, и их, подобно ошибкам распространения, можно классифицировать как смещения. Влияние ошибок среды распространения, ошибок часов спутника и эфемерид должно также усредняться до нуля, но это может занимать несколько суток и даже недель [Misra, Enge, 2001]. Игнорирование этого факта приводит к тому, что результаты обработки показывают прекрасную точность по

внутренней сходимости, но значительно превосходящие ошибки по внешней сходимости.

Некоторые из перечисленных источников ошибок уже упоминались ранее, и они будут рассмотрены кратко в контексте их влияния на абсолютное, дифференциальное и относительное позиционирование, в то же время подробнее будут рассмотрены другие специфические источники ошибок, которые пока не затрагивались.

9.2. Ошибки аппаратуры

9.2.1. Шумы приемника

Шумы данных, полученных при измерениях, дают наименьший вклад в бюджет ошибок. Шум в приемнике может быть теоретически вычислен по коэффициенту усиления антенны, силе сигналов спутников и температурным шумовым характеристикам приемника и окружающей его среды. Шум данных зависит от высоты топоцентрического направления на спутник, поскольку от этого изменяются коэффициент усиления в антенне и потери в силе сигнала из-за ослабления в атмосфере Земли, а также от времени осреднения в приемнике. Один из методов экспериментального определения шума данных заключается в сравнении фаз или псевдодальностей, измеренных двумя приемниками, работающими от одной антенны. Такие тесты показывают, что шумы фазовых измерений на частотах L1 и L2 имеют уровень от 1 до 5 мм, но часто содержат систематическую составляющую. Эта специфическая ошибка не влияет на геодезические измерения, поскольку исключается в двойных разностях, но она должна тщательно исследоваться и учитываться при измерениях ионосферной задержки [Teunissen et al., 1998].

К. Ризос дает простое правило для оценивания величины шума: около 1% от длины волны сигнала, что соответствует:

- 3 м для C/A-кода (стандартного кода);
- 0.3 м для P(Y)-кода (точного кода);
- 2 мм для фазы несущей [Rizos, 1999].

Применение узких корреляторов позволяет превратить C/A-кодовый приемник в P-кодовый, то есть уменьшить уровень шума почти на порядок [van Dierendonck et al., 1992]. Сглаживание псевдодальности измерениями фазы несущей уменьшает уровень шума в два раза [Misra, Enge, 2001].

9.2.2. Влияние многопутности и положения фазового центра

Ошибка из-за многопутности в GPS-приемниках должна рассматриваться как соответствующий вклад в измерение фазы или псевдодальности от отраженных сигналов. Одним из лучших признаков присутствия многопутности является амплитуда принятых сигналов, которая будет колебаться при наличии многопутности. Существующие версии формата RINEX обмена спутниковыми данными не позволяют записывать амплитуду с достаточным числом значащих цифр, иначе было бы возможно выявлять и корректировать сигналы, пораженные многопутностью. Другим индикатором многопутности является повышенный уровень невязок в геометрически замкнутых построениях.

Обычно ошибка из-за многопутности медленно изменяется в течение сеанса, и тогда она может исключаться при усреднении. В коротких сеансах наблюдений (до 20-30 минут, в зависимости от высоты антенны и скорости изменения угла высоты) или при некоторых явлениях, как, например, начавшийся снегопад, многопутность не усредняется до нуля, и это может серьезно влиять на результаты наблюдений. Особенно это опасно для кинематических и быстростатических съемок, где время наблюдений не превышает нескольких минут. В таких случаях могут иметь место ошибки в десятки миллиметров, и если требования к точности высокие, то лучше воспользоваться косвенным методом передачи координат. В этом случае антенна располагается не на самом пункте, а на ближайшей к нему точке, где многопутность значительно меньше, и определяются элементы приведения [Генике, Ву Ван Донг, 2004а, 2004б].

Одним из главных компромиссов в проектировании всенаправленных антенн GPS приемников является поддержание сравнительно высокого усиления на малых высотах и применение антенн с дроссельными кольцами. Многопутность трудно охарактеризовать в целом, поскольку ее амплитуда и фаза зависят от многих параметров, хотя часть из них достаточно постоянна. Это дает возможность наблюдать многопутность, повторяющуюся ежедневно, в соответствии с повторяемостью орбит СРНС. На постоянно действующих станциях некоторые исследователи предлагают ослаблять влияние многопутности посредством образования фазовых разностей через звездные сутки [Schmitz et al., 2002] или посредством применения алгоритма фильтрации [Ge et al., 2000].

Трудности в обеспечении точного соотношения фазового центра с геометрическим центром не позволяют GPS быть истинно универсальным миллиметровым средством измерения, даже на коротких расстояниях, несмотря на высокую точность разрешения измерений фазы несущей. Для уменьшения изменений фазы и проблемы фазового центра изготовители обычно рекомендуют использовать антенны одного типа, которые должны быть согласованно ориентированы в одном направлении. Однако на длинных базовых линиях полной компенсации ошибок у одинаковых антенн не происходит. Некоторые из погрешностей антенны зависят от применения, например, кинематика в воздухе (на самолете) с опорным приемником на Земле. Здесь очень желателен одинаковый фазовый отклик, то есть сферическая диаграмма направленности. Она входит в конфликт с необходимостью делать антенну «слепой» для малых высот с целью уменьшения ее чувствительности к многопутности сигналов.

В качестве еще одного средства, обеспечивающего исключение ошибок фазового центра при использовании разнотипных антенн, иногда применяют наблюдение базовой линии двумя приемами, между которыми приемники с антеннами меняют местами. Наблюдения должны производиться по одним и тем же созвездиям спутников, то есть в разные дни с учетом изменения времени появления спутников.

Для учета влияния изменения положения фазового центра производится специальная калибровка антенн (см. раздел 5.3.3). Некоторые фирмы,

производящие спутниковую аппаратуру, имеютвключают в программном обеспечении опции для включения в обработку результатов калибровки, и при их наличии возможно исправление результатов измерений [Geiger, 1988; Teunissen et al.,1998; Leick, 1995].

9.2.3. Влияние ошибок времени

Основная часть ошибок часов приемника и спутника исключается при формировании двойных разностей или при оценивании поправки часов, изменяющихся по случайному закону. В то же время, есть зависимость геодезических измерений от действительного времени, в которое производились измерения, из-за нелинейности геодезической задачи определения координат. Величина ошибок, связанных с неправильным согласованием времени квантования сигналов GPS, может быть вычислена по доплеровскому сдвигу сигналов и обычно составляет около 1 мм для ошибки времени в 1 мкс. Хотя такие требования определения времени спутниковый приемник легко выполняет, встречаются случаи, когда этого не происходит. Эти случаи распознаются как одиночные отскоки в двойных разностях при отсутствии возмущений в величине ионосферной задержки, полученной из разностной комбинации фаз. Такое поведение приемника согласуется со случаем, когда он делает измерения в моменты, отличающиеся от объявленных моментов. Общее влияние ошибки такого типа мало, за исключением ситуаций, когда приемник неправильно разрешает миллисекундную неоднозначность C/A-кодовых псевдодальностей, при которых становится почти невозможно определить, где было сделано измерение. Когда это имеет место, данные почти всегда подлежат отбраковке. Ошибка должна устраняться в приемнике на стадии первичной обработки сигнала, когда еще есть возможность повторить измерения в поле [Leick, 1995].

9.3. Остаточное влияние атмосферы

Ионосфера является диспергирующей средой, то есть задержка сигнала I_τ (в единицах времени) изменяется с частотой следующим образом:

$$I_\tau = \frac{40.3}{cf^2} \int_0^{Sat.} N dl , \qquad (9.1)$$

где $\int_0^{Sat.} N dl$ суммирует число свободных электронов вдоль пути радиоволны l от точки наземных измерений до спутника, обычно называемое наклонным полным содержанием электронов (TEC) вдоль этого пути; c – скорость света, в м/с; f – рабочая частота системы, в Герцах. Типичные числа для TEC в земной ионосфере находятся в пределах $10^{16} – 10^{19}$ эл./м^2. Широта изменений в TEC – примерно три порядка величин, – происходит из-за многих факторов, среди которых – время суток, время года, положение станции и солнечное ультрафиолетовое ионизирующее излучение.

Выражение (9.1) может быть представлено как

$$I_\tau = \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f^3} + \frac{C}{f^4} + \cdots , \qquad (9.2)$$

где A, B, C – коэффициенты, характеризующие свойства среды распространения радиоволн. Для сигналов средневысотных СРНС вторым и третьим членами в (9.2) пренебрегают. Для частоты 1.5 ГГц их вклад не превосходит, соответственно, 0.08 нс и 0.25 нс, что соответствует 2.4 и 7.5 см [Болдин и др., 1999].

Основные способы учета ионосферной задержки:

– проигнорировать ее вообще; в абсолютном методе это дает ошибку в расстоянии до 20 – 30 м и более;

– использовать модель навигационного сообщения из восьми параметров, позволяющую учесть до 50% от величины поправки. Современные ионосферные модели, требующие сотен коэффициентов, обеспечивают остаточное смещение примерно в 10%;

– учитывать в дифференциальных поправках, это дает погрешность до 0.1 – 0.2 м при расстоянии до 100 км;

– образовывать комбинацию псевдодальностей или фаз, свободную от влияния ионосферы. Остаточная погрешность в расстоянии по фазовым данным – не более сантиметра.

Применяются и другие методы моделирования, как, например, стохастическое моделирование [Delikaraoglou, 1989], но распространения в коммерческих программах они не нашли.

Тропосферная задержка в расстоянии намного более постоянная, обычно изменяется менее чем на 20% по всей Земле. Это происходит из-за того, что примерно 90% тропосферной задержки в расстоянии представляет так называемую сухую (более строго гидростатическую) составляющую земной тропосферы, которая пропорциональна полному давлению и абсолютной температуре. К счастью, ни абсолютное давление, ни абсолютная температура не изменяются более, чем на несколько процентов от номинальных абсолютных величин.

Основой для большинства тропосферных моделей является объединенное значение для зенитной задержки, которая состоит из гидростатической, или «сухой», составляющей и влажной составляющей из-за содержания в атмосфере паров воды. Для не зенитных направлений сумма сухой и влажной задержек умножается на функцию отображения, которая связывает зенитную задержку в расстоянии с задержкой на более низких высотах. Поскольку функции для каждого угла высоты в некоторой степени различны, большинство из них просто требуют, чтобы зенитная задержка была указана, а затем умножена на число, которое является функцией угла высоты. Существуют климатологические методы для назначения вертикальной задержки, а также методы для определения действительной задержки по сделанным почти в реальном времени измерениям давления, температуры и содержания паров воды, как и другие методы для использования точных двухчастотных данных от нескольких GPS приемников на различных высотах и уравнивания наблюденных значений задержек, наилучшим образом подходящих к заданным углам высоты в данное время. В этом методе объявляются точности порядка 1-2 см в расстоянии до спутника.

Одна из многих форм зенитной задержки, в которой гидростатическая зенитная составляющая $T_{z,h}$ и влажная зенитная составляющая $T_{z,w}$ разделены, и в которой локальная температура, давление и содержание паров воды можно учесть, имеет вид

$$T = T_{z,h} \cdot m_h(E) + T_{z,w} \cdot m_w(E), \qquad (9.3)$$

где $m_h(E)$ и $m_w(E)$ – зависящие от высоты спутника над горизонтом E функции отображения. При типичных значениях для давления 1 013 мбар и температуре 15°C или 288K и для относительной влажности 50% полная зенитная задержка имеет значение

$$T_z = 2.18 + 0.08 = 2.26 \text{ м}.$$

Для высоты E = 5° все составляющие увеличиваются примерно в 10 раз. При этом «влажный» компонент составляет только 3.5% от полной задержки.

На рис. 9.1 из статьи [Klobuchar, Kunches, 2003] показаны задержки в зависимости от угла высоты для земной тропосферы и для средне-широтной ионосферы для частоты GPS L1 при разных условиях солнечной активности. Отметим несколько важных фактов, наблюдаемых на рис. 9.1. Во-первых, тропосферная задержка на больших углах высоты подобна ионосферной задержке в средних широтах для условий минимума солнечной активности. Во-вторых, изменения в задержке от направления в зенит до минимальной высоты 5° происходят с увеличением в 3 раза для ионосферы, но в 10 раз для тропосферы. Это объясняется тем, что тропосфера начинается от земной поверхности, в то время как пик плотности ионосферы приходится на высоту около 250 – 300 км. Таким образом, увеличение толщины слоя тропосферы происходит быстрее, чем у ионосферы, которая находится на большей высоте. Наконец, обратим внимание на приближенное значение ошибок определения задержек 1σ (на рис. 9.1 они отмечены штрихами). Ошибка в ионосферной задержке по ежемесячным средним условиям в течение всего времени суток, независимо от времени года и уровней солнечной и геомагнитной активности, составляет около 25%. Для тропосферы эта ошибка меньше 5% от величины задержки.

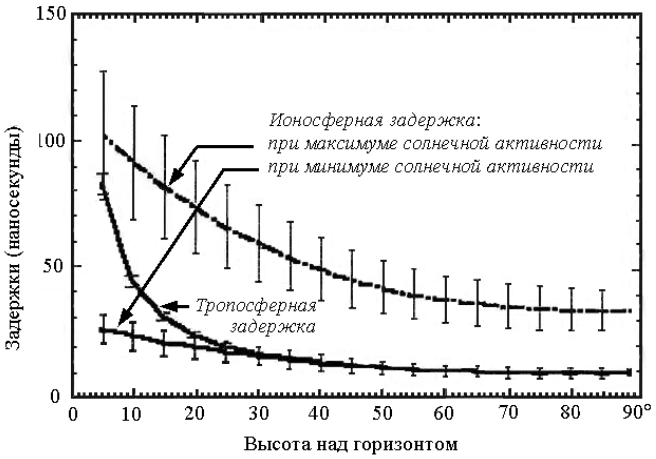


Рис. 9.1. Сравнение ионосферной и тропосферной задержек и их ошибок для средних широт и средних условий на разных высотах [Klobuchar, Kunches, 2003]

Разработано множество способов учета тропосферной задержки, которые можно разделить на две группы (рис. 9.2). В первой из них задержка вычисляется по некоторой внешней информации и вводится в измерения в соответствии с некоторой моделью (Хопфильд, Саастамойнена и др., см. раздел 6.3). Этот метод обычно реализуется в коммерческом программном обеспечении. Вторая группа способов учета влияния тропосферы использует сигналы СРНС как средство дистанционного зондирования, в них параметры тропосферы определяются из обработки GPS/ГЛОНАСС измерений.

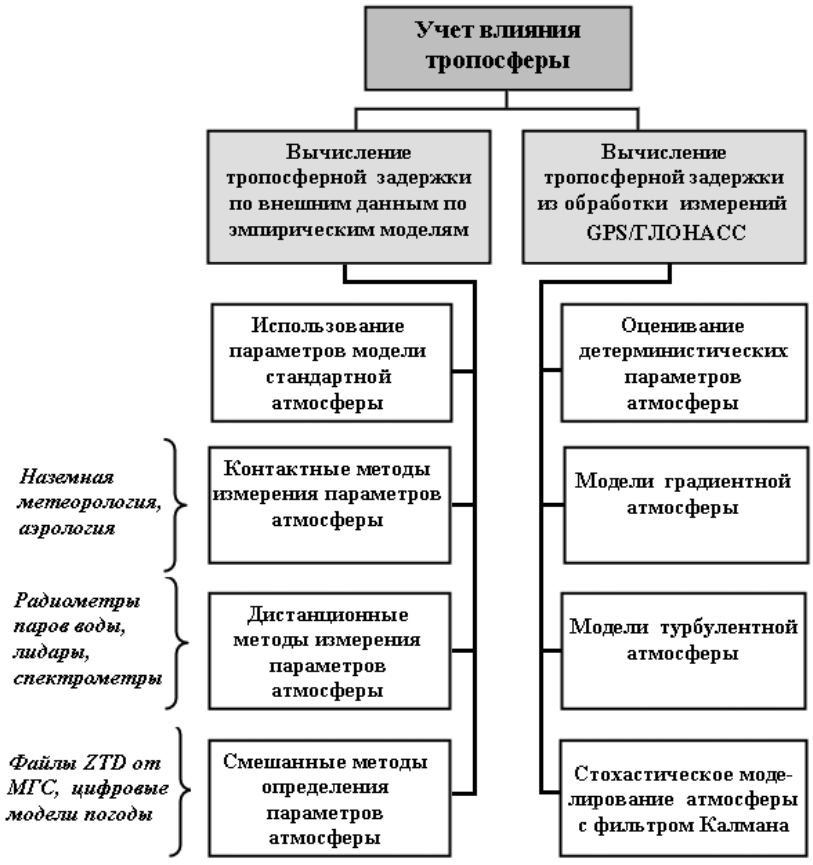


Рис. 9.2. Способы учета тропосферной задержки

В зависимости от применяемого метода позиционирования, можно ожидать различные смещения в координатах. Если не учитывать тропосферную поправку в абсолютных определениях, то это дает ошибку в расстоянии до спутника от 2.5 м в зените и до 25 м на высоте 5°; полученные высоты пунктов будут завышены относительно их истинных значений. Величина смещения пункта по высоте примерно пропорциональна функции отображения для угла отсечки по высоте (коэффициент потери точности VDOP в данном случае использовать нельзя, так как он связан с геометрией засечки и действием случайных ошибок). В итоге получаем смещение в высоте пункта в 25 м при маске высоты 5°. Эти ошибки обычно не столь важны для наземной и морской навигации, но для воздушной навигации являются большой проблемой, особенно на фазе посадки воздушных судов. Именно это побудило канадских ученых разработать для авиации специальную модель тропосферной задержки UNB3. Распределение невязок модели UNB3 характеризуется нулевым средним со стандартной ошибкой σ = 5 см. Нормальное распределение довольно хорошо характеризует невязки модели UNB3 примерно до $\pm 4\sigma$, где величина остаточных невязок почти точно равна ±20 см. Ошибка определения высоты оказывается на уровне 0.5 м при маске высоты 5° [Collins, Langley, 1999].

В дифференциальном методе позиционирования вычисленная на опорной станции тропосферная поправка для мобильной станции может оказаться ошибочной на 10 – 20 см при расстояниях между приемниками более 10 км [Misra, Enge, 2001].

Обработку фазовых дифференциальных и относительных определений производят в соответствии с некоторой моделью поправок, основанной на Стандартной атмосфере. Остаточная ошибка в расстояниях до спутника зависит от несовпадения модельной атмосферы с реальными условиями, расстояния между пунктами и разности высот между ними. Как правило, этот метод обеспечивает относительную ошибку в базовой линии на уровне $2 \cdot 10^{-6}$. Если требуется более высокая точность, то тропосферная задержка вводится в соответствии с некоторой моделью поправок по измеренным метеопараметрам (температуре, давлению, влажности). Точность учета влияния определяется способом измерения: контактным (наземные измерения, аэрологические измерения) или дистанционным (применение радиометров паров воды, лидаров). Чем точнее способ измерений, тем он становится дороже. Наиболее совершенные методы дистанционного зондирования обеспечивают определение задержки с точностью примерно до 6 мм.

Определение тропосферной задержки в процессе обработки измерений используется в научных программах и в некоторых коммерческих программах обработки. Добавление лишних неизвестных обычно ухудшает точность определения основных параметров при недостаточной продолжительности сеанса. Для использования результатов обработки станций МГС или цифровых моделей погоды типа американской MAPS [Marshall et al., 2001] или европейской NWP [Jensen et al., 2002] необходимо специальное программное обеспечение.

Обилие разработанных методов подтверждает тезис о том, что учет влияния тропосферы остается одним из самых трудных факторов при высокоточных измерениях [Bock, Doerflinger, 2000; Vollath et al., 2003; Kleijer, 2004; Gurtner et al., 1989].

Главное влияние ионосферы и тропосферы в абсолютном методе – это ошибки в высотах пунктов, а в относительном методе в малых сетях – это влияние на масштаб. Полное пренебрежение атмосферой ведет к расширению сети. В несколько упрощенном виде ошибку в масштабе из-за атмосферного сдвига в ΔR метров в направлении зенита можно записать:

$$\frac{M_D}{D} = \frac{1}{\cos(z_{\max})} \cdot \frac{\Delta R}{R}, \qquad (9.4)$$

где $z_{\max}$ – максимальное зенитное расстояние; R ≈ 6.4 · 10^6 м – земной радиус. Для $z_{\max}$ = 70° приближенно

$$\frac{M_D}{D} = 0.4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta R. \qquad (9.5)$$

Не моделируемые смещения из-за ошибок в учете тропосферной задержки (в направлении зенита), общие для всех станций сети, должны быть меньше, чем, скажем, 5 см, если давление, температура и влажность измерены на всех станциях. Таким образом, можно заключить, что ошибка масштаба, вводимая атмосферой в результаты двухчастотных измерений, в малых сетях, в общем меньше, чем 0.2 · 10^{-6} [Beutler et al., 1989].

Корреляция в gps измерениях

Обработка данных GPS включает вычисление значений неизвестных параметров по набору измерений или наблюдений, предварительно объединённых некоторыми мерами, которые выражают качество значений оцениваемых параметров. Несомненно, оценивание по МНК создаёт наиболее популярную методику для получения нужных оценок. Возможно усиление этого метода в «пакетном» алгоритме, чтобы определить полный вектор неизвестных параметров в едином математическом процессе, используя все наблюдения одновременно.

Альтернативно можно применить фильтр Калмана, который представляет рекурсивный алгоритм МНК. Этот процесс позволяет оценивать основанные на времени параметры, выводя их из наблюдений вплоть до момента вычисления. Следовательно, Калмановская фильтрация особенно подходит для навигационных применений (в реальном времени).

Если нам нужно вычислить оценки параметров в соответствии с (взвешенными) критериями МНК, мы должны указать (специфицировать) *детерминистическую* или *функциональную* модель, которая описывает соотношения между наблюдениями (псевдодальностями и фазами) и неизвестными параметрами, включая координаты, возможные атмосферные задержки, а также такие «мешающие» параметры, как ошибки часов и фазовые неоднозначности. Хотя может оказаться, что нам не нужно знать ошибки часов или фазовые неоднозначности, эти параметры должны явно участвовать в модели, чтобы получить точные величины для тех параметров, которые мы должны определить.

В дополнение к функциональной модели нам необходима *стохастическая модель*, чтобы описывать характеристики шума наблюдений. Для этой цели служит ковариационная матрица. Эта матрица описывает и точность, и корреляцию (взаимозависимость) наблюдений псевдодальностей и фаз. На главной диагонали находятся дисперсии (корень квадратный из дисперсии даёт стандартное отклонение, или стандартную ошибку, или среднюю квадратическую ошибку), а недиагональные элементы являются ковариациями (из которых легко получаются коэффициенты корреляции). Чтобы получать оптимальные результаты оценивания, в алгоритме МНК должна функционировать обратная ковариационная матрица наблюдений как весовая матрица.

Корреляции выражают взаимную зависимость между переменными. Для двух переменных *x* и *y* с линейной связью корреляция выражается как:

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \qquad (9.6)$$

где:

- σ_x – стандартное отклонение для *x*;
- σ_y – стандартное отклонение для *y*;
- σ_{xy} – ковариация между *x* и *y*.

Величина коэффициента корреляции лежит в диапазоне между -1 и +1. Когда корреляция двух переменных приближается к максимуму в ±1, об этих переменных говорят, что они *сильно коррелированны*. Корреляция не означает, что изменение в одной величине обязательно вызывает изменение в другой, хотя это может быть. Во многих случаях внешние влияния могут воздействовать на обе переменные одинаковым образом. Есть два типа корреляции, встречающейся в спутниковых измерениях: *физическая корреляция* и *математическая корреляция***.**

Физическая корреляция относится к корреляции между действительными полевыми измерениями. Она возникает из-за природы измерений, а также метода их выполнения. Если различные наблюдения или ряды наблюдений подвержены общим внешним влияниям, то о них говорят, что они физически коррелированны. Следовательно, одни и те же наблюдения, сделанные в одно и то же время, можно рассматривать как физически коррелированные, поскольку измерения содержат подобные влияния атмосферных условий и ошибок часов.

Математическая корреляция относится к параметрам математической модели. Ее можно разделить на два вида, которые соответствуют двум компонентам математической модели уравнивания: функциональная корреляция и стохастическая корреляция.

При функциональной корреляции несколько величин используют один и тот же параметр в модели наблюдений, и на них влияют ошибки этого параметра. Примером функционально коррелированных величин является ошибка поправки часов в модели однопутных наблюдений, используемой для

учета физической корреляции, вводимой в измерения часами приемника и/или ошибками часов спутника.

Стохастическая корреляция (или *статистическая корреляция*) происходит между наблюдениями, когда в ковариационной матрице наблюдений присутствуют отличные от нуля недиагональные элементы. Эта корреляция также встречается тогда, когда рассматриваются функции наблюдений (например, при образовании разностей фаз) из-за правила передачи дисперсий. Однако, даже если ковариационная матрица наблюдений является диагональной (без стохастической корреляции), ковариационная матрица, полученная из оценивания параметров по методу наименьших квадратов, будет обычно полной матрицей, и поэтому будет показывать стохастические корреляции.

Точность положения пункта в абсолютном методе является функцией точности наблюденных величин в функциональной модели. Из-за погрешностей в положении спутника, ошибок часов приемника и спутника и в задержках в распространении сигнала абсолютное положение пункта при использовании псевдодальностей будет иметь точность не лучше нескольких метров (и даже десятков метров). Однако источники ошибок в системе GPS и ГЛОНАСС (орбиты спутников, часы спутников и приемника, распространение в атмосфере и т. д.) будут проявлять некоторую *физическую корреляцию* между сигналами, принятыми на нескольких станциях, которые одновременно наблюдали тот же самый набор спутников. Поэтому для геодезических применений необходимо использовать относительный или дифференциальный метод, в котором два или более приемников должны наблюдать одновременно одни и те же спутники. Эти физические корреляции тогда можно моделировать как общие члены смещений в функциональной модели. При использовании математических операций, таких, как образование разностей параметров наблюдений, эти эффекты можно исключать или значительно ослаблять, добиваясь сантиметровой точности. По мере того, как расстояние между станциями становится длиннее, будет ослабевать физическая корреляция от ошибок орбит и атмосферных задержек.

Фундаментальная проблема, с которой сталкиваются, когда выполняют операции вычитания, – это точно и всесторонне определить, в какой мере элементы являются коррелированными и насколько хорошо их можно моделировать. Физические корреляции по природе могут быть пространственными и временными или теми и другими одновременно. Примерами этого являются рефракционные задержки, которые испытывают микроволновые сигналы спутников при их прохождении через ионосферу и тропосферу. Эти задержки являются значительным источником пространственной и временной физической корреляции, которую трудно учитывать.

На основе экспериментальных данных А. Эль-Раббани вывел экспоненциальную ковариационную функцию, которая описывает *временную физическую корреляцию*:

$$r(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right), \qquad (9.7)$$

где $r(\tau)$ – коэффициент корреляции для временного отставания в τ (секунд), а T – временная длина корреляции (в секундах). Типичное значение T составляет около 250 – 350 секунд, то есть данные, собранные через 350 секунд и более с одного и того же приемника на один и тот же спутник, можно рассматривать как полностью некоррелированные (коэффициент корреляции для них будет равен 0). Значения $r(\tau)$ для различных темпов сбора данных (интервалов между эпохами) по формуле (9.7) равны: 0.996, 0.981, 0.944, 0.891, 0.794 – для интервалов τ, равных, соответственно, 1, 5, 15, 30, 60. Следовательно, если считать темп сбора данных постоянным, то коэффициент корреляция между двумя эпохами можно выразить как:

$$r(i) = r(1)^i . \qquad (9.8)$$

Например, при интервале сбора данных в 15 секунд $r(1) = 0.944$, и коэффициент корреляции для данных между последовательными эпохами равен 0.944, но он равен 0.944^2 для двух наборов данных через 30 секунд и 0.944^3 для двух наборов данных через 45 секунд и т. д. Следовательно, временная корреляция уменьшается по мере увеличения интервала между данными. Такую эмпирически выведенную корреляцию невозможно ввести в ковариационную матрицу однопутных наблюдений, и коммерческое программное обеспечение обычно не учитывает ее. Это приводит к тому, что точность базовых линий оказывается завышенной.

При *образовании разностей* исходные наблюдения фазы несущей и их математическая модель модифицируются, следовательно, в полученных параметрах наблюдений присутствует *математическая корреляция.* Это означает, что и математическая, и стохастическая модели изменяются (см. раздел 7.2). Новая математическая модель уже приводилась как уравнение (7.56) а ее ковариационная матрица дается уравнением (7.74).

Поскольку процесс образования двойных разностей вводит математическую корреляцию в полученные наблюдения, то чтобы обеспечить математическую эквивалентность между обработкой двойных разностей и обработкой фаз без образования разностей («не разностных» фаз или нулевых разностей), необходимо образовывать ковариационную матрицу наблюдений двойных разностей, которая выражает корреляции между параметрами наблюдений. На практике не обязательно вычислять ковариационные матрицы на каждую эпоху, поскольку они изменяются только при изменении комбинаций «спутник – приемник», используемых для образования двойных разностей. Данные тройных разностей также математически коррелированны.

В большинстве коммерческих пакетов программ математической корреляцией, возникающей из-за вычитания, обычно пренебрегают, и для двойных и тройных разностей используются диагональные матрицы. Влияние этого упрощения на уравнивание данных обычно мало для коротких базовых линий, возможно $(1 \div 2) \cdot 10^{-6}$. Игнорирование математических корреляций в двойных разностях, образованных при одновременных наблюдениях более чем двумя приемниками (двух или более независимых базовых линий) является главным различием между обработкой одинарных базовых линий и многих

базовых линий (обработка наблюдений multi-baseline) [Rizos, 1999; Tiberius et al., 1999; Schaffrin and Zieliñski, 1989; Капилевич, 2003].

9.4. Точность позиционирования по кодовым псевдодальностям

Для оценки точности определения координат или времени по спутникам СРНС используется формула

$$\sigma_i = \sigma_0 DOP , \qquad (9.9)$$

где σ_i – стандартная ошибка, характеризующая точность положения в плане, по высоте или по времени, а σ_0 – стандартная ошибка единицы веса, характеризующая точность измерения псевдодальности (или фазы). Последняя может быть оценена, исходя из анализа точности измерений и их обработки.

Составляющие дальномерной погрешности можно разделить на три группы:

– погрешности, вносимые навигационным спутником и подсистемой контроля и управления;

– погрешности, вносимые на трассе распространения сигнала от спутника к приемнику;

– погрешности, вносимые в приемнике.

Первая группа ошибок включает в себя: погрешности частотно-временного обеспечения, вызванные нестабильностью частоты опорного генератора спутника, неточной привязкой бортовой шкалы времени к шкале системного времени, погрешностями модели ухода часов. Эта часть ошибок обычно обозначается как «ошибки часов спутника». Дополнительный вклад вносит неполный учет релятивистских и гравитационных эффектов.

Эфемеридные погрешности вызываются неточностью определения параметров орбиты на станциях слежения ПКУ, ошибками прогнозирования орбиты, увеличивающимися с увеличением «возраста» данных, и ошибками интерполирования относительно расчетных точек орбиты, даваемых в навигационном сообщении. Погрешности эфемерид *i*-го спутника образуют вектор $M_E = (m_S, m_T, m_W)^T$, в котором m_S, m_T, m_W – соответственно, его радиальная, трансверсальная и бинормальная составляющие. Их значения для СРНС GPS при отсутствии режима выборочной доступности составляют от 0.6 до 10 м. Наибольшие из них – m_T и m_W – входят в погрешность псевдодальности с коэффициентом не более 0.25, а радиальная компонента m_S, равная 0.6 – 2.0 м, входит полностью. В итоге, вклад средней квадратической ошибки M_E для GPS составляет 1 – 3 м. В системе ГЛОНАСС составляющая псевдодальности от ошибок часов и орбиты составляет 9.2 м [Болдин и др., 1999].

Кроме указанных погрешностей, выделяют еще один вид ошибок дальномерных измерений с однопутным прохождением сигнала: групповую задержку навигационного сигнала в аппаратуре, представляющую собой задержку между выходным навигационным сигналом и выходным сигналом бортового эталона времени и частоты. Случайная составляющая этой величины для системы GPS не превышает 2 нс [Wilson et al., 1999].

Вторая группа ошибок вызвана неточным знанием условий распространения сигнала на трассе «НС – приемник». Сюда относят погрешности определения тропосферной и ионосферной задержек и многопутность принимаемых сигналов. Учет преломления радиоволн в тропосфере производится путем моделирования. Остаточные погрешности моделирования тропосферы составляют единицы наносекунд. Влияние ионосферы для одночастотных измерений моделируется, как правило, по данным навигационного сообщения. Считается, что точность этой модели составляет около 50%. Поэтому остаточные погрешности могут доходить до 10 и более метров. Двухчастотные измерения позволяют почти полностью исключить влияние ионосферы.

Влияние многопутности зависит от взаимного расположения спутника, приемной антенны и отражающих поверхностей. Многочисленные эксперименты показали, что погрешность в дальности может колебаться от 0.5 – 2.0 м в лучшем случае до 100 м в неблагоприятных ситуациях (около высоких зданий). Использование специальных антенн, узкополосных корреляторов и других способов первичной обработки сигнала позволяет уменьшить влияние этого фактора.

Погрешности, вносимые приемником сигналов GPS, складываются из шумов измерений, зависящих от типа сигнала (C/A-код или P-код), погрешностей квантования, погрешностей хода часов.

Примерные значения ряда погрешностей приведены в табл. 9.1. Суммарное влияние различных факторов дается в виде *эквивалентной погрешности измерения дальности*, или UERE (User Equivalent Range Error). Однако наиболее существенным источником ошибок для гражданских пользователей является режим SA – выборочной доступности системы NAVSTAR. Чтобы иметь возможность оценивать точность положения по четырем спутникам, используется информация об априорной точности измерений в виде величины *URA – пользовательской точности псевдодальности*. Она приводится в навигационном сообщении спутников GPS и при включенном режиме SA равнялась 32 м. С 1 мая 2000 г. Министерство обороны США отменило режим выборочной доступности. Это привело к значительному улучшению точности абсолютных определений. Величина *URA* после отмены режима находится в пределах 2 – 5 м, а точность определения положения в плане обычно находится в пределах 5 м.

Таблица 9.1. Оценки значений ошибок в измерениях псевдодальностей в абсолютном и дифференциальном методе GPS

№ п/п	Источники ошибок	Абсолютный метод		Дифференциальный метод	
		Стандарт-ный код	Точный код	Стандарт-ный код	Точный код
1	Ошибки часов спутника	3.0	3.0	0	0
2	Ошибки эфемерид	2.0	2.0	0	0
3	Ионосферная задержка	3.5	2.3	0.1	0.1
4	Тропосферная задержка	0.4	0.4	0.1	0.1
5	Шумы в приемнике, ошибки квантования	1.5	0.2	1.5	0.25
6	Межканальные сдвиги в приемнике	0.6	0.15	0.6	0.15
7	Многопутность	1.2	1.2	1.2	1.2
8	Суммарная ошибка UERE	5.4	4.5	2.0	1.2

В дифференциальном методе опорный и полевой приемники измеряют псевдодальности до одних и тех же спутников. Одна группа ошибок измерений у них оказывается общей, другая – индивидуальной для каждого приемника. К первой группе ошибок относятся ошибки часов и эфемерид спутника, ошибки тропосферной и ионосферной задержек. Ошибки второй группы – это влияние многопутности, шумы в приемнике, ошибки квантования. Предполагается, что ошибка часов приемника достаточно надежно определяется и исключается из общего числа ошибок.

С увеличением расстояния между базовым и полевым приемниками имеет место ослабление корреляции ошибок эфемерид из-за разностей в углах, под которыми наблюдается спутник с разных точек. Исследования показывают, что наиболее неблагоприятен случай, когда вектор ошибок эфемерид направлен вдоль орбиты. При расстоянии между приемниками 200 км дополнительная ошибка в положении полевого приемника в 0.5 м возникает при увеличении ошибки эфемерид вдоль орбиты на каждые 100 м. Из-за изменений в атмосфере нарушается корреляция и в ионосферных задержках. Ослабление корреляции в тропосферной задержке может происходить еще быстрее, поскольку связано с более низкими слоями атмосферы. Оценка неодинаковости ионосферной задержки приводит к ошибке положения порядка 1 м при удалении приемников на 500 км. Тропосферные задержки можно считать одинаковыми, когда приемники находятся на одинаковой высоте и сравнительно близко (до 100 км). Полагают, что ионосферные и тропосферные задержки имеют некоррелированные ошибки режима, которые объединяются в общую остаточную ошибку. Ошибки из-за шумов приемников, квантования и многопутности остаются такими же, как и в навигационном абсолютном режиме (табл. 9.1). Однако, ошибки, связанные непосредственно с аппаратурой, со временем уменьшаются из-за ее непрерывного совершенствования. Это же

касается влияния многопутности. Считается, что многопутность при определении по кодам не должна вызывать ошибку более 1 м. Следует также отметить, что здесь определенную роль играет искусство наблюдателя выбирать места с меньшей многопутностью. При малых ошибках эфемерид, шумов приемника и многопутности основное влияние будут оказывать нескомпенсированные ионосферные ошибки.

Было проведено достаточно много исследований, чтобы оценить точность и абсолютного, и дифференциального методов позиционирования. При этом чем раньше выполнялись исследования, тем давались более грубые оценки точности, то есть явно прослеживается прогресс в работе Космического и Контрольного сегментов (повышение точности эфемерид), в конструкции аппаратуры (цифровая обработка сигнала, узкие корреляторы, уменьшающие влияние многопутности, концепция all-in-view). В табл. 9.1 даются значения ошибок, взятые из «Руководства для инженеров по системе Navstar» (www.css.cornell.edu/courses/465/gps.pdf), среди которых только было уменьшено влияние ошибок эфемерид.

Чтобы получить ошибки положения в плане, по высоте или по времени, необходимо умножить суммарную ошибку в псевдодальности на ожидаемую величину соответствующего коэффициента потери точности DOP. При наличии более чем 10 спутников, величина геометрических факторов не превышает единицы. На основании этого следует ожидать, что ошибки в плане будут не более 10 м в 95% случаев (2σ), а по высоте – не более 20 м.

Измерения с помощью современных навигационных приемников компаний Garmin, Haicom показывают, что реальная точность и в статике, и в кинематике несколько лучше. По данным, приведенным в работе [Tiberius, 2003], стандартная ошибка однократного определения положения в плане не превышает 4.8 м, а по высоте – 6.3 м. В режиме накопления данных с последующим усреднением можно добиваться субметровой точности координат. Однако средние координаты при хорошей внутренней сходимости могут иметь значительные (до метра и более) систематические ошибки.

Отмена режима SA не избавила от необходимости в дифференциальном методе GPS. Хотя точность позиционирования одиночного приемника стала значительно выше, такие точности не всегда гарантированы. Чтобы получать точности в плановом и высотном положении лучше, чем 5 м, необходимы дифференциальные поправки. Их можно получать через региональные источники, такие, как радиомаяки береговой охраны, или от широкозонных систем типа WAAS, EGNOS. Отключение режима SA означает, что DGPS могут не передавать поправки так часто, как ранее. Ошибки орбит спутников и часов и, в определенной степени, ионосферные задержки не изменяются так быстро, как ошибки из-за режима SA.

9.5. Точность позиционирования по фазе несущей

9.5.1. Влияние ошибок априорных координат начала базовой линии и ошибок орбиты

Одна из проблем, которая стоит перед геодезистом при обработке небольших GPS сетей с использованием коммерческих программ, заключается в назначении априорных координат начальной точки сети в системе WGS-84 или в другой геоцентрической системе. Перевод координат из системы СК-42 может привести к ошибкам в системе WGS-84 до 10 м [Макаренко и др., 2000]. При отсутствии такой возможности геодезист вынужден производить обработку базовых линий с координатами, полученными из навигационного решения, или из так называемого точечного позиционирования, когда результаты навигационных определений, записанные в файл измерений, усредняются на некотором интервале времени. Ошибка координат, полученных при навигационном решении, после отмены режима выборочной доступности может достигать 10 м и более. В режиме точечного позиционирования ошибка может быть уменьшена до 1 – 3 м на интервале несколько часов, но может при этом иметь значительную систематическую ошибку по высоте. Более точные координаты можно получить, передавая их от станций МГС [Антонович, 1997; Евстафьев и др., 1997].

Влияние ошибки положения спутника на орбите аналогично предыдущему эффекту. Геоцентрические радиус-векторы приемника $\mathbf{R}_A$ и спутника $\mathbf{r}^i$ используются в уравнениях поправок при линеаризации геометрических дальностей (раздел 7.1.6) в уравнениях псевдодальностей или фазы несущей, поэтому ошибки $\mathbf{dR}_A$, $\mathbf{dr}^i$ в соответствующих векторах сказываются на результатах обработки измерений.

Наиболее точное решение при относительных определениях координат фазовым методом дает уравнение двойной разности фаз, выраженной в линейной мере:

$$\Phi_{AB}^{ik} = (\Phi_B^k - \Phi_B^i) - (\Phi_A^i - \Phi_A^k), \qquad (9.10)$$

где индексы A и B относятся к пунктам наблюдений, а индексы i, k – к положениям спутников. Связь фазовых разностей с геометрическими дальностями выражается уравнением:

$$\Phi_{AB}^{ik} = (\rho_B^k - \rho_B^i - \rho_A^k + \rho_A^i) + \lambda \cdot (N_B^k - N_B^i - N_A^k + N_A^i). \qquad (9.11)$$

Здесь N – целые неоднозначности фазовых отсчетов (неизвестное число длин волн в момент первого измерения); λ – длина волны; ρ – геометрические дальности. Предполагается, что фазовые отсчеты, состоящие из дробной и непрерывной частей фазы, исправлены за влияние ионосферы, тропосферы и прочие факторы.

Зависимость двойной разности фаз от координат концов базовой линии можно найти путем дифференцирования уравнения (9.11):

$$d(\Phi_{AB}^{ik}) = (-\mathbf{u}_A^k + \mathbf{u}_A^i)\mathbf{dR}_A + (\mathbf{u}_B^k - \mathbf{u}_B^i)\mathbf{dR}_B + \\ + (\mathbf{u}_A^i - \mathbf{u}_B^i)\mathbf{dr}^i - (\mathbf{u}_A^k - \mathbf{u}_B^k)\mathbf{dr}^k, \qquad (9.12)$$

где

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\rho}/\rho \qquad (9.13)$$

– единичные векторы топоцентрических направлений на спутники.

Образуем из $\mathbf{dR}_A$, $\mathbf{dR}_B$ их сумму и разность:

$$\mathbf{dR}_A + \mathbf{dR}_B = \mathbf{d(R}_A + \mathbf{R}_B\mathbf{)} = 2\mathbf{dR}_C; \qquad (9.14)$$

$$\mathbf{dR}_B - \mathbf{dR}_A = \mathbf{d(R}_B - \mathbf{R}_A\mathbf{)} = \mathbf{dD}_{AB}. \qquad (9.15)$$

Ошибка середины базовой линии $\mathbf{dR}_C$ может интерпретироваться как ошибка переноса из-за ошибки $\mathbf{dR}_A$ в ее начале. Вектор $\mathbf{dD}_{AB}$ рассматривается как ошибка вектора базовой линии. Выразим $\mathbf{dR}_A$ и $\mathbf{dR}_B$ через (9.14) и (9.15):

$$\begin{aligned} \mathbf{dR}_A &= \mathbf{dR}_C - \mathbf{dD}_{AB}/2; \\ \mathbf{dR}_B &= \mathbf{dR}_C + \mathbf{dD}_{AB}/2 \end{aligned} \qquad (9.16)$$

и подставим их значения в (9.12), в результате получим:

$$d(\Phi_{AB}^{ik}) = [(\mathbf{u}_A^k + \mathbf{u}_B^k) - (\mathbf{u}_A^i + \mathbf{u}_B^i)]\mathbf{dD}_{AB}/2 -$$

$$-[(\mathbf{u}_B^i - \mathbf{u}_A^i) - (\mathbf{u}_B^k - \mathbf{u}_A^k)]\cdot\mathbf{dR}_C + (\mathbf{u}_A^i - \mathbf{u}_B^i)\mathbf{dr}^i - (\mathbf{u}_A^k - \mathbf{u}_B^k)\mathbf{dr}^k. \qquad (9.17)$$

Теперь, считая, что ошибки орбиты отсутствуют, то есть $\mathbf{dr}^i = \mathbf{dr}^k = \mathbf{0}$, и что ошибка двойной разности $d\Phi_{AB}^{ik}$ пренебрежимо мала по сравнению с ошибкой $\mathbf{dR}_A$, влияние ошибки $\mathbf{dR}_A$ координат начальной точки на вектор базовой линии можно оценить из соотношения:

$$[(\mathbf{u}_A^k + \mathbf{u}_B^k) - (\mathbf{u}_A^i + \mathbf{u}_B^i)]\cdot\mathbf{dD}_{AB}/2 = [(\mathbf{u}_B^i - \mathbf{u}_A^i) - (\mathbf{u}_B^k - \mathbf{u}_A^k)]\cdot\mathbf{dR}_C. \qquad (9.18)$$

Суммы векторов в скобках при $\mathbf{dD}_{AB}$ можно упростить до $2\mathbf{u}_A^k$ или $2\mathbf{u}_A^i$ с ошибкой порядка $0(D/\rho)$. Выражение в скобке при $\mathbf{dR}_C$ можно преобразовать с учетом того, что

$$\mathbf{D}_{AB} = \boldsymbol{\rho}_B^i - \boldsymbol{\rho}_A^i = \boldsymbol{\rho}_B^k - \boldsymbol{\rho}_A^k. \qquad (9.19)$$

Тогда уравнение (9.18) приводится к виду:

$$(\mathbf{u}_A^i - \mathbf{u}_A^k)\cdot\mathbf{dD}_{AB} = \left(\frac{\mathbf{D}_{AB}}{\rho_A^i} - \frac{\mathbf{D}_{AB}}{\rho_A^k}\right)\cdot\mathbf{dR}_C. \qquad (9.20)$$

Будем считать расстояния ρ от приемника до спутников примерно одинаковыми (практически они изменяются от 20 до 25 тыс. км). Модуль разности векторов $\left|\boldsymbol{\rho}_A^i - \boldsymbol{\rho}_A^k\right|$ может колебаться в пределах от 0 до 2ρ, в зависимости от геометрии созвездия. Примем: $\left|\boldsymbol{\rho}_A^i - \boldsymbol{\rho}_A^k\right| = 2\rho$, тогда, пренебрегая косинусами в скалярных произведениях, упрощаем (9.20):

$$D_{AB}\, dR_C = \rho\, dD_{AB} \qquad (9.21)$$

и получаем формулу для относительной ошибки в базовой линии из-за ошибки в априорном положении ее начала:

$$dD/D = dR_A/\rho. \qquad (9.22)$$

Подобная формула приводится в [Leick, 1995; Антонович, Ласкин, 1999]. Полагая, что топоцентрическая дальность $\rho \approx 3R$, где R – радиус Земли, получим формулу, аналогичную приведенной в работе [Beutler et al., 1989]:

$$M_D/D = 0.3\cdot M_A/R, \qquad (9.23)$$

где дифференциалы заменены соответствующими средними квадратическими ошибками.

Если базовая линия измеряется с относительной погрешностью 10^{-6}, то необходимо иметь координаты ее начала в системе WGS-84 с ошибкой не грубее 10 м. Это требование иногда приводится в некоторых руководствах по использованию GPS-аппаратуры. В работе [Beutler et al., 1989] указывается, что априорная ошибка высоты M_H начальной станции приводит к искажению в длине базовой линии, то есть влияет на масштаб сети, а ошибки в плановых координатах M_B, M_L – на ее ориентировку.

Если принять, что в уравнении (9.17) ошибки начала базовой линии отсутствуют и имеются только ошибки орбиты, то ошибку базовой линии можно оценить из соотношения:

$$[(\mathbf{u}_A^i + \mathbf{u}_B^i) - \cdot(\mathbf{u}_A^k + \mathbf{u}_B^k)\mathbf{dD}_{AB}/2 = -(\mathbf{u}_A^i - \mathbf{u}_B^i)\mathbf{dr}^i + (\mathbf{u}_A^k - \mathbf{u}_B^k)\mathbf{dr}^k, \qquad (9.24)$$

или, принимая одинаковыми случайные ошибки положений спутников на орбите, то есть $\left\|\mathbf{dR}^i\right\| = \left\|\mathbf{dR}^k\right\| = M_E$, находим:

$$\frac{M_D}{D} = \frac{M_E}{\rho}. \qquad (9.25)$$

Предельное наименьшее значение для топоцентрической дальности ρ – это высота над поверхностью H . Если заменить в (9.25) ρ на H, то получаем широко известную формулу максимального влияния ошибок орбиты:

$$\frac{M_D}{D} = \frac{M_E}{H}. \qquad (9.26)$$

Я. Зелиньски считает, что влияние ошибок эфемерид значительно меньше, то есть формулы (9.25), (9.26) дают слишком пессимистический прогноз [Zieliñski, 1989].

9.5.2. Взаимное расположение спутников и пункта

Геометрия спутников и пункта. Решение уравнений по формулам вида (9.16) требует обращения нормальной матрицы и вычисления ее определителя. Если определитель матрицы равен нулю, то такие матрицы называют вырожденными, особенными или сингулярными. Тогда система линейных уравнений не решается. Если определитель близок к нулю, то говорят о плохой обусловленности системы, ее решение получается грубым, смещенным. Это выражается в том, что малые ошибки исходных данных могут вызывать большие ошибки в определяемых параметрах.

Для выявления таких ситуаций в абсолютном методе необходимо проанализировать матрицу коэффициентов **A** в (9.15). Первые три элемента в каждой строке этой матрицы представляют собой направляющие косинусы единичного вектора **u** от станции на спутник. Для станции A и спутника i в общем виде этот вектор задается выражением:

$$\mathbf{u}_A^i = \frac{1}{\rho_A^i}\boldsymbol{\rho}_A^i. \qquad (9.27)$$

Изменение в псевдодальности из-за смещения пункта на величину $d\mathbf{X}_A$ получается как результат скалярного произведения:

$$d\rho_A^i(d\mathbf{X}) = -\mathbf{u}_A^i \cdot d\mathbf{X}_A = -\begin{bmatrix} \frac{X^i - X_A}{\rho_A^i} & \frac{Y^i - Y_A}{\rho_A^i} & \frac{Z^i - Z_A}{\rho_A^i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dX_A \\ dY_A \\ dZ_A \end{bmatrix}. \quad (9.28)$$

На рис. 9.3 показана ситуация, когда все спутники размещены на круговом конусе. Вершина конуса находится в точке приема сигналов, единичный вектор $\mathbf{u}_{\text{axis}}$ указывает направление оси конуса. Для всех спутников, которые размещаются на конусе, скалярные произведения равны:

$$\mathbf{u}_A^i \mathbf{u}_{axis} = \cos\theta = const. \quad (9.29)$$

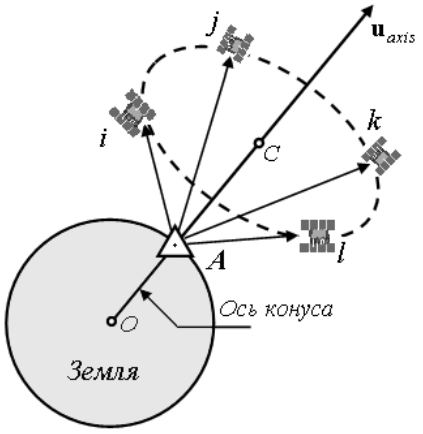


Рис. 9.3. Расположение спутников относительно пункта на конусе

Скалярное произведение (9.29) применимо к каждой строке матрицы **A**. Таким образом, есть четкая линейная зависимость первых трех столбцов в матрице плана (9.15). Такая критическая конфигурация обычно не остается долгое время из-за непрерывного движения спутников. Критические конфигурации представляют проблему только в непрерывной кинематике или в сверхкороткой статике. Кроме того, чем больше наблюдается спутников, тем менее вероятно, что будет иметь место критическая конфигурация. Другие критические конфигурации будут, когда спутник и приемник размещаются в одной плоскости. В этом случае первые три столбца матрицы плана дают векторное произведение

$$\mathbf{u}_A^i \times \mathbf{u}_A^j = 0. \quad (9.30)$$

В относительном позиционировании также можно столкнуться с критическими конфигурациями. Ясно, что спутники не могут постоянно находиться на круговом конусе, видимом с каждой станции. Однако для коротких базовых линий это может быть. Чем короче базовая линия, тем более вероятно, что ситуации, близкие к сингулярности, будут вредить решению базовой линии [Leick, 1995].

9.5.3. Зависимость точности позиционирования от положения пункта на Земле

Влияние распределения навигационных спутников на небе, зависящее от широты пункта наблюдений, на определение положений с помощью GPS исследовалось в работах [Santerre, 1991; Wang et al., 2002]. В первой работе

использовался метод моделирования, во второй – исследовалась весовая функция для учета доступности среднего числа спутников GPS на станциях с разными широтами. Опустим достаточно сложные и объемные выводы и приведем только заключения, сделанные в результате проведенных исследований.

На рис. 9.4 приводится график изменения величины GDOP для станций на широтах от 0 до 90° при долготе 0°. Этот результат показывает, что GDOP возрастает с увеличением широты. Из этого делается вывод, что в высоких широтах для достижения такой же точности, как в низких широтах, требуется времени почти в два раза больше.

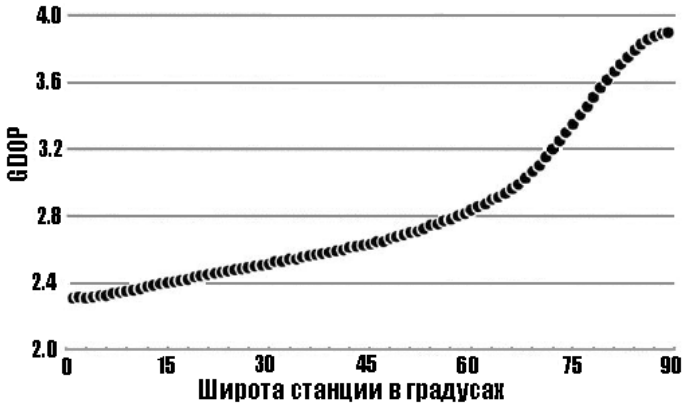


Рис. 9.4. Зависимость коэффициента потери точности GDOP от широты

На рис. 9.5 показано, как изменяется в зависимости от широты станции отношение ошибки позиционирования в долготе к ошибке в широте, то есть $\sqrt{Q_{LL}/Q_{BB}}$. Результаты показывают, что точность по долготе несколько лучше, чем по широте для станций, у которых широта меньше 45°. На более высоких широтах ошибка в долготе становится все больше и больше, чем ошибка в широте.

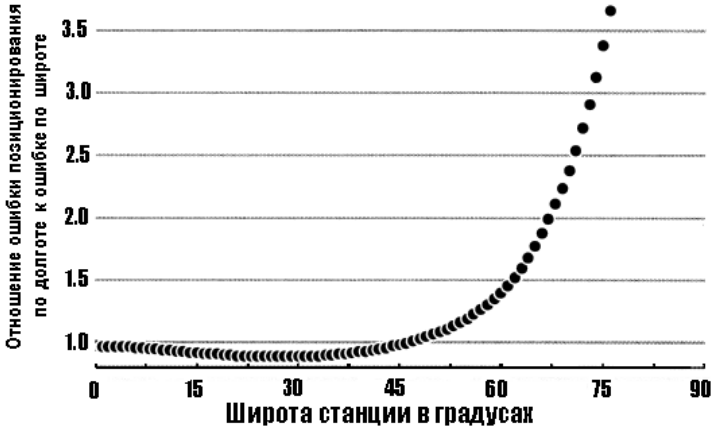


Рис. 9.5. Зависимость от широты станции: отношения ошибок позиционирования в долготном компоненте к ошибкам позиционирования в широтном компоненте

На рис. 9.6 показана зависимость от широты отношения ошибок позиционирования в направлении E-W (восток-запад) к ошибкам в направлении

N-S (север-юг). Видно, что точность позиционирования в направлении E-W всегда лучше, чем в направлении N-S [Wang et al., 2002].

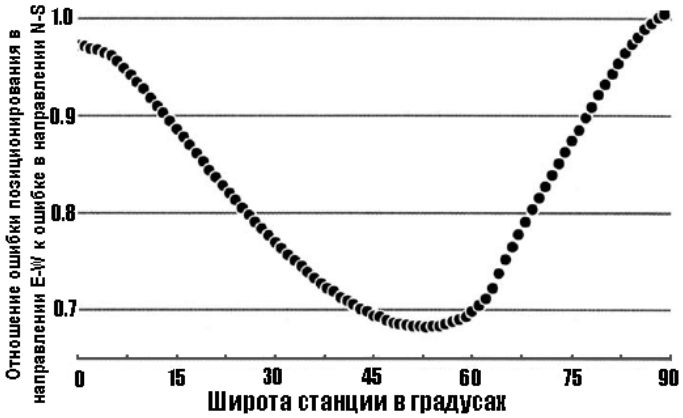


Рис. 9.6. Зависимость от широты станции отношения ошибки позиционирования в направлении E-W (восток-запад) к ошибке в направлении N-S (север-юг)

9.5.4. Точность определения базовой линии по фазе несущей

Как ясно из предыдущего, точность полученных из спутниковых измерений результатов зависит от многих факторов. В расстояниях до спутников, измеряемых по фазе несущей, присутствуют случайные ошибки (шумы) и систематические ошибки (смещения). К случайным ошибкам относят: шумы в приемнике, случайные процессы в часах спутника и приемника, в поведении среды распространения сигналов. Эти ошибки значительно ослабляются при увеличении продолжительности наблюдений или при многократных измерениях одной и той же базовой линии в различных условиях. Смещения происходят из-за ошибок в моделировании процессов в аппаратуре, в среде распространения сигналов, и таким образом точность вектора базовой линии зависит не только от совершенства аппаратуры и искусства наблюдателя, но и от качества программного обеспечения и искусства вычислителя. Особенность фазовых наблюдений состоит в том, что для достижения высокой точности при вычислениях необходимо добиваться разрешения неоднозначности фазы, то есть определять число длин волн в расстоянии между спутником и приемником. Процесс обработки базовых линий и геодезических сетей будет рассмотрен в 11 главе, а пока мы ограничимся проблемой априорной оценки точности, то есть посмотрим, какую точность можно ожидать от фазовых измерений в относительном методе.

Обычно погрешности определения планового положения Δ_D и разности геодезических высот Δ_H оцениваются по формулам вида:

$$\Delta_D = a + b \cdot D; \qquad (9.31)$$

$$\Delta_H = a' + b' \cdot D, \qquad (9.32)$$

где D – длина базовой линии, $a \approx 5$ мм, а $b \approx 1 \cdot 10^{-6}$. Параметры a' и b' обычно в два раза больше. Это означает, что для расстояния, к примеру, в 10 км погрешности Δ_D и Δ_H оцениваются, соответственно, в 15 и 30 мм.

Характеристики точности измерения расстояний для ряда приемников приведены в табл. 5.5.

Приведенные формулы относятся к некоторым средним условиям, соответствующим рекомендациям фирмы в отношении метода наблюдений (статика, кинематика), длины базовой линии (обычно для небольших локальных сетей), продолжительности сеанса, количества спутников, коэффициента потери точности, угла отсечки по высоте. Подразумевается использование соответствующего программного обеспечения, бортовых эфемерид, определенной точности координат начала сети, методики обработки и др. Нарушение этих требований может приводить к резкому ухудшению точности из-за невозможности разрешить неоднозначность базовой линии или к появлению в решениях больших смещений.

Однако еще в 80-е гг. прошлого столетия многими научными группами было показано, что относительное позиционирование по фазе несущей может давать значительно более высокие точности. В работе [Beutler et al., 1989] выведена формула для идеального GPS-приемника (двухчастотные фазовые измерения, наличие псевдодальности, без многопутности) и идеальное программное обеспечение (возможность оценивать все смещения). Формула дает следующую оценку точности GPS в кампании после минимально ограниченного уравнивания:

$$\Delta D = 0.7 \cdot D^{0.58} \text{мм}, \qquad (9.33)$$

где D дается в километрах. Уравнение (9.33) может быть легко трансформировано в уравнение для относительной точности

$$\frac{\Delta D}{D} = 0.7 \cdot D^{-0.42} \text{мм/км} \approx \sqrt{\frac{1}{2D}} \text{мм/км}. \qquad (9.34)$$

В связи с необходимостью практического использования американской сети активных станций CORS группой ученых из Национальной геодезической службы США была исследована зависимость погрешностей определения компонент базовых векторов от расстояния и продолжительности сеансов [Eckl et al., 2001]. Для этого на территории США были выбраны базовые линии с длиной от 26 до 300 км и измерены в течение 10-суточного сеанса. Обработка была выполнена с помощью научной программы PAGES с использованием точных эфемерид МГС и с оцениванием тропосферной задержки. Результаты 10-суточного сеанса по каждой линии были приняты за истинные значения. Затем были получены решения тех же базовых линий сеансами по 4, 6, 8, 12 и 24 часа, и по отклонениям от истинных значений были получены формулы стандартных ошибок для отклонений к северу S_n, к востоку S_e и по высоте S_u (в миллиметрах):

$$S_n = k_n / T^{0.5}, \quad S_e = k_e / T^{0.5}, \quad S_u = k_u / T^{0.5}, \qquad (9.35)$$

где T – продолжительность сеанса в часах. Для величин k_n, k_e и k_u найдены выражения:

$$\mathrm{k_n} = 9.5 \pm 2.1 \text{мм} \cdot \mathrm{T}^{0.5}, \quad \mathrm{k_e} = 9.9 \pm 3.1 \text{мм} \cdot \mathrm{T}^{0.5}, \quad \mathrm{k_u} = 36.5 \pm 9.1 \text{мм} \cdot \mathrm{T}^{0.5}. \qquad (9.36)$$

При таких условиях было найдено, что зависимость точности от расстояния между пунктами пренебрежимо мала. Эти эмпирически

определенные результаты показывают, что величины ошибок позиционирования в горизонтальных компонентах почти одинаковые, а ошибка вертикальной компоненты почти в 3-4 раза больше любой из плановых ошибок.

10. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

В настоящей главе будут описаны самые общие положения технологии выполнения работ с использованием аппаратуры, работающей по сигналам СРНС. Хотя в главе будут рассматриваться и режимы позиционирования низкой точности, основное внимание будет уделяться построению точных геодезических сетей.

10.1. Общий порядок выполнения работ

Технология проведения работ со спутниковой ГЛОНАСС/GPS аппаратурой включает следующие этапы:

– составление проекта геодезических работ на объекте;

– получение разрешений для работы на режимных или частных территориях и на работу радиостанции;

– полевая рекогносцировка, в результате которой делаются заключения об объекте, технологии работ и особенностях материально-технического обеспечения измерений. В итоге составляется проект полевых работ, и подготавливается необходимый картографический материал;

– закладка центров;

– организация базовых станций (если этого требует технология);

– планирование сеансов наблюдений, которое включает в себя определение оптимальных временных интервалов измерений, проектирование последовательности сеансов или маршрутов обхода объектов съемки;

– составление таблиц с кодами топографических объектов и печать штрих-кодовых карточек в соответствии с указанным в техническом задании классификатором объектов. Это необходимо для эффективного выполнения топографических или ГИС съемок;

– полевые измерения (съемка объектов);

– камеральная обработка, вывод результатов измерений;

– составление технического отчета и оформление необходимой документации;

– полевой контроль, архивирование и сдача материалов.

Как видно из перечня работ, в спутниковых и традиционных технологиях много общего, и в дальнейшем будут обсуждаться только характерные особенности спутниковых технологий.

Укажем на еще один вид мероприятий, обоснованно рекомендуемых некоторыми авторами (например, [Sickle, 2001]). Это обучение наблюдателей перед выездом в поле. Особенно это важно, когда планируется применение новой аппаратуры (приемников, контроллеров) или программного обеспечения.

С организационно-правовой точки зрения, применяемая для съемки аппаратура должна иметь следующие документы:

– сертификат, дающий право на использование данной аппаратуры на территории государства;

– свидетельство о метрологической поверке, подтверждающее паспортные данные прибора (аппаратуры) на период полевых работ;

– разрешение Главного радиочастотного центра (ГРЧЦ) на использование радиомодемов.

Организация, ведущая топографо-геодезические работы, должна иметь соответствующую лицензию.

10.2. Проект построения геодезической сети

Технические проекты по выполнению геодезических работ с применением глобальных навигационных спутниковых систем регламентируются определенными нормативными документами. Например, проекты сетей ФАГС, ВГС и СГС-1 разрабатываются в соответствии с требованиями «Основных положений о государственной геодезической сети России» [Основные положения…, 2004] и методики измерений [Проект методических…, 1997], городские сети – в соответствии с «Руководством по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS» [Руководство…, 2003], проекты топографо-геодезического обеспечения геолого-разведочных работ – в соответствии с «Инструкцией по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геолого-разведочных работ» [Инструкция…, 1997] и т. д. Тем не менее, очень часто геодезисты вынуждены определять координаты пунктов, полагаясь на руководства фирм-изготовителей аппаратуры и ее программного обеспечения. В любом случае они должны осознанно подходить к выбору технических решений, базирующихся на общей теории спутниковых методов геодезии.

Работа над проектом начинается со сбора и анализа материалов о геодезической и картографической изученности района работ. Сведения о выполненных ранее работах по ГЛОНАСС/GPS измерениям, триангуляции, полигонометрии, нивелированию и гравиметрическим определениям получают в территориальных инспекциях Госгеонадзора и в организациях, проводивших соответствующие работы.

В техническом проекте устанавливаются объемы работ, технология их выполнения, материально-техническое обеспечение и сметная стоимость. Текстовая часть проекта должна содержать:

– сведения о назначении проектируемых работ, плотности пунктов и их точности;

– сведения о ранее выполненных работах;

– краткую характеристику физико-географических и климатических условий района работ, влияющих на организацию и проведение спутниковых определений. Особенно важными факторами являются сведения о характере растительности, дорожной сети и проходимости местности, наличии помех в виде радиолокаторов, УКВ-передатчиков, ЛЭП. Для выбора аппаратуры важно указать возможный перепад температур на период работ; информацию о глубинах промерзания и оттаивания грунтов, необходимую для правильного выбора типа центров; информацию о гидрографическом режиме;

– обоснование выбора типа геодезических знаков;

– обоснование режима определения координат, типа аппаратуры и ее программного обеспечения, режимов измерений и технологии наблюдений;

– характеристику запроектированной сети, способы ее объединения с существующей сетью в плане и по высоте, схему расположения пунктов сети, названия пунктов, полные и краткие для использования в качестве идентификаторов при вводе данных в аппаратуру и при работе с программным обеспечением;

– порядок обработки результатов наблюдений, выбор способов преобразований координат и высот;

– обеспечение техники безопасного ведения работ;

– сроки начала и окончания работ;

– расчет объемов работ, сметной стоимости, обоснование штатного расписания.

10.2.1. Выбор метода позиционирования

Обоснование метода определения координат. Выбор метода измерений, если он не оговорен в соответствующем нормативном документе, зависит от многих факторов, таких, как требования к оперативности данных, степень удаленности от опорных пунктов, характер динамики работ, наличие соответствующей инфраструктуры и т. п. Однако главным фактором, безусловно, является потенциальная точность метода. На рис. 10.1 показан диапазон точности для большинства доступных на сегодняшний день методов позиционирования. Быстрый прогресс в компьютерных технологиях, средствах связи, модернизация СРНС, усовершенствования в аппаратуре и алгоритмах приводят к появлению новых методов или существенному улучшению существующих методов. При выполнении геодезических работ обычно применяются четыре метода позиционирования:

– абсолютное позиционирование по кодовым псевдодальностям (SPS) или пседодальностям, сглаженным по фазе несущей (точность на уровне единиц метров);

– дифференциальное позиционирование (локальное, региональное, широкозонное) по кодовым псевдодальностям или псевдодальностям, сглаженным по фазе несущей (точность на уровне одного метра);

– дифференциальное позиционирование по фазе несущей (точность порядка 0.01 – 0.5 м) методом RTK, сетевой RTK, с применением технологии виртуальной опорной станции VRS;

– относительное позиционирование по фазе несущей (точность от единиц миллиметров до нескольких сантиметров при условии разрешения неоднозначностей).

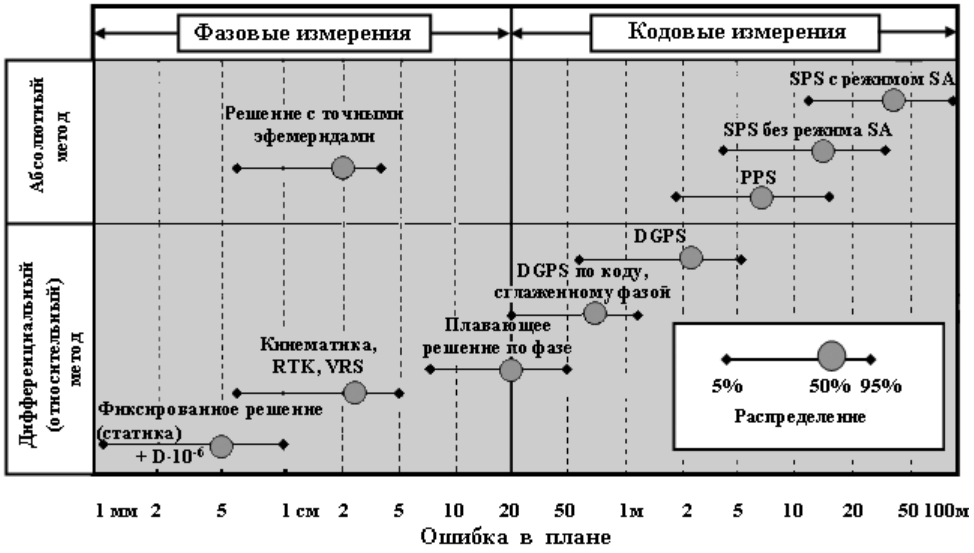


Рис. 10.1. Точность методов GPS/ГЛОНАСС измерений (по статье [Hein, 2000])

Абсолютное позиционирование подразумевает определение координат одним приемником (позиционирование точки). Дифференциальное или относительное позиционирование – это работа, как минимум, пары приемников, из которых один – базовый или опорный, располагающийся на пункте с известными координатами. Вместо «относительного позиционирования» часто используется термин «дифференциальное позиционирование» (например, [Руководство…, 2003]). Заметим, однако, что эти два метода являются (по крайней мере, теоретически) различными. Дифференциальное позиционирование является скорее улучшенным методом позиционирования точки и основано на применении предсказанных поправок к псевдодальностям (кодовым или фазовым) на неизвестном пункте. Этот метод обеспечивает мгновенные решения (обычно называемые решениями в реальном времени), где достигается улучшенная точность по отношению к опорной станции.

В прошлом точечное позиционирование ассоциировалось с навигацией, а относительное позиционирование – с измерениями геодезической точности. Также термин «относительный» использовался для наблюдений по фазе несущей, а термин «дифференциальный» – для наблюдений по кодовым псевдодальностям [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Режим реального времени или пост-обработка. Другое важное требование к выбору технологии определяется сроком представления данных. Моментальное получение данных, то есть практически сразу на точке, возможно в режиме реального времени. Результаты можно рассматривать как «мгновенные», если для вычисления положения используются наблюдения единственной эпохи, и время обработки пренебрежимо мало. Исходная концепция GPS была нацелена на мгновенную навигацию движущегося судна (например, корабля, автомобиля, самолета) по не сглаженным кодовым псевдодальностям. Другое и менее строгое определение режима реального времени – это наблюдения, которые включают вычисление результатов с задержкой в несколько секунд. Строго говоря, это результаты почти в реальном

времени. Сегодня различные способы передачи данных позволяют объединять измерения с различных пунктов в реальном времени. О пост-обработке говорят, когда данные обработаны после факта посещения пункта.

Статическое и кинематическое позиционирование. Режимом статики называют стационарное наблюдение положения, в то время как режим кинематики предполагает измерения в движении. Временная потеря захвата сигнала в статическом режиме не является такой критической, как в кинематическом режиме.

Термины «статика» и «кинематика» необходимо рассматривать в контексте точечного или относительного позиционирования. Типичные примеры этих режимов даются для того, чтобы познакомить читателя с этими терминами.

Статическое точечное позиционирование по кодам полезно, если необходимо иметь координаты точки с умеренной точностью (1 – 5 м).

Кинематическое точечное позиционирование можно использовать для определения трехмерной траектории аппарата как функции времени. Поэтому типичным примером для кинематического позиционирования является навигация судна. Некоторые приемники могут выполнять точную навигацию (траекторные измерения) по псевдодальностям, сглаженным фазой.

Статическое относительное позиционирование по фазе несущей является самым точным методом позиционирования и наиболее часто используется геодезистами. Этот метод предназначен для определения вектора базовой линии между двумя стационарными приемниками. В статических съемках достижимы точности 10^{-6} – 10^{-7} и даже лучше, что эквивалентно миллиметровой точности на базовых линиях длиной в несколько километров.

Кинематическое относительное позиционирование включает один стационарный и один движущийся приемник (или несколько приемников). Два приемника выполняют наблюдения одновременно. В методе множественных опорных станций используется сеть стационарных приемников. Основные применения этого метода в основном те же самые, что и для кинематического точечного позиционирования, но достижима точность сантиметрового уровня. Использование радиосвязи между станциями базовой линии приводит к режиму кинематики реального времени (RTK). В зависимости от типа данных (фазы или фазовые поправки), которые передаются в реальном времени мобильному приемнику, метод относят к относительному или дифференциальному позиционированию.

10.2.2. Выбор аппаратуры

Проблеме выбора аппаратуры для различных видов работ посвящен ряд публикаций [Al-Kadi, 1989; Hofmann-Wellenhof et al., 2001] и др. Правильный выбор приемника и сопутствующей аппаратуры позволяет добиваться необходимой точности и высокой производительности при минимальных материальных затратах или предохраняет от неожиданных неприятностей. Нужно иметь также в виду, что многие приемники имеют набор опций, за каждую из которых необходимо доплачивать. Можно выстроить следующую

примерную шкалу спутниковых приемников в зависимости от их возможностей (и стоимости):

– кодовый приемник для навигации по стандартному коду GPS или ГЛОНАСС;

– кодовый приемник с дифференциальным режимом при пост-обработке;

– кодовый приемник с дифференциальным режимом в реальном времени;

– кодовый приемник со сглаживанием псевдодальности по фазе несущей;

– фазовый одночастотный приемник (статика обязательна, быстрая статика, кинематика истинная и кинематика «стой – иди» (Stop-and-Go) – по необходимости);

– фазовый одночастотный приемник с теми же возможностями и с возможностями работы в реальном времени;

– фазовые двухчастотные приемники, по аналогии с одночастотными приемниками с возможностями статики, быстрой статики, истинной кинематикой, кинематикой «стой – иди», с возможностями измерений в реальном времени или только с пост-обработкой.

Рассмотрим значение некоторых параметров спутниковой аппаратуры.

1. *Тип принимаемых сигналов, способ измерения фазы*. Приемники могут использовать для определения координат пять типов сигналов: C/A-код, P(Y)-код на двух частотах и фазу несущей на двух частотах. Уже сейчас появляются новые типы сигналов. Миллиметровую точность могут обеспечить только измерения фазы несущей, фаза кода может дать только метровый уровень точности. Главный недостаток одночастотных измерений состоит в невозможности точного учета ионосферной задержки. Однако для базовых линий умеренной длины, примерно до 20 км, одночастотные приемники обеспечивают почти такие же результаты, как двухчастотные приемники, поскольку ионосферная рефракция (в основном) исключается при вычитании измерений фазы между пунктами базовой линии. Длины базовых линий получаются уменьшенными в периоды высокой активности солнечных пятен (последний максимум 11-летнего солнечного цикла был в 2002 г.). Наблюдения на двух частотах значительно ослабляют влияние ионосферы и обеспечивают более быстрые (примерно в 1.5-2 раза) и надежные результаты.

Наиболее распространенными на рынке геодезическими приемниками являются многоканальные приемники с корреляцией по кодам, отслеживающие полноволновую фазу несущих частот. Точные измерения фазы на частотах L1 и L2 с полной длиной волны можно объединять, образуя разностную комбинацию с длиной волны 86 см. Целая неоднозначность такой комбинации разрешается значительно легче, чем у фазы несущей с длиной волны 19 см. Однако можно использовать приемники, использующие другие способы обработки сигналов (бескодовые с квадратированием фазы биений, наблюдения по фазе кода или другие методы), если получаемые из их аттестации результаты подтверждают требуемый уровень точности.

2. *Число каналов в приемнике*. Чтобы отслеживать все видимые спутники (концепция all-in-view), высокоточный геодезический приемник, работающий

только по GPS, должен иметь не менее 12 каналов. Если приемник работает по двум системам, то нужно иметь не менее 20 каналов. Это приводит к повышению точности, надежности и скорости получения результатов. Чтобы получить удовлетворительные результаты при наблюдении только 5 спутников, приемник должен работать на точке около часа, в то время как по 10 спутникам достаточно несколько минут, а иногда и секунд. Большое число спутников (более 9) особенно полезно для кинематики в режиме реального времени.

3. *Чувствительность приемника*. Считается, что приемник должен отслеживать сигналы до уровня 20 дБ/Гц. При такой чувствительности он сможет отслеживать сигналы даже через листву, которая значительно ослабляет их силу.

Одним из достоинств приемника является его способность выбирать полосу пропускания в цепях слежения, что особенно важно для работы в режиме кинематики. Полоса пропускания должна быть достаточно широкой, чтобы предупреждать потери сигналов, но достаточно узкой, чтобы обеспечивать высокое отношение «сигнал – шум». Поэтому оптимальные результаты будут обеспечивать приемники, которые способны адаптировать ширину полосы пропускания в зависимости от своей динамики.

4. *Односистемные и двухсистемные приемники*, то есть работающие только по сигналам GPS или ГЛОНАСС, или по сигналам обеих систем. Для пунктов, расположенных севернее параллели 55° (величина наклонения спутников GPS), в северной части небосвода находится зона, недоступная американским спутникам, но по которой проходят видимые траектории спутников ГЛОНАСС, что улучшает геометрические факторы понижения точности DOP. Это особенно важно при работах на закрытых и полузакрытых территориях (городские «каньоны», карьеры и т. п.).

5. *Типичный темп записи данных*: для статических измерений обычная дискретность записи данных – 15 – 30 с, для кинематических применений необходим намного более высокий темп, возможно даже 0.10 – 0.05 с.

6. *Ослабление влияния многопутности путем обработки сигнала*. Считается, что ошибка из-за многопутности по фазе несущей должна быть менее 1 мм при расстоянии между антенной и отражающей поверхностью более 30 м. Ошибка из-за многопутности по коду не должна превышать 1 м для такого же расстояния. Значение этого фактора очевидно: могопутность ухудшает точность, надежность и скорость получения результатов.

7. *Подавление интерференции*. Чтобы гармоники сигналов от других источников не мешали работе приемника, когда они попадают в полосу частот ГЛОНАСС-GPS, приемник должен подавлять интерференцию, по крайней мере, в полосе 50 дБ.

8. *Тип антенны и ее характеристики*. Чем выше точность измерений, тем более высокими становятся требования к антенне приемника. Для геодезического приемника важно, чтобы фазовый центр антенны имел симметрию в плане лучше, чем 2 мм. Это требование объясняется тем, что действительно вычисляемое с помощью спутников положение относится к электрическому центру антенны. В дальнейшем оно приводится к опорной

точке антенны ARP, а затем – к марке пункта через измеренную высоту антенны. Если центр перемещается в соответствии с ориентировкой антенны, то это вызовет ошибку в вычисленном положении. Чтобы антенна имела указанную характеристику, она должна иметь четырехполюсную цепь питания. Антенна геодезического приемника должна иметь возможность для ориентировки относительно сторон горизонта.

Не менее важной является способность антенны противостоять многопутности сигналов: наличие отражающей плоскости (плоскости заземления ground plane) или дроссельных колец (choke ring), применение технологий типа Stealth. Однако важно знать, что антенны с заглушающими кольцами choke-ring – достаточно крупные по размерам, массивные и плохо подходят для кинематических измерений. Способность антенны принимать только сигнал с правосторонней круговой поляризацией также предохраняет от многопутности, так как однократно отраженный сигнал меняет поляризацию на противоположную. Антенны с коническим куполом, в отличие от плоских антенн, представляют хорошую защиту от птиц, что особенно важно для базовых станций.

Антенны в приемнике могут быть внутренними и внешними. В некоторых приемниках допускаются оба типа антенн, тогда при подключении внешней антенны внутренняя антенна отключается.

9. *Внешние сигналы*. Приемник должен иметь выход 1 импульс в секунду (сигнал с частотой 1 герц), синхронизированный со временем СРНС. Это необходимо для таких работ, как определение времени, аэрофотосъемка и др. Приемник должен иметь маркер внешних событий с точностью регистрации времени не хуже 25 нс, что необходимо для многих видов кинематических съемок, таких, как аэрофотосъемка и др.

Приемник должен иметь вход для стабильной частоты 5, 10 или 20 МГц от внешнего генератора, необходимой в длительных сеансах и мониторинге.

У приемников, предназначенных для топографических и ГИС съемок, желательно иметь возможность для подключения датчиков (сенсоров), позволяющих записывать в файл нужную информацию:

- штрих-кодовый считыватель атрибутов объектов съемки,
- определитель кислотности почвы,
- определитель уровня радиоактивности,
- мерная вилка лесника,
- определитель объема биомассы и др.

10. *Наличие автоматической метеостанции.* При обработке наблюдений могут понадобиться метеорологические данные, полученные в процессе измерений. Результаты измерений температуры, давления и влажности автоматической метеостанции можно записывать в файл наблюдений на пункте. Такая информация особенно важна при выполнении работ, в которых повышены требования к точности определения высоты, причем это касается, в первую очередь, районов работ со значительными перепадами высот между

пунктами (50 – 100 м и более), в том числе при аэрофотосъемке с GPS привязкой.

11. *Объем внутренней памяти.* Спутниковый приемник имеет память для записи результатов и память для конфигурирования приемника. Память в приемнике может быть расположена на съемных технических носителях различного типа (карточки PCCMA тип I, II, флэш-память и т. д.). Требования к объему памяти приемника, необходимой для записи результатов измерений, зависят от вида выполняемых работ, режимов и параметров измерений, типа приемника. Для постоянных спутниковых измерений, выполняемых двухчастотными, двухсистемными спутниковыми приемниками суточными сеансами с интервалом записи 30 секунд, необходимо, чтобы память приемника была не менее 64 МБ, так как объем файла суточных измерений, в зависимости от типа аппаратуры, может быть 1.9 МБ и более. Для приемника, используемого при построении съемочного обоснования или для съемки, объем памяти для записи результатов спутниковых измерений с дискретностью 1 секунда в режиме кинематики должен быть более 8 МБ.

12. *Модемы*. Для обеспечения связи между базовым и мобильным приемником используются радиомодемы. Для работы с ним необходимо иметь разрешение Главного радиочастотного центра (ГРЧЦ). Поскольку в каждой стране и даже каждом районе для радиосвязи выделяется определенный частотный диапазон, то необходимо, чтобы аппаратура подходила по этому параметру. Мощность передатчика должна отвечать расстоянию, на которое ведется передача. Желательно, чтобы передатчик был объединен с приемником без дополнительных кабелей, которые создают неудобства в обращении и могут ломаться на морозе. Для работы с телефонным модемом разрешение не требуется, но необходимы услуги оператора сотовой связи.

13. *DGPS*. Режим DGPS состоит в передаче дифференциальных поправок от базовой станции к полевому приемнику. Кодовые наблюдения обеспечивают метровый уровень точности. Существуют стандартные форматы данных для передаваемых поправок. Каждый изготовитель может иметь свой собственный формат данных. Чтобы можно было объединять данные разных изготовителей, программное обеспечение должно поддерживать форматы RTCM как в опорном, так и в полевом приемниках.

14. *Режим кинематики в реальном времени* (Real Time Kinematic, RTK) заключается в передаче поправок фазы несущей от базы к полевому приемнику. Существуют некоторые стандартные форматы данных для передачи этих поправок. Каждая фирма также может давать данные в своем собственном формате. Чтобы совместно использовать приемники разных изготовителей, программное обеспечение должно поддерживать форматы RTCM RTK как на базовой станции, так и на мобильной станции.

15. *Блок контрольного дисплея.* Чтобы указать спецификации дисплея, нужно представить, что наблюдатель будет делать в поле. Для того чтобы запустить и остановить запись данных в статическом или кинематическом режиме, совсем не обязательно иметь дисплей с графическими возможностями. Можно так управлять операциями приемника, чтобы ограничить объем

вводимых данных. Станет меньше ошибок на холоде, в темноте или при других неблагоприятных условиях. Можно вести полевой журнал данных и операций на диктофон, а затем создавать в офисе файл журнала. Однако наличие дисплея позволяет, например, отслеживать расположение спутников на небе или иметь подложку карты местности.

16. Аппаратура должна иметь *средства для включения и выключения приемника*, запускать и останавливать запись данных и указывать соответствующие операции приемника. Это минимальный интерфейс, который необходим оператору. Применение пользовательского интерфейса с большими возможностями будет эффективно при высокой квалификации наблюдателя.

17. Приемник может иметь *средства для ввода информации*, такой, как имя точки и высота антенны. Это желательно, но не обязательно.

18. *Энергообеспечение и батареи*. Комплект приемника и антенны должен иметь низкое энергопотребление с несколькими опциями. Система может быть легкой, но с высоким энергопотреблением, что вынуждает нести в поле тяжелые аккумуляторы. Аккумуляторы разных технологий имеют разный вес и цены. Не заряжаемые литиевые батареи легки, но очень дороги. Свинцовые кислотные намного дешевле, но также и тяжелее. Низкое потребление питания продлевает жизнь электроники. Удобно иметь приемник со вставляемыми батареями, без кабельных соединений, хотя это и незначительно во многих видах измерений. Важно также знать, что при перевозках на самолетах и в поездах не все виды аккумуляторов разрешены для провоза в багаже.

19. *Окружающая среда*. Обычно аппаратура должна работать при температуре окружающей среды от -20 до +50°С. Однако, в условиях Сибири и Якутии нередки температуры -40°С и ниже, и, если приемник или его антенна не рассчитаны на такую температуру, то либо придется принимать меры по утеплению аппаратуры, либо отказываться от полевых работ.

Система должна работать при идущем дожде. Это важно для приемников, работающих в поле. Для приемников, работающих по мониторингу, такие характеристики должна иметь антенна.

20. Проблема *кабелей* оказывается очень актуальной, особенно при работе в зимнее время. В комплекте аппаратуры может быть несколько разных кабелей (антенна – приемник, блок питания – приемник, контроллер – приемник, приемник – компьютер). Слабое место в кабеле – соединение с разъемом. Изготовители аппаратуры стремятся уменьшить количество кабелей и соединений. Выпускаются приемники, образующие единое целое с антенной (моноблок), уменьшение энергопотребления приемников привело к активному использованию заряжаемых батарей. Появилась аппаратура с беспроводной связью – с инфракрасными портами, с радиосвязью bluetooth.

21. *Аксессуары* для установки и переноски в поле, для упаковки и транспортировки: кейс, рюкзак, штативы, кинематические вешки (биноги), трегеры, центриры, переходники для установки антенн на штативе, рулетки (мерные рейки) и т. п. Это оборудование должно быть удобным, легким, обеспечивать требуемый уровень точности работ. Следует помнить, что у

импортного оборудования (штативов, центриров) применяется дюймовая резьба, в отличие от отечественной метрической. Это может приводить к несовместимости оборудования.

22. *Физические характеристики*. Вся система из приемника, антенны, дисплея, аккумуляторов, зарядных устройств, штатива и компьютера для постобработки должна занимать кейсы размером не более 55 × 40 × 20 см. Это важно, если нужно проносить аппаратуру в салон самолета.

Конструкция приемника должна быть прочной, легкой и портативной.

23. *Точность*. Если параметры аппаратуры выбраны правильно, то точность измерений будет зависеть только от того, как геодезист будет работать с системой. Например, ошибки будут больше, если наблюдается длинная линия, а продолжительность сеанса невелика, или когда велики геометрические факторы потери точности DOP.

24. *Совместимость приемников*. В одном проекте можно использовать приемники разных моделей или изготовителей. Однако должны быть проверены их совместимость и синхронизация наблюдений (это одна из задач метрологической аттестации). Кроме того, могут возникать проблемы из-за различного числа каналов, разной техники обработки сигналов и различной привязки к меткам времени.

25. *Цена*. Все заслуживающее внимания GPS оборудование, купленное сегодня, обеспечивает прекрасные результаты, поэтому решение о том, какое оборудование использовать, обычно делается на основе легкости его применения или его стоимости. Цены на GPS приемники постоянно снижаются, а их возможности неуклонно возрастают.

Очень привлекательный способ дооборудования приемника – это использование файлов авторизованных опций. Чтобы получать актуальную информацию об особенностях продукта, необходимо контактировать напрямую с производителями. Адреса можно получить в ежегодных январских или июньских выпусках журнала *GPS World* (см. также прил. А).

10.2.3. Параметры миссии

Спутниковые приемники являются достаточно универсальными, с ними можно добиваться различных уровней точности, изменяя установки и режимы, в соответствии с которыми они работают. С другой стороны, когда на объекте работает несколько наблюдателей, важно, чтобы получаемые результаты были согласованы между собой и обладали одинаковым уровнем точности. Это достигается установкой в приемниках соответствующих *параметров миссии*, то есть условий наблюдений и режимов выполнения работы. Сюда могут относиться такие параметры, как режим работы (статика, кинематика, кинематика в реальном времени и т. п.), минимальное количество спутников, при котором выполняется позиционирование, угол отсечки по высоте, допустимое отношение уровней сигнала и шума (маска SNR), допустимая величина коэффициента потери точности PDOP или GDOP и ряд других параметров.

Некоторые установки касаются работы приемника (одно- или двухчастотный режим, подключение внешнего генератора стабильной частоты и т. д.) или создают необходимый уровень сервиса (единицы измерений, продолжительность звукового сигнала и т. п.). Есть несколько способов ввода параметров. В одних приемниках они установлены в заводских условиях, то есть прошиты в управляющей программе, и не подлежат изменению. Приемник сигнализирует о готовности к работе загоранием светового индикатора. В других приборах наблюдатель сам устанавливает параметры. В аппаратуре третьего типа заранее готовится так называемый конфигурационный файл миссии, содержащий указанные установки. Перед началом наблюдений все наблюдатели, участвующие в сеансе, должны сделать файл миссии текущим, то есть установить согласованные параметры работы приемника.

Из-за разнообразия спутниковой аппаратуры, способов управления, степени автоматизации и других факторов нет необходимости рассказывать обо всех параметрах, и здесь мы остановимся только на трех из них: угол отсечки по высоте, продолжительность сеанса и интервал регистрации.

Угол отсечки по высоте (маска высоты) – это высота спутника над горизонтом, начиная с которой, приемник выполняет измерения при восходе спутника или прекращает измерения при его заходе. Чем меньше этот угол, тем больше спутников доступно приемнику и тем более высокой точности можно достигать. Однако у низких спутников обычно повышается уровень шума в измерениях. Зависимость шума измерений от угла высоты вызывается главным образом диаграммой направленности коэффициента усиления антенны приёмника; другие факторы, такие, как атмосферное затухание сигнала, дают значительно меньший вклад. Повышение масок высоты способствует прохождению лучей при более благоприятных условиях, уменьшает вероятность возникновения многопутности, но иногда приводит к ухудшению геометрических факторов из-за уменьшения числа доступных спутников.

С появлением многоканальных приемников, наблюдающих все, что видят (all-in-view), проблема маски высоты становится менее актуальной. Рекомендуемая маска высоты для фазовых приемников – 15° при статических измерениях и 10 или 13° для быстрой статики и кинематических измерений. Меньшие углы отсечки по высоте приведут к увеличению объема измерений, более быстрому расходованию памяти приемника. Однако при обработке нередко бывает так, что увеличение объема измерений из-за уменьшения маски высоты приводит к улучшению качества решения. Вклад низких спутников может быть существенным при обработке измерений универсальными программами, а при определении зенитных тропосферных задержек обязательно наличие спутников с высотами порядка 7° [Tralli, Lichten, 1990].

Продолжительность сеанса измерений. Под *сеансом* наблюдений, или *сессией*, понимается время, в течение которого производится непрерывная регистрация сигналов спутников. Этот параметр особенно важен при статических измерениях фазовыми приемниками.

Каждая сессия имеет обозначение, обычно состоящее из номера очередного календарного дня года (day of year, DOY) с добавлением буквы

латинского алфавита. Например, сессия с обозначением 106d означает, что это четвертая сессия 106-го дня года.

Известно, что однократное измерение фазы несущей производится с точностью до миллиметра и даже лучше (1.0 – 0.1% от длины волны), и чтобы обеспечить геодезическую точность наблюдений, было бы достаточно пары измерений за 5 – 10 секунд времени. Зачем же необходимы длительные сеансы? Объясняется это необходимостью определения целого числа длин волн несущих колебаний в расстоянии от антенны спутника до антенны приемника в момент первого наблюдения каждого спутника. Это число называют неоднозначностью (или многозначностью) фазовых отсчетов, его величина превышает 10^8. Минимальное количество эпох, при котором число измерений превышает число неизвестных, равно двум (хотя уже появились «одноэпоховые» методы разрешения неоднозначностей). Однако только достаточно длительные измерения в совокупности с хорошей геометрией расположения пунктов и космических аппаратов обеспечивают наблюдаемость данной динамической системы, обеспечивая несмещенную оценку вектора определяемых параметров.

В относительном методе наблюдений продолжительность сеанса определяется следующими факторами:

– длина базовой линии;
– количество наблюдаемых спутников;
– геометрия спутников относительно наблюдателя и ее изменение в течение сеанса;
– отношение «сигнал – шум» принятого сигнала.

Чем больше доступных спутников и лучше геометрия (меньше геометрические факторы DOP), тем меньше необходимая продолжительность сеанса. Например, для измерения одночастотным приемником линии длиной 1 – 2 км при наличии 6 спутников обычно достаточно 20 минут. Более длинные линии для получения хороших результатов требуют наблюдений в течение 90 минут и более. Большое влияние на качество решения оказывают окружающие антенну препятствия, вызывающие потери захвата сигнала и многопутность. Восстановление счета циклов непрерывной фазы является сложной задачей, и при большом количестве потерь сигналов программа не всегда с ней справляется. По этой причине спутниковые наблюдения под геодезическими сигналами обычно не обеспечивают аппаратурную точность. Для одночастотных приемников большое значение играет уровень солнечной активности, поскольку с ним связана концентрация в ионосфере заряженных частиц и, следовательно, зависящая от неё величина ионосферной задержки. В годы максимума солнечной активности (1991, 2002 и др.) для одночастотных приемников максимальным расстоянием считается 10 км, в то время как в годы минимумов одночастотной аппаратурой наблюдались базовые линии до 60 км. Об этом пишет К. Гоад в книге [Teunissen et al., 1998].

Обычные значения для продолжительности сеансов в режиме статических наблюдений (особенно при длине базовых линий до 20 км) приведены в табл. 10.1. Эти значения основаны на видимости не менее 4 спутников, хорошей геометрии и нормальных атмосферных условиях. Заметим, что дополнительные

спутники позволяют уменьшить продолжительность сеанса примерно на 20%, эти цифры могут не оставаться слишком постоянными, однако, они гарантируют правильное разрешение неоднозначности и, таким образом, высокие точности.

Таблица 10.1. Продолжительность сеансов для статических измерений [Hofmann-Wellenhof et al., 2001]

Приёмник	Обычная статика	Быстрая статика
Одночастотный	30 мин + 3 мин/км	20 мин + 2 мин/км
Двухчастотный	20 мин + 2 мин/км	10 мин + 1 мин/км

Наилучший метод определения оптимальной продолжительности сеанса в больших проектах – это сделать более чем нормальное наблюдение в первый день работ, получив типичные данные наблюдений. Например, можно сделать наблюдения продолжительностью 60 минут для коротких (1 – 5 км) линий и 120 минут для более длинных линий (5 – 20 км). Эти данные при обработке дают хорошие результаты. Затем эти данные можно обработать несколько раз повторно, сокращая последовательно объем данных и сравнивая с результатами по полному объему данных. Так можно подобрать приемлемую продолжительность сеанса [Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Антонович, Долганов, 2003].

Одна из мер избыточности при построении сетей – измерения базовых линий несколькими приемами. Однако некоторую избыточность можно было бы добавить к сети, если хотя бы один из приемников был бы установлен повторно, то есть его антенна была повторно отцентрирована, горизонтирована и заново была измерена ее высота. В этом случае был бы возможен некоторый контроль по обоим сеансам. При этом важно, чтобы наблюдались разные созвездия спутников. Число приемов и связанное с ним число повторных посещений пунктов должно устанавливаться в зависимости от класса сети [Sickle, 2001].

Интервал регистрации. Интервал записи данных в приемнике обычно выбирается кратным минуте. Наиболее популярный интервал для записи измерений в статических съемках – 15 секунд. При длительных сеансах устанавливается интервал 20 или 30 секунд, напротив, для быстрой статики предпочтительнее интервал в 5 секунд для одночастотных измерений и 10 секунд – для двухчастотных измерений.

Что лучше: наблюдать 5 минут с дискретностью в 1 секунду (получается 300 эпох измерений) или 25 минут с дискретностью 5 секунд (также 300 эпох измерений)? Ответ такой: для уверенного разрешения неоднозначностей фаз второй случай предпочтительнее, так как за 25 минут спутники переместятся в пространстве на большие дуги, свободные члены в уравнениях поправок будут вычисляться более уверенно. Иногда говорят об «информационном содержании» наблюдений, которое во втором случае, естественно, больше. (Мерой «информационного содержания» или «геометрической силы» наблюдений является параметр IDOP – Integer DOP [Misra, Enge, 2001].)

Другой фактор, который также необходимо учитывать, – это проблема восстановления потерь счета циклов. Она будет увереннее решаться в первом случае, где точки на траекториях будут располагаться чаще, и их можно надежно аппроксимировать какими-либо функциями. Поэтому в длительных сеансах обычно антенны стараются располагать в местах, лишенных препятствий.

При кинематических измерениях интервалы записи данных обычно устанавливаются равными 1, 2, 3 или 5 секундам, в зависимости от скорости движения антенны. При больших скоростях данные собираются чаще, чтобы иметь возможность точнее определять положение антенны в момент регистрации нужного события (например, момента измерения глубины эхолотом).

10.2.4. Форма геодезической спутниковой сети

Форма сети. В сетях триангуляции все углы в треугольниках измеряются с одинаковой точностью. В равносторонних треугольниках в процессе их решения это обеспечивает получение сторон с одинаковой точностью. Если встречается треугольник с разными углами, то сторона, лежащая против большего угла, будет определяться грубее остальных сторон. Напротив, сторона, лежащая против острого угла, будет получаться точнее большой стороны, но такая сеть будет быстро уменьшаться в размерах. Проблема формы треугольников объясняется нелинейной функциональной моделью, используемой в триангуляции для связи параметров измерений (углов) с параметрами сети (координатами пунктов).

Передача координат в сетях, построенных с применением СРНС, сводится к последовательному добавлению разностей прямоугольных координат от некоторой начальной точки. В отличие от триангуляции, математическая модель спутниковой сети, состоящей из векторов базовых линий, оказывается линейной. Матрица коэффициентов уравнений поправок (матрица плана) содержит 1, -1 и 0 (см. раздел 11.6). В этом отношении векторная сеть подобна нивелирной сети. Из-за особого вида матрицы плана форма наземной векторной сети не играет роли. «Геометрия решения» определяется геометрией спутникового созвездия, которая отражается в стохастической модели и числе векторов на пункт (то есть числе связей между пунктами). Спутниковая сеть может состоять из любых фигур (треугольников, четырехугольников и других многоугольников), их комбинаций и траверсов. Хорошую векторную сеть могут образовать несколько пунктов, расположенных на прямой линии [Leick, 1994a]. Примеры проектов кольцевых сетей представлены в статье [Morgan, 1987].

Поскольку форма сети не имеет особого значения, и не нужно обеспечивать взаимную видимость между пунктами, то можно выбирать места для закладки пунктов там, где это удобно, – в легко доступных местах, поблизости от дороги и т. д. Учет взаимной видимости потребуется при выборе места для ориентирных пунктов или при работе с радиомодемами и повторителями. При отсутствии прямой радиовидимости между антеннами передатчика и приемника работа в режиме RTK невозможна. В этом отношении работа с телефонными модемами имеет преимущество, поскольку прямая видимость не требуется.

Длинные и короткие базовые линии. Присутствие в сети длинных и коротких базовых линий может создавать некоторые сложности при реализации проекта. Из-за высокой корреляции ошибок атмосферы на коротких базовых линиях целочисленные неоднозначности обычно разрешаются гораздо лучше, чем на длинных линиях. Решения с вычисленными неоднозначностями (фиксированные решения) приводят к малым средним квадратическим ошибкам в разностях координат. Плавающие решения, то есть без разрешения неоднозначностей, часто являются единственной возможностью для длинных базовых линий, но они дают значительно большие погрешности. Когда в сети есть короткие и длинные базовые линии, совокупность коротких линий будет получаться с высоким весом в уравнивании сети. Это будет приводить к неравноточной сети пунктов. Поэтому длинные базовые линии следует находить из двучастотных измерений и с использованием точных эфемерид. Тогда их статистические оценки будут сравнимы с оценками коротких базовых линий [Leick, 1994a]. Впрочем, в работе [Eckl et al., 2001] делается вывод о том, что при использовании точных эфемерид и научного программного обеспечения точность определения векторов базовых линий слабо зависит от расстояния, есть зависимость только от продолжительности наблюдений.

Иногда короткие базовые линии специально вставляются в сеть, состоящую из длинных линий (тысячи километров), чтобы уверенно разрешать неоднозначности фазы, используя метод bootstrapping, в котором вначале решаются короткие линии, а затем делается переход к длинным линиям [Leick, 1995].

Данная проблема напрямую связана с определением ориентирных направлений. Ориентирные пункты располагаются в пределах прямой видимости, обычно на небольших расстояниях. Передачу координат из спутниковых измерений следует производить с контролем не менее чем по двум векторам.

Опорные и контрольные точки. Для объединения проектируемой сети с существующими сетями необходимо иметь несколько общих точек, чтобы провести полноценное уравнивание и контроль полученных данных. Число опорных точек, необходимых для уравнивания с ограничениями (то есть с определением параметров связи координатных систем), определяется размерами новой сети и требуемой точностью привязки, но оно не должно быть менее трех. Однако, если хотя бы одна из выбранных точек окажется неудачной, то привязка оказывается бесконтрольной или даже невозможной. Поэтому лучше иметь избыточное количество опорных точек. Для линейных сетей типа траверсов такие точки рекомендуется располагать не реже, чем через 50 км. Плановую привязку можно проконтролировать, если связывать точку сети с парой опорных пунктов.

Проблема привязки спутниковых сетей по высоте более сложная, потому что спутниковые измерения дают приращения эллипсоидальных высот, а отметки реперов даются в системе нормальных (или ортометрических) высот. Для преобразования эллипсоидальных высот в нормальные высоты необходимо знать высоту квазигеоида над эллипсоидом, которая не является постоянной на

объекте работ. Для равнинных районов работ расстояния между точками высотной привязки должны быть не реже, чем через 10 км, чтобы добиваться точности на уровне нивелирования IV класса. В горных районах расстояние должно быть еще меньше, порядка 5 – 8 км. Чем точнее планируется получить квазигеоид, тем больше необходимо иметь контрольных точек и чаще их располагать. Нельзя допускать, чтобы точки были сосредоточены в одной какой-либо части сети или располагались по прямой линии, они должны равномерно располагаться по всей площади объекта.

На рис. 10.2 приводится проект спутниковой геодезической сети из 15 пунктов. Ее привязка к ГГС осуществляется в плане к пунктам триангуляции (точки A, B, C, D, E), а по высоте – к реперам (точки F, G, H, I). Здесь намеренно выбран не совсем удачный вариант. Пункты 10, 14 и 15 находятся за контуром пунктов триангуляции, их координаты будут получаться из экстраполяции координатной сетки. Было бы полезно добавить еще одну привязку на юго-восточном углу сети. Привязка к пунктам C и D позволяет контролировать ошибки в координатах этих пунктов, а к пунктам A, B и E – не дает этого. Привязка к пункту B контролирует только ошибки в базовых линиях. Привязка по высоте к реперам F и G не дает того же эффекта, что и привязка в плане к пунктам триангуляции C и D, здесь можно проконтролировать только базовые линии, но не отметки реперов, поэтому привязка к реперам H и I вполне достаточная. В случае повышенных требований к точности высот желательно располагать реперы по каждому углу спутниковой сети, а привязку выполнять двумя сеансами, как показано на реперах I и H.

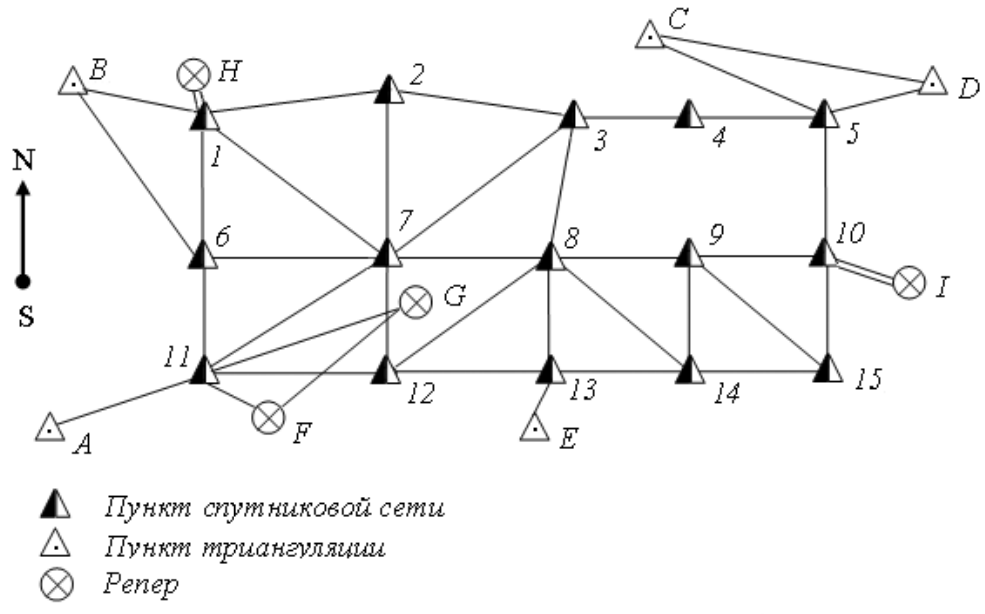


Рис. 10.2. Проект спутниковой геодезической сети

Некоторые авторы рекомендуют район проектируемой сети разделить на четыре примерно равных части и убедиться, что на каждой из них имеются опорные точки для плановой и высотной привязки [Sickle, 2001].

Контрольные точки нужны для того, чтобы убедиться в правильности проведенных наблюдений и преобразований плановых координат и отметок высот.

Независимые и зависимые базовые линии. Предположим, что приведенная на рис. 10.2 сеть будет наблюдаться четырьмя приемниками, и в первой сессии приемники будут установлены на точках 1, 2, 3 и 7 (рис. 10.3).

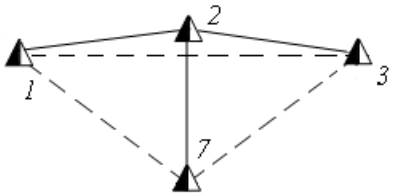


Рис. 10.3. Фрагмент сети, наблюдаемый четырьмя приемниками

Совокупность наблюдений, выполненных этими приемниками, дает возможность вычислить шесть векторов базовых линий. Однако нетрудно видеть, что любой из этих векторов можно получить путем сложения или вычитания других векторов. Например, вектор 1 – 7 можно найти, сложив векторы 1 – 2 и 2 – 7. В каждую сессию можно определить тот минимальный объем векторов, которые дают единственное решение. На рисунке сплошными линиями показаны *независимые*, или *не тривиальные*, линии. Три линии, которые показаны пунктиром, называют *тривиальными*, или *зависимыми*, линиями. Где бы ни использовались четыре приемника, всегда создаются шесть линий. Однако любые три линии из них будут полностью определять положение станции относительно других в данной сессии. Поэтому пользователь может считать любые три из шести линий независимыми. Но как только решение принято, только эти три линии включаются в сеть. Остальные три линии тогда считаются тривиальными и исключаются. На практике почти всегда выбираются кратчайшие линии, а три самые длинные линии исключаются как тривиальные или зависимые. Этот случай как раз и проиллюстрирован.

Если R – число приемников, то каждая сессия дает $R \cdot (R - 1)/2$ всех комбинаций линий, но независимыми являются только $R - 1$. Например, 4 приемника, использовавшиеся в 10 сессиях, должны давать 30 независимых базовых линий. Нельзя сказать, что кратчайшие базовые линии всегда выбираются как независимые линии. Иногда бывают причины, чтобы отвергнуть более короткие векторы из-за неполных данных, большого количества потерь счета циклов, многопутности или какого-либо другого недостатка в измерениях. Прежде чем делать такое заключение, каждый сеанс необходимо проанализировать после того, как данные действительно были собраны. На стадии планирования всегда лучше за независимые базовые линии принимать кратчайшие линии.

Другой аспект, связанный с различием между зависимыми и независимыми базовыми линиями, включает концепцию невязок, или незамыканий замкнутых фигур. Замыкание представляет процедуру, при которой проверяется внутренняя согласованность спутниковой сети. Любое замыкание фигуры,

использующей базовые линии, выведенные из единственной общей сессии, будет давать ноль, поскольку они получены по одним и тем же одновременным наблюдениям [Sickle, 2001].

Из приведенных рассуждений следует, что поскольку при планировании необходимо для каждой сессии отбирать только независимые линии, то на некоторых станциях потребуется провести несколько сессий. Кроме того, для лучшей согласованности данных и повышения точности сети некоторые независимые векторы требуется вычислять из различных сессий.

Надежность сети. Поскольку форма спутниковой геодезической сети не играет особой роли, то при ее проектировании можно сосредоточиться на других качествах, в частности, таких, как точность и надежность. Точность относится к качеству сети, оцениваемому через случайные ошибки. Как уже указывалось ранее, она зависит от метода наблюдений, аппаратуры, программного обеспечения и т. д. Точность обычно относится к координатам пунктов или их функциям (расстояниям, азимутам и т. п.). Надежность определяется как способность сети реагировать на большие ошибки в измерениях и выявлять их. Внутренняя надежность сети подразумевает возможность обнаружения ошибок в наблюдениях, внешняя надежность оценивает влияние не выявленных ошибок на результаты уравнивания. Не выявленные влияния больших ошибок, например, в сети мониторинга можно легко интерпретировать как деформации, что приведет к нежелательным последствиям [Schmitt, 2005; Even-Tzur, 2002].

Для контроля измерений, а, следовательно, и для надежного уравнивания сети необходимы избыточные измерения. Количество таких измерений определяется числом степеней свободы r:

$$r = n - t, \qquad (10.1)$$

где n – число всех измерений в сети, а t – число оцениваемых параметров.

Если в процессе уравнивания сети образуется матрица коэффициентов $\mathbf{A}$ с весовой матрицей $\mathbf{P}$, то выражение (10.1) можно представить как

$$r = n - \mathrm{tr}(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{N}) = n - \mathrm{tr}(\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}) =$$

$$= \mathrm{tr}(\mathbf{E}) - \mathrm{tr}(\mathbf{A}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}) = \mathrm{tr}(\mathbf{E} - \mathbf{A}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}), \qquad (10.2)$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица, а $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}$ – нормальная матрица. Символом tr(…) обозначается след матрицы в скобках, то есть сумма диагональных элементов. Выражение в последней скобке в (10.2) представим как

$$\mathbf{E} - \mathbf{A}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P} = (\mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{A}^T)\mathbf{P} = \mathbf{Q}_\mathbf{V}\mathbf{P}, \qquad (10.3)$$

где $\mathbf{Q}_\mathbf{V}$ – матрица весовых коэффициентов МНК-поправок. Следовательно, из (10.2) получаем, что число степеней свободы равно следу матрицы произведения матрицы весовых коэффициентов МНК-поправок и весовой матрицы измерений:

$$r = \mathrm{tr}(\mathbf{Q}_\mathbf{V}\mathbf{P}) = n - t. \qquad (10.4)$$

В данном случае t есть эффективный ранг матрицы $\mathbf{A}$:

$$t = \mathrm{rank}(\mathbf{A}) \qquad (10.5)$$

или

$$\mathrm{tr}(\mathbf{Q}_\mathbf{V}\mathbf{P}) = n - \mathrm{rank}(\mathbf{A}). \qquad (10.6)$$

Диагональ матрицы $\mathbf{Q_V P}$ образуют числа избыточности измерений (redundancy numbers), характеризующие избыточность отдельных наблюдений. Число избыточности отдельного измерения характеризует его вклад в общее число избыточности сети *r*:

$$r = \sum r_i = n - \mathrm{rank}(\mathbf{A}). \qquad (10.7)$$

При увеличении числа избыточности растет надежность определения координат, так как повышается возможность их контроля, и, следовательно, вероятность их надежного уравнивания. Для трехмерной спутниковой сети числа избыточности базовых линий находятся в интервале

$$0 \le r_i \le 3. \qquad (10.8)$$

Если $r_i << 3$, то это измерение очень сложно проконтролировать, и лучше от него отказаться, хотя, с другой стороны, оно определяет необходимый параметр. В хорошо запроектированной сети числа избыточности измерений примерно одинаковы и стремятся к среднему числу избыточности $\bar{r}$:

$$\bar{r} = (n - t)/n, \qquad (10.9)$$

которое определяет среднее число избыточных связей в сети *s*:

$$s = \bar{r}/3. \qquad (10.10)$$

Значение параметров *s* или $\bar{r}$ задается в зависимости от класса сети [Sickle, 2001]. Число избыточности для каждого отдельного измерения так же зависит от его веса, задаваемого при уравнивании [Leick, 1995; Коршик, Падве, 1998].

В дополнение к точности и надежности сети иногда рассматривается ее *чувствительность*. Это качество в сети мониторинга связано с возможностью выявлять и измерять движения и деформации в области, охваченной сетью. Оцениваемые геологические явления и их параметры используются в процессе анализа чувствительности сети. Модель возможной деформации в исследуемой площади можно предсказать в соответствии с информацией, извлечённой из геологических и сейсмических съёмок, а также из предыдущих геодезических исследований. Сеть определяется как чувствительная, когда геологическое явление, если оно имеет место, может быть выявлено с назначенными вероятностями α и β (где α – уровень значимости, а 1 - β – мощность теста). Поэтому разумно использовать чувствительность как один из главных критериев в процессе проектирования сетей геодинамического мониторинга. Подробнее см. [Even-Tzur, 2002].

10.2.5. Количество приемников

Количество приемников и производительность работ. Производительность работ при наблюдении геодезической сети зависит как от ее класса, конфигурации, физико-географических и погодных условий, доступности пунктов, так и от количества используемых приемников и их распределения по пунктам в сеансах наблюдений. Рассмотрим вопрос о том, сколько сеансов потребуется для съемки сети из *P* пунктов, если в распоряжении имеется *R* приемников.

Очевидно, что для определения координат *P* пунктов достаточно *P* - 1 базовых линий. Для контроля потребуется некоторое избыточное количество

линий, хотя контроль можно делать и посредством замыкания полигонов. Пока ограничимся числом необходимых базовых линий.

Как уже было показано, с помощью R приемников можно определить R - 1 независимых базовых линий из их общего количества в сеансе $R \cdot (R - 1)/2$. Поэтому, если, например, одновременно работают три приемника, то они не обеспечивают объективный контроль в треугольнике, который они образуют, так как третья базовая линия является точной комбинацией двух других базовых линий. В треугольнике можно обработать все три линии раздельно и убедиться, что невязки в замкнутой фигуре по каждой координате равны нулю. Небольшие отступления от нуля возможны из-за ошибок округлений или отбраковки разных измерений. Таким образом, число сеансов Q, необходимое для определения P точек с использованием R приемников, равно:

$$Q(P,R) = \left[\frac{P-1}{R-1} + 0.5 \right],$$

где квадратные скобки означают переход к целому числу, ближайшему к вещественному в скобках. Если каждая линия измеряется k раз, то величину Q нужно умножить на это число, а после умножения на продолжительность одного сеанса оценить необходимую продолжительность наблюдений.

Можно посмотреть, как уменьшится число сеансов, и, следовательно, сроки работ, если будет добавляться один приемник, в зависимости от их наличия на момент начала работ:

$$\Delta Q = \left(\frac{Q(P, R+1)}{Q(P, R)} - 1 \right) \cdot 100\% = \frac{100\%}{R-1}. \qquad (10.11)$$

Значения функции ΔQ для некоторых R следующие:

R	2	3	4	5	6	8	10
ΔQ%	100	50	33	25	20	17	11

Видно, что при использовании трех приемников вместо двух производительность возрастает на 100% (100/50), то есть удваивается, при использовании четырех вместо трех возрастает в полтора раза (50/33) и т. д. В дальнейшем рост производительности замедляется, и использовать в одном подразделении больше шести или менее трех приемников вряд ли целесообразно. В то же время ясно, что если число приемников совпадает с числом пунктов, то все измерения можно выполнить за один сеанс, что может быть важно, например, на геодинамических полигонах (хотя один сеанс не даст никакой избыточности). Для построения СГС, где число пунктов велико, оперативность не столь важна. Кроме того, с увеличением числа приемников растет состав бригад, из-за чего усложняются организационно-технические и транспортные проблемы, требования к уровню взаимодействия и надежности связи.

Известны другие подходы для расчета количества сессий. Например, в книге [Sickle, 2001] дается следующая формула оценки количества сессий Q для наблюдения сети из P станций R приемниками:

$$Q = \frac{(P \cdot \bar{q})}{R} + \frac{(P \cdot \bar{q})(p-1)}{R} + k \cdot P. \qquad (10.12)$$

Здесь переменная $\bar{q}$ представляет среднее число сеансов на каждой станции сети. Если каждая станция, согласно проекту, должна посещаться q_i раз, то

$$\bar{q} = \frac{\sum q_i}{P}. \qquad (10.13)$$

Опыт коллектива представлен в этой формуле переменной p. Деление финального числа действительных сессий, необходимых для выполнения прошлых проектов, на начальную оценку дает отношение, которое можно использовать для улучшения будущих проектов. Это отношение является фактором продуктивности, его типичное значение равно 1.1.

Фактор безопасности в 0.1, обозначенный как k, рекомендован для GPS проектов, выполняемых в пределах 100 км от базы компании. За пределом этого радиуса фактор безопасности увеличивается до 0.2.

Похожие формулы даются в [Botton et al., 1997].

Количество приемников и стохастическая модель сети. В результате обработки одновременных наблюдений двумя приемниками на двух пунктах, из которых один имеет координаты, получается трехмерный вектор базовой линии **D** и его ковариационная матрица **K** размера 3×3. В результате последовательного решения базовых линий координаты распространяются по всем пунктам сети, а совокупность ковариационных матриц дает стохастическую модель сети. Если каждая линия наблюдается независимо от других, то полная априорная ковариационная матрица для сети будет блочно-диагональной, каждый блок этой матрицы является ковариационной матрицей соответствующей базовой линии.

Если одновременно наблюдают R приемников, то из возможных $R \cdot (R - 1)/2$ базовых линий независимых линий будет только $R - 1$. Остальные линии будут зависимыми или тривиальными. Научные программы позволяют делать строгую обработку одновременных измерений R приемниками и получать полную ковариационную матрицу размера $3 \times (R - 1) \times (R - 1)$. Большинство коммерческих программ рассчитано на обработку измерений, сделанных парой приемников, они позволяют получать только блочно-диагональную ковариационную матрицу, то есть блоки вне главной диагонали будут нулевыми. В итоге такая ковариационная матрица не будет отражать действительную точность сети, что будет приводить к погрешностям порядка произведения коэффициента корреляции на стандартные ошибки соответствующих компонент базовых линий. Для сетей, в которых слишком высокая точность не требуется (на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ и грубее), использование зависимых базовых линий и искаженной стохастической модели не существенно. Для высокоточных сетей, где стохастическая модель сети должна соответствовать реальной методике наблюдений, имеются две возможности:

– использовать дорогие научные программы (сейчас службы обработки online появляются также и в России);

– использовать только два приемника, чтобы все измерения были независимыми.

При наблюдении тремя приемниками можно уменьшить корреляцию между базовыми линиями, если они располагаются под углами, близкими к 90° (в пределах ±30°) (см. статью [Schaffrin, Zieliñski, 1989]).

Включение в уравнивание сети всех базовых линий, и независимых, и зависимых дает на выходе очень высокие показатели точности, которые не соответствуют действительности, обычно они завышены в 10 и более раз. Другим возможным следствием от наблюдения всей сети или ее части многими приемниками за один сеанс является то, что ошибки в установке антенны или измерении ее высоты обычно не выявляются. Получается, что высокоточные измерения относятся к совершенно другой точке.

Кроме того, поскольку чувствительность спутниковых наблюдений к систематическим ошибкам (смещениям) выше, чем чувствительность к случайным ошибкам (шумам), то даже при длительных сеансах (сутки и более) результаты различаются на величины, которые значительно больше случайных ошибок. Было бы полезно переводить смещения в шумы, что можно достигать, если проводить многократные наблюдения непродолжительными сеансами при различных условиях. Это дополнительный аргумент против длительных сеансов. К примеру, среднее из двух сеансов по 2 часа с промежутком между ними в 12 часов или 24 часа даст точность выше, чем из одного сеанса в 4 часа (промежуток выбран кратным периоду обращения спутников GPS). Такого рода рекомендации входят в некоторые руководства по наблюдениям, например, [Zilkoski et al., 1997].

Когда базовые линии вычерчены на карте проекта для статических измерений или для любой другой GPS работы, где точность находится в центре внимания, проектировщик должен помнить, что их эффективность частично зависит от формирования замкнутых геометрических фигур. Когда проект выполняется, эти независимые векторы должны образовывать замкнутые фигуры, которые объединяют базовые линии от двух до четырёх разных сессий [Sickle, 2001].

10.2.6. Точность априорных координат начальной точки сети и эфемерид

Одна из проблем, которая стоит перед геодезистом при построении небольших сетей по GPS-измерениям, заключается в назначении априорных координат начальной точки в геоцентрических системах WGS-84 и/или ПЗ-90, в которых работают СРНС. Перевод координат из системы СК-42 может привести к ошибкам в системе WGS-84 до 10 и более метров. При отсутствии такой возможности геодезист вынужден производить обработку базовых линий с координатами, полученными из точечного позиционирования, когда результаты навигационных определений, записанные в файл измерений, усредняются на некотором интервале времени. К счастью, из-за отмены режима селективного доступа ошибка координат, полученных при навигационном решении, в настоящее время уменьшена примерно до 15 м, но по высоте может быть достаточно большой (до 50 м), причем увеличение продолжительности наблюдений здесь не очень помогает из-за систематического характера ошибки.

Более точные координаты можно получить, передавая их от станций МГС или от пунктов ГГС (ФАГС, ВГС или СГС-1).

Как было показано в разделе 9.6.1, ошибка M в координатах начала сети вызовет ошибку M_D в базовой линии длиной D, определяемую формулой:

$$M_D / D = k \cdot M / R, \qquad (10.14)$$

где R – радиус Земли. Коэффициент k у разных авторов принимает значения от 0.3 до 1. Если нужно измерить базовую линию с относительной ошибкой, равной 10^{-6}, то рекомендуется иметь координаты в геоцентрической системе с ошибкой не более 10 м, а для ошибки 10^{-7} – с ошибкой не более 1 м. Дополнительное влияние этих ошибок заключается в повышении общего уровня ошибок в сети, появлении систематических ошибок и ухудшении разрешения неоднозначностей фазы, особенно для одночастотных измерений [Антонович и др., 2000].

Координаты спутника на момент измерения вычисляются по элементам орбиты. Они могут быть либо получены по навигационному сообщению (бортовые эфемериды), либо взяты из службы точных эфемерид, либо определяться в процессе уравнивания сети. В последнем случае требуется применение специальных научных программ. Ошибка M_E положения спутника на орбите с высотой H над земной поверхностью будет вносить в базовую линию ошибку, величину которой можно оценить по формуле:

$$M_D / D = k_E \cdot M_E / H. \qquad (10.15)$$

Для коэффициента k_E в разных источниках приводятся значения от 0.1 до 1. Точность бортовых эфемерид спутников GPS по данным 2004 г. имеет порядок 2 м. Если проектируемая сеть имеет уровень точности 10^{-6} или более высокий и, тем более, содержит длинные базовые линии, то необходимо предусмотреть обеспечение точными эфемеридами. Для пользователей СРНС в условиях России наиболее приемлемым является использование продуктов деятельности МГС. Для этого достаточно иметь выход в Интернет.

Другое влияние ошибок эфемерид заключается в увеличении времени, необходимого для разрешения неоднозначности фазы. Это особенно важно для кинематического режима наблюдений в реальном времени. Метод сетевой RTK в значительной степени компенсирует этот недостаток, поскольку сводится к уточнению эфемерид и атмосферных задержек.

10.2.7. Способ учета метеоданных

Исходными параметрами моделей для вычисления тропосферных поправок являются температура T, давление P и влажность h (вместо влажности может быть сухая температура T_d и влажная температура T_w). Разработано несколько способов для их определения:

– измерение метеопараметров на каждой точке синхронно через определенный интервал времени (обычно достаточна дискретность 0.5 – 1.0 часа) с помощью термометров, барометров и психрометров или автоматической метеостанции;

– использование стандартной метеорологической модели (используются данные P, T_d и T_w для одной опорной высоты, например, для уровня моря, для всех точек);

– построение локальной метеорологической модели (данные P, T_d и T_w для одной опорной высоты, вертикальные градиенты выводятся по собранным в течение сеанса данным от всех точек);

– определение метеорологических параметров из обработки спутниковых измерений или использование стохастических оценок параметров для каждой станции;

– использование файлов с оценками тропосферной зенитной задержки на станциях МГС или цифровых прогнозов погоды;

– измерение влажности с помощью аэрологического зондирования, радиометров паров воды, лидаров.

Нужно заметить, что учет реального состояния атмосферы необходим тогда, когда требуется построить геодезическую сеть с точностью 10^{-6} и лучше. Для менее точных сетей практически всегда достаточно использовать модели поправок Хопфилд, Саастамойнена и другие для стандартной тропосферы, и только в районах с большими перепадами высот (более 100 м) могут потребоваться метеорологические данные. Можно, конечно, посоветовать закладывать новые пункты примерно на одной высоте, это делает сеть менее чувствительной к ошибкам тропосферной модели. Однако это не везде возможно.

Программное обеспечение должно быть адаптировано к выбранному методу сбора метеорологических данных.

10.3. Рекогносцировка сети и закладка центров

При полевой рекогносцировке участка предстоящих работ исполнитель должен выбрать места для установки новых пунктов и подтвердить пригодность для спутниковых наблюдений существующих пунктов. По мере возможности необходимо стремиться использовать старые пункты, чтобы избежать закладки новых.

Места для размещения новых пунктов и закладки центров. Места для размещения пунктов должны обеспечивать оптимальные условия для выполнения наблюдений, долговременную сохранность пунктов, их устойчивость в плане и по высоте в течение длительного времени, возможность работать и днем, и ночью в любое время года. Нельзя размещать пункты в зонах перспективного строительства, в местах, предназначенных для выполнения гидротехнических, дорожных, строительных работ, где не может быть гарантирована сохранность пункта.

Главное условие для оптимальных условий наблюдений – чистое небо от высоты 10 – 15° над горизонтом. Высокие деревья с плотной листвой обычно создают проблемы в наблюдениях: листья и ветки блокируют сигналы спутников или сильно их ослабляют. Нежелательно устанавливать приемник около высоких стен или на крышах. Плоские поверхности около антенны, как вертикальные, так и горизонтальные, создают многопутность сигналов. От

одноэтажных зданий необходимо отходить на 15 – 20 м, а от многоэтажных – на 50 м и более. Можно допускать наличие препятствий к северу от пункта в азимутах примерно 315 – 345°. Это объясняется тем, что для широт в 50° и более северных спутники NAVSTAR находятся преимущественно в южной стороне неба. При наличии объектов съемки с препятствиями полезно составить диаграммы препятствий.

Телевизионные или микроволновые передатчики, расположенные поблизости от спутникового приемника, могут вызывать явление интерференции. Нецелесообразно размещать пункт ближе 1 км от источника помех. Удаление от ЛЭП обычно принимается не менее 150 м.

Поскольку прямая видимость на соседние пункты при построении спутниковой сети не требуется (достаточно обеспечивать ее только на ориентирные пункты), и форма сети не играет особой роли, то решающим фактором при выборе места для пункта становится его доступность. Предпочтительнее места поблизости от дорог (20 – 30 м), это повысит производительность работ. Для измерений в городе необходимо также предусмотреть место для парковки автомашины.

При выборе мест для особо ответственных пунктов типа ФАГС, ВГС целесообразно до закладки провести пробные измерения фазовой аппаратурой с целью выявления возможных радиопомех.

Если планируется работа в дифференциальном режиме, то намечаются место расположения *базовых станций* и способ их геодезической привязки.

Существующие пункты ГГС и ГНС. Геодезист должен отыскать пункты триангуляции, полигонометрии и нивелирных сетей, проверить сохранность центров и знаков, оценить возможность проведения спутниковых измерений. Если последнее невозможно, то необходимо наметить схемы привязки и определения элементов приведения.

Дорожная сеть. Необходимо знать, как добираться до района работ и до каждого конкретного пункта с учетом проходимости местности в периоды сухой и дождливой погоды. При рекогносцировке нужно наметить такие пути подхода к пунктам и для перемещения по району работ, чтобы обеспечить безопасное форсирование водных преград людьми и техникой или избежать нанесения вреда природе и сельхозугодиям. Продолжительность переездов хронометрируется для планирования сеансов наблюдений. Для уверенного перемещения по незнакомой местности и для корректировки карт в памяти навигационного приемника создаются *путевые точки*, включая места старых и новых пунктов, ориентиры местности. Попутно оценивается *достоверность картоматериалов*.

Подготовка картоматериалов заключается в нанесении на аэрофотоснимки или планы местности координатной сетки в общеземной или локальной системе в нужной проекции. Для этого на местности выбирают два или более уверенно опознаваемых по карте контуров, в постоянстве расположения которых не приходится сомневаться. На них определяют координаты спутниковой аппаратурой, а затем по ним строится координатная сетка.

Организационные проблемы включают в себя следующие мероприятия:

– наметить место для полевого лагеря, с учетом возможности зарядки аккумуляторов и разгрузки информации из приемников, обеспечения продовольствием, водой, горючим и удовлетворения санитарных и бытовых нужд членов бригады;

– оценить экологическую обстановку в районе работ (наличие вредных и опасных условий, осложнения санитарно-эпидемиологической обстановки в зоне выполнения работ, наличие опасных насекомых и других видов животных);

– получить разрешения на работу в пределах частных владений и пропуска в закрытые зоны.

По результатам рекогносцировки принимаются соответствующие решения, намечаются сроки выполнения работ, и производится планирование доступности спутников.

Закладка центров обычно становится ненужной, если уже установлены активные опорные сети. В настоящее время закладка центров все еще применяется в проектах, где пункты планируются для повторных посещений, например, при геодинамических исследованиях. Геодезисты и другие специалисты обычно используют отрезки стальных армированных стержней, верхушка которых загнута к точке центра (монумента). Каждый геодезист должен решить, какой особый тип марки соответствует проекту. Для опознака могла бы подойти стальная штанга, в то время как для геодезических измерений на геодинамическом полигоне более подошёл бы бетонный монумент. Главное внимание должно уделяться тому, чтобы марку можно было легко находить, по крайней мере, во время измерений. Для Государственной спутниковой геодезической сети ЦНИИГАиК разработал правила закрепления центров [Правила…, 2001].

10.4. Планирование доступности спутников

Приступая к наблюдениям, оператор должен убедиться, что в зоне радиовидимости его приемников будет достаточное количество спутников, и их пространственное расположение в период наблюдений обеспечит ему требуемую точность. Даже при полном развертывании навигационных систем ГЛОНАСС или NAVSTAR на протяжении суток случаются ситуации, когда количество спутников или их геометрия не обеспечивают круглосуточное определение трехмерных координат. Полную уверенность в доступности требуемого количества спутников и конкретное значение геометрических факторов потери точности могут дать специальные компьютерные программы. Особенно важно иметь эти данные при съемке на точках с ограниченным обзором неба.

Все программы планирования содержат ряд общих опций и различаются средой, в которой они работают, способами управления, компьютерной графикой и уровнем сервиса.

Для работы с программой необходимо иметь файл альманаха или эфемерид, создаваемых по навигационным сообщениям спутников. Эти файлы содержит информацию об орбитах и часах всех спутников системы, сведения об

их работоспособности и используются для расчета времени видимости и обеспечения быстрого захвата сигналов приемником. Некоторые коммерческие программы требуют для работы файл эфемерид в запатентованном («фирменном») формате. Другие же программы допускают ввод в альтернативных форматах, таких, как данные бюллетеня НАСА, элементы предварительной орбиты, файлы в формате RINEX, файлы альманахов Yuma или SEM, точные эфемериды и другие форматы.

Для планирования рекомендуется применять эфемериды с «возрастом» до 30 суток, так как за время, прошедшее с момента их сбора до даты наблюдений, на орбитах могут появиться новые спутники, а «старые» спутники могут выйти из строя или совершить орбитальный маневр. Файлы эфемерид или альманаха загружаются в компьютер из полевого приемника с помощью программы, обслуживающей аппаратуру.

Программа планирования настраивается на предполагаемые условия наблюдений, для чего вводятся следующие данные:

– дата, время наблюдений и примерные координаты района работ;
– угол отсечки по высоте (маска высоты);
– временной сдвиг между местным и всемирным временем, который считается к востоку положительным, к западу – отрицательным;
– диаграмма препятствий на пункте.

Точность задания положения должна быть не грубее 15'. Угол отсечки по высоте, как правило, задается равным 10° для наблюдений с кодовым приемником и 10-15° – для фазовых измерений. Делается отбор спутников, используемых в вычислениях видимости, с учетом информации об их работоспособности.

Программы планирования позволяют получать различные виды информации. Наиболее важными из них являются:

– график количества доступных спутников, представляемых с некоторым шагом по времени (рис. 10.4);
– график видимых спутников, где указываются номера спутников и время пребывания их в зоне видимости;
– графики восходов и заходов спутников GPS (и ГЛОНАСС);
– графики или таблицы геометрических факторов PDOP, GDOP и др. (рис. 10.5);
– графики азимутов и высот спутников;
– диаграммы небесной сферы с траекториями спутников (рис. 10.6);
– графики трасс спутников.

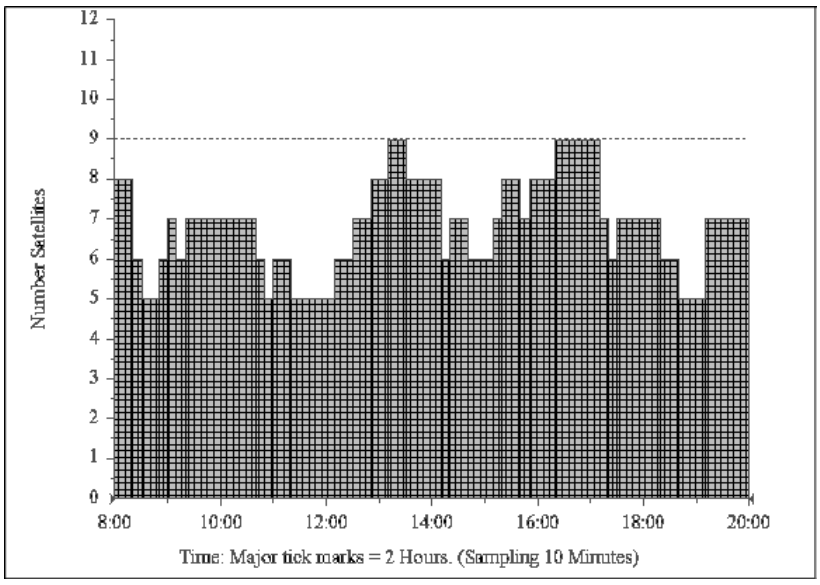


Рис. 10.4. График с указанием количества наблюдаемых спутников

На основании анализа полученной информации делается заключение о возможности наблюдений на отдельной станции. Наблюдатель может подобрать угол отсечки по высоте, обеспечивающий достаточное количество спутников, или промежутки времени с необходимым количеством спутников.

Чтобы убедиться в возможности синхронных наблюдений с двух или большего числа станций, необходимо построить соответствующие графики для каждой станции, участвующей в сеансе, и произвести их анализ. Должны выполняться следующие условия:

– число общих спутников на каждой станции должно быть более четырех (если не оговаривается другое минимальное количество);

– продолжительность видимости минимального числа спутников достаточна для получения решения;

– геометрические факторы на каждой станции не превышают установленных пределов. На рис. 10.5 график GDOP имеет два промежутка времени (около 3 и 21 часа), где его значение достигает 15. Эти промежутки времени при малой продолжительности сеансов (быстрая статика, кинематика) не пригодны для работы.

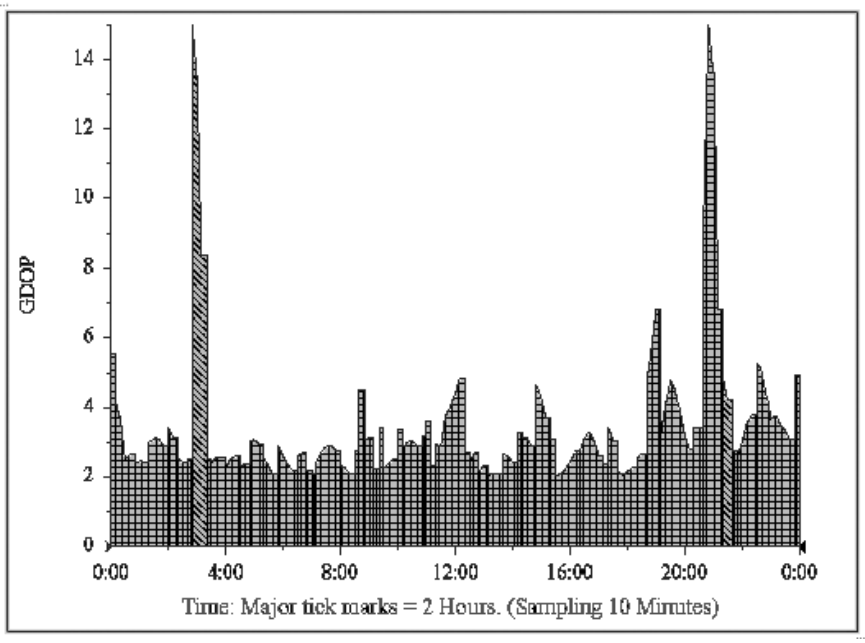


Рис. 10.5. Пример выдачи графика геометрического фактора GDOP

Если пункты располагаются достаточно близко (в пределах 100 км) и не имеют препятствий, то графики для обеих станций будут практически одинаковыми.

Опасная ситуация может возникнуть при использовании аппаратуры, не поддерживающей режим наблюдений all-in-view (наблюдаю «все, что вижу»), когда прогноз дает количество спутников, превышающее число каналов аппаратуры. Если в рабочих созвездиях каждого из приемников число общих спутников будет меньше четырех, то ни кодовые, ни фазовые измерения невозможно будет обработать. В таких ситуациях необходимо либо увеличивать угол отсечки по высоте для обоих приемников, либо исключать из наблюдений некоторые спутники, делая их «недоступными» приемнику.

Обычное значение величины геометрических факторов PDOP или GDOP – от 2 до 4. Максимальное значение часто принимается равным 7. Впрочем, это не является жестким условием, и в зависимости от назначения работ в качестве допустимого может назначаться иная величина.

Количество расчетов, тип выводимой информации и способ ее представления (диаграммы, графики, таблицы) наблюдатель делает по своему усмотрению. При работе в полузакрытой местности, где много препятствий разного характера, планирование для каждой точки становится обременительным. Тогда можно вывести на печать несколько диаграмм небесной сферы Skyplot (рис. 10.6) с траекториями спутников без препятствий на различные периоды рабочего дня и использовать их на местности либо для отыскания точки с достаточным числом спутников, либо для выбора удобного времени, нанося при этом на диаграмму препятствия.

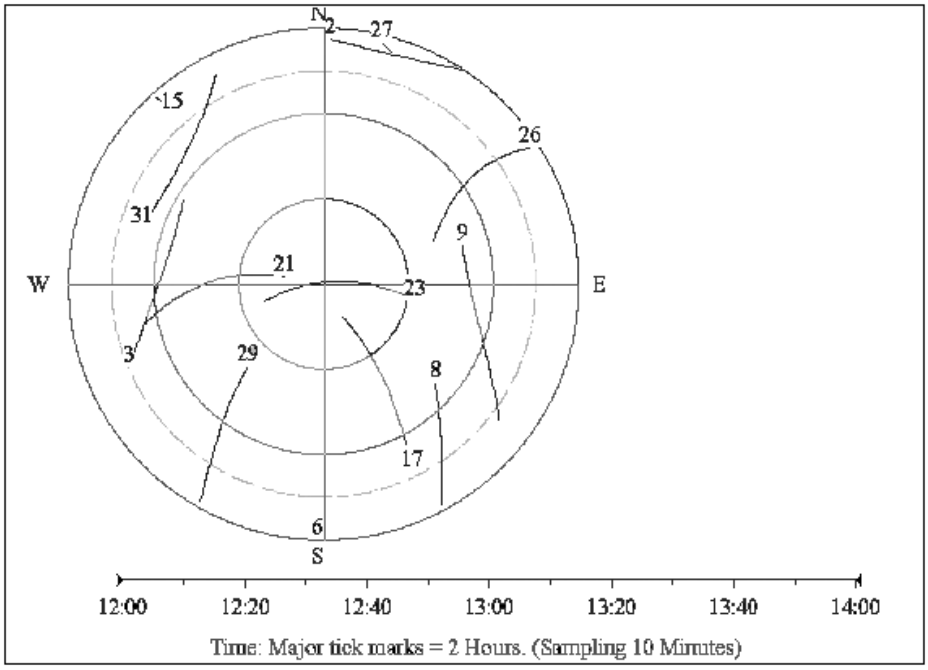


Рис. 10.6. Диаграмма небесной сферы (Skyplot) с траекториями спутников

Если планирование сделано на одну дату, а наблюдения выполняются в другую, близкую дату, то нужно иметь в виду, что взаимное расположение спутников NAVSTAR повторяется на следующие сутки на 4 минуты раньше, у спутников ГЛОНАСС траектории повторяются на восьмые сутки на 32 минуты раньше. Однако при функционировании всех спутников ГЛОНАСС траектории спутников на небесной сфере будут повторяться на следующие сутки на 4 минуты раньше, но принадлежать они будут спутникам, проходившим по орбите в предыдущий день позднее, то есть имеющим аргумент широты на 45° больше. В условиях неполной орбитальной группировки для спутников ГЛОНАСС требуется планирование на каждый день недели.

10.5. Режимы спутниковых измерений

10.5.1. Статические измерения

В процессе развития GPS/ГЛОНАСС технологий было разработано три режима статических измерений с применением фазовых приемников. Первый из них, появившийся как модификация интерферометрического метода радиоастрономии, называют *классической статикой* или просто *статическим режимом*. Второй режим – *быстрая статика* (fast static или rapid static). Его принципиальное отличие от предыдущего режима заключается в уменьшении времени наблюдений на пункте, применении специальных алгоритмов для разрешения начальных неоднозначностей фаз, и, как следствие от выигрыша времени, в некоторой потере точности. Третий режим получил название *реоккупация*. Иногда его называют псевдокинематикой или псевдостатикой, поскольку он имеет признаки как статики, так и кинематики. Поскольку под «оккупацией» здесь понимается период измерений на пункте, то реоккупация – это режим наблюдений с повторным посещением пункта, когда при первом наблюдении данных оказалось недостаточно для точного решения. В каждом

из перечисленных режимов возможно применение как одночастотной, так и двухчастотной аппаратуры. Двухчастотная статика – наиболее универсальный режим измерений, в котором возможно достижение самой высокой точности и на самых больших расстояниях, вплоть до нескольких тысяч километров. В этом режиме иногда отдельно выделяется статика коротких, средних и длинных базовых линий. Четких количественных границ между этими понятиями не существует, и основной принцип деления основан на теоретических возможностях исключения определенных видов ошибок. На коротких базовых линиях уверенно исключается влияние ионосферы и тропосферы. В периоды минимума солнечной активности одночастотные приемники могут давать фиксированное решение на расстояниях до 50 и даже 100 км, в то время как в максимум солнечной активности с трудом дают решение на расстоянии 10 км. Ошибки тропосферы перестают быть коррелированными с расстояний около 15 км. В среднем можно считать, что под короткими расстояниями понимаются обычные для триангуляции и полигонометрии расстояния в пределах до 15 – 25 км. По другому определению, пределом для коротких расстояний является то расстояние, на котором становится ощутимым расхождение между результатами одночастотных и двухчастотных измерений. Подобным образом, верхний предел для средних расстояний можно определить как минимальное расстояние, на котором разрешение неоднозначностей на двух частотах не выполняется из-за доминирующего влияния ошибок опорных координат и орбиты. Диапазон расстояний для средних базовых линий предполагается примерно от 20 – 50 до 1 000 км. Пределом расстояний для длинных базовых линий является возможность выполнения синхронных измерений. Чем длиннее расстояние между пунктами, тем меньше наблюдается общих спутников. Практическим пределом может быть расстояние в 5 – 7 тыс. км [Teunissen et al., 1998].

Быстрая статика разработана на основе классической статической съемки [Frei, 1990]. Цель быстростатической съемки – точно определить базовую линию за максимально короткое время. Один приемник устанавливается на опорной точке и непрерывно следит за всеми видимыми спутниками. В это время со вторым приемником последовательно обходят все точки, оставаясь на каждой из них несколько минут (рис. 10.7). Использование процессоров базовых линий, специально разработанных для быстрой статики, позволяет разрешить неоднозначности по этим кратковременным измерениям. Техника быстрой статики идеально подходит для съемок, где необходимо определять много точек, расположенных поблизости от опорной точки, и где можно пренебречь влиянием ионосферы и тропосферы. Преимущество этого режима перед обычной статикой – в сокращении времени в 2 – 4 раза, преимущество перед кинематикой Stop-and-Go – в том, что не нужно поддерживать непрерывный захват спутников во время движения от точки к точке. Каждая точка наблюдается независимо от других, а при перемещении на другую точку приемник может выключаться. Это особенно важно при работе в городских условиях, где много препятствий и помех. Недостатком быстростатических

решений базовых линий является слабое исключение многопутности из-за коротких сеансов наблюдений.

Измерения в режиме быстрой статики очень похожи на статические измерения. Главное различие между двумя режимами – это то, что время для определения базовой линии в быстростатическом режиме намного короче и, как следствие, точность обычно ниже, а предельные расстояния между пунктами ограничены 15 – 20 км.

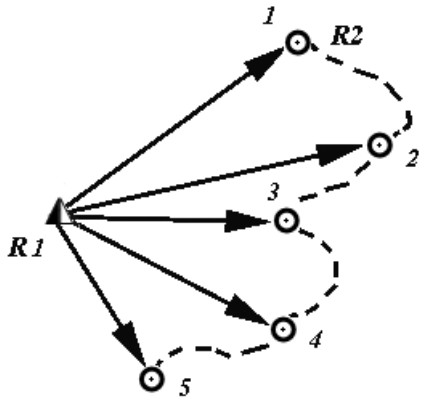


Рис. 10.7. Обход точек при съемке в режиме быстрой статики

Типичные установки приемника для быстростатических измерений:

- минимальное количество спутников – 4 – 5 или больше;
- интервал между эпохами – 5 с;
- угол отсечки по высоте – 13°.

Время наблюдений на каждой точке при определении базовой линии зависит от количества спутников и от спутниковой геометрии. При величине геометрического фактора PDOP меньше 7 рекомендуется следующее время нахождения на точке:

- при четырех спутниках – время более 20 минут;
- при пяти спутниках – 10 – 20 минут;
- при шести и более спутниках – 5 – 10 минут.

При коэффициентах потери точности PDOP, близких к 7, лучше продлить сеанс, «подстраховаться».

При проведении съемки в режиме быстрой статики приемник, расположенный на опорной точке, обычно запускается в режиме обычной статики, а полевой приемник может стартовать либо в режиме быстрой статики, либо в режиме кинематики.

Использование быстростатического режима наблюдений, как правило, обеспечивается специальным индикатором, показывающим, как долго измеряется базовая линия. Приемник использует значения геометрических факторов и количество спутников для того, чтобы оценить, когда можно закончить наблюдение базовой линии, или указать для линии какой длины достаточно данных [Leick, 1995; Leick, 1994c].

10.5.2. Режим реоккупации

В 1988 г. были проведены исследования методик разрешения неоднозначностей по малым объемам измерений. Эти исследования показали, что в принципе можно разрешать неоднозначности из данных, полученных в течение нескольких минут. Последующее тестирование на реальных измерениях показало, что это вполне достижимо [Logsdon, 1995]. Исходя из того, что разрешение неоднозначности при отсутствии каких-либо систематических возмущений является только функцией геометрии наблюденных спутников, были рассмотрены способы улучшения геометрии посредством особого порядка измерений. Идея проведения повторных измерений на одной и той же точке принадлежит Б. Ремонди [Remondi, 1988]. Проведенные испытания показали важность строгой и эффективной методики разрешения неоднозначностей, особенно при использовании режимов ускоренного определения положения.

В режиме реоккупации приемник *R1*, установленный на опорной точке, работает непрерывно (рис. 10.8). С приемником *R2* начинают измерения на произвольной точке *1*, наблюдают на ней несколько минут и обходят точки *2, 3, 4, 5*. Через 1 – 2 часа полевой приемник возвращается на точку 1, где повторяется та же самая процедура измерений. Во время перемещений приемник может выключаться, отслеживать спутники при переходе с точки на точку ему не нужно. Полученные два набора измерений обрабатываются совместно, как один сеанс. Так, если при первом посещении точки наблюдалось четыре спутника, и при втором посещении также четыре тех же спутника, то в сумме получается созвездие из восьми спутников. Их общая геометрия будет существенно лучше. Таким образом, режим реоккупации представляет собой объединение решений из нескольких сеансов с искусственным улучшением геометрии.

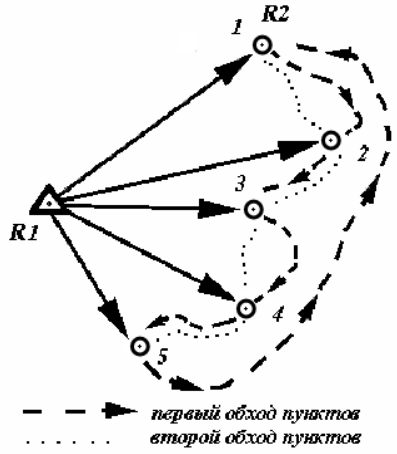


Рис. 10.8. Схема наблюдений в режиме реоккупации

Метод реоккупации применяют в случае слабого геометрического фактора, недостаточного количества спутников или для усиления одночастотных наблюдений. Следует обратить внимание на ограничение величины временного перерыва между посещениями одноименных точек. Разработчики режима и рекомендации фирм ограничивают его величиной 1 – 2, иногда 3 часа.

Исключение составляет программа SKI, допускающая интервал в одни сутки [SKI, 1992]. Изменение состояния тропосферы и ионосферы за этот промежуток времени будет вносить дополнительные ошибки. Особенно это опасно при использовании одночастотной аппаратуры. Точность режима при использовании двухчастотной аппаратуры составляет $5 \div 10$ мм $+ D \cdot 10^{-6}$ [Frei, Schubernigg, 1992].

10.5.3. Работа в поле при статических измерениях

Работа перед выездом в поле. Перед началом полевых измерений производится поверка аппаратуры. Для GPS измерений обычно достаточно поверить оптический центрир, с помощью которого антенна устанавливается над центром знака. Визирная ось центрира при выведенном на середину пузырьке уровня должна совпадать с отвесной линией. Методика этой поверки хорошо известна геодезистам, и мы не будем на ней останавливаться. Дополнительные ошибки могут вызывать люфт переходника в трегере, несоосность удлинителя для установки антенны и переходника. При выполнении высокоточных работ эти источники ошибок должны непременно устраняться [Minkel, 1989].

Чтобы убедиться в исправности приемника, можно выполнить один простой тест: отнаблюдать нулевую базовую линию. Это измерение делается, когда два или больше приемников подсоединяются к одной антенне. Методика исследования описана в разделе 5.3.3.

Обязательные операции перед выездом в поле – проверка доступного объема памяти приемника, разгрузка ее в случае необходимости, а также зарядка аккумуляторов. Полезно заранее проверить комплектацию приемников, исправность штативов, цельность проводов, наличие переходников, рулеток, метеоаппаратуры, полевых журналов.

Работа на пункте. Описанный ниже порядок работы на пункте является достаточно приближенным, поскольку существует множество особенностей в аппаратуре, конструкциях оборудования, типах центров и т. д. Прибыв на точку, наблюдатель должен выполнить следующее.

1. *Оценить возможность проведения наблюдений на точке*. На сигналы GPS могут влиять объекты, расположенные вокруг антенны: деревья, здания, транспорт и люди. Движение людей и транспорта вблизи антенны может влиять на сигналы или даже блокировать их. Рекомендуется парковать автомобиль, по крайней мере, в 15 м от антенны или дальше. Если есть возможность выбора места для установки антенны, то предпочтительнее самое высокое и надежное место.

2. *Установить антенну над маркой*. Вначале устанавливается штатив, примерно над маркой, и на нем закрепляется трегер с центриром. Штатив нужно поставить так, чтобы марка оказалась вблизи перекрестия сетки нитей. Далее производится нивелирование по уровню посредством регулировки ножек штатива, при этом сетка не изменяет свое положение относительно марки. Окончательное приведение пузырька в нуль-пункт выполняют подъемными винтами трегера. Если перекрестие сетки нитей проходит далеко от центра

марки, становой винт штатива ослабляется, и трегер аккуратно передвигается в правильное положение. Затем еще раз проверяется пузырек уровня. После этого на штатив устанавливается антенна приемника (или приемник с антенной). Установка кинематической антенны на штанге-биноге контролируется по уровню.

3. *Расположить аппаратуру.* Располагать аппаратуру следует так, чтобы не только хватало кабелей для соединения отдельных блоков, но и был свободен доступ к штативу для контроля постоянства расположения антенны и возможности измерения ее высоты без нарушения отслеживания спутников. Для этого нужно воспользоваться диаграммой небесной сферы с траекториями спутников и выбрать сторону, с которой можно свободно подходить к штативу. Антенна (или сенсор) соединяется кабелями с приемником, к приемнику подсоединяется аккумулятор. Марку N на антенне направить на север, используя ориентир-буссоль, компас или направление с известным азимутом.

4. *Измерить высоту антенны.* Без знания высоты антенны невозможно дать точный вектор базовой линии. Опыт геодезистов показывает, что измерение высоты антенны является операцией, в которой чаще всего делают ошибки. Поэтому рекомендуется измерять высоту до начала и после наблюдений, а также контролировать ее в процессе наблюдений, причем измерять в различных единицах. Результаты измерений заносятся в журнал, обязательно с зарисовкой измеренных элементов.

В принципе, геодезист должен измерить положение фазового центра антенны F над маркой геодезического знака C по вертикали, или, более точно, по нормали к эллипсоиду (рис. 10.9). Однако истинное положение фазового центра в момент измерений неизвестно, более того, оно различное для разных спутников и для разных частот. Поэтому над маркой измеряется высота некоторой опорной точки антенны (Antenna Reference Point, ARP). Этой точкой может быть точка на оси антенны (низ монтировки, bottom of mount) или на краю антенны (угол – corner, выемка – notch, крюк для подвешивания рулетки – hook). Часто измеряется неисправленная или наклонная высота h' (uncorrected or slant height). Тогда истинная высота h получается как

$$h = h_1 + \Delta h = \sqrt{h'^2 - l^2} + \Delta h, \qquad (10.16)$$

где l – расстояние от центра до края антенны, а Δh – смещение по вертикали точки, от которой измеряется высота антенны, относительно ее фазового центра, называемое в руководствах antenna offset. Параметры l и Δh даются в описании аппаратуры, приводятся на самой антенне и в программном обеспечении. Обычно геодезисту не нужно делать какие-либо вычисления, достаточно указать в приемнике или в программе обработки, какая высота была введена и ее значение.

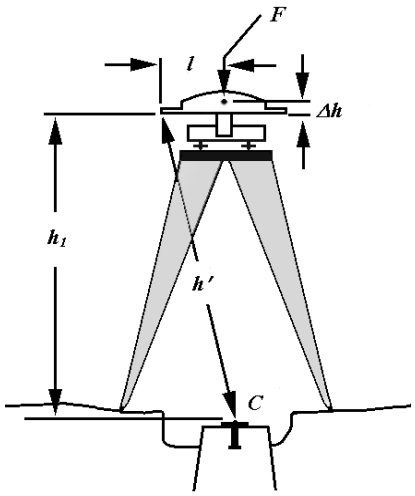


Рис. 10.9. Измерение высоты антенны

5. *Включить приемник*, ввести (или проверить) параметры миссии, дождаться начала позиционирования. Иногда необходимо продолжительное время, пока приемник соберет альманах (до 12.5 минуты) и вычислит положение. Если приемник долго не может вычислить свое положение, то необходимо ввести его грубые координаты.

6. *Начать измерения.* Приемник может начинать измерения автоматически, по заранее установленному автотаймеру, или в ручном режиме, по нажатию кнопки оператором. Первый способ обычно применяется при проведении регулярных длительных сеансов, при мониторинге. Второй способ обычен в практике полевых работ. Опоздание может сделать наблюдения бесполезными. Потеря большого количества одновременных данных может стать причиной того, что решение не будет найдено.

7. *Ввести данные в приемник.* В приемник необходимо ввести:

– название пункта (идентификатор установленной длины);

– высоту антенны и ее смещение в плане (если это допускает интерфейс приемника);

– метеоданные через выбранный заранее интервал времени (температуру, давление, влажность).

Данные вводятся в установленных системах единиц. Применение несогласованных идентификаторов для названий пунктов обычно приводит к большим потерям времени.

8. *Заполнить полевой журнал.* Журнал заполняется для каждого сеанса на каждой станции. В него заносят время начала и конца измерений, метеоданные, неоткорректированную высоту антенны, смещение антенны, ее истинную величину с соответствующими вычислениями и зарисовкой. Всегда указывают тип антенны, используемой для каждого приемника. Информация, отраженная в журнале, должна включать видимость спутников, препятствия и текущее состояние измерений. Все, что может повлиять на прием сигналов, также должно быть занесено в журнал, например, информация о близких радиопередатчиках или ЛЭП. Полевая бригада должна скопировать в журнал полное название с верхней части марки. Необходимо также сделать с марки оттиск и хранить его

вместе с журналом. В дальнейшем это предотвратит возможную путаницу. Например, можно будет определить, на какой точке действительно были измерения: на самом знаке или на его ориентирном пункте.

9. *Контролировать работу аппаратуры во время измерений.* Рекомендуется проверять приемник каждые 15 минут и записывать комментарии в полевой журнал. Контролируется его состояние, объем оставшейся памяти, энергоресурс, наличие срывов циклов, текущие геометрические факторы и т. д. Сбой питания может стать катастрофой, если разрядился аккумулятор, и полевая бригада не контролировала приемник в течение часа. Для увеличения «жизни» аккумулятора не нужно держать его на солнце или на морозе, а когда он не используется, то должен храниться заряженным.

Если случился сбой питания, то необходимо восстановить подачу энергии любым возможным способом. Если приемник отключился, проработав 10% времени сеанса, то нужно увеличить время наблюдения. Время сбоя в питании необходимо записать в полевой журнал. Обычно, когда восстановится энергия после сбоя питания, открывается второй файл, и для одного сеанса будет два файла данных, которые нужно будет объединить при переводе данных в компьютер.

Нормальные погодные условия не оказывают негативного воздействия на GPS сигналы и оборудование. Однако, лед или снег, налипшие на верхнюю часть антенны, могут блокировать сигналы. При холодной погоде уменьшается энергетическая возможность батарей, так что необходимо иметь в запасе дополнительные источники питания. Молния может быть опасна, если антенна оказалась самой высокой точкой в округе, в случае грозы лучше закончить сеанс, чтобы избежать возможности нанесения ущерба бригаде или оборудованию.

Точность определения координат станции зависит от точности измерения высоты антенны. Если замечено, что в течение сеанса штатив сместился, есть несколько выходов: можно усреднить измеренные в начале и в конце высоты. Если есть основание считать, что штатив сместился в начале наблюдений, то нужно использовать конечную высоту, а если в конце сеанса, то использовать начальную высоту. Если разница высот очень велика, то проще повторить наблюдения.

10. *Выключить приемник.* Останавливать съемку нужно только тогда, когда у наблюдателя будет уверенность, что на всех станциях собрано достаточное количество одновременных данных. При наличии связи полевая бригада должна уведомлять об окончании сеанса руководителя, который может изменить график работы. Время окончания сеанса также заносится в журнал.

Статика с кодовым приемником. Измерения в абсолютном или дифференциальном методе с применением кодовых или кодо-фазовых GPS приемников чаще всего применяются для работ с точностью порядка 0.5 – 3 м. Установки базового и полевого приемников должны обеспечивать не только необходимый уровень точности определений координат, но возможность

выполнения самой дифференциальной коррекции положений полевого приемника.

Объем измерений устанавливается на основе рекомендаций фирмы-изготовителя аппаратуры и собственных исследований. Если наблюдения выполняются непродолжительными сеансами, то наблюдатель сам встает над точкой, обычно лицом к югу, следя за тем, чтобы собственное тело не служило дополнительной преградой для сигналов.

При первом включении приемник должен накопить новый альманах и произвести итеративный цикл вычислений координат. При последующих включениях позиционирование обычно начинается через несколько секунд. Задержки с началом позиционирования могут происходить из-за недостаточного количества спутников (объективная реальность или наличие препятствий), неверного задания установок, неисправности аппаратуры. Оператор может выяснить горизонтальные координаты спутников, уровень сигнала, величины DOP, URA и др.

В процессе съемки необходимо вести журнал, в котором записываются номер точки, дата и время наблюдений, имя файла, число позиций, высота антенны, элементы приведения, характер препятствий и т. п.

Пост-обработка кодовых измерений производится по специальным программам, которые поставляются вместе с аппаратурой. Эти программы производят следующие виды операций:

- перевод данных из приемника в компьютер (и обратно);
- создание, редактирование и удаление проектов;
- визуализация данных измерений;
- текстовое или графическое редактирование файлов измерений;
- работа с путевыми точками;
- объединение нескольких файлов в один;
- дифференциальная коррекция измерений;
- усреднение измерений с оценкой точности;
- представление различных видов сервиса, таких, как преобразования координат и высот, вывод данных в графическом и цифровом виде на различные носители и т. д.

Обработка производится в каталоге проекта, в который переводятся файлы базового и полевого приемников. Если наблюдения происходили в разные даты, то для каждой из них удобно создать свою проектную директорию (папку).

Как абсолютные определения на точках, так и дифференциальные определения не подлежат уравниванию, за исключением усреднения (статистическая обработка). Исправление координат точек потребуется при уточнении опорной позиции базовой станции, а также для учета поправок за центрировку и высоту антенны.

Съемки с кодовым приемником в лесу. Наблюдения с кодовым приемником в лесу обычно невозможны, так как сигналы спутников либо не доходят до антенны, либо доходят переотраженными (явление многопутности). Это особенно тормозит работу, когда невозможно отойти в сторону, чтобы

выбрать чистое место. Примером таких ситуаций может служить съемка на геологоразведочных профилях (маршрутах) или при поквартальной съемке лесных массивов, когда точки съемки или съемочная трасса являются заданными и не могут быть изменены.

Группой сотрудников Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС, г. Новосибирск) разработан режим съемки с кодовой аппаратурой в лесу [Пат. 2116656; Прихода и др., 2002]. Задачей изобретения является уменьшение влияния многопутности на принимаемый спутниковым приемником радионавигационный сигнал и повышение точности определения положения. Проблема решается за счет изменения в ходе приема высоты антенны спутникового приемника и обработки усредненного результата. Антенну приемника на измеряемой точке располагают на выносной штанге с возможностью вращательно-поступательного движения (по спирали) относительно вертикальной оси, проходящей через точку (рис. 10.10).

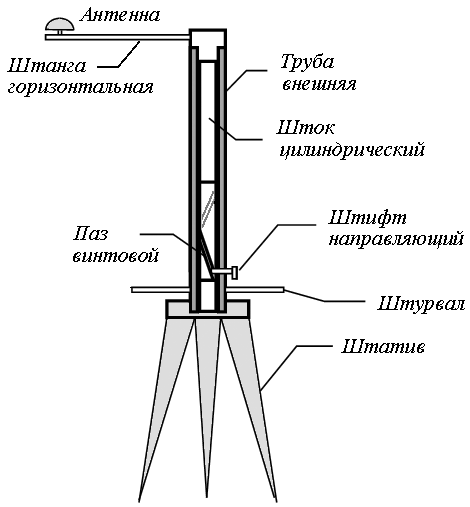


Рис. 10.10. Антенно-поворотное устройство СНИИГГиМС

При наблюдениях после установки антенны на штанге и после того, как приемник захватил сигнал хотя бы одного спутника, включается режим записи измерений, и антенну начинают поднимать, поворачивая вокруг вертикальной оси. Фазовый центр антенны описывает поверхность кругового цилиндра с радиусом и высотой в несколько длин волн (обычно около 0.5 м). После достижения высшей точки антенна перемещается в обратном направлении. В изобретении описывается три типа конструкций для перемещения антенны. Проведенные многочисленные испытания с разными типами аппаратуры показали, что точность измерений по приведенной методике несколько ниже по сравнению с наблюдениями на открытом месте.

10.5.4. Приведение GPS измерений к центру знака

Нередко доступ к центру пункта ограничен из-за неблагоприятных условий радиовидимости спутников. Как правило, это имеет место при привязке к пунктам ГГС, на которых установлены знаки в виде простых или сложных сигналов. Наблюдения под сигналами обычно не дают значения базовой линии с разрешением неоднозначностей из-за многочисленных срывов циклов и

многопутности. В таких случаях антенну устанавливают на некотором удалении от знака, где есть достаточно открытое место, и определяются элементы приведения. Для опорной станции это элементы редукции, для определяемой станции – элементы центрировки. Различий в технологии определения элементов центрировки или редукции никаких нет. Особенность определения элементов приведения в спутниковых измерениях, по сравнению с триангуляцией или астрономическими определениями, состоит в необходимости измерения пространственных трехмерных, а не плановых (плоских) элементов.

Пусть l – наклонная дальность между маркой C и фазовым центром I, точка I_0 – проекция фазового центра на плоскость геодезического горизонта точки C, A и h – соответственно, геодезический азимут и угол высоты линейного элемента l от плоскости геодезического горизонта (рис. 10.11). Введем пространственную систему координат $CENU$ с началом в точке C (ось E направлена на восток, N – на север, ось U – по нормали к эллипсоиду). В этой системе координаты фазового центра I можно получить по формулам:

$$\begin{aligned} E &= l\cos h\ \sin A; \\ N &= l\cos h\ \cos A; \\ U &= l\sin h. \end{aligned} \qquad (10.17)$$

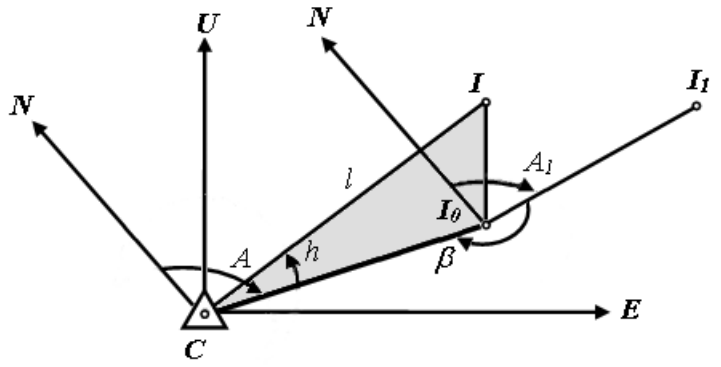


Рис. 10.11. Определение элементов приведения

Поправки в полученные из решения компоненты базовой линии $\Delta X'_{CD}, \Delta Y'_{CD}, \Delta Z'_{CD}$ между пунктами C и D за приведение к центру, из которых C – опорный пункт, а D – определяемый, вводятся по формуле:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{CD} = \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix}_{CD} + \mathbf{R}'_C \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix}_C - \mathbf{R}'_D \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix}_D . \qquad (10.18)$$

Матрицы $\mathbf{R}'_C$, $\mathbf{R}'_D$, зависящие от геодезических координат пунктов C и D, определяются по формуле вида:

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} -\sin L & -\sin B\cos L & \cos B\cos L \\ \cos L & -\sin B\sin L & \cos B\sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \end{bmatrix}. \qquad (10.19)$$

Из сказанного ясно, что главная проблема геодезиста при определении элементов приведения заключается в нахождении угловых параметров h и A.

Дело в том, измерение угла наклона h с помощью теодолита дает угол от уровенной поверхности, в то время как нужен наклон относительно эллипсоида WGS-84. Уклонения вертикала в 10″ на расстоянии 100 м уже дают ошибку в высоте 5 мм [Minkel, 1989]. Поэтому, если такая точность не устраивает геодезиста, то необходимо определять наклон геоида или уменьшать расстояние от центра знака до антенны.

Для определения геодезического азимута A линейного элемента можно в пределах прямой видимости от точки I_0 установить антенну другого приемника I_1, измерить базовую линию I_0I_1 и угол β. Тогда азимут A получается как

$$A = A_1 + \beta \pm 180^\circ, \qquad (10.20)$$

где A_1 – азимут базовой линии I_0I_1, найденный из ее решения.

Если для линии CI_0 известен дирекционный угол α (например, если антенна располагается над маркой ориентирного пункта), то азимут линейного элемента приведения получается как

$$A = \alpha + \gamma - \delta, \qquad (10.21)$$

где γ – сближение меридианов, а δ – редукция направления в проекции Гаусса – Крюгера.

Определение элементов приведения следует делать с контролем, для чего можно повторить измерения с точки I_1. Схемы определения элементов с примером можно найти в [Глушков и др., 2002; Бойко, Смирнов, 2001].

Кроме аналитического метода определения элементов приведения, довольно часто применяется *створный метод*. В этом методе тахеометр устанавливается над маркой в точке C, а два приемника R_1 и R_2 устанавливаются в створе либо с одной стороны от пункта, либо по разные стороны от пункта (рис. 10.12). Расстояния l_1, l_2 между приемниками и центром знака измеряются тахеометром (или рулеткой). Если координаты передаются на точки R_1 и R_2 (случай редукции), то координаты центра пункта получаются интерполированием. Для первого случая (приемники с одной стороны от пункта):

$$X_C = X_1 + \frac{l_1(X_2 - X_1)}{l_1 + l_2}. \qquad (10.22)$$

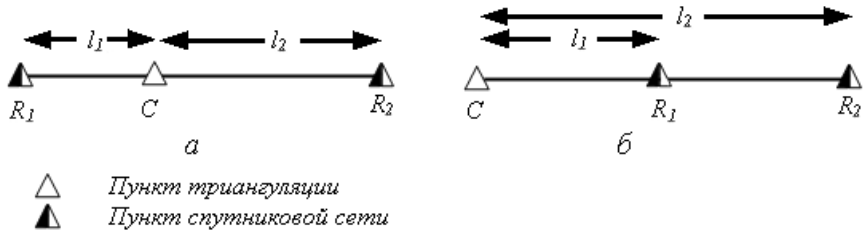


Рис. 10.12. Схема определения элементов приведения створным методом

Во втором случае, когда приемники находятся по разные стороны от пункта,

$$X_C = X_1 + \frac{l_1(X_2 - X_1)}{l_2 - l_1}. \qquad (10.23)$$

Координаты Y_C и Z_C получаются подобным образом. Если координаты от пункта C передаются на некоторую точку (случай центрировки), то вначале

необходимо определить вектор базовой линии между приемниками $\mathbf{D}_{12} = (X_2 - X_1,\ \ Y_2 - Y_1,\ \ Z_2 - Z_1)^T$. Тогда координаты от центра можно передать на каждое положение приемника:

$$X_1 = X_C + \frac{l_1(X_2 - X_1)}{l_1 + l_2} \quad (10.24)$$

или

$$X_1 = X_C + \frac{l_1(X_2 - X_1)}{l_2 - l_1}. \quad (10.25)$$

Этот метод достаточно удобен при плановой привязке. Высотная координата будет менее точна, чем плановые, из-за погрешностей GPS определений и трудностей в обеспечении створа в горизонтальной или наклонной плоскости [Глушков и др., 2002].

10.6. Кинематический режим в относительном методе

10.6.1. Принцип работы в кинематическом относительном режиме

Основная идея кинематического режима состоит в том, что разность наблюдений фаз, выраженная в единицах расстояния, или разность псевдодальностей между двумя эпохами, измеренная одним и тем же приемником и по тем же самым спутникам, равна изменению в его топоцентрическом расстоянии. Не имеет значения, двигался ли приемник между эпохами, и по какому пути он следовал из одной точки в другую. В наблюдении одним приемником фазы несущей волны невозможно отделить движение спутника от движения антенны. Для решения этой проблемы в кинематическом режиме получают также траекторию движения антенны относительно неподвижной точки. Антенна на стационарной точке, называемой опорной (базовой) станцией, остается неподвижной в течение всего сеанса кинематических измерений. Антенна другой станции, называемой подвижной или мобильной станцией, передвигается по точкам, положения которых необходимо определить (на земле, в воздухе или на воде). Оба приемника должны непрерывно следить за одними и теми же спутниками. Как экстренная мера контроля качества, подвижная антенна может вернуться в начальную точку или некоторую другую точку с известными координатами для завершения измерений. Кинематический режим возможен как по псевдодальностям, так и по фазам несущей или их комбинациям. В любом случае, точные положения антенны выводятся по наблюдениям фазы несущей.

Кинематические измерения начинаются с процесса, который называют *инициализацией*. Цель его состоит в разрешении целочисленных неоднозначностей фазовых отсчетов на момент начала движения подвижной антенны (см. разделы 8.4.3 и 8.4.4). Инициализация на земле может проводиться тремя способами: на пункте с известными координатами, путем измерения базовой линии и путем обмена местами установки пары антенн. Если инициализация проведена успешно, то после этого можно по относительным изменениям фаз двух приемников отслеживать изменение положения подвижной антенны. Однако в процессе измерений может происходить потеря захвата

сигналов одним из приемников, что приводит к потере счета циклов непрерывной фазы. Чаще это бывает у мобильного приемника. Срыв циклов может быть следствием прохождения вблизи препятствия, при развороте самолета для захода на новый маршрут аэрофотосъемки и т. д. Если число наблюдаемых спутников в момент потери захвата сигнала оказалось меньше четырех, то инициализацию необходимо выполнять заново. Можно представить, насколько это неудобно, если мобильная антенна располагалась на самолете или на морском судне. Поэтому большим событием в области GPS технологий стала разработка в 1989 г. метода инициализации при движении приемника. Это сделали немецкие ученые Г. Сеебер и Г. Вюббена. В отличие от метода «инициализации на земле», он получил название «инициализации на лету» (On-the-Fly, OTF).

Кинематическое относительное позиционирование возможно и в том случае, когда оба приемника в движении. Положение одного из приемников должно быть известно хотя бы приближенно, чтобы гарантировать точное определение относительных координат. Предварительное положение движущегося приемника может быть постоянно доступно из решения по С/А-кодовым псевдодальностям. Тот же прием можно применить для отслеживания (мониторинга) ориентировки по спутникам. В этом случае непрерывно наблюдают три приемника. Их относительные положения определяются в трехмерном пространстве как функции времени и преобразуются в азимут и углы крена и тангажа. Это же возможно с использованием одного специального приемника (ориентатора), имеющего три разнесенных антенны [Чмых, 1997].

Обычная точность фазовых двухчастотных наблюдений в статическом режиме составляет 5 мм + $D \cdot 10^{-6}$. Чтобы получить этот уровень точности для линии в 10 км, необходимо время 20 – 30 минут. Для такого короткого расстояния влиянием ионосферы и тропосферы можно пренебречь. Тогда уравнение выраженной в циклах двойной разности для базовой линии AB и спутников i, j в эпоху t можно записать в следующем виде:

$$\phi_{AB}^{ij}(t) = \frac{f}{c} r_{AB}^{ij} + N_{AB}^{ij}(t_0), \qquad (10.26)$$

где $r_{AB}^{ij} = r_A^j - r_A^i - r_B^j + r_B^i$ – двойная разность соответствующих топоцентрических геометрических дальностей; $N_{AB}^{ij}(t_0)$ – двойная разность целых неоднозначностей в начальную эпоху t_0.

Правая часть уравнения состоит из двух членов, а именно разностей расстояний между спутниками и приемниками и неизвестной начальной целой неоднозначности двойной разности. Если первый член определить из наблюдения базовой линии в статическом режиме, то, используя уравнение, можно определить неизвестные начальные целые двойных разностей $N_{AB}^{ij}(t_0)$, соответствующие парам спутников. Вычисляемые целые действительно должны быть близки к целым числам, например, 385.9954 или 386.0023. Эти начальные оценки затем округляются до целого значения, то есть 386 в последующем решении. Такое фиксирование дает наиболее точное значение для векторов базовых линий, поскольку отвечает природе фазовых измерений.

Необходимость наблюдать базовую линию достаточно продолжительное время вызвана тем, что при меньшем объеме данных целые неизвестные не разрешаются до их теоретических значений.

Как только целые значения установлены, достаточно всего несколько наблюдений, чтобы получить вектор базовой линии между любыми двумя точками. Подобным образом, если целочисленные неоднозначности найдены, то необходима всего лишь пара наблюдений для определения разности координат между последующими векторами базовых линий, имеющих одно общее для всех линий начало.

В этом состоит основной принцип кинематических измерений. Вначале находятся целочисленные неоднозначности двойных разностей. Затем один из приемников перемещается на неизвестную станцию таким образом, что постоянно поддерживается захват фазы, и, следовательно, удерживаются известными начальные неоднозначности. По прибытию на новую станцию необходимо только 1 – 2 наблюдения, чтобы определить новую неизвестную точку. При условии, что нет потери захвата сигнала, что приводит к потере непрерывной фазы, процесс может продолжаться до тех пор, пока не будут отсняты все неизвестные точки. Можно вообще не останавливаться на точках, а производить фиксирование фазы в предопределенные моменты. Отсюда следуют два основных режима кинематического съемки. Первый режим получил название *«стой – иди»* (*Stop-and-Go*), второй режим – *«истинная кинематика»* (*True Kinematic*), или *«непрерывная кинематика»* (*Continious Kinematic*). Каждый из них может выполняться с пост-обработкой или в реальном времени (Real Time Kinematic, RTK).

В кинематическом режиме оператор должен оценивать время наблюдения самостоятельно, пользуясь данными о геометрических факторах, рекомендациями фирмы и собственным опытом.

10.6.2. Позиционирование по фазе несущей в реальном времени

Во многих случаях координаты точки необходимо знать немедленно во время ее посещения, не дожидаясь результатов обработки в офисе. Чтобы выполнить это, данные опорного приемника должны быть переданы полевому приемнику с использованием надежной линии связи. Разработанная в середине 1980-х гг. техника дифференциальных наблюдений по псевдодальностям (DGPS) была рассчитана на точность порядка 1 м и для этой цели не подходит. В случае DGPS опорная станция передает поправки пользовательским приемникам, которые объединяют их со своими измерениями псевдодальностей и получают исправленные псевдодальности, из обработки которых определяются положения.

Есть несколько источников дифференциальных поправок, они включают:

– коммерческих провайдеров Real-time DGPS и земного (например, RDS), и спутникового базирования (например, Omnistar, Landstar);

– правительственных провайдеров, таких, как маяки Береговой охраны США (Coast Guard);

– системы заказчика, которые требуют, чтобы имелся источник поправок DGPS в формате RTCM SC 104 (то есть базовая станция) и линия связи радиоданных (модем и передатчик) или сотовый телефон.

Почти все коммерческие источники дифференциальных поправок обеспечивают только поправки для фазы кода. Оперативное расстояние дифференциальных поправок для фазы несущей в настоящее время довольно ограниченное (50 км в лучшем случае, а обычно 20 км), поэтому большинство применений RTK требуют, чтобы исполнитель устанавливал свою собственную сеть базовых станций.

Обработка измерений, проведенных подвижным приемником, и данных, принятых по линии связи, выполняется на внешнем компьютере. Некоторые фирмы снабжают свои приемники соответствующими внутренними программами для обработки кинематических измерений. Собранные файлы поступают на обработку с некоторой задержкой, поскольку данные опорной станции должны быть преобразованы в нужный формат, собраны в пакеты, переданы по линии связи, декодированы и переданы в обрабатывающую программу. Все эти операции не могут выполняться одновременно, из-за чего происходит некоторая задержка. Она зависит от скорости передачи информации и может доходить до двух секунд. Эта задержка может быть приемлемой для многих видов статики, но не всегда удовлетворяет некоторым видам кинематики и точной навигации.

В ситуациях, требующих минимальной задержки данных, таких, как контроль механизмов или навигация на высоких скоростях, подвижная станция может экстраполировать измерения опорной станции на эпохи собственных текущих измерений. Для этого перед выполнением алгоритма двойных разностей устанавливается соответствующий фильтр. Такой подход дает ошибки в двойных разностях на уровне сантиметра при задержке в связи данных в одну секунду. Альтернативно может быть использован подход, аналогичный тому, который применяется при дифференциальном определении координат по псевдодальностям, и заключающийся в передаче *поправок* для фазы несущей частоты. Из-за того, что поправки изменяются медленнее, чем измеренные фазы, ошибка в поправке, вызванная ее задержкой, менее серьезна. Использование этого режима может снизить задержку решения до четверти секунды, но точность обычно ограничена несколькими сантиметрами. Любые потери в счете циклов фазы несущей частоты будут понижать точность. Обрабатывающая программа должна содержать алгоритмы для обнаружения и восстановления срывов циклов.

Ключевая особенность в получении высоких точностей, присущих RTK-измерениям, – это способность определять целочисленные неоднозначности фазы во время движения мобильного приемника. Если программа просто оценивает неоднозначности как вещественные величины, то полученное плавающее решение обеспечивает координаты с точностью от метра до дециметра. Приемная аппаратура, позволяющая измерять фазы и точные псевдодальности, дает возможность эффективно применять «инициализацию на лету» (OTF). Наблюдения точных псевдодальностей дают возможность

уменьшить объем исследований неоднозначности. Чем выше их точность или ниже уровень шума, тем меньшее число комбинаций целых чисел должно тестироваться, и быстрее получается решение.

Многие приложения OTF инициализации используют широкополосную (разностную) комбинацию фаз несущих частот L1 и L2. Хотя эта комбинация имеет больший шум, чем чистая фаза на частоте L1, соответствующая ей длина волны в 86 см намного легче и быстрее разрешает неоднозначность. Полученное по широкополосной комбинации фаз положение может использоваться для прямого разрешения неоднозначностей на частоте L1. В алгоритмах для инициализации OTF применяют метод функций неоднозначности, или исследование неоднозначностей по методу наименьших квадратов (МНК), с фильтром быстрого исследования неоднозначности, а также метод уравнивания неоднозначностей с исключением корреляций по МНК (λ-метод) [Langley, 1998; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Скорость, с которой можно найти неоднозначности, зависит от многих факторов, включая число наблюдаемых спутников, их геометрию, наличие псевдодальностей, шум измерений и использование двухчастотных наблюдений. При хороших условиях время определения может быть короче одной минуты, но оптимально должно быть менее 10 с.

Чем больше спутников наблюдают опорный и подвижный приемники, тем быстрее происходит операция нахождения начальных неоднозначностей и выше точность положений. В этом отношении определенное преимущество имеют системы, работающие по сигналам спутников как ГЛОНАСС, так и NAVSTAR. Преимущество интегрированной аппаратуры особенно проявляется в полузакрытых местностях, таких, как карьеры, улицы большого города, речные долины и т. п.

Наилучшие результаты в RTK получаются, когда опорная и подвижная станции наблюдают одни и те же восемь или более спутников при $PDOP \leq 2$. Хорошие результаты можно получить, если пара приемников наблюдает пять общих спутников при $PDOP \leq 4$. Алгоритмы обработки RTK обычно требуют приближенной оценки динамики подвижного приемника в виде скоростей и ускорений. Часто они выражаются в таких терминах, как статика, передвижение пешком, на автомобиле или на самолете. Некорректное употребление этих терминов также может приводить к менее точным решениям [Leick, 1993a, 1993b].

Линии передачи данных. В RTK-системах и опорная, и подвижная станции состоят из одно- или двухчастотных приемников с антеннами и радиомодемов, имеющих свои собственные антенны. Обычно пользователи на опорной и подвижной станциях работают с одинаковыми типами приемников и радиомодемов, хотя должно быть очевидно, что на опорной станции используется передающий радиомодем, а на подвижной станции – принимающий радиомодем. Возможно применение мощных передатчиков и менее мощных принимающих радиомодемов. Часто передающая антенна имеет более высокое усиление, чем принимающая, но обе они являются всенаправленными. В некоторых RTK-системах приемник и радиомодем находятся в одном корпусе. Для достижения лучших результатов GPS антенна

опорной станции должна устанавливаться на месте, свободном, по возможности, от многопутности, а антенна радиосвязи должна устанавливаться как можно выше, чтобы иметь максимальный охват связью.

Линии связи для поддержки операций в RTK обычно используют некоторые виды радиоканалов, хотя могут использоваться и оптические линии связи. Для кинематических измерений, которые обрабатываются по двойным разностям, данные должны обновляться каждые 0.5 – 2.0 с, что медленнее 10 с, используемых для кодовых измерений в DGPS. Так, принимая во внимание, что сообщение в формате RTCM SC-104 для DGPS обычно передается радионавигационными маяками со скоростью 200 бод, для линии связи RTK необходима скорость, по крайней мере, 2 400 бод, но лучше, если 9 600 или даже 19 200 бод (табл. 10.2). Полоса пропускания для поддержки таких скоростей находится в УВЧ или ОВЧ диапазонах. В США и юрисдикциях некоторых других стран на пользование частотами в ОВЧ от 150 до 174 МГц и в УВЧ от 450 до 470 МГц можно получить лицензии для кинематики в реальном времени с использованием передатчиков мощностью от 2 до 35 ватт. В России на использование фиксированной радиочастоты необходимо разрешение Главного радиочастотного центра (ГРЧЦ). В Северной Америке ISC диапазон 902-928 МГц (промышленно-научно-медицинский) может быть использован без лицензии, но выходная мощность передатчика ограничивается 1 ваттом.

Таблица 10.2. Скорости передачи линий связи

Способ передачи	Скорость (бод)
Очень низкие частоты (VLF)	50
Низкие частоты (LF)	300
Системы радиоданных (RDS)	1000
Сверхвысокие частоты (UHF)	2400
Сотовый телефон	9600
INMARSAT	19200

Из-за того, что RTK работает в ОВЧ и УВЧ диапазонах, ее применение ограничено большей частью прямой видимостью с максимальным расстоянием в d км, которое может быть теоретически достигнуто. Это расстояние можно оценить по формуле:

$$d = 3.57\sqrt{k}\,(\sqrt{h_r} + \sqrt{h_t}), \quad (10.27)$$

где k – рефракционный коэффициент, изменяющийся в зависимости от погоды от 1.2 до 1.6 при типичном значении 1.33; h_r и h_t – соответственно, высоты антенн приемника и передатчика над средним уровнем земной поверхности. Для передающей антенны с высотой 30 м над земной поверхностью и антенной приемника с высотой 2 м расстояние, на котором можно принимать сигнал, равно примерно 28 км. На практике, добиться приема на таком расстоянии довольно трудно. Любые препятствия вдоль пути распространения сигнала могут ограничивать мощность сигнала. Более того, даже при отсутствии препятствий сигнал подвергается ослаблению обратно пропорционально квадрату расстояния. Это так называемые потери в свободном

пространстве. Кроме прямого сигнала, приемник часто получает сигналы, отраженные от поверхности, которые накладываются на прямой сигнал. Поэтому полные потери сигнала зависят от многих факторов, включая характеристики земного отражения, свойств местности, наличия зданий и других построек. Дополнительные потери мощности сигнала происходят в антенных кабелях. Будет сигнал обнаружен или нет – зависит от чувствительности приемника.

Если сигнал становится слишком слабым, некоторые биты сообщения могут быть утеряны, и связь оказывается ненадежной. Для увеличения расстояния с уверенным приемом сигналов можно повышать мощность передатчика, использовать направленные передающие антенны или увеличивать высоту передающей антенны. Можно применять направленные приемные антенны, хотя это не всегда практично, или ретрансляторы. Таким образом, успех кинематических съемок в реальном времени полностью зависит от надежности линий связи. В дополнение к возможным нарушениям связи, вызванным препятствиями, возможна потеря сигнала из-за интерференции с сигналами от других передатчиков, работающих на близких частотах. Геодезист может обнаружить такое явление по миганию индикатора радиомодема, когда передающая станция не работает.

При работе в реальном времени при съемках DGPS и RTK данные от базового приемника, расположенного в точке с известными координатами, передаются к полевому приемнику. Полевой приемник учитывает данные базового приемника, чтобы точно вычислить собственное положение.

Радиомодемы обеспечивают беспроводную связь между базовым и полевым приемниками. Когда базовый приемник транслирует данные через передатчик радиомодема, его данные может использовать неограниченное число полевых приемников. Радиомодемный передатчик состоит из *радиомодулятора*, *усилителя* и *антенны*. Радиомодулятор берет данные от GPS приемника и преобразует их в радиосигнал, который можно передавать. Усилитель повышает силу сигнала до уровня, при котором переданный сигнал может быть принят полевым GPS приемником. Чем дальше полевой приемник, тем более сильный нужен сигнал. Антенна передатчика транслирует усиленный сигнал в эфир. Мощность усилителя непосредственно влияет на расстояние, на котором сигнал может быть принят. Расстояние также зависит от типа местности и места установки радиоантенны.

Связь между радиомодемным передатчиком и базовым GPS приемником происходит через последовательные порты приемника и радиомодемного передатчика. Радиопередатчик может быть непосредственно объединен с электроникой GPS приемника или связан через линии связи Blue-tooth, Hi-Fi, Wi-Fi.

Радиомодем приемника состоит из антенны радиоприемника и *радиодемодулятора*. Антенна радиоприемника улавливает сигналы из эфира и направляет их к радиодемодулятору, преобразующему сигнал обратно в форму, которая может быть доставлена в последовательный порт полевого GPS приемника.

Связь между радиомодемным приемником и полевым GPS приемником происходит через последовательные порты GPS приемника и радиомодемного приемника. Радиоприемник может быть объединен с электроникой GPS приемника.

На рынке спутникового оборудования есть множество радиомодемов. Главной характеристикой радиомодемов является форма, в которую преобразуются данные для передачи: *UHF* (сверхвысокочастотные), *VHV* (очень высокой частоты) и *Spred Spectrum* (широкого спектра с перескоком частот – frequency hopping или direct – прямого действия). У каждого из них есть свои преимущества и недостатки.

Для использования определенных типов модемов может потребоваться разрешение государственных органов. Есть международные и национальные органы, которые распределяют частоты и дают разрешение на передачу радиосигналов. В некоторых странах есть полосы частот для широкой публики, не требующие разрешения на передачи. Этот важный фактор необходимо учитывать при выборе радиомодема, поскольку получение разрешения на трансляцию информации часто бывает не простой задачей. Особый интерес представляют частоты, на которые дается разрешение работать. В США полоса 900 МГц, а в большинстве стран Европы 2.4 ГГц допускается для использования связи Spred Spectrum без каких-либо разрешений (но с ограничением на мощность UHV передатчика и Spred Spectrum радиомодемов, наиболее популярных для DGPS и RTK). Spred Spectrum радиостанции имеют радиус действия около 20 км (если антенна установлена на очень высоком месте). UHV имеют больший радиус действия. С 35-ваттным усилителем UHV радиостанция может иметь радиус передачи до 45 – 50 км, в зависимости от условий местности и установки антенны [Langley, 1998].

Успехи в развитии связи привели к появлению таких линий передачи данных, как Интернет и сотовая связь GSM. В 2002 г. крупнейшие российские операторы связи объявили о запуске новой услуги GPRS – системе пакетной передачи данных в сетях GSM. При использовании GPRS данные собираются в пакеты и передаются в эфир, заполняя не используемые в данный момент голосовые каналы, которые всегда есть в промежутках между разговорами абонентов. Возможность использования сразу нескольких голосовых каналов обеспечивает более высокую скорость передачи данных, а этап установления соединения занимает несколько секунд. GPRS занимает участок частотного диапазона только в момент фактической передачи пакетов, что обеспечивает чрезвычайно эффективное использование доступной полосы частот и позволяет делить один канал между несколькими пользователями (мобильными RTK приемниками). Пользователь платит не за время соединения, а за фактический объем переданной или полученной информации, при этом средняя скорость передачи данных составляет 20 – 40 Кбит/с.

Что касается зон GPRS-покрытия, то они пока невелики и распространяются, в основном, на мегаполисы. Но в планах всех операторов стоит расширение GPRS услуг на всю территорию действия сети сотовой связи. В рассматриваемом варианте можно предложить два способа запуска базовой RTK станции для

передачи RTK поправок через GPRS связь. Один из них заключается в использовании на базовой станции сотового телефона с активированной услугой GPRS для трансляции поправок. Этот способ удобен в том случае, когда требуется установить временную базовую станцию непосредственно в районе работ и выполнить съемку близлежащей территории. Таким образом, обеспечивается возможность работы на минимальном удалении подвижного приемника от базовой станции, что гарантирует быструю инициализацию фазовых измерений. Этот способ универсален и позволяет развернуть базовую RTK станцию в любом месте при условии нахождения сотовой связи в области покрытия. Недостатками являются необходимость оплачивать исходящий трафик для базового телефона и короткое время автономной работы мобильного телефона. Для решения последней проблемы можно использовать специализированный GSM/GPRS модем с внешним питанием. При наличии качественного Интернет канала базовый приемник можно установить в офисе и направлять RTK поправки от приемника GPS на выделенный IP адрес посредством компьютерной сети. В этом случае в комплект базового RTK приемника вообще нет необходимости включать мобильный телефон. Подвижный приемник GPS, «выйдя» в Интернет с использованием GPRS соединения, будет «забирать» RTK поправки по фиксированному IP адресу. Этот способ предназначен для организации базовой станции постоянного действия и позволяет снизить оплату услуг сотового оператора ровно в два раза.

Следует напомнить, что для успешной реализации опробованного метода необходимо обязательно находиться в области покрытия GPRS. Пока что это лишь территории крупных городов: Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска – и прилегающих к ним областей. Однако уже в ближайшем будущем можно рассчитывать на работу в режиме RTK на всех плотно заселенных территориях.

Для тех областей, где услуга GPRS отсутствует, передача RTK поправок может осуществляться с использованием стандарта GSM, поддерживающего услугу передачи данных. Эта методика была протестирована ранее и успешно используется производственным отделом компании «Навгеоком».

Выполненные полевые испытания позволяют сделать следующие выводы.

1. Передача поправок с помощью GPRS по сравнению с традиционным радиоканалом на основе УКВ радиомодемов дает следующие преимущества:

– нет необходимости в получении разрешения ГРЧЦ на использование фиксированного номинала радиочастоты;

– достигается значительный выигрыш по стоимости (стоимость комплекта сотовых телефонов (модемов) на порядок меньше комплекта УКВ радиомодемов);

– нет необходимости в прямой радиовидимости между мобильным телефоном базовой станции и телефоном, установленным на подвижном приемнике;

– обеспечивается быстрое развертывание базовой RTK станции в полевых условиях;

– появляется возможность отправлять по электронной почте результаты измерений сразу в офис и получать оттуда файлы с пунктами обоснования на новые объекты.

2. Однако, для успешной работы в режиме RTK, необходимо соблюдать следующие условия:

– необходим надежный канал для передачи поправок RTK от базовой станции к подвижному приемнику с частотой 1 раз в секунду (1 Гц);

– для успешной инициализации съемки необходимо, чтобы все приемники одновременно и непрерывно отслеживали сигналы минимум от пяти общих спутников по двум частотам;

– подвижные приемники должны поддерживать режим инициализации фазовых измерений на лету (OTF);

– при сбое в приеме поправок RTK инициализация срывается, при этом точность измерений резко падает. Для возврата точности на сантиметровый уровень необходимо дождаться восстановления инициализации и только после этого продолжить RTK съемку;

– для достижения наибольшей производительности при выполнении съемки в режиме RTK (с временем OTF инициализации не более 10 – 15 с) не следует удаляться от базовой станции на расстояния свыше 10 – 12 км.

3. На городских территориях рассматриваемый метод имеет ряд ограничений в связи с особенностями городской застройки. А именно, необходимо строго обеспечить отслеживание минимум пяти общих спутников по двум частотам, а также убедиться в том, что для данной территории загруженность сотового канала позволяет обеспечить прием RTK поправок. Очень часто большая часть городских территорий не отвечает этим требованиям и поэтому не позволяет использовать данный метод с должной эффективностью. Наибольший эффект и универсальность для полузакрытых территорий будут достигаться путем комбинирования GPS съемки в режиме RTK и в режиме с постобработкой. Для закрытых территорий рекомендуется совместное использование GPS и традиционного оборудования (электронных тахеометров). Такой комплект обеспечит возможность проведения геодезических работ практически в любых условиях с максимальной производительностью.

4. Наибольшие преимущества и перспективы этот метод имеет при работе на открытых незастроенных (сельских) территориях, позволяя оперативно проводить сгущение опорной съемочной сети, выполнять топографическую съемку, межевание земель и др. Для достижения сантиметровой точности время наблюдений на точке в режиме RTK составляет 5 – 10 с [Караванов, Малибашев, 2004; Ванин, 2005; Фетисов, Петров, 2005; Toran et al., 2004].

Формат RTCM. В 1985 г. Специальный комитет 104 (Special Committee 104) Радиотехнической комиссии по мореплаванию (Radio Technical Commission for Maritime) США предложил формат стандарта RTCM 104 для кодирования и передачи поправок для DGPS. Хотя были разработаны и другие частные пользовательские форматы, формат RTCM остается наиболее

распространенным. Точность DGPS можно повысить, если передавать полевым приемникам данные о фазе несущей опорного приемника. Это позволяет получать в реальном времени высокоточное определение координат, даже если приемник движется. Такой режим получил название кинематики в реальном времени (RTK). Специальный комитет SC-104 при RTCM разработал и добавил новые типы сообщений. В версии 2.2 имеется 64 типа сообщений (часть из них перечислена в табл. 10.3), но некоторые из них до сих пор не определены. Заметим, что сообщения касаются и GPS, и ГЛОНАСС.

Таблица 10.3. Некоторые типы сообщений RTCM версии 2.2

Тип	Значение
1	Дифференциальные поправки для GPS
3	Параметры опорной станции
6	Нулевой кадр (заполнитель)
9	Частный набор сообщений 1-го типа
16	Специальное сообщение по GPS
18	Сырые измерения фазы несущих колебаний
19	Сырые измерения кодовых дальностей
20	Поправки к фазе несущей
21	Поправки к кодовой дальности
31	Дифференциальные поправки для ГЛОНАСС
32	Параметры опорной станции ГЛОНАСС
34	Частичный набор сообщений 31-го типа
36	Специальное сообщение для ГЛОНАСС

Формат сообщений почти идентичен тому, что используется в навигационном сообщении GPS и состоит из последовательности 30-битовых слов. Последние шесть битов в каждом слове являются битами паритета. Каждое сообщение начинается с заголовка. Первое слово содержит преамбулу фиксированной длины, идентификацию типа сообщения и идентификатор опорной станции. Второе слово содержит метки времени кадра в форме Z-счета, число последовательности, длину сообщения и идентификатор здоровья опорной станции. В некоторых сообщениях к заголовку добавляется третье слово.

Сообщения 1 – 17 были уже в более ранней версии 2.0, в то время как сообщения 18 – 21, каждое с заголовком из трех слов, были добавлены, начиная с версии 2.1. Сообщения, связанные с ГЛОНАСС, появились с версии 2.2. Сообщения 18 и 19 содержат необработанные данные по фазе и кодовым дальностям, полученным на опорной станции по GPS и ГЛОНАСС, необходимые для относительного позиционирования. Сообщения 20 и 21 содержат поправки к соответствующим измерениям и, таким образом, поддерживают дифференциальное позиционирование. Детальное описание сообщений всех типов можно найти в RTCM (1998) (http://www.rtcm.org/ и http://it.geocities.com/maurovenanzi/GPS-DGPS-data-elaboration.html).

Для сетевой передачи RTCM поправок посредством Интернет протокола разработан формат Ntrip. Это новый формат, введенный Немецким Федеральным Агентством по Картографии и Геодезии (BKG) для передачи данных в формате RTCM посредством Интернета. Формат Ntrip был разработан

совместно с компанией Trimble Terrasat и имеет хорошие перспективы стать международным стандартом передачи данных глобальных спутниковых навигационных систем GNSS (http://www.navgeocom.ru).

10.7. Методы сбора данных при статических измерениях

Работа с двумя приемниками. Высокая производительность и надежность результатов являются необходимыми условиями при выполнении геодезических работ. Они обеспечиваются не только соответствующим выбором аппаратуры и режима съемок, но также и технологическими схемами сбора данных [Постоногов, 1994]. Под этим подразумевается последовательность обхода пунктов и комбинирование режимов съемки. Разумеется, не всегда возможно объединение различных видов съемки. Зачастую они жестко предопределены и не допускают объединения режимов с разной точностью. Примером таких работ является построение ГГС, например СГС-1, где разрешаются только статические измерения.

Рассмотрим пример передачи координат в небольшой геодезической сети. Здесь мы не будем обращать внимания на такие ситуации, как возможности подъезда к точкам и т. п. Если используется два приемника, то возможны два способа перемещения от точки к точке.

1. Установить приемник *R1* в точке с известными координатами, а с приемником *R2* последовательно посещать все остальные точки, наблюдая на них в режиме статики или быстрой статики, как это уже было представлено на рис. 10.6 при описании режима быстрой статики. Из обработки пяти базовых линий координаты будут переданы на все остальные пункты. Эту технологию сбора данных называют *радиальным методом*. Ее очевидные качества – быстрота, но отсутствие контроля.

2. Можно установить приемник *R1* в опорной точке *1*, а приемник *R2* – в определяемой точке *2* и измерить базовую линию *12* (рис. 10.13). После этого опорным становится приемник *R2* в точке *2*, а приемник *R1* перемещается на точку *3*, и наблюдается линия *23* и т. д. Такую технологию сбора данных будем называть *последовательным методом*.

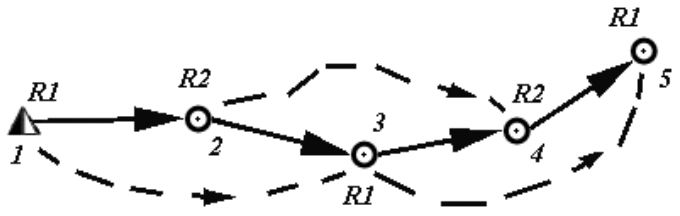
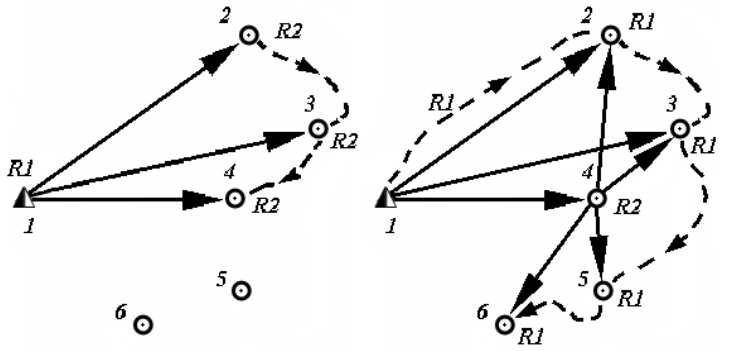


Рис. 10.13. Последовательный метод сбора данных

Часто применяют более сложные схемы сбора данных парой приемников. Например, приемник *R1* устанавливается на опорной точке *1*, а приемник *R2* посещает точки *2, 3, 4* (рис. 10.14, *а*). Во время этих сеансов наблюдаются базовые линии *12, 13* и *14*. На точке *4* приемник *R2* становится опорным, а приемник *R1* перемещается с пункта *1* последовательно на точки *2, 3, 5, 6* (рис. 10.14, *б*), во время этих сеансов измеряются линии *42, 43, 45* и *46*. При такой

технологии оба приемника поочередно становятся то опорным, то мобильным. Конечно, при этом ниже производительность, зато есть надежный контроль измерений.

Для контроля измерений в случае радиального метода можно параллельно с измерениями статическим режимом провести кинематику «стой – иди». Тогда для каждой базовой линии будет получено решение и в статике, и в кинематике. Другой выход – повторить измерения с другим положением базы для первого приемника.



а) *б*)

Рис. 10.14. Комбинация радиального и последовательного метода сбора данных

Работа с тремя приемниками. Работа с тремя и большим числом приемников может иметь соответственно больший набор комбинаций режимов сбора данных. При этом комбинации зависят также и от характеристик аппаратуры. Двухчастотные приемники предпочтительней использовать на длинных базовых линиях, одночастотные – на коротких базовых линиях. Приведем три технологии работы с тремя приемниками.

1. Приемники *R1* и *R3* работают как опорные (базовые) на пунктах *1* и *6* и определяют базовую линию *16*, а *R2* – как мобильный (рис. 10.15), который последовательно посещает пункты *2*, *3*, *4* и *5*. Работа возможна в режимах статики, быстрой статики, реоккупации и кинематики «стой – иди». Все положения мобильного приемника получаются с контролем.

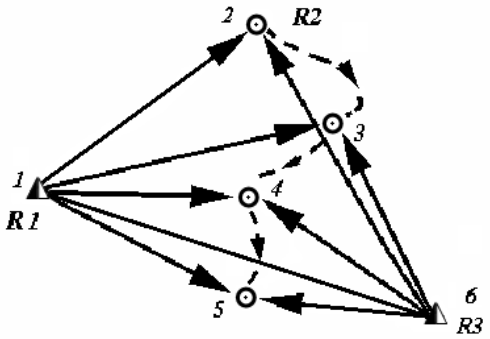
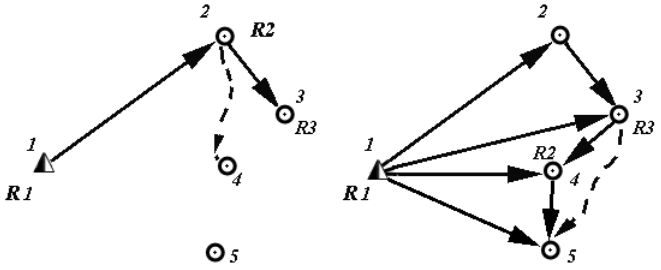


Рис. 10.15. Сбор данных двумя базовыми и одним полевым приемником

2. Еще один прием работы – один базовый и два мобильных приемника. Базовый приемник *R1* постоянно располагается на пункте *1*. Мобильные

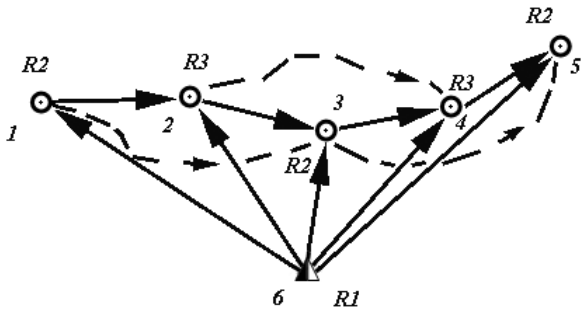
приемники *R2* и *R3* (рис. 10.16) одновременно работают на точках *2* и *3* (рис. 10.16, *а*). При этом определяются базовые линии *12* и *23*. Затем приемник *R2* перемещается на точку *4*. Во время его движения приемник *R3* продолжает работать на точке *3* и получает базовую линию *13*, а когда приемник *R2* начнет работу на точке *4*, определяются линии *14* и *34* (рис. 10.16, *б*). После перемещения приемника *R3* на точку *5* можно получить все базовые линии как независимые. Чередование режимов работы приемников достигается переговорами голосом при малых расстояниях или по рациям либо мобильному телефону.



а) б)

Рис. 10.16. Сбор данных одним базовым и двумя мобильными приемниками

Другой вариант работы одного опорного и двух мобильных приемников показан на рис. 10.17. Чтобы в каждом из треугольников *612, 623, 634, 645* одна из базовых линий не оказалась зависимой, необходимо так составлять расписание работы приемников, чтобы одновременные наблюдения трех приемников сочетались с наблюдениями пары приемников. Например, из наблюдений приемников на точках *6, 1, 2* получаются линии *61* и *12*, а затем работают приемники на точках *6* и *2* и определяют линию *62*.



10.17. Базовый приемник R1 и два мобильных приемника R2 и R3

3. Все приемники – мобильные, хотя, строго говоря, функции базового каждый из них выполняет поочередно. В этом технологическом приеме также объединяются качества последовательного и радиального методов. Рассмотрим рис. 10.18. В начальный момент T_1 работают все три приемника на точках *1, 2, 3*, получая линии *12, 13* и зависимую линию *23*. Затем приемник *R1* передвигается в точку *5*, а приемник *R2* – в точку *4*, и наблюдаются линии *34* и *35*, а также зависимая линия 45. Далее на следующую точку должен перемещаться приемник R3 и т. д. Для того, чтобы зависимые линии оказались независимыми, необходимо их наблюдать в дополнительных сеансах или

изменять соответствующим образом при обработке время начала и конца съемки, разделяя файлы данных.

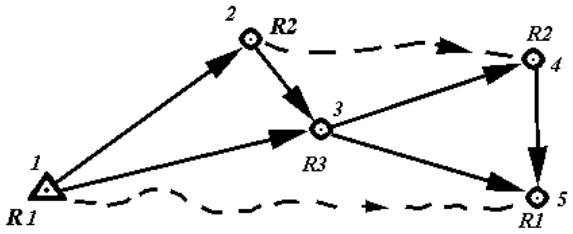


Рис. 10.18. Съемка тремя мобильными приемниками

10.8. Геодезические сети для мониторинга земной поверхности

10.8.1. Геодинамический мониторинг

Среди различных видов мониторинга земной поверхности с применением спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС можно выделить:

– мониторинг международной земной отсчетной основы ITRF, включающий мониторинг тектонических плит, параметров ориентировки Земли (ПОЗ), параметров движения спутников GPS и ГЛОНАСС;

– региональные геодинамические сети с размерами порядка 100 – 1 000 км;

– локальный геодинамический мониторинг земной поверхности, уровня воды, поверхности снега (льда), движения ледников, деятельности вулканов и т. п. Размеры таких сетей обычно менее 100 км.

Все эти виды мониторинга требуют наивысшей точности наблюдений и выполняются, как правило, в режиме статики двухчастотной аппаратурой.

Глобальный мониторинг земной поверхности средствами GPS выполняет Международная геодинамическая служба (МГС), делая при этом значительный вклад в отсчетную основу ITRF Международной службы вращения Земли и референцных систем (МСВЗ). Результатом этой работы являются точные геоцентрические декартовы координаты станций и их скорости, а также параметры вращения Земли. МГС была установлена в 1993 г. Международной ассоциацией геодезии (МАГ), чтобы объединить мировые постоянные сети слежения за спутниками GPS в единую сеть. В нее вошли две самые большие глобальные сети: Cooperative International GPS Network (CIGNET), управляемая Национальной океанической и атмосферной администрацией США (NOAA), и Fiducial Laboratories for an International Natural science Network (FLINN), руководимая Национальным управлением по аэронавтике (NASA), объединенные с несколькими сетями континентального масштаба в Северной Америке, Западной Европе и Австралии. Пилотная фаза проекта создания МГС была инициализирована в июне 1992 г., а формально началом деятельности МГС считается январь 1994 г. [Beutler et al., 1994; James et al., 1994].

В настоящее время действует около 50 основных станций, имеющих водородные стандарты частоты, и более 200 фидуциальных станций. Плотность

сети неравномерная. Наибольшая плотность в Западной Европе, США, Японии. На территории России имеются две основных станции (Менделеево и Иркутск) и около десятка фидуциальных станций. МГС собирает результаты наблюдений со станций сети, распределяет, анализирует и архивирует результаты наблюдений спутников GPS и ГЛОНАСС геодезического качества (двухчастотные фазы и псевдодальности). Данные обмениваются и хранятся в формате RINEX. Обработка измерений производится научными программными комплексами [Teunissen et al., 1998].

Наличие глобальной сети станций, поддерживающих систему ITRF, позволяет оперативно определять координаты в любом месте земного шара.

Наблюдения в региональных и локальных сетях мониторинга обычно проводятся либо циклами, либо непрерывно, либо применяется смешанная технология работ.

Цикловые наблюдения (*полевые «кампании»*). Геодезическая сеть наблюдается за ограниченный период времени несколькими подвижными приемниками по установленному расписанию перемещений и наблюдений. Чтобы установить деформации, сеть должна наблюдаться периодически (например, раз в год). Эти измерения могут выполняться статическим, кинематическим и/или динамическим методом (с привлечением других методов, например, РСДБ). В общем случае, число участвующих в мониторинге станций значительно превышает число приемников.

Непрерывные наблюдения (*непрерывно действующие массивы станций*). Станции сети непрерывно наблюдают спутники СРНС продолжительный период времени (см., например, [Zhang et al., 1997]). В глобальном масштабе развиваемая сеть GPS станций слежения обеспечивает доступ к общеземной системе отсчета, параметрам ориентировки Земли и точным спутниковым эфемеридам. В региональном масштабе непрерывный мониторинг станций GPS обеспечивает базовые измерения для полевых работ и связь с глобальной системой отсчета. Более того, они обеспечивают улучшенное временное разрешение и возможность лучше характеризовать спектр ошибок GPS, чем цикловые измерения. Два примера таких сетей: Южно-Калифорнийская объединенная GPS сеть SCIGN (Southern California Integrated GPS Network) и Национальный массив станций GPS (National GPS Array) в Японии. Южно-Калифорнийская сеть включает около 250 непрерывно наблюдающих пунктов. Непрерывные сети дают возможность осуществлять дополнительные исследования, такие, как мониторинг тропосферы и ионосферы, что невозможно в цикловых измерениях. Сети SCIGN, расположенной в районе активного взаимодействия Северо-Американской и Тихоокеанской тектонической плит, посвящено большое число публикаций. Изучение этого взаимодействия ведется также в Канаде [Chen et al., 1996].

Сеть Японии состоит почти из 1 000 пунктов со средними расстояниями до 30 км, наблюдаемые скорости смещений иногда превышают 10 см/год (http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html).

Смешанные геодезические измерения (*многорежимные измерения*). При методике смешанных измерений полевые приемники определяют свое

местоположение относительно массива непрерывно работающих станций, которые обеспечивают базовые данные и согласованную систему отсчета. По сравнению с цикловыми измерениями здесь необходимо развертывать сеть из одного или нескольких непрерывно работающих приемников. Для этого удобно использовать станции глобальной сети МГС или станции активных сетей, что дает больше гибкости в организации наблюдений и логистике. Их можно дополнять временными непрерывно работающими пунктами, которые по мере выполнения работ перебазируют на другое место. В такой ситуации позиционирование мобильных приемников производится как вставка пункта (или нескольких пунктов) в постоянно действующую сеть. При наличии достаточно плотной сети постоянно действующих станций можно построить новую высокоточную сеть практически одним приемником. Преимущества в использовании транспорта в таком методе могут быть значительными, особенно для больших проектов. Необходимость в кропотливой координации между различными полевыми бригадами почти полностью устраняется. Оператору не нужно занимать данную станцию в соответствии с составленным заранее расписанием, поскольку одновременные измерения (между мобильными станциями) не обязательны. За рубежом такой метод построения сети называют технологией MOST (Multimodal occupation strategy). В последние годы технология MOST принята рабочими группами Калифорнии, в Центральных США, восточном Средиземноморье, Чили, Аргентине и других местах. Она становится третьим видом технологий построения геодинамических сетей, дополняющим две других технологии [Bevis et al., 1997].

Приведем несколько примеров региональных и локальных геодинамических сетей.

Геодинамическая сеть Центральной Европы по проекту CERGOP включает до 31 станции из 11 стран, из них 7 станций входят в глобальную сеть МГС. Наблюдения ведутся циклами из 5 – 6 суточных сеансов с интервалом записи 30 с. В циклах 1994 и 1995 гг. преимущественно использовались приемники 4000 SSE, на станциях МГС – приемники Turbo Rogue 8000SNR. Обработка выполняется программным обеспечением Bernese Астрономического института г. Берн (Швейцария) в два этапа. На первом этапе уравниваются наблюдения, выполненные на станциях МГС совместно со станциями остальной сети МГС. На втором этапе эти станции фиксируются, и производится привязка остальной сети с использованием уравненных на первом этапе точных орбит спутников GPS. При расстояниях между пунктами порядка 300 – 500 км средние квадратические ошибки определения широт и долгот станций из суточных сеансов имеют величину 1 – 2 мм, а для геодезических высот – в среднем около 5 мм [Marjanovic, 1996].

Альпийская геодинамическая сеть. Сеть располагается на территории севера Италии, восточной Франции, в Швейцарии и Австрии. В этом мониторинге также использовались цикловые измерения с привязкой к станциям МГС.

Первый цикл GPS измерений был проведен в течение сентября 1993 года. Были проведены измерения на 50 пунктах 23 двухчастотными приемниками.

Большое число пунктов потребовало сложной организации работ, 40 пунктов наблюдали в три этапа, по четыре 12-часовых сеанса и 6 пунктов измеряли в шесть 12-часовых сеансов. Непрерывные измерения были выполнены в трех оставшихся пунктах в течение 12 суток. Главный интерес для этих трех и шести предыдущих пунктов заключается в объединении пунктов, которые не были измерены одновременно. Это классическая схема, применяемая, когда пунктов существует больше, чем доступных приемников. Всего было измерено 700 базовых линий из 1 250 возможных, по крайней мере, четыре раза.

Второй цикл измерений был выполнен в течение июля 1998 г. и проводился по тому же плану, что и кампания 1993 г. Были использованы только более совершенные приемники и антенны, а ежедневные сеансы продолжались по 24 часа вместо 12. Так же в это время сеть непрерывно действующих станций МГС была значительно расширена. В 1993 г. использовались данные от 6 станций МГС, в 1998 г. – уже от 13 станций.

Большая часть обработки GPS данных проведена при помощи программного обеспечения GAMIT/GLOBK Массачусетского технологического института. Средние квадратические ошибки независимых ежесуточных измерений в 1993 г. составили 4 мм в широте, 7 мм в долготе и 13 мм в высоте и соответственно, 4, 4 и 8 мм – в 1998 г. Улучшение с 1993 по 1998 гг. для широтной и долготной компонент существенно. Это объясняется как применением более совершенной GPS аппаратуры, так и увеличением числа спутников в созвездии GPS [Vigny et al., 2002].

В России созданы региональные геодинамические сети на район Восточной России [Demianov, Tatevian, 2002], на область Байкала, Алтая и Саян [Тимофеев и др., 2003; Тимофеев, Запреева, 2002].

Локальные геодинамические сети строятся в большом количестве, в основном стратегией кампаний. Их технологии достаточно хорошо отработаны, обработка наблюдений может выполняться на коммерческом программном обеспечении, поскольку длины базовых линий не превышают нескольких десятков километров. Для повышения надежности и точности таких сетей в проектах сетей предусматривается большое число избыточных связей, при обработке используются точные эфемериды МГС.

Интерес к исследованиям современных движений и деформаций во многом обусловлен тем, что безопасное ведение человеком хозяйственно-экономической деятельности в массиве горных пород и на земной поверхности возможно только при получении целостной картины о происходящих в недрах Земли и на ее поверхности процессах. Эти сложные многофакторные процессы имеют как естественную, так и техногенную природу, причем в последнее время все большее значение приобретает техногенный фактор, который приводит к негативным изменениям геодинамической и экологической обстановки. Если естественные геодинамические процессы проявляются в основном в виде медленных трендовых подвижек по границам структурных блоков, которые происходят на фоне короткопериодных знакопеременных колебаний массива, прилегающего к ним, то техногенные, или наведенные геодинамические процессы, вызваны масштабной деятельностью человека по

добыче и переработке полезных ископаемых и изменению окружающей природной среды. В качестве примера подобного рода исследований приведем Институт горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург), который с 1996 г. проводит геодезический мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с использованием GPS технологий более чем на десяти месторождениях Урала, Сибири, Казахстана [Панжин, Коновалова, 2005].

Краткий обзор применения спутниковых технологий для мониторинга земной поверхности приводится в статье [Антонович, Карпик, Клепиков, 2004]. Приведенный далеко не полный обзор работ по применению СРНС в геодинамике показывает, что GPS/ГЛОНАСС технологии стали основным средством наблюдений при построении глобальных, региональных и локальных геодинамических сетей. Кроме цикловых измерений, стали применяться массивы непрерывно работающих станций и измерения смешанного типа. При этом в течение суточного сеанса измерений можно добиваться точности получения координат в общеземной системе отсчета порядка 0.5 см в плане и 1 – 2 см по высоте.

О новых возможностях использования GPS измерений для мониторинга сейсмических явлений сообщает канадский геодезист Я. Коуба. Он представил независимые решения GPS положений с интервалом в 1 секунду, выведенные по данным МГС и точным эфемеридам с параметрами часов. На них ясно видны сейсмические волны, образованные землетрясением с магнитудой 7.9 на Аляске на разломе Denali, произошедшем 3 ноября 2002 г. Поверхностные сейсмические волны с периодом около 20 секунд и амплитудой до 20 см по высоте были выявлены на расстоянии 4 000 км от эпицентра. Сейсмические волны от землетрясения в Японии магнитудой 7.0, произошедшего 26 мая 2003 г., также наблюдались в серии решений с дискретностью 1 с на станции Мицузава, в 80 км от эпицентра. Это землетрясение не удалось выявить на станции Усуда в 410 км от эпицентра. Подобным образом алжирское землетрясение от 21 мая 2003 г. с магнитудой 6.8 балла не было выявлено с помощью GPS на ближайших станциях МГС, размещенных на расстояниях 800 км от эпицентра [Kouba, 2003].

10.8.2. Активные станции и сети

Активной сетью называют сеть непрерывно действующих станций GPS наблюдений, данные которых общедоступны по линиям связи. Такие сети работают на территории США и Канады, в некоторых странах Западной Европы. Отдельные станции начинают действовать в России.

Оборудование станции активной сети может состоять из следующих компонент:

- GPS приемник с антенной;
- метеорологическое оборудование (опционально);
- внешние часы (опционально);
- компьютер с оборудованием для хранения данных;
- оборудование связи для сетевого доступа, модемы и/или передатчик для поправок DGPS или RTK;

– непрерывное энергообеспечение (UPS);
– программа управления работой приемника, в том числе и дистанционно.

Прежде всего, на станции должен быть двухчастотный геодезический GPS приемник. Среди критериев для выбора типа приемника следующие: число каналов (12), доступность данных, темп записи, цена и прочность приемника. Одночастотные приемники возможны для операций по DGPS, но двухчастотные приемники предлагают больше возможностей для мониторинга целостности. Кроме того, дополнительная стоимость двухчастотного приемника мала по сравнению с другими компонентами инфраструктуры.

Главная задача активной контрольной станции – сбор кодовых и фазовых данных по спутникам GPS/ГЛОНАСС и распределение этих данных для различных применений пользователям GPS. Тем не менее, активная контрольная станция представляет собой нечто большее, чем просто приемник, работающий 24 часа в сутки. Вспомогательные данные, такие, как температура, давление и влажность, также могут собираться, но это не является главным. Необходимость любой активной опорной станции заключается в том, что данные должны собираться, храниться, обрабатываться и передаваться различными путями, и это делает небольшой компьютер и соответствующее программное обеспечение совершенно необходимыми. Функции, которые могут выполняться этим компьютером, следующие: мониторинг целостности данных GPS, их архивирование, сжатие и восстановление, ведение информационного табло о наличии данных, передача поправок для DGPS и данных для RTK, дистанционный контроль и управление.

Активные контрольные станции (АКС) могут действовать как отдельные станции или как часть сети. В сети обычно есть объявленный вычислительный центр, который может быть совмещен с одной из контрольных станций. Некоторые функции АКС, такие, как архивирование данных и функции восстановления, могут быть централизованы в вычислительном центре. Другими задачами для вычислительного центра являются:

– регулярный контроль АКС;
– мониторинг целостности сети, который более мощный, чем мониторинг целостности на АКС;
– обработка, дающая в результате дополнительные продукты (например, параметры атмосферы для метеорологических прогнозов);
– действие операционной системы.

Главное преимущество сети АКС заключается в избыточности, улучшенной доступности и надежности АКС, а также в доступности центральной точки для пользователя. Недостатком сетевого подхода является необходимость в наличии дополнительных линий связи между вычислительным центром и опорными станциями.

Примеры систем АКС можно найти на каждом континенте Земли, начиная с элементарных станций DGPS локальных или широкозонных систем, использующих для передачи поправок национальные радиотрансляционные сети или стационарные спутники; государственных геодезических сетей для

геодезических измерений и кинематических применений; региональных сетей из сотен приемников для мониторинга землетрясений, как это сделано в Японии и Калифорнии; и вплоть до мировой сети МГС и ее подсетей.

Компоненты активных контрольных станций. Полный проект АКС должен быть нацелен на стабильное и надежное оперирование. Станция должна удовлетворять следующим требованиям:

– стабильная конструкция антенны с хорошим фундаментом, на скальной или стабильной осадочной основе, свободной от препятствий и отражающих поверхностей, которые могут вызывать многопутность;

– комната или укрытие для размещения приемника и другого оборудования с отоплением или охлаждением, когда необходимо;

– электропитание, средства связи (телефон и/или линии передачи данных);

– доступность для транспорта и обслуживающего персонала, но не для посторонних;

– неподверженность вандализму и защищенность от животных и птиц;

– свобода от радиопомех.

Иногда возможно использование существующих средств, но, с другой стороны, все должно быть специально создано для АКС. Другой сильный аргумент для выбора отдельной точки – это совместное расположение с другой техникой, такой, как лазерный дальномер, РСДБ или приливномерная станция. К примеру, 5 станций АКС в Нидерландах используют существующие средства, приливные посты на побережье Северного моря и на реке Маас и средства астрономических и геодезических институтов для расположения рядом с РСДБ и лазерным дальномером. Существующие точки также имеют один недостаток – препятствия. Поэтому в Нидерландах антенны устанавливаются на специально спроектированных мачтах. Мачты соединяются с осадочным основанием посредством подземных свай. От птиц и от непогоды антенны защищены коническими обтекателями.

Темп записи, в котором работает приемник, зависит от последующего применения. Для кинематического применения это может быть 1 с, 5 или 10 с достаточно для геодезической съемки в режиме быстрой статики, 30 с – для точной геодезии и геодинамики. Если приложений больше, и с разными темпами сбора данных, и их необходимо обслуживать в одно и то же время, то приемник должен оперировать с наиболее высоким темпом. Затем соответствующая программа должна понижать темп для других приложений. Высокий темп (1 с) также имеет преимущество для мониторинга целостности.

Активные станции могут быть оборудованы внешними часами и метеооборудованием. Внешние часы непосредственно подсоединяются к приемнику. Использование внешних часов будет поддерживать целостность мониторинга на АКС. Метеорологическое оборудование важно для мониторинга атмосферы и окружающей среды. Особенно необходимо атмосферное давление, когда станции используются для вывода содержания водяных паров в атмосфере. Температура и влажность обеспечивают дополнительную информацию.

Приемник GPS и метеооборудование подсоединяются к компьютеру, чтобы накапливать данные на месте, посылать их пользователям или в специальный компьютерный центр, а также управлять приемником на расстоянии. Для связи с пользователями, вычислительным центром и для дистанционного контроля оператором могут использоваться модемы, линии интегрированной цифровой сети ISDN или Интернет. К примеру, в голландской сети AGRS-NL используются два высокоскоростных модема через обычные телефонные линии для связи с вычислительным центром и оператором. ISDN (Integrated Services Digital Network – объединенная цифровая служебная сеть) является хорошей альтернативой для связи. Сеть ISDN действует через обычную телефонную линию, но после аналого-цифрового преобразования. Сеть ISDN хорошо подходит для передачи больших объемов компьютерных данных и может устанавливать новые связи намного быстрее модема. Кроме сбора данных и связи, программное обеспечение контрольной станции ответственно за первичный контроль целостности данных GPS. В случае проблем программа должна выдать сигнал тревоги оператору или компьютерному центру.

Кроме того, если это не делается вычислительным центром, компьютер АКС должен создавать систему бортового бюллетеня, из которой пользователь может сбрасывать данные. Когда АКС должна обеспечивать поправками DGPS или RTK, приемник или компьютер должны быть связаны с передатчиком. Покупка, лицензирование и установка передатчика являются задачами, которые требуют помощи специалиста. Альтернативно, поправки DGPS могут посылаться по линии прямого модема провайдеру DGPS (то есть национальной радиопередающей компании).

Наконец, блок непрерывного электроснабжения (UPS) необходим, чтобы перекрывать небольшие перерывы и флуктуации в питании переменным током. Чтобы обеспечить перерывы в снабжении переменным током, станция должна иметь возможность генерировать собственную энергию. В некоторых странах, например, в Нидерландах, прерывания на большие периоды очень редки, поэтому нет реальной необходимости вкладывать деньги в очень дорогие установки автономного питания. Полезное техническое средство для восстановления станции в случае ее падения – дистанционный переключатель питания. Он может быть активирован для ликвидации прерывания за 15 – 30 с путем использования обычного телефона или специальной последовательности номеров. В результате компьютер и другое оборудование будут перезагружены [Teunissen et al., 1998; van der Marel, 1998; Сурнин, Кужелев, 1997; Середович, Сурнин, 1999].

10.9. Полевая обработка данных

До отъезда с объекта работ наблюдатель должен выполнить обработку измерений, чтобы убедиться в том, что все данные получены в нужном объеме и с требуемой точностью. Это особенно важно, когда работы выполняются в экспедициях, вдали от стационарных условий офисов и камеральных цехов.

10.9.1. Перевод данных в компьютер

У современных приёмников данные GPS наблюдений хранятся во внутренней памяти самого приемника или контроллера либо на карточке памяти (флэш-карте). Первый шаг в обработке – перевод данных из приёмника на жёсткий диск компьютера. Этот перевод выполняется специальной программой, поставляемой изготовителем аппаратуры, которая может опционально входить в программу обработки. Файлы наблюдений для данного сеанса содержат измерения псевдодальностей и фаз, бортовые эфемериды, данные о пункте, включающие идентификатор станции, высоту антенны, и, возможно, положение из навигационного определения. Главное при переводе файлов – убедиться, что файлы и пункты правильно названы, и что высота антенны соответствует значению, приведенному в полевом журнале.

Очень часто наблюдатели вводят неверный идентификатор пункта. Это может быть следствием различного написания русского названия, например, пункт «Алексеевка» разные наблюдатели в одном проекте обозначали и как Alek, и как Alex. Еще более опасная ситуация возникает, когда одно и то же название присваивается разным пунктам. Эти ошибки нужно исправлять до начала обработки. Хороший приём, обеспечивающий правильность имени файла и высоты антенны, – ведение сводки, содержащей распределение пунктов по сеансам, высоты антенн и время начала и конца сеансов. Табличный список различных сеансов и высот антенн полезен для включения в отчёт о проекте.

Большинство программ для пакетной обработки файлов автоматически извлекают высоту антенны из файла данных о пункте, хранящемся в приёмнике. После исправления названия в различных файлах нужно проверить правильность всех высот антенн. Если некоторая ошибка будет обнаружена после обработки базовых линий, то исправление этой ошибки приведет к удалению той части обработанных базовых линий, где были использованы ошибочные данные, и возможно, что некоторую часть обработки придется повторять. В процессе пересылки файлов измерений в базу данных проекта может производиться объединение файлов, разорванных по какой-либо причине, например, из-за перерыва в питании.

Когда все файлы исправлены, данные наблюдений необходимо продублировать, по крайней мере, на двух средствах хранения (например, на дискетах, компакт-дисках) [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

10.9.2. Обработка измерений

Полевая обработка наблюдений базовых линий обычно производится с помощью коммерческих программ, поставляемых производителями спутниковой аппаратуры. При окончательной обработке нередко используются научные программы. Они имеют больше возможностей для моделирования различных процессов. Эти особенности дают им большое преимущество, особенно при наблюдении сверхдлинных базовых линий (подробнее см. в разделе 11.1). Научные программы позволяют одновременно обрабатывать наблюдения, сделанные на многих пунктах (одновременно или в разное время), то есть получать многопунктовое (или сетевое) решение. Для коммерческих

программ, прежде всего, характерна простота в эксплуатации, поскольку они предназначены для широкого круга потребителей. Они позволяют получать уверенные результаты высокой точности на коротких базовых линиях. При использовании точных координат опорных пунктов и точных эфемерид некоторые программы дают прекрасные результаты на длинных базовых линиях.

Коммерческие программы получили повсеместное распространение, и в любом случае они должны использоваться до обработки в решении по многим станциям. В некоторых случаях одна из точек в сеансе наблюдений может оказаться запорченной, а если все точки обрабатывались совместно, то ошибки от плохой точки распределяются среди всех векторов, и ошибка маскируется. Программа для обработки отдельных векторов обеспечивает лучший контроль слабых линий или пунктов. Неудачные точки можно легко изолировать, заметив, что их статистики (например, стандартные ошибки) на линиях, ведущих к данной точке, хуже, чем статистики на других линиях. Кроме того, для линий в сеансе можно просуммировать векторы, и, если сумма по периметру не является малой величиной (например, порядка 10^{-6} от периметра), то это указывает, что одна из точек в сеансе плохая.

Указанные программные продукты, как правило, включают главную программу, управляющую модулями, которые выполняют следующие процессы:

- планирование сеансов наблюдений или доступности спутников (см. раздел 10.4);
- работу с проектами;
- пересылку данных;
- редактирование данных;
- обработку базовых линий;
- обзор сети;
- преобразование координат;
- уравнивание геодезической сети;
- вывод результатов обработки.

Ряд программных комплексов дополнительно имеет возможности настройки на различные единицы измерения расстояний, температуры и давления.

Обработка данных обычно начинается с создания проекта. Под проектом понимается область постоянной памяти компьютера, логически связанная с конкретным объектом работ (геодезической сетью). Для каждого проекта вводятся соответствующие спецификации в базе данных программы. Допускается модификация проектов, архивирование, восстановление и удаление.

Ввод результатов измерений в проект возможен из приемника, из его накопителя, с карточки памяти, из переведенного ранее файла данных. Файлы измерений в приемнике или на карточке памяти обычно хранятся в собственном формате фирмы. Разработка формата независимого обмена данными измерений

между приемниками разных фирм (RINEX-формат) привела к обязательному включению в программы опций RINEX-экспорта и RINEX-импорта данных. В проект могут вводиться не только результаты полевых измерений, но и результаты пост-обработки или полевой обработки измерений, сделанных в реальном времени.

Формат RINEX. Необходимость иметь способ обмена данными, полученными разными приемниками, была высказана в 1989 г. во время проведения эксперимента EUREF-89, когда в наблюдениях участвовало 60 приемников 4 разных фирм. В пользу применения такого формата говорит состав набора данных, записываемых в файл измерений:

- фазы несущей на одной или двух частотах;
- кодовые псевдодальности по C/A- и P-коду;
- время наблюдений (отсчеты по часам приемника);
- информация о станции (название, тип антенны, ее высота, метеоданные и т. п.) [Gurtner, 1994].

К февралю 2006 г. насчитывалось уже несколько версий формата RINEX:

- версия 1, принятая на 5-м Международном геодезическом симпози-уме по спутниковому позиционированию в Лас-Крус (США), в 1989 г.;
- версия 2 была принята в Оттаве в 1990 г., в нее добавлена возможность использовать спутники разных систем, включая ГЛОНАСС и SBAS;
- в версии 2.10, 2.11, 2.20 добавлены такие возможности, как использование наблюдений с дискретностью меньше одной секунды, применение двухсимвольного обозначения для кодовых наблюдений, возможности преобразования наблюдений, произведенных на космических аппаратах.

Хотя версия 3.00 ориентирована уже и на сигналы системы Галилео, формат навигационного сообщения для этой системы в ней пока не определен из-за его недоступности для широкой публики. В версию 3.00 дополнительно включены следующие возможности:

- трехсимвольное обозначение кодов наблюдений (включая атрибут, описывающий более точно режим генерации наблюдения);
- улучшенный формат записи данных наблюдений без ограничения длины записи;
- включение вспомогательной информации для антенн, установленных на космических аппаратах (например, космические приемники), или антенн с нестандартной ориентировкой;
- новые виды псевдонаблюдений (ионосферная задержка, номера каналов приемника) для специальных применений [Gurtner, Estey, 2006].

Пропущенный через программу RINEX-экспорта файл измерений из фирменного представления данных распадается на ASCII-файлы пяти типов, доступные для чтения программами обработки, имеющими опцию RINEX-импорта:

- файлы данных наблюдений,
- файл навигационного сообщения GPS,

– файл метеорологических данных,
– файл навигационного сообщения ГЛОНАСС,
– файл навигационного сообщения геостационарных спутников систем SBAS.

Когда объем файлов становится слишком большим, для их хранения или передачи применяется сжатие (compress) с использованием специальной программы Ю. Хатанака (Yuki Hatanaka). Тогда перед их использованием в обработке такие файлы необходимо восстановить (decompress).

Каждый тип файла распознается по его имени, которое имеет вид ssssdddf.yyt. Символы «ssss» представляют идентификатор станции наблюдений, «ddd» – номер дня года для первой записи в файле, «f» – номер файла в данный день: f = 0 для суточного файла, для часовых файлов f принимает значения от «a» до «x» в соответствии с номером часа для первой записи в файле. Символы «yy» представляют две последние цифры в номере года. Значения других символов в расширениях имен файлов даны в табл. 10.4.

Таблица 10.4. Типы расширений RINEX-файлов версии 3.00

Типы файлов	Несжатые файлы, все платформы	Сжатые файлы		
		Unix	VMS	DOS
Файлы наблюдений	.yyO	.yyO.Z	.yyO_Z	.yyY
Сжатые файлы наблюдений	.yyD	.yyD.Z	.yyD_Z	.yyE
Навигационные файлы GPS	.yyN	.yyN.Z	.yyN_Z	.yyX
Навигационные файлы ГЛОНАСС	.yyG	.yyG.Z	.yyG_Z	.yyV
Навигационные файлы Галилео	.yyL	.yyL.Z	.yyL_Z	.yyT
Навигационные файлы геостационаров SBAS	.yyH	.yyH.Z	.yyH_Z	.yyU
Файлы метеоданных	.yyM	.yyM.Z	.yyM_Z	.yyW

Во избежание неопределенности и путаницы в данных RINEX-формат дает строгие определения для наблюдаемых параметров. Приведем некоторые определения.

Временем измерений является время приемника для принятых сигналов. Оно одинаково для измерений фаз и псевдодальностей для всех спутников, наблюдавшихся в данную эпоху. По умолчанию для GPS данных оно выражается в системе времени GPST (то есть это не всемирное время). Для файлов ГЛОНАСС или смешанных файлов систему времени необходимо указывать в записи Start Time в заголовке файла.

Псевдодальность – расстояние от антенны приемника до антенны спутника, включающее смещения за счет поправок часов спутника и приемника (а также другие поправки, в том числе атмосферные задержки):

$$P_A^i = \rho_A^i + c(dt_A - dt^{ki} + \Sigma_A^i). \qquad (10.28)$$

Псевдодальность отражает действительное поведение часов приемника и спутника. Приводится в метрах.

Фаза – измеренная фаза несущей в целых циклах как на частоте L1, так и на частоте L2. Фаза, измеренная в полуциклах приемниками квадратурного типа, должна конвертироваться в полные циклы и отмечаться флагом длинноволнового фактора в заголовке раздела. Фаза изменяется в том же смысле (в ту же сторону), что и дальность (отрицательный доплер). Наблюденные фазы между эпохами должны быть связаны включением целого числа циклов (непрерывной фазы) и не должны содержать каких-либо систематических дрейфов от сдвигов опорных генераторов.

Все наблюденные величины не исправляются за влияние каких-либо факторов (атмосферная рефракция, поправки часов и т. п.). Если программное обеспечение приемника или конвертера производит уравнивание измерений, используя выведенные в реальном времени поправки часов приемника dt_i, то должно поддерживаться взаимное соответствие трех параметров: времени, псевдодальности и фазы, то есть

$$\left.\begin{aligned} t_A^i(corr.) &= t_A^i(rec.) - dt_A(rec.) \\ P_A^i(corr.) &= P_A^i(rec.) - dt_A(rec.)\cdot c \\ \Phi_A^i(corr.) &= \Phi_A^i(rec.) - dt_A(rec.)\cdot f \end{aligned}\right\}, \qquad (10.29)$$

где комментарии (*corr*.) и (*rec*.), соответственно, обозначают исправленное и принятое (записанное) значение параметра.

Международной ГНСС службой разработан целый ряд RINEX-подобных форматов:

– формат обмена поправками (смещениями) часов спутников и приемников, полученных при обработке наблюдений на сети станций ГНСС;

– формат обмена для полного набора данных, транслируемых системами дополнения космического базирования SBAS;

– формат IONEX для обмена моделями ионосферы, полученными при обработке данных ГНСС;

– формат ANTEX для изменений фазовых центров геодезических антенн [Gurtner, Estey, 2006].

Подробную информацию о RINEX-формате, о преобразованиях файлов можно найти в Интернете на сайте МГС.

Процессор базовых линий. Одним из наиболее ответственных модулей программы обработки GPS наблюдений является процессор базовых линий (ПБЛ). Процессор базовых линий имеет своей целью вычисление точных трехмерных векторов между станциями по результатам полевых кодовых и фазовых GPS измерений, выполненных с использованием статических, быстростатических или кинематических методов сбора данных.

Алгоритмом оценивания обычно является обобщенный метод наименьших квадратов (МНК) в параметрической форме. Для его реализации используются нелинейные и линеаризованные модели кодовых и фазовых измерений. Вектор оцениваемых параметров включает группу основных неизвестных (компоненты базовых линий) и дополнительных параметров (начальные целочисленные неоднозначности, параметры согласования шкал

приемников и системного времени и другие параметры, зависящие от теорий и методов, положенных в основу ПБЛ).

Ведущие фирмы-производители спутниковой аппаратуры уделяют первостепенное внимание таким качествам ПБЛ, как надежность, быстрота разрешения неоднозначностей по малому объему данных, автоматическая настройка на оптимальный режим обработки и т. п. На рынке появляются все более совершенные версии ПБЛ. Они различаются по выбору методики разрешения неоднозначностей, заложенным критериям математической статистики, предельной длине базовых линий, возможностям отбора независимых базовых линий и многим другим параметрам.

Процессоры базовых линий некоторых фирм допускают совместную обработку фазовых измерений спутников GPS и ГЛОНАСС.

Входными данными для ПБЛ являются файлы данных из приемника, структура и количество которых для разных фирм-изготовителей и даже для разных версий аппаратуры может значительно различаться. Отличаются данные также для систем ГЛОНАСС и NAVSTAR. Общие исходные данные:

– эпоха наблюдений – год, месяц, день, час, минута, секунда – момент времени, к которому относятся передаваемый альманах и параметры орбиты спутника;

– предварительные координаты станции – аппроксимированные, вычисляемые приемником по имеющимся наблюдениям;

– номера спутников – SV(i);

– параметры ионосферы – параметры для расчета ионосферной задержки α_i и β_i ($i = 0, \ldots, 3$) – эти величины могут быть введены в модель ионосферы, используемую для исключения ионосферных задержек при вычислении вектора пространственного положения определяемого пункта;

– параметры часов спутника – поправка часов, ход часов, вариации хода часов;

– параметры орбиты спутника в кеплеровых элементах или в прямоугольных координатах;

– непосредственные измерения и их параметры – в зависимости от типов измерений отражаются полученная по кодам псевдодальность (метры), по фазам – сумма целой и дробной фаз (в полных циклах).

Помимо параметров, получаемых из файлов, в процессе вычислений могут вводиться следующие величины:

– координаты пункта наблюдений – X, Y, Z (в метрах) – прямоугольные координаты или B, L, H – геодезическая широта, геодезическая долгота и высота над эллипсоидом в общеземной системе WGS-84, ПЗ-90 или ITRF;

– высота антенны HI или элементы центрировки E, N, U (в метрах);

– угол отсечки по высоте – Elevation Mask (в градусах дуги) – параметр используется для удаления из обработки измерений низких спутников, имеющих больший уровень шума;

– номера включаемых в обработку спутников – SV(n) – некоторые спутники могут иметь большое количество срывов циклов на одной или обеих частотах, и появляется необходимость в их исключении;

– моменты начала $T_н$ и конца $T_к$, задающие обрабатываемый период измерений. Изменение продолжительности обрабатываемого сеанса может быть вызвано различными причинами, в том числе удалением части измерений с плохой геометрией, или необходимостью выделения независимых базовых линий;

– вид измерений: иногда в двухчастотных измерениях может понадобиться обработка на какой-либо одной частоте;

– вид решения – решение по двойным, тройным или одинарным разностям;

– выбор модели учета ионосферы – для базовых линий небольшой протяженности можно использовать, без вреда для качества вычислений стандартную модель ионосферы (модель Klobuchar);

– возможность использования метеорологических данных – помимо файлов навигации и наблюдений, имеются файлы метеорологических параметров тропосферы.

При обработке вычислитель должен учесть две особенности построения GPS сетей.

1. Для достижения более высокой точности и согласованности результатов необходимо обеспечивать так называемый процесс «подсева» координат. Суть его заключается в правильной организации передачи координат ко всем точкам сети от одной исходной точки (начала сети), координаты которой в геоцентрической системе известны априорно. Передача координат происходит по цепочке базовых линий. Для вычисления каждой следующей базовой линии координаты начала должны быть известны. При правильной передаче координат все базовые линии будут получены в одной системе отсчета, определяемой координатами начала сети. Чем выше класс сети, тем точнее должны определяться координаты начала сети.

2. Если в обрабатываемом сеансе участвовали более двух приемников, то есть альтернатива между обработкой отдельных базовых линий, всех независимых или всех возможных базовых линий. Для R приемников независимых линий будет $R - 1$ от общего числа $R(R - 1)/2$. Наиболее подходящей методикой была бы такая: вначале базовые линии обрабатываются как отдельные, выявляются проблемные случаи, например, неразрешение неоднозначностей, и определяются наиболее приемлемые параметры обработки. Затем выполняется совместная обработка $R - 1$ независимых базовых линий, в результате которой формируется полная ковариационная матрица решения, учитывающая корреляционные связи между линиями. Наличие полной ковариационной матрицы повышает точность и адекватность последующего уравнивания сети.

Обработка статических измерений. Современные программы для вычисления векторов базовых линий используют пакетную обработку. Обычно

на жестком диске в папку загружается информация для указанных суток. Обрабатывающая программа находится в другой папке, и для доступа к программам компьютеру необходимо устанавливать «путь». Когда программа запущена (преимущественно через меню команд), строки обрабатываются по порядку, автоматически.

В общем, программа для обработки отдельных векторов выполняет следующие шаги:

– образование файлов орбит;

– вычисление наилучшего положения для точки по кодовым псевдодальностям;

– отбор фазовых данных из отсчётов фазы несущей волны из приёмника и данных спутниковых орбит. При этом могут корректироваться метки времени;

– образование разностей фаз и вычисление их корреляций;

– вычисление оценки вектора по тройным разностям. Этот метод нечувствителен к потерям счёта циклов, но обеспечивает менее точные результаты;

– вычисление по двойным разностям вектора базовой линии и значений фазовых неоднозначностей (с плавающей точкой, вещественных);

– оценивание целых величин фазовых неоднозначностей, вычисленных на предыдущем шаге, и принятие решения, продолжать ли вычисление фиксированных неоднозначностей;

– вычисление решений по лучшим оценкам неоднозначностей, полученных на предыдущем шаге;

– вычисление нескольких других решений с фиксированным решением с использованием слегка отличающихся (например, на 1) от выбранных значений;

– вычисление отношений дисперсий, подходящих к выбранному фиксированному решению и к следующему лучшему решению. Это отношение должно равняться, по крайней мере, двум или трём, это будет указывать на то, что выбранное решение в два-три раза лучше, чем следующее наиболее вероятное решение.

Процессоры базовых линий обычно обеспечивают несколько видов решений для базовых линий.

Одночастотные измерения. При обработке одночастотных измерений в качестве измеряемого параметра используется фаза на частоте L1. Предполагается, что базовые линии короткие, обычно в пределах 15 – 20 км, и влияние разностей в тропосферных и ионосферных поправках невелико. Последовательно получаются следующие решения:

– *решение по кодовым псевдодальностям*, в котором получается вектор базовой линии в первом приближении;

– *решение по тройным разностям*, в котором вектор базовой линии определяется с точностью около одного метра. По результатам этого решения исключаются потери счета циклов, и производится отбраковка грубых измерений;

– *вещественное решение по двойным разностям*, в котором проверяется правильность исправления потерь счета циклов, находятся неоднозначности фазовых отсчетов в виде вещественных, не целых чисел, и определяется вектор базовой линии с точностью в пределах 20 см;

– *фиксированное решение по двойным разностям* (формальное разрешение неоднозначности), в котором делается попытка определения неоднозначностей в виде целых чисел. Если уровень доверия к точности выше 95%, то неоднозначности разрешены корректно, и базовая линия определяется с сантиметровым уровнем точности.

Двухчастотные измерения позволяют достичь более высокой точности и на больших расстояниях, чем одночастотные измерения, прежде всего, из-за открывающейся возможности точного учета ионосферной задержки. Она исключается при образовании линейной комбинации фаз, называемой свободной от ионосферы. В двухчастотной обработке ослабляется влияние солнечных вспышек и магнитных бурь, и усиливается решение для длинных базовых линий, на концах которых заметно различие в состоянии ионосферы. Влияние ионосферы в большей степени проявляется в полярных и экваториальных областях Земли, в средних широтах оно меньше.

Другое преимущество двухчастотных измерений заключается в возможности получения разностной (широкополосной) комбинации фаз. Эта комбинация особенно эффективна, когда измеряются псевдодальности по точному коду и фазы на полной длине волны. Тогда эффективная длина волны разностной комбинации фаз равна примерно 86 см. Если в приемнике применяется техника квадратирования сигнала, то на первой частоте измеряется фаза на полной длине волны, а на второй частоте – на половинной длине волны. Разностная комбинация таких фаз эквивалентна измерениям на волне 34 см. Высокий уровень шума на второй частоте и меньшая эффективная длина волны затрудняют уверенное разрешение неоднозначностей в такой аппаратуре. Недостаток решений по разностной комбинации фаз состоит в том, что при большой длине волны при неправильном разрешении неоднозначностей ошибка также будет больше.

Возможен следующий порядок обработки двухчастотных измерений:

– решение по тройным разностям с определением срывов циклов и грубых измерений;

– плавающее решение по двойным разностям широкополосной комбинации фаз с определением неоднозначностей широкополосной фазы в виде вещественных чисел;

– фиксированное решение по двойным разностям широкополосной комбинации с оценкой уровня доверия к решению;

– если разрешение неоднозначностей выполнено успешно, то окончательное решение производится по двойным разностям ионосферно-свободной комбинации фаз, и ему присваивается тип фиксированного решения. Если уровень доверия к разрешению неоднозначностей не превзойден, то

решению присваивается тип плавающего решения, то есть без разрешения неоднозначности фазовых отсчетов.

Обработка кинематических съемок. Сегодня многие из кинематических съемок выполняются в режиме RTK, в котором наблюдения опорного пункта передаются по радио к мобильному приемнику. Одновременные наблюдения опорного пункта и мобильного приемника объединяются и обрабатываются внутренним программным обеспечением приёмника в реальном времени. В режиме постобработки основные шаги подобны последовательности обработки статических и кинематических съёмок. Файлы данных выгружаются из приёмника в компьютер, и контролируются имена файлов и высота антенны. Действительная обработка отличается в зависимости от используемой программы; однако, многие из новейших программ автоматизированы настолько, что не нуждаются в ручном управлении. Основной контроль кинематических векторов состоит в вычислении положений подвижного приёмника, которые должны получаться одинаковыми при различных посещениях одних и тех же точек. Также хорошая практика съёмок – посещение точек, чьи координаты получены ранее в течение измерений, как контроль метода.

10.9.3. Контроль качества спутниковых наблюдений

Отдельные базовые линии. Разработчики процессоров базовых линий указывают на ряд показателей, характеризующих качество определения компонент векторов базовых линий. Универсальных показателей правильности решения нет, и авторы программ часто справедливо напоминают, что выполнение всех критериев качества не гарантирует правильности решения.

Прежде всего, это тип окончательного решения. Лучшим типом решения для одночастотных измерений является фиксированное по двойным разностям, для двухчастотных измерений – фиксированное по двойным разностям ионосферно-свободной комбинации фаз. Плавающие решения, как правило, приемлемы для средних базовых линий, в десятки и сотни километров длиной. Погрешности таких решений обычно больше половины длины волны, то есть 10 см.

При расстояниях между пунктами в 20 – 30 км средние квадратические ошибки длины вектора базовой линии и его компонент в общеземной или локальной геодезической системах обычно находятся в пределах 1 – 2 мм. К средней квадратической ошибке одного измерения очень близка ошибка rms. Полезную информацию о погрешностях дает апостериорная ковариационная матрица (кофакторная матрица). Однако эти данные характеризуют точность лишь по внутренней сходимости.

Объем отвергнутых измерений, по мнению разработчиков ПБЛ, не должен превышать 10% от всего объема данных.

В связи с тем, что для системы уравнений поправок находится несколько наборов целочисленных неоднозначностей, выбор лучшего из них производится на основании F-теста или отношения дисперсий (*Variance Ratio, VR*). В этом исследовании соответствующие каждому набору дисперсии располагаются в

порядке возрастания, и берется отношение дисперсии второго претендента на решение σ_2^2 к дисперсии первого претендента на решение σ_1^2, то есть к наименьшей из всех дисперсий:

$$VR = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}. \qquad (10.30)$$

Полагая, что лучшему решению соответствует минимальная дисперсия, обычно при *Ratio* > 1.5 с вероятностью 95% ПБЛ присваивает ему тип фиксированного решения. Если *Ratio* ≤ 1.5, то первому претенденту на решение присваивается тип плавающего решения.

Тест на относительную дисперсию *Reference Variance* (*RV*) проверяет соответствие апостериорной $\sigma^2_{a\ posteriori}$ и априорной $\sigma^2_{a\ prior}$ дисперсий:

$$RV = \frac{\sigma^2_{a\ posteriori}}{\sigma^2_{a\ priori}}. \qquad (10.31)$$

Относительная дисперсия является индикатором того, насколько хорошо наблюдалась базовая линия. Эта величина не имеет размерности, иногда ее называют коэффициентом дисперсии, или дисперсией единицы веса. Она показывает, насколько полученные данные соответствуют тому, что ожидалось получить. Априорная дисперсия рассчитывается на основе предсказания о нормальном уровне ошибок в измерениях (уровне шумов). Если предположения о суммарном влиянии ошибок оправдалось, то *RV* = 1. При *RV* < 1 можно утверждать, что получены более качественные данные, чем ожидалось, при *RV* > 1 – ожидания не оправдались. Для одночастотных статических измерений нормальное значение относительной дисперсии может быть около 4, а для кинематических съемок, когда положение выводится из 1 – 2 эпох, *Reference Variance* может быть порядка 5 – 6 и более.

Высокое *Reference Variance* и низкое *Ratio* могут быть следствием ряда причин:

– шумные данные, вызванные частичными препятствиями, например, деревьями, данными от спутников вблизи горизонта;

– значительная многопутность;

– немоделируемые систематические ошибки, особенно при одночастотных измерениях на линиях длиннее 15 – 20 км, где могут быть проблемы с учетом ионосферной рефракции;

– неправильный выбор фиксированного решения.

Линия в 30 км, измеренная одночастотными приемниками, может иметь относительную дисперсию от 10 до 20 из-за влияния ионосферы. Линия в 1 км, измеренная в режиме быстрой статики в 5-минутном сеансе, может иметь высокую относительную дисперсию из-за многопутности. Наблюдения двухчастотной аппаратурой небольших базовых линий (до 10 км) дают относительную дисперсию 0.8 – 1.0, если на обоих концах линии отсутствуют препятствия. Если на одном конце находится 4-метровая пирамида из металлического уголка, относительная дисперсия возрастает до 2 – 4, если пирамиды на обоих концах, – то до 6 – 8. Несмотря на то, что сигналы не имеют

потерь в счете циклов, возникающая из-за стоек пирамиды многопутность ухудшает качество измерений [Антонович, 1997].

Важную информацию для анализа решения могут дать графики остаточных невязок уравнений наблюдений.

Ошибки элементов приведения, ошибки фазового центра не сказываются на качественных характеристиках решения базовой линии, они выявляются при вычислении невязок в замкнутых фигурах.

Приемы обработки для улучшения решений базовых линий. Геодезиста не всегда устраивают результаты счета, даваемые ПБЛ. Иногда это касается слабых статистических оценок в фиксированном решении. Но наибольшего внимания оператора требует плавающее решение на коротких и средних базовых линиях. Главной причиной, которая приводит к неудаче при разрешении целочисленных неоднозначностей начальных фазовых отсчетов, является повышенный уровень ошибок (шумов) в измерениях, в некоторой части исходных данных или неудачная геометрия (большие значения DOP). Об этом неоднократно указывалось ранее, и поэтому здесь мы ограничимся только перечнем возможных мер, как правило, предоставляемых обработчику фирменной программой.

1. Удаление из обработки спутников с короткими дугами. Эти спутники, только что вошедшие в зону видимости или уходящие из нее, имеют высоту, близкую к углу отсечки, и результаты их измерений в наибольшей степени страдают от низких значений коэффициента усиления антенны на диаграмме направленности, а также подвержены возмущениям атмосферы. Эта мера равносильна удалению из обработки неизвестных, обеспеченных малым объемом измерений. Однако стоит проверить, не приведет ли удаление спутника из обработки к фатальному изменению геометрических факторов.

2. Увеличение угла отсечки по высоте. Эта мера аналогична предыдущей, но касается удаления наиболее шумной части данных у всех спутников, имеющих низкое отношение «сигнал/шум». Однако нужно иметь в виду, что удаление части наблюдений, пусть даже более шумных, приводит к ухудшению обусловленности системы уравнений и может приводить к еще более неудачным результатам. Подобным образом, уменьшение угла отсечки по высоте и, следовательно, некоторое увеличение объема измерений, может улучшить качество решения. Поэтому полезно иметь некоторый резерв по высоте, скажем, наблюдать с углом отсечки 10°, а обработку делать с углом 15°. В случае необходимости можно попытаться делать обработку и на 20°, и на 10°.

3. Удаление из обработки спутников с большим количеством потерь (срывов) циклов. Потери циклов чаще всего происходят из-за каких-либо препятствий, например, деревьев, а где препятствия – там и многопутность. Нужно заметить, что не всегда наличие препятствий приводит к потерям циклов, но это определенно искажает данные.

4. Переход от двухчастотной обработки к одночастотной. Сигнал на второй частоте, особенно у приемников с квадратурной обработкой сигнала, имеет отношение «сигнал/шум» ниже, чем на первой частоте. Это не является

лучшим решением, так как приводит к увеличению влияния ионосферы, и оправдано лишь на коротких базовых линиях.

5. Попытаться сделать обработку, назначив другой опорный спутник, если это допускает программа.

6. Обработка с точными априорными координатами начала базовой линии. Иногда это помогает при большом числе потерь счета циклов.

7. Обработка с точными эфемеридами.

8. Обработка по другой программе. Для этого потребуется преобразование файла наблюдений в RINEX формат. Известно, что в программах разных фирм заложены различные приемы разрешения неоднозначностей, и нередко бывает, что по одной программе получается плавающее решение, а по другой выводится фиксированное решение с прекрасными характеристиками.

Контроль сети. Для сетей наилучшим средством нахождения проблемных линий является использование программ замыкания фигур, которые для определения невязок суммируют компоненты векторов по замкнутому контуру. Большинство программных пакетов имеют именно этот тип программ. В каждой фигуре можно получить невязки w_X, w_Y, w_Z или w_E, w_N, w_U по каждой из координат как сумму соответствующих приращений, которая теоретически должна равняться нулю:

$$w_X = \sum_k \Delta X;\ w_Y = \sum_k \Delta Y;\ w_Z = \sum_k \Delta Z, \qquad (10.32)$$

где k – число сторон в замкнутой фигуре.

По координатным невязкам можно получить полную невязку w:

$$w = \sqrt{w_X^2 + w_Y^2 + w_Z^2} = \sqrt{w_E^2 + w_N^2 + w_U^2} \qquad (10.33)$$

и сравнить ее с допустимой (ожидаемой) невязкой $w_{доп.}$:

$$w_{доп.} = \sqrt{\sum_k (\Delta_D^2 + \Delta_H^2)}. \qquad (10.34)$$

Ошибки Δ_D, Δ_H определяются на основании паспортных данных или устанавливаются в соответствии с инструкцией для данного вида работ. С вероятностью 95% должно выполняться условие:

$$w \le 2w_{доп.}. \qquad (10.35)$$

Преимущество контроля по невязкам очевидно: здесь осуществляется не только контроль решения базовой линии, но и ошибки оператора. Большие невязки w_E, w_N свидетельствуют о грубом центрировании антенны, а большая невязка w_H – о промахе при измерении высоты. Недостаток метода контроля по невязкам состоит в невозможности контролировать смещенные решения базовых линий. Один из источников таких решений – ошибки в априорных координатах начала базовой линии.

В статье [Герасимов, Сластенов, 1994] дается формула средней квадратической ошибки измерения одной разности координат по невязкам фигур всей сети:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}{3\sum_{i=1}^{n} k_i}}. \qquad (10.36)$$

В этой формуле в числителе должна быть сумма квадратов полных невязок из n замкнутых фигур, а в знаменателе – сумма числа сторон во всех фигурах, k – число сторон в фигуре. Если требуется сделать оценку точности по каждой из координат в отдельности, то формулу нужно изменить: в числителе вместо полных невязок использовать только невязки по соответствующей координате, а в знаменателе необходимо убрать коэффициент 3. При этом важно, чтобы одна и та же базовая линия присутствовала только в одной фигуре.

Другой метод контроля сети – это выполнение свободного или минимально ограниченного уравнивания по методу наименьших квадратов с использованием одной из многочисленных доступных сегодня программ. Это уравнивание обычно должно выполняться только после исключения плохих линий программой вычисления невязок в замкнутых фигурах. В главе 11 даётся более полное описание уравнивания по МНК, и здесь будут обсуждаться только некоторые аспекты практического применения.

Программы уравнивания по МНК выполняют три основных задачи:

– объединяют все векторы в неразрывную сеть;

– добавляют в компоненты каждого вектора малые поправки, чтобы получить замкнутые геометрические фигуры;

– вычисляют координаты и высоты всех точек.

Проект сети важен при получении полезной информации из уравнивания. Единственная замкнутая фигура обеспечивает минимум необходимой информации, в то время как сеть, такая, как на рис. 10.2, могла бы обеспечить более высокую степень избыточности, необходимую для анализа сети.

При пакетной обработке GPS данных часто используется навигационное положение как начальная координата для вычисления вектора, относительно которой производится линеаризация вектора. Заметим, что ошибка в 20 м в начальном положении вводит ошибку базовой линии около 10^{-6}. При выполнении минимально ограниченного уравнивания обычно вводятся координаты одной точки, а координаты всех векторов переносятся в соответствии с координатами одной точки. Поэтому можно получить список величин, на которые каждая точка была смещена, чтобы согласовать её с фиксированной точкой. Полезно просмотреть этот список смещений, чтобы определить, не были ли начальные координаты для любого из векторов ошибочными на величину большую, чем некоторое разумное значение. Например, если смещение было 200 м, то, вероятно, придется заново вычислить этот отдельный вектор, используя лучшие начальные координаты (например, полученные из предварительного уравнивания). Кроме того, эти смещения являются хорошим индикатором того, насколько положение по C/A-кодовым псевдодальностям согласуется с «каталожным» положением.

Постоянной проблемой является корректное взвешивание наблюдений (векторов). Во многих программах уравнивания строится весовая матрица, основанная на корреляционных матрицах векторов и стандартных ошибках в выходном GPS файле. Формальные стандартные ошибки вычисления векторов обычно занижены в 3 – 10 раз. Поэтому весовая матрица, образованная по этим значениям, должна быть масштабирована, чтобы привести её к истинной оценке ошибки сети. Проблема состоит в определении величины масштабного коэффициента. Опыты с различными пакетами программ покажут, какова соответствующая величина масштабного коэффициента. Кроме того, в программе уравнивания или в документации к программе должны указываться различные масштабные коэффициенты для применения в конкретных случаях.

Другой метод контроля качества сети GPS – проверка остаточных невязок, получаемых из уравнивания. Обычно есть два списка невязок. Один состоит из действительных значений, которыми компоненты векторов исправлялись, чтобы достичь точное замыкание в сети. Эти остаточные невязки должны состоять из малых значений для коротких линий и больших значений для длинных линий. Грубые промахи или большие ошибки будут распределены (размазаны) по всей площади, и их будет трудно изолировать. Наилучший способ изолировать большие ошибки – это использование программы для вычисления невязок в замкнутых фигурах в комбинации с программой уравнивания.

Второй список остаточных невязок, предоставляемый большинством программ, состоит из нормированных невязок. Эти величины являются безразмерными и представляют действительные масштабированные невязки. Значение нормированной остаточной невязки, равное 1.0, будет указывать на то, что невязка оказалась такой, как и ожидалось при использовании априорной весовой модели. Значение меньше 1.0 указывает, что невязка получилась меньше, чем ожидалось, а величина больше 1.0 указывает, что остаточная невязка больше ожидаемого значения. При уравнивании можно ожидать несколько нормированных остаточных невязок, равных 2.0. Когда число остаточных невязок, больших 2.0, превышает 5%, то для любой величины больше 3.0, нужно выполнять дальнейшие исследования, и, вероятно, некоторые линии нужно будет удалять.

Если измерения выполняются в кинематическом режиме с применением последовательного метода, то построенный траверс или геометрическую фигуру можно уравнивать тем же образом, что и при статической съёмке. Ту же самую методику можно применять для изолирования грубых линий, или грубых превышений, или грубых плановых положений [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

10.9.4. Отчет об измерениях

Заключительный отчёт об измерениях полезен при анализе результатов работ. В действительности, отчёт о проекте должен так задокументировать измерения, чтобы другие компетентные лица могли восстановить все вычисления. Этот отчёт служит «проверочным следом» для съёмки. Отчёт по проекту должен содержать следующие пункты:

1. Местоположение района измерений и описание площади проекта. Рекомендуется иметь карту, показывающую расположение.

2. Назначение измерений и объём требований, которые были удовлетворены. Кроме того, необходимо указать спецификации, с которыми выполнялись измерения (например, измерения в сети СГС-1).

3. Описание использовавшихся типов центров. Особо нужно заметить, если использовались грунтовые центры или центры с принудительным центрированием. Желательно объяснить, как отыскивались существующие центры, и какие из них были найдены. Для центров, которые не были найдены, оценить время, которое необходимо затратить на поиск марки, чтобы помочь другим, кто пожелает её найти. При анализе проекта полезен список всех контрольных (опорных) точек, найденных точек и использованных точек.

4. Описание использованной аппаратуры и оборудования должно включать как GPS, так и обычное оборудование вместе с их серийными номерами. Необходимо дать пояснение о поверках уровней у центриров и биподов. Если использовались сигналы или специальные мачты, то должно быть описание методики центрирования антенны.

5. Должна быть описана вычислительная схема для проекта, включая версию программного обеспечения и применённый метод уравнивания по МНК. В списке должны быть указаны спутники, наблюдавшиеся в каждом сеансе. Кроме того, должна быть сводка, показывающая для каждой линии факторы качества. Полезно включение данных повторных измерений по каждому вектору.

6. Должны приводиться вычисления поправок за центрировку и редукцию. В случае плановых точек должны быть чертежи (схемы), и показаны результаты непосредственного вычисления. Для высотных точек в приложении должны быть копии нивелирного журнала.

7. Должны быть описаны все встреченные проблемы, перечислены поломки оборудования. Необходимо указать на повышенную солнечную активность, а также на многопутность и другие особые случаи и факторы, встретившиеся при съёмке.

8. К отчёту должны прилагаться следующие ведомости:

- сводка невязок,
- расписание сеансов,
- статистики векторов,
- результаты свободного уравнивания по МНК,
- выписка из результатов свободного уравнивания, показывающая углы вращения и статистики,
- каталог уравненных координат (пространственных и плоских),
- копии «оригинальных» журналов наблюдений на пунктах,
- журнал неверного функционирования оборудования (дефектная ведомость),
- схема проекта, показывающая все точки.

9. Наконец, должны представляться копии оригиналов наблюдений (возможно в RINEX формате), как часть измерений.

Заархивированные соответствующим образом данные можно использовать в последующие годы другими лицами для изучения особых явлений, или когда работа может быть включена в другой проект [Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Руководство…, 2003].

10.10. Метрологическое обеспечение спутниковых измерений

Метрологическое обеспечение – это комплекс мероприятий по обеспечению единства измерений и объективной оценки систематических и случайных погрешностей результатов измерений.

В задачи метрологического обеспечения входят:

- создание эталонной базы данного вида измерений;
- передача размера единиц измерений от эталона к рабочим средствам;
- проведение государственных испытаний типов средств измерений;
- организация периодических поверок;
- осуществление функций метрологического контроля и надзора за выполнением измерений [Юношев, 1999; Спиридонов, 2003].

Метрологический контроль аппаратуры пользователей СРНС. Спутниковая аппаратура чрезвычайно разнообразна по точности, методам, заложенным в ее программное обеспечение, и методикам наблюдений.

В соответствии с типом измеряемых параметров, аппаратура пользователей СРНС подразделяется на два больших класса:

- навигационная аппаратура, предназначенная для определения положения и вектора скорости потребителя в общеземной системе координат, реализующая только кодовые измерения на одной или двух частотах в абсолютном или дифференциальном методе;
- геодезическая аппаратура, работающая по кодовым и фазовым измерениям в абсолютном, дифференциальном и относительном методе и обеспечивающая возможность высокоточных (на уровне сантиметра и точнее) определений положений или приращений координат между пунктами установки приемников в общеземной системе. Эта аппаратура может быть одно-, двух- и даже трехчастотной и одно- или двух- (а в скором времени, возможно, даже и трех-) системной. Кодовые измерения для такой аппаратуры являются обязательными, но их роль, как правило, вспомогательная (оперативное решение навигационных задач, помощь в сборе навигационного сообщения или облегчение решения по фазе). Исключение составляют приемники, использующие кодовые псевдодальности, сглаженные по фазе.

Согласно Закону РФ «Об обеспечении единства измерений», геодезическая аппаратура пользователей СРНС относится к сфере государственного метрологического контроля и надзора, который включает:

- утверждение типа средств измерений;
- поверку средств измерений, в том числе эталонов;
- лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту и прокату средств измерений;

– контроль за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованными методиками выполнения измерений, эталонами физических величин, соблюдением метрологических правил и норм.

Навигационная аппаратура пользователей СРНС формально не относится к сфере действия государственного метрологического контроля и надзора. Это означает, что средства измерений могут быть подвергнуты государственной сертификации только на добровольной основе по желанию производителя, продавца или потребителя. Периодическая поверка средств измерений может быть заменена их калибровкой, что снижает уровень требований к метрологическим службам, выполняющим калибровку. С таким положением дел согласны не все специалисты, поскольку от уровня качества навигационного обеспечения транспортных средств напрямую зависит безопасность людей и экономическая эффективность перевозок. Государственный центр «Интернавигация» вышел в Правительство РФ с предложением о включении навигационной аппаратуры в перечень средств измерений, подлежащих обязательной сертификации в соответствии с Законом РФ «О сертификации продукции и услуг».

Реальное положение дел таково, что навигационная аппаратура авиационного и морского применения подлежит обязательной сертификации по соответствующим международным правилам, которую проводят аккредитованные ведомственные службы. Вся же прочая аппаратура по требованию компетентных органов нашего государства должна подвергаться метрологическим испытаниям с целью проверки реальной точности навигационных определений и решения вопроса о несекретности получаемой информации.

Таким образом, практически вся аппаратура пользователей СРНС, производимая в стране и ввозимая из-за рубежа, в том или ином виде подлежит метрологическим испытаниям.

В отличие от метрологической поверки средств измерений, *калибровкой средств измерений* называют совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения метрологических характеристик или пригодности средств измерений, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору. Выполняется, например, калибровка антенн спутниковой аппаратуры, показывающая, насколько фазовый центр антенны изменяет свое положение в зависимости от направления на наблюдаемый объект. Использование при наблюдениях спутниковых антенн, не имеющих соответствующих данных, может искажать результат на уровне паспортной точности прибора.

Поверочная схема геодезической аппаратуры пользователей КНС. Поверочная схема устанавливает порядок передачи единицы измерений от государственного эталона времени, частоты и длины Российской Федерации к рабочим средствам измерений с указанием погрешностей и основных методов поверки. В основу схемы положено пролетное определение метра.

Методика сличений поверяемых средств с рабочими эталонами основана на определении расстояний, как функции разностей координат, инвариантной по отношению к началу и ориентировке осей системы. По другой методике

анализируются не расстояния, а координаты (в абсолютном и дифференциальном методах) или приращения координат (в относительном методе), непосредственно получаемые в процессе обработки и используемые в дальнейшем для построения геодезических сетей. Для этого случая необходимо иметь эталонные пространственные базисы и полигоны.

В качестве рабочих эталонов, применяемых для передачи размера единицы времени при определении задержки сигнала на измеряемом расстоянии лазерными спутниковыми или фазовыми геодезическими дальномерами, рекомендовано использовать стандарты частоты с пределами допускаемых погрешностей не более $1 \cdot 10^{-10}$ и метод непосредственных сличений частот задающих генераторов.

Из ранних поверочных схем заимствован комплекс линейных базисов в диапазоне 24 – 75 000 м по ГОСТ 8.503.84. Такие базисы имеются на предприятиях различных ведомств. Их абсолютные погрешности не должны выходить за пределы 5 мм при длине до 2 км и 10 мм при длине до 10 км. Базисы рекомендовано применять для периодической поверки эталонов 1-го разряда и рабочих средств измерений разностей координат по сигналам КНС методом прямых измерений.

В качестве рабочих эталонов 1-го разряда при периодической поверке средств измерений на базисах длиной до 30 км рекомендовано применение геодезических фазовых светодальномеров с погрешностью не более 0.6 мм + $1 \cdot 10^{-6}$ D, где D – длина базиса.

Базисы длиной более 1 000 км следует определять по лазерным наблюдениям искусственных спутников Земли в сети станций. Погрешность лазерных спутниковых дальномеров должна быть не более 30 мм.

Рабочим эталоном 2-го разряда является сеть эталонных базисов ИМВП ГП «ВНИИФТРИ» в диапазоне 0.02 – 4 000 км. Базисы снабжены аппаратурой контроля условий воспроизведения единицы длины в диапазонах:

- 0.02 – 10 км – геодезическими фазовыми дальномерами;
- 10 – 1 000 км – фазовыми геодезическими приемниками сигналов КНС;
- более 1 000 км – лазерными спутниковыми дальномерами.

Государственная поверочная схема МИ 2292–94 для средств измерений разностей координат по сигналам СРНС, включая геодезические приемники, а также кодовые приемники дифференциальной навигации, была разработана в Институте метрологии времени и пространства ГП «ВНИИФТРИ» [Дойников, 1994].

Периодическая поверка рабочих средств измерений, применяемых в нашей стране, выполняется метрологическими службами предприятий, аккредитованных Госстандартом РФ.

Испытания геодезической аппаратуры пользователей КНС при утверждении типа средств измерений. Согласно ст. 14 Закона РФ «Об обеспечении единства измерений», в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора средства измерений подвергаются обязательным испытаниям с последующим утверждением типа.

Решение об утверждении типа средств измерений принимается Госстандартом России и удостоверяется сертификатом, срок действия которого – от 3 до 5 лет.

Утвержденный тип вносится в Государственный реестр средств измерений, информация об утверждении типа публикуется в специальных официальных изданиях Госстандарта России.

Испытания средств измерений для целей утверждения их типа проводятся государственными научными метрологическими центрами Госстандарта, аккредитованными им в качестве государственных центров испытаний. В отношении геодезической аппаратуры пользователей КНС таковым центром является государственное предприятие «ВНИИФТРИ».

Процедура утверждения типа проводится по заказу предприятия-изготовителя средства измерений на основании заявки, направляемой в Управление метрологии Госстандарта России.

К проведению испытаний геодезической аппаратуры с целью утверждения типа, кроме метрологов Государственного центра испытаний средств измерений, привлекаются также специалисты ведомств пользователей: Роскомзема, Роскартографии, Министерства обороны и др.

Программа испытаний предусматривает:

– проверку соответствия эксплуатационной документации и технических характеристик аппаратуры требованиям распространяющихся на них нормативных и эксплуатационных документов Российской Федерации и изготовителя, включающих методики поверки средств измерений (СИ);

– определение основных метрологических характеристик образцов приемников и экспериментальную апробацию методики их поверки;

– результаты испытаний по каждому пункту программы оформляются протоколами в соответствии с требованиями отечественных нормативных документов.

Проверка метрологических характеристик включает оценку случайных и систематических погрешностей:

– автономных определений координат (навигационный режим);

– определений длин базисных линий фазовым методом в режимах «статика» и «быстрая статика»;

– определений координат в режиме «реального времени» с использованием радиомодема;

– определений приращений координат в кинематическом режиме и режиме «стой – иди».

Применяются три основных метода оценки погрешностей: сравнение с эталоном, по невязкам в замкнутых фигурах и по сходимости повторных измерений. В качестве эталонных значений длин базисов принимаются результаты многократных светодальномерных измерений. Погрешности определения координат в автономном режиме оцениваются на пунктах ГСВЧ РФ, постоянно работающих в составе международной сети МГС.

Методика метрологической поверки спутниковой аппаратуры. Аппаратура, прошедшая испытания с целью утверждения типа, допускается к метрологической поверке. Программа и методика поверки зависят от применяемого режима спутниковых определений:

- навигационное позиционирование;
- кодовые и кодо-фазовые абсолютные определения;
- относительные определения;
- дифференциальное позиционирование;
- дифференциальное позиционирование с накоплением;
- кодовая статика;
- фазовая статика;
- фазовая быстрая статика;
- реоккупация (псевдокинематика);
- кинематика «стой – иди»;
- непрерывная кинематика;
- кинематика «стой – иди» в реальном времени.

В свою очередь, режим определений зависит от типа аппаратуры и способа ее применения.

Методика поверки базируется на использовании создаваемых эталонных пространственных полигонов (ЭПП), включающих эталонные пространственные базисы и геодезическую сеть пунктов. Пункты эталонного полигона должны иметь координаты в системе, используемой навигационными системами GPS и ГЛОНАСС, с точностью, превышающей точность подлежащих поверке средств, минимум в три раза (критерий 3σ). Точность взаимного положения пунктов также должна превосходить точность аппаратуры в несколько раз. Исходя из формулы (10.14), точность привязки к геоцентру должна быть на уровне 1 – 5 дециметров (при поверке фазовой аппаратуры, наблюдающей абсолютным методом, – на уровне сантиметра), а взаимные положения пунктов должны быть известны с относительными ошибками 10^{-6} – 10^{-7}.

Методика метрологической поверки предусматривает оценку соответствия метрологических характеристик спутниковой аппаратуры её техническим характеристикам, указанным в фирменной документации, на основе сопоставления результатов, полученных из испытаний, с эталонными координатами и/или компонентами векторов базовых линий. Для получения статистически достоверных оценок метрологических характеристик СПА необходимо выполнить не менее трёх определений на 3-4 пунктах эталонного полигона.

Полученные в процессе поверки метрологические характеристики относятся к принятой в СРНС координатной системе. При переходе к любой другой координатной системе необходимо учитывать дополнительные погрешности, вносимые этой процедурой. Результаты поверки по каждому пункту методики оформляются протоколом. При положительных результатах

поверки оформляется свидетельство установленного образца [Антонович и др., 1998; Ачкасов и др., 1993].

Средства поверки спутниковой аппаратуры. Как показывает международный опыт, наиболее рациональным является создание специальных эталонов – «геодезических испытательных метрологических полигонов» на основе эталонных базисов и эталонной сети триангуляции [Контроль…, 1996; Rizos, 1999]. В ЦНИИГАиК разработаны общие технические требования к таким полигонам, которые утверждены для использования в системе Роскартографии [РТМ 68 – 8.20 – 93]. Методики построения полигонов были разработаны в Верхневолжском АГП [Побединский и др., 2003], в Сибирской государственной геодезической академии [Антонович и др., 1999б; Антонович и др., 2004б] и других организациях. В России разработан комплекс эталонов и средств измерений для испытаний аппаратуры потребителей СРНС на основе использования имитаторов сигналов [Денисенко и др., 2003].

В основе методик построения пространственных полигонов – стремление к максимально возможному ослаблению систематических и случайных ошибок (табл. 10.5).

Таблица 10.5. Источники погрешностей и способы их ослабления при построении эталонного пространственного полигона

№ п/п	Источник ошибок	Способ исключения или ослабления
1	Ошибки априорных координат начала сети	Привязка к станциям Международной GPS службы (точность привязки на уровне 3 см)
2	Ошибки эфемерид	Использование точных эфемерид МГС (точность около 5 см, обработка по двойным разностям)
3	Ионосферная задержка	Применение двухчастотной аппаратуры, финальное решение по комбинации фазы несущей, свободной от влияния ионосферы
4	Тропосферная задержка	Проектирование сети с малой разностью высот пунктов, использование при обработке файлов тропосферной задержки от ближайших пунктов сети МГС
5	Многопутность	Использование аппаратуры, устойчивой к многопутности (приемники 5 700 с антеннами Zephyr geodetic), продолжительные сеансы наблюдений, удаление на время измерений наружных знаков (пирамид)
6	Нестабильность фазовых центров антенн	Использование приемников с однотипными антеннами
7	Геометрия спутников	Выбор сеансов с величинами PDOP меньше 4 и числом спутников больше 6, использование всей возможной качественной геометрии созвездия
8	Ошибки центриро-	Принудительное центрирование,

	вания и измерения высоты антенны	специальные переходники для измерений высоты антенны штангенциркулем
9	Геометрия сети	Избыточные связи между пунктами (рис. 10.19)
10	Ошибки стохастической модели сети	Наблюдения в один сеанс только двумя приемниками
11	Шумы измерений и смещения	Измерение двумя комплектами аппаратуры, несколькими продолжительными сеансами (более 4 часов)

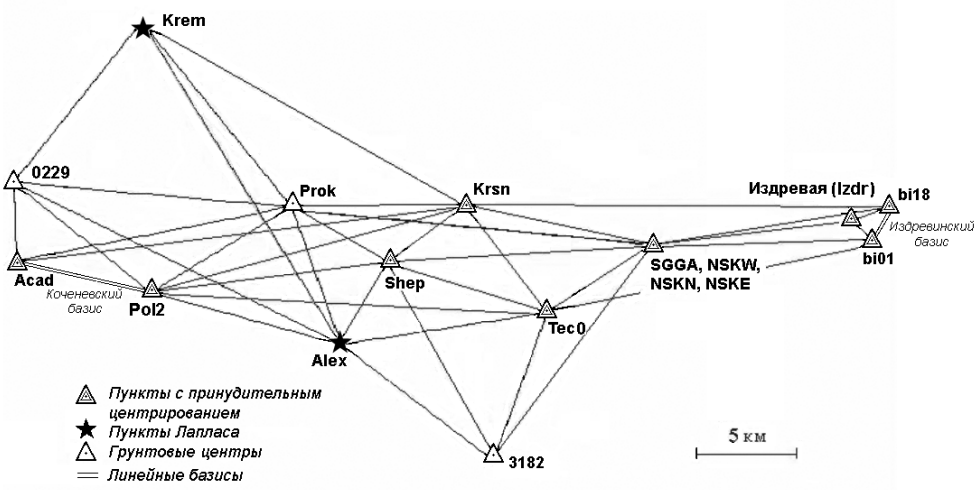


Рис. 10.19. Сеть эталонного метрологического полигона Сибирской государственной геодезической академии

Следует отметить, что даже если аппаратура успешно прошла метрологическую поверку, это еще не гарантирует, что результаты будут безошибочными, поскольку с аппаратурой работает специалист в условиях, отличающихся от условий поверки, который может принимать неправильные решения. Примеров таких ситуаций – масса: наблюдения под знаками или ЛЭП, наблюдения больших базовых линий одночастотной аппаратурой, неудачное расположение опорных пунктов и т. д. В результате, при качественной аппаратуре получается далеко не качественный результат. За 5 лет метрологическая служба СГГА поверила около 700 спутниковых приемников, и не было выявлено ни одного случая, чтобы аппаратура давала неверные результаты. Это говорит о высокой надежности аппаратуры и ее тщательном тестировании на стадии изготовления. В то же время, неоднократно наблюдались случаи неправильной работы операторов с аппаратурой. Кроме того, накопленный опыт работ свидетельствует, что часто геодезисты допускают ошибки на стадии уравнивания сетей и трансформирования координат. В зарубежной печати даже появились предложения проверять не только аппаратуру, но и наличие у геодезиста умения развивать сети нужной точности, для проверки, поручая ему выполнить наблюдения и обработку на контрольной сети [Craimer et al., 1990].

11. ОБРАБОТКА GPS/ГЛОНАСС ИЗМЕРЕНИЙ

11.1. Методы, средства и порядок обработки

Концепции уравнивания. В общем случае кампания GPS измерений включает использование небольшого числа приёмников для определения координат большого количества станций. Выполненные в проекте наблюдения разделяются на сессии, состоящие из наблюдений на отдельных станциях (пунктах). Сессия может быть короткой, всего несколько минут, если в малой сети применяется метод быстрого разрешения неоднозначностей, или несколько часов и даже суток, если необходимо достигать высокую точность в более крупных сетях. При ограниченном числе доступных спутников типичная сессия наблюдения в инженерных сетях продолжается от 1 до 3 часов. Разработаны и используются следующие методики уравнивания спутниковых наблюдений:

– уравнивание наблюдений, выполненных на *одной станции*;

– обработка *одной базовой линии* и последующее объединение базовых линий в сеть;

– объединенное уравнивание всех полученных наблюдений отдельной сессии (*уравнивание наблюдений многих станций одной сессии*);

– объединение решений *многих сессий* в строгое всеобщее сетевое решение.

Уравнивание *одной станции* (позиционирование точки, «однопунктовое» решение) обеспечивает абсолютные координаты станции в системе WGS-84 (или ПЗ-90). Если обрабатываются только кодовые измерения, то из-за низкой точности эти результаты обычно представляют малый интерес для геодезических применений, но они часто отвечают требованиям некоторых задач геофизики, ГИС и дистанционного зондирования. Типичная область этого применения – навигация.

В строгом геодезическом уравнивании необходима информация и об относительном, и об абсолютном положении пункта. Поэтому решение по одной станции во многих программных пакетах включается для совместной обработки многих станций. Решение по одной станции также используется для предварительной обработки и редактирования данных (например, из-за потерь счета циклов, вращения Земли, эффектов теории относительности, ионосферы, тропосферы и для образования нормальных мест). Более точные абсолютные положения, на уровне несколько метров или лучше, можно достигнуть, если используются данные нескольких суток наблюдений. Сантиметровый уровень точности возможен при абсолютном позиционировании по фазе несущей (см. раздел 8.2).

Концепция *одинарной базовой линии* очень широко используется в программном обеспечении для обработки спутниковых данных. В совместном уравнивании обрабатываются наблюдения от двух одновременно работавших приемников, преимущественно в виде двойных разностей. Результатом являются компоненты $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ вектора базовой линии и соответствующая ковариационная матрица $\mathbf{K}_{XYZ}$.

Отдельные базовые линии используются как входные данные в программе уравнивания сети. Обработка наблюдений в сети распадается на *первичное уравнивание* (решение базовых линий) и *вторичное уравнивание* (уравнивание векторов базовых линий). Эта методика является строгой, если одновременно наблюдали только два приемника, и если используется вся стохастическая информация полной ковариационной матрицы. Однако если пары станций выбраны из большего числа одновременно действовавших приемников, то не все возможные комбинации базовых линий не зависят одна от другой. Как было показано в разделе 10.2.4, при одновременных наблюдениях R приемниками получается $R(R - 1)/2$ возможных базовых линий, но независимыми из них являются только $R - 1$ линий. Если имеющееся программное обеспечение может обрабатывать только одну базовую линию, то независимые, «не тривиальные» базовые линии должны выявляться с использованием подходящих критериев отбора, таких, как длина базовой линии или число наблюдений. Тем не менее, эта методика не является строгой для сетевых решений, поскольку не учитывается стохастическая информация между одновременно наблюдавшимися линиями. Для улучшения решения необходимо тщательное взвешивание и ослабление корреляции (см., например, [Goad, Müller, 1988; Schaffrin, Zieliñski, 1989]).

В простейшем случае используется концепция только длины вектора базовой линии, и спутниковые наблюдения используются просто как метод измерения расстояний между станциями (трилатерация). Этот метод часто применялся в ранние годы геодезического использования GPS. Метод правильный, однако, часть ценной информации, содержащейся в наблюдениях, а именно пространственная ориентация базовой линии, при этом теряется [Генике, Побединский, 1999; Seeber, 2003].

Большинство производителей предлагают вместе с приемниками программы, которые используют концепцию базовых линий. Эти программы удобны для малых проектов, для полевой проверки данных и для применений в реальном времени.

В *уравнивании многих станций одной сессии* совместно обрабатываются все данные, которые наблюдались одновременно тремя или более участвующими приемниками.

В этом случае результатами решения являются $R - 1$ независимых векторов и ковариационная матрица размера $3(R - 1) \times 3(R - 1)$. В зависимости от имеющегося программного обеспечения, результаты можно также выдавать набором из $3R$ координат и ковариационной матрицы размером $3R \times 3R$. Ковариационная матрица также является блочно-диагональной, в которой размер ненулевых диагональных блоков является функцией R. Следовательно, это строгое уравнивание наблюдений с использованием всех взаимных стохастических соотношений. Для геодезических целей такое «многопунктовое» уравнивание имеет концептуальные преимущества над методом базовых линий, поскольку используется весь потенциал точности СРНС.

Несколько решений по сессиям можно объединять в *уравнивание многих сессий* или, более точно, в *решение по многим станциям и многим сессиям*. Это обычная методика, когда крупные сети разбиваются на части из-за ограниченного числа приемников. Основное условие в таком уравнивании состоит в том, что каждая сессия связывается хотя бы с одной другой сессией через одну или большее количество общих станций, на которых наблюдения выполнялись в обе сессии. Расширение числа общих станций повышает стабильность и надежность всей сети.

Решение по многим сессиям является строгим и эквивалентно объединенному уравниванию all-in-one (все в одном), если используются соответствующие ковариационные матрицы для решений индивидуальных сессий. Пошаговая процедура, начинающаяся с сессионных решений, имеет преимущество в том, что не требуется мощный компьютер. Кроме того, сравнение результатов отдельных сессий обеспечивает лучший контроль точности сети при достаточном объеме избыточных наблюдений на общих станциях. Программные пакеты для обработки наблюдений больших спутниковых сетей обычно основаны на концепции многих станций и многих сессий [Seeber, 2003; Rizos, 1999; Leick, 1995].

Программное обеспечение. Используемые для обработки программы принято делить на *коммерческое программное обеспечение*, поставляемое производителями спутниковой аппаратуры, и многоцелевое *научное программное обеспечение*, которое происходит от разработчиков из научных организаций. Программы первой группы предназначены преимущественно для обработки данных от приемников определенного типа. Однако более совершенные программы принимают данные также через интерфейс формата RINEX. Как правило, математические модели этих продуктов в большинстве случаев пользователю недоступны. Коммерческие программы подходят для повседневной геодезической работы. Обычно они предлагают большое разнообразие возможных применений и могут достаточно легко управляться персоналом со средним уровнем инженерного образования в области спутниковых технологий. В некоторых случаях основная программа включает только решение базовых линий, а для уравнивания сети необходимо дополнительное программное обеспечение. Обычно этот вид программ позволяет делать обработку статических и кинематических измерений. Набор типичных опций таких программ описан в разделе 5.3.4.

Из коммерческих программ в России наиболее распространенными на рынке спутниковых технологий являются:

- Trimble Geomatics Office (TGO), заменившая программу GPSurvey, компании Trimble Navigation;
- SKI-Pro компании Leica Geosystems;
- Pinnacle, Ensemble компании Javad Navigation Systems;
- Topcon Tools компании Topcon Positioning Systems;
- Ashtech Solutions компании Thales Navigation.

Разработка многоцелевой системы для пост-обработки GPS представляется сложной задачей, требующей многолетней работы научного коллектива и состоящей из большого числа индивидуальных программ. Обычно эти программные пакеты не ограничиваются использованием одного типа приемников, а принимают данные от всего разнообразия геодезической аппаратуры. Эти пакеты в большинстве случаев служат для следующих задач:

– профессионального стандартного использования в небольших сетях для быстрой обработки;

– профессионального использования в высокоточных измерениях, а также на больших расстояниях;

– для обработки данных научных исследований, включая геодинамические исследования и обработку массивов постоянно действующих станций.

Кроме стандартных опций быстрой обработки, эти виды программных пакетов предлагают многие виды особых режимов для научной обработки. Некоторые пакеты включают опции для определения орбит или для оценивания атмосферных моделей. Математические модели научных программных пакетов общего назначения в большинстве случаев обеспечены документацией и приводятся в научной литературе. В некоторых случаях пользователь имеет доступ к исходным модулям и может делать модификации или вставлять новые фрагменты. Считается, что в научных программах моделирование явлений выполняется на уровне точности в 1 мм, в то время как в коммерческих программах – 5 мм [Seeber, 2003; Rizos, 1999].

В настоящее время примерами программ второй группы являются:

– Bernese – разработана в Астрономическом институте Университета Берна, Швейцария;

– GAMIT/GLOBK – разработана в Массачусетском институте технологий, США;

– GEONAP – разработана в Университете Ганновера, Германия;

– GIPSY-OASIS II – разработана в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского института технологий, США;

– программа BAHN разработана в Университете Ньюкастла совместно с LogicaCMG (Англия), используется для вычисления орбит и поправок часов спутников
(www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/02834/ COSPAR2006-A-02834.pdf).

Нужно заметить, что в отличие от коммерческих программ, работающих в среде Windows, научные программы разрабатываются под операционную систему Linux. На то, чтобы понять программу, и как наилучшим образом ее использовать при различных обстоятельствах, могут потребоваться значительные затраты времени. Поэтому настоятельно рекомендуется обучение у дистрибьютера [Blewitt, 1997].

Известно несколько других программ, но они имеют тенденцию ограничиваться институтами и центрами, где были разработаны. К ним можно отнести программы PAGES (Национальная геодезическая служба США) [Eckl et

al., 2001], GRAPE (Институт прикладной астрономии, Россия) [Гаязов и др., 2005]. Программный пакет PANDA (Position And Navigation Data Analyst) разработан в исследовательском центре Университета г. Ухань (КНР) и предназначен для обработки лазерных наблюдений, GPS и в будущем системы GALIEO. Для получения координат станций, тропосферных зенитных задержек и содержания паров воды, элементов орбит GPS в центре GFZ (ФРГ) используется пакет EPOS. Программа применяется также для прогнозирования орбит GPS.

Многоцелевые научные программные пакеты состоят из нескольких частей. Можно выделить три главные группы:

– *уровень предварительной обработки*, на котором данные готовятся к основной обработке;

– *уровень основной обработки* (главный процессор) имеет дело с оцениванием неизвестных параметров;

– *уровень пост-обработки*, на котором полученная информация собирается в виде таблиц или графиков, и, если необходимо, происходит объединение сессий в сеть.

Программа начинается с ввода *необработанных данных* всех приемников, включенных в отдельную сессию, эти данные необходимо накопить, перевести в доступный для чтения ASCII формат (RINEX-файл) и проверить на наличие грубых ошибок. Файл в формате RINEX требует дополнительной информации, которая не всегда обеспечивается приемником, например, высота антенны, приближенные координаты станции, метеорологические данные и т. д. Эти данные можно ввести в *базу данных*.

Переданные по радио сообщения можно отделить от данных наблюдений, проконтролировать и образовать для каждой сессии *файл сообщения*. Для разных частей сообщения можно применять алгоритмы сглаживания. На этом уровне можно ввести (если потребуется) внешнюю информацию об орбитах от МГС.

Решения для одиночной станции по кодовым измерениям или по псевдодальностям, сглаженным по фазе несущей, обычно образуются на уровне *главной программы*. На этой стадии можно ввести необходимые поправки в данные, это могут быть поправки за ионосферу, тропосферу, фазовый центр антенны, вращение Земли и релятивистские эффекты. Данные можно проконтролировать на наличие потерь счета циклов и сжать в нормальные места.

Оценивание параметров в *главной программе* производится либо в соответствии с концепцией исключения параметров, либо определения параметров, либо по обеим концепциям. Основными параметрами наблюдений могут быть не разностные фазовые данные (например, GEONAP, GIPSY-OASIS II) или двойные разности (например, Bernese).

Подлежащими оцениванию параметрами могут быть:

– координаты станции;

– параметры часов спутника и часов приемника (полином второй степени со стохастической моделью часов);

– аппаратурные задержки на спутнике и в электронике приемника (полином второй степени с одним стохастическим параметром);

– поправки в элементы орбиты с моделью коротких дуг (до шести Кеплеровых параметров, модель солнечного давления);

– тропосферная зенитная задержка (или тропосферный масштабный параметр) для каждой станции (постоянный или стохастический процесс);

– локальные ионосферные поправки (например, улучшенные параметры в модели Клобучара, изменяющиеся во времени параметры однослойной ионосферной модели);

– параметры для каждой неразрешенной неоднозначности и каждой невосстановленной потери счета циклов.

В оценивание может включаться больше параметров, например, параметры вращения Земли, точные ионосферные модели, содержание осаждаемых паров воды в атмосфере. Процесс уравнивания в главной программе можно повторять, чтобы зафиксировать как можно больше неоднозначностей. Главными результатами в сессионном решении являются координаты всех участвующих станций и ковариационная матрица.

На *уровне пост-обработки* все сессионные решения могут строго объединяться в программе уравнивания сети, если это еще не сделано в главной программе. Результаты сетевого решения можно вновь подставить в сессионное решение с целью фиксирования остальных неоднозначностей. На этом уровне можно ввести внешнюю информацию, такую, как координаты фидуциальных станций. Кроме того, в файл эфемерид снова могут быть введены улучшенные орбиты, и затем может быть инициирован второй проход программы.

Окончательные результаты из сетевого уравнивания можно преобразовать в локальную или глобальную систему координат и сравнить с существующими наборами наземных данных. Окончательная оценка результатов поддерживается статистическими тестами и серией графических представлений. Они могут включать статистики на используемые одновременные наблюдения и на поведение отдельных сигналов и линейных комбинаций, таких, как комбинация, свободная от влияния ионосферы.

Методика обработки одной базовой линии. Обработка по концепции одной базовой линии фазовых измерений в коммерческих или научных программах состоит из следующих шагов обработки:

– определение координат конца базовой линии абсолютным методом;

– решение по тройным разностям, которое обеспечивает умеренную точность, но высокий уровень надежности из-за его нечувствительности к потерям счета циклов, поэтому оно идеально подходит для предварительного определения координат неизвестной станции;

– выявление потерь счета циклов и восстановление отсчетов;

– решение по двойным разностям с вещественными неоднозначностями (плавающее решение, в нем неоднозначности вычисляются как вещественные

числа с плавающей точкой), для длинных базовых линий это может быть наилучшее решение, но для коротких линий это решение с низкой точностью;

– поиск целых неоднозначностей (разрешение неоднозначностей);

– решение по двойным разностям с фиксированными неоднозначностями (в фиксированном решении вычисленные целые неоднозначности рассматриваются уже как известные параметры, то есть они зафиксированы), это наилучшее решение и для коротких, и для длинных базовых линий.

Приведенная последовательность решения применяется для обычных статических решений базовых линий. Такие методы измерений как «быстрая статика», «стой – иди» и «истинная кинематика» обязательно требуют решений с фиксированными неоднозначностями.

Программы для двухчастотных приемников допускают несколько возможностей обработки (зависящих от длины базовой линии), некоторые из них приводят к фиксированному решению, другие обеспечивают решения с вещественными неоднозначностями.

Появление двухсистемных приемников, работающих по сигналам GPS и ГЛОНАСС (или совместной системы GNSS) потребовало разработки теории совместного использования данных, относящихся к разным частотам, системам координат и времени.

Коммерческие пакеты программ обычно обрабатывают только одиночные базовые линии, даже когда в поле одновременно наблюдали более чем два приемника. Строгая математическая обработка требует применения метода многих базовых линий multi-baseline (сетевого решения), в котором учитываются корреляционные зависимости между станциями.

Результаты обработки фазовых измерений являются входными данными для программы уравнивания сети. Однако при этом необходимо учитывать, что выходная информация в ковариационных матрицах после решения базовых линий обычно показывает слишком завышенную точность, поэтому при уравнивании сети эту точность необходимо корректировать, приводя ее в соответствие с реальной точностью [Rizos, 1999].

11.2. Выявление и восстановление потерь счета циклов

11.2.1. Проблема потерь счета циклов

В процессе измерений приемник определяет разность фаз между принятой несущей и сигналом, сгенерированным внутри приемника в определенные по часам приемника моменты времени. Эта разность фаз называется *дробной фазой*. Каждый раз, когда разность фаз изменяется с 360 на 0° (или наоборот), показание счетчика циклов изменяется на единицу. Эти показания счетчика составляют так называемый *целый счет*, который в сумме с дробной фазой образует наблюдаемую *непрерывную фазу* несущей.

Если приемник теряет захват сигнала спутника, то после восстановления захвата сигнала происходит скачок на целое число циклов в наблюдении фазы несущей. Потери счета циклов могут происходить по одной из трех причин. Чаще всего это происходит из-за блокировки сигналов препятствиями:

деревьями, зданиями – и даже самим наблюдателем. Другая причина – это низкое отношение «сигнал – шум» из-за ионосферных возмущений, многопутности, высокой динамики приемников или малой высоты спутников над горизонтом. Третий источник потерь счета циклов – неполадки в программном обеспечении приемника, которые приводят к неправильной обработке сигнала. Потери счета циклов могут также вызываться плохой работой генераторов спутника, но этот случай очень редкий. Потеря захвата может быть короче, чем временной интервал между соседними эпохами записи данных, или быть больше его, из-за чего появляется разрыв в данных. При восстановлении захвата дробная часть фазы будет неизменной, то есть будет такой же, какой она была бы без потери захвата, но целое число будет нарушено. В результате наблюдаемая фаза ϕ будет содержать ошибку в целое число циклов n (рис. 11.1).

Существуют две проблемы, связанные с потерей счета циклов: *обнаружение* и *исправление* (то есть определение места и количества пропущенных циклов и исправление наблюдений). Исправление потерь счета циклов делается посредством добавления во все последующие наблюдения фаз для этого спутника и этой несущей найденной величины n.

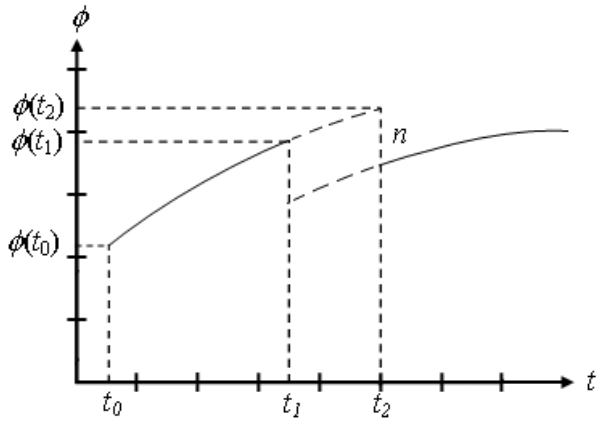


Рис. 11.1. Потеря счета циклов:

t_0 – момент начала измерений; t_1 – момент потери захвата сигнала; t_2 – момент возобновления измерений; n – величина сдвига в непрерывной фазе

Для точного позиционирования необходимо, чтобы пропуски циклов выявлялись и полностью исправлялись до выполнения решений базовых линий. Для решения этой задачи может потребоваться много усилий, если использовать полуавтоматический метод, или можно получить ошибочный результат в случае применения несоответствующей автоматизированной методики. Выявление пропусков циклов и их восстановление все еще является сложной задачей, даже после многих лет поиска, в начале которого предполагалось, что потери циклов, вероятно, в будущем не станут особой проблемой из-за совершенствования приемников [Bisnath et al., 2001; Xu, 2003].

11.2.2. Методы выявления потерь счета циклов

Один из первых методов выявления потерь счета циклов непрерывной фазы состоял в *ручном редактировании* данных непосредственно на экране компьютера после выполнения решений по одинарным или двойным разностям.

Потеря циклов выявлялась по величине остаточных невязок. Эта методика хорошо действовала при достаточно точных координатах известного пункта. Ручное редактирование, однако, очень трудоемкое и при наличии большого количества разрывов в данных занимает много времени.

Потеря счета может быть восстановлена посредством *введения новой целой неоднозначности* как дополнительного параметра. Такие параметры становятся частью вектора неизвестных, который определяется в процессе оценивания. Этот метод имеет определенное преимущество – прямое нахождение размера сдвига фазы по методу наименьших квадратов. Недостатком метода является то, что присутствие большого количества дополнительных параметров обесценивает окончательное решение. Кроме того, при наличии большого количества потерь в счете циклов матрица нормальных уравнений становится большой, и это может требовать специальных методов для ее обработки.

Еще в середине 1980-х гг. Б. Ремонди предложил автоматизированный метод редактирования сдвигов фазы с использованием *алгоритма тройных разностей*, которые нечувствительны к ошибкам часов спутника и приемника, а также к неоднозначностям фазы. Известно, что влияние разрыва в счете циклов действует локально на конкретную тройную разность, и, следовательно, сдвиги фазы обычно легко замечаются по большим невязкам (см. раздел 7.2.5). Чтобы эти ошибочные тройные разности не оказывали влияние на решение, им назначается малый вес. Решение ведется методом приближений. Как только решение по МНК сходится, полученные невязки будут указывать на величину скачков циклов. У хороших разностей невязки будут составлять малые доли цикла, но тройные разности, содержащие срывы циклов, будут иметь невязки, близкие к одному циклу или более. Затем производится поиск и исправление соответствующих разрывов. Обычно этот процесс повторяется до разрешения неоднозначностей двойных разностей, где производится окончательное изменение фазовых сдвигов. Недостатком тройных разностей является наличие у них повышенного уровня шума [Cross, Ahmad, 1988].

Часто встречающийся метод тестирования данных – *вычисление* первых, вторых, третьих и более высоких порядков *разностей* для временных рядов из одинарных, двойных, тройных разностей или других функций измеренных величин, в которых предполагается наличие разрывов.

Принцип действия этого метода можно увидеть на примере табл. 11.1. Предположим, $y(t_i)$, i = 1, 2, …, 7 представляет временной ряд для функции сигнала, который содержит скачок n в эпоху t_4. В этой схеме через y^1, y^2, y^3, y^4 обозначены разности первого, второго, третьего и четвертого порядков. Важное свойство разностей состоит в усилении скачка в разностях более высокого порядка, и, таким образом, улучшении возможности его выявления. Подразумеваемой теоретической основой является тот факт, что разности образуются посредством фильтров вычитания. Они фильтруют шумы с высокой частотой и сглаживают шумы с низкими частотами. Высокочастотные составляющие, такие, как сдвиг фазы, усиливаются. Эффект от применения разностной схемы становится очевидным, если сигнал $y(t_i)$ заменить, например, на фазу, содержащую скачок в n циклов, вызванный потерей захвата сигнала.

Для разностной схемы можно использовать любую из описанных величин для тестирования. Главный недостаток этого метода состоит в том, что пользователь должен устанавливать особые наборы величин допусков, а кинематические данные требуют формирования линейных комбинаций, свободных от геометрии [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

Таблица 11.1. Схема разностей

Эпохи t_i	Функции $y(t_i)$	Разности			
		y^1	y^2	y^3	y^4
t_1	0	0			
t_2	0	0	0	n	
t_3	0	n	n	$-2n$	$-3n$
t_4	n	0	$-n$	n	$3n$
t_5	n	0	0	0	$-n$
t_6	n	0	0		
t_7	n				

Во многих разработанных методиках автоматизированного исправления применяется положение о том, что измеренные величины или их функции (например, одинарные или двойные разности) плавно изменяются со временем. Поэтому их можно представлять в виде *временного полинома*, который экстраполируется на шаг вперед, и полученная величина сравнивается с измеренным значением. Если величина расхождения больше некоторого значения (скажем, 0.1 цикла), то округленное до целого значение разности добавляется ко всем фазовым отсчетам, начиная с момента потери захвата.

Популярным приемом в выявлении потерь счета циклов является *Калмановская фильтрация*. В этом методе предсказанные величины временных рядов, оцененные из разработанной динамической модели в фильтре Калмана, сравниваются с действительными временными рядами данных. Указателями потерь циклов являются любые статистически значимые расхождения. Однако выбор подходящих параметров фильтра для набора данных требует настройки фильтра, и, если выбраны несоответствующие параметры, то метод может выдавать непредсказуемые результаты, во всяком случае, с не разностными данными статических измерений. Применяются и другие виды фильтров, см., например, [Bisnath et al., 2001].

Для отдельного пункта величинами для тестирования являются измеренные фазы, комбинации фаз, комбинации фаз и кодовых дальностей или комбинации фаз и интегральных доплеровских частот. Тесты отдельного приемника дают возможность выявлять потери счета циклов на месте наблюдений и восстанавливать внутренним программным обеспечением приемника. Когда

объединяются два пункта, тестирование величин обеспечивается одинарными, двойными и тройными разностями (табл. 11.2).

Таблица 11.2. Тестируемые величины для выявления потерь счета циклов

Необходимые данные	Тестируемая величина
Одиночный приемник	
Фаза на одной частоте (L1 или L2)	Необработанная фаза
Фазы на двух частотах (L1 и L2)	Фазовые комбинации
Фаза и кодовая дальность на одной частоте	Комбинация фазы и кодовой дальности
Фаза и интегральный доплер на одной частоте	Комбинация фазы и интегрального доплера
Пара приемников	
Фаза на одной частоте (L1 или L2)	Одинарные, двойные, тройные разности фаз
Фазы на двух частотах (L1 и L2)	Комбинация фазы, свободная от геометрии
Фаза и кодовая дальность на двух частотах	Разность широкополосной фазы и узкополосной псевдодальности

Выбор параметров наблюдений базируется на двойных разностях фазы несущей и псевдодальностей. Для частоты L1 двойные разности представляются как

$$\Phi_{AB,1}^{ij} = \lambda_1 \phi_{AB,1}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} - I_{AB}^{ij} + \lambda_1 N_{AB,1}^{ij} + dm_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij} \qquad (11.1)$$

и

$$P_{AB,1}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + I_{AB}^{ij} + dM_{AB}^{ij} + e_{AB}^{ij}, \qquad (11.2)$$

где Φ_1 и P_1 – измеренная фаза и псевдодальность (в единицах расстояния); λ_1 – длина волны несущей; ϕ_1 – измеренная фаза несущей (в циклах); ρ – геометрическая дальность от приемника до спутника; N_1 – число циклов, на которое не определены начальные фазы; T и I – тропосферная и ионосферная задержки; dm_1 и dM_1 – влияние многопутности на фазы и на псевдодальности; ε_1 и e_1 – влияние шума приемника на фазы несущей и на псевдодальности. Мы проигнорировали задержки в цепях спутника и приемника и другие малые эффекты, поскольку они практически не влияют на предобработку данных. Подобное выражение можно записать для частоты L2.

Рассмотрим особенности использования двух параметров: комбинации фазы, свободной от геометрии, и разностной комбинации широкополосной фазы и узкополосной псведодальности.

Использование фазы, свободной от геометрии. Уравнение линейной комбинации двойных разностей фаз, свободной от геометрии, имеет вид:

$$\lambda_1 \phi_{AB,1}^{ij} - \lambda_2 \phi_{AB,2}^{ij} = (I_{AB,2}^{ij} - I_{AB,1}^{ij}) + (\lambda_1 N_{AB,1}^{ij} - \lambda_2 N_{AB,2}^{ij}) +$$
$$+ (dm_{AB,1}^{ij} - dm_{AB,2}^{ij}) + (e_{AB,1}^{ij} - e_{AB,2}^{ij}). \qquad (11.3)$$

Эта комбинация состоит из двойной разности ионосферной задержки для двух частот, двойной разности целых неоднозначностей на L1 и L2

и двойной разности шумов фазы приемника также для двух частот. Потеря циклов на следующую эпоху (постпотеря) у этой комбинации привела бы к члену с неоднозначностями в уравнении (11.3), замененному на

$$\lambda_1(N^{ij}_{AB,1}+n^{ij}_{AB,1})-\lambda_2(N^{ij}_{AB,2}+n^{ij}_{AB,2}), \qquad (11.4)$$

где $n^{ij}_{AB,1}$ и $n^{ij}_{AB,2}$ – двойные разности целых потерь циклов (в циклах) на частотах L1 и L2.

Изменения происходят преимущественно из-за ионосферного члена в уравнении (11.3), в то время как члены шумов и многопутности фазы имеют намного более высокую частоту и более низкую амплитуду.

Разность широкополосной фазы и узкополосной псевдодальности. Другим наблюдаемым параметром является разность широкополосной фазы и узкополосной псевдодальности:

$$\lambda_4(\phi^{ij}_{AB,1}-\phi^{ij}_{AB,2})-\lambda_5\left(\frac{P^{ij}_{AB,1}}{\lambda_1}+\frac{P^{ij}_{AB,2}}{\lambda_2}\right)=\lambda_4(N^{ij}_{AB,1}-N^{ij}_{AB,2})+$$
$$+\lambda_4\left(\frac{dm^{ij}_{AB,1}}{\lambda_1}-\frac{dm^{ij}_{AB,2}}{\lambda_2}\right)-\lambda_5\left(\frac{dM^{ij}_{AB,1}}{\lambda_1}-\frac{dM^{ij}_{AB,2}}{\lambda_2}\right)+$$
$$+\lambda_4\left(\frac{d\varepsilon^{ij}_{AB,1}}{\lambda_1}-\frac{d\varepsilon^{ij}_{AB,2}}{\lambda_2}\right)+\lambda_4\left(\frac{de^{ij}_{AB,1}}{\lambda_1}-\frac{de^{ij}_{AB,2}}{\lambda_2}\right), \qquad (11.5)$$

где

$$\lambda_4=(\lambda_1^{-1}-\lambda_2^{-1})^{-1}=86.2 \text{ см} \qquad (11.6)$$

является длиной волны широкополосной (разностной) комбинации, а

$$\lambda_5=(\lambda_1^{-1}+\lambda_2^{-1})^{-1}=10.7 \text{ см} \qquad (11.7)$$

– длиной волны узкополосной (суммарной) комбинации.

Эта комбинация состоит из неоднозначности широкой полосы, члена остаточной многопутности и члена остаточного шума приемника, ионосферные члены исключены (до первого порядка).

Поскольку члены многопутности и шумов измерений псевдодальности намного больше, чем для фазовых измерений, флуктуации в этой комбинации происходят главным образом из-за многопутности в псевдодальности и шума измерений псевдодальности. Первый из этих членов ошибок может вызывать квазисинусоидальные изменения в несколько метров. Потеря циклов на следующую (после потери) эпоху из этой комбинации могла бы дать в результате член с неоднозначностями, которые можно заменить в соответствии с равенством

$$\lambda_4[(N^{ij}_{AB,1}+n^{ij}_{AB,1})-(N^{ij}_{AB,2}+n^{ij}_{AB,2})]. \qquad (11.8)$$

Шум этого наблюдения дает очень высокое разрешение при выявлении потерь циклов [Bisnath et al., 2001; Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Rizos, 1999; Генике, Побединский, 1999].

Как правило, *выявление* потерь счета циклов производится легче, чем *исправление*, сложность зависит от режима позиционирования, длины базовой

линии, типа имеющихся данных, динамики антенны и т. д. В отношении эффективности выявления или исправления данных можно сделать следующие замечания:

– чем выше темп сбора данных (короче интервал между наблюдениями), тем легче предсказать изменение расстояния или фазы между эпохами;

– с двухчастотными данными процесс выполняется легче, чем с одночастотными данными;

– работа с разностными данными производится легче, чем с неразностными данными из-за исключения в них ошибок часов, ошибок моделирования тропосферной и ионосферной рефракции;

– потери счета циклов в статических данных находятся легче, чем в случае кинематических данных («скачки» фазы между эпохами могут происходить из-за движения приемника, а не из-за потери захвата сигнала);

– на коротких базовых линиях (< 30 км) поиск и исправление скачков фазы выполняется легче, чем с данными длинных базовых линий, на которых они маскируются остаточными невязками из-за ослабления корреляции смещений от атмосферы и ошибок орбиты;

– счет циклов в пост-обработке восстанавливается легче, чем при обработке в реальном времени;

– на легкость, с которой можно предсказать скорость изменения фазы, влияет точность координат станции: для обеспечения того, что бы потери в циклах не маскировались ошибками базовой линии, координаты должны быть известны с точностью до нескольких дециметров [Rizos, 1999].

11.3. Решение базовых линий

11.3.1. Одночастотные решения базовых линий

Высокая точность относительного позиционирования основана на очень точных измерениях фазы несущей сигналов спутников СРНС. Предпосылкой для достижения высокой точности является то, что в двойных разностях неоднозначности фаз можно достаточно уверенно отделять от координат базовых линий. Как только целые неоднозначности успешно определены, измерения фазы несущей начинают действовать как высокоточные измерения псевдодальностей, что позволяет вычислять вектор базовой линии с очень высокой точностью. Проблема определения неоднозначностей состоит из двух разных частей:

1) *оценки* неоднозначностей;
2) *проверки* неоднозначностей.

Большинство коммерческих программ обработки воспринимает фазовые данные, собранные только двумя приемниками. Это происходит потому, что моделирование, необходимое для обработки фазовых данных, включает только две станции, определяющие базовую линию. Это очевидно для моделей двойных и тройных разностей, но, возможно, менее очевидно для модели фазы, не включенной в процесс образования разностей. Эти данные называют либо «не разностными» фазами, либо нулевыми разностями. Однако для оценивания

параметров часов, появляющихся в явном виде в не разностной модели типа (8.35), должны собираться и обрабатываться совместно данные измерений фазы с нескольких пунктов на несколько спутников. Обработка не разностных фазовых данных и обработка по двойным разностям фаз являются эквивалентными [Teunissen et al., 1998].

Нелинейная функциональная модель для двойной разности фаз, полученной по одновременным измерениям приемниками A и B сигналов, переданных спутниками i и j, записывается в виде уравнения (11.1) (здесь дается без указания диапазона частот):

$$\Phi_{AB}^{ij} = \lambda_1 \phi_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} - I_{AB}^{ij} + \lambda \cdot N_{AB}^{ij} + dm_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}. \qquad (11.9)$$

Особенность данного уравнения наблюдений состоит в том, что не все параметры являются вещественными числами. Известно, что двойные разности фазовых неоднозначностей N_{AB}^{ij} могут быть только *целыми* величинами. В контексте классической теории уравнивания по МНК это является скорее необычной ситуацией. Классическая теория уравнивания была разработана на основе предпосылок о том, что все параметры являются вещественными числами. Это предполагает, что хорошо известные методы классической теории уравнивания здесь реально не применимы. Конечно, можно попытаться применить классическую теорию уравнивания, поскольку область существования целых чисел является частью области вещественных чисел. Следовательно, можно не обращать внимания на целочисленную природу неоднозначностей двойных разностей и находить их как вещественные числа. Следствием такого подхода, однако, является то, что не вся информация при этом учитывается, но эта информация, в принципе, может оказывать очень полезное влияние на оценивание неизвестных параметров. Поэтому полученное решение не будет максимально точным, и ставится цель найти по вещественным неоднозначностям их соответствующие целые значения, и уже с ними определить компоненты вектора базовой линии. Многие авторы доказывают, что полученное таким образом решение обладает максимальной точностью (см., например, [Teunissen et al., 1998]).

Будем предполагать, что данные не содержат потерь счета циклов. Следующим шагом будет обработка в режиме отдельной базовой линии. Главными шагами при обработке отдельной базовой линии по фазовым данным являются:

– решение по тройным разностям;

– решение по двойным разностям фаз с вещественными (плавающими) неоднозначностями;

– поиск целых неоднозначностей;

– решение по двойным разностям с фиксированными целыми неоднозначностями.

Решение по тройным разностям фаз. Функциональная модель для решения содержит только параметры координат (неоднозначности и ошибки часов были исключены на стадии образования разностей):

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1,t_2) = \rho_{AB}^{ij}(t_1,t_2) - I_{AB}^{ij}(t_1,t_2) + T_{AB}^{ij}(t_1,t_2) + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1,t_2), \quad (11.10)$$

а уравнение поправок имеет вид

$$-d\mathbf{R}_B\left(\mathbf{a}_B^{ij}(t_1,t_2)\right)+l_{AB}^{ij}(t_1,t_2)=v_{AB}^{ij}(t_1,t_2), \qquad (11.11)$$

где

$$\mathbf{a}_B^{ij}(t_1,t_2)=\left(\mathbf{u}_B^{i}(t_2)-\mathbf{u}_B^{j}(t_2)\right)-\left(\mathbf{u}_B^{i}(t_1)-\mathbf{u}_B^{j}(t_1)\right); \qquad (11.12)$$

$$l_{AB}^{ik}(t_1,t_2)=(\rho_{AB}^{ik}(t_2))^0-(\rho_{AB}^{ik}(t_1))^0-I_{AB}^{ij}(t_2)+I_{AB}^{ij}(t_1)+$$

$$+T_{AB}^{ij}(t_2)-T_{AB}^{ij}(t_1)-\Phi_{AB}^{ij}(t_1,t_2). \qquad (11.13)$$

Решения по тройным разностям являются надежными, поскольку не чувствительны к потерям счета циклов фазы несущей, которые имеют характеристики «выбросов» в данных. Низкая чувствительность к данным, которые не свободны от потерь счета циклов, происходит из-за того, что не учитываются корреляции в разностных данных (предполагают, что весовая матрица **P** диагональная). Алгоритм, используемый для образования тройных разностей, идеально подходит для выявления и восстановления потерь счета циклов в данных двойных разностей. Поэтому такие решения обычно выполняются как часть общего процесса выявления потерь счета циклов. Автоматизированная процедура должна была бы базироваться на просмотре невязок в решения по тройным разностям для тех из них, которые близки к единице или нескольким единицам циклов.

Решение по тройным разностям обеспечивает хорошие априорные величины для компонент базовой линии. В чрезвычайных обстоятельствах решение по тройным разностям может быть единственным достаточно надежным.

Порядок решения по тройным разностям:

– вычислить координаты спутников на моменты выхода сигналов, координаты исправить за эффект вращения Земли;

– вычислить направляющие косинусы направлений на спутники с каждой станции и априорные геометрические дальности;

– вычесть в каждую эпоху фазы между спутниками, образовать двойные разности;

– вычесть двойные разности между эпохами с некоторой дискретностью (например, каждую 5-ю эпоху наблюдений), образовать тройные разности;

– считая все тройные разности независимыми, образовать весовую матрицу P;

– образовать уравнения наблюдений, создать матрицу плана A;

– образовать систему нормальных уравнений – матрицу коэффициентов ATPA и столбец свободных членов ATPl;

– обратить нормальную матрицу и получить решение для геодезических параметров $\mathbf{dR_B = (A^TPA)^{-1} \cdot A^TPl}$.

После первого решения могут понадобиться последующие решения, поскольку априорное положение пункта *B* могло оказаться недостаточно точным, что сказалось на коэффициентах и свободных членах системы уравнений тройных разностей. Поэтому производится обновление параметров, и

цикл решения повторяется. Опционально можно просканировать невязки тройных разностей на наличие потерь счета циклов в двойных разностях.

Решение по двойным разностям фаз с вещественными неоднозначностями. Функциональная модель для решения содержит и координаты, и неоднозначности (точная форма зависит от используемой модели неоднозначностей):

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + \lambda \cdot dN_{AB}^{ij} + l_{AB}^{ij} = v_{AB}^{ij}. \qquad (11.14)$$

Решения по двойным разностям чувствительны к потерям счета циклов, но могут оказаться чувствительными к ряду внутренних факторов программы, таким, как порядок образования двойных разностей между спутниками, критерии отбраковки данных, учет корреляций при образовании разностей. Решение также чувствительно к внешним факторам, таким как длина базовой линии и продолжительность наблюдательной сессии, геометрия «спутник – приемник» (включая количество наблюдавшихся спутников), остаточные смещения в данных двойных разностей из-за атмосферных неоднородностей, многопутность и т. д. В каждую эпоху образуются только независимые двойные разности, число которых равно s - 1, где s – число наблюдаемых спутников. Используемый алгоритм для образования двойных разностей должен учитывать такие ситуации, как восход и заход спутников во время сеанса наблюдений (и соответствующее этому случаю определение параметров неоднозначности).

Последовательность решения по двойным разностям повторяет алгоритм решения по тройным разностям:

– образовать двойные разности фаз в каждую эпоху;

– ввести поправки в данные, такие, как за тропосферную и ионосферную модель;

– образовать априорные ковариационные матрицы (в зависимости от того, учитываются корреляции или нет), определить весовую матрицу **P**;

– образовать уравнения наблюдений, получить матрицу плана **A** и вектор свободных членов l (см. формулы (9.105));

– накопить матрицу нормальных уравнений N = **A**T**PA** с учетом весов двойных измерений;

– обратить нормальную матрицу и получить вектор неизвестных, состоящий из геодезических параметров dR и вещественных неоднозначностей двойных разностей, X = (ATPA)-1ATPl.

После вычисления производится обновление параметров и принимается решение: продолжать делать итерации или делать итерации только после попытки разрешения неоднозначностей.

Решение по двойным разностям с фиксированием целых неоднозначностей фаз. Функциональная модель для решения представляется уравнением, в котором вектор неизвестных содержит только поправки в координаты конечного пункта базовой линии, а найденные целые неоднозначности вошли в свободный член уравнения поправок:

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + (l_{AB}^{ij} + \lambda \cdot dN_{AB}^{ij}) = v_{AB}^{ij}. \qquad (11.15)$$

Следует заметить, что в уравнение могут входить также некоторые неразрешенные параметры неоднозначностей. Как только неоднозначности разрешены до целых значений, они становятся частью априорно известной информации, и это сказывается на превращении *неоднозначных* наблюдений фазы в *однозначные* наблюдения расстояний.

Такое решение по двойным разностям является сравнительно сильным (здесь меньше параметров для оценивания!), но оно оказывается надежным только в том случае, если найдены правильные целые значения неоднозначностей.

Решение может быть довольно чувствительным к таким особенностям методики, как:

– разрешение всех неоднозначностей как *набора* или только как его части;

– критерий разрешения, используемый для принятия решения;

– способ поиска целых значений.

Процесс разрешения неоднозначностей также чувствителен к таким внешним факторам, как длина базовой линии и продолжительность наблюдательной сессии, геометрия «спутник – приемник», остаточные смещения в двойных разностях из-за атмосферных неоднородностей, многопутность, восход или заход спутников в течение сессии и т. п.

Порядок выполнения фиксированного решения аналогичен тому, что использовался при решении с определением вещественных неоднозначностей, отличие только в получении векторов свободных членов.

Этот процесс можно выполнять приближениями до тех пор, пока не будут разрешены все неоднозначности (и «зафиксированы» на целых значениях), или когда все возможности для надежного разрешения будут исчерпаны.

Как только неоднозначности разрешены, неоднозначные измерения фазы преобразуются в наблюдения точных расстояний. Поэтому в обычной навигации по спутникам GPS/ГЛОНАСС теперь возможно позиционирование по единственной эпохе, и, следовательно, наблюдения «расстояний по несущей» идеально подходят для применения в кинематическом позиционировании.

11.3.2. Решения по двухчастотным измерениям

Есть ряд методик для обработки двухчастотных данных. Наиболее часто используются для геодезических измерений:

1) обработка данных L1 и L2 раздельно;

2) обработка комбинации, свободной от влияния ионосферы;

3) обработка «широкополосной» комбинации, возможно, в итеративной процедуре с другими типами наблюдений;

4) использование комбинаций L3, L4, L5 и L6 в определенном сочетании, облегчающем разрешение неоднозначностей.

Здесь мы кратко остановимся на методиках обработки (1), (2) и (3), о методике (4) см. в [Rizos, 1999]. В этих методиках пытаются исключить член ионосферной задержки, или, по крайней мере, ее влияние на определенные двухчастотные комбинации фазы. Имеются альтернативные методы

двухчастотной обработки, в которых пытаются управлять ионосферными смещениями посредством их моделирования тем или иным способом (обычно с помощью комбинации L4) или путем оценивания ионосферной задержки как некоторой формы стохастического процесса в фильтре Калмана.

Использование наблюдений фазы на частотах L1 и L2. Это простейшая методика, требующая минимум усилий при разработке алгоритма. Образуются двойные (или тройные) разности, как это обсуждалось ранее, но для наблюдений на L1 независимо от наблюдений на L2. Разностные наблюдения затем обрабатываются раздельно. В результате получают либо единственное решение, в котором наблюдения на L2 являются просто дополнительными наблюдениями, усиливающими общее решение, либо два независимых решения: одно из них – решение только на L1, другое – только на L2; среднее из них можно рассматривать как оптимальное решение. Оба этих метода являются равноценными в предположении, что при вычитании между станциями исключаются ионосферные смещения.

В случае двойных разностей присутствуют два типа наблюдений:

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + \lambda_1 \cdot dN_{AB,L1}^{ij} + l_{AB,L1}^{ij} = v_{AB,L1}^{ij} \qquad (11.16)$$

и

$$-d\mathbf{R}_B(\mathbf{u}_B^j - \mathbf{u}_B^i) + \lambda_2 \cdot dN_{AB,L2}^{ij} + l_{AB,L2}^{ij} = v_{AB,L2}^{ij}. \qquad (11.17)$$

В них необходимо оценивать поправки в априорные значения неоднозначностей $dN_{AB,L1}^{ij}$, как и $dN_{AB,L2}^{ij}$. Предполагается, что ионосферные поправки в $l_{AB,L1}^{ij}$ и $l_{AB,L2}^{ij}$ пренебрежимо малы, и их не нужно больше рассматривать. Этот метод страдает от ряда проблем:

– величина I_{L2} больше, чем I_{L1}, поскольку частота L2 ниже, чем частота L1;

– наблюдения на L2 имеют тенденцию быть «более шумными», чем наблюдения на L1, особенно если приемники используют некоторый вид «бескодовой» методики (например, квадратирование);

– в условиях режима Anti-Spoofing длина волны для L2 может быть не c/f_2, а вдвое меньше, то есть ≈12 см;

– величина I_{AB}^{ij} обычно возрастает с увеличением длины базовой линии, поскольку ионосферные условия для двух антенн оказываются различными.

Первые три проблемы делают разрешение неоднозначностей более трудным в решениях только по двойным разностям L2. Последний пункт является очень важным. Из-за ионосферного влияния разрешение неоднозначности на расстояниях в 20 км или больше часто затруднительно или вообще невозможно, и для них есть другие, более подходящие методики.

Среди других возможностей для испытаний наблюдений на L1 и L2, как двух раздельных уравнений наблюдений, можно отметить введение общего ионосферного параметра, связывающего наблюдения на L1 и L2:

$$f_1^2 \cdot I_1 = f_2^2 \cdot I_2, \qquad (11.18)$$

оцениваемого как дополнительный параметр на эпоху [Rizos, 1999].

Использование комбинации, свободной от ионосферы. Обработка исправленных за ионосферу двойных или тройных разностей требует всего нескольких изменений в алгоритме, когда фазовые данные L1 и L2 линейно объединяются в «псевдоизмерение». После объединения обработка продолжается так же, как раньше, когда для случая плавающего решения использовались одночастотные данные. Однако результаты, полученные из комбинации L3, являются вещественными параметрами $N^{ij}_{AB,\,iono-free}$ (или N_3), представляющими комбинацию из $N^{ij}_{AB,1}$ и $N^{ij}_{AB,2}$ (см. формулы (8.105)).

Длина волны для комбинации, свободной от ионосферы, равна примерно 6 мм, следовательно, разрешение неоднозначностей становится более сложным, чем в раздельном решении по наблюдениям на L1 или L2. Имеется несколько комбинаций из целых неоднозначностей $N^{ij}_{AB,1}$ и $N^{ij}_{AB,2}$, которые дают почти одну и ту же неоднозначность, что и $N^{ij}_{AB,\,iono-free}$. Поэтому часто трудно надежно ослабить корреляцию между целыми неоднозначностями на L1 и L2, используя только наблюдение L3. Применение ионосферно свободной комбинации L3 обычно оправдано, поскольку обеспечивает лучшее качество плавающего решения, чем решение, которое было бы получено по одночастотным наблюдениям или из раздельной обработки данных L1 и L2. Коммерческие программы, способные производить обработку двухчастотных данных, обычно позволяют в дополнение к раздельным решениям по L1 и L2 использовать опцию L3 для средних и длинных базовых линий (> 20 – 30 км).

Использование широкополосного наблюдения L5 (разностной комбинации). Метод с использованием наблюдения L5 подходит только для двойных разностей. Вначале получают решение по L5 с вещественными неоднозначностями. Поскольку разностная комбинация фазы имеет сравнительно большую длину волны – 86 см, то неоднозначности на L5 можно разрешать легче, чем неоднозначности L1 или L2 для коротких или средних базовых линий, даже при наличии смещений от ионосферы (они не исключаются в L5). Затем получают решение с фиксированными неоднозначностями, что было бы невозможно, если бы обрабатывались только одночастотные данные.

Насколько хорошо решение по L5? Решение с вещественными неоднозначностями более грубое, чем такие же решения на L1 или L2. Фиксированное решение на L5 более точное, чем плавающие решения на L1 или L2. Разностную комбинацию L5 используют многие коммерческие программы. Однако существуют более совершенные методики с разрешением неоднозначностей, разработанные для высокоточных применений на базовых линиях длиной свыше 100 км. Существуют также программы, в которых комбинация L5 используется для разрешения неоднозначностей при очень коротких наблюдательных сессиях в «быстрой статике» или кинематике с разрешением в движении «on-the-fly», а также при выявлении и восстановлении потерь счета циклов.

11.4. Методы разрешения неоднозначностей фазы

Под разрешением неоднозначностей будем понимать процесс преобразования вещественных параметров неоднозначностей в наиболее вероятные целые значения. Эта проблема является ключевой при обеспечении высокой точности спутниковых измерений, поскольку разрешение неоднозначностей – это математический процесс превращения неоднозначных расстояний (накопленной фазы несущей) в однозначные расстояния миллиметровой точности.

Насколько существенно улучшение, которое можно получить, используя целочисленную природу неоднозначностей? На рис. 11.2 показаны погрешности положений, полученные в эксперименте с 1 200 измерениями в отдельные эпохи с интервалом 3 секунды. На графике слева разброс положений из плавающих решений представлен на метровой шкале. Каждая точка представляет вычисленное положение по наблюдениям в одну эпоху. Для этого графика неоднозначности оценены как вещественные случайные переменные. График справа показывает «фиксированное решение» на сантиметровой шкале, основанное по тем же самым измерениям, но с использованием целочисленной природы неоднозначности. Сравнения двух графиков показывают, что эта информация значительно усиливает модель обработки данных и дает намного более точное решение [Joosten, Tiberius, 2000]. При увеличении продолжительности наблюдений (скажем, до часа и более) плавающее решение будет постепенно приближаться к фиксированному решению.

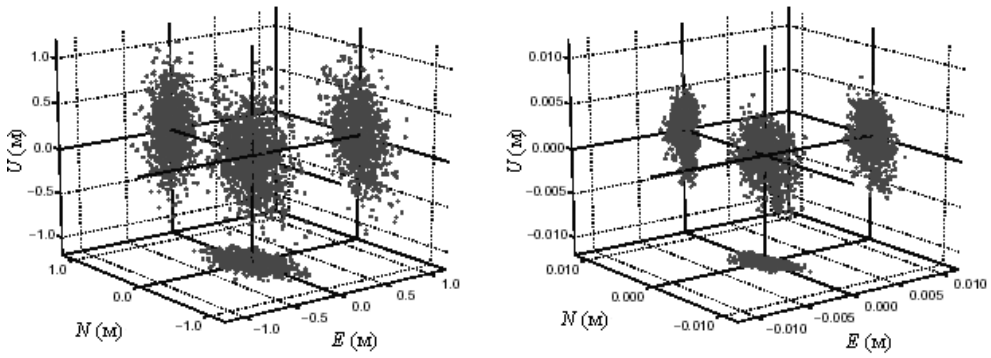


Рис. 11.2. Результаты обработки короткой базовой линии, представленные в системе координат E, N, U. Показано 1 200 одиночных решений для случая плавающих неоднозначностей (слева) и правильно разрешенных фиксированных неоднозначностей (справа). В плавающих решениях положение может иметь смещение на дециметр и более. При успешном разрешении неоднозначностей координаты имеют сантиметровый уровень точности [Joosten, Tiberius, 2000]

Поиск наилучшего решения в основном состоит из следующих шагов: определение объема (или пространства) поиска, установление внутри объема сетки с некоторым шагом, определение квадратичной формы и ее оценка в каждой точке сетки. Искомое решение соответствует точке сетки с самой низкой величиной суммы остаточных невязок.

Разработано несколько процедур поиска целых неоднозначностей, каждая со своими геометрическими условиями, в которых исследуются либо неоднозначности, либо наиболее подходящие координаты, либо измерения.

Поиск в «пространстве неоднозначностей» используется в классическом методе с применением МНК, в методе быстрого разрешения неоднозначностей (Fast Ambiguity Resolution Approach, FARA [Frei, Schubernigg, 1992]), примененном в программе SKITM. Объем имеет вид гиперэллипсоида в n-мерном пространстве (n = s - 1 – число неоднозначностей двойных разностей, на единицу меньше числа спутников s). Априорные неоднозначности и их погрешности (определенные из предварительного плавающего решения) определяют положение, форму и размер гиперэллипсоида.

Поиск в пространстве неоднозначностей производится также в методе с декомпозицией по Холецкому [Landau, Euler, 1992], методе спектральной декомпозиции [Abidin, 1993], методе с быстрым фильтром поиска неоднозначностей (Fast Ambiguity Search Filter, FASF) [Chen, 1993]. В последние годы большое распространение получил метод уравнивания неоднозначностей по МНК с понижением корреляций (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment, Lambda) [Teunissen et al., 1998].

Объем поиска в «трехмерном пространстве неоднозначностей», состоящем из эллипсоида или куба, внутри которого пересекаются различные наборы «линий неоднозначности», применен при использовании МНК с разбиением на первичные и вторичные спутники [Hatch, 1990].

Поиск по методу функций неоднозначности (МФН) производится в «пространстве координат», при этом решение находится в кубе, в котором ожидаются координаты мобильной станции (другой конец базовой линии является фиксированной или базовой станцией). Положение и размер куба определяются по априорной информации о базовой линии и ее погрешностях.

В математическом отношении МФН эквивалентен методам поиска по МНК, и, следовательно, обеспечивает не лучшее различие между «наилучшим» и «вторым наилучшим» набором кандидатов в неоднозначности (или координатам, соответствующим наибольшей и второй наибольшей величине функции неоднозначности), чем другие методы поиска. Одно важное различие между методом МФН и МНК состоит в том, что независимо от размера объема поиска и разрешения или типа сетки пробных координат, в методе МФН не учитываются геометрические условия, на которые влияет число и распределение пересечений линий равных неоднозначностей.

Определение наборов на кандидаты в неоднозначности непосредственно из наблюдений, использующих комбинации измерений фазы и псевдодальностей, производится в «пространстве измерений». В основе этого метода лежит комбинация двойных разностей фаз и псевдодальностей, как дается в примере уравнением:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) - P_{AB}^{ij}(t) = \lambda N_{AB}^{ij} + \textit{остаточные смещения} + \textit{ошибки}. \quad (11.19)$$

Это соотношение справедливо и для L1, и для L2, а также для линейных комбинаций двух частот. В отличие от предыдущих методов, где используется

взаимное расположение созвездия спутников и пункта (явным признаком этого является наличие матрицы коэффициентов), этот метод является «свободным от геометрии» или «свободным от орбиты», поскольку геометрическая дальность в уравнении (11.19) отсутствует. Недостатками этого метода являются:

использование наблюдений L1 или L2 в уравнении (11.19) проблематично, так как ионосферная задержка для фазы и псевдодальности имеет противоположные знаки и поэтому не исключается в разности (определенные двухчастотные комбинации могут преодолевать это);

псевдодальности обладают достаточно высоким шумом измерений, который может быть больше нескольких длин волн. Дополнительно может присутствовать большая ошибка из-за многопутности.

Несмотря на эти проблемы, негеометрические методы представляются наиболее простыми и самыми «прямыми» методами поиска неоднозначностей, особенно полезными либо сами по себе, либо в комбинации с другими методами поиска. Однако они могут использоваться только с приемниками высшего класса, способными делать все четыре измерения (Φ_1, Φ_2, P_1, P_2). На рис. 11.3 представлена схема классификации методов поиска целых неоднозначностей.

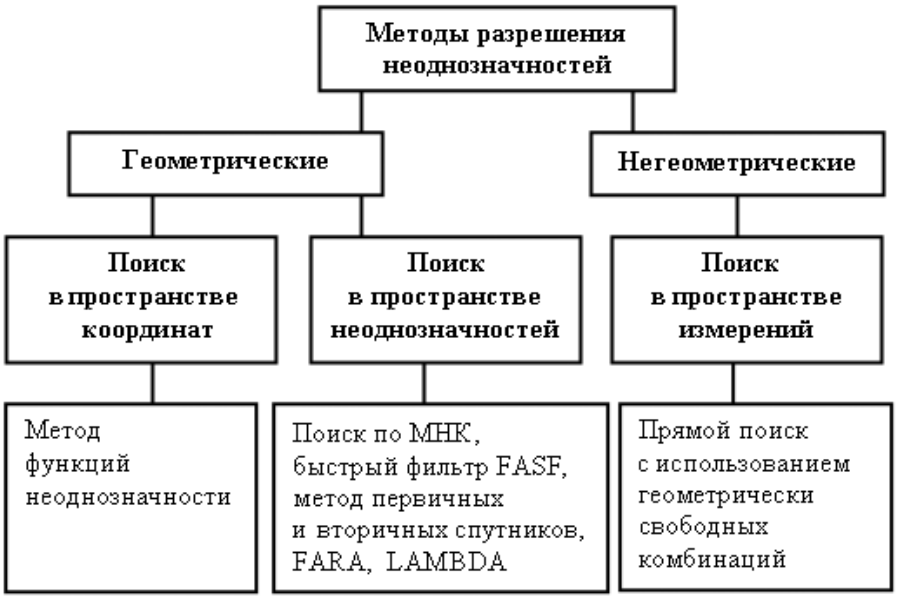


Рис. 11.3. Классификация методов поиска целых неоднозначностей

В процессе разрешения неоднозначностей можно выделить несколько шагов:

– определение начальных значений неоднозначностей и их ковариационных матриц;

– использование алгоритма поиска для идентификации наиболее вероятных целых значений;

– использование алгоритма принятия решения для выбора «наилучшего» набора целых величин.

Если поиск целых неоднозначностей завершен успешно, то выполняется фиксированное решение, в противном случае, в качестве окончательного результата принимается одно из плавающих решений.

Начальные значения неоднозначностей. Начальные (априорные) значения неоднозначностей обычно обеспечиваются в плавающем решении в виде *вещественных величин и информации ковариационной матрицы*. Поэтому вероятнейшими значениями неоднозначностей являются ближайшие округленные целые значения. В некоторых случаях оценка может быть очень близка к целой величине (рис. 11.4), но в других случаях вещественная оценка не обязательно близка к целому значению. Надежность этих оценок зависит от длины базовой линии, геометрии «спутник – приемник», продолжительности сеанса наблюдений, влияния многопутности, остаточных смещений и потерь счета циклов.

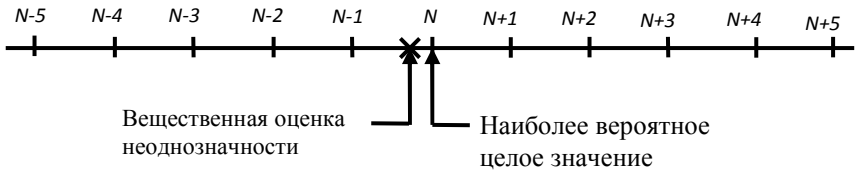


Рис. 11.4. Оценка вещественной неоднозначности и тестируемые кандидаты на целые значения

Представим, что неоднозначность двойной разности находится по измеренным псевдодальностям с использованием соотношения

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) - P_{AB}^{ij}(t) = \lambda \cdot N_{AB}^{ij}. \qquad (11.20)$$

Если случайная ошибка (шум) каждой псевдодальности имеет уровень около 0.5 м, то ошибка двойной разности псевдодальностей, включающей четыре пседодальности, будет в два раза больше, то есть 1 м. При длине волны 0.2 м это приводит к ошибке в неоднозначности N_{AB}^{ij} в 5 циклов. В случае, например, пяти наблюдавшихся спутников имеются четыре комбинации неоднозначностей, подлежащих определению. Если окно поиска имеет ширину в десять циклов (по пять циклов в каждую сторону от округленной величины), то необходимо тестировать набор из 10^4 неоднозначностей. Такие методы тестирования называются *переборными*. Все методы полагаются на некоторую методику поиска, которая тестирует вокруг значения начальной неоднозначности диапазон соседних значений. Отсюда видно, насколько важно иметь начальные значения неоднозначностей и положение определяемой станции с наименьшими погрешностями.

Поиск неоднозначностей с использованием обычного МНК. На первом этапе поиска образуются возможные комбинации целых неоднозначностей, которые необходимо рассматривать алгоритму. Комбинации образуются из целых неоднозначностей для каждой пары спутников в двойных разностях. Чтобы определить эти комбинации, необходимо образовать *пространство поиска*. Пространство поиска – это объем неопределенности, который окружает приближенные координаты положения неизвестной антенны. Поскольку

пространство поиска диктует, какие целые неоднозначности будут рассматриваться, его нужно выбирать с осторожностью, так как оно должно содержать истинное положение антенны. В случае статического позиционирования это пространство поиска может быть реализовано из плавающего решения, а при кинематическом позиционировании оно образуется из решения по кодовым дальностям. Важным аспектом при выполнении этого шага разрешения неоднозначностей является то, что размер пространства поиска будет влиять на эффективность процесса, то есть на скорость вычисления. Больший объем пространства дает большее количество для оценивания потенциальных комбинаций неоднозначностей, что, в свою очередь, увеличивает объем вычислений. Это особенно важно в кинематических применениях, где нужно добиваться усиления работы в реальном времени. Поэтому необходим баланс между объемом вычислений и умеренным размером пространства поиска.

Второй большой этап в процессе разрешения неоднозначностей – идентификация правильной комбинации целых неоднозначностей. Используемый во многих методах разрешения неоднозначностей критерий – это выбор такой комбинации, которая дает минимальную взвешенную сумму квадратов невязок $\Sigma = [\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}]$ (квадратичную форму) при уравнивании по методу наименьших квадратов. Обоснование этому происходит из предположения о том, что правильный результат дает комбинация, данные которой подходят наилучшим образом.

Третьим этапом в процессе разрешения неоднозначностей является их проверка. Оценке правильности полученных целых чисел должно уделяться большое внимание. Во многих случаях отыскивается наилучший набор неоднозначностей, который явно лучше, чем второй наилучший набор по некоторому критерию отбраковки (который может корректироваться). Во многих программах проверяется величина Ratio (отношение): отношение величины Σ, полученной с использованием второго наилучшего набора неоднозначностей, к Σ для первого наилучшего набора (или отношение соответствующих дисперсий):

$$Ratio = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}. \qquad (11.21)$$

Эта величина должна быть как можно больше. Разрешение неоднозначности наименее надежно, когда нет очевидного наилучшего набора неоднозначностей (то есть величина Ratio слишком мала, возможно, меньше 1.5 или 2).

Альтернативный подход заключается в разрешении только некоторых неоднозначностей. Здесь производится округление только тех неоднозначностей, которые близки к целым значениям, и которые имеют малые стандартные ошибки, поэтому считается, что их можно надежно разрешить. Другой метод представляет методику последовательного поиска разрешения неоднозначностей, который основан на минимизации суммы взвешенных квадратов невязок. Однако по этой методике наилучшая определенная неоднозначность (с наименьшей стандартной ошибкой) используется как

тестовая величина, около которой находится окно для поиска. Как только неоднозначность разрешена, выводятся новые значения неоднозначностей для остальных параметров оценивания, и поиск этих остальных неоднозначностей продолжается с использованием наилучших определенных неоднозначностей и т. д. Этот процесс более гибкий, и его можно остановить, когда уже никакие другие неоднозначности надежно определить невозможно.

Поиск по МНК. Поиск неоднозначностей по методу наименьших квадратов с использованием первичных и вторичных спутников. Описываемый здесь метод детально исследовался в работах Р. Хатча, например, [Hatch, 1990]. Метод требует предварительного определения положения (для линеаризации уравнений наблюдений), которое можно получить по кодовому решению. Область поиска можно установить, ограничив предварительное положение районом в 3σ. Один из основных принципов метода – разделение спутников на основную и вспомогательную группы. Основная группа состоит из четырех спутников. Основываясь на этих четырех спутниках, которые должны иметь хороший фактор PDOP, определяются наборы возможных неоднозначностей. Оставшиеся спутники вспомогательной группы используются для исключения дополнительных возможных наборов неоднозначностей.

Набор возможных решений можно найти следующим образом. Представим упрощенную модель двойных разностей:

$$\Phi_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + \lambda N_{AB}^{ij}. \qquad (11.22)$$

Если неоднозначности перенести в левую часть, как если бы они были известными, модель записывается как $\Phi_{AB}^{ij} - \lambda N_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij}$. Для четырех спутников i, j, k, l можно установить три уравнения такого типа. Три неизвестные координаты станции, содержащиеся в правой части уравнения, можно найти из решения посредством линеаризации ρ и обращения матрицы плана размера 3×3. Назначение и варьирование трех неоднозначностей в левой части дает новые решения для положения, в которых обратная матрица плана остается неизменной. В зависимости от изменений трех неоднозначностей получается набор потенциальных решений.

Из набора потенциальных решений удаляются неправильные решения посредством учета информации по вспомогательной группе спутников. Последующее уравнивание по МНК должно использоваться для этой задачи. Наконец, сумма квадратов остаточных невязок может использоваться как критерий для индикатора качества решения. В идеале, должен остаться только правильный набор неоднозначностей. Если это не случится, как описано ранее, необходимо выбирать решение с наименьшей суммой квадратов остаточных невязок (после сравнения ее со второй наименьшей суммой).

Функции неоднозначности. Во всех описанных выше методах получения вещественных неоднозначностей, основанных на применении МНК, необходимо вычислять частные производные, необходимые для решения по МНК и минимизации квадратичной формы $[\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}]$. Предполагаемые приближенные координаты станций входят в производные и невязки. Решение по МНК производится в итеративном режиме до тех пор, пока приближенные

координаты приемника не сойдутся на их истинном значении. В случае метода функций неоднозначности находится максимум косинусов остаточных невязок, преобразованных в циклы. Рассмотрим вновь уравнение двойных разностей:

$$v_{AB}^{ij}(t)=\left(\phi_{AB}^{ij}(t)\right)^{c}-\left(\phi_{AB}^{ij}(t)\right)^{o}=$$

$$=\frac{f}{c}\left(\rho_{AB}^{ij}(t)\right)^{c}+\left(N_{AB}^{ij}(1)\right)^{c}-\left(\varphi_{AB}^{ij}(t)\right)^{o}+\left[I_{AB,\phi}^{ij}(t)+T_{AB}^{ij}(t)+d_{AB}^{ij}(t)\right]. \quad (11.23)$$

Верхние индексы c и o обозначают, соответственно, уравненные (вычисленные) и наблюденные значения. Члены в квадратных скобках являются остаточными не моделируемыми ошибками. В радианной мере эти невязки равны

$$\psi_{AB}^{ij}(t)=2\pi v_{AB}^{ij}(t). \quad (11.24)$$

Основная идея метода функций неоднозначности состоит в том, что изменение в целом числе $N_{AB}^{ij}(1)$ изменяет функцию $\psi_{AB}^{ij}(t)$ на величину, кратную 2π. Косинус этой функции не подвержен такому изменению, потому что

$$\cos[\psi_{AB,q}^{ij}(t)]=\cos[2\pi v_{AB,q}^{ij}(t)]=\cos\{2\pi[v_{AB,q}^{ij}(t)+\Delta N_{AB,q}^{ij}(t)]\}, \quad (11.25)$$

где $\Delta N_{AB,q}^{ij}(t)$ – произвольное целое число. Индекс q, обозначающий частоту, добавлен с целью обобщения.

Для двухчастотных наблюдений на базовой линии AB в каждую эпоху имеем $2(s-1)$ двойных разностей, где s – число спутников. Предполагается, что наблюдения не являются коррелированными. Если далее предположить, что все наблюдения равноточные, то сумма квадратов невязок становится равной

$$\mathbf{v}^{T}\mathbf{P}\mathbf{v}(d\mathbf{X}_B, N_{AB,q}^{ij})=\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}(v_{AB,q}^{ij})^2=\frac{1}{4\pi^2}\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s=1}(\psi_{AB,q}^{ij})^2. \quad (11.26)$$

Переменными, которые минимизируют эту функцию, являются поправки в координаты станции B и неоднозначности двойных разностей фаз. Чтобы достигнуть геометрически строгого решения, координаты станции A удерживаются фиксированными. Функция неоднозначности $AF(d\mathbf{R}_B)$ определяется как

$$AF(d\mathbf{R}_B)\equiv\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}[\cos(\psi_{AB,q}^{ij})]=$$

$$=\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}\cos\left\{2\pi\left[\frac{f_q}{c}[\rho_{AB}^{ij}(t)]^{c}+[N_{AB,q}^{ij}(1)]^{c}-[\phi_{AB,q}^{ij}(t)]^{o}\right]\right\}=$$

$$=\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}\cos\left\{2\pi\left[\frac{f_q}{c}[\rho_{AB}^{ij}(t)]^{c}-[\phi_{AB,q}^{ij}(t)]^{o}\right]\right\}. \quad (11.27)$$

В этом уравнении явно не перечислены малые члены от двойных разностей ионосферных и тропосферных задержек и многопутности, хотя они в нем присутствуют, и будут влиять так же, как они влияют в других методах. Тем не менее, если мы предположим на момент, что эти члены пренебрежимо малы, и что положение приемника известно безошибочно, то уравнение (11.27) показывает, что максимальная величина функции неоднозначности равна $2(s-1)$, поскольку косинус каждого члена равен 1. Шум наблюдений будет заставлять

вызывать функцию неоднозначности действительно быть слегка ниже максимума. Поскольку функция неоднозначности не зависит от неоднозначностей, то она не зависит от потерь счета циклов в двойных разностях. Это инвариантное свойство является наиболее выдающейся особенностью функции неоднозначности и делает ее уникальной среди всех других методов решений.

Поскольку функция $\psi_{km,L}^{pq}$ мала, обычно несколько десятых долей цикла, то функция косинуса разлагается в ряд, в котором члены высоких порядков отбрасывают. Таким образом,

$$AF(d\mathbf{R}_B) \equiv \sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}[\cos(\psi_{AB,q}^{ij})] = \sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}\left[1-\frac{(\psi_{AB,q}^{ij})^2}{2!}+\mathrm{L}\right] =$$

$$= 2(s-1)-\frac{1}{2}\sum_{q=1}^{2}\sum_{j=1}^{s-1}(\psi_{AB,q}^{ij})^2 = 2(s-1)-2\pi^2\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}. \qquad (11.28)$$

Последняя часть этого уравнения следует из (11.24). Ясно, что функция неоднозначности и решение по МНК эквивалентны, в том смысле, что в точке сходимости функция имеет максимум, а квадратичная форма $\mathbf{v}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{v}$ имеет минимум.

Формулы (11.27), (11.28) легко обобщаются для случая одновременных наблюдений многими приемниками.

Есть несколько способов получить решение для функции неоднозначности. Наиболее простая методика – предположить объем поиска, например, куб или эллипсоид, размещенный в начальной оценке положения станции *B*. Эту оценку можно вывести из решения по псевдодальностям, по тройным разностям или любым другим методом. Физический объем поиска делится узкой сеткой точек с равными расстояниями. Каждая физическая точка является кандидатом на решение и используется для вычисления функции неоднозначности (11.27). Заметим, что величина двойной разности геометрических дальностей $[\rho_{AB}^{ij}(t)]^c$, которая требуется для (11.27), оценивается для исследуемой позиции. Поскольку функция неоднозначности вычисляется посредством сложения косинусов по одной двойной разности за раз, для ускорения решения можно использовать стратегию раннего выхода. Например, если исследуемая (опытная) позиция значительно отличается от истинного положения, то невязка, вероятно, будет намного больше, чем можно ожидать на основе шума измерений и не моделируемых влияний от ионосферы, тропосферы, многопутности. Тогда можно бросить исследуемое положение, то есть остановить накопление соответствующих косинусов, и начинать исследовать следующее опытное положение. Это должно продолжаться до тех пор, пока один член становится ниже некоторого допустимого значения, например,

$$\cos\left\{2\pi\left([\varphi_{AB}^{ij}(t)]^c-[\varphi_{AB,q}^{ij}(t)]^o\right)\right\}_i < \varepsilon. \qquad (11.29)$$

Величина критерия отсечки ε является очень важной не только для ускорения решений, но также для уверенности, что правильное решение не является ошибочным. Стратегия раннего выхода не срабатывает, когда отвергается

правильная опытная позиция. В этом случае просмотр оставшихся опытных позиций не дает правильное решение. Соответствующий выбор величины ε является результатом экспериментов, как и в стратегиях раннего выхода для других методов. Это объясняется уверенностью в том, что опытные положения достаточно близки к истинному положению, и его решение не будет пропущено. Очень частая сетка опытных положений увеличивает вычислительную нагрузку, несмотря на методику раннего выхода. Оптимальная сетка обычно связана с длиной волны, хотя соотношение не определяется точно, и от числа спутников. Очевидно, чем меньше исходный объем поиска, тем быстрее получается решение.

Метод функций неоднозначности можно модифицировать несколькими путями, чтобы увеличить его скорость. Метод можно применять к двойным разностям наблюдений широкой полосы. В этом случае опытная позиция может быть изначально широко размещенной, чтобы отражать широкополосную длину волны в 86 см. Такое решение потенциально служит для идентификации меньшего физического пространства поиска, которое затем можно просканировать, используя более близко размещенные опытные позиции. Конечно, можно применять метод функций неоднозначности к широкополосному и узкополосному наблюдениям одновременно или использовать его с любыми другими функциями наблюдений, которые сохраняют целочисленную природу неоднозначностей.

Вместо сканирования равно отстоящих опытных положений в большом физическом объеме поиска можно вначале определить пробные (опытные) наборы неоднозначностей и использовать их для идентификации малого числа опытных положений.

Метод функций неоднозначности из-за его природы не является статистическим. Он не предлагает никакой возможности вводить корреляцию между двойными разностями наблюдений или корреляции с другими функциями двойных разностей. Здесь нет прямой меры точности для окончательного положения, которое дает максимум функции неоднозначности, такой, как стандартная ошибка координат. Качество решения связано с расстоянием между пробными положениями. Если между ними шаг равен 1 см, а максимум функции неоднозначности определен уникально (однозначно), то можно сказать, что точка определена с сантиметровой точностью [Leick, 1995].

Метод LAMBDA. Задача оценивания 3-мерного вещественного вектора $d\mathbf{R}$ поправок в координаты определяемого пункта и вектора целых чисел $\mathbf{N}$, имеющего размерность s - 1 (s – количество наблюдавшихся спутников), можно сформулировать в виде решения уравнения

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot d\mathbf{R} + \mathbf{B}\mathbf{N} + \boldsymbol{\varepsilon}, \qquad (11.30)$$

в котором ковариационная матрица для $\boldsymbol{\varepsilon}$ равна $\mathbf{K}_{DD}$ в соответствии с (8.74). Иными словами, необходимо найти $d\mathbf{R}$ и $\mathbf{N}$, которые дают минимум квадратичной формы

$$C_{\mathbf{P}}(d\mathbf{R},\ \mathbf{N}) = \left\|\mathbf{y} - \mathbf{A} \cdot d\mathbf{R} - \mathbf{B}\mathbf{N}\right\|^2_{\mathbf{P}} =$$

$$= (\mathbf{y} - \mathbf{A}d\mathbf{R} - \mathbf{B}\mathbf{N})^T\ \mathbf{P}(\mathbf{y} - \mathbf{A}d\mathbf{R} - \mathbf{B}\mathbf{N}). \qquad (11.31)$$

Для придания невязкам соответствующих весов используется обратная ковариационная матрица шума $\mathbf{P} = \mathbf{K}_{DD}^{-1}$. Алгоритм решения состоит из трех шагов.

Шаг 1. Получение решений для $d\mathbf{R}$ и $\mathbf{N}$, которые дают минимум квадратичной формы (11.31), без учета ограничений на неоднозначности. Ранее мы обсуждали вещественное (плавающее) решение. Ранее мы обсуждали вещественное (плавающее) решение. Единственное различие состоит в том, что здесь для учета корреляций между двойными разностями используется критерий взвешенного МНК. Более важное различие заключается в том, что в прежней дискуссии целые неоднозначности были получены посредством округления вещественных решений до ближайших целых чисел. В методе LAMBDA это только первый шаг, которым заканчивается вещественное решение для положения, а неоднозначности и их ковариационная матрица записываются в блочной форме ниже:

$$\textit{Плавающее} \quad \textit{решение} = \begin{bmatrix} \widehat{d\mathbf{R}} \\ \widehat{\mathbf{N}} \end{bmatrix},$$
$$\mathrm{Cov}\begin{bmatrix} \widehat{d\mathbf{R}} \\ \widehat{\mathbf{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\widehat{d\mathbf{R}}} & \mathbf{K}_{\widehat{d\mathbf{R}},\widehat{\mathbf{N}}} \\ \mathbf{K}_{\widehat{d\mathbf{R}},\widehat{\mathbf{N}}} & \mathbf{K}_{\widehat{\mathbf{N}}} \end{bmatrix}. \qquad (11.32)$$

Здесь $\widehat{d\mathbf{R}}$ и $\widehat{\mathbf{N}}$ – вещественные решения, $\mathbf{K}_{\widehat{d\mathbf{R}}}$ и $\mathbf{K}_{\widehat{\mathbf{N}}}$ – соответствующие ковариационные матрицы, а матрица $\mathbf{K}_{\widehat{d\mathbf{R}},\widehat{\mathbf{N}}}$ представляет кросс-корреляцию между ними.

Шаг 2. Находится вектор целых неоднозначностей, который дает минимум квадратичной формы

$$c(\mathbf{N}) = (\mathbf{N} - \widehat{\mathbf{N}})^T \mathbf{P}_{\mathbf{N}} (\mathbf{N} - \widehat{\mathbf{N}}), \qquad (11.33)$$

в которой $\widehat{\mathbf{N}}$ – плавающее решение из шага 1, а $\mathbf{P}_{\mathbf{N}}$ – весовая матрица, обратная ковариационной матрице: $\mathbf{P}_{\mathbf{N}} = \mathbf{K}_{\widehat{\mathbf{N}}}^{-1}$.

Шаг 2 является основой метода LAMBDA. Мера расстояния (или «близость») вектора целых к вещественному вектору $\widehat{\mathbf{N}}$ дается формулой (11.33). Контур точек с постоянной величиной квадратичной формы является эллипсом в двух измерениях и эллипсоидом более высоких измерений, центром которого является $\widehat{\mathbf{N}}$. Пространство (или объем) поиска ограничено выбором размера эллипсоида, предназначенного для исследования через величину параметра $c > 0$. Неравенство

$$(\mathbf{N} - \widehat{\mathbf{N}})^T \mathbf{P}_{\mathbf{N}} (\mathbf{N} - \widehat{\mathbf{N}}) \le c \qquad (11.34)$$

определяет вектор целых значений $\mathbf{N}$, который состоит из кандидатов на решение. Пространство поиска состоит из точек сетки внутри эллипсоида. Ясно, что это пространство поиска должно быть достаточно большим, чтобы в нем содержался правильный ответ, и достаточно малым, чтобы поиск завершался быстро. (В более ранних обсуждениях пространство поиска было сеткой внутри прямоугольного объема или куба.)

На практике, эллипсоиды с постоянной величиной c будут очень вытянутыми, в одном направлении длиннее, чем в другом направлении, на несколько порядков величин. Это особенно характерно, когда измерения ограничены одной эпохой или всего несколькими эпохами. В результате, точки,

которые оказываются намного дальше от $\hat{\mathbf{N}}$, могут иметь меньшие значения величины *c*, чем те, которые оказываются близко. Тогда обычный поиск оказывается неэффективным. Необходимо изменить переменную, которая должна повернуть вытянутый эллипсоид, превратив его в сферу таким образом, чтобы поиск можно было бы ограничить соседними с $\hat{\mathbf{N}}$ значениями.

Если бы весовая матрица в (11.34) была диагональной, то минимизация квадратичной формы была бы тривиальной. Наилучшая оценка целой неоднозначности была бы соответствующей плавающей оценкой, округленной до ближайшего целого значения. Диагональная матрица $\mathbf{P_N}$ должна означать, что оценки целых неоднозначностей в плавающем решении некоррелированные. В общем случае, матрица $\mathbf{P_N}$ получается недиагональной, и цель шага 2 – произвести изменения переменных таким образом, чтобы полученная корреляционная матрица оказалась диагональной.

Матрица $\mathbf{P_N}$ является положительной полуопределенной матрицей, и ее приведение к диагональному виду (диагонализация) не должно быть проблемой. Для трансформирования переменных можно использовать матрицу из ее собственных векторов. В действительности этот метод здесь не будет работать, потому что преобразование не сохранит целочисленную природу неоднозначностей. И мы вынуждены ограничить трансформирование до такого, при котором целые числа преобразуются в целые. Кроме того, обратное трансформирование должно делать то же самое, чтобы можно было найти решение исходной задачи. Требуемая матрица трансформирования $\mathbf{Z}$ должна удовлетворять следующим условиям:

- иметь целые элементы;
- должна быть обратимой;
- обратная матрица $\mathbf{Z}^{-1}$ должна иметь целые элементы.

Эти условия гарантируют, что будет соотношение один к одному между целыми в исходном и трансформированном пространствах. Из указанных выше условий следует, что $\mathbf{Z}$ и $\mathbf{Z}^{-1}$ представляют преобразование, сохраняющее объем, то есть $|\det(\mathbf{Z})| = 1.$

Рассмотрим гипотетическое преобразование $\mathbf{Z}$ в этом ограниченном классе преобразований, которое приводит матрицу $\mathbf{P_N}$ к диагональному виду. Пусть

$\mathbf{M} = \mathbf{ZN}$ и $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{N}}$.

Квадратичная форма в преобразованном пространстве есть

$$(\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}})^T (\mathbf{Z}^{-T}\mathbf{P_N}\mathbf{Z}^{-1})(\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}). \qquad (11.35)$$

Поскольку матрица $\mathbf{Z}^{-T}\mathbf{P_N}\mathbf{Z}^{-1}$ является диагональной, найдем решение для $\mathbf{M}$ путем округления каждого элемента $\hat{\mathbf{M}}$. Теперь выполним обратное трансформирование и найдем $\mathbf{N}$ из

$$\mathbf{N} = \mathbf{Z}^{-1}\mathbf{M}. \qquad (11.36)$$

Метод LAMBDA был бы простым алгоритмом, если бы матрицу $\mathbf{P_N}$ можно было бы привести к диагональному виду, используя указанный класс трансформаций. К сожалению, это почти невозможный случай, и у целых неоднозначностей корреляции полностью не исчезают. Метод LAMBDA включает несколько искусных шагов для того, чтобы трансформировать матрицу

$\mathbf{P}_N$ в матрицу, которая как можно более близка к диагональной матрице [Teunissen, 1997; Teunissen et al., 1998; Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Strang, Borr, 1997; Xu, 2003].

Шаг 3. После нахождения целых неоднозначностей **N** на шаге 2 получают фиксированное решение для *d***R**. Из (11.30) следует, что

$$d\mathbf{R} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T(\mathbf{y} - \mathbf{BN}). \qquad (11.37)$$

На рис. 11.5 приводится 2-мерный пример из статьи [Joosten, Tiberius, 2000]. Плавающее решение, отмеченное цифрой 2, есть $\hat{\mathbf{N}} = (3.875, 5.400)^T$, и при этом неоднозначности сильно коррелированны, что распознается по сильно вытянутой форме пространства поиска, имеющего вид эллипса. Простое округление должно дать неверный ответ (цифра 3), поскольку истинные целые должны быть $\mathbf{N} = (2, 4)^T$ (отмечено цифрой 1). Теперь произведем трансформирование с помощью матрицы

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -3 & 4 \end{bmatrix}.$$

Плавающее решение трансформируется в $\hat{\mathbf{M}} = (-1.525, 9.975)^T$. Неоднозначности теперь намного менее коррелированны в преобразованном пространстве, что видно по близкой к окружности форме эллипса поиска. Польза от этого состоит в том, что простое округление $\hat{\mathbf{M}}$ дает правильный ответ для целых в трансформированном пространстве: $\hat{\mathbf{M}} = (-2, 10)^T$. Обратное преобразование **M** в **N** дает правильный ответ на исходную проблему.

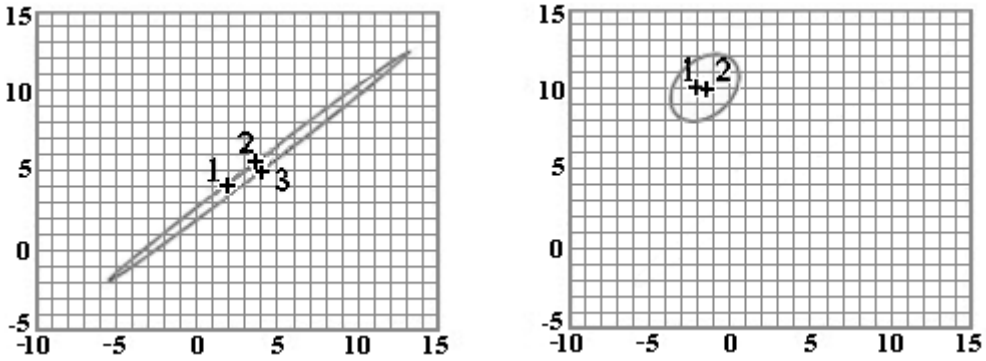


Рис. 11.5. Исходное и преобразованное пространства поиска неоднозначностей в методе LAMBDA [Joosten, Tiberius, 2000]

Поскольку неоднозначности получаются по измерениям, содержащим погрешности в виде шумов и не моделируемых ошибок, то правильность их определения характеризуется некоторой вероятностью, названной разработчиками метода *темпом успеха неоднозначности* (ambiguity success-rate). Темп успеха – это число между 0 и 1 или между 0 и 100%, и выражает вероятность, с которой целые неоднозначности оцениваются правильно. Темп успеха неоднозначности зависит от трех основных факторов: уравнений наблюдений (функциональная модель), точности наблюдений (стохастическая модель), и выбранного метода оценивания целых чисел. Разработано несколько методов вычисления этой характеристики [Joosten, Tiberius, 2000].

11.5. Особенности обработки наблюдений ГЛОНАСС

Первые геодезические спутниковые приемники работали исключительно по системе GPS. Созданные в России навигационные приемники работали либо только по системе ГЛОНАСС, либо по обеим системам. Планировавшиеся к выпуску геодезические ГЛОНАСС приемники не появились в эксплуатации, вероятно, из-за экономических трудностей, обрушившихся на СССР и Россию в конце 1980-х и начале 1990-х гг. После опубликования Интерфейсного контрольного документа по ГЛОНАСС и появления в 1995 г. сообщения о возможности использования Российской навигационной системы мировым сообществом появился интерес к двухсистемным геодезическим измерениям и аппаратуре [Галазин и др., 1997; Zarraoa et al., 1998].

Объединение GPS и ГЛОНАСС или любых других будущих микроволновых систем имеет несколько практических и научных преимуществ. Во-первых, увеличивается число доступных спутников, что также подразумевает увеличение числа наблюдений в эпоху. При полном развёртывании систем ГЛОНАСС и GPS объединённое созвездие будет состоять из 48 спутников. В этом случае на любом открытом месте и в любое время можно видеть не менее 12 спутников. Максимальное число видимых спутников в лучшем случае равно 20. Доступность большого числа спутников будет улучшать геометрию наблюдений и, следовательно, лучше учитывать корреляции тропосферных зенитных задержек и оценки высот станции. Это будет также приводить к более быстрому и более надежному разрешению неоднозначностей, что сделает быструю статику и кинематику более лёгкими, чем по каждой системе в отдельности [Wang, 2000]. Совместная обработка в относительном методе фазовых измерений позволит повысить надежность и точность определения геодезических параметров. Особенно это будет заметно при наблюдениях в районах с ограниченной радиовидимостью – в лесу, горах, городах с высотной застройкой, карьерах. В некоторых случаях добавление ГЛОНАСС к GPS будет улучшать охват полярных регионов из-за большего наклонения орбит спутников ГЛОНАСС по сравнению со спутниками GPS (65 против 55°) [Крюков, Свердлик, 2001; Weber, Springer, 2001; Börjesson, 2000].

При объединенной обработке данных GPS и ГЛОНАСС тем же способом, которым производится обработка данных только GPS, неизвестные параметры, включающие *компоненты базовой линии и неоднозначности,* обычно оцениваются по методу наименьших квадратов или Калмановской фильтрацией. Каждый из этих методов основан на так называемой модели Гаусса-Маркова, которая состоит из математической (функциональной) и стохастической моделей. Поэтому надежность оцененных результатов зависит от правильного определения и математической, и стохастической модели.

11.5.1. Позиционирование по ГЛОНАСС псевдодальностям

Хотя спутники ГЛОНАСС передают свои сигналы на разных частотах, уравнение для псевдодальности (без учета влияния многопутности) представляется в том же виде, что и для GPS (см. уравнение (7.17) в томе 1):

$$P_A^i(t) = \rho_A^i + I_A^i + T_A^i + c(dt_A - dt^i) + c(d_A^i + d^i) + e_A^i. \qquad (11.38)$$

Особенность его состоит в том, что различные частоты спутников ГЛОНАСС и GPS приводят к разным ионосферным задержкам I_A^i, которыми в данном контексте можно пренебречь. Разными оказываются также запаздывания в приемнике d_A^i и аппаратуре спутника d^i . Согласно Интерфейсному контрольному документу [Глобальная навигационная…, 2002], недетерминированная часть групповых задержек в аппаратуре для спутников ГЛОНАСС составляет ±8 нс, а для спутников ГЛОНАСС-М – ±2 нс. Шум измерений e_A^i по спутникам ГЛОНАСС будет в два раза выше, чем по спутникам GPS из-за более низкой тактовой частоты и, как следствие, – большей длины одного элемента кодовой последовательности (600 м в ГЛОНАСС по сравнению с 300 м в GPS). Однако отсутствие режима селективного доступа в системе ГЛОНАСС до его отмены в системе GPS приводило к значительно более высокой точности навигационных определений по российским спутникам.

У спутников ГЛОНАСС вся информация о часах дается в системе времени ГЛОНАСС, а положения спутников относятся к системе ПЗ-90, в которой даются эфемериды спутников [Галазин и др., 1998]. У спутников GPS информация о времени относится к системе GPST, а координаты даются в системе WGS-84 [NIMA…, 2000]. Объединение измерений ГЛОНАСС и GPS требует использования единой системы координат и времени. Параметры связи координатных систем WGS-84 и ПЗ-90 с точностью, достаточной для кодовых измерений, были определены в результате исследований, проведенных учеными России и США [Галазин и др., 1997; Митрикас и др., 1997; Misra et al., 1996]. Обзор методов определений параметров и сводка результатов даются в [Boucher, Altamimi, 2001]. Параметры, рекомендуемые для применения в России, указываются в [ГОСТ Р 51794-2001].

Поскольку при объединении GPS и ГЛОНАСС приходится определять поправку часов приемника относительно двух систем времени, то минимальное число спутников в этом случае равно пяти [Болдин и др., 1999]. Однако можно воспользоваться поправкой τ_{GPS} за расхождение системных шкал времени GPS (T_{GPS}) и ГЛОНАСС ($T_{\text{ГЛ}}$), даваемой в навигационном сообщении ГЛОНАСС в соответствии со следующим выражением:

$T_{\text{GPS}} - T_{\text{ГЛ}} = \Delta T + \tau_{GPS}$,

где ΔT – целая часть, а τ_{GPS} – дробная часть расхождения шкал времени, выраженного в секундах. Целая часть расхождения ΔT определяется потребителем из навигационного сообщения системы GPS. Средняя квадратическая погрешность представления τ_{GPS} равна 30 нс [Глобальная навигационная…, 2002].

Известно, что систематические влияния исключаются или уменьшаются в разностях исходных наблюдений, что успешно применяется при относительном позиционировании. Разности ГЛОНАСС псевдодальностей можно вычислить, используя точно те же формулы, что и для GPS. Одинарные разности (между приемниками *A* и *B*) определяются как

$$P_{AB}^i = P_B^i - P_A^i, \qquad (11.39)$$

что дает

$$P_{AB}^i = \rho_{AB}^i + T_{AB}^i + I_{AB}^i + cdt_{AB}. \qquad (11.40а)$$

Для случая, когда спутники относятся к разным системам, в работе [Wang et al., 2001a] предлагается вводить дополнительный член α для учета межсистемного смещения:

$$P_{AB}^i = \rho_{AB}^i + T_{AB}^i + I_{AB}^i + cdt_{AB} + \alpha_{AB}^i + e_{AB}^i. \qquad (11.40б)$$

Ошибка в поправке часов спутника dt^i почти исключается, если часы приемников синхронизированы с системой времени ГЛОНАСС до нескольких миллисекунд, тогда можно пренебречь дрейфом часов спутника между двумя эпохами излучения сигналов. В дальнейшем будем считать, что *часы приемников синхронизированы с системой времени ГЛОНАСС до 1 мс*.

Двойная разность (между приемниками A и B и спутниками i и j) определяется как

$$P_{AB}^{ij} = P_{AB}^j - P_{AB}^i. \qquad (11.41)$$

Это дает

$$P_{kl}^{ij} = \rho_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + I_{AB}^{ij}. \qquad (11.42)$$

Если требование на точность определения поправок часов приемника соблюдается, то это допускает правильное вычисление геометрических дальностей. В этом случае поправки часов приемника исключаются, уравнение имеет вид, аналогичный тому, который применяется при позиционировании по GPS.

11.5.2. Модели фазы несущей ГЛОНАСС

Модель фазы, выраженной в линейной мере. Предположим для упрощения, что i-й спутник ГЛОНАСС генерирует частоту f^i, i = 1, 2, …, 24,

$$\begin{aligned} f_1^i &= f_0^i + i \cdot \Delta f_1, \\ f_2^i &= f_0^i + i \cdot \Delta f_2, \end{aligned} \qquad (11.43)$$

излучаемую, соответственно, в частотных поддиапазонах L1 и L2:

$f_{0,\,L1}$ = 1 602 МГц; Δf_{L1} = 562,5 КГц, для поддиапазона L1 (λ_{L1} = 18.7 см);

$f_{0,\,L2}$ = 1 246 МГц; Δf_{L2} = 437,5 КГц, для поддиапазона L2 (λ_{L2} = 24.1 см).

Из-за расхождения в частотах длины волн у спутников ГЛОНАСС могут различаться на L1 до 1.5 мм, а на L2 – до 2.0 мм. Различие в длинах волн между спутниками ГЛОНАСС и GPS может достигать, соответственно, 3.16 и 5.6 мм. (Спутники GPS можно рассматривать как спутники ГЛОНАСС с номерами i = -47 для диапазона L1 и i = -42 для диапазона L2.)

В соответствии с формулой (7.27), уравнение фазы наблюдений, выраженной в линейной мере (без учета влияния многопутности и без указания эпох), можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi_A^i &= \rho_A^i - I_A^i + T_A^i + c(dt_A - dt^i) + c(\delta_A^i + \delta^i) + \\ &+ \lambda^i [\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda^i N_A^i + \varepsilon_A^i. \end{aligned} \qquad (11.44)$$

В этом уравнении не только длина волны λ^i будет у каждого спутника своя, но и запаздывания в аппаратуре δ_A^i будут также различными.

Одинарные разности фаз. Если сигнал от спутника *i* одновременно наблюдается двумя приемниками *A* и *B*, то можно сформировать одинарную разность фаз

$$\Phi^i_{AB} = \Phi^i_B - \Phi^i_A \qquad (11.45)$$

и получить уравнение наблюдений

$$\Phi^i_{AB} = \rho^i_{AB} + cdt_{AB} - I^i_{AB} + T^i_{AB} + \delta^i_B - \delta^i_A + \\ + \lambda^i N^i_{AB} + \lambda^i [\phi_B(t_0) - \phi_A(t_0)] + \varepsilon^i_{AB}, \qquad (11.46)$$

в котором $N^i_{AB} = N^i_A - N^i_B$. Поправка часов спутника dt^i исключается, если часы приемников синхронизированы с системой времени ГЛОНАСС в пределах 1 мс. Исключаются запаздывания в аппаратуре спутника $\dot{\delta}^i$, но остаточные запаздывания в приемниках могут сохраняться. Модель (11.46) может быть использована для решения коротких базовых линий, ее недостатком является необходимость определять в каждую эпоху относительную поправку часов приемников cdt_{AB}, что приводит к уменьшению числа избыточных измерений [Leick et al., 1995; 1998].

Двойные разности фаз. Образование разности двух одинарных разностей между приемниками *A* и *B* и спутниками *i* и *j* приводит к двойной разности фаз

$$\Phi^{ij}_{AB} = \Phi^j_{AB} - \Phi^i_{AB} \qquad (11.47)$$

и уравнению наблюдений

$$\Phi^{ij}_{AB} = \rho^{ij}_{AB} - I^{ij}_{AB} + T^{ij}_{AB} - \lambda^i \cdot N^i_{AB} + \lambda^j \cdot N^j_{AB} + \\ + (\lambda^j - \lambda^i) \cdot [\phi_B(t_0) - \phi_A(t_0)] + \varepsilon^{ij}_{AB}. \qquad (11.48)$$

Член с поправкой часов $c \cdot dt_{AB}$ исключается, если выполняется синхронизация часов приемника с бортовой шкалой времени в пределах 1 мс. Влияние начальных фаз генераторов для спутников ГЛОНАСС не будет превышать 1.5 – 2 мм, то есть оставаться на уровне шума измерений фазы. Если же один из спутников относится к системе ГЛОНАСС, а другой – к GPS, то влияние этого члена может достигать 3.1 мм на поддиапазоне L1 и 5.6 мм – на L2 и иногда может превышать уровень шума. Эти небольшие остаточные систематические ошибки могут приводить к систематическим ошибкам в компонентах базовой линии. Однако главная проблема здесь состоит в том, что из неоднозначностей одинарных разностей не образуется целая неоднозначность двойной разности.

Если представить

$$\lambda^{ij} = \lambda^j - \lambda^i, \qquad (11.49)$$

то, используя равенства $N^{ij}_{AB} = N^j_{AB} - N^i_{AB}$ и $\lambda^j = \lambda^i + \lambda^{ij}$, уравнение (11.48) можно переписать как

$$\Phi^{ij}_{AB} = \rho^{ij}_{AB} - I^{ij}_{AB} + T^{ij}_{AB} + \lambda^i \cdot N^{ij}_{AB} + \lambda^{ij} \cdot N^j_{AB} + \varepsilon^{ij}_{AB}. \qquad (11.50)$$

Поскольку два спутника-антипода могут генерировать несущие с номинально одинаковой частотой, для такой пары спутников имеем

$$\lambda^{ij} = 0, \qquad (11.51)$$

и тогда решение по спутникам ГЛОНАСС аналогично решению по спутникам GPS. Но для обычных ГЛОНАСС наблюдений

$$\lambda^{ij} \neq 0 . \qquad (11.52)$$

В этом случае в уравнении двойной разности фаз присутствует член смещения одинарной разности b_{AB}^{ij}, который отсутствует при обработке GPS измерений:

$$b_{AB}^{ij} = \lambda^{ij} \cdot N_{AB}^{j} . \qquad (11.53)$$

Член смещения одинарной разности (11.53) представляет главную проблему при выявлении потерь счета циклов и разрешении неоднозначностей для спутников ГЛОНАСС. Величина его зависит от разности частот спутников *i* и *j* и от одинарной разности неоднозначностей N_{AB}^{j}. Очевидно, что при оценивании неоднозначностей двойных разностей член смещения будет нарушать целую природу неоднозначностей в уравнении (11.50). Поэтому для разрешения неоднозначностей двойных разностей N_{AB}^{ij} нужно знать неоднозначность одинарной разности N_{AB}^{j}. В работе [Habrich, 1999] показано, что при минимальной разности длин волн между двумя спутниками (когда $i - j = 1$) для поддержания члена смещения на уровне 0.1 цикла неоднозначности одинарных разностей N_{AB}^{j} должны быть известны с точностью в 285 циклов. Это соответствует ошибке положения пункта примерно в 50 – 70 м, что возможно, например, при вычислении положения отдельной точки по кодам. Формирование двойной разности между спутниками с максимальной разностью в длинах волн требует знания N_{kl}^{j} с точностью в 24 раза более высокой, то есть около 12 циклов или 2 – 3 м. Еще более высокая точность потребуется для смешанных пар спутников ГЛОНАСС – GPS.

В работе [Habrich, 1999] модель фазы (11.50) использована для разработки метода разрешения неоднозначностей, который хорошо подходит как для длинных, так и для коротких базовых линий. Двойные разности фаз обрабатываются в итеративном режиме таким образом, чтобы в каждой итерации находилась одна неоднозначность двойной разности. При этом для неоднозначности одинарной разности N_{AB}^{i} опорного спутника *i* используется приближенное значение. Подобная модель с использованием итеративного алгоритма оценивания неоднозначностей двойных разностей предложена в работе [Wang, 2000].

Тройные разности фаз. Двойные разности фаз для двух разных эпох t_1 и t_2 можно использовать для образования тройных разностей фаз:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1, t_2) = \Phi_{AB}^{ij}(t_2) - \Phi_{AB}^{ij}(t_1) . \qquad (11.54)$$

Если предположить, что неоднозначности N_{AB}^{i} и N_{AB}^{j} в уравнении (11.50) не изменяются в течение временного интервала $(t_2 - t_1)$, то фазовые неоднозначности исключаются, и мы получаем уравнение наблюдений:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1, t_2) = \rho_{AB}^{ij}(t_1, t_2) + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1, t_2) . \qquad (11.55)$$

Изменения в тропосферной рефракции обычно малы на коротких временных интервалах $(t_2 - t_1)$, например в 30 с, и тропосферная рефракция адекватно уменьшается в тройной разности. Однако ионосферная рефракция в некоторых случаях может быстро изменяться. Тройные разности используются

для вычисления более точного, чем по кодам, приближения в векторе относительного положения между приемниками *A* и *B* и для выявления потерь счета циклов.

Использование модели фазы в циклах частоты. Перевод фазового наблюдения из представления в линейной мере в циклы частоты дает:

$$\phi_A^i = \frac{1}{\lambda^i}[\rho_A^i - I_A^i + T_A^i] + \frac{c}{\lambda^i}[(dt_A - dt^i) + (\delta_A^i + \delta^i)] +$$
$$+[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + N_A^i + \frac{1}{\lambda^i}\varepsilon_A^i. \qquad (11.56)$$

Для коротких базовых линий одинарные разности измерений фазы несущей GPS/ГЛОНАСС можно моделировать следующим образом:

$$\phi_{AB}^i = \frac{1}{\lambda^i}\rho_{AB}^i - \frac{c}{\lambda^i}dt_{AB} + N_{AB}^i + \delta_{AB}^i + \phi_{AB}^i(t_0) + \varepsilon_{AB}^i. \qquad (11.57)$$

Нужно заметить, однако, что на практике из-за нехватки геометрической информации, содержащейся в измерениях, невозможно оценить все неизвестные параметры в уравнении (11.57). Для преодоления этой трудности используются три основных методики.

Первая методика заключается в том, что можно разработать специальную процедуру моделирования, которая изменяет представление в модели (параметризацию) или исключает некоторые неизвестные параметры в математической модели. Например, как и целый параметр неоднозначности, начальная фаза гетеродина приемника является постоянной (она могла бы быть разной для двух каналов, если бы для GPS и ГЛОНАСС каналов использовались разные генераторы). Поэтому при образовании двойной разности (GPS – GPS, ГЛОНАСС – ГЛОНАСС) член начальной фазы для GPS (или ГЛОНАСС) может быть смешан с неоднозначностью одинарной разности GPS (или ГЛОНАСС) для опорного спутника GPS (или ГЛОНАСС). Действительно, если используется процедура образования одинарной разности, эту неоднозначность одинарной разности вместе с членом начальной фазы можно исключить в модели неоднозначности двойной разности фаз:

$$\phi_{AB}^{ij} = \frac{1}{\lambda^j}[\rho_{AB}^j - I_{AB}^j + T_{AB}^j] - \frac{1}{\lambda^i}[\rho_{AB}^i - I_{AB}^i + T_{AB}^i] +$$
$$+\left(\frac{c}{\lambda^j} - \frac{c}{\lambda^i}\right)dt_{AB} + N_{AB}^{ij} + \left(\frac{1}{\lambda^j} - \frac{1}{\lambda^i}\right)\varepsilon_{AB}^i. \qquad (11.58)$$

В уравнении (11.58) смещения между каналами для фаз GPS исключаются, поскольку они идентичны для всех каналов GPS.

Вторая методика заключается в использовании некоторой дополнительной информации в системе позиционирования, чтобы калибровать измерения. Например, из-за непостоянных характеристик групповой задержки в радиочастотном блоке ГЛОНАСС приемника смещения между каналами в аппаратуре изменяются между каналами радиочастотного блока ГЛОНАСС. Эти смещения были выявлены в начале разработки ГЛОНАСС приемника и были также замечены и в ГЛОНАСС псевдодальностях и фазах несущей от различных приемников (например, [Kozlov, Tkachenko, 1998]). Некоторые

изготовители ГЛОНАСС приемников исследуют методики уменьшения величины межканальных сдвигов. Можно также оценить смещения, используя измерения фазы несущей GPS, когда двойные разности и GPS, и ГЛОНАСС зафиксированы на их правильных значениях [Kozlov, Tkachenko, 1998]. В работе [Povalyaev, 1997] межканальные сдвиги ГЛОНАСС разделяются на постоянную часть и член, зависящий от частоты, и таким образом можно калибровать, используя линейную функцию, подставляемую в следующую модель:

$$\phi_{AB}^{ij} = \frac{1}{\lambda^j}[\rho_{AB}^j - I_{AB}^j + T_{AB}^j] - \frac{1}{\lambda^i}[\rho_{AB}^i - I_{AB}^i + T_{AB}^i] +$$
$$+\left(\frac{c}{\lambda^j} - \frac{c}{\lambda^i}\right) d\bar{t}_{AB} + N_{AB}^{ij} + \left(\frac{1}{\lambda^j} - \frac{1}{\lambda^i}\right)\varepsilon_{AB}^i . \qquad (11.59)$$

По сравнению с уравнением (11.58), в уравнении (11.59) действительно смешиваются ошибки часов приемника и зависящая от частоты часть из межканальных сдвигов как новый параметр $d\bar{t}_{AB}$, а постоянный член межканальных сдвигов исключается при образовании двойной разности.

Третья методика состоит в представлении не моделируемых ошибок случайными величинами («рандомизация»). Некоторые неизвестные члены в модели могут быть незначительными по сравнению с уровнем шума, и поэтому ими можно пренебречь в математической модели. К примеру, современные GPS/ГЛОНАСС приемники могут иметь очень малые межканальные фазовые сдвиги. Во многих исследованиях, таких, как [Kozlov, Tkachenko, 1998; Leick et al.,1998], нет межканальных сдвигов для спутников ГЛОНАСС, а межсистемные сдвиги (δ, γ и α) калибруются. Вместо этого такие не моделируемые члены должны учитываться в стохастической модели.

Однако даже без межканальных сдвигов и межсистемных сдвигов в модели фазы несущей, математическое моделирование для ГЛОНАСС измерений все еще остается серьезной проблемой. Причина этого состоит в том, что в наблюдениях двойных разностей появляются параметры часов между приемниками dt_{AB} (см. уравнение (11.58)). Поэтому методика моделирования должна, соответственно, иметь дело с ошибками часов приемников. В принципе, предложенные методики моделирования можно рассматривать как принадлежащие к одной из следующих категорий: а) те, которые исключают ошибки часов приемников; б) те, которые требуют оценивания ошибок часов приемников. Кроме того, предложенные модели включают так же неизвестные параметры компонент базовой линии и неоднозначностей [Wang et al., 2001a].

Использование моделей (11.57), (11.58) с применением Калмановской фильтрации описано в работе [Leick et al., 1998].

Обзоры моделей для раздельной и совместной обработки GPS и ГЛОНАСС измерений можно найти в работах [Habrich, 1999; Wang, 2000]. Оригинальный алгоритм с использованием сигнального времени предложен в работе российских ученых [Харисов, Булавский, 2000]. Несмотря на определенные трудности, связанные с различием в концепциях российской и американской

СРНС, было показано несколько способов как раздельной, так и совместной обработки наблюдений спутников ГЛОНАСС и GPS [Галазин и др., 1997; Leick et al., 1998].

В октябре 1998 г. была начата полевая часть кампании в первой международной координированной попытке по наблюдениям спутников ГЛОНАСС (IGEX – International GLONASS Experiment) в глобальном масштабе. К настоящему времени около 40 научных учреждений во всем мире поддерживают эти усилия, либо обеспечивая данными слежения спутников ГЛОНАСС, либо получая связанную с ними информацию и обслуживая работу аналитических центров [Weber, Springer, 2001].

Стохастические модели описывают статистическое качество математических моделей, они определяются главным образом ковариационными матрицами ошибок математической модели.

«Совершенных» моделей нет. Как и в случае позиционирования только по GPS, не моделируемые ошибки или ошибки модели уравнений измерений для одинарных или двойных разностей в объединенных системах позиционирования также включают ошибки орбит спутников, атмосферных задержек, влияния многопутности, изменений фазового центра, межканальных сдвигов и т. д. Орбитальные ошибки и атмосферные задержки можно в значительной степени исключить на коротких базовых линиях.

Считается, что различие между системами координат GPS и ГЛОНАСС и системами времени приведет к ошибкам в моделях. Такие проблемы особенно важны в глобальных сетях или станциях мониторинга, таких, как Международная служба ГЛОНАСС. Для коротких базовых линий влияние различий в координатных системах и системах времени считается незначительным. Даже при использовании оптимальной математической модели все еще имеются некоторые не моделируемые (или остаточные) систематические ошибки в одинарных или двойных разностях, которые считаются случайными ошибками и должны учитываться при стохастическом моделировании. При обработке объединенных GPS и ГЛОНАСС данных общая практика – недовзвешивание ГЛОНАСС измерений. Поэтому создание реалистичной стохастической модели очень важно для объединенного позиционирования по GPS и ГЛОНАСС.

Описание нескольких стохастических моделей дается в работах [Wang et al., 2001a; Dai et al., 2001].

11.6. Уравнивание спутниковых векторных сетей

11.6.1. Концепция вторичного уравнивания сетей

Из приведенных в разделе 11.1 замечаний следует, что существует два вида уравнивания: первичное уравнивание, в результате выполнения которого находятся векторы базовых линий с соответствующими ковариационными матрицами, и вторичное уравнивание, в котором результаты первичного уравнивания рассматриваются как наблюдения.

Уравнивание (или МНК-оптимизация) геодезических сетей, построенных с применением спутниковых технологий, является необходимым этапом технологии геодезических работ. Задачами этого процесса являются:

– согласование совокупности всех измерений в сети;

– минимизация и фильтрация случайных ошибок измерений;

– выявление и отбраковка грубых измерений, исключение систематических ошибок;

– получение набора уравненных координат и соответствующих им элементов базовых линий с оценкой точности в виде ошибок или ковариационных матриц;

– трансформирование координат в требуемую координатную систему;

– преобразование геодезических высот в нормальные высоты.

Таким образом, главная цель уравнивания – повышение точности и представление результатов в необходимой системе координат с оценкой точности. Для достижения этих целей используются известные теоретические и практические методы, имеющие достоверное статистическое обоснование.

Обработка некоторой базовой линии *AB* дает в результате вектор между двумя станциями с компонентами в виде разностей координат $\tilde{\mathbf{D}}_{AB} = (\Delta\tilde{X}_{AB}, \Delta\tilde{Y}_{AB}, \Delta\tilde{Z}_{AB})^T$, которые рассматриваются теперь как результаты измерений. Им соответствует ковариационная матрица $\mathbf{K}_{XYZ_{AB}}$ размера 3×3. Полная ковариационная матрица для сети является блочно-диагональной, с подматрицами размера 3×3 на главной диагонали. В такой форме результаты измерений получаются, если работали только два приемника. Если совместно обрабатывались результаты сессии из *R* приемников, и получено *R - 1* независимых базовых линий, то им соответствует полная ковариационная матрица размера $3(R - 1) \times 3(R - 1)$.

Дополнительными исходными данными для уравнивания СГС являются:

– координаты опорных пунктов в геоцентрической системе WGS-84, ПЗ-90 или ITRF с необходимой точностью;

– координаты (плановые и высотные) опорных пунктов в новой системе при переводе пространственных координат.

Различают свободное, минимально ограниченное и ограниченное (несвободное) уравнивание. В *свободном уравнивании* неизвестными считаются все пункты сети, и положение сети относительно геоцентра известно с той же точностью, что и координаты начальной точки сети. В этом случае матрица коэффициентов системы уравнений поправок и, следовательно, нормальная матрица будут иметь дефект ранга, равный трем. Однако использование аппарата псевдообращения матриц, применяемого в некоторых программах, позволяет провести уравнивание. При фиксировании координат одного пункта получаем *минимально ограниченное уравнивание*, в котором нормальная матрица оказывается невырожденной. Для достижения значимого контроля векторная сеть не должна содержать незамкнутых геометрических фигур. При фиксировании более чем трех координат будет ограниченное уравнивание в том смысле, что будут наложены дополнительные ограничения по

отношению к минимально необходимым. Свободное и минимально ограниченное уравнивание применяются для решения первых трех задач, перечисленных в начале раздела. Его результаты отражают внутреннюю точность сети, не деформированной ошибками исходных данных. *Ограниченное уравнивание* производится после успешного выполнения минимально ограниченного уравнивания для включения вновь построенной сети в существующую сеть, в ее координатную систему, в том числе систему высот. Для этого новая сеть должна быть связана, по крайней мере, с двумя станциями существующей сети.

При уравнивании сети можно оценить качество наблюдений, выведенных при первичном уравнивании векторов базовых линий, выполнить вычисления внутренней и внешней надежности, можно выявить и удалить грубые ошибки. К примеру, ошибку в высоте антенны невозможно обнаружить при последовательной обработке базовых линий (то есть одна за другой), но она будет выявлена при уравнивании сети. Методику последовательного уравнивания, если необходимо, можно также использовать для уравнивания компонент сети. При свободном или минимально ограниченном уравнивании можно произвести передачу дисперсий для вычисленных расстояний, углов или любых других функций координат [Leick, 1994a, 1995].

Особая проблема – это совместное уравнивание спутниковых и обычных геодезических измерений. Суть ее в том, что традиционные геодезические измерения (измерения углов, нивелировки, астрономические определения и др.) выполняются с использованием уровня, то есть в качестве опорной поверхности используется геоид. Измерения базовых линий производятся в системе осей общеземного эллипсоида. Для корректного приведения данных к одной какой-либо системе необходимо знать высоты геоида над эллипсоидом с соответствующей точностью.

Уравнивание небольших сетей выполняется обычно по программам, входящим в состав фирменного коммерческого обеспечения. Примером таких программ может служить модуль TRIMNET Plus, входивший в состав программ GPSurvey [TRIMNET, 1991] и в несколько измененном виде вошедший в пакет Trimble Geomatics Office [Trimble Geomatics…, 2001] американской фирмы Trimble Navigation и др. Отметим также разработки российских ученых, описанные в статье [Маркузе, 1997] и книге [Глушков и др., 2002].

11.6.2. Функциональные модели уравнивания

Уравнение связи, или функциональная модель уравнивания спутниковой геодезической сети (СГС), определяет соотношение между измеренными величинами (компонентами вектора базовой линии) и параметрами сети, в качестве которых здесь выступают координаты пункта наблюдений.

Уравнивание СГС можно производить в прямоугольных пространственных координатах X, Y, Z, в геодезических координатах B, L, H на эллипсоиде, или в плоских координатах в некоторой проекции.

Уравнивание в прямоугольной системе координат. Если уравнивание производится в *прямоугольных пространственных координатах параметрическим методом*, то функциональная модель имеет вид:

$$\mathbf{D}_{AB} = \mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A, \qquad (11.60)$$

где $\mathbf{D}_{AB}$ – уравненный вектор базовой линии между станциями A и B, а $\mathbf{R}_A, \mathbf{R}_B$ – уравненные координаты станций. Функциональная модель связывает измеренные элементы и элементы, которые должны быть получены. В матричном виде модель (11.60) записывается как

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix}. \qquad (11.61)$$

Такая математическая модель от природы линейна. Выразим координаты станций $\mathbf{R}_A, \mathbf{R}_B$ через их предварительные (априорные) значения $\mathbf{R}_A^0, \mathbf{R}_B^0$ и поправки к ним $d\mathbf{R}_A$, $d\mathbf{R}_B$, а уравненный вектор базовой линии $\mathbf{D}_{AB}$ – через его измеренное значение $\tilde{\mathbf{D}}_{AB}$ и поправку к нему $\mathbf{v}_{AB}$:

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_1^0 + d\mathbf{R}_1;\ \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_2^0 + d\mathbf{R};\ \mathbf{D}_{AB} = \tilde{\mathbf{D}}_{AB} + \mathbf{v}_{AB}. \qquad (11.62)$$

Теперь уравнение поправок для одной базовой линии можно записать в виде:

$$\mathbf{R}_B^0 - \mathbf{R}_A^0 + d\mathbf{R}_B - d\mathbf{R}_A = \tilde{\mathbf{D}}_{AB} + \mathbf{v}_{AB}, \qquad (11.63)$$

или

$$-d\mathbf{R}_A + d\mathbf{R}_B + \mathbf{l}_{AB} = \mathbf{v}_{AB}, \qquad (11.64)$$

где $\mathbf{v}_{AB}$ – вектор поправок (матрица-столбец):

$$\mathbf{v}_{AB} = (v_{\Delta X_{AB}}, v_{\Delta Y_{AB}}, v_{\Delta Z_{AB}})^T, \qquad (11.65)$$

а $\mathbf{l}_{AB}$ – свободный член, определяемый выражением:

$$\mathbf{l}_{AB} = \mathbf{R}_B^0 - \mathbf{R}_A^0 - \tilde{\mathbf{D}}_{AB}. \qquad (11.66)$$

Система уравнений поправок для всей сети записывается в виде:

$$\mathbf{AX} + \mathbf{l} = \mathbf{v}. \qquad (11.67)$$

Матрица коэффициентов **A** для системы уравнений (11.67) состоит из 1, -1 и 0, ее фрагмент для линии AB представляется следующим образом:

$$\mathbf{A}_{AB} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (11.68)$$

Матрица **A** для спутниковой сети выглядит так же, как для нивелирной сети. Каждая базовая линия вносит в матрицу коэффициентов три строки. Каждой станции сети принадлежат три столбца. Вектор неизвестных поправок в параметры **X** состоит из векторов поправок $d\mathbf{X}$ в координаты пунктов:

$$\mathbf{X} = (d\mathbf{X}_A,\ d\mathbf{X}_B,\ K\ ,\ d\mathbf{X}_N)^T =$$

$$= (dX_A,\ dY_A,\ dZ_A,\ dX_B,\ dY_B,\ dZ_B,\ K\ ,\ dX_N,\ dY_N,\ dZ_N)^T, \qquad (11.69)$$

а вектор свободных членов **l** и вектор поправок **v** состоят, соответственно, из отдельных векторов свободных членов и векторов поправок в компоненты базовых линий.

Из-за того, что наблюдение вектора содержит информацию об ориентировке и масштабе сети, достаточно зафиксировать только начало координатной системы. Минимальные ограничения для фиксирования начала можно наложить просто удалением трех параметров координат одной станции из набора параметров. Таким приемом данная станция будет зафиксирована.

В свободном уравнивании к нормальным уравнениям могут добавляться внутренние ограничения [Bock et al., 1985; Leick, 1995]:

$$\mathbf{EX} = \mathbf{0}, \qquad (11.70)$$

где $\mathbf{E}$ – матрица размера $3 \times 3N$ (N – число станций в сети), состоящая из единичных матриц $\mathbf{I}$, каждая размером 3×3:

$$\mathbf{E} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{I} \quad \cdots \quad \mathbf{I}]. \qquad (11.71)$$

Назначение этих ограничений сводится к тому, чтобы сумма координатных сдвигов и возможных смещений в ориентировке и длине базовых линий была равна нулю. Решение свободного уравнивания для поправок в координаты пунктов будет:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{N} + \mathbf{E}^T\mathbf{E})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{Pl}, \qquad (11.72)$$

а ковариационная матрица оцененных координат станций имеет вид:

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}} = \hat{\sigma}_0^2\left[\left(\mathbf{N} + \mathbf{E}^T\mathbf{E}\right)^{-1} - \mathbf{E}^T\left(\mathbf{EE}^T\right)^{-1}\left(\mathbf{EE}^T\right)^{-1}\mathbf{E}\right], \qquad (11.73)$$

причем нормальная матрица находится методом псевдообращения:

$$\mathbf{N}^+ = (\mathbf{A}^T\mathbf{PA} + \mathbf{E}^T\mathbf{E})^{-1} - \mathbf{E}^T(\mathbf{EE}^T\mathbf{EE}^T)^{-1}\mathbf{E}. \qquad (11.74)$$

При ограниченном уравнивании в качестве дополнительных неизвестных в параметрические уравнения вставляются параметры связи между системами координат и высот [Leick, 1995; Глушков и др., 2002].

Уравнивание на поверхности эллипсоида. Уравнивание на эллипсоиде позволяет разделять влияние ошибок в плане и по высоте и в необходимых случаях локализовать грубые ошибки центрирования или измерения высоты антенны. Для уравнивания на эллипсоиде прямоугольные координаты преобразуются в геодезические, а компоненты векторов базовых линий преобразуются в длины геодезических линий, их геодезические азимуты и приращения эллипсоидальных высот. Для этого вычисляются приращения координат E, N, U в топоцентрической системе [Leick, 1995]:

$$\begin{bmatrix} E_{AB} \\ N_{AB} \\ U_{AB} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_A \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}, \qquad (11.75)$$

где матрица $\mathbf{R}_A$ вычисляется по геодезическим координатам начала вектора базовой линии:

$$\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} -\sin L_A & \cos L_A & 0 \\ -\sin B_A \cos L_A & -\sin B_A \sin L_A & \cos B_A \\ \cos B_A \cos L_A & \cos B_A \sin L_A & \sin B_A \end{bmatrix}. \qquad (11.76)$$

Геодезический азимут с пункта A на пункт B вычисляется по формуле [TRIMNET, 1991]:

$$A_{AB} = \operatorname{arctg}(E_{AB} / N_{AB}) + \delta_{H_B}, \qquad (11.77)$$

где δ_{H_B} – поправка за высоту наблюдаемого пункта B, вычисляемая по азимуту A_{AB} и радиусу кривизны нормального сечения эллипсоида R_{AB} в этом азимуте:

$$\delta_{H_B} = \frac{H_B (e')^2}{2R_A} \sin 2A_{AB} \cos^2 B_m; \qquad (11.78)$$

$$R_A = \frac{N_A}{1 + (e')^2 \cos^2 B_A \cos^2 A_{AB}}. \qquad (11.79)$$

В формулах (11.78) и (11.79): N_A – радиус кривизны эллипсоида в первом вертикале в пункте A; e' – второй эксцентриситет эллипсоида; B_m – средняя широта между пунктами.

Высота точки B над эллипсоидом (рис. 11.6) вычисляется по формулам:

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB}; \qquad (11.80)$$

$$\Delta H_{AB} = \sqrt{D_{AB}^2 + (R_A + H_A)^2 + 2(R_A + H_A) \cdot U_{AB}} - (R_A + H_A). \qquad (11.81)$$

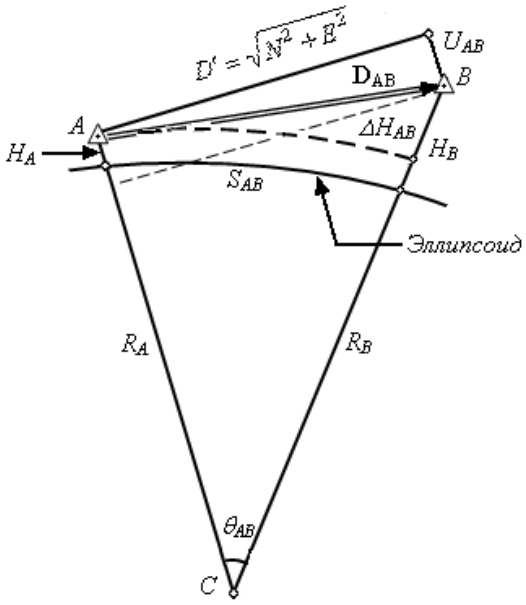


Рис. 11.6. Геометрия базовой линии

Расстояние S_{AB} между пунктами на эллипсоиде по геодезической линии находится как

$$S_{AB} = \theta_{AB} \cdot R_A, \qquad (11.82)$$

где угол θ_{12} определяется из выражения:

$$\theta_{12} = \arcsin \frac{\sqrt{E_{12}^2 + N_{12}^2}}{R_1 + H_1 + \Delta H_{12}}. \qquad (11.83)$$

Уравнения поправок для геодезического азимута, длины геодезической и приращения эллипсоидальных высот можно найти в книге [Герасимов, 1996]. Описания других математических моделей уравнивания, применяемых для спутниковых измерений, см. в работах [Bock et al., 1985; King et al., 1987; Leick, 1995; Teunissen et al., 1998; Rizos, 1999; Глушков и др., 2002].

11.6.3. Стохастические модели для уравнивания сети

Стохастическая модель дает информацию о точности измерений. Тем самым достигается исправление более грубых измерений большими поправками, а более точных измерений – меньшими поправками. Если же стохастическая модель измерений сети содержит ошибочную информацию, то результаты уравнивания и заключение о нем могут оказаться ненадежными.

Стохастическая модель для уравнивания сети, построенной по ГНСС измерениям, представляется ковариационными матрицами $\mathbf{K}_{XYZ}$, полученными при решении отдельных базовых линий:

$$\mathbf{K}_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}, \qquad (11.84)$$

в которых диагональные члены – дисперсии приращений координат базовых линий, а недиагональные члены – их ковариации. В случае обработки одновременных наблюдений R приемниками имеется полная ковариационная матрица для группы из R станций (или R - *1* независимых базовых линий). Она имеет размер $3(R - 1) \times 3(R - 1)$.

Использование дисперсий (квадратов средних квадратических ошибок) как основы для назначения весов наблюдений подразумевает, что ошибки наблюдений (компонент базовой линии) имеют *нормальное распределение*. Однако это может быть ошибочное предположение, которому практически нет альтернативы.

Одной из характерных особенностей спутниковых методов является существенное преобладание систематических ошибок над случайными. Практически всегда при решении базовых линий в ковариационных матрицах для приращений координат получаются миллиметровые точности, особенно при удачном разрешении неоднозначностей по двойным разностям. В то же время, невязки в замкнутых фигурах, вычисляемые по этим же базовым линиям, имеют величину на сантиметровом уровне. Это происходит потому, что ковариационная матрица на выходе из решения базовой линии подразумевает точность по внутренней сходимости. В ней не учитывается влияние ошибок центрирования, измерения высоты антенны, некоррелированных ошибок тропосферной и ионосферной задержки и других, не моделируемых ошибок, которые в сеансе ведут себя как систематические ошибки (смещения). Когда на вход программы уравнивания сети будет поступать нереальная ковариационная матрица, получаемое решение не будет проходить χ^2-тест. Если бы можно было определить истинную ковариационную матрицу (включающую влияние не моделируемых ошибок), тогда ее можно было бы использовать вместо выходной ковариационной матрицы, полученной при первичном уравнивании сети.

Хотя ковариационные матрицы векторов базовых линий не дают возможности судить о реальной точности их координат, по ним можно составить некоторые выводы об условиях наблюдений. Но перед их использованием во вторичном уравнивании эти матрицы необходимо корректировать, приближая их к реальным условиям измерений. На практике

обработчик для изменения ковариационных матриц прибегает к различным эмпирическим методам. Обычно это производится в итеративном режиме, с использованием теста на фактор дисперсии (или какого-либо другого статистического теста).

В коммерческих программах уравнивания спутниковых сетей, как правило, используются два общепринятых метода корректировки ковариационных матриц:

- масштабирование ковариационных матриц;
- модификация отдельных элементов ковариационных матриц.

В первом методе применяется некоторый масштабирующий коэффициент w (скаляр, поэтому метод иногда называют *стратегией скаляров*), и получается преобразованная ковариационная матрица $\mathbf{K}'_{XYZ}$, в которой все дисперсии и ковариации будут хуже, чем в уравнении (11.79) [Rizos, 1999]:

$$\mathbf{K}'_{XYZ} = w \cdot \mathbf{K}_{XYZ} . \qquad (11.85)$$

Если тест не проходит, то назначается другой коэффициент, и вычисления повторяются.

В статье [Герасимов, Сластенов, 1994] предлагается вычислить коэффициент w из сравнения средних квадратических ошибок, полученных по невязкам фигур и даваемых ковариационными матрицами. Для этого вычисляются невязки в n замкнутых фигурах и по формуле (10.36) рассчитывается средняя квадратическая ошибка m для одной из разностей координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, то есть выполняется оценка точности по внешней сходимости. Обычно эта ошибка в 5 – 10 раз больше ошибок, представленных в ковариационных матрицах базовых линий. Средние квадратические ошибки, определяемые по внутренней сходимости, находятся через три диагональных элемента K_{11}, K_{22}, K_{33} как $\sqrt{K_{11}}$, $\sqrt{K_{22}}$, $\sqrt{K_{33}}$. Для сети из всех $\sqrt{K_{ii}}$ определяется среднее арифметическое значение:

$$m_K = \frac{1}{3n} \sum \sqrt{K_{ii}} , \qquad (11.86)$$

то есть m_K является средней квадратической ошибкой одной разности по результатам решения базовых линий. Масштабирующий коэффициент находится по формуле

$$w = m^2 / m_K^2 , \qquad (11.87)$$

а корректировка ковариационных матриц выполняется по формуле (11.80). Такой прием в большей степени подходит для сетей с примерно одинаковыми длинами линий, измеренных однотипной аппаратурой и в одном стиле (методы обычной статики, кинематики «стой – иди» или быстрой статики), с использованием решений одного и того же типа (например, по двойным разностям свободных от влияния ионосферы комбинаций фазы с разрешением целых неоднозначностей). Если же такие условия не выполняются, то можно попытаться для каждой базовой линии подобрать свой масштабирующий множитель. При этом более надежным базовым линиям следует назначать меньшие масштабирующие множители.

В некоторых руководствах по уравниванию (например, [Trimble Geomatics…, 2001]) применяется стратегия автоматического назначения скаляров, основанная на сравнении априорной и апостериорной ошибок единицы веса по сети.

Второй метод построения стохастической модели основан на известном свойстве ошибок определения планового положения σ_D и разности геодезических высот σ_H по формулам вида (9.31), (9.32), в соответствии с которыми ошибки состоят из постоянной части и части, зависящей от расстояния D:

$$\sigma_D = a + b \cdot D; \qquad (11.88)$$

$$\sigma_H = a' + b' \cdot D. \qquad (11.89)$$

Постоянный член можно рассматривать, например, как ошибку центрирования или ошибку измерения высоты антенны (соответственно, влияние в плане и по высоте). С теоретической точки зрения, остаточные тропосферные и ионосферные ошибки в наблюдениях фазы несущей, как и влияния ошибок в координатах спутников и фиксированных станций, сказываются на результатах позиционирования величиной, которая возрастает с увеличением длины базовой линии.

Влияние внешних систематических смещений на обработку фазовых измерений можно выявить через их согласованность с другими данными. Иногда это достаточно трудно, например, при сравнении результатов с существующими наземными сетями, поскольку расхождения могут быть из-за ошибок в сети триангуляции или полигонометрии. Более надежный метод – сравнение повторных измерений базовых линий, полученных в разное время суток, разное время года и т. д. Однако, чтобы не оказали влияние другие эффекты (вызванные, например, различием в длинах базовых линий), при этом анализе их нужно исключать. Заметим, что в этом методе невозможно выявить систематические ошибки, которые влияют на результаты всех сессий с одинаковой величиной.

Необходимая для моделирования дисперсий информация берется из паспортных данных на аппаратуру или определяется эмпирически (см., например, [Rizos, 1999; Eckl et al., 2001]). Использование эмпирически выведенной информации о дисперсиях для модификации ковариационных матриц теперь является общепринятой практикой при объединении решений отдельных базовых линий, решений отдельных сессий или решений по многим сессиям. Обычно оценки параметра a лежат в диапазоне примерно 5 – 40 мм, а оценки параметра b – в пределах $(2 – 10)\cdot 10^{-6}$, в зависимости от качества первичной обработки сети. Параметры a' и b' в 2-3 раза больше.

Возможно несколько способов использования дисперсии из оценок a и b:

– величина σ^2 для определенных базовых линий принимается одинаковой для всех трех компонент: K_{11}, K_{22}, K_{33};

– ко всем трем компонентам базовых линий могут применяться одинаковые величины a или разные величины для каждой из компонент

базовых линий (a_X, a_Y, a_Z). Ковариационную матрицу $\mathbf{K}_{XYZ}$ можно трансформировать в топоцентрическую форму $\mathbf{K}_{ENU}$, используя соотношение:

$$\mathbf{K}_{ENU} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{K}_{XYZ} \cdot \mathbf{R}^T, \qquad (11.90)$$

где матрица $\mathbf{R}$ определяется формулой (11.76), и назначить разные величины для плановых компонент a_E, a_N, возникающих из-за ошибок центрирования, и для вертикального компонента a', предполагающего ошибки в высоте антенны;

– величина b предполагается связанной с длиной базовой линии и распределяется в соответствии с длинами компонент базовой линии, в этом случае дисперсии аппроксимируются как:

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= (a_X + b \cdot \Delta X)^2; \\ \sigma_Y^2 &= (a_Y + b \cdot \Delta Y)^2; \\ \sigma_Z^2 &= (a_Z + b \cdot \Delta Z)^2; \end{aligned} \qquad (11.91)$$

– величину b можно связать с длиной базовой линии и оценивать в соответствии со стандартными отклонениями оцененных компонент базовых линий, в этом случае дисперсии аппроксимируются выражениями:

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= (a_X + b \cdot \frac{\sigma_{\Delta X}}{\sigma_D} \cdot \Delta X)^2; \\ \sigma_Y^2 &= (a_Y + b \cdot \frac{\sigma_{\Delta Y}}{\sigma_D} \cdot \Delta Y)^2; \\ \sigma_Z^2 &= (a_Z + b \cdot \frac{\sigma_{\Delta Z}}{\sigma_D} \cdot \Delta Z)^2, \end{aligned} \qquad (11.92)$$

где $\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}, \sigma_{\Delta Z}$ – средние квадратические ошибки (стандартные отклонения) определения компонент базовой линии; σ_D – средняя квадратическая ошибка в длине базовой линии;

– в матрице $\mathbf{K}_{ENU}$ можно назначить разные значения a и b для плановых и вертикальных компонент (например, для учета того факта, что определение высоты грубее определения плановых компонент):

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= (a_E + b_E \cdot D)^2; \\ \sigma_N^2 &= (a_N + b_N \cdot D)^2; \\ \sigma_U^2 &= (a' + b' \cdot D)^2. \end{aligned} \qquad (11.93)$$

Заметим, что для коротких базовых линий более характерно влияние постоянных компонент a, a′, а для длинных базовых линий большее значение имеет зависимость от компонент b, b′.

Хотя есть несколько методов для вычисления дисперсии, есть также и несколько возможностей для того, как их использовать для модификации исходных матриц $\mathbf{K}_{XYZ}$ или $\mathbf{K}_{ENU}$:

– вычисленная из обработки фазовых данных матрица игнорируется и заменяется диагональной матрицей, содержащей только выведенные дисперсии σ^2. Здесь нет ковариационных членов, соответственно, корреляции между компонентами базовой линии отсутствуют;

– можно сохранить вычисленную при первичном уравнивании ковариационную матрицу и добавить соответствующую величину дисперсии σ^2 к диагональным элементам матрицы. Сохранение исходных членов ковариаций означает, что изменились корреляции между компонентами базовой линии;

– можно образовать новую ковариационную матрицу $\mathbf{K}'_{XYZ}$, используя новую информацию о дисперсии σ^2 и исходную информацию о корреляциях. В этом случае вначале вычисляются коэффициенты корреляции по исходной информации из ковариационных матриц:

$$r_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}; \quad r_{XZ} = \frac{\sigma_{XZ}}{\sigma_X \sigma_Z}; \quad r_{YZ} = \frac{\sigma_{YZ}}{\sigma_Y \sigma_Z}. \qquad (11.94)$$

Затем определяются новые дисперсии $\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_Z^2$, и образуется новая ковариационная матрица:

$$\mathbf{K}'_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & r_{XY}\sigma_X\sigma_Y & r_{XZ}\sigma_X\sigma_Z \\ r_{YX}\sigma_Y\sigma_X & \sigma_Y^2 & r_{YZ}\sigma_Y\sigma_Z \\ r_{ZX}\sigma_Z\sigma_X & r_{ZY}\sigma_Z\sigma_Y & \sigma_Z^2 \end{bmatrix}. \qquad (11.95)$$

Последняя возможность предпочтительнее.

Если уравнивание производится на эллипсоиде, то матрицы K_{ENU} конвертируются в ковариационные матрицы для геодезических азимутов, длин геодезических линий и приращений геодезических высот:

$$\mathbf{K}_{ASH} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{K}_{ENU} \cdot \mathbf{J}^T. \qquad (11.96)$$

Матрица Якоби **J** находится путем дифференцирования функций для *A*, *S*, ΔH:

$$\boldsymbol{J} = \frac{\partial(A, S, \Delta H)}{\partial(E, N, U)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial E} & \frac{\partial A}{\partial N} & \frac{\partial A}{\partial U} \\ \frac{\partial S}{\partial E} & \frac{\partial S}{\partial N} & \frac{\partial S}{\partial U} \\ \frac{\partial H}{\partial E} & \frac{\partial H}{\partial N} & \frac{\partial H}{\partial U} \end{bmatrix}. \qquad (11.97)$$

Выражения для некоторых частных производных из (11.97) можно найти в книге [Leick, 1995].

Поскольку азимут *A* и длина геодезической *S* не зависят от компонента *U*, то в итоге дополнительная ошибка центрирования m_c увеличивает дисперсии в азимуте и длине геодезической, а дополнительная ошибка высоты антенны увеличивает дисперсию в ΔH.

Можно сразу разложить ошибку m_c на дополнительную ошибку азимута m_A и ошибку длины геодезической m_S и ввести соответствующие дополнительные дисперсии в матрицу $\mathbf{K}_{AHS}$.

Еще один прием корректировки ковариационной матрица описан в руководстве [TRIMNET, 1991]. В этом методе, называемом *стратегией суммирования* назначаются дополнительные ошибки для азимутов, длин геодезических и приращений эллипсоидальных высот. Эти дополнительные ошибки возводятся в квадрат и складываются с соответствующими дисперсиями в ковариационных матрицах $\mathbf{K}_{AHS}$. Суммирование может

производиться либо для одного какого-либо вида параметров, либо для их комбинаций. Величина дополнительной ошибки для каждой базовой линии может назначаться индивидуально, либо одинаковой для всех базовых линий.

К сожалению, приходится констатировать, что у пользователя коммерческой программы уравнивания спутниковой сети выбор методов построения стохастической модели уравнивания обычно ограничен 2-3 опциями программного обеспечения.

11.6.4. Решение системы уравнений поправок для сети

Решение составленной системы уравнений поправок (11.67)

$$\mathbf{AX} + \mathbf{l} = \mathbf{v}$$

с исправленными априорными ковариационными матрицами вида (11.85), (11.95) производится в соответствии с условием $\mathbf{v}^T\mathbf{Pv} = \min$ в следующем порядке:

– из модифицированных ковариационных матриц $\mathbf{K}'$ отдельных линий или отдельных сессий составляется полная ковариационная матрица $\mathbf{K}$ для всей сети;

– находится полная весовая матрица $\mathbf{P}$ через назначаемую априорную дисперсию единицы веса $\sigma^2_{a\ priori}$:

$$\mathbf{P} = \sigma^2_{a\ priori}\mathbf{K}^{-1}, \qquad (11.98)$$

– составляется система нормальных уравнений

$$\mathbf{NX} + \mathbf{L} = \mathbf{0}, \qquad (11.99)$$

в которой

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T\mathbf{PA}; \quad \mathbf{L} = \mathbf{A}^T\mathbf{Pl}; \qquad (11.100)$$

– находится вектор оцененных параметров

$$\hat{\mathbf{X}} = -\mathbf{N}^{-1}\mathbf{L}; \qquad (11.101)$$

– вычисляется вектор оцененных поправок в измерения $\hat{\mathbf{v}}$, находится величина $\hat{\mathbf{v}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{v}}$ путем прямого суммирования взвешенных квадратов поправок, либо через свободные члены уравнений поправок:

$$\mathbf{v}^T\mathbf{Pv} = \mathbf{l}^T\mathbf{Pl} - (\mathbf{A}^T\mathbf{Pl})^T\hat{\mathbf{X}}; \qquad (11.102)$$

– оценивается апостериорная дисперсия единицы веса

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{v}}}{r}, \qquad (11.103)$$

где r – число степеней свободы (число избыточных измерений), равное разности числа всех измерений $n = 3d$ (d – число базовых линий) и числа неизвестных $u = 3N$ (N – число определяемых пунктов), то есть $r = n - u = 3d - 3N$;

– составляются ковариационные матрицы уравненных параметров (прямоугольных координат пунктов) $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}}$ и поправок в измерения $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}$:

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}} = \hat{\sigma}_0^2(\mathbf{A}^T\mathbf{PA})^{-1}; \qquad (11.104а)$$

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}} = \mathbf{K} - \mathbf{A}\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}}\mathbf{A}^{-T}. \qquad (11.104б)$$

Их может дополнять полная ковариационная матрица приращений координат между всеми пунктами сети.

Начальная стадия уравнивания сети – это свободное уравнивание. Оно дает возможность оценить внутреннюю точность сети, проверить оценки погрешностей отдельных определений базовых линий и выявить любые промахи в них.

Для обращения нормальной матрицы $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T\mathbf{PA}$ и получения единственного решения нормальных уравнений необходимо определить начало координатной системы в геодезической сети, иначе матрица коэффициентов будет иметь дефект ранга. В этом случае возможно решение с применением псевдообращения матриц. Можно зафиксировать координаты одной из станций и выполнить минимально ограниченное уравнивание. Иногда фиксируется центр тяжести сети («центроид»), определенный по априорным координатам пунктов. Ковариационная матрица в таком решении имеет минимальный след и является удобным индикатором точности сети. Из этой ковариационной матрицы легко вычисляется эллипсоид ошибок для каждой станции. Независимо от выбора начала сети, уравненные базовые векторы будут одними и теми же.

При ограниченном уравнивании все опорные точки фиксируются на их каталожных положениях, а остальная сеть подстраивается под них. Этот этап уравнивания используется для вычисления окончательных координат и оценки ошибок на контрольных станциях. Кроме того, в процессе ограниченного уравнивания производятся преобразование координат в нужную систему координат и перевод измеренных разностей геодезических высот в разности нормальных высот, о чем будет рассказано ниже.

Решение систем уравнений поправок выполняется методом итераций, в котором добиваются сходимости уравненных координат. Это объясняется тем, что коэффициенты в уравнениях наблюдений при поправках в координаты зависят от самих координат и, как в любой линеаризованной модели, точны только при малых координатных сдвигах [Bock et al., 1985; TRIMNET…, 1991; Leick, 1995; Герасимов, 1996; Маркузе, 1997; Rizos, 1999; Глушков и др., 2002].

11.6.5. Анализ результатов уравнивания сети

Результаты уравнивания. Результатами уравнивания спутниковой сети являются оцененные параметры (прямоугольные, геодезические или плоские координат и высоты пунктов сети) и характеристики их точности, задаваемые в апостериорной ковариационной матрице. Ковариационная матрица решения $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}}$ содержит дисперсии оцененных параметров и корреляции между ними. Эти данные используются для построения эллипсов ошибок (или эллипсоидов ошибок) положений пунктов или для построения эллипсов ошибок линий, характеризующих точность уравненных параметров. В дополнение к параметрам и их точностям, из решения получается другая полезная информация: это поправки в наблюдения (или остаточные невязки) $\hat{v}_i$, их ковариационная матрица $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}$, гистограммы распределения ошибок, числа избыточности r_i.

Теория МНК не требует, чтобы остаточные невязки наблюдений имели нормальное распределение. Однако если ошибки наблюдений имеют Гауссово нормальное распределение, то можно ожидать нормально распределённые остаточные невязки. Поэтому по остаточным невязкам можно выполнить несколько статистических тестов. Статистические тесты можно применить для оценки качества наблюдений и для выявления аномальных ошибок (отскоков) в измерениях [Герасименко, 1998; Rizos, 1999].

Статистическое тестирование. Уравнивание по МНК геодезических сетей редко немедленно дает приемлемые результаты по ряду различных причин. Поэтому результаты уравнивания должны быть проверены (протестированы), чтобы выявить и устранить любые ошибочные влияния. Тестирования можно применить к любому решению по МНК любых типов измерений.

Тестирование начинается с нулевой гипотезы H_0, которая описывает некоторую проверяемую ситуацию. Если нулевая гипотеза отвергается, то принимается альтернативная гипотеза H_A. Для выполнения тестирования вычисляются статистики, характеристики которых, в частности, функция плотности вероятности, хорошо известны, если гипотеза H_0 верна. В зависимости от величины вычисленного значения статистики, принимаемой за критерий, делается решение принять или отвергнуть гипотезу H_0.

При выполнении тестирования возможны ошибки двух родов:

– гипотеза H_0 отвергается, хотя на самом деле она должна быть принята. Это ошибка I рода, вероятность ее совершения определяется *уровнем значимости* теста α. Если уровень доверия выбран 95%, то $\alpha = 0.05$;

– гипотеза H_0 принимается, хотя на самом деле она должна быть отвергнута. Это ошибка II рода, вероятность ее совершения обозначается как β. Величина $1 - \beta$ называется *мощностью теста*.

Процедура тестирования может быть представлена в следующем виде:

– выбор нулевой гипотезы H_0;

– вычисление принятого критерия t;

– выбор уровня значимости α и вычисление по известной плотности вероятности P критерия t его критического значения p, которое может быть превышено с вероятностью α;

– если $t < p$, то принимается гипотеза H_0, в противном случае она отвергается;

– выбор вероятности β и вычисление по H_A предельно обнаруживаемого значения t (или выбор величины t и вычисление β, то есть вероятности ошибки II рода для этого значения) [Герасименко, 1998].

Тест $\chi 2$. В высокоточных спутниковых измерениях отношение апостериорной и априорной дисперсий должно быть меньше или равно 1. Когда отношение меньше 1, то это говорит о том, что предсказанные ошибки были преувеличены, и, что на самом деле точность выше, чем ожидалось. Когда отношение больше 1, то возможно, что одна или несколько предсказанных

ошибок были недооценены, то есть реальные ошибки оказались больше предсказанных.

Вероятностный тест χ^2 основан на сумме взвешенных квадратов поправок *v*, числе степеней свободы *r* и уровне доверия (проценте вероятности). Назначение этого теста – отвергнуть или принять гипотезу о том, что предсказанные ошибки были точно оценены. Если тест не проходит, то это указывает на то, что все или несколько наблюдений необходимо проверить или даже наблюдать повторно.

Статистикой, используемой для теста $\chi 2$, является квадратичная форма оцененных поправок. Она представляет длину или норму вектора оцененных поправок в наблюдения. Математически квадратичная форма поправок определяется как

$$\left\|\hat{\mathbf{v}}\right\| = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}, \qquad (11.105)$$

где $\hat{\mathbf{v}}$ – вектор оцененных поправок, а $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}$ – ковариационная матрица оцененных поправок. Однако матрица $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}$ (формула (11.104б)) является сингулярной, поскольку имеет ранг, равный числу степеней свободы (дефект ранга равен числу наблюдений минус число степеней свободы). Поэтому квадратичная форма поправок аппроксимируется путем замены $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{v}}}$ на априорную ковариационную матрицу наблюдений **K**, то есть

$$\left\|\hat{\mathbf{v}}\right\| = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{K}^{-1} \hat{\mathbf{v}} = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}} = r \hat{\sigma}_0^2 . \qquad (11.106)$$

Таким образом, тест $\chi 2$ становится тестом на апостериорную дисперсию единицы веса, где нулевая гипотеза H_0 состоит в том, что оцененная (апостериорная) дисперсия единицы веса равна априорной дисперсии единицы веса.

Для выполнения теста χ^2 составляется статистика:

$$\frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{\sigma_0^2} = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}(n-u) \cong \chi^2_{n-u} . \qquad (11.107)$$

Заметим, что *n* - *u* – число степеней свободы уравнивания, которое принимается при отсутствии дефекта ранга в матрице коэффициентов. Основываясь на статистике (11.102), можно выполнить тест по обнаружению нарушения уравнивания. Гипотезы формулируются следующим образом:

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 ; \qquad (11.108а)$$

$$H_A : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 . \qquad (11.108б)$$

Нулевая гипотеза утверждает, что априорная дисперсия единицы веса в статистическом смысле равна апостериорной дисперсии единицы веса. Если численное значение

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}(n-u) = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{\sigma_0^2} \qquad (11.109)$$

таково, что

$$\chi^2 < \chi^2_{n-u,\,1-\alpha/2} ; \qquad (11.110а)$$

$$\chi^2 > \chi^2_{n-u,\,\alpha/2} , \qquad (11.110б)$$

то нулевая гипотеза отвергается. Уровень значимости α, то есть вероятность ошибки I рода или вероятность отвержения нулевой гипотезы, даже если она истинная, обычно фиксируется равным 0.05. Здесь уровень значимости есть сумма вероятностей в обеих ветвях кривой распределения ошибок (рис. 11.7). Вероятность β ошибки II рода (мощность теста), то есть вероятности отвержения альтернативной гипотезы и принятия нулевой гипотезы, хотя альтернативная гипотеза верна, обычно не вычисляется.

При уравнивании спутниковых данных априорная дисперсия единицы веса принимается равной единице. Если невязки наблюдений согласуются с оценками их точности (из ковариационной матрицы) и имеют нормальное распределение, то апостериорная дисперсия единицы веса должна ожидаться в интервале между 0.6 и 1.6, в зависимости от числа степеней свободы $r = n - u$. В программах уравнивания ее обычно называют *масштабным показателем точности* (reference factor). Он выводится и для всей сети, и для каждого наблюдения.

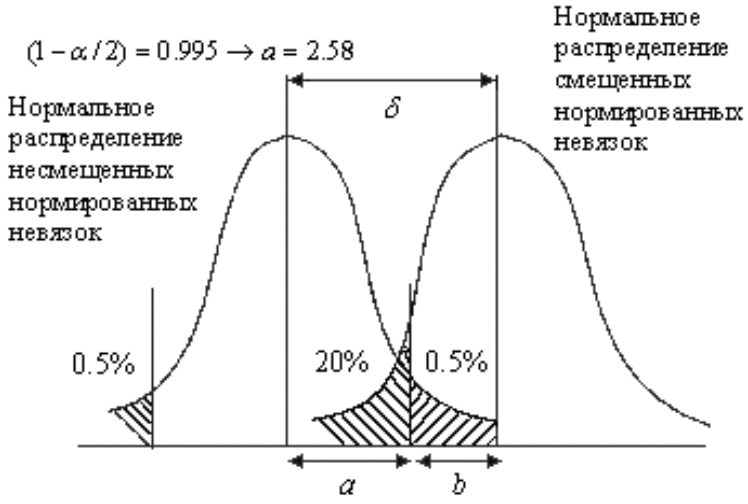


Рис. 11.7. Несмещённое и смещённое нормальное распределение остаточных невязок [Rizos, 1999]

Поскольку величина $\chi_r^2 = \hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}^{-1} \hat{\mathbf{v}}$, являющаяся тестовой статистикой, следует распределению χ^2 с r степенями свободы, где r – число избыточности, то ожиданием χ_r^2 является число избыточности: $E(\chi_r^2) = r$, следовательно, $E(\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}^{-1} \hat{\mathbf{v}}) = r$, или $E\left(\dfrac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{r}\right) = \dfrac{r}{r}$, поэтому $E(\hat{\sigma}_0^2) = 1$.

Если тест для сети проходит, то это свидетельствует о нормальном распределении ошибок измерений и о том, что достигнутая точность соответствует ожидавшейся точности. С помощью χ^2-теста оценивается приемлемость всего уравнивания, поэтому такие тесты называют глобальными. В том случае, если тест не удается, можно указать на наличие одной или нескольких из следующих проблем:

– слабые оценки средних квадратических ошибок и корреляций между наблюдениями. Остаточные невязки наблюдений значительно больше или

меньше, чем априорные средние квадратические ошибки. Это говорит о том, что априорная ковариационная матрица K не соответствует ожиданию и требует повторного корректирования;

– неадекватная модель для учета систематических ошибок, или фиксировалось недостаточное количество параметров;

– большие ошибки в одном или большем числе наблюдений, например, грубые ошибки в измерении высоты антенны, передаваемые в неправильное решение базовой линии;

– низкое качество (точность) наблюдений, например, из-за недостаточной продолжительности сессий;

– ошибки при вводе данных (наблюдений, соответствующих параметров или переключателей опций) [Герасименко, 1998; Падве, 2005; Leick, 1995; Rizos, 1999; Krakiwsky et al., 1999].

Тестирование ошибок измерений. При тестировании ошибок измерений предполагается, что остаточные невязки имеют нормальное распределение. Следовательно, прежде чем проводить статистические тесты, может понадобиться проверка того, что невязки имеют нормальное распределение.

Знакомая кривая частоты нормального распределения, имеющая форму колокола (см. рис. 11.7), показывает, что сравнительно большие невязки должны встречаться значительно реже, чем малые. Например, 99.7% всех невязок должны быть меньше, чем утроенная средняя квадратическая ошибка, вычисленная по невязкам.

Если одна или несколько невязок значительно превышают другие невязки в наборе, тогда нужно решить:

– являются ли аномальные наблюдения экстремальным случаем в нормальном распределении, и в таком случае его нужно сохранить, или

– является ли это наблюдение указанием на содержание аномальных ошибок, известных как «отскоки» или «промахи», и тогда его нужно удалять.

Границей между большой ошибкой, относящейся к нормальному распределению, и аномальной ошибкой из альтернативного распределения является *критическое значение*, которое устанавливается в зависимости от принятой вероятности. Для вероятностей 95, 99 и 99.9% критические значения составляют, соответственно, 1.96σ, 2.58σ и 3.29σ. Величина, выбранная для критического значения, будет также определять, какой процент хороших наблюдений будет некорректно отвергнутым. Если в качестве критического значения выбрана величина 2.58σ (уровень доверия 99%), то ожидается, что будет отвергнут 1% хороших данных (вместе с любыми наблюдениями, имеющими «истинные» большие ошибки), – это и есть ошибки I рода.

Второй тип ошибочного исхода тестирования наблюдений по невязкам состоит в *принятии* плохого наблюдения (которое, как предполагается, принадлежит нормальному распределению), которое должно быть *отвергнуто* (то есть принадлежит альтернативному распределению) – в литературе по статистике считается ошибкой II рода. Вероятность совершения ошибки II рода рассматривается как мощность теста β (равна 0.30, 0.20 и 0.10, что соответствует

вероятностям 30, 20 и 10%). Следовательно, если мощность установлена на 20%, то это значит, что есть 20% вероятности неправильного принятия наблюдений, которые должны быть отвергнуты (или 80% вероятности правильного выявления аномальных ошибок). Альтернативное распределение может быть нормальным распределением, но с другим средним и средней квадратической ошибкой. Такая ситуация возможна, если наблюдения оказались систематически смещенными на некоторую величину.

Когда наблюдения *не смещены* (то есть не содержат большую ошибку), нормированные невязки центрируются в левой части нормального распределения (см. рис. 11.7). Это наблюдение принимается внутри набора границ посредством выбора уровня значимости (здесь 1 или 0.5% с каждой стороны от значения). Однако если наблюдение смещено, то нормированная невязка будет также смещена, и её распределение будет центрировано относительно другого среднего (правая сторона кривой нормального распределения). Здесь также есть возможность того, что величина аномальной нормированной невязки будет в пределах между -2.58σ и +2.58σ, и будет ошибочно принята как несмещённая невязка. Вероятность этого события равна 20%. Величину δ рассматривают как верхнюю границу, равную сумме a и b, где a – функция параметра α, а b – функция параметра β. К примеру, если α = 0.01, а β = 0.20, то a = 2.58 и b = 0.84, что даёт в результате δ = 3.42 [Rizos, 1999].

Тау тест. Тест был предложен американским ученым Поупом (Pope A.J.). В этом тесте ошибки II рода не учитываются. Тест принадлежит к группе тестов Стьюдента, которые используют полученную из наблюдений апостериорную дисперсию единицы веса. Статистика теста, в соответствии с [Leick, 1995], представляется как

$$\tau_i = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_{v_i}} = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_0\sqrt{q_i}} = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_0\sqrt{r_i / p_i}} = \frac{\sigma_0}{\hat{\sigma}_0}\frac{v_i}{\sigma_i\sqrt{r_i}} \sim \tau_{n\text{-}r}. \qquad (11.111)$$

Символом $\tau_{n\text{-}r}$ обозначено τ-распределение с $n - r$ степенями свободы. Оно связано со статистикой Стьюдента t через соотношение:

$$\tau_{n-r} = \frac{\sqrt{n-r}\; t_{n-r-1}}{\sqrt{n-r-1+t^2_{n-r-1}}}. \qquad (11.112)$$

При бесконечно большом числе степеней свободы τ-распределение стремится к распределению Стьюдента или к нормальному распределению, то есть $\tau_\infty = t_\infty = n(0,1)$.

При выполнении τ-теста проверяется гипотеза о том, что все невязки следуют нормальному распределению: $v_i \sim n(0, \sigma_{v_i}/\hat{\sigma}_0)$ для всех i. Гипотеза отвергается, то есть наблюдение отмечается флагом для дальнейшего исследования и возможного отвержения, если

$$|\tau_i| \geq c. \qquad (11.113)$$

Критическое значение c выбирается в соответствии с уровнем значимости $\alpha = P(\tau_{\max} > c)$, для которого используется фиксированное, заранее выбранное значение, скажем, α = 0.05. Критическое значение c связано с числом

наблюдений в уравнивании n: $P(\tau_i > c) = \alpha / n$. Таким образом, критическое значение определяется как

$$\int_c^{\infty} \tau_{n-r} dx = \frac{\alpha}{2n}. \qquad (11.114)$$

Критическое значение c становится функцией числа степеней свободы и количества наблюдений.

Метод *data snooping*. Разработанный голландским геодезистом В. Баарда (Willem Baarda) метод *data snooping* («просмотр данных»), или w-тест, также часто применяется к тестированию индивидуальных поправок. Теория метода предполагает, что в наборе наблюдений присутствует только один промах. Нулевая гипотеза записывается как

$$n_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_i}} \sim n(0, 1). \qquad (11.115)$$

При уровне значимости 5% критическое значение равно 1.96. Критическое значение для этого теста не является функцией числа наблюдений в уравнивании. Статистика (11.115) использует априорное значение σ_0 , а не апостериорную оценку $\hat{\sigma}_0$.

Статистики (11.111) и (11.115) являются функциями индивидуальных чисел избыточности r_i. Для данного размера поправок соответствующие наблюдения являются более вероятно отвергаемыми в тех случаях, когда меньше числа избыточности. Поскольку принятие промахов увеличивается с уменьшением чисел избыточности, повышенная чувствительность критического значения к малым числам избыточности представляется желательным свойством. И τ-тест, и метод *data snooping* хорошо работают в итеративных решениях. На каждой итерации наблюдения с наибольшим промахом должны удаляться. Поскольку МНК пытается распределить грубые ошибки, несколько правильных наблюдений могли бы принять на себя большие поправки и быть отмечены флагами ошибочно.

Стратегия поиска ошибок. Поскольку все поправки в уравнивании обычно коррелированны, отвержение измерений должно проходить последовательно, шаг за шагом, каждый раз исключая по одной большой ошибке. Вначале из вектора наблюдений удаляется самая большая невязка, отмеченная как аномальная, уравнивание повторяется, и тестирование невязок выполняется вновь. Удаление одного измерения в уравнивании может значительно влиять на результаты и изменять характер ошибок и связанных с ними тестовых статистик. Следовательно, удаление многих измерений может приводить к ошибочному выбрасыванию хороших данных.

В случае единственной аномальной ошибки в уравнивании, представляющей один компонент базовой линии, нужно бы удалять не только наблюдение этого компонента, но и всю базовую линию (то есть все три компонента). Дальнейшая проблема состоит в том, что три наблюдения базовой линии коррелированны, что делает статистическое тестирование ненадежным. Более оправдано было бы удаление только плановых компонент или только высотной компоненты вектора.

Статистика *w*-теста имеет стандартное нормальное распределение, когда нет отскоков в уравнивании. В ситуации, когда статистика теста превосходит критическое значение при желаемом уровне значимости, соответствующее измерение отмечается флагом возможной аномальной ошибки. Тест выполняется для каждого измерения, и наибольшая величина (когда один отскок может вызывать неудачу множественного теста), которая превосходит максимальное значение, считается отскоком и удаляется из модели. Такое *w*-тестирование выполняется вновь, чтобы посмотреть, нет ли еще отскоков. Если находится другая аномальная ошибка, ее удаляют из модели, а измерение, которое первым рассматривалось отскоком, восстанавливается, и модель тестируется вновь. Такая процедура *data snooping* повторяется до тех пор, пока никакие аномальные ошибки больше не будут выявляться.

В том случае, когда уравниваемая сеть достаточно сложная, целесообразно для выявления ошибок разбивать ее на части, и каждую часть тестировать отдельно. Другой выход – начать уравнивание с некоторой части сети и затем постепенно наращивать сеть, выполняя последовательное тестирование [Герасименко, 1998; Leick, 1995; Rizos, 1999].

Точность. Средние квадратические ошибки координат находятся как квадратные корни из диагональных элементов ковариационной матрицы параметров $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{x}}}$. Очень часто для представления точности координат используются эллипсы или эллипсоиды ошибок. В случае плановых координат ковариационная матрица координат точек, извлечённая из полной ковариационной матрицы, имеет вид:

$$\mathbf{K}_{\hat{E}\hat{N}} = \begin{bmatrix} \sigma_E^2 & \sigma_{EN} \\ \sigma_{EN} & \sigma_N^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_E^2 & r\sigma_E\sigma_N \\ r\sigma_E\sigma_N & \sigma_N^2 \end{bmatrix}, \qquad (11.116)$$

где $r = \dfrac{\sigma_{EN}}{\sigma_E\sigma_N}$ – коэффициент корреляции; σ_E и σ_N – средние квадратические ошибки координат; σ_{EN} – ковариация между координатами.

Эллипс показывает размеры области доверия к координатам отдельной точки, независимо от любых других точек в уравнивании. Чтобы определить эллипс ошибок, необходимо определить размер и ориентировку большой и малой полуоси эллипса. Дирекционный угол α направления, для которого дисперсия σ_x^2 максимальна, равен

$$tg\alpha = \frac{2\sigma_{EN}}{\sigma_N^2 - \sigma_E^2}. \qquad (11.117)$$

Формулы для большой полуоси *a* и малой полуоси *b* имеют вид:

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sqrt{(\sigma_E^2 - \sigma_N^2)^2 + 4(\sigma_{EN})^2}\right)}; \quad (11.118)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\sigma_E^2 + \sigma_N^2 - \sqrt{(\sigma_E^2 - \sigma_N^2)^2 + 4(\sigma_{EN})^2}\right)}. \qquad (11.119)$$

Если строятся «стандартные» эллипсы ошибок (формулы (11.118) и (11.119)), то вероятность того, что точка будет в эллипсе, для двухмерного

случая равна 39%. Нередко даются эллипсы с уровнем доверия 95%, то есть в 2.45 раза больше их «стандартного» размера.

Часто более важно получать оценки точности относительных положений точек, а не их абсолютных положений. Эти оценки можно также найти по ковариационным матрицам координат. Рассмотрим две точки A и B, соответствующая им часть ковариационной матрицы есть:

$$\mathbf{K}_{\widehat{E}\widehat{N}_{AB}} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{E_A} & \sigma_{E_A,N_A} & \sigma_{E_A,E_B} & \sigma_{E_A,N_B} \\ \sigma_{N_A,E_A} & \sigma^2_{N_A} & \sigma_{N_A,E_B} & \sigma_{N_A,N_B} \\ \sigma_{E_B,E_A} & \sigma_{E_B,N_A} & \sigma^2_{E_B} & \sigma_{E_B,N_B} \\ \sigma_{N_B,E_A} & \sigma_{N_B,N_A} & \sigma_{N_B,E_B} & \sigma^2_{N_B} \end{bmatrix}. \qquad (11.120)$$

Тогда

$$\sigma_{\Delta E,\Delta E} = \sigma^2_{E_A} - 2\sigma_{E_A,E_B} + \sigma^2_{E_B}; \qquad (11.121а)$$

$$\sigma_{\Delta N,\Delta N} = \sigma^2_{N_A} - 2\sigma_{N_A,N_B} + \sigma^2_{N_B}; \qquad (11.121б)$$

$$\sigma_{\Delta E,\Delta N} = \sigma_{N_B,E_B} + \sigma_{N_A,E_A} - \sigma_{N_B,E_A} - \sigma_{N_A,E_B}. \quad (11.121в)$$

Ориентировку и длину большой и малой полуосей эллипсов для линий можно получить из уравнений вида (11.117), (11.118) и (11.119) тем же способом, что и для эллипсов точек [Rizos, 1999; Strang, Borr, 1997; Глушков и др., 2002].

Точность можно проконтролировать путем сравнения с заранее установленной информацией. Обычно этот контроль включает вычисление ошибок по разностям на контрольных точках, которые являются геодезическими точками с известными координатами, не включавшимися в уравнивание фиксированными. При избыточном числе опорных пунктов этот прием используется для выявления ошибок в исходных данных. Другой метод – вначале уравнять сеть с минимальными ограничениями или как свободную сеть, в любом случае, без внешних влияний на форму сети; затем используется 7-параметрическое (или 4-параметрическое – для плановой сети) преобразование, чтобы подогнать свободно уравненную сеть ко всем фиксированным точкам через пост-обработку. Невязки после этого эффективно указывают ошибки, такие же, как по контрольным точкам.

Числа избыточности. Важную информацию могут также давать *числа избыточности*. Числа избыточности для векторов изменяются от нуля до трёх. Проверка выбранного набора чисел избыточности обнаруживает те части сети, которые содержат либо избыточные наблюдения (буквально), либо, более опасно, недостаточные наблюдения. Нулевая избыточность подразумевает наличие станций, которые определяются только одним вектором. Это создает полностью неконтролируемую ситуацию. Необходимо исследовать наименьшие числа избыточности. К примеру, если станция определяется двумя векторами, и у одного из этих векторов было уменьшение веса в автоматизированной процедуре поиска ошибок, то другой вектор имеет малое число избыточности, даже если он может оказаться правильным и точно определённым вектором. Из-за того, что у второго вектора уменьшили вес, здесь создаётся особенно неконтролируемая ситуация. Для больших сетей числа избыточности являются

прекрасным средством для нахождения слабых мест сети. Нужно не только проверять число избыточности для векторов, но и вычислять среднее число избыточности для каждой станции. Малые числа избыточности для станции указывают на области, которым были бы полезны дополнительные наблюдения [Leick, 1994a, 1995].

11.7. Локальные преобразования координат и высот в спутниковых технологиях

11.7.1. Преобразования координат

Проблема локального преобразования. Построение геодезических сетей с применением спутниковых технологий производится в системах координат, оси которых параллельны осям геоцентрической системы (WGS-84, ПЗ-90, ITRF), в зависимости от того, в какой системе даются эфемериды спутников. Кроме того, из-за недостаточно точного определения геоцентрических координат начальной точки сети ее система координат получает некоторое дополнительное смещение относительно геоцентра. Практически получается, что каждая сеть развивается в своей системе координат.

Традиционные геодезические сети и спутниковые сети имеют близкие масштабы, близкую ориентировку (расхождения в пределах нескольких секунд дуги), так как при их построении вводятся поправки за движение полюса. Однако взаимные сдвиги координатных систем могут быть весьма значительными. В дополнение к ошибкам геоцентрических координат начальной точки спутниковой сети сказываются смещения из-за выбора начала референц-эллипсоида и локальные деформации традиционных геодезических сетей. Большие сдвиги и углы разворота также могут иметь место при трансформировании спутниковых сетей в условные системы координат. В совокупности эти причины приводят к тому, что одного набора параметров перехода между системами координат оказывается недостаточно, и поэтому для каждого проекта сети находится свой набор параметров, для чего разработаны методы локального трансформирования координат.

Для определения параметров преобразования координат пунктов геодезической сети достаточно для нескольких точек иметь координаты в обеих системах. Составив уравнения связи координат в двух системах для известных (опорных) точек и определив из решения системы уравнений параметры трансформирования, можно перевести координаты остальных точек в нужную систему. Трехмерное трансформирование требует для общих станций либо эллипсоидальных высот, либо нормальных высот и высот квазигеоида над эллипсоидом.

В процессе преобразования должны решаться следующие задачи:

– нахождение максимально точных оценок для параметров трансформирования (то есть параметров масштаба, сдвига и вращения);

– достижение такой комбинации координатных систем, которая уменьшает поправки к наблюдениям;

– учет стохастической модели сети.

В зависимости от требуемых результатов, наличия априорной информации и других факторов, применяется *классический* или *интерполяционный* тип преобразования (см. раздел 2.9). Если необходимо сохранить геометрию существующей спутниковой сети, то должно применяться классическое 7-парамет-рическое преобразование. Если же необходимо наилучшим образом подогнать спутниковую сеть под уже существующую сеть, то адекватным является интерполяционный подход, в котором геометрия сети не сохраняется. Практически это решается при выполнении уравнивания с ограничениями в соответствующих фирменных программных продуктах, поставляемых производителями спутниковой аппаратуры (см., например, [Залуцкий, 2000]).

Среди классических методов локального трансформирования координат чаще всего применяется *преобразование подобия* в декартовых или эллипсоидальных координатах (методы Гельмерта и Молоденского). В этом преобразовании масштабный коэффициент одинаков во всех направлениях, вследствие чего сохраняется форма сети, то есть не искажаются углы, но длины линий и положения точек могут изменяться.

Из интерполяционных методов локального трансформирования координат по произвольно расположенным точкам наиболее известны такие методы, как метод нелинейной многопараметрической регрессии, метод обобщенной средневзвешенной интерполяции, метод трендовых поверхностей, метод полиномиальной интерполяции, различные варианты сплайн-интерполяции и т. д. В спутниковых технологиях для локального преобразования координат референцных систем широко используется метод нелинейной многопараметрической регрессии.

Проблема корректного совместного использования спутниковых и наземных геодезических сетей осложняется наличием трех факторов.

– Первый фактор – точностной. Он заключается в том, что пока на территорию России не построена высокоточная Государственная геодезическая сеть, часто приходится делать привязку спутниковой сети к пунктам триангуляции 1 – 4 классов. В этом случае точность относительного положения пунктов спутниковой сети на 1-2 порядка выше соответствующей точности Государственной геодезической сети, вследствие чего после уравнивания спутниковая сеть значительно теряет в точности.

– Второй фактор – физический. Он состоит в том, что плановая и высотная государственные основы не образуют единую трехмерную пространственную координатную систему. Плановая сеть (широты, долготы) создана в геометрической системе отсчета (относительно референц-эллипсоида), а высотная сеть (нормальные высоты) – в гравитационной системе – относительно квазигеоида (или геоида). Спутниковая сеть – в противоположность наземной – образует трехмерную пространственную систему с примерно равными по точности координатами.

– Третий фактор – математический. Он заключается в том, что на локальной области система уравнений связи координат плохо обусловлена. В условиях неизбежных погрешностей измерений и модели встает задача

корректного выделения из всей совокупности исходной информации устойчивой части решения, согласованной с точностью входных данных [Гиенко, 2002].

Математические модели трансформирования. Проблемы, связанные с первыми тремя факторами, могут быть решены разработкой регулярной методики трансформирования координат, отвечающей следующим системным требованиям:

– математическая модель трансформирования должна быть *адекватна* как в пространстве измерений, так и в пространстве оцениваемых параметров;

– математическая модель трансформирования должна быть *наблюдаема*, то есть должно существовать взаимно однозначное соответствие между множеством оцениваемых параметров модели и множеством измерений;

– алгоритм оценивания параметров модели должен быть *состоятелен*, то есть, критерий качества решения задачи при заданных условиях опыта должен обеспечивать получение оптимальных оценок.

Математическая модель трансформирования должна обеспечивать пространственное преобразование спутниковой геодезической сети в референцную систему координат без изменения геометрии и масштаба сети. Чтобы не допустить потери точности при воспроизведении координат, относительная погрешность математической модели трансформирования $\delta_{\text{мод.}}$ должна быть, как минимум, на порядок меньше погрешности высокоточных спутниковых измерений (порядка 10^{-6}), то есть должно выполняться условие $\delta_{\text{мод.}} \le 10^{-7}$ [Гиенко, 2002].

Модели преобразования прямоугольных координат. Преобразование подобия из координатной системы СК1 в систему СК2 (координаты в этих системах распознаются по нижним индексам 1 и 2) выполняется с помощью вектора переноса $\mathbf{T} = (T_X,\ T_Y,\ T_Z)^T$, ортогональной матрицы $\mathbf{E}$ вращения на малые углы $\omega_X,\ \omega_Y,\ \omega_Z$ вокруг соответствующих осей системы СК1 и масштабного коэффициента μ (*модель Гельмерта*):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & \mu & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1, \qquad (11.122)$$

или

$$\mathbf{T} + (1+\mu)\cdot\mathbf{E}\cdot\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 = 0. \qquad (11.123)$$

Напомним, что компоненты переноса являются сдвигами, выраженными в системе СК2, и что система СК1 поворачивается и масштабируется. Параметры трансформирования определяются из решения по МНК. Декартовы координаты в обеих системах считаются наблюдениями, к ним должны отыскиваться поправки. Уравнения (11.122) или (11.123) представляют смешанную модель уравнивания [Leick, 1995]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \qquad (11.124)$$

или

$$\mathbf{F}(\tilde{\mathbf{R}}_1 + \mathbf{v}_1, \tilde{\mathbf{R}}_2 + \mathbf{v}_2, \mathbf{p}^0 + d\mathbf{p}) = \mathbf{0}, \qquad (11.125)$$

где $\mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}_2$ – уравненные наблюдения (координаты); $\tilde{\mathbf{R}}_1, \tilde{\mathbf{R}}_2$ – наблюдения (координаты в системах СК1 и СК2); $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ – поправки в координаты; $\mathbf{p} = (T_X, T_Y, T_Z, \mu, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T$ – вектор уравненных параметров трансформирования; $\mathbf{p}^0$ – приближенные параметры трансформирования (обычно $\mathbf{p}^0 = \mathbf{0}$); $d\mathbf{p}$ – поправки в параметры.

Обычная процедура уравнивания происходит под условием $\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v} = min$ (через $\mathbf{P}$ обозначена весовая матрица наблюдений, то есть координат общих станций), применяемому к выражению

$$\mathbf{B}\mathbf{v} + \mathbf{A}d\mathbf{p} + \mathbf{L} = 0, \qquad (11.126)$$

где

$$\mathbf{B} = \left.\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{R}}\right|_{\tilde{\mathbf{R}}_1, \tilde{\mathbf{R}}_2, \mathbf{p}^0}; \ \mathbf{A} = \left.\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}}\right|_{\tilde{\mathbf{R}}_1, \tilde{\mathbf{R}}_2, \mathbf{p}^0}; \ \mathbf{L} = \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{R}}_1, \tilde{\mathbf{R}}_2, \mathbf{p}^0). \qquad (11.127)$$

Каждая станция дает три уравнения в (11.126). Например, для станции A с приближенными параметрами $\mathbf{p}^0 = \mathbf{0}$ уравнения имеют вид:

$$\mathbf{B}_A\mathbf{v}_A + \mathbf{A}_A d\mathbf{p} + \mathbf{L}_A = \mathbf{0}, \qquad (11.128)$$

или

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (v_X)_1 \\ (v_Y)_1 \\ (v_Z)_1 \\ (v_X)_2 \\ (v_Y)_2 \\ (v_Z)_2 \end{bmatrix}_A +$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & -Z_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & -X_1 & 0 & Z_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & 0 & X_1 & -Y_1 \end{bmatrix}_A \cdot \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ \mu \\ \omega_Z \\ \omega_Y \\ \omega_X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 - \tilde{X}_2 \\ \tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2 \\ \tilde{Z}_1 - \tilde{Z}_2 \end{bmatrix}_A = 0. \qquad (11.129)$$

Видоизменением модели (11.129), называемым иногда моделью Бурша – Вольфа, является модель Молоденского – Бадекаса:

$$\mathbf{T} + (1+\mu)\mathbf{E}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_C)_1 - \mathbf{R}_2 = 0, \qquad (11.130)$$

где $\mathbf{R}_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ – вектор положения в системе СК1 для некоторой точки в сети, подлежащей трансформированию. Наиболее вероятный выбор для $\mathbf{R}_C$ – центр тяжести сети. Все другие обозначения в (11.130) – такие же, как в уравнении (11.123). Координаты центра тяжести сети получаются как среднее из координат N пунктов в системе СК1:

$$X_C = \frac{\sum(X)_{1_i}}{N}; \quad Y_C = \frac{\sum(Y)_{1i}}{N}; \quad Z_C = \frac{\sum(Z)_1}{N}. \qquad (11.131)$$

Каждая станция A дает три уравнения вида [Leick, 1995]

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (v_X)_1 \\ (v_Y)_1 \\ (v_Z)_1 \\ (v_X)_2 \\ (v_Y)_2 \\ (v_Z)_2 \end{bmatrix}_A +$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (X-X_C)_1 & (Y-Y_C)_1 & -(Z-Z_C)_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (Y-Y_C)_1 & -(X-X_C)_1 & 0 & (Z-Z_C)_1 \\ 0 & 0 & 1 & (Z-Z_C)_1 & 0 & (X-X_C)_1 & -(Y-Y_C)_1 \end{bmatrix}_A \cdot \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ \mu \\ \omega_Z \\ \omega_Y \\ \omega_X \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \%X_1 - \%X_2 \\ \%Y_1 - \%Y_2 \\ \%Z_1 - \%Z_2 \end{bmatrix}_A = 0. \qquad (11.132)$$

Уравненные координаты, длины базовых линий, коэффициент масштаба, углы вращения, а также их ковариационные матрицы и апостериорная дисперсия в модели Молоденского – Бадекаса будут теми же самыми, что и в модели Бурша – Вольфа. Однако, параметры переноса T_X, T_Y, T_Z будут другие, а их точность на порядок лучше. При этом, хотя дисперсии параметров переноса в модели Молоденского – Бадекаса будут меньше, чем в модели Бурша – Вольфа, и менее коррелированы с другими параметрами, они не являются лучшими оценками членов T_X, T_Y, T_Z: это совершенно разные величины.

Преобразование подобия защищает от чрезмерных деформаций на малых площадях, но на обширных сетях может нарушить локальный масштаб и ориентировку. При уравнительных вычислениях должны учитываться математические аспекты модели преобразования, статистический анализ, ошибки вычислений, надежность результатов уравнивания, зависящая от устойчивости решения. В устойчивом решении малые изменения в наблюдениях дают малые изменения в координатах. На результаты могут также влиять ошибки математической аппроксимации и вычислений (например, ошибки округлений).

Геометрическая формулировка трансформирования подобия представляет континуум – непрерывную совокупность точек. Замена этого континуума дискретным набором общих точек может вызвать ошибки. Более того, при наличии наблюдательных и вычислительных ошибок точность вычисления параметров может значительно изменяться. Это зависит от пространственного распределения используемых точек. К примеру, точки не должны находиться на одной прямой, потому что компоненты вращения вокруг осей, параллельных линии точек, невозможно определить. Для устойчивого решения важно, чтобы точки были хорошо распределены в пространстве. Сеть с неодинаковым

географическим расположением точек приведёт к решению, смещённому к площадям с высокой плотностью. Точки на площадях с низкой плотностью будут в невыгодном положении и иметь, вероятно, большие поправки в свои координаты. Таким образом, желательно равномерное распределение точек [Harvey, 1986].

При определении параметров трансформирования должны быть корректными как математическая модель преобразования, так и стохастическая модель. Как и при обычном уравнивании сети, встает проблема «внутренней» и «внешней» точности. Элементы ковариационных матриц, полученных из решения базовых линий, дают оценки точности по «внутренней» сходимости. Для перехода к оценке по внешней точности необходимо учесть влияние внешних факторов (ошибок центрирования, измерения высоты антенны и др.).

Модель преобразования геодезических координат (модель Молоденского). Преобразование геодезических координат $(B,\ L,\ H)_1$, полученных из спутниковых определений, в набор координат национальной сети $(B,\ L,\ H)_2$ может выполняться трехмерным преобразованием подобия с параметрами преобразования Гельмерта $\mathbf{p} = (T_X, T_Y, T_Z, \mu, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T$. Вместе с разностью больших полуосей эллипсоидов $\Delta a = a_2 - a_1$ и разностью сжатий $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ (или квадратов эксцентриситетов Δe^2) вектор **p** образует вектор геодезических параметров $\mathbf{d} = (T_X, T_Y, T_Z, \mu, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, \Delta a, \Delta\alpha)^T$. В литературе известно несколько форм записи преобразований по методу Молоденского [Молоденский и др., 1961; Герасимов, 1996; Harvey, 1986] и др. Используя разложение в ряд Тейлора с линеаризацией координат в точке $(B,\ L,\ H)_1$, можно записать переход от системы 1 к системе 2 с разделением плановых и высотных компонент.

Для плановых координат имеем [Jäger, Kälber, 2004]:

$$
\begin{aligned}
&B_2 + v_B = B_1 + \partial B_1(\mathbf{d}) = B_1 + \partial B_1(T_X, T_Y, T_Z, \mu, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, \Delta a, \Delta\alpha) = \\
&= B_1 + \left[\frac{-\cos L \sin B}{M+H}\right]_1 T_X + \left[\frac{-\sin L \sin B}{M+H}\right]_1 T_Y + \left[\frac{\cos B}{M+H}\right]_1 T_Z + \\
&+ \left[\sin L \frac{H + NW^2}{M+h}\right]_1 \omega_X + \left[-\cos L \frac{H + NW^2}{M+h}\right]_1 \omega_Y + \\
&+ \left[\frac{-e^2 N \cos B \sin B}{M+H}\right]_1 \mu + \Delta B(\Delta a, \Delta\alpha); \qquad (11.133)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&L_2 + v_L = L_1 + \partial L_1(\mathbf{d}) = L_1 + \partial L_1(T_X, T_Y, T_Z, \mu, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, \Delta a, \Delta\alpha) = \\
&= L_1 + \left[\frac{-\sin L}{(N+H)\cos B}\right]_1 T_X + \left[\frac{\cos L}{(N+H)\cos B}\right]_1 T_Y + \\
&+ \left[\frac{-(H + (1-e^2)N)}{(N+H)\cos B} \cos L \sin B\right]_1 \omega_X + \\
&+ \left[\frac{-(H + (1-e^2)N)}{(N+H)\cos B} \sin L \sin B\right]_1 \omega_Y + \omega_Z + \Delta L(\Delta a, \Delta\alpha). \qquad (11.134)
\end{aligned}
$$

Высотные компоненты трехмерного преобразования выглядят следующим образом:

$$
\begin{aligned}
& H_2 + v_H = H_1 + \partial H_1(\mathbf{d}) = \\
& = H_1 + \partial H_1(T_X, T_Y, T_Z, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z, \mu, \Delta a, \Delta\alpha) = \\
& = H_1 + [\cos L \cos B]_1 T_X + [\cos B \sin L]_1 T_Y + [\sin B]_1 T_Z + \\
& + \left[e^2 N \sin B \cos B \sin L \right]_1 \omega_X + \left[-e^2 N \sin B \cos B \cos L \right]_1 \omega_Y + \\
& + \left[H + W^2 N \right]_1 \mu + \Delta H(\Delta a, \Delta\alpha).
\end{aligned} \qquad (11.135)
$$

Здесь $N(B)$ и $M(B)$ – зависящие от широты радиусы кривизны нормальных сечений в направлении первого вертикала и меридиана (см. формулы (2.99) и (2.100)). Для первой функции широты $W(B)$ и e^2 имеем выражения: $W(B) = a/N(B)$ и $e^2 = 2\alpha - \alpha^2$. В общем случае, изменения параметров Δa и $\Delta\alpha$ известны, и зависящие от них величины вводятся как детерминистические поправки. В соответствии с формулами (2.94) – (2.96)

$$
\Delta B(\Delta a, \Delta\alpha) = \frac{\rho''}{M+H}\left[\frac{\Delta a (N e^2 \sin B \cos B)}{a} + \frac{N \Delta e^2}{2}\left(\frac{N^2}{a^2} + 1 \right) \sin B \cos B \right]; \quad (11.136а)
$$

$$
\Delta L(\Delta a, \Delta\alpha) = 0; \qquad (11.136б)
$$

$$
\Delta H = -\frac{a \Delta a}{N} + \frac{\Delta e^2 N \sin^2 B}{2}. \qquad (11.136в)
$$

Стоит заметить, что преобразование результатов спутникового позиционирования B_1, L_1, H_1 в любую другую плановую систему B_2, L_2 можно ограничить формулами (11.133), (11.134), если для определения вектора геодезических параметров **d** использовать только плановые координаты B_2, L_2 общих для двух систем точек. Таким образом, можно сохранить строгость преобразования, и при этом не нужна ни высота H_2, ни информация о высоте квазигеоида (или геоида) над эллипсоидом системы 2. Поскольку формулы (11.133), (11.134) получены методом линеаризации, то в случае больших параметров **d** (например, при большом векторе переноса **T**) перед их применением должно выполняться соответствующее предварительное трансформирование между системами с приближенными параметрами.

Преимущество системы уравнений наблюдений (функциональная модель), как это дается уравнениями (11.133) – (11.135), по сравнению с преобразованием подобия в прямоугольных координатах X, Y, Z состоит в том, что их можно одновременно использовать для следующих преобразований:

– полного трехмерного преобразования по общим точкам с координатами B, L, H в обеих системах;

– двухмерного преобразования по общим точкам с плановыми координатами B, L в обеих системах;

– одномерного преобразования точек с общими высотами H в обеих системах.

Описание ряда способов локального трансформирования одного массива данных в другой массив можно найти в работах [Сурнин, Гиенко, 2001;

Глушков и др., 2002; Harvey, 1986; Leick, 1995; Rizos, 1999; SKI, 1992; TRIMNET, 1991; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

11.7.2. Определение нормальных высот по спутниковым наблюдениям

Передача от начального пункта сети приращений декартовых координат ΔX, ΔY, ΔZ, полученных из обработки GPS наблюдений базовых линий, позволяет найти координаты всех остальных пунктов в единой системе как в форме прямоугольных координат X, Y, Z, так и в форме геодезических координат B, L, H в системе осей общеземного эллипсоида. Геодезистам и инженерам обычно нужны высоты от уровня моря в принятой в России Балтийской системе нормальных высот БСВ-77. Связь этих высот с геодезическими высотами в некоторой точке описывается известным соотношением:

$$H^{\gamma} = H - \zeta, \qquad (11.137)$$

где H^{γ} – нормальная высота пункта (над поверхностью квазигеоида); ζ – высота квазигеоида над эллипсоидом. Предполагается, что высоты H и H^{γ} в уравнении (11.137) действительно имеют геометрическую связь через высоту квазигеоида ζ, то есть имеют общую систему координат. Если, например, в сети, построенной по спутниковым наблюдениям, геодезические координаты начального пункта были приняты с некоторыми ошибками в системе WGS-84, то высоты всех точек также будут иметь дополнительные ошибки. Поэтому в уравнении (11.137) должны появиться члены, вызванные негеоцентричностью локальной системы. Аналогично, если высота ζ относится, например, к геоиду WGS-84, то в уравнении (11.137) нельзя использовать высоту H над эллипсоидом Красовского в системе СК-95 (или СК-42). В дальнейшем мы не будем акцентировать внимание на различии в терминах «геоид» и «квазигеоид», полагая, что методика определения этих поверхностей во многом аналогична. Для обобщения понятий геоида и квазигеоида иногда вводится термин «высотная опорная поверхность», ВОП (Height Reference Surface, HRS, рис. 11.8) (например, [Jäger, 1999]).

Отметим, что на симпозиуме EUREF в Анкаре в мае 1996 г. была принята резолюция № 2 о переходе к системе нормальных высот для Европы (http://www.euref-iag.net/html/resolutions.html), однако многие геодезисты продолжают использовать геоид Гаусса – Листинга как основную отсчетную поверхность [Бурша, Юркина, 2005].

Для геодезических измерений необходимо иметь модель геоида с точностью эллипсоидальной высоты, только тогда точность H^{γ} будет соответствовать точности H. В абсолютном методе GPS по кодовым псевдодальностям эллипсоидальная высота в лучшем случае пока может определяться на метровом уровне точности. Для абсолютного позиционирования по фазе несущей нужен геоид сантиметровой точности. Относительные и дифференциальные фазовые методы дают приращение эллипсоидальных высот ΔH между двумя точками с

точностью сантиметрового уровня, передача нормальной высоты от пункта A к пункту B выполняется в соответствии с формулой

$$H_B^\gamma = H_A^\gamma + \Delta H_{AB} + \Delta\zeta_{AB}, \qquad (11.138)$$

поэтому требования к точности геоида здесь значительно выше, хотя при этом достаточно знать только приращения в высотах геоида между пунктами $\Delta\zeta$, а абсолютные значения ζ не обязательны.

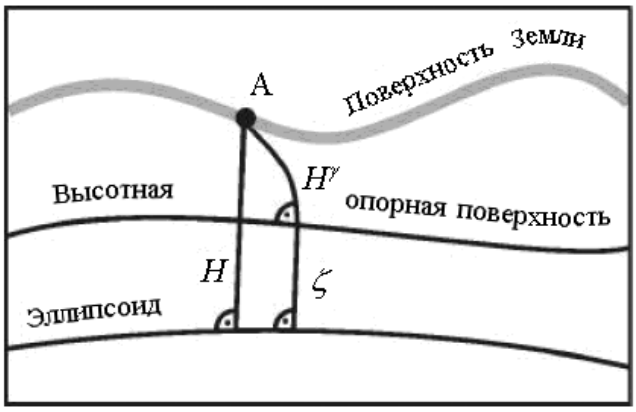


Рис. 11.8. Эллипсоидальная высота H, высота точки над ВОП Hγ
и высота опорной поверхности ζ над эллипсоидом
при точке A(B, L) [Jäger, 1999]

Поверхность геоида имеет сложную, неправильную форму. Это связано как с рельефом местности, так и с неравномерным распределением плотности земных пород. Отступления геоида от эллипсоида колеблются от -107 до +85 м (рис. 11.9). Спектральная информация о геоиде, содержащемся в модели, имеет короткие, средние и длинные волны. Короткие волны, имеющие амплитуду порядка метра, не превышают 100 км, средние, с амплитудой до 10 м, имеют ширину от 100 до 1 000 км.

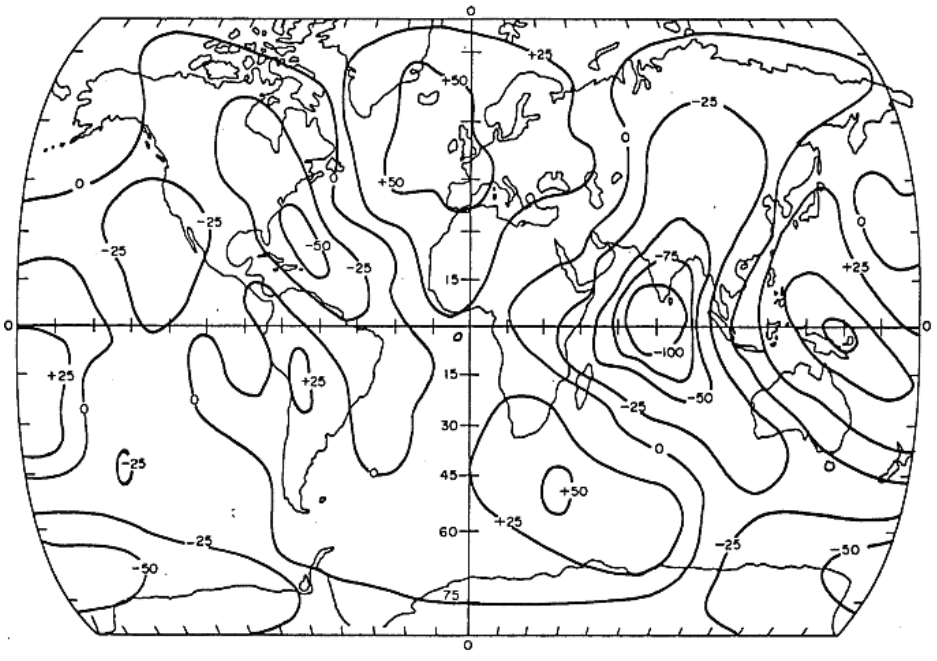


Рис. 11.9. Карта высот планетарного геоида
(http://www.solid_earth.ou.edu/notes/geoid/earths_geoid.htm)

Модели геоида. Модели геоида могут быть представлены в виде точечных значений, профилей или карт и могут аппроксимироваться некоторой функцией. Модели геоидов различают по размеру охватываемой ими территории и по методам получения их характеристик.

Астрономо-геодезические геоиды строятся по уклонениям отвесной линии u и их азимутам v:

$$\xi = u\cos v;\ \eta = u\sin v;\ u = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\ . \qquad (11.139)$$

Уклонения отвеса (допускается термин «отклонения отвеса») в плоскости меридиана ξ и в плоскости первого вертикала η получаются из сравнения геодезических и астрономических координат:

$$\xi = \varphi - B,\quad \eta = (\lambda - L)\cos B\,. \qquad (11.140)$$

Геодезические координаты можно находить из спутниковых наблюдений или из наземных измерений (триангуляция, полигонометрия). Астрономические координаты определяют по наблюдениям звезд методами геодезической астрономии.

Наклон геоида θ в исследуемой точке в направлении с азимутом A вычисляется по формуле:

$$\theta = \xi\cos A + \eta\sin A, \qquad (11.141)$$

приращение геоида по высоте определяется как

$$d\zeta = -\theta\, ds, \qquad (11.142)$$

а передача высоты геоида от пункта A к пункту B происходит в соответствии с соотношением:

$$\zeta_B = \zeta_A - \int_A^B \theta\, ds\,. \qquad (11.143)$$

В *гравиметрическом* методе высота геоида в точке A вычисляется по известной формуле Стокса:

$$\zeta_A = \frac{R}{4\pi\gamma}\int_\sigma f(\Psi)\Delta g\, d\sigma, \qquad (11.144)$$

в которой Ψ – угол между геоцентрическими радиусами точки A и элемента площади $d\sigma$; Δg – гравитационная аномалия для элемента поверхности; $f(\psi)$ – функция Стокса. Аномалия ускорения силы тяжести вычисляется как разность измеренного значения ускорения с редукцией в свободном воздухе минус нормальное значение силы тяжести на эллипсоиде. Интегрирование по формуле (11.144) нужно вести на эллипсоиде по всему земному шару. Вклад далеких зон быстро убывает с увеличением углового расстояния Ψ и становится мал при $\Psi > 30°$ [Пеллинен, 1978].

В *астрономо-гравиметрических* геоидах превышения геоида получаются гравиметрическим методом, но корректируются по астрономо-геодезическим данным на опорных пунктах. *Спутниковые* геоиды строятся на основе анализа возмущений в орбитах. В *геометрических* геоидах высоты геоида над эллипсоидом определяются из сравнения отметок пунктов, полученных из нивелирования, и геодезических высот, определенных, как и в астрономо-

геодезическом методе, по спутниковым измерениям или традиционными методами геодезии.

По размеру покрываемой территории (репрезентативности) различают три типа моделей геоидов: планетарные (глобальные), региональные и локальные.

В последнее время в качестве *планетарных геоидов* наибольшее распространение получили модели, представляющие собой набор полностью нормированных коэффициентов C_{nm}, S_{nm} разложения потенциала силы тяжести по сферическим функциям. Высота геоида ζ в точке со сферическими координатами r, φ, λ может быть вычислена по формуле (2.41). Реализации общеземных систем координат сопровождаются выводом параметров разложения потенциала тяготения и высот геоида над эллипсоидом, соответствующим данной системе координат. Модели с разложением до 36-й степени и порядка обычно получают из анализа возмущений орбит спутников с применением динамического метода космической геодезии. Величины ζ получаются сглаженными, ошибки определения высот по глобальным моделям относительно велики и могут достигать нескольких метров. Одна из причин этого явления заключается в медленной сходимости ряда (2.41) и невозможности отображения локальных особенностей геоида современными методами разложений. Например, при разложении до 36-й степени и до такого же порядка разрешающая способность аппроксимации высот геоида эквивалентна половине длины волны с расстоянием около 500 км. Известны более точные модели планетарных геоидов с разложениями до 180, 360-го порядков. При их построении используются не только спутниковые данные, но и результаты гравиметрических измерений. Разложение до 180-й степени и до такого же порядка обеспечивает разрешение $1 \times 1°$ с учетом волн геоида до 1-2 м. В хорошо изученных районах с плавным рельефом существующие глобальные модели позволяют достичь точности определения высот геоида порядка 0.6 – 1.0 м [Галазин и др., 1998; DMA, 1991]. Считается, что сантиметровый уровень в изучении фигуры геоида будет достигнут в результате выполнения спутниковых гравитационных миссий CHAMP, GOCE, GRACE. Три упомянутых выше метода, возможно, будут реализованы в первое десятилетие нового столетия [Seeber, 2003].

В *региональных моделях* высоты геоида представляются в виде значений, заданных в узлах регулярной координатной сетки. Обычно такие модели создаются на основе гравиметрической информации и охватывают территорию в несколько десятков градусов по широте и долготе с шагом сетки несколько минут. Для определения высоты геоида по региональной модели в исследуемой точке достаточно выбрать значения в ближайших к ней узлах сетки и выполнить интерполяцию. Примерами региональных моделей геоида являются известные модели GEOID90, GEOID93, GEOID96, создаваемые Национальной геодезической службой США для территории страны и соседних с ней областей [Leick 1995; Milbert 1992]. Применение метода конечных элементов позволяет строить региональные и локальные геоиды с

любой сеткой, объединяя разнообразные трансформанты гравитационного поля Земли (см. подраздел 11.7.3).

При обработке небольших спутниковых сетей геодезисты вынуждены использовать *локальные* модели высот геоида. Чаще всего для этого используется геометрический метод. При наличии четырех и более опорных пунктов с известными нормальными (из нивелирования) и эллипсоидальными (по спутниковым наблюдениям) высотами находятся высоты геоида

$$\zeta = H - H^{\gamma}. \qquad (11.145)$$

В эти высоты геоида полностью входят ошибки эллипсоидальной высоты начального пункта GPS-сети, которая может достигать нескольких десятков метров. При правильной передаче координат по пунктам сети эта ошибка будет на всех точках постоянной, а превышения высот геоида $\Delta\zeta_{AB} = \Delta H_{AB} - \Delta H^{\gamma}_{AB}$ будут иметь высокую точность, что позволяет использовать полученные таким образом данные для изучения фигуры Земли. Для каждой из высот (11.145) составляется выражение вида:

$$\zeta(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + ... = \sum_{i=0}^{I}\sum_{j=0}^{J} a_{ij}x^i y^j , \qquad (11.146)$$

где x, y – плоские прямоугольные координаты опорных точек в местной системе; a_{ij} – коэффициенты, определяемые по разностям высот на опорных точках. После нахождения этих коэффициентов можно вычислить высоту геоида для определяемого пункта по его координатам и перейти к нормальной высоте. В интерполянтах вида (11.146) вместо плоских координат x, y можно использовать разности геодезических координат B, L. При большом числе опорных пунктов применяются сложные аппроксимирующие выражения, учитывающие и наклоны геоида, и его кривизну. Точность метода определяется плотностью опорных пунктов, степенью аномальности гравитационного поля и видом интерполянта. Достоинством метода является его слабая чувствительность к ошибкам координат начального пункта сети. При расстояниях между опорными пунктами 15 – 20 км в районах средней аномальности ошибка составляет 15 – 20 см, в районах повышенной аномальности – 40 – 60 см [Непоклонов и др., 1996; Бойко и др., 1997; Гиенко, 2002].

Кроме непосредственных значений высот, локальная модель должна включать плановые координаты пунктов и ковариационную матрицу ошибок высот. Плановые координаты получают из первичной обработки спутниковых измерений или из свободного (минимально ограниченного) уравнивания сети. Ковариационная матрица ошибок формируется из ковариационных матриц измерений высот H и H^{γ}.

Как видно, для вычисления в исследуемой точке высоты геоида по локальной модели необходим более сложный аппарат интерполяции, чем для обслуживания региональных моделей, так как высокая точность модельных высот не соответствует плотности сети. При этом в качестве дополнительной информации может быть использована автоковариационная функция высот

геоида. В связи с этим различают коррелированные и некоррелированные модели геоидов.

При использовании региональной и локальной моделей геоида одной из проблем является оценка точности нормальной высоты. Ошибки модели могут быть в базе данных, в алгоритме интерполяции или в данных измерений, как и локальные высоты геоида внутри ячейки сетки могут не отражаться в модели. Очевидно, чем ближе две точки одна к другой, тем более вероятно, что ошибки в их геоидальных высотах более коррелированны. Две точки, которые находятся совсем близко одна от другой (скажем, на расстоянии 1 м), будут иметь коэффициент корреляции 1.0, означающий, что ошибки в их геоидальных высотах совершенно коррелированны. Так же очевидно, что с увеличением расстояния на некотором удалении ошибки в их геоидальных высотах перестанут быть коррелированными, то есть коэффициент корреляции станет равным 0. Это максимальное расстояние называется *радиусом корреляции* и обозначается r_C .

При моделировании коротковолновых ошибок в модели регионального геоида величина радиуса корреляции будет теоретически зависеть от промежутков в ячейках сетки в базе данных. Радиус корреляции может назначаться пользователем, но по умолчанию он должен устанавливаться равным диагонали между углами сетки. По этому умолчанию все высоты геоида в сети будут иметь корреляции между их ошибками, хотя на точках в противоположных сторонах сетки коэффициент корреляции приближается к нулю. Слишком малый радиус корреляции будет ослаблять корреляцию модели, а большой радиус корреляции может приводить к сингулярной ковариационной матрице. Когда же контрольные точки отстоят дальше, чем теоретический радиус корреляции, это не соответствует корреляциям модели в ошибках высот геоида.

Для пары высот геоида с коррелированными ошибками необходимо определить математическую функцию для вычисления коэффициента корреляции между ними с использованием в качестве аргумента радиуса корреляции и расстояния от точки до точки. Эта функция называется автокорреляционной функцией *АКФ*. Один из видов *АКФ* определяется следующим образом:

$$C_{\zeta_A\zeta_B} = \frac{\sigma_{\zeta_A\zeta_B}}{\sigma_{\zeta_A}\sigma_{\zeta_B}} = 1.0 - \frac{D_{AB}}{r_C}. \qquad (11.147)$$

В этом выражении $C_{\zeta_A\zeta_B}$ представляет коэффициент корреляции между ошибками в геоиде на точках *A*, *B*, а *D* – расстояние между точками *A*, *B*. Другие члены *АКФ* могут быть приняты для моделирования поправок в модель геоида. Приведенная здесь *АКФ* производит простую линейную интерполяцию, как консервативная стратегия, которая не накладывает предположений о преобладающем источнике ошибок в модели геоида. Коэффициент корреляции, который всегда будет между 0 и 1, здесь выражается отношением расстояния между двумя точками и радиуса корреляции.

Прежде чем масштабировать дисперсией модели геоида σ_ζ^2, коэффициенты корреляции задают для недиагональных элементов корреляционной матрицы $\mathbf{Q}_\zeta$

высот геоида, диагональные члены которой устанавливаются равными 1. В результате масштабирования получается ковариационная матрица наблюденных высот геоида $\mathbf{\Sigma}_\zeta$

$$\mathbf{\Sigma}_{\zeta_A\zeta_B} = \sigma_\zeta^2 \mathbf{Q}_\zeta = \sigma_\zeta^2 \begin{bmatrix} 1 & C_{\zeta_A\zeta_B} \\ C_{\zeta_A\zeta_B} & 1 \end{bmatrix}. \qquad (11.148)$$

По мере накопления информации о геоиде на некоторую территорию в виде локальных моделей они могут по желанию пользователя объединяться в одну региональную модель. В отличие от локальной модели, хранить полную ковариационную матрицу всех ошибок геоида региональной модели не представляется возможным. Поэтому такое объединение целесообразно лишь при достижении некоторой однородной плотности пунктов локальных моделей, позволяющей интерполировать высоты без существенной потери точности [TRIMNET, 1991].

Использование гравиметрической информации для построения локального геоида при обработке спутниковых данных началось с работы [Engelis et al., 1985]. Теория объединения трансформант гравитационного поля Земли для построения локального геоида дается в работах [Сурнин, 2006; Jäger, 1999]. Построенный геоид может использоваться не только для преобразования геодезических высот в нормальные, но и для преобразования геодезических координат в астрономические координаты и геодезического азимута – в астрономический. Проведенные в Сибирской государственной геодезической академии эксперименты на эталонной геодезической сети продемонстрировали хорошую сходимость астрономических координат и азимутов, полученных традиционным и спутниковым методом с дополнением данных геометрического нивелирования, гравиметрии и астроопределений [Сурнин, 1999; Гиенко и др., 2005; Гиенко, Сурнин, 2005].

11.7.3. Применение метода конечных элементов в ГНСС технологиях

Метод конечных элементов (МКЭ) основан на идее аппроксимации непрерывной функции (в данном случае – модели высот геоида над эллипсоидом или модели преобразования плановых координат из одной системы в другую) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами. Исследуемая геометрическая область разбивается на элементы таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная сложная функция аппроксимировалась некоторой более простой функцией (как правило, полиномом). Эти функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей. Выбор для каждого элемента аппроксимирующей функции будет определять соответствующий тип элемента.

Метод конечных элементов можно применять для преобразования и плановых координат, и высот. При этом совершенно не важно, какие высоты преобразуются, ортометрические или нормальные.

Разработка методов применения МКЭ для спутниковой геодезии выполнена группой ученых Университета прикладных наук г. Карлсруэ (ФРГ). Метод успешно применяется в ряде стран Западной Европы, Америки и Африки (http://www.dfhbf.de; http://www.geozilla.de).

Общая концепция метода. Для преобразования плановых координат B_1, L_1 и высот H_1, полученных спутниковым методом в системе, близкой к WGS-84 или ITRF и определяемой координатами базовой станции или начальной точки сети, в координаты B_2, L_2 и высоту H_2, относящихся к некоторой локальной (национальной) системе координат, используется модель, заданная уравнениями (11.133) – (11.135). Как было указано выше, эта модель допускает строгое раздельное трансформирование плановых координат и высот.

Однако если требуется перейти от геодезической высоты H_1 к принятой системе высот H_2^γ, относительно физически определенной высотной опорной поверхности ВОП (см. рис. 11.8), то дополнительно потребуется некоторая модель геоида, квазигеоида или, в общем случае, модели высотной опорной поверхности ВОП, поскольку

$$H^\gamma = H_2 - \zeta_2. \qquad (11.149)$$

В этом контексте мы вынуждены считаться с жизненными реальностями, заключающимися в том, что любая модель ВОП ζ', взятая из ее базы данных, характеризуется неизвестной системой геодезических параметров $\mathbf{d}_\zeta$=(**T**, ω_X, ω_Y, μ_ζ). Из-за того, что происходит влияние параметров $\mathbf{d}_\zeta$ на используемую базу данных ВОП $\zeta'(B, L)$, предлагается записывать полную формулу преобразования высот как

$$\begin{aligned} H_2^\gamma &= H_1 + \partial H_1(\mathbf{T}, \omega_X, \omega_Y, \mu) - (\zeta' + \partial\zeta(\mathbf{T}, \omega_X, \omega_Y, \mu)_\zeta) = \\ &= H_1 + \partial H_1(\mathbf{d}) - (\zeta' + \partial\zeta(\mathbf{d}_\zeta)) \end{aligned} \qquad (11.150)$$

Предположив, что значения высот ВОП из базы данных $\zeta'(B, L)$ выбираются по $(B, L)_1$, мы видим из (11.133) – (11.135), (11.149) и (11.150), что параметры в разных наборах **d** и $\mathbf{d}_\zeta$ различаются из-за изменений высот H_1 и ζ в коэффициентах, относящихся, соответственно, к **d** и $\mathbf{d}_\zeta$. Поэтому общепринятый метод трехмерного преобразования, использующий только один общий набор из семи параметров **d**, не будет свободен от систематических ошибок. Из формул (11.133) – (11.135), (11.149) и (11.150) следует, что переход к высотам H_2^γ при использовании модели геоида ζ должен производиться по совокупности из 13 параметров из **d** и $\mathbf{d}_\zeta$.

Если мы, по аналогии с обсужденной выше проблемой преобразования плановых координат, все же ограничим себя получением только нормальных высот H_2^γ по геодезическим высотам H_1, то из (11.135) и (11.150) получаем:

$$\begin{aligned} H_2^\gamma &= H_1 - \zeta' + [\cos L \cos B]_1 (T_X - T_{X,\zeta}) + [\cos B \sin L]_1 (T_Y - T_{Y,\zeta}) + \\ &+ [\sin B]_1 (T_Z - T_{Z,\zeta}) + \left[e^2 N \sin B \cos B \sin L\right]_1 (\omega_X - \omega_{X,\zeta}) + \\ &+ \left[-e^2 N \sin B \cos B \cos L\right]_1 (\omega_Y - \omega_{Y,\zeta}) + \left[H + W^2 N\right]\mu - \left[\zeta + W^2 \cdot N\right]\mu_\zeta = \\ &= H_1 - \zeta + \partial_{H_1,\zeta}(T_X', T_Y', T_Z', \omega_X', \omega_Y') + \left[H_1 + W^2 \cdot N\right]\mu - \left[\zeta + W^2 \cdot N\right]\mu_\zeta. \end{aligned} \qquad (11.151)$$

Из (11.151) видно, что из-за некоторых общих коэффициентов в модель преобразования GPS высот, основанную на модели ВОП, вместо двух разных наборов можно ввести только один набор разностей общих параметров переноса и вращения

$$\mathbf{d}' = (\mathbf{T}', \omega'_X, \omega'_Y) =$$
$$= (T_X - T_{X,\zeta}, T_Y - T_{Y,\zeta}, T_Z - T_{Z,\zeta}, \omega_X - \omega_{X,\zeta}, \omega_Y - \omega_{Y,\zeta}). \quad (11.152)$$

Однако параметры, касающиеся масштабов μ и μ_ζ, соответственно, в **d** и $\mathbf{d}_\zeta$ в формуле (11.150), необходимо сохранять разными.

Заметим, что декомпозиция в прямоугольных координатах с последующей регуляризацией решения выполнена в работе [Гиенко, 2002].

Использование метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования высотной опорной поверхности (ВОП). Главное средство рабочей группы Университета Карлсруэ в методах объединения GPS высот заключается в представлении высоты геоида ζ или, лучше, высотной опорной поверхности ВОП (см. рис. 11.8) поверхностью из конечных элементов, обозначаемой как $\zeta_{\text{МКЭ}}$. Эта поверхность задается базовыми функциями из полиномов с двумя переменными, определяемыми на элементарных площадках квадратной сетки с нерегулярными положениями узловых точек (рис. 11.10). Модель $\zeta_{\text{МКЭ}}$ высотной отсчетной поверхности ВОП представляется в идеальном смысле как $H = H^\gamma + \zeta$. Она не зависит от системы координат и от типа системы высот H. Высоты ζ поверхности ВОП над эллипсоидом выражаются через плановые положения (B, L) и вектор параметров **p**. Плановое положение (B, L) заменяется на прямоугольные координаты $x(B, L)$ и $y(B, L)$ в проекции UTM или в проекции Гаусса – Крюгера, которые являются функциями (B, L). Эта функциональная зависимость записывается как $\zeta_{\text{МКЭ}}(\mathbf{p}, x(B, L), y(B, L))$.

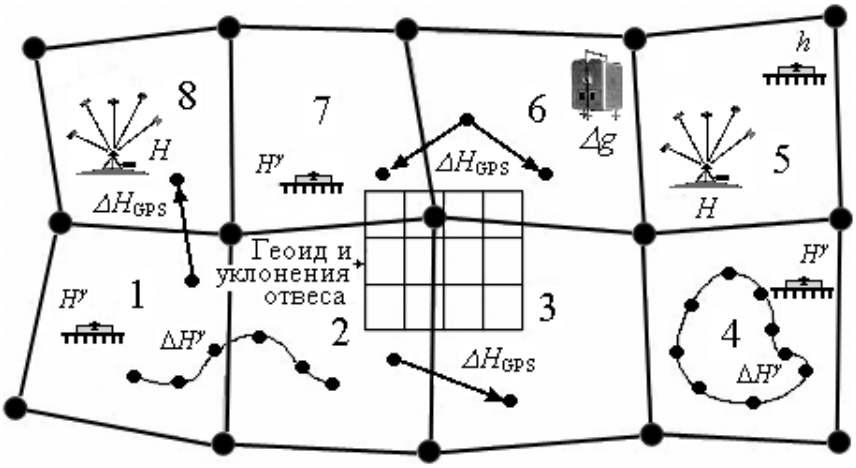


Рис. 11.10. Узловые точки и грани ячеек в модели высотной отсчетной поверхности, построенной по методу конечных элементов, и геодезические измерения (H, H^γ, ΔH, ΔH^γ и опционально модель геоида ζ, уклонения отвеса ξ, η и аномалии силы тяжести Δg как источники дополнительных данных)

Размеры ячеек и их форму (см. рис. 11.10), и в то же время качество аппроксимации $\zeta_{\text{МКЭ}}(\mathbf{p}, x, y)$ относительно истинной поверхности геоида или

квазигеоида можно выбирать произвольно. Особое преимущество модели ВОП $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ заключается в том, что узловые точки сетки полностью не зависят от расположения пунктов геодезической сети и точек с данными о геоиде (H, H^{γ}, ΔH, ΔH^{γ}, модель геоида ζ (B, L), уклонения отвеса ξ, η, а также ускорения силы тяжести Δg), которые используются для определения вектора параметров $\mathbf{p}$. Полиномы с двумя переменными, представляющие поверхность $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ на различных ячейках, имеют степень не выше 1. Соответствующие полиномиальные коэффициенты вводятся как $a_{ij,k}$, так что полный вектор параметров $\mathbf{p}$ состоит из всех наборов коэффициентов $a_{ij,k}$ на m ячейках ($i = 0, 1$; $j = 0, 1$ и $k = 1, m$).

С учетом этого,

$$\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}) = \left\{ \begin{array}{c} \zeta(p_k) = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{l-i} a_{ij,k} \cdot y^i \cdot x^j \\ C_{0,1,2}(p_m, p_n) \end{array} \right\}. \qquad (11.153)$$

Для получения высоты локального геоида ζ для точки A с координатами x, y вначале производится идентификации соответствующей k-й ячейки по вектору положений узловых точек. После этого ζ оценивается из $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ по полиному с коэффициентами $a_{ij,k}$. Чтобы считать поверхность $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ непрерывной, при ее вычислении для каждой пары соседних ячеек m и n должен устанавливаться один набор условий непрерывности разного типа $C_{0,1,2}$. Непрерывность типа C_0 (формула (11.153)) подразумевает одни и те же функциональные значения вдоль каждой общей границы ячеек. Непрерывность типа C_1 подразумевает одни и те же касательные плоскости вдоль общих границ, а непрерывность типа C_2 подразумевает одну и ту же кривизну вдоль общих границ модели $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ опорной высотной поверхности. Условия непрерывности включаются как дополнительные условные уравнения, относящиеся к полиномиальным наборам коэффициентов $a_{ij,m}$ и $a_{ij,n}$ каждой пары соседних ячеек m и n. Число и математическое содержание этих условных уравнений зависят от степени полинома l, а также от типа уравнений непрерывности.

Обычно при исследованиях по преобразованию GPS высот и в рабочих проектах модель $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ приводит к наилучшим результатам при использовании условий типа C_0 и степени $l = 1,2$ для ячеек малых размеров (до 10 – 40 км) и степени $l = 3$ для ячеек больших размеров. К примеру, для случая $l = 3$ и непрерывности C_0 для $\zeta_{МКЭ}(\mathbf{p}, x, y)$ для границ каждой пары соседних ячеек вводятся следующие условные уравнения:

$$\begin{aligned} & da_{30}\,dx^3 + da_{21}\,dx^2\,dy + da_{12}\,dxdy^2 + da_{03}\,dy^3 = 0; \\ & da_{30}\,\Delta^3 + da_{20}\,\Delta^2\,dy + da_{10}\,\Delta dy^2 + da_{00}\,dy^3 = 0; \\ & da_{10}\,dxdy^2 + da_{01}\,dy^3 + 2\,da_{20}\,\Delta dxdy + da_{11}\,\Delta dy^2 + da_{12}\,\Delta^2\,dy = 0; \\ & da_{20}\,dx^2\,dy + da_{11}\,dxdy^2 + da_{02}\,dy^3 + 3da_{30}\,\Delta dx^2 + 2\,da_{21}\,\Delta dxdy + \\ & + da_{12}\,\Delta dy^2 = 0. \end{aligned} \qquad (11.154)$$

Здесь введены следующие обозначения: $dx = x_E - x_A$, $dy = y_E - y_A$, $\Delta = dy \cdot x_E - dx \cdot y_A$ и $da_{ij} = a_{ij,m} - a_{ij,n}$. Индекс *A* означает начальную, а индекс *E* – конечную точку на общей границе двух соседних ячеек *m* и *n*.

Определение высот в интерактивном режиме. Согласно этой концепции, на первом шаге (шаг образования продукта) создается Цифровая высотная опорная поверхность, построенная по методу конечных элементов (Digital Finite Element Height-Reference Surface, DFHRS), как новый вид продукта базы данных (рис. 11.11, слева).

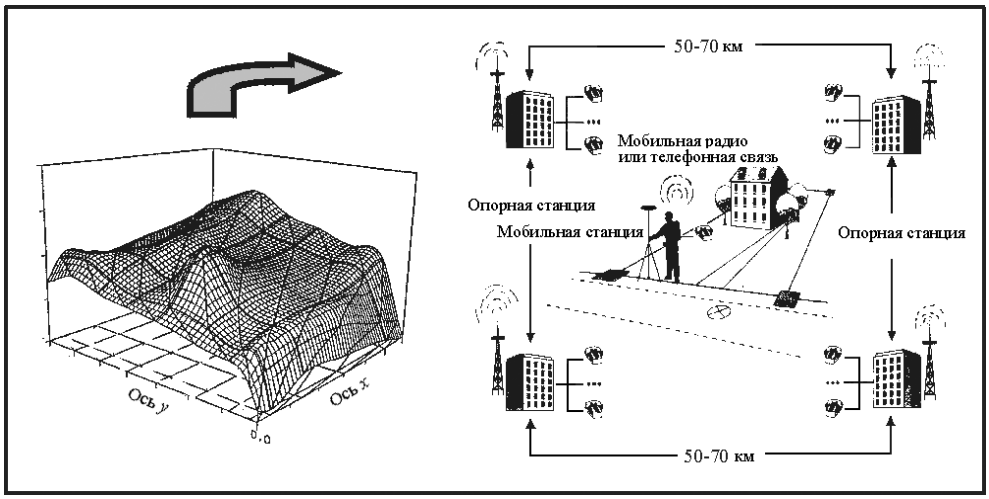


Рис. 11.11. Цифровая высотная поверхность DFHRS (слева) и использование ее базы данных DFHRS при определении высот в режиме online сетевым методом RTK (справа) [Jäger, 1999]

На втором шаге (шаг применения) эта база данных делается доступной для режима online – активным или пассивным образом – для определения высот дифференциальным методом DGPS (рис. 11.11, справа). Это значит, что либо пользователь DGPS имеет в своем распоряжении базу данных DFHRS, либо сама служба DGPS использует базу данных DFHRS для оценивания поправки Δ для перехода от геодезической высоты *H* к высоте H^{γ} принятой системы высот.

Точность преобразования высот зависит от степени детализации высотной опорной поверхности, то есть от размеров ячеек и точности опорной сети. Авторы метода считают, что для построения базы данных DFHRS_DB при использовании системы высот Германии EGG-97 необходимы следующие размеры ячеек:

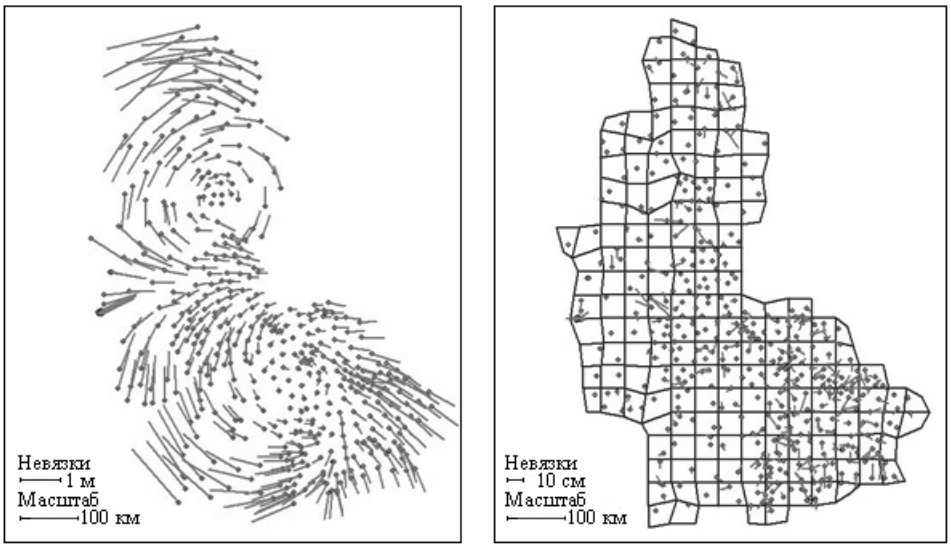
- 30 – 40 км – для точности порядка 1 см;
- 50 – 60 км – для точности 3 см;
- до 300 км – для точности определения высоты до 10 см.

На каждую ячейку необходимо иметь 3 – 5 общих точек.

Преобразование плановых координат. В настоящее время при выполнении геодезических работ возникает две задачи, связанные с преобразованием координат. Первая из них вызвана тем, что во многих странах осуществляется переход от систем координат, построенных традиционными методами геодезии, к системам, связанным с общеземными системами типа WGS-84, ITRF, которые применяются при спутниковом позиционировании.

Польза от этого очевидная: при работе со спутниковой аппаратурой сразу получаются координаты в нужной системе, не требуются переходы, при выполнении которых теряется точность. Однако координаты пунктов традиционных сетей необходимо переводить в новую систему. Вторая задача связана с тем, что старые традиционные системы координат во многих случаях остаются основными, и требуется трансформирование получаемых координат из спутниковых систем в традиционные координатные системы. Для решения первой задачи разработана основанная на методе конечных элементов концепция решения, названная COPAG (Continuous Patched Georeferencing, примерный перевод – «непрерывная геодезическая привязка по ячейкам»). Для обеспечения строгого и непрерывного трехмерного преобразования традиционных плановых сетей в систему ITRF/ETRS89 используется так называемая база данных COPAG, а база данных DFLBF используется в современном ГНСС позиционировании, чтобы в интерактивном режиме (online) или в пост-обработке положения из ITRF/ETRS89 трансформировать во все еще существующие традиционные плоские сети.

В соответствии с концепцией COPAG для выполнения преобразования плановых координат достаточно знать высоту точки с невысокой точностью. Основные соображения и соответствующее решение проблемы для преобразования плановых координат производятся в соответствии с математическим обоснованием так называемых «слабых форм», вызванных слабой геометрией сети или ошибками в стохастической модели уравнивания сети (некорректным заданием весов). Эти длинноволновые отклонения формы в традиционных геодезических сетях достигают величины нескольких метров в масштабе государства типа Германии (рис. 11.12).



а б

Рис. 11.12. Остаточные невязки при трансформировании плановых координат германской сети DHDN в систему ETRS89:
а) при использовании единственного набора параметров трансформирования невязки достигали 2.5 м; б) при разбиении сети на 177 ячеек невязки уменьшились, в среднем, до величины 0.02 м [Jäger et al., 2003]

Для исключения таких систематических ошибок требуется разбиение всего района сети на множество ячеек, для каждой из которых определяются свои параметры трансформирования плановых (или плоских) координат. Введение условия непрерывности по границам ячеек подразумевает ограничения между параметрами преобразования смежных ячеек. Из-за математической строгости и общей обоснованности и законченности концепция COPAG имеет (подобно методу DFHRS) широкий и далеко идущий прикладной профиль в контексте большого количества подобных задач по преобразованию координат, встречающихся во всем мире в наступающем веке ГНСС технологий [Jäger et al., 2003].

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые технологии в геодезии прошли путь длиной в четверть века и продолжают динамично развиваться. Прогресс в технологиях приводит в итоге к изменениям в организации и управлении, которые оказывают огромное влияние на профессии геодезиста, топографа, маркшейдера, а также на общество в целом. Возможно, самая очевидная тенденция – расширение диапазона применений ГЛОНАСС/GPS технологий, которая привела к образованию функциональных (специализированных) локальных, региональных и глобальных систем. Типичными примерами таких систем могут являться системы управления воздушным, водным, наземным транспортом, системы управления полетом космических аппаратов, системы мониторинга параметров вращения Земли и других геофизических и геодинамических параметров, системы обеспечения геодезических, кадастровых и строительных работ и т. п. Примером распределенных по пространству, времени и функциям потребительских систем координатно-временного навигационного обеспечения могут служить системы, объединенные в международные службы, в том числе Международная ГНСС служба (IGS, МГС).

Экономическая выгода от применения ГНСС и их функциональных дополнений огромна. К примеру, затраты на создание и внедрение дифференциальной подсистемы NDGPS по утвержденному проекту Береговой охраны США составили 30 миллионов долларов. Содержание системы за 15 лет ее существования обойдется в 68.6 миллиона долларов, а прибыль от нее за этот срок составит 10.4 миллиарда долларов, то есть отношение прибыли к затратам равняется 152 : 1 [Allen III, 1999].

Неуклонно расширяется применение спутниковых методов в топографо-геодезическом производстве. Как правило, их применение приводит к повышению производительности труда в 10 – 20 раз. Однако в условиях современной России это не всегда оказывается благом: повышение производительности при ограниченном объеме производства приводит к сокращению рабочих мест и росту числа безработных.

Существующие в настоящее время две спутниковых радионавигационных системы – GPS и ГЛОНАСС, хотя и являются системами двойного назначения, но управляются военными и служат, прежде всего, для поддержания обороноспособности своих стран. Обе они открыты для свободного использования гражданских сигналов. В политике США, РФ и ЕС отражается готовность к предоставлению услуг СРНС гражданским потребителям в глобальном масштабе на безвозмездной основе, если это не противоречит национальным интересам и безопасности, а также к международному сотрудничеству в целях повышения уровня совместимости, взаимодополняемости различных систем и средств координатно-временного навигационного обеспечения, и, в конечном счете, повышению качества предоставляемых услуг.

Однако в силу военных, политических, технологических или экономических причин ни одна из СРНС не может гарантировать

бесперебойное координатно-временное обеспечение на требуемом для выполнения многих ответственных задач уровне функционирования. Более того, есть также возможность того, что США могут создавать помехи или понижать точность сигналов во время конфликтов, чтобы исключить вражеское использование для наведения оружия на цели. Критическими характеристиками для выполнения таких задач, как навигация воздушных и морских судов, являются точность и целостность данных. Чтобы уменьшить зависимость своих стран от режимов работы GPS и ГЛОНАСС, в ряде стран создаются свои собственные спутниковые глобальные или региональные навигационные спутниковые системы или системы функционального дополнения.

Ниже будут сделаны некоторые замечания в отношении изменений в радионавигационных системах, усовершенствовании спутников, изменений в национальной и интернациональной инфраструктуре, которые определяют прогресс непосредственно в спутниковых технологиях, аппаратуре и программном обеспечении, определением и поддержанием систем отсчета и их геодезических параметров.

12.1. Модернизация навигационных систем

Все мероприятия по модернизации и развитию систем ГЛОНАСС и GPS и проектные характеристики системы Галилео имеют практически одну направленность. Во всех системах предполагается:

– повышение точностных характеристик систем за счет усовершенствования эфемеридно-временного обеспечения на основе перехода к современным технологиям обработки беззапросных измерений от сети глобально распределенных станций;

– увеличение количества доступных гражданскому потребителю навигационных сигналов с совершенствованием структуры этих сигналов;

– повышение помехоустойчивости сигналов;

– разработка новых типов аппаратуры пользователей и внедрение новых методов обработки сигналов с целью максимально возможной компенсации влияния внешних факторов;

– увеличение количества навигационных спутников в орбитальной группировке;

– повышение надежности, срока активного существования навигационных спутников.

Большое внимание в настоящее время уделяется также развитию функциональных дополнений, которые позволяют, в первую очередь, повысить точность и целостность навигации по сигналам ГНСС.

Модернизация системы GPS. Текущие планы – передавать С/А-коды на L2, а планы для третьей частоты – более высокая тактовая частота и более длинные кодовые последовательности, чем современные С/А-коды (10.23 Мб/с, с длиной кодовой последовательности между 4 000 и 10 230 бит). Кодовые последовательности с более высокой тактовой частотой должны обеспечивать повышение точности измерения расстояний, более низкий уровень шума,

лучшие свойства кросс-корреляции, сокращение времени захвата сигнала и уменьшение интерференции от многопутности.

Улучшения будут сделаны также в Контрольном сегменте. Последние усовершенствования в программном обеспечении КС, используемого для оценивания орбит спутников GPS (и для составления навигационного сообщения), продемонстрировали, что точность бортовых эфемерид имеет уровень 1-2 м. Планируется довести до 20 количество наземных станций в сети слежения, при этом почти все станции будут совмещены с сетью станций, формирующих международную систему отсчета ITRF. Эти меры улучшат качество измерений при слежении за спутниками GPS, повысят точность вычисляемых орбит и параметров часов. Планируется также более частая загрузка данных на спутники. Ожидается, что в течение следующего десятилетия объединенный эффект от этих улучшений в Контрольном сегменте должен привести к субметровой (и, возможно, дециметровой) точности эфемерид.

Некоторые предложения по модернизации GPS будут касаться доступности улучшенного сигнала (что повлияет на целостность и точность системы через увеличение количества сигналов спутников или избыточность, при наблюдении GPS приемниками). Еще одно предложение – увеличение созвездия на 6 – 12 спутников. Это обеспечит созвездие из 30 – 36 космических аппаратов. В дополнение, уровни мощности передаваемых сигналов на второй и третьей частоте будут повышены, а это значит, что сигналы будут легче наблюдаться в течение периодов интерференции или затенения сигналов, чем это сейчас возможно на частоте L2. Кроме очевидной стоимости улучшений, связанной с увеличением числа спутников, критическим следствием является (парадоксально!) значительно увеличенная продолжительность жизни спутников Block IIA и IIR, что откладывает даты запуска для спутников Block IIF (которые, как ожидается, будут передавать новые сигналы GPS). Это может привести к тому, что модернизированные спутники будут доступны лишь к 2010 г. [Rizos, 1999].

В состав действующей группировки GPS на настоящий момент входит 28 космических аппаратов (КА), которые используются по целевому назначению. Все КА являются спутниками второго поколения (GPS-II), часть из которых – старые (GPS-II, GPS-IIA) и часть – сравнительно новые (GPS-IIR). Имеющиеся «на складе» КА GPS-IIR (8 штук) модернизируются на предмет добавления второго гражданского сигнала на частоте L2 и нового военного сигнала на частоте L1. В сентябре 2005 г. выведен на орбиту первый спутник блока IIR-M (модифицированный). На 2006 г. намечен запуск КА GPS-IIF, на котором будет реализован третий гражданский сигнал на частоте L5. На 2012 – 2015 гг. планируется первый запуск КА следующего поколения GPS-III с повышенными тактико-техническими характеристиками, новым гражданским сигналом на частоте L1 (L1C), который, возможно, будет идентичен сигналу Галилео на этой частоте (www.defenselink.mil/transformation/ articles/2005-08/ta081805a.html).

Модернизации системы ГЛОНАСС. В августе 2001 г. Правительство РФ утвердило Федеральную целевую программу «Глобальная навигационная система». Она включает в себя:

– обеспечение функционирования и развития системы ГЛОНАСС;

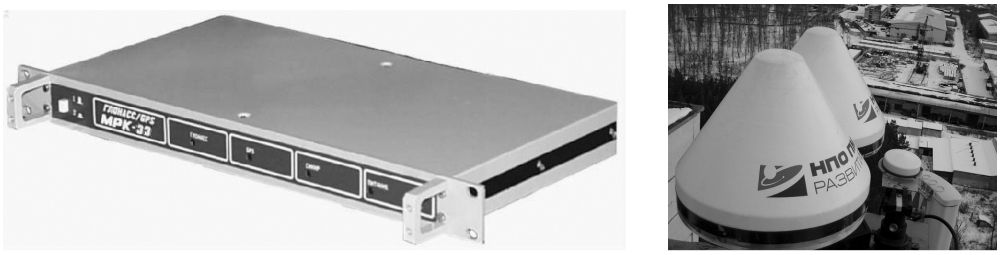
– разработка, подготовка производства, изготовление навигационного оборудования и аппаратуры для гражданских потребителей;

– внедрение и использование спутниковых навигационных систем на транспорте, в геодезическом обеспечении и для удовлетворения интересов специальных потребителей [Писарев, 2002].

С 2005 г. начался запуск спутников ГЛОНАСС-М с увеличенным сроком активного существования (до 7 лет), на которых транслируется второй гражданский сигнал на частоте L2. В этот период планируется перейти на беззапросный прием навигационных сигналов на станциях слежения для определения эфемерид и синхронизации часов. С 2008 г. планируются запуски спутников нового поколения ГЛОНАСС-К с улучшенными характеристиками (срок активного существования на орбите 10 лет), с трансляцией третьего гражданского сигнала на частоте L5. Ожидаемая точность позиционирования по сигналам спутников ГЛОНАСС-К с учетом модернизации системы эфемеридно-временного обеспечения будет порядка 10 м.

Модернизация наземного сегмента предусматривает также развертывание системы контроля целостности и глобальной дифференциальной подсистемы, предназначенных для обеспечения пользователей информацией о целостности и более высокой точностью позиционирования. К 2008 г. планируется развернуть орбитальную группировку в минимально необходимом составе из 18 спутников. Полная группировка системы ГЛОНАСС (24 спутника), передающая три гражданских сигнала, будет развернута в 2011 г. [Данилюк, Крымов, 2005].

Большое внимание уделяется совершенствованию эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Комплекс мер включает существенное повышение точностных характеристик эфемерид, частотно-временных поправок, разработку и внедрение в наземном сегменте беззапросной технологии наблюдений более точными наземными измерительными средствами отечественного производства (рис. 12.1), проведение межспутниковых измерений, переход на более стабильные наземные и бортовые часы ($1 \cdot 10^{-14}$, $1 \cdot 10^{-13}$) и др. [Бартенев, Гречкосеев, 2005]. Ведутся активные работы по улучшению точности прогнозирования параметров вращения Земли, без чего невозможно улучшение в точности эфемерид космических аппаратов [Балахненко и др., 2005].



а) б)

Рис. 12.1. Аппаратура для беззапросного слежения
за космическими аппаратами ГНСС:
а) приемо-измерительный блок МРК-33; б) антенная система МРК-33
[Кокорин и др., 2005]

Система Галилео. Европейская спутниковая радионавигационная система Галилео разрабатывается по инициативе Европейского Союза и Европейского космического агентства (ЕКА). Система должна полностью войти в строй в 2008 г. в результате объединения усилий членов Европейского Союза. В проекте предусматривается создание глобальной системы под гражданским управлением и только для гражданского применения.

Система должна включать глобальный (космический), региональный и локальный сегменты, а также приемники пользователей и терминалы. Ее стоимость оценивается в 3.8 миллиарда евро (4.5 миллиарда долларов).

Космический сегмент состоит из 30 спутников, распределенных в трех орбитальных плоскостях с наклонением 56°. Рассматриваются другие варианты созвездия Галилео, в частности, с использованием нескольких геостационарных спутников. Высота полета – 23 616 км, период обращения – 14 ч 04 мин. В запуске планируется выводить от двух до восьми спутников, в зависимости от возможностей ракеты и потребностей группировки. В качестве средств запуска возможно использование ракет-носителей Ариан, Протон и Союз. В космический сегмент входят два Центра контроля, размещаемые в Западной Европе, станции передачи данных и станции мониторинга. Региональный и локальный сегменты представляют инфраструктуру широкозонной и локальной дифференциальных подсистем.

Спутники системы Галилео будут транслировать на четырех несущих частотах, модулируемых пятью различными сигналами. Планируется более высокая тактовая частота сигналов, чем в системах GPS и ГЛОНАСС. Это обеспечит более высокую потенциальную точность измерения псевдодальностей и скорость передачи навигационной информации.

Галилео будет обеспечивать метровую точность измерения расстояний. Дополнительно прогнозируется высокий уровень целостности положения. В случае аномального сигнала или неправильного функционирования системы будет выпускаться предупреждение о возможной ошибке позиционирования.

Галилео будет повышать безопасность и эффективность работы наземного, морского и воздушного транспорта. Применения предусматривают отслеживание парков дорожных средств, безопасную посадку самолетов и навигацию мобильных средств по назначенным маршрутам. Для высокоточных

геодезических работ критическим является разрешение целых неоднозначностей несущих волн. Использование комбинаций GPS-Галилео-ГЛОНАСС будет уменьшать вероятность неудачи в этом процессе.

Первый из спутников системы Галилео, GIOVE-A (рис. 12.2), был выведен на орбиту российской ракетой Союз, запущенной с космодрома Байконур 28 декабря 2005 г. Полезная нагрузка состоит из изготовленного в Великобритании 600-килограммового спутника. Название спутника GIOVE-A является акронимом от Galileo In Orbit Validation Element (проверка достоверности системы Галилео на орбите), но также это итальянское название планеты Юпитер, чьи луны были открыты великим астрономом Галилео. Со спутником будут проведены различные технологические эксперименты, включая испытания атомных часов, самых точных из всех посылавшихся когда-либо в космос. Следующей фазой проекта будет запуск второго спутника GIOVE-B в 2006 г., а далее – четырёх рабочих спутников в 2008 г.

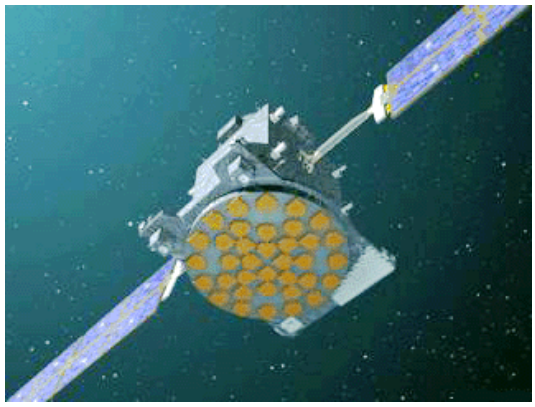


Рис. 12.2. Спутник GIOVE-A
(www.sciencedaily.com/releases/2006/01/060115154552)

ГНСС. ГНСС – Глобальная навигационная спутниковая система для определения координат, скорости и времени, разрабатываемая на международной основе для гражданских потребителей с целью замены GPS и ГЛОНАСС. Ожидается, что она будет совместима с системами GPS и ГЛОНАСС и на начальном этапе будет использовать их сигналы.

Международная организация гражданской авиации и Международная организация по морскому судоходству приняли GPS и ГЛОНАСС за ядро международной гражданской системы спутниковой навигации, названной Глобальной навигационной спутниковой системой или ГНСС (GNSS). Объединенная система GPS-Галилео иногда в литературе называется GNSS-2.

К 2015 г. ожидается функционирование трех среднеорбитальных СРНС с общим количеством навигационных спутников более 80 и общим числом навигационных сигналов порядка 20, половина из которых будет доступна гражданскому потребителю. Увеличится число сигналов от геостационарных спутников подсистем дополнения.

Польза от спутниковой навигации огромна. Например, авиационное сообщество предвидит, что это будет так же значительно, как появление реактивного двигателя (http://www.eoportal.org).

Китайская навигационная система Бэйдоу. Были опубликованы сообщения о двух событиях в области высокоточного спутникового позиционирования. Во-первых, китайская национальная система позиционирования на базе геостационарных спутников Бэйдоу с успешным запуском третьего из них стала способна обеспечивать пользователей данными об их положении в трех измерениях (широта, долгота, высота).

Система Бэйдоу (Beidou, английский эквивалент – Big Dipper – Большой Ковш, или Большая Медведица) является спутниковым компонентом независимой китайской системы навигации и позиционирования. Запуск спутников планируется в течение 2000 – 2010 гг., одновременно ведется разработка соответствующих подсистем. Конечный результат – своя индустрия для спутниковой навигации и позиционирования. Система начала разрабатываться с 1983 г., когда было предложено разработать свою систему из двух спутников на геостационарных орбитах. В 2000 г. был произведен запуск двух экспериментальных спутников. Окончательное созвездие Бэйдоу должно состоять из четырех спутников на геостационарных орбитах: двух действующих и двух запасных.

Масса спутников – 2 200 кг, в том числе топлива 1 100 кг. Орбита близка к круговой с высотой 35 800 км. Географические долготы подспутниковых точек – около 140°E и 80°E (http://www.astronautix.com).

Японская региональная Квазизенитная спутниковая система QZSS. Система QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) предназначена для дополнения к GPS (но не копирования) на территории Японии, запуск спутников планируется в 2008 и 2009 гг. (рис. 12.3).

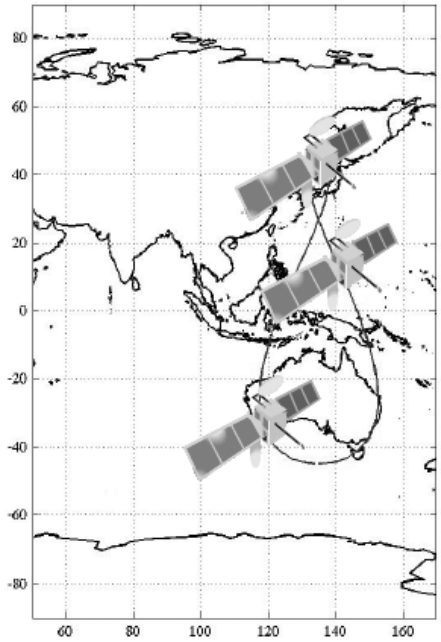


Рис. 12.3. Трасса спутников японской региональной навигационной системы QZSS при функционировании трех аппаратов [Takahashi, 2004]

Система QZSS состоит из трёх (или четырёх) спутников с наклонением 45°, находящихся в одной плоскости примерно на равных расстояниях один от

другого. Это созвездие из высоких эллиптических орбит запроектировано как геосинхронное (период равен звездным суткам, то есть 23 ч 56 мин). Апогей равен 39 700 км, перигей – 31 602 км. Спутники размещены на орбитах таким образом, что один из них всегда виден с территории Японии на большой высоте над горизонтом. По этой причине сигналы спутников значительно реже будут блокироваться высокими зданиями и горами, делая всю систему идеальной и надежной не только для навигации, но и для мобильной связи и вещания. Ожидается, что система повысит точность для пользователей GPS в юго-восточной Азии. Услуги можно будет расширить за счет геостационарных спутников японской дифференциальной подсистемы MSAS.

Для обеспечения навигации каждый спутник QZSS передает навигационные сигналы на одних и тех же четырех несущих частотах. Эти навигационные сигналы модулированы потоком данных, содержащих эфемериды и время. Полоса передачи сигналов достаточна для точной навигации без обращения к двухпутным передачам или объединению с доплеровскими измерениями [Takahashi, 2004].

12.2. Прогресс в средствах и методах наблюдений

Аппаратура. Интенсивное использование СРНС требует огромного количества аппаратуры. Объем продаж оборудования по земному шару за 2003 г. оценивается в 16.5 миллиардов долларов, и ожидается, что в 2006 г. он возрастет вдвое (www.accj.or.jp/document_library/Journal/1070851168.pdf). На геодезическую аппаратуру, в которой используются измерения по фазе несущей, приходится около 10% от объема.

В эволюции спутниковых приемников наблюдаются следующие тенденции:

– уменьшение в размерах, потреблении энергии и стоимости приемников, выпуск «одночиповых» приемников;

– цифровая обработка сигнала, повышенная надежность и чувствительность, более высокий темп записи, уменьшенный шум наблюдений, сопротивление многопутности;

– расширенные возможности геодезических приемников, вероятно, это будет двух- или трехчастотный ГНСС-приемник с увеличенной памятью, большей автоматизацией операций, оптимизированный для кинематического применения в реальном времени;

– улучшение точности измерения псевдодальностей до сантиметрового уровня;

– увеличение объема вычислительных возможностей в самом приемнике, получение конечных результатов непосредственно на пункте;

– интеграция спутниковых технологий в комплексные геодезические и навигационные системы;

– улучшение конструкций антенн, уменьшение в восприимчивости к многопутности [Rizos, 1999; Langley, 2000; Ashjaee, 2001; Mattos, 2005; Караванов, 2006].

Уже сейчас на рынке появились приемники и микросхемы под новые типы сигналов, как, например, трехсистемный 72-канальный чип GeNiuSS для сигналов GPS-ГЛОНАСС-Галилео (http://www.javad.com). Разрабатываются алгоритмы для ГНСС-позиционирования (см., например, [Feng, 2005]).

Предпринимаются многочисленные попытки преодоления одного из самых неприятных недостатков спутниковых методов – невозможности позиционирования в условиях затенения сигналов спутников, то есть внутри помещений, на улицах городов и т. д. Многообещающие результаты получили канадские исследователи по испытаниям навигационного приемника с высокой чувствительностью [MacGougan et al., 2002]. Разработан способ использования телевизионных сигналов как в аналоговой, так и в цифровой форме для определения положений. Тем же способом, как работает GPS, специальный приемник может извлекать из принятых телевизионных сигналов временную информацию и с помощью дополнительной информации о поправке часов передатчика определять плановые координаты приемника. А поскольку сигналы телевидения очень мощные, то можно получать положения даже внутри зданий, где обычный GPS приемник не работает [Martone, Metzler, 2005]. Тем не менее, основным направлением остается интегрирование спутниковых приемников с другими способами позиционирования (применение дальномеров, одометров, высотомеров, инерциальных систем и др., см. раздел 8.5).

Теория математической обработки и программное обеспечение. Теория обработки спутниковых наблюдений постоянно совершенствуется. В последние годы большое внимание уделялось работам над алгоритмами для надежного разрешения неоднозначности фазы несущей, улучшению стохастических моделей обработки фазы, совершенствованию моделей и способов учета влияния среды распространения сигнала, углублению теории преобразования координат и высот. Одновременно происходит совершенствование форматов для передачи данных. Эти особенности приводят к постоянному совершенствованию программного обеспечения. Для него характерно:

– улучшенные возможности с дружественным интерфейсом, большей автоматизацией при обработке;

– разрешение неоднозначности «On-the-Fly» становится более уверенным, допуская позиционирование по фазе несущей в одну эпоху;

– расширение разнообразия методик обработки в программных пакетах;

– резкий рост программ для кинематических съемок, точной навигации, ГИС;

– повышенные требования к мерам уверенности в качестве, особенно для режимов быстрой статики и кинематики;

– расширение использования точных продуктов МГС, включая орбиты, тропосферные и ионосферные модели;

– расширение диапазона улучшенных вторичных программ, например, для уравнивания сетей, ввода данных для ГИС и т. д.

Появились службы, выполняющие обработку наблюдений в режиме on-line.

Методы позиционирования. Появление спутниковых методов позиционирования привело к коренному изменению концепции построения государственных геодезических сетей, как за рубежом, так и в России [Основные положения…, 2004; Руководство…, 2003]. Большое внимание обращается на новые методы получения нормальных высот [Демьянов, 2003; Хабаров, 2004].

Высокоточная GPS технология становится основным средством для разнообразных геодезических работ. Начиная с решений в пост-обработке в начале 1980-х гг., высокоточное позиционирование в реальном времени Real-Time Kinematic Positioning по GPS/ГЛОНАСС является одним из наиболее широко используемых методов измерений. Установленные в различных странах сети опорных станций заменяют традиционные опорные сети, закрепленные монументами. Для метода RTK из-за вынужденной необходимости в коротких расстояниях между опорной и мобильной станцией сети должны быть очень плотными, и не всегда национальные сети могут обеспечивать полный охват для RTK. Недостаточная плотность сетей успешно компенсируется с помощью концепции виртуальных опорных станций. При их использовании уменьшаются систематические ошибки, вызванные данными опорных станций. Это позволяет пользователю не только увеличить расстояние между опорной станцией и мобильной станцией, но также повысить надежность системы и уменьшить время на инициализацию мобильного приемника. Эту концепцию можно использовать для улучшения работы старых, уже установленных сетей. Сети опорных станций GPS были развернуты во многих странах Европы, Америки, Азии и Австралии. Они являются основой для использования концепции виртуальных базовых станций. Сети также используются для определения параметров геодезических систем координат, обеспечивая услуги для RTK и измерений с пост-обработкой. Они используются в кадастре, для картографирования.

В целом напрашиваются следующие выводы:

– ГНСС-позиционирование по фазе несущей быстро развивается за последнее десятилетие, так что теперь можно получать положение в кинематическом режиме, в реальном времени и моментально.

– Стирается различие между точной ГНСС навигацией и ГНСС геодезией.

– При выполнении определенных условий позиционирование по фазе почти неотличимо от позиционирования по псевдодальностям в методе DGPS, но при намного более высокой точности.

– Однако имеются очень реальные ограничения в отношении универсального использования фазовых измерений. Они касаются количества спутников, качества геометрии, длины базовой линии, точности кодовых измерений, совершенства алгоритмов моделирования внешних условий и т. д. Если эти ограничения учитываются, то возможно очень быстрое разрешение неоднозначности в движении.

– Сетевые методы смягчают критические ограничения в очень быстром разрешении неоднозначностей, допуская максимальные расстояния во многие десятки километров.

– Важную тенденцию представляет установление сетей из непрерывно оперирующих приемников, поскольку оно постепенно ведет к сетевому методу с пост-обработкой или обработкой в реальном времени.

Будущее точного кинематического позиционирования зависит от ряда факторов, включая разработку аппаратных средств, алгоритмов обработки и программного обеспечения, методик измерений, в том числе связь через Интернет и GSM, а также усиление GPS через использование псевдолитов, систем инерциальной навигации, сенсоров, применение систем WAAS, объединение с ГЛОНАСС, развитие системы Галилео и модернизацию GPS для передачи второй и третьей гражданской частоты. Все это значительно улучшит надежность, целостность и точность результатов позиционирования [Rizos, 2001].

Считается, что статическое позиционирование сохранится в сетях непрерывного мониторинга, включая сети типа МГС, для построения государственных сетей класса ФАГС, ВГС, а также более низких классов в районах, где отсутствует инфраструктура для методов типа сетевой кинематики.

Системы координат и опорные сети. Прогресс в развитии средств и методов определения координат и, особенно, широкое внедрение в практику спутниковых навигационных систем требуют постоянного совершенствования координатной основы и уточнения взаимосогласованных параметров общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли. Используемая для функционирования GPS система отсчета WGS84 приближена к системам отсчета ITRF. Практически теперь WGS-84(G1150) идентична отсчетной основе ITRF2000 [Merrigan et al., 2002].

Многие страны заново определяют свои национальные геодезические системы координат, чтобы они совпадали (на некотором уровне точности) с отсчетными основами ITRF. Примерами такого подхода является отсчетная основа EUREF (European Reference Frame), созданная и поддерживаемая Европейской подкомиссией Международной ассоциации геодезии. В Южной Америке реализована подобная отсчетная основа SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), в Австралии – GDA94 (Geocentric Datum of Australia), в США и Канаде – NAD83(CORS96) [Soler, Marshall, 2003].

Точность реализации системы координат ПЗ-90 не вполне соответствует современным требованиям точности при измерениях с использованием спутниковой технологии [Юркина, Серебрякова, 2001]. Поэтому получение новых реализаций Параметров Земли ПЗ-90 является одной из задач фундаментального координатно-временного обеспечения в России [Демьянов, 2003; Губанов и др., 2005].

В условиях, когда геодезист, придя на точку, моментально получает координаты в нужной системе с абсолютной точностью на уровне сантиметра, построение опорных сетей в том объеме, как это выполнялось в классической

геодезии, становится ненужным. Однако для безопасности государства должна оставаться альтернатива спутниковому методу позиционирования, поскольку в условиях военных действий радионавигационные системы становятся достаточно уязвимыми.

Политика. Текущая политика ведущих стран мира отражает глубокое понимание роли и места ГНСС, как неотъемлемой части мировой экономической инфраструктуры и как средства укрепления национальной безопасности. В то же время, расширяющаяся и растущая зависимость от ГНСС военных, гражданских и коммерческих систем и инфраструктур делает многие из этих систем уязвимыми по отношению к внезапным перерывам в координатно-временных и навигационных услугах. Именно поэтому поддерживается развитие дополняющих и резервных средств координатно-временного обеспечения, наряду с повышением уровня помехозащищенности и развитием средств, обеспечивающих управляемое исключение доступа возможного противника к средствам и услугам СРНС (без ущемления интересов гражданских потребителей).

Страны, обладающие собственными ГНСС или создающие их, заинтересованы в обеспечении национальной безопасности и экономической независимости исключительно за счет собственных систем без какой-либо зависимости от зарубежных услуг координатно-временного и навигационного обеспечения.

Благодаря осознанию роли, которую играют вопросы координатно-временного и навигационного обеспечения в общем стремительно развивающемся процессе вовлечения высоких информационных технологий во все сферы человеческой деятельности и, как следствие, повышенному вниманию со стороны администрации развитых стран к вопросам и технологиям космической навигации в этой области, за последнее время достигнут значительный прогресс, который, наряду с планами модернизации СРНС GPS, ГЛОНАСС и создания новой европейской ГНСС Галилео, должен привести к качественно новому состоянию координатно-временного обеспечения потребителей во всем мире.

Заявляемые в проектных материалах точности навигации по сигналам ГНСС ГЛОНАСС, Галилео и GPS IIRM/GPS IIF (от 5 до 15 м), вероятно, будут превзойдены благодаря совершенствованию средств и методов эфемеридно-временного обеспечения, приема и обработки сигнала в навигационном приёмнике.

Проблемы использования и распространения современных навигационных технологий в РФ в значительной степени связаны с отсутствием сбалансированной нормативно-правовой базы, регламентирующей разработку, производство, применение и ввоз навигационной аппаратуры и других средств координатно-временного навигационного обеспечения. Существующая нескоординированная нормативно-правовая система регулирования деятельности в области космической навигации и геодезии не может способствовать созданию и развитию единой системы координатно-временного обеспечения. Именно поэтому необходимы корректировка существующего

законодательства в области координатно-временной и навигационной деятельности и создание единой системы нормативно-правового регулирования этой деятельности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
АДРЕСА ИНТЕРНЕТ САЙТОВ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СРНС

Таблица А.1. Службы информации по СРНС ГЛОНАСС, GPS, Галилео

Организация	Страна	Адрес
КНИЦ (KNIC)	Россия	http://www.glonass-center.ru
Еврокомиссия	Евросоюз	http://www.europa.eu.int/comm/dgs/energy_ transport/galileo/
Еврокомиссия	Евросоюз	http://www.Galileo-pgm.org
AUSLIG	Австралия	http://www.auslig.gov.au
CBIS	США	http://igscb.jpl.nasa.gov
GIBS	Германия	http://gibs.leipzig.ifag.de
JPO NAVSTAR	США	http://gps.losangeles.af.mil
NIS	США	http://www.navcen.uscg.mil
Civil GPS Service Interface Committee	США	http://www.navcen.uscg.gov/cgsic/Default.htm

Таблица А.2. Информация по технологиям, литературе

Организация или издание	Страна	Адрес
АГП Навгеоком	Россия	http://www.navgeokom.ru http://www.agp.ru
ГИС Ассоциация	Россия	http://www.gisa.ru
Журнал «Геопрофи»	Россия	http://www.geoprofi.ru
Журнал «Professional Surveyor»	США	http://www.profsurv.com
Журнал «GPS World»	США	http://gpsworld.com
Компания «Геокосмос»	Россия	http://www.geokosmos.ru
Компания «ПРИН»	Россия	http://www.prin.ru
Компания «УралГЕОтехнологии»	Россия	http://www.ugt.ur.ru
Компания GPSCom	Россия	http://www.gpscom.ru
Семинар NavTech GPS	США	http://www.nsvtechgps.com
Journal of Global Positioning Systems	Австралия	http://www.gmat.unsw.edu.au/wang/jgps/
GPS User Magazine		www.gpsuser.com

Таблица А.3. Научные центры, ресурсы, производственные организации

Организация	Страна	Адрес
Роскартография	Россия	http://www.roskart.gov.ru
Институт прикладной астрономии	Россия	http://www.ipa.nw.ru
Научно-технический центр современных технологий «Интернавигация»	Россия	www.internavigation.ru
US National Geospatial Intelligence Agency NGA	США	http://164.214.2.59/GandG/GandG.html http://earthinfo.nima.mil/GanG/
Международная ГНСС служба (МГС, IGS)	США	http://igscb.jpl.nasa.gov
ITRF	Франция	http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/
FAO		http://www.fao.org/
EUREF		http://homepage.oma.be/euref/ http://www.oosa.unvienna.org/SAP/stdm
Международная ассоциация геодезии МАГ (IAG)		http://www.gfy.ku.dk/~iag
SIRGAS		http://www.dgfi.badw-muenchen.de/gps/sirgas.html
IAG Commission X		http://lareg.ensg.ign.fr/GRGN/
МСВЗ (IERS)		http://www.iers.org/
Institute for Applied Geodesie, IfAG	Германия	http://www.ifag.de http://gibs.leipzig.ifag.de http://www.potsdam.ifag.de
Institute of Navigation	США	http://www.ion.org
Университет консорциума NAVSTAR (UNAVCO)	США	http://www.unavco.ucar.edu
Национальная геодезическая служба NGS	США	http://www.ngs.noaa.gov
CDDIS	США	http://www.cddisa.gsfc.nasa.gov
Файлы наблюдений МГС		ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/
Точные орбиты МГС		ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/
Координаты ITRF	США	http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/table2.txt
NGS (информация по GPS антеннам)	США	www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml
Geo++(информация по GPS антеннам)	Германия	http://www.geopp.com/gnpcvdb/AOA_DM_T/general.html

Таблица А.4. Описание навигационных систем, теория применения, научные статьи и журналы

Автор, организация или издание	Страна	Адрес
ГЛОНАСС-ГРУППА	Россия	http://www.orc.ru/~vhar/
Институт технологий, г. Дельфт	Нидерланды	http://enterprise.lr.tudelft.nl/mgp/modules/Papers/
Крис Ризос, Университет Южного Уэльса	Австралия	http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/
Дэвид Вильсон	Англия	http://www.erols.com/dlwilson/gps.htm
Петер Дана	США	http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html
Денис Тучин	Россия	http://www.kiam1.rssi.ru/~den/gps/ ftp://ftp.kiam1.rssi.ru/pub/gps/book/brn/
Майкл Краймер	Канада	http://www.craymer.com
Норрис	Канада	http://www.ualberta.ca/~norris/
В.В. Конин «Спутниковые системы и технологии»	Украина	http://www.kvantn.com.ua/resourse/All/public.html
GPS-info – навигация для всех	Россия	http://www.gpsinfo.ru/
GPS-club	Россия	http://gps-club.ru/index.php
Университет Калгари, кафедра инженерной геоматики	Канада	http://geomatics.ucalgary.ca/
Университет Нью-Брунсвика	Канада	http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/
Centre for Observation and Modelling of Earth-quakes and Tectonics	Англия	http://comet.nerc.ac.uk/schoolsgps1.html
Educational Observatory Institute		http://www.edu-observatory.org/gps/gps.htm
Javad	США	http://www.javad.com/jns/gpstutorial/jpstutorial.pdf
GPS Tutorials and Information	США	http://www.topconps.com/Tutorial/index.html
Trimble Navigation	США	http://www.trimble.com/gps/index.html
Federal Aviation Administration	США	http://gps.faa.gov/
US Coast Guard	США	http://www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo
Журнал «Earth Planets Space»	Япония	http://www.terrapub.co.jp/index.html
Aerospace Corporation GPS Primer		http://www.aero.org/education/primer/gps

Таблица А.5. Производители спутниковой аппаратуры

Компания	Страна	Адрес
Allen Osborne Associates	США	http://www.aoa-gps.com
Integrinautics	США	http://www.integrinautics.com
Javad Positioning Systems	США	http://www.javad.com
Leica Geosystems	Швейцария	http://www.leica-geosystems.com
NavCom Technology, Inc.	США	http://www.navcomtech.com
NovAtel, Inc.	Канада	http://www.novatel.com
Sokkia Corporation	Япония	http://www.sokkia.com
Thales Navigation	США	http://www.thalesnavigation.com
Topcon Positioning Systems	США	http://www.topcons.com
Trimble Navigation Ltd.	США	http://www.trimble.com/
Garmin International	Тайвань	http://www.garmin.com
GPS information website	США	http://gpsinformation.net/
КБ «НАВИС»	Россия	http://www.navis.ru
ОАО «Российский институт радионавигации и времени» РИРВ	Россия	http://www.rirt.ru
НИИ Радиоэлектроники КГТУ	Россия	http://www.ire.krgtu.ru/nir/

Примечание: статьи из некоторых платных журналов, например, Journal of Geodesy, GPS Solutions, можно получать из Российской электронной библиотеки (http://www.elibrary.ru или http://www.e-library.ru).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ГЛОССАРИЙ

Абсолютный метод – метод трехмерного определения координат объекта и времени по наблюдениям спутников, независимо от наблюдений на других пунктах.

Альманах (GPS, ГЛОНАСС) – набор параметров, позволяющих оценить траекторию движения и ход часов одного или нескольких спутников СРНС. Информация об орбитах представляет собой эфемеридные данные пониженной точности. Альманах каждого активного спутника содержится в его навигационном сообщении и обновляется еженедельно. Время передачи альманаха GPS составляет 12.5 мин, для спутников ГЛОНАСС – 2.5 мин.

Антисанкционированный режим (*Anti Spoofing*) – режим функционирования GPS, предотвращающий несанкционированный доступ использования *Р-кода*. Осуществляется на обеих несущих сложением по модулю два Р-кода с частотой 10.23 МГц и секретного W-кода с частотой около 500 КГц. В результате *код Р* шифруется в *код Y.*

Атрибут **(*attribute*) – характеристика объекта съемки для ГИС. Общий для всех объектов атрибут – географическое положение объекта.**

Базовая линия (*baseline*) – отрезок ориентированной прямой или трехмерный вектор между двумя точками, вычисленный по одновременно собранным данным посредством обработки фазовых наблюдений. Это понятие является фундаментальным в технологии *относительного местоопределения*.

Базовая станция (*base station*) – антенна и приемник, установленные на точке с известными координатами для сбора данных, которые необходимы для дифференциальной коррекции файлов измерений полевых приемников.

Блок (*block*) – группа спутников GPS одной серии, имеющих одинаковые технические характеристики. Различают Блок I, Блок II, Блок IIA, Блок IIF, Блок IIR.

Блок I спутников – первая серия спутников GPS, содержащая 11 спутников, имеющих угол наклона орбиты 63^{o}.

Блок II спутников – серия спутников GPS второго поколения, поддерживающих режимы SA и AS.

Блок IIA спутников – серия спутников GPS второго поколения, имеющих угол наклона орбит 55^{o}. Состоит из 15 спутников.

Блок IIF спутников – серия спутников, запуск которых начался в 2005 г.

Блок IIR спутников – серия спутников, запуск которых начат в 1996 г. и которые поддерживают автономное определение собственных орбит. Спутники данной серии имеют возможность измерять расстояния между собой и передавать эти измерения на другие ИСЗ и на наземные станции.

ВОС (*Virtual Reference Station*) – виртуальная (не существующая в реальности) опорная станция, наблюдения для которой вычисляются на основе сетевого решения реальных опорных станций.

«Горячий старт» (hot start) – состояние навигационного приемника, возникающее, когда его питание было в течение некоторого времени отключено,

а затем включено. При этом данные об эфемеридах, альманахе и времени сохраняются, что позволяет резко сократить время первого определения местоположения.

Двойная разность (*double difference*) – линейная комбинация фаз несущих (или псевдодальностей), измеренных одновременно парой приемников, наблюдающих одну и ту же пару спутников. Соответствует разности для одного и того же спутника его *одинарных разностей фаз*, полученных приемниками GPS в определенный момент.

Двухчастотный приемник (*dual-frequency receiver*) – приемник, настроенный на прием двух несущих частот, излучаемых спутниками GPS или ГЛОНАСС.

Дифференциальный режим (*Differential GPS, DGPS*) – точное измерение относительных положений двух приемников, отслеживающих одни и те же сигналы GPS. Режим возможен в реальном времени и с пост-обработкой. Термин обычно применяется к наблюдениям с кодовыми приемниками.

Дифференциальный метод навигации (*differential navigation*) – метод непрерывного местоопределения подвижного объекта относительно неподвижного. См. также *навигация*.

Доступность (*availability*) **–** число часов в сутки для отдельного местоположения, когда имеется достаточное количество спутников с указанным углом отсечки по высоте и допустимой величиной *PDOP*, чтобы сделать фиксацию координат.

Измерения грубые (*blunders*) – наблюдения, имеющие поправки больше, чем предсказанные.

Инициализация приемника (*receiver initialization*) – процесс измерений подвижным приемником в кинематических и псевдокинематических способах съемки, при котором определяется целочисленная неоднозначность фазовых отсчетов. Разработаны методы инициализации на земле (on-the-ground) и в движении (on-the-fly).

Ионосфера (*ionosphere*) – слой земной атмосферы, характеризующийся наличием в ней заряженных частиц (электронов и ионов), образующихся в результате фотоионизации атмосферы солнечной радиацией. Для определения границ ионосферы полагают, что плотность электронов достаточна для заметного воздействия на распространение радиоволн определенной частоты. Ионосфера Земли приблизительно простирается от 50 до нескольких сотен километров по высоте. Ионосфера вызывает дисперсию радиоэлектрических сигналов. Ионосферная задержка сигналов может быть измерена при использовании *двухчастотных приемников*.

Ионосферная задержка (*ionospheric delay*) – при прохождении через ионосферу радиоволна испытывает задержку, которая зависит от ее электронной плотности и частоты несущей. Групповая задержка зависит от дисперсии в ионосфере так же, как и фазовая задержка. Фазовая и групповая ионосферные задержки одинаковы по величине и противоположны по знаку.

Калмана фильтр (*Kalman filtering*) **–** численный метод для слежения за изменяющимся во времени сигналом при наличии шума. Если сигнал может

быть охарактеризован некоторым числом параметров, которые медленно изменяются со временем, то фильтр Калмана может использовать входящие «сырые» измерения, чтобы лучше оценить эти параметры как функцию времени.

Канал квадратирования (Squaring type channel) – канал приемника, который умножает сигнал спутника на себя (возводит в квадрат) для получения второй гармоники несущей, которая не содержит кодовую модуляцию. Используется в бескодовых приемниках.

Код Y (*Y-code*) – секретный код GPS. Параметры *Y-кода* имеются в соответствующих службах МО США. *Y-код* – шифрованная версия *P-кода*.

Код P (*P-code*) – точный (precise) или защищенный (protected) код GPS, доступный пользователям службы PPS и передаваемый на частотах *L1* и *L2*. Очень длинная последовательность псевдослучайных двоичных двухфазных модуляций несущей GPS при скорости передачи 10.23 МГц, которая повторяется через каждые 267 суток. Каждую неделю сегмент этого кода является единственным для одного спутника GPS и вновь устанавливается каждую неделю.

Код C/A (*C/A-code*) – основной код GPS, доступный пользователям и излучаемый на частоте *L1*. Частота модуляции *C/A*-кода равна 1.023 МГц. *C/A*-код повторяется каждую миллисекунду.

Кодирование (*encoding*) – представление информации в дискретной форме с помощью различных символов по правилам однозначного кодирования.

Коллокация (*collocation*) – версия МНК, в которой информация об измеряемых величинах дается на уровне только их ковариационной матрицы.

Контрольный сегмент (*control segment*) – совокупность постоянно действующих наземных станций, предназначенных для контроля нормального функционирования системы СРНС (калибровка часов спутников, уточнение эфемерид, слежение за физическим состоянием ИСЗ). Результатом действия данного сектора является навигационное сообщение.

Космический сегмент (*space segment*) – космодром и совокупность ИСЗ, образующих при своем функционировании некоторую космическую систему. Спутники системы генерируют и передают сигналы стандартного и точного кода, а также навигационные сообщения.

Маска GDOP (*GDOP Mask*) – см. *маска PDOP.*

Маска PDOP (GDOP) (*PDOP Mask, GDOP Mask*) – наибольшее значение PDOP (GDOP), при котором приемник будет вычислять позицию или вести запись данных.

Масштабный показатель точности (*reference factor*) – ошибка единицы веса для группы измерений. Равен корню квадратному из суммы взвешенных квадратов поправок, деленной на число степеней свободы. Если речь идет о сети, то масштабный показатель точности и ошибка единицы веса имеют одинаковый смысл.

Метка события (*Event mark*) – запись случайного события, такого, как закрытие затвора фотокамеры, отметка эхолота и пр. Приемник может записать событие, содержащее время и буквенно-цифровые комментарии, введенные с

клавиатуры. Событие может запускаться через триггер, клавиатуру или электросигнальный вход на одном из портов приемника.

Миссия (*mission*) – совокупность параметров сеанса *GPS приемников*, обеспечивающих возможность их совместного использования для определения базовых линий.

Многоканальность (*multiplexity*) – способ обработки сигналов, реализованный в приемниках, позволяющий одновременно отслеживать измерительную информацию, непрерывно поступающую с разных спутников.

Многопутность (*multipath*) – помеха при наблюдениях, вызванная интерференцией сигнала, который достиг антенны по двум или более различным траекториям вследствие отражения радиоволны от строений, деревьев и других объектов. Отраженный сигнал проходит более длинный путь, чем основной сигнал, и дает ошибочное значение псевдодальности или фазы, а следовательно, и координат.

Модель математическая (*mathematical model*) – соотношение, представляющее собой формальное отражение реального физического процесса. Устанавливает связь между наблюдениями и параметрами. Часто делится на функциональную и стохастическую модели.

Модель стохастическая (*stochastic model*) – соотношение, описывающее характеристики ошибок наблюдений. Для этой цели служит ковариационная матрица.

Навигационное поле (*navigation field*) – совокупность радиосигналов в околоземном пространстве, излучаемых штатными навигационными КА.

Навигационные данные (*navigation data*) – совокупность радиоинформации, излучаемой спутниками СРНС. Обычно включает в себя эфемериды, параметры часов и параметры модели ионосферы.

Навигация (*navigation*) – 1) искусство вождения транспортных средств в заданном направлении путем определения их местоположения, вычисления оптимальной траектории движения и ориентирования относительно этого положения; 2) оценка в реальном времени мгновенного положения движущегося объекта, осуществляемая на борту этого объекта; 3) мгновенное местоопределение движущейся точки.

При использовании GPS и ГЛОНАСС навигация, в общем случае, осуществляется по измеренным *псевдодальностям*.

Неоднозначность (число неоднозначности) (*integer ambiguity*) – целое число фазовых циклов, которое не определяется фазометром, а устанавливается другими аппаратурно-математическими решениями. Применяется также термин **многозначность**.

Несущая (*carrier*) – сигнал, предназначенный для переноса информации, заложенной в несущую путем амплитудной, частотной или фазовой модуляции.

Несущая частота (*carrier frequency*) – частота несущего сигнала передатчика. Частоты несущих колебаний GPS сигналов: L1 = 1.57542 ГГц, L2 = 1.22760 ГГц.

Одинарная разность (*single difference*) – разность фаз сигналов, принятых двумя приемниками, наблюдавших один и тот же спутник, либо разность фаз

сигналов, принятых одним приемником от двух спутников в данный момент времени.

Одночастотный приемник (*single-frequency receiver*) – приемник, принимающий сигналы лишь на одной из двух частот, излучаемых спутниками СРНС (как правило, на частоте L1).

Отношение «сигнал – шум» (*signal to noise radio, SNR*) – мера интенсивности спутникового сигнала, выраженная в безразмерных единицах.

Относительное позиционирование (*relative positioning*) – определение положения одной точки относительно другой. Термин обычно применяется при работе с фазовыми приемниками.

Отображения функция (*mapping function*) – зависящий от угла высоты коэффициент для приведения зенитной тропосферной задержки к наклонному направлению на спутник. Иногда этот же термин используют для приведения вертикальной ионосферной задержки к направлению на спутник.

Ошибки немоделируемые (*unmodeled errors*) – в процессе измерений очень часто присутствуют ошибки, которые не моделируются по каким-либо причинам (сложности, за ненадобностью). Например, влияние окружающей среды в геоспутниковых измерениях. Эти параметры не получают поправок, но их влияние отражается на необходимых параметрах в ковариационной матрице последних.

Позиционирование (*positioning*) – 1) местоопределение; 2) процедура, заключающаяся в контроле перемещений движущегося объекта с целью направить его в требуемую точку.

Позиционирование динамическое (*dynamic positioning*) – позиционирование с использованием информации о силах, воздействующих на объект во время его движения. Часто объединяет кинематическое позиционирование по GPS с инерциальным методом. См. также *позиционирование кинематическое*.

Позиционирование кинематическое (*kinematic positioning*) – непрерывное позиционирование подвижного объекта, не требующее информации о силах, действующих на этот объект. Это позиционирование обычно выполняется в различные моменты времени для получения наиболее точных результатов. См. также *позиционирование динамическое, позиционирование псевдокинематическое*.

Позиционирование в режиме быстрой статики (*rapid static positioning, fast static positioning*) – статическое позиционирование, реализованное в течение нескольких минут с использованием специального алгоритма, позволяющего быстро разрешать неоднозначность, то есть число фазовых циклов.

Позиционирование в режиме «стой – иди» (*stop-and-go*) – кинематическое позиционирование, при котором приемник после проведения инициализации перемещается от одной точки к другой с использованием наблюдений короткой продолжительности на каждой из точек. Позиционирование в режиме «стой – иди» не требует возвращения на точки.

Позиционирование псевдокинематическое (*pseudo-kinematic positioning*). Вид кинематического позиционирования с подвижной точки, траектория которой не является произвольной. Например, средство передвижения может вновь оказаться в ранее зафиксированной точке, и не один раз. Кроме того, оно может оказаться с известным местоположением. См. также *позиционирование кинематическое*, *позиционирование динамическое*.

Позиционирование с повторениями, реоккупация (*reoccupation positioning*) – вид псевдокинематической съемки, требующей выполнения измерений на пункте несколько раз. Все данные, полученные в различное время и на различных спутниках, объединяются для получения одного решения.

Позиционирование статическое (*static positioning*) – позиционирование при неподвижном (покоящемся) приемнике. Это самый точный метод позиционирования. Данный метод, в общем случае, требует продолжительных наблюдений: от десятков минут до нескольких суток.

Позиционное решение (*position solution*) – определение трех координат пункта и времени из обработки принятого ряда измерений сигнала и навигационного сообщения, как минимум, с четырех спутников.

Покрываемость территории созвездием (*constellation value*) – часть земной поверхности, для которой показатель *PDOP*, осредненный по времени, соответствующий оптимальной геометрии созвездия из четырех спутников, находится в пределах от 5 до 6. Это значение позволяет выбирать *созвездия GPS*. Оно же является показателем степени возможного использования появляющихся на горизонте спутников.

Пользователей сегмент (*user segment*) – часть спутниковой системы, включающая в себя аппаратуру потребителя (ГЛОНАСС/GPS приемники).

Приемник ГЛОНАСС/GPS (*GLONASS/GPS-receiver*) – радиоэлектронный приемник, основное назначение которого состоит в измерении *псевдодальностей* или *фаз* и декодировании *навигационных данных*. См. также *одночастотный приемник* и *двухчастотный приемник*.

Приемник мультиплексный (*multiplexed receiver*) – приемник, через один канал которого проходит последовательность сигналов от разных спутников. См. также *приемник многоканальный*, *приемник бескодовый*, *приемник кодовый*.

Приемник бескодовый (*codeless receiver*) – приемник, функционирование которого не требует знания кода принимаемого сигнала. См. также *приемник кодовый*.

Приемник кодовый (*correlation-type receiver*) – приемник, требующий знания, по крайней мере, одного системного кода для своего функционирования. Отечественное название – *приемоиндикатор*. См. также *приемник бескодовый*.

Приемник многоканальный (*multi-channel receiver*) – приемник, имеющий множество каналов, позволяющих одновременно отслеживать более одного спутника. См. также *приемник мультиплексный*, *приемник бескодовый*, *приемник кодовый*.

Процессор базовых линий (*Baseline processor*) – компьютерная программа или ее модуль, которые дают решение на основе спутниковых измерений.

Могут запускаться на персональном компьютере или как процессор реального времени в приемнике. Ряд фирм применяет также термин *engine*.

Псевдодальность ((*code*) *pseudorange*) – измеренное расстояние между спутником (на момент излучения сигнала) и приемником (на момент приема сигнала), получаемое путем сравнения показаний часов. Основная составляющая разности между псевдодальностью и реальной дальностью обусловлена ошибкой часов приемника. См. также *фаза*.

Псевдодальность сглаженная ((*phase*) *smoothed pseudorange*) – измеренная псевдодальность, полученная (уточненная) с помощью измерений фазы несущей (точных, но неоднозначных) с целью уменьшения влияния шумов. Вычисление сглаженных псевдодальностей происходит по рекуррентному алгоритму.

Псевдослучайный код, псевдослучайный шум (*pseudorandom code, pseudorandom noise*) – бинарный код, статистические характеристики которого соответствуют характеристикам соответствующей случайной величины (шума). В отличие от естественного шума, псевдослучайный шум может точно воспроизводиться. Отличается низкой автокорреляцией, что позволяет использовать одну частоту для всех спутников. Пример: *C/A*-код, *P*-код, *Y*-код.

Псевдоспутник (*pseudo satellite*) – станция наземного базирования, передающая сигналы с такой же структурой, что и действующий спутник. Применяется также термин *псевдолит*.

Радиоэфемериды (*broadcast ephemeris*) – эфемериды, содержащиеся в радионавигационных данных (бортовые эфемериды). Более точные данные, чем альманах, но грубее, чем точные эфемериды, получаемые при пост-обработке.

Ровер (*rover*) – приемник, собирающий спутниковые данные на точках.

Сеанс (*session*) – период сбора данных, характеризующийся временем начала наблюдений, маской высоты, типом данных, подлежащих накоплению (координаты и/или спутниковые данные). Длительность сеанса зависит от выбора созвездия спутников и/или выбора группы приемников. То же, что наблюдательная сессия.

Секунда SI (*International System second*) – атомная секунда, определенная как 9192631770 периодов излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Секунда атомная – то же, что и *секунда SI*.

Секунда звездная – период времени, равный 1/86400 звездных суток или 0.99726966 секунды среднего солнечного времени.

Селективный доступ (*selective availability, SA*) – программа МО США для понижения точности измерения псевдодальностей несанкционированными пользователями путем введения цифрового шума в показания часов и в данные эфемерид. Отменен со 2 мая 2000 г.

Синяя Книга (*Blue Book*) – неформальное название руководства Национальной геодезической службы США по оформлению результатов топографо-геодезических измерений.

Созвездие GPS (*GPS constellation*) – группа спутников GPS, функционирующая на орбите и потенциально доступная для наблюдений в данной точке. См. также *Космический сегмент*.

Спутниковая геометрия (*satellite geometry*) – взаимное расположение доступных спутников относительно приемника на конкретный момент времени. Набор координат спутников, приводящих к высокому (или низкому) значению фактора PDOP, часто называется «слабой (или хорошей) спутниковой геометрией».

Срыв цикла (*cicle slip*) – нарушение непрерывности измерения фазы, обусловленное временной потерей захвата сигнала контуром слежения за несущей.

τ-критерий (*Tau Criterion*) – вероятностный тест, опирающийся на распределение Стьюдента, которое, в свою очередь, базируется на числе наблюдений, доверительной вероятности (95%) и числе степеней свободы. Тест позволяет выявить грубые измерения.

«**Теплый старт**» (*warm start*) – состояние приемника при выключенном питании, в котором его память сохраняет текущий (до выключения) альманах и начальные координаты в границах определенной зоны (например, радиусом 3 000 км), а также обеспечивается поддержка часов истинного времени. Первое определение координат в этом режиме занимает существенно меньше времени, чем при «холодном старте», так как приемник может идентифицировать спутники, предположительно находящиеся в зоне видимости, и вычислять планируемое доплеровское смещение для каждого из них.

Тройная разность фаз (*triple phase difference*) – линейная комбинация измерений фаз (или псевдодальностей), представляющая собой, в общем случае, разность во времени *двойных разностей* относительно двух спутников и двух приемников.

Тропосфера (*troposphere*) – внутренняя часть земной атмосферы, простирающаяся от поверхности Земли, примерно до 8 км на полюсах и до 17 км на экваторе. В этом слое температура падает с высотой достаточно равномерно. Относительно радиосигналов тропосфера ведет себя как прозрачная среда. Ее показатель рефракции не зависит от частоты радиосигнала.

Тропосферная задержка (*tropospheric delay*) – из-за влияния нейтральной атмосферы измеренные дальности оказываются длинней, чем геометрическое расстояние между приемником и спутником. Задержка зависит от температуры, влажности и давления.

Угол отсечки по высоте (*Маска высоты*) (*cut-off elevation, elevation mask*) – угол высоты, ниже которого данные о небесных объектах (ИСЗ, квазары и т. д.), попавшие в массив измерений, не будут приняты в расчеты.

Уравнивание, полностью ограниченное (*fully constrained abjustment*) – уравнивание, результатом которого является отнаблюденная сеть, привязанная к геодезической основе.

Уравнивание, минимально ограниченное (свободное) (*minimally constrained adjustment*) – уравнивание, позволяющее выявить реальную

точность и конфигурацию сети за счет отсутствия фиксированных параметров, необходимых для привязки сети к существующей геодезической основе.

Фаза несущей (*carrier phase*) – фаза биения, образующаяся как разность фазы, полученной от носителя (в общем случае от спутникового передатчика) и фазы сигнала, генерируемого приемником на частоте, соседней с частотой принятого сигнала или одной из кратных ему частот. Фазы могут быть измерены на каждой рабочей частоте системы (например, на частотах *L1* и *L2* в случае использования GPS).

Фазовый центр антенны (*antennae phase center*) – фазовый или электрический центр – точка антенны, в которой совпадают одинаковые фазовые фронты пришедших радиосигналов. Для антенны приемника GPS фазовый центр *L1* и фазовый центр *L2* обычно не совпадают.

χ^2-тест (*Chi-square test*) – вероятностный тест, опирающийся на сумму взвешенных квадратов поправок, число степеней свободы и уровень значимости (обычно 95%). Тест позволяет отвергнуть или принять гипотезу о том, что априорные ошибки были оценены точно.

«**Холодный старт**» (*cold start*) – состояние приемника после включения питания, в котором осуществляется поиск навигационных сигналов при априорно неизвестных данных об эфемеридах спутников и альманахе системы. В режиме «холодного старта» у приемника (в том числе у элементов памяти) полностью отключено питание.

Целостность (*integrity*) – вероятность выявления отказа (канала аппаратуры, всей аппаратуры, станции, сети станций, навигационной системы) в течение времени, равного заданному или менее его. Численно целостность оценивается вероятностью оповещения потребителей при нарушении работы системы в пределах допустимого интервала времени.

Центр управления полетами (*control center*) – центр, из которого координируются все действия по исполнению космического запуска и полета ЦУП спутников GPS, находится в Колорадо Спрингс (входит в контрольный сегмент).

Цикл (*Cycle*) – 1) одна полная волна радиосигнала, сдвиг по фазе 360^o; 2) период, в течение которого GPS приемник делает одно измерение по спутникам.

Частота биения (*Beat frequency*) – каждая из двух дополнительных частот, созданных путем смешивания сигналов двух частот. Частоты биений равны сумме или разности двух исходных частот.

Частота фундаментальная (*fundamental frequency*) – опорная частота, генерируемая спутниковым осциллятором 10.23 МГц. Частоты всех других сигналов получаются преобразованием опорной частоты.

Чип (*Chip*) – 1) единица времени, необходимая для передачи 1 или 0 бинарного кода; 2) интегральная цепь (микросхема).

Число избыточности (*redundancy number*) – число степеней свободы отдельного наблюдения. Числа избыточности измерений являются диагональными элементами матрицы, равной произведению матрицы весовых коэффициентов поправок и матрицы весов измерений. Сумма диагональных элементов дает *число степеней свободы.*

Число степеней свободы (*degrees of freedom*) – величина, равная разности числа всех измерений и необходимых параметров (число избыточных измерений).

Английские термины и сокращения

AS (Anti-Spoofing) – см. антисанкционированный режим.

BRG (Bearing) – в геодезии – азимут, дирекционный угол, в навигации – пеленг. Отсчитывают от северного конца истинного (true) или магнитного (magnetic) меридиана по часовой стрелке.

C/A (Coarse Acquisition) – см. код C/A.

CDMA (Code division multiple access) – техника связи множественного доступа с разделением по кодам.

CEP (Circular Error Probable) – статистическое измерение планового положения в 2D-положении. Круг, радиус которого равен CEP, включает 50% точек данных. (Половина всех точек находятся внутри, половина снаружи.)

CGS (Civil GPS Service) – круглосуточная гражданская служба США по работе GPS.

Chip Rate – число чипов в секунду (тактовая частота). Для C/A-кода тактовая частота равна 1 023 000.

CIGNET (Coopetative International GPS Netvork) – Международная геодезическая сеть, созданная по результатам измерений с помощью GPS. Руководство работами осуществляет NGS.

CMR (Compact Measurement Record) – формат для двухчастотных данных, разработан компанией Trimble для передачи данных более компактным и надежным способом, чем в других форматах. Применяется для передачи данных мобильным приемникам в кинематических измерениях в реальном времени.

CORS (Continuously Operating Reference Stations) – сеть непрерывно действующих опорных станций в США, образующих активную опорную сеть. Расстояния между пунктами – около 200 км. Результаты круглосуточных измерений двухчастотными фазовыми GPS приемниками доступны по линиям связи.

DGPS (Differential Global Positioning System) – дифференциальный режим GPS позиционирования.

DMA (Defense Mapping Agency) – Картографическая служба Армии США. Новое название с октября 1996 г. – National Imagery and Mapping Agency, NIMA (Национальное агентство по обработке изображений и картированию). В ноябре 2003 г. NIMA было преобразовано в National Geospatial-Intelligence Agency, NGA (Национальное агентство по геокосмической разведке).

DOD (Departament Of Defence) – Министерство Обороны США.

DOP (Dilution Of Precision) – коэффициент потери точности результатов (относительно априорного стандарта). Например, существуют следующие DOP: GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, RDOP.

EGNOS (European Geostationary Overlay System) – Европейская дифференциальная навигационная подсистема, в которой усиление GPS

достигается за счет использования геостационарных спутников, передающих GPS подобные сигналы.

FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services) – Федерация Астрономической и Геофизической Служб.

FDMA (frequency division multiple access) – техника связи множественного доступа с разделением по частоте.

FOC (Full Operational Capability) – полная возможность работы по GPS, была достигнута при функционировании на заданных орбитах 24 спутников (Блоки II, IIA) и после тестирования для военных целей.

GDOP (Geometric Dilution Of Precision) – геометрический фактор потери точности координат из-за ошибок времени и геометрии используемого созвездия спутников и пользователя.

GG (GPS/GLONASS) **receiver** – GPS/ГЛОНАСС приемник.

G-GIWG (GPS-GLONASS Interoperability Working Group) – рабочая группа по обеспечению взаимодействия систем GPS и ГЛОНАСС, учрежденная Институтом навигации ION (Institute of Navigation) в 1996 г.

GLONASS (Global Navigation Satellite System) – Российская навигационная спутниковая система позиционирования в масштабах земного шара.

GNSS (Global Navigation Satellite System) – будущая система глобальной навигации, удовлетворяющая потребностям морской и аэрокосмической навигации. Первая версия GNSS-1, которая, однако, все еще не удовлетворяет требованиям пользователей и требует дальнейшего совершенствования GPS и GLONASS. GNSS-2 – объединенная система GPS и Галилео.

GPS (Global Positioning System) – американская система позиционирования в масштабах земного шара. См. NAVSTAR.

GPST, GPS Time – опорное время GPS, совмещено со временем UTC(USNO) в Гринвичскую полночь 5/6 января 1980 г. Время GPS Time имеет непрерывную шкалу, в отличие от UTC, шкала которого ступенчато-равномерная. Различие между ними равно числу скачков секунд в шкале UTC, прошедших после 1980 г. Шкала GPST определяется Контрольным сегментом. С TA1 соотносится следующим образом: TA1 = GPST + 19 с.

GPS week – неделя GPS – самая большая единица GPS времени, равная 684 800 с. Счет недель GPS ведется с полуночи по времени UTC с 5 на 6 января 1980 г.

GPSIC (*GPS Information Center*) – информационный центр GPS. Является частью *CGS*.

GRS80 (*Geodetic Reference System*) – Международный референц-эллипсоид, принятый в 1980 г.

HAE (*Height Above Ellipsoid*) – высота над эллипсоидом.

HARN (*High Accuracy Reference Network*) – высокоточная опорная сеть, построенная на территорию США. Имеет точность порядка 10^{-6}.

HDG (*Heading*) **–** курс, азимут вектора скорости.

HDOP (*Horizontal Dilution Of Precision*) – коэффициент потери точности горизонтальной составляющей результатов позиционирования. См. *DOP.*

HOW (*Hand-Over-Word*) – слово, наряду с *TLM*, идентифицирующее субформу и идущее следом за *TLM*, включает число, которое при умножении его на 4 дает *TOW* – время недели текущей эпохи на начало следующей субформы.

IAT (*International Atomic Time*) – шкала Международного атомного времени, которое установлено таким образом, что *ET – IAT* = 32.184 с на 1 января 1977 г.

IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) – Международная служба вращения Земли и референцных систем (МСВЗ), занимающаяся определением параметров ориентировки Земли (ПОЗ), а также поддержкой земных и небесных систем отсчета.

IGEX (*International GLONASS Experiment*) – международный эксперимент с системой ГЛОНАСС. Совместный проект Международной ассоциации геодезии (IAG), Института навигации США (ION) и ряда других зарубежных и российских организаций, целью которого являлось измерение геодезических и геодинамических характеристик в разных районах мира с помощью спутников ГЛОНАСС.

IGS (*International GNSS Service*) – Международная GNSS Служба (МГС), осуществляющая свою деятельность под руководством Международной Геодезической Ассоциации *IAG* и поддерживающая научных пользователей результатами наблюдений, высокоточными эфемеридами и параметрами вращения Земли. *IGS* является членом Федерации Астрономической и Геофизической Служб *FAGS*. Первоначальное название – International GPS Service for Geodynamics, Международная геодинамическая GPS служба.

IOC (*Initial Operational Capability*) – начальная потенциальная возможность работы по спутникам GPS, достигнутая при функционировании 24 спутников (*Блоки I, II, IIA*) и доступная для навигации. IOC официально была объявлена МО США 8 декабря 1993 г. Существует еще одна возможность работы – *FOC*.

IRF (*Inertial Reference Frame*) – инерциальная система отсчета.

ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) – Международная Земная Система Отсчета, разработанная и осуществляемая службой *IERS*. С 1988 г. *IERS* публикует ежегодные отчеты по реализации системы (ITRF92, ITRF93,…, ITRF2000).

ITRS (*International Terrestrial Reference System*) – Международная Земная Система Координат, введенная службой *IERS* с целью поддержки земных координатных систем.

L1 – первая номинальная частота системы GPS. Равна 1.57542 ГГц.

L2 – вторая номинальная частота системы GPS. Значение ее равно 1.22760 ГГц.

L3 – линейная комбинация частот *L1* и *L2*, позволяющая численно исключить ионосферную задержку. Эта комбинация на английском языке называется «ionosphere-free combination» (комбинация, свободная от влияния ионосферы).

L4 – разностная комбинация частот *L1* и *L2*, позволяющая выделить собственно ионосферную задержку и разрешить неоднозначность. Эта

комбинация на английском языке называется «wide-lane» (широкополосная), длина волны λ_{L4} = 86.2 см.

L5 – суммарная комбинация частот *L1* и *L2*. Эта линейная комбинация используется для разрешения неоднозначности целого числа фаз для больших базовых линий. Этот вид комбинации называется «narrow-lane» (узкополосная). Длина волны λ_{L5} = 10.7 см.

MSAS (*Multifunction Transportation Satellite* (*MTSAT*)*-based Satellite Augmentation System*) **–** японская широкозонная дифференциальная подсистема, аналогичная WAAS и EGNOS.

MSL (*Mean Sea Level*) – система высот от уровня моря (система ортометрических высот).

NAD-83 (*North American Datum 1983*) – Северо-Американская система координат.

NAVD-88 (*North American Vertical Datum 1988*) – Северо-Американская система высот, установлена в 1991 г. Начальная точка – пункт Father Point/Rimouski в провинции Квебек, в устье реки Св. Лаврентия.

NAVSTAR (*Navigation System by Taiming and Ranging*) – Американская Глобальная Навигационная Спутниковая Система, предназначенная для круглосуточного помехоустойчивого *навигационно-временного позиционирования* движущихся и неподвижных объектов на всей территории земного шара. См. *GPS.*

NGA – см. *DMA.*

NGS (*National Geodetic Survey*) – Национальная геодезическая служба, комитет по геодезической службе при правительстве США.

NIMA – см. *DMA.*

NMEA-018 – стандарт, установленный National Marine Electronics Association, который определяет электромагнитные сигналы, протоколы передачи данных и форматы для связи между инструментами морской навигации.

OCS (*Operational Control System*) – то же, что и *Контрольный сегмент*.

On-the-Fly (*OTF*) – метод разрешения целых неоднозначностей приемника без остановки в движении (буквально – «на лету»).

P.p.b. (*part per billion*) – множитель, равный одной миллиардной доле (10^{-9}).

P.p.m. (*part per million*) – множитель, равный одной миллионной доле (10^{-6}).

PDOP (*Position Dilution of Precision*) – коэффициент потери точности в результатах позиционирования. См. *DOP.*

PPS (*Precise Positioning Service*) – Служба точных определений системы *GPS*, предназначенная для удовлетворения нужд пользователей, определяемых МО США, и позволяющая этим пользователям производить высокоточное позиционирование, определение составляющих скорости и пр. Допуск к Р-коду контролируется шифром. См. *SPS.*

PRC (*Pseudorange correction*) – в формате сообщения RTCM-104 единица информации, которая описывает поправку в псевдодальности, вычисленную по спутниковым сигналам. Может применяться к спутниковым данным,

собранным мобильным приемником DGPS для вычисления более точного положения.

PRN (*Pseudo Random Number*) – номер идентификации спутника, связанный с его псевдослучайным кодом. См. *SV.*

PSPR (*Phase Smoothed Pseudorange*) – псевдодальность, сглаженная фазой. См. *Псевдодальность сглаженная*.

RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitiring*) — автономный мониторинг целостности. Реализованная в приемнике процедура быстрого обнаружения КА и «отбрасывания» неисправных спутников в том случае, если их вычисленные параметры существенно отличаются от ожидаемых. Для решения задачи комбинированный приемник обеспечивает работу от 18 до 24 каналов, по которым принимаются сигналы спутников GPS/ГЛОНАСС.

RDOP (*Relative Dilution of Precision*) – коэффициент понижения точности при относительном позиционировании. См. *DOP.*

RHCP (*right hand circular polarization*) – правосторонняя круговая поляризация.

RINEX (*Receiver Independent Exchange format*) – формат обмена GPS данными, рекомендованный Международной Геодезической Ассоциацией в 1989 г. Данные GPS измерений, преобразованные в формат RINEX, становятся независимыми от типа приемника.

RMS (*Root mean square*) – квадратный корень из суммы квадратов ошибок, деленных на их число (почти то же самое, что средняя квадратическая ошибка).

RTCM SC-104 – специальный формат для дифференциальных поправок при передаче их от базового приемника к мобильному приемнику в режиме реального времени. Известен так же, как RTCM-104. Разработан Специальным комитетом 104 Радиотехнической комиссии по мореплаванию (Radio Technical Commission Maritime Special Committee 104).

RTK (*Real Time Kinmatic*) – *позиционирование кинематическое* в режиме реального времени.

RTS (*Real Time surveying*) – съемочная операция, дающая очень точные координаты в реальном времени. Режим измерений, использующий радиосвязь между опорной станцией и мобильным приемником.

SA (*Selective Availability*) – управляемое загрубление сигналов системы GPS по типу *селективного доступа*. Отменен с 1 мая 2000 г.

SBAS (Space Based Augmentation System) – Система дополнения космического базирования. Общее название широкозонных дифференциальных систем (как дополняющих подсистем для GPS или ГЛОНАСС). См. *EGNOS, WAAS, MSAS.*

SINEX (*Solution Independent Exchange*) – формат для вывода решений. Разработан геодезистами для обмена между организациями информацией о решениях, из которых можно восстановить исходную систему нормальных уравнений, чтобы объединять ее с другими решениями и получать новые решения базовых линий.

SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) – отношение уровней сигнала и шума в приемнике.

SNR Mask – предельное значение отношения «сигнал – шум», при котором производятся измерения.

SPS (*Standard Positioning Service*) – стандартное (нормальное) функционирование системы *GPS*, доступное всем потенциальным пользователям, обеспечивающее их позиционирование, определение скорости и пр. на уровне определенной точности, установленном МО США. См. *PPS*.

SV (*Space Vehicle*) – идентификационный номер спутника системы *NAVSTAR* в соответствии с порядковым номером его запуска. См. *PRN*.

SV время (*Space Vehicle*) – время спутника системы *GPS*. Навигационное сообщение содержит поправки для преобразования *SV времени* в *GPST*. В случае работы в режиме *PPS* поправка равна 176 нс (95%), в режиме *SPS* – 363 нс (95%).

SVN (*Space Vehicle Number*) – то же, что и *SV*.

TDB (*Barycentric Dynamical Time*) – шкала земного динамического времени, отнесенного к негеоцентрическому движению Земли.

TDOP (*Time Dilution of Preciseion*) – показатель потери точности позиционирования, обусловленной точностью синхронизации. См. *DOP*.

TDT (*Terrestrial Dynamical Time*) – устаревшее название для шкалы земного динамического времени, которое относится к центру Земли и совпадает по физическому содержанию с *ET* и связано с *IAT* соотношением *TDT = IAT* + 32.184 с. С 1991 г. для него принято название *земное время* (Terrestrial Time, TT).

TLM (*Telemetry Word*) – слово, с которого начинается *субформа*, включающее систему синхронизации и некоторые диагностические сообщения.

TOW (*Time-of-Week*) – время недели, представляющее собой число секунд с начала *GPS недели*. Отсчитывается от Гринвичской полуночи с субботы на воскресенье.

TTFF (*time to first fix*) – время первого определения местоположения. Основной показатель, определяющий быстродействие приемника после включения питания. В зависимости от степени доступности и точности данных об эфемеридах спутника и альманахе системы, различают «горячий», «теплый» и «холодный старт».

UERE (*User Equivalent Range Error*) – оценка ошибки измерения дальности «спутник – приемник». Эта величина не зависит от места и времени приема сигнала. См. *GDOP*, *URE*.

URA (*User Range Accuracy*) – пользовательская точность дальности, передается в навигационном сообщении.

URE (*User Range Error*) – составляющая ошибка вектора, определенного между приемником и спутником.

USGS (*US Geological Survey*) – Геологическая служба Америки – комитет геологической службы при правительстве США.

UT (*Universal Time*) – система времени, соответствующая местному среднему времени меридиана Гринвича.

UT1 **– более равномерная шкала времени *UT*, время которой исправлено за смещение мгновенного полюса относительно среднего полюса, причем (*UT1 – UT*) < 0.9 с.**

UTC (*Universal Time Coordinated*) – шкала Всемирного координированного времени. Международная система высокоточного определения среднего времени по Гринвичскому меридиану, единицей времени является *секунда SI.*

UTM – универсальная поперечная проекция Меркатора (картографическая). В России и странах СНГ применяется ее частный случай – проекция Гаусса – Крюгера.

VDOP (*Vertical Dilution of Precision*) – коэффициент потери точности вертикальной составляющей позиционирования. См. *DOP.*

VRS (*Virtual Reference Station*) – виртуальная опорная станция (см. *BOC*).

WAAS (*Wide Area Augmentation System*) – широкозонная дифференциальная подсистема Федеральной авиационной администрации США. Функциональное дополнение GPS производится через геостационарные спутники, в навигационные сигналы которых включена информация о целостности орбитальной группировки, а также точные поправки для всех видимых спутников и другие сведения, необходимые для решения навигационных задач, которые связаны с точной посадкой воздушных судов.

W-code – код, имеющий частоту равную 0.5115 МГц, которая получается путем деления частоты *P-кода* на 20.

WGS (*World Geodetic System*) – общеземная система отсчета, разработанная *DMA.* Система *WGS-84* сменила систему WGS-72. Система WGS-84(G1150) совмещена с системой отсчета ITRF-2000 на уровне сантиметра.

WPT (*Way Point*) – в навигации – точка маршрута.

Y-code – шифрованная версия *кода P.* См. *Код Y.*

Z count (Z-счет) – бинарное число из 29 бит, состоящее из основных единиц времени GPS. Десять первых битов дают номер недели GPS, а 19 остальных битов – дают время недели (TOW) в единицах по 1.5 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович, К.М. Мониторинг объектов с применением GPS технологий [Текст] / К.М. Антонович, А.П. Карпик // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2004. – № 1. – С. 53 – 67.
2. Антонович, К.М. Мониторинг объектов с применением GPS технологий и других методов определения положения [Текст] / К.М. Антонович, А.П. Карпик // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2003. – № 6. – С. 123 – 135.
3. Антонович, К.М. О влиянии продолжительности сеанса наблюдений на точность определения компонент базовой линии [Текст] / К.М. Антонович, И.М. Долганов // Вестник СГГА, вып. 8. – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 14 – 13.
4. Антонович, К.М. Определение скорости движения станции «Новосибирск» по GPS-измерениям [Текст] / К.М. Антонович, А.Н.Клепиков // Современные проблемы геодезии и оптики. Межд. науч.-техн. конф., посвященная 65-летию СГГА-НИИГАиК. Материалы конф. – Новосибирск: СГГА, 1999. – С. 14 – 17.
5. Антонович, К.М. О точности опорной позиции при обработке базовых линий по GPS-измерениям [Текст] / К.М. Антонович, А.Б. Ласкин // Современные проблемы геодезии и оптики. Межд. науч.-техн. конф., посвященная 65-летию СГГА-НИИГАиК. Материалы конф. – Новосибирск: СГГА, 1999. – С. 18 – 23.
6. Антонович, К.М. Отработка методик высокоточных измерений спутниковыми приемниками [Текст] / К.М. Антонович, Л.Г. Куликова, Ю.В. Сурнин, В.Д. Лизунов // Законодат. метрология. – 1998. – № 4. – С. 34 – 35.
7. Антонович, К.М. Построение геодезических сетей повышенной точности по GPS-наблюдениям [Текст] / К.М. Антонович // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Спутниковые системы связи и навигации», Красноярск, 30 сент. – 3 окт. 1997 г. Т. 1. – Красноярск: КГТУ, 1997. – С. 135 – 136.
8. Антонович, К.М. Построение специальной геодезической сети на Верхне-Салымском объекте с использованием GPS-измерений [Текст] / К.М. Антонович, В.А. Середович, Ю.В. Сурнин и др. // Вестник СГГА, вып. 5, Новосибирск: СГГА, 2000. – С. 9 – 15.
9. Антонович, К.М. Пространственный эталонный полигон для метрологической аттестации GPS-аппаратуры (опыт создания) / К.М. Антонович, В.А. Ащеулов, Ю.В. Сурнин, В.А. Скрипников // Вестник СГГА, вып. 4, Новосибирск: СГГА, 1999а. – С. 8 – 13.
10. Антонович, К.М. Разработка и создание геодезического испытательного метрологического полигона для поверки GPS-приемников [Текст] / К.М. Антонович, В.А. Середович, Ю.В. Сурнин, Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов // Современные проблемы геодезии и оптики. Межд. науч.-техн. конф., посвященная 65-летию СГГА-НИИГАиК. Материалы конф. – Новосибирск: СГГА, 1999б. – С. 103 – 110.

11. Антонович, К.М. Спутниковый мониторинг земной поверхности [Текст] / К.М. Антонович, А.П. Карпик, А.Н. Клепиков // Геодезия и картография. – 2004. – № 1. – С. 4 – 11.

12. Антонович, К.М. Эталонный пространственный полигон СГГА: аттестация 2004 [Текст] / К.М. Антонович, Ю.В. Сурнин, А.Н. Клепиков, Е.К. Фролова // Материалы 7-й межд. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004, Новосибирск, 21 – 24 сент. 2004. Том 3. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 259 – 262.

13. Антонович, К.М. Этапы развития спутниковых технологий с применением систем GPS/ГЛОНАСС [Текст] / К.М. Антонович // Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 6 – 10.

14. Ачкасов, С.Н. Метрологическая аттестация геодезической КНС аппаратуры [Текст] / С.Н. Ачкасов, А.А. Генике, Л.А. Синенко, Л.С. Юношев // Геодезия и картография. – 1993. – № 12. – С. 16 – 19.

15. Базлов, Ю.А. Параметры связи систем координат [Текст] / Ю.А. Базлов, А.П. Герасимов, Г.Н. Ефимов, К.К. Насретдинов // Геодезия и картография. – 1996. – № 8. – С. 6 – 7.

16. Балахненко, А.Ю. Методика прогнозирования DUT1 [Электронный ресурс] / А.Ю. Балахненко, В.М. Тиссен, А.С. Толстиков. – 2005. – 20 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/13_apr/s-s5/balakhn.zip

17. Бартенев, В.А. Эфемеридно-временное обеспечение космической навигационной системы ГЛОНАСС с использованием межспутниковой радиолинии [Электронный ресурс] / В.А. Бартенев, А.К. Гречкосеев. – 2005. – 20 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/12_apr/s-s2/bartenev.zip

18. Бойко, Е.Г. Приведение измерений к центрам пунктов в пространственных геодезических сетях [Текст] / Е.Г. Бойко, Г.А. Смирнов // Геодезия и картография. – 2001. – № 10. – С. 7 – 10.

19. Бойко, Е.Г. Исследование методов определения нормальных высот в геодезических сетях с использованием спутниковой системы GPS [Текст] / Е.Г. Бойко, Ле Ван Хынг, Ле Чунг Тьон // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 1997. – № 1. – С. 3 – 12.

20. Болдин, В.А. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС [Текст] / В.А. Болдин, В.И. Зубинский, Ю.Г. Зурабов и др. / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – 2-е изд., исправ. – М.: ИПРЖР, 1999. – 560 с.

21. Бурша, М. О необходимости отказа от геоида Гаусса – Листинга и перехода к теории Молоденского [Текст] / М. Бурша, М.И. Юркина // Геодезия и картография. – 2005. – № 9. – С. 11 – 13.

22. Ванин, С.А. Кинематика в режиме реального времени при передаче дифференциальных поправок через GSM-сети [Текст] / С.А. Ванин // Геодезия и картография. – 2005. – № 5. – С. 14 – 16.

23. Галазин, В.Ф. О результатах высокоточных геодезических определений с помощью КА системы ГЛОНАСС [Текст] / В.Ф. Галазин, В.Н. Гаража, А.Ф. Ильин, А.О. Куприянов // «Навигация-97». Сб. трудов второй Межд. конф. «Планирование глобальной радионавигации», 24 – 26 июня 1997 г. Том I, II. – М.: НТЦ «Интернавигация», 1997. – С. 323 – 327.

24. Галазин, В.Ф. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90) [Текст] / В.Ф. Галазин, Б.Л. Каплан, М.Г. Лебедев и др. Под общей ред. В.В. Хвостова – М.: Координац. научно-информ. центр, 1998. – 37 с.

25. Галазин, В.Ф. Совместное использование GPS и ГЛОНАСС: оценка точности различных способов установления связи между ПЗ-90 и WGS-84 [Текст] / В.Ф. Галазин, Ю.А. Базлов, Б.Л. Каплан, В.Г. Максимов // «Навигация-97». Сб. трудов второй Межд. конф. «Планирование глобальной радионавигации», 24 – 26 июня 1997 г. Том I, II. – М.: НТЦ «Интернавигация». – 1997. – С. 299 – 310.

26. Гаязов, И.С. Обработка GPS-наблюдений в ИПА РАН [Электронный ресурс] / И.С. Гаязов, Н.А. Панафидина, З.М. Малкин. – 2005. – 31 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/12_apr/s-s3/gaya_gps.zip

27. Генике, А.А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии [Текст] / А.А. Генике, Г.Г. Побединский. – М.: Картоцентр: Геодезиздат, 1999. – 272 с.

28. Генике, А.А. Особенности учета влияния многопутности при спутниковых геодезических измерениях [Текст] / А.А. Генике, Ву Ван Донг // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2004а. – № 2. – С. 3 – 15.

29. Генике, А.А. Экспериментальные исследования влияния многопутности на спутниковые измерения [Текст] / А.А. Генике, Ву Ван Донг // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2004б. – № 3. – С. 3 – 11.

30. Герасименко, М.Д. Современный метод наименьших квадратов с геодезическими приложениями [Текст] / М.Д. Герасименко. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 101 с.

31. Герасимов, А.П. Уравнивание государственной геодезической сети [Текст] / А.П. Герасимов. – М.: Картоцентр: Геодезииздат, 1996. – 216 с.

32. Герасимов, А.П. Спутниковая технология и пространственное уравнивание геодезических сетей [Текст] / А.П. Герасимов, К.К. Насретдинов // Геодезия и картография. – 1996. – № 7. – С. 11 – 13.

33. Герасимов, А.П. Оценка точности разностей координат по невязкам фигур [Текст] / А.П. Герасимов, В.С. Сластенов // Геодезия и картография. – 1994. – № 10. – С. 6 – 7.

34. Гиенко, Е.Г. Регулярная методика оценивания параметров взаимного трансформирования локальных спутниковых геодезических сетей и государственной координатной основы [Текст]: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 25.00.32: защищена 26.09.02: утв. 17.01.03 г. / Гиенко Елена Геннадьевна. – Новосибирск, 2002. – 193 с. – Библиогр.: с. 187 – 193. – диплом № 086342.

35. Гиенко, Е.Г. Некоторые результаты определения гравитационного поля на локальном участке земной поверхности по спутниковым, астрономо-геодезическим и гравиметрическим данным [Текст] / Е.Г. Гиенко, В.И. Кузьмин, Ю.В. Сурнин // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 1, Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29 апреля 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 132 – 136.

36. Гиенко, Е.Г. Экспериментальная проверка методики определения астрономических координат и азимутов геодезических пунктов по GPS-измерениям и данным геометрического нивелирования [Текст] / Е.Г. Гиенко, Ю.В. Сурнин // Вестник СГГА, вып. 10, Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 13 – 19.

37. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейс. контрол. док. (редакция 5.0) [Электронный ресурс] – М.: Координац. науч.-информ. центр ВКС России, 2002. – 57 с. – Режим доступа: http://www.glonass-center.ru

38. Глушков, В.В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития [Текст] / В.В. Глушков, К.К. Насретдинов, А.А. Шаравин. – М.: Институт политического и военного анализа. – 2002. – 448 с.

39. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек [Текст] – М.: Изд-во стандартов. – 2001. – 11 с.

40. Губанов, В.С. Фундаментальное координатно-временное обеспечение [Электронный ресурс] / В.С. Губанов, Г.А. Красинский, З.М. Малкин, А.М. Финкельштейн. – 2005. – 7 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/11_apr/s-p1/gubanov.zip

41. Данилюк, А.Ю. Основные направления развития космических навигационных систем в период до 2020 года [Электронный ресурс] / А.Ю. Данилюк, В.С. Крымов. – 2005. – 7 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/11_apr/s-p3/daniluk.zip

42. Демьянов, Г.В. Концепция современного развития системы нормальных высот [Текст] / Г.В. Демьянов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2003. – № 3. – С. 3 – 20.

43. Денисенко, О.В. Комплекс эталонов и средств измерений для испытаний аппаратуры потребителей космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS [Текст] / О.В. Денисенко, С.И. Донченко, Е.В. Еремин // Измерительная техника. – 2003. – № 2. – С. 25 – 31.

44. Дойников, А.С. Поверочная схема наземной аппаратуры пользователей космических навигационных систем [Текст] / А.С. Дойников, С.П. Моисеева, Л.А. Синенко, Л.С. Юношев // 5-й Рос. Симпозиум «Метрология времени и пространства», 11 – 13 сентября 1994 г. – ИМВП ГП ВНИИФТРИ. – Менделеево, 1994.

45. Евстафьев, О.В. Опыт GPS-измерений на сверхдлинных базах для передачи координат [Текст] / О.В. Евстафьев, В.Н Милич, Р.Г. Каримов // Геодезия и картография. – 1997. – № 2. – С. 12 – 19.

46. Евстафьев, О.В. SMARTSTATION – новый полевой инструмент компании LEICA GEOSYSTEMS [Text] / О.В. Евстафьев // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 1, Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29 апреля 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 67 – 70.

47. Залуцкий, В.Т. О преобразовании координат в спутниковой технологии [Текст] / В.Т. Залуцкий // Геодезия и картография. – 2000. – № 7. – С. 17 – 24.

48. Зубинский, В.И. Проблемы метрологического обеспечения геодезических измерений, выполняемых с помощью спутниковой GPS-аппаратуры [Текст] / В.И. Зубинский, В.В. Лохов, Р.А. Татевян, Ф.В. Широв // Метрологическое обеспечение производства. Информационный сборник. – М.: ЦНИИГАиК, 1996. – С. 29 – 38.

49. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геолого-разведочных работ [Текст] – Новосибирск: Сибир. науч.-исслед. ин-т геологии, геофизики и минерал. сырья (СНИИГГиМС), М-во природ. ресурсов Рос. Федерации, 1997. – 104 с.

50. Капилевич, Д.И. Учет ковариационных зависимостей спутниковых геодезических измерений [Текст] / Д.И. Капилевич // Геодезия и картография. – 2003. – № 12. – С. 6 – 11.

51. Караванов, М.Ю. Современные тенденции развития спутникового оборудования [Текст] / М.Ю. Караванов // Пространственные данные. – 2006. – № 1. – С. 47 – 64.

52. Караванов, М.Ю. GPS-съемка в режиме RTK с применением мобильных телефонов с услугой GPRS [Текст] / М.Ю. Караванов, Б.М. Малибашев // Геопрофи. – 2004. – № 1. – С. 13 – 16.

53. Карпик, А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: Монография [Текст] / А.П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.

54. Кокорин, В.И. Высокоточный измеритель временных задержек и фазы несущей для эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС [Электронный ресурс] / В.И. Кокорин, А.В. Гребенников, В.Б. Новиков и др. – 2005. – 7 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/14_apr/s-s8/kokorin.zip

55. Контроль систем GPS: Обзор. информ. [Текст] – М.: ЦНИИГАиК, 1996. – 44 с.

56. Кораблев, М.Е. Геодезический приемник ГЛОНАСС/GPS ГЕО-161 [Текст] / М.Е. Кораблев, Б.Б. Тикко // Геопрофи. – 2004. – № 5. – С. 8 – 11.

57. Коршик, О.А. Моделирование геодезических построений с использованием чисел избыточности и необходимости [Текст] / О.А. Коршик, В.А. Падве // 3-й Сибирс. конгр. по прикл. и индустр. мат. (ИНПРИМ-98), посвящ. памяти С.Л. Соболева (1908 – 1989), 1998. – С. 111 – 112.

58. Коуба, Я. Об особенностях GPS измерений [Текст] / Я. Коуба // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 27 – 28.

59. Крюков, С.В. Особенности совместной обработки фазовых измерений в системах ГЛОНАСС и GPS [Текст] / С.В. Крюков, С.Н. Свердлик // Геодезия и картография. – 2001. – № 12. – С. 10 – 13.

60. Макаренко, Н.Л. Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95) [Текст] / Н.Л. Макаренко, Г.В. Демьянов, Е.В. Новиков и др. Под ред. А.А. Дражнюка. – М.: Федерал. служба геодезии и картографии России. – 2000. – 34 с.

61. Маркузе, Ю.И. Алгоритм объединения наземных и спутниковых геодезических сетей [Текст] / Ю.И. Маркузе // Геодезия и картография. – 1997. – № 9. – С. 23 – 28.

62. Медведев, Е.М. Интегральные навигационные комплексы GPS/IMU [Текст] / Е.М. Медведев // Геопрофи. – 2005. – № 3 – С. 39 – 40; – № 4. – С. 39 – 40; – № 5. – С. 35 – 36; – № 6. – С. 52 – 55.

63. Митрикас, В.В. Определение параметров перехода из системы координат ПЗ-90 в WGS-84 для совместного использования систем ГЛОНАСС и GPS [Текст] / В.В. Митрикас, С.Г. Ревнивых, Е.В. Быханов // «Навигация-97». Сб. трудов второй Межд. конф. «Планирование глобальной радионавигации», 24 – 26 июня 1997 г. Том I, II. – М.: НТЦ «Интернавигация», 1997. – С. 311 – 321.

64. Молоденский, М.С. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли [Текст] / М.С. Молоденский, В.Ф. Еремеев, М.И. Юркина / Тр. ЦНИИГАиК, вып. 131. – М.: Геодезиздат, 1961. – 252 с.

65. Непоклонов, В.Б. Новые возможности развития сети нормальных высот на территории России [Текст] / В.Б. Непоклонов, И.П. Чугунов, П.Э. Яковенко, В.В. Орлов // Геодезия и картография. – 1996. – № 7. – С. 20 – 22.

66. Основные положения о Государственной геодезической сети Российской Федерации [Текст] – ГКИНП (ГНТА) – 01-006-03. – М., 2004. – 28 с.

67. Падве, В.А. Показатель точности геопространственных данных [Текст] / В.А. Падве // Геодезия и картография. – 2005. – № 1. – С. 18 – 19.

68. Панжин, А.А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий [Электронный ресурс] / А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова. – 2005. – Режим доступа: http://www.laboratory.ru/rstart.htm

69. Пат. 2116656. Способ проведения геодезических измерений с использованием глобальных спутниковых радионавигационных систем и устройство для его осуществления (варианты) [Текст] / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, А.А. Пыстин и др. – ЛР № 040720. – Заявл. 31 июля 1997 г. – 16 с.

70. Пеллинен, Л.П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия) [Текст] / Л.П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 264 с.

71. Писарев, С.Б. О перспективах развития координатно-временного обеспечения в Российской Федерации и основных направлениях сотрудничества государств-участников СНГ [Текст] / С.Б. Писарев // Новости навигации. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.

72. Побединский, Г.Г. Геодезический полигон Верхневолжского АГП для метрологической аттестации спутниковых приемников [Текст] / Г.Г. Побединский, Ю.С. Гусев, С.В. Еруков, Е.В. Шабанов // Соврем. проблемы

геодезии и оптики. LIII межд. науч.-техн. конф., посв. 70-летию СГГА. Сб. мат. конф., Ч. III. – 2003. – С. 192 – 197.

73. Постнов, А.В. Основы геодезического обеспечения археологических исследований с применением спутниковых навигационных приемников [Текст] / А.В. Постнов, Е.Г. Вергунов. – Новосибирск: Свет. – 2003. – 160 с.

74. Постоногов, К.Л. Технологические схемы спутниковых наблюдений [Текст] / К.Л. Постоногов // Геодезия и картография. – 1994. – № 10. – С. 7 – 9.

75. Правила закрепления центров спутниковой геодезической сети [Текст] – М.: ЦНИИГАиК, 2001. – 30 с.

76. Прихода, А.Г. Геодезическое обеспечение геологоразведочных работ [Текст] / А.Г. Прихода // Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 3 – 5.

77. Прихода, А.Г. Спутниковое обеспечение сейсморазведочных работ [Текст] / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, Г.И. Мальцев, И.А. Бунцев. – Методические рекомендации / Науч. ред. А.Г. Прихода. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2002. – 144 с.

78. Проект методических указаний по построению государственных геодезических сетей с применением глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] – М.: ЦНИИГАиК, 1997. – 53 с.

79. РТМ 68 – 8.20 – 93. Полигоны геодезические. Общие технические требования [Текст] – М.: ЦНИИГАИК, 1994.

80. РТМ 68-14-01. Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения [Текст] – М.: ЦНИИГАиК. – 2001. – 29 с.

81. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS [Текст] – М.: ЦНИИГАиК. – 2003. – 182 с.

82. Середович, В.А. Метрологическому полигону СГГА – 10 лет [Текст] / В.А. Середович, Ю.В. Сурнин, К.М. Антонович, Л.Г. Куликова // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 1, Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29 апреля 2005 г. Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 122 – 126.

83. Середович, В.А. Создание региональной активной опорной сети геодезических пунктов в Сибири с помощью спутниковых систем связи и навигации [Текст] / В.А. Середович, Ю.В. Сурнин // Вест. СГГА. – 1999. – № 4. – С. 3 – 8.

84. Синякин А.К. Принципы работы глобальных систем местоопределения (GPS): Учеб. пособие [Текст] / А.К. Синякин.– Новосибирск: СГГА, 1996. – 57 с.

85. Соловьев, Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения [Текст] / Ю.А. Соловьев.– М.: Эко-Трендз. – 2003. – 326 с.

86. Спиридонов, А.И. Основы геодезической метрологии: Произв.-практ. изд. [Текст] / А.И. Спиридонов. – М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 248 с.

87. Сурнин, Ю.В. Алгебраическая и физическая декомпозиция математических моделей при решении плохо обусловленных обратных задач геодезии [Текст] / Ю.В. Сурнин, Е.Г. Гиенко // Четвертый Сибирский конгресс

по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-2000), посв. памяти М.А. Лаврентьева. Сб. науч. статей. – Новосибирск: СГГА, 2001. – С. 57 – 64.

88. Сурнин, Ю.В. Математическая модель внешнего гравитационного поля на ограниченном участке земной поверхности по спутниковым и традиционным геодезическим данным [Текст] / Ю. В. Сурнин // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 1, ч. 2. Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2006», 24 – 28 апреля 2006 г. Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 79 – 90.

89. Сурнин, Ю.В. О концепции создания активных опорных геодезических сетей с помощью систем связи и навигации [Текст] / Ю.В. Сурнин, С.В. Кужелев // Тр. межд. науч.-техн. конф. «Спутник. системы связи и навигации», Красноярск, 30 сент. – 3 окт. 1997 г., Т. 1. – Красноярск: КГТУ, 1997. – С. 133 – 134.

90. Сурнин, Ю.В. Теоретическое обоснование методики определения астрономических координат азимутов точек на физической поверхности Земли по спутниковым и наземным измерениям [Текст] / Ю.В. Сурнин // Вестник СГГА, вып. 4, Новосибирск: СГГА, 1999. – С. 3 – 8.

91. Татевян, С.К. Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований [Текст] / С.К. Татевян, С.П. Кузин, С.П. Ораевская // Геодезия и картография. – 2004. – № 6. – С. 33 – 44.

92. Тимофеев, В.Ю. Сеть GPS измерений в западной части Алтае-Саянской области [Текст] / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, А.Д. Дучков и др. // Геология и геофизика. – 2003. – № 11. – С. 1850 – 1868.

93. Тимофеев, В.Ю. Деформации в Юго-Западной части Байкальской рифтовой зоны по измерениям методами GPS, светодальнометрии, наклонометрии и деформографии [Текст] / В.Ю. Тимофеев, Е.А. Запреева // Сб. тезисов докладов к 11 Межд. симп. «Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов» – Бишкек: МНИЦ ГП. – 2002 . – С. 195 – 197.

94. Фетисов, С.А. Дифференциальные GPS-измерения с использованием систем мобильной связи [Электронный ресурс] / С.А. Фетисов, С.Д. Петров. – 2005. – 18 с. – Режим доступа: http://www.ipa.nw.ru/koi8-r/conference/kvo-2005/present/14_apr/s-s9/fetisov.zip

95. Хабаров, В.Ф. О развитии ФАГС и ВГС и постоянно действующих спутниковых станций [Текст] / В.Ф. Хабаров // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 15 – 19.

96. Харисов, В.Н. Фильтрация относительных координат в СРНС ГЛОНАСС с использованием фазовых измерений: подход на основе сигнального времени [Электронный ресурс] / В.Н. Харисов, Н.Т. Булавский. – 2000. – Режим доступа: www.orc.ru/~vhar/Glo_RT.html

97. Чмых, М.К. Расширение функциональных возможностей глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на основе фазовых методов [Текст] / М.К. Чмых // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Спутниковые системы связи и навигации», Красноярск, 30 сент. – 3 окт. 1997 г. Т. 1. – Красноярск: КГТУ, 1997. – С. 92 – 99.

98. Шебшаевич, В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы [Текст] / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. / М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

99. Шебшаевич, В.С. Дифференциальный режим сетевой спутниковой радионавигационной системы [Текст] / В.С. Шебшаевич, М.Н. Григорьев // Зарубеж. радиоэлектроника. – 1989. – № 1. – С. 5 – 32.

100. Щербаков, В.В. Координатный способ диагностики железнодорожного пути [Текст] / В.В. Щербаков, В.Д. Овчаров, К.М. Антонович / Совр. проблемы геодезии и оптики. LIII международная научно-техническая конф., посв. 70-летию СГГА. Сб. мат. конф., Ч. III. – Новосибирск: СГГА. – 2003 – С. 180 – 182.

101. Юношев, Л.С. Метрологическое обеспечение космических навигацион-ных систем [Электронный ресурс] / Л.С. Юношев. – Справочно-демонстраци-онный компакт-диск «От форума до форума», № 1, 1999. // ГИС-Ассоциация. – 1999. – Режим доступа: GEODISK\gps&glonass\Yunoshev\metrolog.htm-1999

102. Юркина, М.И. Действующие системы координат в России [Текст] / М.И. Юркина, Л.И. Серебрякова // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2001. – № 3. – С. 40 – 53.

103. Abidin, H.Z. On-the-fly ambiguity resolution: formulation and results [Text] / H.Z. Abidin // Manuskripta Geodaetica. – 1993. – Vol. 18, No. 6. – P. 380 – 407. – Англ.

104. Alber, C. GPS surveying with 1 mm precision using corrections for atmospheric slant path delay [Text] / C. Alber, R. Ware, C. Rocken, F. Solheim // Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 15. – August 1997. – P. 1859 – 1862. – Англ.

105. Al-Kadi, I. Selection of GPS receiver for GPS applications [Text] / I. Al-Kadi // J. of Surveying Engineering, Vol. 115, No. 1. – 1989. – P. 111 – 120. – Англ.

106. Allen, L.W. III United States´ Nationwide Differential Global Positioning System [Text] / Leonard W. Allen III // GPS Solutions. 1999. – Vol. 2, No. 4. P. 1 – 6. – Англ.

107. Ashjaee, J. GPS: The Challenge of a Single Chip [Text] / J. Ashjaee // GPS World. – 2001. – Vol. 12, No. 5. – P. 24 – 27. – Англ.

108. Awange, J.L. Algebraic Solution of GPS Pseudo-Ranging Equations [Text] / J.L. Awange, E.W. Grafarend // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 5, No. 4. – P. 20 – 32. – Англ.

109. Bar-Sever, Y.E. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver [Text] / Y.E. Bar-Sever, P. Kroger, J.A. Börjesson // J. of Geoph. Research. – 1998. – Vol. 103. – P. 5019 – 5035. – Англ.

110. Bernese GPS Software Version 4.2 [Text] / Edited by U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. – Astronomical Institute University of Berne. – February 2001. – Англ.

111. Bertiger, W.I. A Real-Time Wide Area Differential GPS System [Text] / W.I. Bertiger, Y.E. Bar-Sever, B.J. Haines et al. // Navigation: J. of the Institute of Navigation. – 1998. –Vol. 44, No. 4. – P. 433 – 447. – Англ.

112. Beutler, G. Accuracy and biases in the geodetic application of the Global Positioning System [Text] / G. Beutler, I. Bauersima, S. Botton et al. // Manuscripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 28 – 35. – Англ.

113. Beutler, G. The International GPS Service for Geodynamics (IGS): Development and start of official service on January 1, 1994 [Text] / G. Beutler, I.I. Mueller, R.E. Neilan // Bull. Géodesique. – 1994. – Vol. 68. – P. 39 – 70. – Англ.

114. Beutler, G. Wide Area Differential GPS [Electronic resource] / G. Beutler, S. Schaer, M. Rothacher. – Study in the Context of AGNES. – 1999. – 89 p. – Англ. – Режим доступа: ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/agnrep99.pdf

115. Bevis, M. Blending old and new approaches to regional GPS Geodesy [Text] / M. Bevis, Y. Bock, P. Fang et al. // Eos, Transactions, American Geophysical Union. – 1997. – Vol. 78, No. 6. – P. 61, 64 – 66. – Англ.

116. Bisnath, S.B. A new approach to an old problem Carrier-Phase Cycle Slips [Text] / S.B. Bisnath, Donghyun Kim, R.B. Langley // GPS World. – 2001. – Vol. 12, No. 5. – P. 46 – 51. – Англ.

117. Blackwell, E.G. Overview of differential GPS Methods [Text] / E.G. Blackwell // Navigation (USA). – 1985. – Vol. 32, No 2. – P. 114 – 125. – Англ.

118. Blewitt, G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km [Text] / G. Blewitt, W.G. Melburne, W.I. Bertiger et al. // J. of Geophys. Res. – 1989. – V. 94, No B8. – P. 10187 – 10203. – Англ.

119. Blewitt, G. Basics of the GPS Technique: Observation Equations [Electronic resource] / Blewitt, G. – 1997. – 46 p. – Режим доступа: http://www.nbmg.unr.edu/staff/pdfs/gps%20for%20geodesy.pdf

120. Blewitt, G. GPS geodesy with centimeter accuracy [Text] / G. Blewitt, W.G. Melburne, W.I. Bertiger et al. // Manuscripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 53 – 60. – Англ.

121. Blewitt, G. The Global Positioning System Geodesy Odyssey [Text] / G. Blewitt, E.R. Swift, T.P. Yunck et al. // Navigation, Journ. of the Inst. of Navigation. – Spring 2002. – Vol. 49, No. 1. – P. 7 – 34. – Англ.

122. Bock, O. Atmospheric processing methods for high accuracy positioning with the Global Positioning System [Electronic resource] / O. Bock, E. Doerflinger / 2000. – 11 p. – Англ. – Режим доступа: http://www.gdiv.statkart.no/igsworkshop/book/bock_doerf.pdf

123. Bock, Y. Establishment of three-dimensional geodetic control by interferometry with the Global Positioning System [Text] / Y. Bock, R.I. Abbot, C.C. Counselman III et al. // J. of Geophys. Res. – 1985. – Vol. 90 (B9). – P. 7689 – 7703. – Англ.

124. Botton, S. GPS localisation et navigation [Text] / S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels et al. – Paris: Hermès, 1997. – 160 p. – Франц.

125. Börjesson J. GLONASS Contribution to Space Geodesy [Text] / J. Börjesson. – 2000. – 62 p. – Англ. [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.oso.chalmers.se/~geo/introduction.pdf

126. Boucher, C. ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations and the related transformation parameters [Text] / C. Boucher, Z. Altamimi // J. of Geodesy. – 2001. – Vol. 75, No. 11. – P. 613 – 619. – Англ.

127. Brown, A.K. Performance Test Results of an Integrated GPS/MEMS Inertial Navigation Package [Electronic resource] / A.K. Brown, Yan Lu. – 2004. – 8 p. – Режим доступа: www.navsys.com/Papers/0409001.pdf

128. Butsch, F.A. Growing Concern Radiofrequency Interference and GPS [Text] / F.A. Butsch // GPS World. – 2002. – Vol. 13, No. 10. – P. 40, 42, 44 – 46, 48 – 49. – Англ.

129. Chen, G.A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry of the analysis of space geodetic data [Text] / G. Chen, T. Herring // J. of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102, No. B9. – P. 20489 – 20502. – Англ.

130. Chen, D. Fast Ambiguity Search Filter (FASF): a novel concept for GPS ambiguity resolution [Text] / D. Chen // Proc. 6th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, 22 – 24 September, 1993. – P. 781 – 787. – Англ.

131. Chen, X. Ivestigation of annual variations in the WCDA GPS solutions [Electronic resource] / X. Chen, R.B. Langley, H. Dragert. – 1996. – Англ. – Режим доступа: http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/iongps96.pdf

132. Choi, I.K. Pseudolites: a new tool for surveyors? [Text] / I.K. Choi, J. Wang, S. Han, C. Rizos. – 2nd Trans. Tasman. Survey Congress, Queenstown, New Zealand, 20 – 26 August, 2000. – P. 141 – 149. – Англ.

133. Collins P. Tropospheric Delay: Prediction for the WAAS User [Text] / P. Collins, R.B. Langley // GPS World. – 1999. – Vol. 10, No. 7. – P. 52 – 58. – Англ.

134. Craimer, M.R. Secifications for urban GPS surveys [Text] / M.R. Craimer, D.E. Wells, P. Vaniĉec, R.L. Devlin // Surveying and Land Information Systems. – 1990. – Vol. 50, No. 4. – P. 251 – 259. – Англ.

135. Cross, P.A. Field validation of GPS phase measurements. [Text] / P.A. Cross, N. Ahmad // GPS – Techn. Appl. Geod. And Surveying: Proc. Int. GPS – Workshop, Darmstadt, Apr. 10 – 13, 1988. – Berlin etc. 1988. – P. 349 – 360. – Англ.

136. Dai, Liwen. Performance Analysis of Integrated GPS/GLONASS Carrier Phase-Based Positioning [Electronic resource] / Liwen Dai, Shaowei Han, C. Rizos. – 2001. – 9 p. – Англ. Режим доступа: www.gmat.unsw.edu.au/snap/ publications/dai_etal2001f.pdf

137. Delikaraoglou, D. On the stochastic modelling of GPS ionospheric delay [Text] / D. Delikaraoglou // Manuskripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 100 – 109. – Англ.

138. Demianov, G.V. On the Use of the Fundamental Geodetic Network in Eastern Russia for Regional Geodynamics Studies [Text] / G.V. Demianov, S.K. Tatevian // Proc. Of the 4th Workshop, Shanghai, P.R. China, 14 – 19 May, 2001 (APSG 2001). – Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2002. – P. 71 – 75. – Англ.

139. Diep Dao. Location-based services: technical and business issues [Text] / Diep Dao, C. Rizos, J. Wang // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 3. – P. 169 – 178. – Англ.

140. van Dierendonck, A.J. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver [Text] / A.J. van Dierendonck, P. Fenton, T. Ford // Navigation, 39(3). 1992. – P. 265 – 283. – Англ.

141. DMA Technical Report 8350.2 Departament of Defence World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationship with local geodetic Systems; DMA TR 8350.2; 2nd edition. [Text] – Washington, DC: Headquarters, Defence Mapping Agency; 1 September 1991. – 170 p. – Англ.

142. Eckl, M.C. Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration [Text] / M.C. Eckl, R.A. Snay, T. Soler, M.W. Cline, G.L. Mader // J. of Geodesy. – 2001. – Vol. 75, No. 12. – P. 633 – 640. – Англ.

143. El-Rabbany, A. Introduction to GPS: The Global Positioning System [Text] / A. El-Rabbany. – Boston, London: Artech House. – 2002. – 176 p. – Англ.

144. El-Rabbany, A. Precise GPS Point Positioning: the Future Alternative to Differential GPS Surveying [Electronic resource] / A. El-Rabbany, P. Eng. – 2003. – 6 p. – Англ. – Режим доступа: www.geod.nrcan.gc.ca/index_e/ products_e/ publications_e/papers_e/El-Rabbany_e.pdf

145. Engelis, T. Measuring orthometric height differences with GPS and gravity data [Text] / T. Engelis, R. Rapp, Y. Bock // Manuscripta Geodaetica. – 1985. – Vol. 10, No. 3. – P. 187 – 194. – Англ.

146. Even-Tzur, G. GPS vector confguration design for monitoring deformation Networks [Text] / G. Even-Tzur // J. of Geodesy. – 2002. – Vol. 76, No. 12. – P. 455 – 461. – Англ.

147. Feng, Y. Future GNSS performance. Predictions using GPS with a virtual Galileo constellation [Text] / Y. Feng // GPS World. – Vol. 16, No. 3. – 2005. – P. 46 – 52. – Англ.

148. Ford T. MEMS Inertial on an RTK GPS Receiver: Integration Options and Test Results [Electronic resource] / T. Ford et al. – 2003. – 12 p. – Англ. – Режим доступа: www.novatel.com/Documents/Papers/ION_NTM_Session.pdf

149. Fotopoulos, G. An Overview of Multi-Reference Station Methods for cm-Level Positioning [Text] / G. Fotopoulos, M.E. Cannon // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 4, No. 3. – P. 1 – 10. – Англ.

150. Frei, E. Rapid differential positioning with the Global Positioning System (GPS) [Text] / E. Frei. – Switzerland, Thesis University of Berne. – 1990. – Англ.

151. Frei, E. GPS surveying techniques using the «Fast ambiguity resolution approach (FARA)» [Text] / E. Frei, M. Schubernigg. – Leica Heerbrugg AG, CH-9435 Ltd. (Switzerland), May 1992. – 20 p. – Англ.

152. Fruehauf H. WAAS for Time and WAAS for Time and Frequency Sync Frequency Sync Applications [Electronic resource] / H. Fruehauf. – 2004. – 21

р. – Англ. – Режим доступа: www.zyfer.com/briefings/gps/ waas%20for%20t-f%20aps%2010-04.pdf

153. Geiger, A. Modeling of Phase Center Variation and its Influence on GPS-Positioning [Text] / A. Geiger // GPS-Techn. Appl. Geod. and Surveying. Proc. Int. GPS-workshop Darmstadt, Apr. 10 – 13, 1988. – Berlin etc., 1988. – P. 210 – 222. – Англ.

154. Ge, L. Adaptive filtering of continuous GPS results [Text] / L. Ge, H.-Y. Chen, Sh. Han, C. Rizos // J. of Geodesy. – 2000. Vol. 74, No. 7/8. – P. 572 – 580. – Англ.

155. Goad, C.C. An automated procedure for generating of optimum set of independent double difference observables using GPS carrier phase measurement [Text] / C.C. Goad, A. Müller // Manuscripta Geodaetica. – 1988. – Vol. 13. – P. 365 – 369. – Англ.

156. Grewal, M.S. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration [Text] / M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews. – New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Willey & Sons, Inc. – 2001. – 392 p. – Англ.

157. Gurtner, W. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.00 [Electronic resource] / W. Gurtner, L. Estey. – February 1st, 2006. – 36 p. – Англ. – Режим доступа: ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex300.pdf

158. Gurtner, W. RINEX – The receiver-independent exchange format [Text] / W. Gurtner // GPS World. – 1994. – Vol. 5, No. 7. – P. 48 – 52. – Англ.

159. Gurtner, W. The use of the Global Positioning System in mountainous areas [Text] / W. Gurtner, G. Beutler, S. Botton et al. // Manuscripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 53 – 60. – Англ.

160. Habrich, H. Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS Combinations [Electronic resource] / H. Habrich. – 1999. – 147 p. – Англ. – Режим доступа: http://www.ifag.de/misk_publ_idx.htm

161. Han, S.-C. Accurate absolute GPS positioning through satellite clock error estimation [Text] / S.-C. Han, J.H. Kwon, C. Jekeli // J. of Geodesy. – 2001. – Vol. 75, No. 1. – P. 33 – 43. – Англ.

162. Harvey, B.R. Transformation of 3D coordinates [Text] / B.R. Harvey // The Australian Surveyor. – June 1986. – Vol. 33, No. 2. – P. 105 – 125. – Англ.

163. Hatch, R.R. Instantaneous ambiguity resolution [Text] / R.R. Hatch // Proc. «Kinematic Systems in Geodesy, Surveying & Remote Sensing», IAG Symposium 107, Springer-Verlag Vienna New York, 1990. – P. 299 – 308. – Англ.

164. Hatch, R. StarFire: A global high accuracy differential GPS system [Electronic resource] / R. Hatch, T. Sharpe, P. Galyean. – 2002. – 12 p. – Англ. – Режим доступа: http://www.navcomtech.com/docs/ StarFireGlobalHighAccuracySystem.pdf

165. Hein, G.W. From GPS and GLONASS via EGNOS to Galileo-positioning and navigation in the third millennium [Text] / G.W. Hein // GPS Solutions. – 2000. – Vol. 3, No. 4. – P. 39 – 47. – Англ.

166. Hofmann-Wellenhof, B. The Antenna exchange: One aspect of high-precission GPS kinematic survey [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, B.W. Remondi //

GPS-Techn. Appl. Geod. snd Surveying. Proc. Int GPS-workshop Darmstadt, Apr. 10 – 13, 1988. – Berlin etc., 1988. – P. 261 – 277. – Англ.

167. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theory and practice. – Fifth, revised edition [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins – Wienn, New-York: Springer. – 2001. – 384 p. – Англ.

168. Hudson, J.R. Globally Corrected GPS (GcGPS): C-Nav GPS System [Electronic resource] / J.R. Hudson, T. Sharp / 2001. – 13 p. – Англ. – Режим доступа: www.navcomtech.com/docs/ StarFireGlobalHighAccuracySystem.pdf

169. Interface Control Document ICD-GPS-200C. 10 Oct. 1993 – 14 Jan. 2003. – 198 p. – Англ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.navcen.uscg.gov/pubs/ gps/icd200/default.htm

170. Jäger, R. State of the art and present developments of a general concept for GPS-based height determination [Text] / R. Jäger // Proc. of the First Workshop on GPS and Mathematical Geodesy in Tanzania (Kilimanjaro Expedition 1999). October 4, 1999, University College of Lands and Architectural Studies (UCLAS), Dar Es Salaam. – Англ.

171. Jäger, R. Precise Vertical Reference Surface Representation and Precise Transformation of Classical Networks to ETRS89 [Text] / R. Jäger, S. Kälber, S. Schneid, S. Seiler // ITRF – General Concepts and Realisation of Databases for GIS, GNSS and Navigation Applications in and outside Europe. Proceedings GNSS2003 – The European Navigation Conference, Graz, April 22 – 25, 2003. – Англ.

172. Jäger R. Datum Transformation and Reference Surface Transitions [Electronic resource] / R. Jäger, S. Kälber. – 2004. – 7 p. – Англ. – Режим доступа: http://www.geozilla.de/files/3D_B,L,h_Molodensky_and_XYZ-Alternative.pdf

173. Jäggi, A. Using Double Difference Information from Network Solutions to Generate Observations for a Virtual GPS Reference Receiver [Electronic resource]. / A. Jäggi, G. Beutler, U. Hugentobler. – 2001. – 6 p. – Англ. – Режим доступа: ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/ iag01aj.pdf

174. James, F. The International GPS Service for Geodynamics – Benefits to Users [Text] / F. James, J.F. Zumberge, R.E. Neilan, W. Gurtner // Inst. of Navigation, ION GPS-94, 7th Int. Tech. Meeting, Salt Lake City, Utah, September 20 – 23, 1994. – Англ.

175. Jensen A.B.O. Integrating Numerical Weather Predictions in GPS positioning [Electronic resource] / A.B.O. Jensen, C.C. Tscherning, F. Madsen. – 2002. – 8 p. – Англ. – Режим доступа: http:// research.kms.dk/~aoj/paper54.pdf

176. Jin, X.X. Algorithm for carrier-adjusted DGPS positioning and some numerical results [Text] / X.X. Jin // J. of Geodesy, Vol. 71, No. 7. – 1997. – Англ.

177. de Jong, C.D. The benefits of a third carrier frequency to GNSS users [Elect-ronic resource] / C.D. de Jong, N.F. Jonkman, P. Joosten. – 1999. – Англ. – Режим доступа: http://enterprise.lr.tudelft.nl/mgp/modules/Papers/files/ ninworkshop99.pdf

178. Joosten, P. Fixing the ambiguities. Are you sure they're right? [Text] / P. Joosten, C.C.J.M. Tiberius // GPS World. – 2000. – V. 11, No. 5. – P. 46 – 51. – Англ.

179. Kee, C. Centimeter-accuracy indoor navigation using GPS-like pseudolites [Text] / C. Kee // GPS World. – 2001. – Vol. 12, No. 11. – P. 14 – 24. – Англ.

180. Kibe, S.V. Indian plan for satellite-based navigation systems for civil aviation [Text] / V. Kibe // Current Science. – 2003. – Vol. 84, No. 11. – P. 1405 – 1411. – Англ.

181. King, R.W. Surveying with Global Positioning System (GPS) [Text] / R.W. King, E.G. Masters, C. Rizos, A. Stolz, J. Collins // Bonn: Ferd. Dummler Verlog. – 1987. – 128 p. – Англ.

182. Kleijer F. Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling [Electronic resource] / F. Kleijer. – 2004. – 282 p. – Англ. – Режим доступа: http://enterprise.lr.tudelft.nl/mgp/modules/Papers/files/kleijer.pdf.

183. Klobuchar, J.A. Comparative range delay and variability of the earth's troposphere and ionosphere [Text] / J.A. Klobuchar, J.M. Kunches // GPS Solutions. – 2003. – Vol. 7, No. 1. – P. 55 – 58. – Англ.

184. Kouba, J. A Guide to using international GPS service (IGS) products [Eletronic resource] / Jan Kouba. – 2003. – 31 p. – Англ. – Режим доступа: http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf

185. Kouba, J. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS / J. Kouba [Text] // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2003. – V. 47, No. 4. – P. 741 – 755. – Англ.

186. Kozlov, D. Centimeter-level real-time kinematic positioning with GPS + GLONASS C/A receivers [Text] / D. Kozlov, M. Tkachenko // Navigation. – 1998. – Vol. 45, No. 2. – P. 137 – 147. – Англ.

187. Krakiwsky, E.J. Development and testing of in-context confidence regions for geodetic survey networks [Electronic resource] / E.J. Krakiwsky, D.J. Szabo, P. Vaníček, M.R. Craymer. – 1999. – P. 30. – Англ. – Режим доступа: http://www.gge.unb.ca/Personnel/Vanicek/InContextConfidenceRegions.pdf

188. Lachapelle, G. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research [Text] / G. Lachapelle, P. Alves // J. of Global Positioning Systems. – 2002. – Vol. 1, No. 2.– P. 133 – 136. – Англ.

189. Ladetto, Q. On Foot Navigation: When GPS alone is not enough [Electronic resource] / Q. Ladetto, B. Merminod, Ph. Terrier, Y. Schutz. – 1999. – Англ. – Режим доступа: http:// topo.epfl.ch/publications/gnss99_ql.pdf

190. Landau, H. On-the-fly ambiguity resolution for precise differential positioning [Text] / H. Landau, H.J. Euler // Proc. 5th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, 16 – 18 September, 1992. – P. 607 – 613. – Англ.

191. Landau, H. Virtual Reference Station Systems [Text] / H. Landau, U. Vollath, X. Chen // J. of Global Positioning Systems. – 2002. – Vol. 1, No. 2. – P. 137 – 143. – Англ.

192. Langley, R.B. RTK GPS [Text] / R.B. Langley // GPS World. – 1998. – Vol. 9, No. 9. – P. 70 – 76. – Англ.

193. Langley, R.B. Smaller and smaller. The evolution of the GPS receiver [Text] / R.B. Langley // GPS World. – 2000. – Vol. 11, No. 4. – P. 54 – 58. – Англ.

194. Langley, R.B. Dilution of Precision [Text] / R.B. Langley // GPS World. – 1999. – Vol. 10, No. 5. – P. 52 – 58. – Англ.

195. van Leeuwen, S.S. GPS Point Position Calculation [Text] / S.S. van Leeuwen // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 1 – 2. – P. 115 – 117. – Англ.

196. Lee, H.K. Carrier Phase Processing Issues for High Accuracy Integrated GPS/Pseudolite/INS Systems [Electronic resource] / H.K. Lee, J. Wang, C. Rizos. – 2003. – 21 p. – Англ. – Режим доступа: www.gmat.unsw.edu.au/snap/ publications/lee_etal2003.pdf

197. Lee, H.K. Web-based resources on GPS/INS integration [Text] / H.K. Lee, S. Hewitson, J. Wang // GPS Solutions. – 2004. – Vol. 8, No. 3. – P. 189 – 191. – Англ.

198. Leick, A. GPS Satellite Surveying [Text] / A. Leick. - New York: A Willey-Interscience Publication. – 1995. – 560 p. – Англ.

199. Leick, A. GPS Vector Networks [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, January/February, 1994a. – Англ.

200. Leick, A. Introducing GPS Surveying Techniques [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, July/August, 1992a. – Англ.

201. Leick, A. Kinematic GPS Surveying [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, November/December, 1992b. – Англ.

202. Leick, A. Kinematic GPS continued [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, January/February, 1993a. – Англ.

203. Leick, A. More on Kinematic GPS [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, March/April, 1993b. – Англ.

204. Leick, A. On-The-Fly Ambiguity fixing [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, November/December, 1994b. – Англ.

205. Leick, A. Processing GLONASS Carrier Phase Observations. Theory and First Experience [Text] / A. Leick, J. Beser, G. Mader // Proc. ION-GPS 95, Institute of Navigation. – 1995. – P. 1041 – 1047. – Англ.

206. Leick, A. Rapid Static GPS Surveying [Text] / A. Leick // ACSM Bulletin, May/June, 1994c. – Англ.

207. Lichten, S.M. Strategies for high precision GPS orbit determination [Text] / S.M. Lichten, J.S. Border // J. of Geophysycal Research. – 1987. – Vol. 92(B12). – P. 12751 – 12762. – Англ.

208. Lithopoulos, E. The Applanix Approach to GPS/INS Integration [Electronic resource] / E. Lithopoulos. – 1999. – 5 p. – Англ. – Режим доступа: www.ifp.uni-stuttgart.de/ publications/phowo99/lithopoulos.pdf

209. Logsdon, T. Understanding the Navstar: GPS, GIS, and IVHS. Second Ed. [Text] / T. Logsdon. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1995. – 330 p. – Англ.

210. MacGougan, G. Performance analysis of a stand-alone high-sensitivity receiver [Text] / G. MacGougan, G. Lachapele, R. Klukas et al. // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 3. – P. 179 – 195. – Англ.

211. Mader, G.L. Calibrating Antenna Phase Centers [Text] / G.L. Mader, F. Czopek // GPS World. – 2002. – Vol. 13, No. 5. – P. 40 – 46. – Англ.

212. Mader, G.L. Dynamic positioning using GPS carrier phase measurements [Text] / G.L. Mader // Manuscripta geodaetica. – 1986. – Vol. 11. – P. 272 – 277. – Англ.

213. Mader, G.L. Verification of airborne Positioning System carrier phase measurements [Text] / G.L. Mader, J.R. Lucas // J. of Geophysical Research. – 1989. – Vol. 94, No B8. – P. 10175 – 10181. – Англ.

214. Mader G.L. The On-line Positioning User Service (OPUS) [Electronic resource] / G.L. Mader, N.D. Weston, M.L. Morrison, D.G. Milbert // Professional Surveyor Magazine, Vol. 23, No. 5. – 2003. – Англ. – Режим доступа: http://www.profsurv.com/

215. van der Marel, H. Virtual GPS reference stations in The Netherlands [Electronic resource] / H. van der Marel // Proc. of the 11th International Technical Meeting, Algorithms and Methods ION-GPS '98, Nashville, USA, 15-18 September 1998, part I. – P. 49 – 58. – Англ. – Режим доступа http://enterprise.lr.tudelft.nl/mgp/modules/Papers/files/ion98vir.pdf

216. Marjanovic, M. Results of the CEGRN'94 and CEGRN'95 GPS campaigns [Text] / M. Marjanovic, P. Franke, K. Herzberger et al. // Proc. Of the 5th CEI CERGOP working conference, Reisseck, Carinthia, Austria 29 – 31 May 1996. – Warshaw: Politechnika Warshawska, Inst. Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej, No. 2 (20), 1996. – P. 117 – 137. – Англ.

217. Marshall, M. The Effect of the MAPS Weather Model on GPS-Determined Ellipsoidal Heights [Text] / M. Marshall, M. Scheneverk, R. Snay, S. Gutman // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 5, No 1. – P. 1 – 14. – Англ.

218. Martone, M. Prime Time Positioning. Using Broadcast TV Signals to Fill GPS Acquisition Gaps [Text] / M. Martone, J. Metzler // GPS World. – 2005. Vol. 16, No. 9. – P. 52 – 59. – Англ.

219. Mattos, P.G. A Single-Chip GPS Receiver and the Steps to Mass-Market Galileo [Text] / P.G. Mattos // GPS World. – 2005. – Vol. 16, No. 10. – P. 24 – 31. – Англ.

220. Merrigan, M.J. A Refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame [Electronic resource] / M.J. Merrigan, E.R. Swift, R.F. Wong et al. – 2002. – 11 p. – Англ. – Режим доступа: http://164.214.2.59/GandG/sathtml/IONReport8-20-02.pdf

221. Milbert, D.G. GPS and Geoid90 – the new level rod [Text] / D.G. Milbert // GPS World. – 1992. – Vol. 3, No 2. – P. 38 – 43. – Англ.

222. Minkel, D.H. GPS antenna set up procedures and error sources [Text] / D.H. Minkel // J. Surv. Eng. – 1989. – 115, № 3. – P. 297 – 303. – Англ.

223. Misra, P.N. Integrated use of GPS and GLONASS: Transformation between WGS-84 and PZ-90 [Text] / P.N. Misra, R.I. Abbot, E.M. Gaposchkin // Presented at The Institute of Navigation. ION GPS-96. – Англ.

224. Misra, P.N. Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance [Text] / P.N. Misra, P. Enge – USA: Ganga-Jamuna Press. – 2001. – 390 p. – Англ.

225. Morgan-Owen, G.J. Differential GPS positioning [Text] / G.J. Morgan-Owen, G.T. Johnston // Electronics & Communication Engeneering J. – February 1995. – P. 11 – 21. – Англ.

226. Morgan, P. Models for GPS network design [Text] / P. Morgan. // Aust. J. Geod. Photogram. Surv. – December, 1987. – Nos 46, 47. – P. 41 – 55. – Англ.

227. Muellerschoen, R.J. An Internet-Based Global Differential GPS System, Initial Results [Electronic resource] / R.J. Muellerschoen, W.I. Bertiger, M. Lough, D. Stowers, D. Dong / 2000. – Англ. – Режим доступа: http://gipsy.jpl.nasa.gov/igdg/papers/ion_paper_2000.doc

228. NIMA Technical Report 8350.2 Departament of Defence World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationship with local geodetic Systems; DMA TR 8350.2; 3rd edition. – 3 January 2000. – Англ. – [Electronic resource]. – Режим доступа: http://164.214.2.59/GandG/tr8350_2.html – Англ.

229. Ochieng W.Y. Integration of GPS and dead reckoning for real-time vehicle performance and emissions monitoring [Text] / W.Y. Ochieng, J.W. Polak, R.B. Noland et al. // GPS Solutions. – 2003. – Vol. 6, No. 4. – P. 229 – 241. – Англ.

230. Petrovski, I. The Issues of Practical Implementation of the Commercial RTK Network Service [Text] / I. Petrovski, S. Kawaguchi, H. Torimoto, K. Fuji, M.E. Cannon, G. Lachapelle // Proceedings of ION GPS-01 (Salt Lake City, 11 – 14 September, 2001), Institute of Navigation, Alexandria, VA. – 2001. – P. 2654 – 2664. – Англ.

231. Phillips, A.H. Geometrical determination of PDOP [Text] / A.H. Phillips. // J. of the Institute of Navigation. – Winter 1984-85. – Vol. 31, No. 4. – P. 329 – 337. – Англ.

232. Povalyaev, A. Using single differences for relative positioning in GLONASS [Text] / A. Povalyaev // 10th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION'97, Kansas City, Missouri, 16 – 19 September, 1997. – P. 929 – 934. – Англ.

233. Remondi, B. Global Positioning System carrier phase: description and use [Text] / B. Remondi // Bull. Géodésique. – 1985. – Vol. 59 (4). – P. 361 – 377. – Англ.

234. Remondi, B. Kinematic and psevdokinematic GPS [Text] / B. Remondi // Proceeding of the satellite Division’s International Meeting, 1988, September 19 – 23, Colorado Springs, USA. – Англ.

235. Rizos, Ch. GPS with Multiple Reference Stations: Surveying Scenarios in Metropolitan [Electronic resource] / Ch. Rizos, Ch. Satirapod, H.-Y. Chen, Sh. Han / 1999. – 14 p. – Англ. – Режим доступа: www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/rizos_etal1999a.pdf

236. Rizos, Ch. Precise GPS Positioning: Prospects and Challenges [Electronic resource] / Ch. Rizos. – 2001. – 17 p. – Англ. – Режим доступа: www.gmat.unsw.edu.au/snap/ publications/rizos_2001a.pdf

237. Rizos, Ch. Principles and Practice of GPS Surveying [Electronic resource] / Ch. Rizos. – Version 1.1, September 1999. – Режим доступа: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/ – Англ.

238. Rizos, Ch. Regional-scale multiple reference stations for carrier phase-based GPS positioning: A correction generation algorithm [Text] / Ch. Rizos, Sh. Han, H.-Y. Chen // Earth Planets Space. – 2000. – Vol. 52. – P. 795 – 800. – Англ.

239. Ruland, R. Application of GPS to a high precision engineering survey network [Text] / R. Ruland, A. Leick // Proc. Pos. with GPS, 1. – 1985. – P. 483 – 493. – Англ.

240. Santerre, R. Impact of GPS satellite sky distribution [Text] / R. Santerre // Manuscripta Geodaetica. – 1991. – Vol. 16, No. 1. – P. 28 – 53. – Англ.

241. Schmitt, G. Spectral analysis and optimization of geodetic networks [Text] / G. Scmidt // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 1, Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», 25 – 29 апреля 2005 г. Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 11 – 16. – Англ.

242. Schmitz, M. Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results [Text] / M. Schmitz, G. Wübbena, G. Boettcher // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 1 – 2. – P. 18 – 27. – Англ.

243. Schaffrin, B. Designing a covariance matrix for GPS baseline measurements [Text] / B. Schaffrin and J.B. Zieliñski // Manuscripta Geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 19 – 27. – Англ.

244. Seeber, G. Satellite Geodesy [Text] / G. Seeber. – 2-nd edition – Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. – 589 p. – Англ.

245. Shaw, M. Modernization of the global positioning system [Text] / M. Shaw, K. Sandhoo, D. Turner // GPS World. – 2000. – Vol. 11, No. 10. – P. 40 – 49. – Англ.

246. Sickle, J.V. GPS for Land Surveyors [Text] / J.V. Sickle / Second Edition. – New York, London: Taylor & Francis. – 2001. – 284 p. – Англ.

247. SKI – Static Kinematic Software [Text] – Leica Heerbrugg AG (Switzerland), April 1992. – Англ.

248. Snay, R.A. Modern terrestrial reference systems [Text] / R.A. Snay, T. Soler // Professional Surveyor. – 1999. – Vol. 19, No. 10. 2000. – Vol. 20, No. 2, 3, 4. – Англ.

249. Soler, T. Coordinate system used in geodesy: basic definitions and concepts [Text] / T. Soler, L.D. Hotem // J. of Surv. and Eng. – 1988. – Vol. 114, N 2. – P. 84 – 97. – Англ.

250. Soler, T. Important Parameters Used in geodetic Transformations [Text] / T. Soler, L.D. Hotem // J. of Surv. and Eng. – 1989. – Vol. 115, No 4. – P. 414 – 417. – Англ.

251. Soler, T. A note on frame transformations with applications to geodetic datums [Text] / T. Soler, J. Marshall // GPS Solutions. – 2003. – Vol. 7 No. 1. – P. 23 – 32. – Англ.

252. Strang, G. Linear algebra, geodesy and GPS [Text] / G. Strang, K. Borr. – USA: Wellesley-Cambridge Press, 1997. – 624 p.

253. Takahashi, H. Japanese Regional Navigation Satellite System «The JRANS Concept» [Text] / H. Takahashi // J. of Global Positioning Systems. – 2004. – Vol. 3, No. 1 – 2. – P. 259 – 264. – Англ.

254. Talbot, N. Broadcast Network RTK – Transmission Standards and Results [Text] / N. Talbot, Gang Lu, T. Allison, U. Vollath // ION GPS 2002, 24 – 27 September 2002, Portland, OR. – P. 2379 – 2387. – Англ.

255. Teunissen, P.J.G. A canonical theory for short GPS baselines [Text] / P.J.G. Teunissen // J. of Geodesy. – 1997. – Vol. 71. – P.P. 320 – 336, 389 – 401, 486 – 501, 513 – 525. – Англ.

256. Teunissen, P.J.G. GPS for geodesy. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. (Eds.). [Text] / P.J.G. Teunissen, Y. Bock, G. Beutler et al. – Berlin: Springer, 1998. – 650 p. – Англ.

257. Tiberius, C. Standard Positioning Service – handheld GPS receiver accuracy [Text] / C. Tiberius // GPS World. – 2003. – Vol. 14, No. 2. – P. 46 – 51. – Англ.

258. Tiberius, C. The Stochastics of GPS Obeservables [Text] / C. Tiberius, N. Jonkman, F. Kenselaar // GPS World. – 1999. – Vol. 10, No. 2. – P. 49 – 54. – Англ.

259. Toran, F. Position via Internet. SISNeT Catches GPS in Urban Canyons [Text] / F. Torán, J. Ventura, E. Gonzáles, et al. // GPS World. – 2004. – Vol. 15, No. 4. – P. 28 – 35. – Англ.

260. Tralli, D. M. Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements [Text] / D.M. Tralli, S.M. Lichten // Bull. Géodesique. – 1990. – Vol. 64. – P. 127 – 159. – Англ.

261. Trimble Geomatics office. Network Adjustment User Guide [Text] / Trimble Navigation Ltd. – 2001. – 113 p. – Англ.

262. TRIMNET Plus. Survey network software user’s manual [Text] / Trimble Navigation Ltd. – 1991. – Англ.

263. Vigny C. GPS network monitors the Western Alps' deformation over a five-year period: 1993 – 1998 [Text] / C. Vigny, J. Chery, T. Duquesnoy et al. // J. of Geodesy. – 2002. – Vol. 76, No. 2. – P. 63 – 76. – Англ.

264. Visser, Ir. H. OmniSTAR HP worldwide positioning service [Text] / Ir. H. Visser, C. de Kuijper // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 1, ч. 2. Геодезия, картография, маркшейдерия: Сб. материалов научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2006», 24 – 28 апреля 2006 г. Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 108 – 116.

265. Vollath, U. Troposphere: Signal or Noise? [Electronic resource] / U. Vollath, E. Brockmann, X. Chen. – 2003. – 9 p. – Англ. – Режим доступа: http://www.trimble.com/vrs.shtml

266. Walter, T. Introduction to the Wide Area Augmentation System [Text] / T. Walter // J. of Global Positioning Systems. – 2002. – Vol. 1, No. 2. – P. 151 – 153. – Англ.

267. Wang, J. An approach to GLONASS ambiguity resolution [Text] / J. Wang // J. of Geodesy. – 2000. – Vol. 74, No. 5. – P. 421 – 430. – Англ.

268. Wang, J. Dependency of GPS positioning precision on station location [Text] / J. Wang, H. B. Iz, C. Lu // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 6, No. 1 – 2. – P. 91 – 95. – Англ.

269. Wang, J. GPS and GLONASS Integration: Modeling and Ambiguity Resolution Issues [Text] / J. Wang, C. Rizos, M. P. Stewart, A. Leick // GPS Solutions. – 2001a. – Vol. 5, No. 1. – P. 55 – 64. – Англ.

270. Wang, J. GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning [Electronic resource] / J. Wang, T. Tsujii, Ch. Rizos et al. – 2001b. – 15 p. – Англ. – Режим доступа: www.gmat.unsw.edu.au/snap/ publications/wang_etal2001b.pdf

271. Warren, D.L.M. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective [Text] / D.L.M. Warren, J.F. Raquet // GPS Solutions. – 2003. – Vol. 7, No. 3. – P. 151 – 156. – Англ.

272. Weber, R. The international GLONASS experiment: products, progress and prospects [Text] / R. Weber, T.A. Springer // J. of Geodesy. – 2001. – Vol. 75, No. 11. – P. 559 – 568. – Англ.

273. Weill, L.R. Multipath mitigation. How good can it get with new signals? [Text] / L.R. Weill // GPS World. – 2003. – Vol. 14, No. 6. – P. 106 – 113. – Англ.

274. Wilson, B.D. New and improved the broadcast interfrequency biases [Text] / B.D. Wilson, C.H. Yinger, W. A. Feess, C. Shank // GPS World. – 1999. – Vol. 10, No. 9. – P. 56 – 66. – Англ.

275. Wübbena, G. Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks [Text] / G. Wübbena, A. Bagge, G. Seeber, et al. // Proc. of the 9th Intern. Tech. Meet. of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-96), Kansas City, Missouri. – 1996. – P. 1845 – 1852. – Англ.

276. Xu, Guochang. GPS Theory, algorithms and applications [Text] / Guochang Xu. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. – 2003. – 315 p. – Англ.

277. Zarraoa, N. Preliminary evaluation of the Russian GLONASS system as a potential geodetic tool [Text] / N. Zarraoa, W. Mai, E. Sardón, A. Jungstand // J. of Geodesy. – 1998. – Vol. 72, No.6. – P. 356 – 363. – Англ.

278. Zhang, J. Southern Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities [Text] / J. Zhang, Y. Bock, H. Johnson et al. // J. of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102, No. B8. – P. 18035 – 18055. – Англ.

279. Zieliñski, J.B. GPS baseline error caused by the orbit uncertainty [Text] / J.B. Zieliñski // Manuscripta geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 117 – 124. – Англ.

280. Zilkoski, D.B. Guidelines for establishing GPS-derived ellipsoid heights [Electronic resource] / D.B. Zilkoski, J.D. D'Onofrio, S.J. Frakes. – 1997. – Режим доступа: http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/NGS-58.html/ – Англ.

281. Zumberge, J.F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [Text] / J.F. Zumberge, M.B., Heflin, D.C.

Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb // J. of Geoph. Research. – 1997. – Vol. 102, No B3. – P. 5005 – 5017. – Англ.