УО "Полоцкий государственный университет"

Конспект лекций по теме
"Основы спутниковой геодезии"
Раздел 4.1 Спутниковая геодезия. Система координат. Геометрические методы спутниковой геодезии
Лекция4.1.2 Краткий обзор геометрических методов спутниковой геодезии
(2часа, 9 страниц)

Составитель: ст. преподаватель Товбас С. К.

2004 год

4.1.2.1 Методы спутниковой геодезии

Искусственный спутник Земли, двигаясь по орбите подчиняется законам космической динамики и испытывает воздействие различных внешних факторов. В каждый момент времени положение спутника на орбите может быть описано тремя векторами в геоцентрической декартовой системе координат $\overline{R} = \overline{r} - \overline{\rho}$ (рис.1).

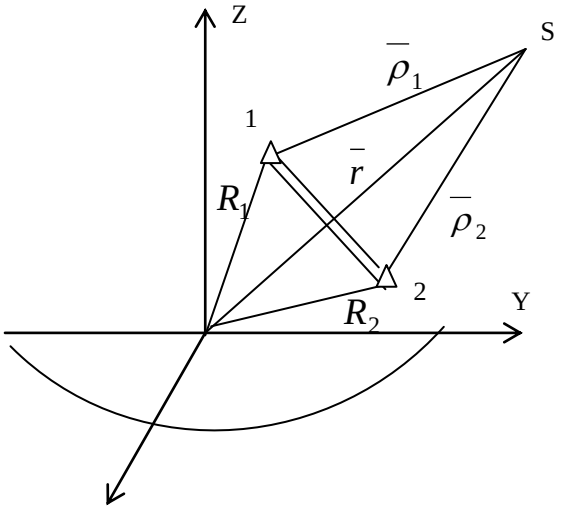


Рис. 1

Через $\overline{R_1}$ обозначен вектор положения наземного пункта $[x_1, y_1, z_1]^{\mathrm{T}}$. $\overline{r}$ - вектор положения спутника в геоцентрической системе $[x_S, y_S, z_S]^T$. $\overline{\rho_1}$ - вектор положения спутника в топоцентрической системе координат точки 1, $[x_5 - x_1, y_S - y_1, z_S - z_1]^T$.

В зависимости от задач решаемых методами спутниковой геодезии различают динамический, орбитальный и геометрический методы.

Динамический метод (наиболее общий) основан на использовании законов движения спутников и включает группу способов для совместного определения геофизических параметров и координат наземных пунктов. Любой измеренный топоцентрический вектор может быть представлен в виде

$$\overline{\rho_0} + d\overline{\rho} = \overline{\rho}_{изм} + \overline{V}, \tag{1}$$

где $\overline{\rho_0}$ - приближенное (предвычисленное) значение топоцентрического вектора $\overline{\rho}$, $d\overline{\rho}$ - поправка к приближенному значению $\overline{\rho}$, $\overline{\rho_{изм}}$ - измеренное значение $\overline{\rho}$.

Поправка к измеренному значению $\overline{\rho}$.

Уравнение [1] распишем в виде.

$$\left(\overline{r_0} - \overline{R_0}\right) + \left(d\overline{r} - d\overline{R}\right) = \overline{\rho}_{изм} + \overline{V}.$$

$$\overline{V} = d\overline{r} - d\overline{R} + \left[\left(\overline{r}_0 - \overline{R}_0\right) - \rho_{изм}\right]. \tag{2}$$

$$\overline{V} = d\overline{r} - d\overline{R} + \overline{l};$$

$$\overline{V} = \sum_{i=1}^{6} \frac{\partial \overline{r}}{\partial q_i} \cdot dq_i - d\overline{R} + \overline{l}.$$

В результате решения системы уравнений поправок по МНК, для дискрентных участков орбиты получают поправки к координатам наземного пункта $d\overline{R}$ и поправки к координатам спутника $\frac{\partial \overline{r}}{\partial q_i} dq_i$, выраженные через изменения в параметров орбиты dq_i.

Решение составляют 9 неизвестных (3 координаты пунктов и 6 параметров орбиты).

Орбитальный метод - частный случай динамического. Заранее известны возмущающие факторы (модель гравитационного поля Земли и другие возмущающие

силы), что позволяет вычислить координаты спутника в любой момент времени и использовать их в качестве исходных.

Уравнивание поправок примет вид

$$\overline{V} = d\overline{R} + \overline{l}, \qquad (3)$$

где $l = \left[\left(r_i - R_0\right) - \rho_{изм.}\right].$

Метод позволяет определить координаты пункта поверхности Земли в любой момент, в реальном времени.

Геометрический метод не требует точного знания законов движения ИСЗ, но требует синхронного наблюдения спутников с двух и более пунктов.

Вернемся к рассмотрению рис.1.

$\Delta\overline{R}$ - хордовый вектор (приращение координат $\left(\overline{R_1} - \overline{R_2}\right)$).

$$\overline{R}_1 = \overline{r} - \overline{\rho}_1; \overline{R}_2 = \overline{r} - \overline{\rho}_2; \qquad (4)$$
$$\Delta\overline{R} = \overline{R}_1 - \overline{R}_2 = \overline{\rho}_2 - \overline{\rho}_1;$$

Таким образом, измерение разности топоцентрических векторов спутника относительно двух наземных пунктов достаточно для определения приращения координат этих пунктов.

Метод позволяет определить относительное положение пунктов. Достаточно построить сеть хордовых векторов и иметь хотя бы один исходный пункт в какой либо системе координат, чтобы распространить эту систему на какую угодно территорию.

4.1.2.2 Краткий обзор геометрических методов спутниковой геодезии

Методы наблюдения ИСЗ делят на оптико-электронные и радиотехнические. К оптико-электронным методам относят фотографические и фотоэлектрические, к радиотехническим - радиодальномерные, доплеровские и радиоинтерференционные.

Фотографический метод

Спутник движется с угловой скоростью около 1^0 за секунду при высотах 1000-1500км. над поверхностью Земли. Для обеспечения определения направления единичного вектора мгновенного положения спутника с точностью 0,5" необходима фиксация моментов времени не грубее $0{,}001^S$. Фотометод заключается в фотографировании спутника на фоне звездного неба. Одновременно на поле снимка отображается временная шкала.Съемку производят синхронно двумя или более фотокамерами, расположенными в разных пунктах земной поверхности. Часы на пунктах синфронизированы в системе единичного вектора. Платформа на которой установлена камера отслеживает суточное вращение Земли.

На снимке (рис.2), изображены звезды (точками), трасса спутника (пунктирной линией), дата и время. На полях справа и слева метки времени. Соединяя одноименные метки времени получают положение спутника на этот момент. Интерполируя положение спутника относительно известных координат звезд, получают его координаты. На снимке с другого пункта на этот же момент времени получают координаты

аналогичным способом. Координаты спутника (прямое восхождение и склонение) позволяют вычислить уравнивание синхронной плоскости в которой лежат спутник и два наземных пункта на момент времени t_1.

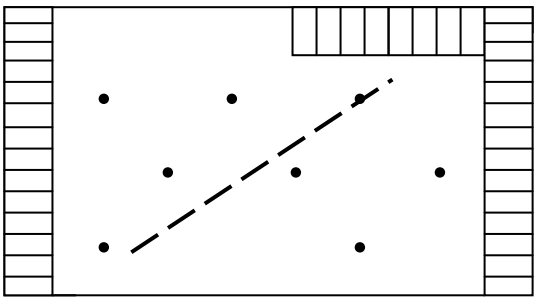


Рис. 2

Для моментов t_2, t_3 и т.д. получают уравнения плоскостей с общей стороной, связывающей наземные пункты и различными положениями спутника.

Совместное решение уравнений плоскостей даст значения направляющих косинусов хорд (направление между двумя наземными пунктами). Объединив отдельные хорды в единую сеть получили спутниковую триангуляцию и создали глобальную геодезическую сеть, охватывающую весь Земной шар. Как любая триангуляция эта сеть нуждалась в базисах и изначально базировалась на измеренных произведенных в наземной триангуляции. В дальнейшем с внедрением лазерно-дальномерных измерений до спутников, базисные стороны уточнялись и точность триангуляция повышалась. Пункты спутниковой триангуляции объединены в космическую геодезическую сеть (КГС), которая в настоящее время служит основой для установления общей земной системы координат. Эта же сеть является хранителем этой системы на земной поверхности. Расстояния между пунктами космической геодезической сети достигают несколько тысяч километров. Естественно, что плотность таких пунктов низка.

На ряде пунктов смонтированы лазерно-дальномерные устройства, позволяющие измерять расстояния до уголкового отражателя установленного на спутнике синхронно с его фотографированием. Точность таких измерений до 0,15м. Имея значения направляющих косинусов наземный пункт - спутник и наземный пункт - наземный пункт несложно вычислить углы в синхронном треугольнике и по теореме синусов получить расстояние между наземными пунктами. Таким образом спутниковая триангуляция дополняется рядом базисов, масштабирующих и уточняющих ее.

Спутниковое нивелирование (альтиметрия)

В спутниковом нивелировании используются спутники вращающиеся на высотах 1000-1500км, снабженные радиовысотомерами. С помощью радиовысотомера измеряется высота спутника над поверхностью океана. Траектория движения спутника сильно подвержена возмущениям от гравитационного поля Земли, поэтому используют измерения на коротких отрезках траектории. Отрезки на повторных витках накладываются друг на друга с некоторым смещением.

Разности высот на концах дуг это приращения высот геоида. Составив непрерывную кривую из отдельных отрезков, имеющих общие точки, можно получить профиль геоида.

Измеренные значения высот и значения векторов положения спутника в геоцентрической системе координат на определенный момент времени, позволяют определить высоты геоида над уровенным эллипсоидом для океанической поверхности.

Систематические приборные поправки радиовысотомера могут быть определены на метрологических эталонных океанских полигонах. Случайная составляющая приборной поправки радиовысотомера может быть снижена до 5см.

Ошибки вызванные тропосферной рефракцией фронта радиоволн, при прохождении импульсов сантиметрового диапазона, могут достигать 5м.

При тщательно отработанной методике учета метеофакторов ошибка не превышать 8см.

Волнение океана минимально в летние месяцы. Наиболее точными могут быть наблюдения выполненные в этот сезон.

За сутки можно отнивелировать два профиля геоида. За год осуществить 20 нивелировок поверхности Мирового океана.

Задачи решаемые с помощью спутникового нивелирования:

1. Периодическое уточнение параметров внешнего гравитационного поля Земли. Повторное нивелирование позволяет установить изменения параметров геоида во времени.
2. Определение с сантиметровой точностью векового движения центра масс Земли в ее теле (равномерно располагая районы нивелирования).
3. Установление уравенного эллипсоида наилучшим образом аппроксимирующий планетарный.
4. Сравнивая предвычисленные и реальные положения орбит можно определять возмущения орбит навигационных спутников там, где нет станций слежения за космическими объектами.

Длиннобазисная радиоинферометрия

Принцип использования радиоинтерферометрических наблюдений осуществляемых при помощи квазаров, в геодезических целях, основан на том, что сигналы от квазаров на антенны двух радиотелескопов, находящихся на большом расстоянии, поступают не одновременно, а с запаздыванием. Это обусловлено разностью расстояний, от базисных пунктов радиоинтерферометрии (РИ) до квазара. Со временем эта разность изменяется вследствие изменения угла между базой РИ и направлением на квазар, из-за суточного вращения Земли. Синхронизация по времени реализуется по сигналам Службы единого времени. Сущность метода иллюстрирует рис.3.

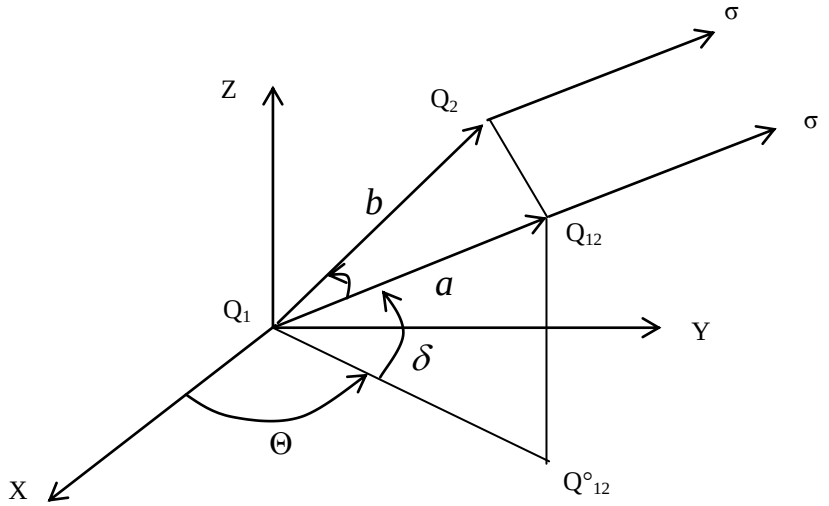


Рис.3

$\bar{a} = c\tau$ - измеренная длина вектора

$\bar{b}$ - искомый вектор положения точки Q_2 в топоцентрической экваториальной гринвичской СК точки Q_1 $\bar{b} = [XYZ]^T$.

Связь измеренного и искомого векторов осуществляется посредством трансформирования одного в другой.

$$a = c\tau = X\cos\delta\Theta + Y\cos\delta\sin\Theta + Z\sin\delta; \qquad (5)$$

где $\Theta = \alpha - S$

Второе уравнение базы обусловленно угловой скоростью w вращения Земли.

Производная $d\tau$ по времени ds (скорость изменения вектора a по времени)

$$c\frac{d\tau}{ds} = \left(X\cos\delta\sin\Theta - Y\cos\delta\cos\Theta\right)\cdot w \qquad (6)$$

$$\frac{d\tau}{ds} = \left(X\cos\delta\sin\Theta - Y\cos\delta\cos\Theta\right)\cdot\frac{w}{c}$$

Измеренную величину τ представляем в виде суммы трех величин: τ' - результата измерения; $\Delta\tau$ поправки за несинхронность часов и ошибки вызванные несовершенством модели ионосферы и тропосферы; V_T - поправка за случайную ошибку измерения времени запаздывания.

Задачи решаемые методом длиннобазисной РИ

1. Имея известную длину базиса РИ, можно решить обратную задачу о геоцентрических положениях далеких квазаров. При длине базы в несколько тысяч километров и использовании стандарта частоты 10^{-13} можно определить α и δ квазаров с точностью в тысячные доли угловых секунд.

2. Поскольку экваториальные координаты α и δ квазара постоянные, а шкала атомных часов равномерна, то изучив в течение нескольких суток уклонение $d\tau / ds$ от периодической функции, можно определить неравномерность вращения Земли.

3. По вариациям топоцентрических координат баз РИ можно с точностью до 0,1м следить за движением полюсов и определить перемещения крупных блоков земной коры.

По наблюдениям станций РИ, расположенных на различных литосферных плитах, можно установить их взаимное перемещение, а по наблюдениям нескольких РИ размещенных на одной литосферной плите, определить ее деформацию и вращение.

Радиотехнические методы наблюдений

В общем случае мгновенное положение объекта в пространстве определяется тремя координатами. Для характеристики движения объекта необходимы также производные координат. Возможно также непосредственно оценить составляющую относительной скорости объекта, перпендикулярную фронту приходящей к антенне электромагнитной волны, путем измерения доплеровского смещения частоты.

При распространении сигнала от излучателя до приемника, при условии движения излучателя со скоростью V_r частота принятого сигнала будет отличаться от излучаемого на величину: $F_V = V_r / \lambda_u$, где λ_u - длина волны излучения.

При радиотехнических измерениях может быть определена дальность от приемника до передатчика, разность дальности от передатчика до двух приемников, направление перехода сигнала от передатчика к приемнику.

В радионавигации при нахождении местоположения объекта вводят понятие радионавигационого параметра, поверхностей и линий положения.

Радионавигационным параметром (РНП) называют физическую величину непосредственно измеряемую радионавигационным средством (расстояние, разность или сумма расстояний, угол).

Поверхность положения считают геометрическое место точек в пространстве, имеющих одно и тоже значение радионавигационного параметра.

Линия положения - есть линия пересечения двух поверхностей положения.

Пересечение линий положения определяет положение объекта.

Различают три основных определения местоположения объекта:

- угломерный
- дальномерный
- разностно-дальномерный.

В спутниковой геодезии используется дальномерный, разностно-дальномерный.

Доплеровские системы наблюдений ИСЗ

Физическая сущность эффекта Доплера объясняется тем, что при движении источника излучения к приемному устройству частота радиосигнала, принимаемая приемным устройством больше частоты излучения источника, из-за набега фазы синусоидального сигнала.

При реализации измерений доплеровским методом пользуются приближенной формулой:

$$F_Д = f_П - f_И \qquad (7)$$

где $f_П$ - частота приема; $f_И$ - частота излучения; $F_Д$ - доплеровский сдвиг частоты.

Возможно три варианта построения доплеровских систем:

1) пассивный,
2) запросный (ретрансляционный),
3) беззапросный.

1- используется сигнал отраженный от спутника ,

2- на ИСЗ используется приемо-ответчик, ретранслирующий сигналы обратно в приемник (генератор один, только на Земле),

3- передатчик постоянно излучает частоту бортового генератора, которая сравнивается с частотой такого же наземного.

Беззапросные системы являются основными.

При реализации разностно-дальномерного метода используются сравнения $f_п$ с $f_{оп}$ опорного генератора приемника, подачей их на смеситель, на выходе которого выделяется сигнал с частотой биений $F_Б$.

$$F_Б = f_{ОП} - f_П = f_{ОП} - f_И - F_Д = (f_{ОП} - f_И) - F_Д \qquad (8)$$

Частота ($f_{ОП}$ - $f_п$) называется частотой подставки, которая выбирается посредством подбора $f_{ОП}$, такой чтобы $F_Б$ была всегда положительной.

Интегральный метод доплеровских измерений.

В интегральном методе наблюдений период наблюдений берут равным 1-2 минутам.

Интегратор считает число периодов сигнала $F_Б$ за фиксированный промежутком времени, которое позволяет вычислить разность расстояний от наблюдателя до

спутника в двух точках орбиты соответствующих моментам начала и конца счета периода наблюдений.

$$N_{i,i+1} = \frac{f_{ОП}}{2Пс}(\rho_{i+1} - \rho_i) + (f_{ОП} - f_И)\Delta T / 2П \qquad (9)$$

Частота подставки включает в число определяемых параметров. Ее можно считать постоянной за время одного прохождения.

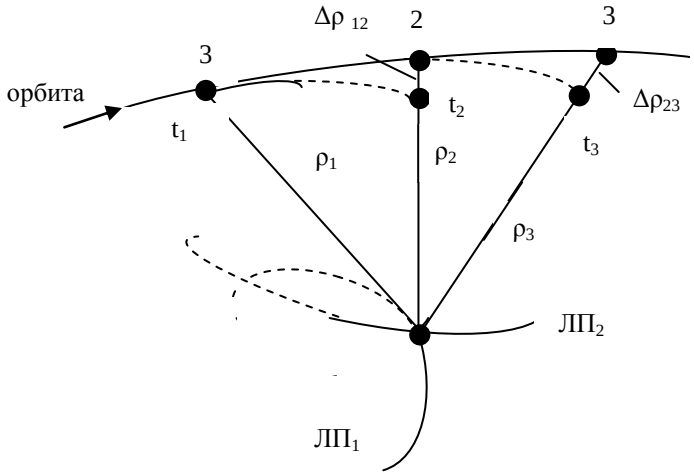


Рис.4

Таким образом, вычисление интеграла от доплеровского сдвига частот фиксирует разность расстояний до ИСЗ в последовательные моменты времени. Рис. 4. Значение $\Delta\rho_i$ соответствует поверхности гиперболоида. положение наблюдателя характеризуется точкой пересечения гиперболоидов. Возникающая неоднозначность требует приближенных координат.

Для обеспечения синхронизации часов, коррекцию бортовой шкалы времени осуществляют с помощью специальных меток времени в принимаемом радиосигнале. Кроме того, для вычисления текущих пространственных координат ИСЗ на борту необходимо иметь эфемеридную информацию, т.е. предвычисленные значения координат или параметров орбиты и вектора скорости ИСЗ.

Эфемеридную информацию передают с борта ИСЗ с помощью модуляции (фазовой или частотной) непрерывной несущей, используемой для интегральных доплеровских измерений.

При прохождении атмосферы радиоволны подвергаются рефракции двух различных видов: рефракция неионизированных слоев нижней атмосферы, особенно тропосферы, и рефракция, ионосферы.

Для учета влияния этих факторов необходимо использование не менее чем двух несущих частот.

Спутниковая навигационная Система Транзит

Состав системы Транзит: 1) 5-6 спутников; 2) наземный комплекс контроля; 3) парк бортовой аппаратуры потребителя.

Система Транзит - беззапросная.

Спутники вращаются на почти круговых полярных орбитах с большими полуосями порядка 7450км и периодом обращения 106,8 мин.

Передатчик ИСЗ излучает в течении двухминутных циклов сигналы на двух когерентных частотах: 149,988 и 399,968мГц. Стабильность генераторов 10^{-11}. Прие-

моиндикаторную аппаратуру делят на одноканальную и двухканальную. Последняя используется для решения геодезических и геофизических задач. Одноканальная использует только частоту 399,968мГц и предназначена для решения навигационных задач.

Время нахождения ИСЗ в зоне радиовидимости 10-16мин, что позволяет получить от 5 до 8 поверхностей положения при необходимых 3, плюс одно уравнение для оценки расхождения шкал времени потребителя и ИСЗ.

Точность определения координат пунктов 5-6м .

Система Транзит используется для решения динамических задач космической геодезии в режиме наблюдения с наземных станций слежения. Спутники находятся на низких орбитах и их траектории сильно подвержены возмущениям, особенно от вариаций значений геопотенциала.

В рассматриваемой системе невозможно непрерывно осуществлять наблюдения. Средний интервал времени между обсервациями составляет от 35 минут в приполярных районах до 90 минут на экваторе. Уменьшение этого интервала путем увеличения числа спутников невозможно, так как все ИСЗ излучают сигналы на одних и тех же частотах. При нахождении в зоне радиовидимости нескольких спутников возникают взаимные помехи, что нарушает работу системы.

Таким образом, существующие низкоорбитные СРНС обладают по крайней мере двумя серьезными недостатками: малой точностью определения координат высокодинамичных объектов и большим интервалом времени между обсервациями.

УО "Полоцкий государственный университет"

Конспект лекций по теме
"Основы спутниковой геодезии"
Раздел 4.2 Позиционные и относительные определения системой GPS - измерений. Спутниковое нивелирование
Лекция4.2.1 Позиционные и относительные определения системой GPS .
(4часа, 29 страниц)

Составитель: ст. преподаватель Товбас С. К.

2004 год

4.2.1.1. Спутниковая радионавигационная система (СРНС) GPS

В состав СРНС входят ИСЗ, подсистема контроля и управления (наземный командно – измерительный комплекс) и подсистема аппаратуры потребителей (рис.1).

1. В состав подсистемы ИСЗ входят 18-24 спутника, размещенных равномерно в шести орбитальных плоскостях с наклоном орбит 55˚ и разнесенных по долготе через 30˚. Высота орбит ИСЗ около 20000 км, период обращения 12 часов. В зоне радиовидимости потребителя в любой момент находится от 4 до 11 ИСЗ, что обеспечивает возможность непрерывного определения координат. СРНС имеет собственное системное время, хранимое на борту атомными эталонами частоты с нестабильностью за сутки 10^{-13}. Раз в сутки временные шкалы всех спутников согласовываются между собой и синхронизируются системой единого времени.

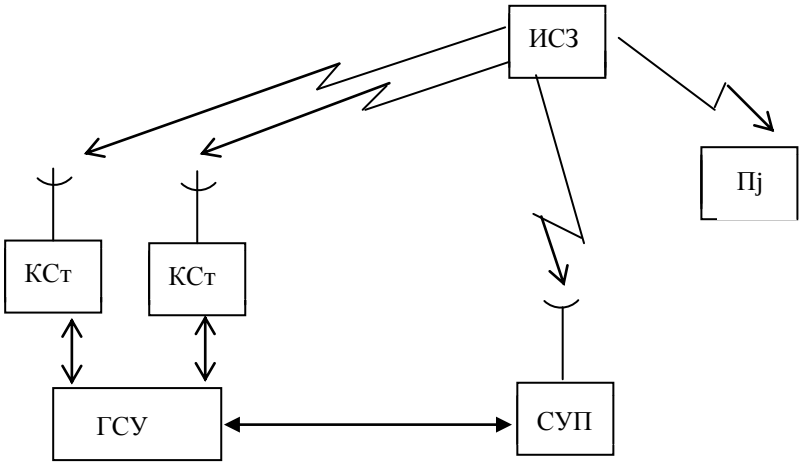


Рис. 1

2. Наземный командно – измерительный комплекс включает главную станцию управления и передачи данных (ГСУ), контрольные станции (КСТ) для автоматического слежения за радионавигационными сигналами и сбора информации о положении ИСЗ. Управление КСТ осуществляет ГСУ, на которую они передают всю собранную информацию. Навигационные данные для каждого ИСЗ, полученные на ГСУ, поступают по линиям связи на станцию управления и передачи данных (СУП), которая по командному радиоканалу передает их на борт ИСЗ. Эти данные хранятся в памяти бортовой ЭВМ . Процесс передачи данных контролируется в ГСУ, где анализируются данные телеметрии и проверяется передача навигационных сообщений с ИСЗ потребителю ($П_j$).

3. Навигационная аппаратура потребителей обеспечивает выбор необходимых ИСЗ, поиск и слежение за их радионавигационными сигналами, измерение их временной задержки и доплеровских сдвигов несущих частот, выделение и декодирование навигационных сообщений, обработка измерительной информации, расчет координат ИСЗ в момент навигационных измерений, определение координат и вектора скорости потребителя, оценку точности местоположения и индикации координат.

Типовой комплект навигационной аппаратуры потребителя состоит из антенны, сенсора, ЭВМ с хранящимися в ее запоминающем устройстве программ, блока управления и индикации.

Каждый ИСЗ передает радионавигационные сигналы на когерентных несущих частотах $f_1 = 1.57542$ Ггц и $f_2 = 1.2276$ Ггц, получаемых с одного генератора путем умножения. За счет использования двух когерентных частот обеспечивается компенсация ионосферных ошибок навигационных измерений. Каждый из когерентных сиг-

налов манипулируется по фазе кодовыми последовательностями, без знания которых, невозможен допуск в систему. Кроме этого коды С и Р дополнительно модулируются сигналами, несущими навигационную информацию.

$$S_1 = a_\rho P_i(t) Д_i(t) \cos(w_1 t + \varphi_1) + a_c C_i(t) Д_i(t) \sin(w_1 t + \varphi_1);$$

$$S_2 = a_2 P_i(t) Д_i(t) \cos(w_2 t + \varphi_2). \qquad (1)$$

a_ρ, a_c, a_2 - амплитуды колебаний;

$P_i(t), C_i(t)$ - Р - код, С - код;

$Д_i(t)$ - навигационные данные.

Сдвиг фаз $П/2$ несущих колебаний Р и С кодов в сигнале S_1 обеспечивает их разделение на приемной стороне.

Структура кода Р позволяет использовать Р код лишь потребителям, имеющим дешифратор ключевого слова, содержащего информацию о виде и временном состоянии кода Р. Это слово передается с помощью кода С в составе навигационных данных. По С - коду производится идентификация спутника.

С и Р коды позволяют измерить псевдодальности до спутника с точностями соответственно 20-30м и 2-5 метров. Приближенная дальность с точности до 150м измеряется по времени прохождения импульсов меток времени невысокой частоты от ИСЗ до приемника.

Длины волн С - кода 300м, Р - хода 30м.

Если бы шкалы времени ИСЗ и потребителя были точно совмещены, то для нахождения координат достаточно было бы синхронно измерить три РНП

(ρ_1, ρ_2, ρ_3). Но при наличии расхождения шкал времени $\Delta t = const$ измеренная псевдодальность включает $c\Delta t$.

$$(\rho_i - c\Delta t)^2 = (x_{исз_i} - x_n)^2 + (y_{исз_i} - y_n)^2 + (z_{исз_i} - z_n)^2; \qquad (2)$$

и для получения однозначного решения необходимо 4 уравнения.

Скорость спутника определяют из уравнения вида:

$$\dot{\rho}_i + \delta\dot{\rho} = (\rho_i + c\Delta t)^{-1}[(x_{исз_i} - x_n)(\dot{x}_{исз_i} - \dot{x}_n) + (y_{исз_i} - y_n)(\dot{y}_{исз_i} - \dot{y}_n) +$$

$$+ (z_{исз_i} - z_n)(\dot{z}_{исз_i} - \dot{z}_n)]; \qquad (3)$$

$\dot{\rho}_i + \delta\dot{\rho}$ - измерена на борту потребителя с помощью сравнения частот принятых сигналов с частотой опорного генератора .

Имея в виду, что $X_П$, $Y_П$, $Z_П$ и Δt определены на первом этапе решения навигационной задачи, а ($\dot{x}_{исз}$, $\dot{y}_{исз}$, $\dot{z}_{исз}$) транслированы на борт потребителя информационным сообщением, получим систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными $\dot{x}_П$, $\dot{y}_П$, $\dot{z}_П$, $\delta\dot{\rho}$.

Определение пространственных прямоугольных геоцентрических координат

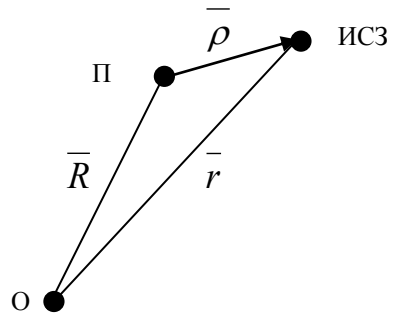


Рис. 2

Для любого момента времени уравнения связи положения ИСЗ и наземного приемника

$$\overline{\rho} = \overline{r} - \overline{R}$$

в скалярном виде:

$$\rho^2 = (x_{ИСЗ} - x_П)^2 + (y_{ИСЗ} - y_П)^2 + \\ + (z_{ИСЗ} - z_П)^2$$

Наиболее вероятный алгоритм решения координатной задачи следующий:

1. Имея приближенные координаты приемника из решения системы трех уравнений на основе импульсных измерений с точностью не хуже 150м, или полученные любым другим способом, вычисляется $\rho_{iвыч}$

2. Составляют систему уравнений вида: (с учетом того, что ρ_i - известны из изсмерений)

$$V_i = a_i \delta x_П + b_i \delta y_П + c_i \delta z_П - c\Delta t + l_i; \qquad (4)$$

где $a_i = -\dfrac{x_{исзi} - x'_П}{\rho_i}$; $b_i = -\dfrac{y_{исзi} - y'_П}{\rho_i}$; $c_i = -\dfrac{z_{исзi} - z'_П}{\rho_i}$; $c\Delta t = 1$; $l_i = \rho_{iвыч} - \rho_i$.

В матричном виде: $V = A\delta X + L$

3. Составляют и решают систему нормальных уравнений

$$A^T A \delta X + A^T L = 0;$$

$$\delta X = \left(A^T A\right)^{-1} A^T L \qquad (5)$$

с оценкой точности, при i > 4.

В динамике можно увеличивать точность позиционных определений путем увеличения числа наблюдений и обработки статистической информации.

Вновь накопленная информация суммируется с ранее полученной и решается нормальное уравнение в виде:

$$\delta X = -\left(\sum A' A\right)^{-1} \cdot \sum\left(A' L\right) \qquad (6)$$

так реализуют позиционные определения системы GPS.

Способы наблюдений GPS системой

Сложная структура сигнала, передаваемого от ИСЗ к приемнику, обусловила многообразие способов его обработки и наблюдений.

Кодовые наблюдения реализуются в самых простых по конструкции GPS-приемниках. Из принятого со спутника сигнала частоты L1 выделяется C/A-код (тогда

приемник называется одночастотным) или из частотных сигналов L1 и L2 выделяется Р-код (двухчастотный приемник). Производится сравнение соответствующего кода с эталонным кодом, который генерирует сам приемник. Точность определения координат при этом составляет:

- для одночастотного (L1) приемника - 100м;
- для двухчастотного (LI, L2) приемника - 16м.

Значения точностей приведены для неблагоприятного режима измерений, когда включен режим "ограниченного доступа" SA.

Фазовые наблюдения выполняются для повышения точности измерений. В этом случае при сравнении принятого со спутника сигнала и его эталона, генерируемого в приемнике, учитывается не только код, но и фаза несущей частоты (L1 или L2). Поскольку период несущей частоты в сотни (для Р-кода) и тысячи (для С/А-кода) раз меньше периодов кодовых последовательностей, точность процедуры сравнения значительно повышается, а, следовательно, возрастает точность измерения координат. Однако в этом случае возникает проблема целочисленной фазовой неоднозначности, поскольку отсутствует информация о количестве целых периодов информационного сигнала, укладывающихся на пути ИСЗ - приемник. Непосредственно можно измерить только дробную часть фазовой задержки сигнала (в пределах одного периода). Для решения этой проблемы используют несколько способов:

- классический двухэтапный метод измерений, который предполагает на первом этапе выполнение большого количества избыточных измерений, а на втором - статистический анализ полученных данных и определение наиболее вероятного значения фазовой неоднозначности;
- модификация классического метода, которая отличается тем, что при обработке результатов измерений производится многоэтапная калмановская фильтрация и выбирается группа фильтров Калмана с оптимальными свойствами;
- метод замены антенн, когда наблюдения выполняются двумя различными приемниками на двух пунктах в две различные эпохи. При измерениях во вторую эпоху производится замена антенн приемников;
- метод определения неоднозначности "в пути", когда для определения целого числа периодов используют линейные комбинации сигналов L1 и L2 (суммы и разности).
-

4. 2.1. 2. Источники ошибок

На точность определения координат существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Природа этих ошибок различна.

1. Неточное определение времени. При всей точности временных эталонов ИСЗ существует некоторая погрешность шкалы времени аппаратуры спутника. Она приводит к возникновению систематической- ошибки определения координат около 0.6 м.

2. Ошибки вычисления орбит. Появляются вследствие неточностей прогноза и расчета эфемерид спутников, выполняемых в аппаратуре приемника. Эта погрешность также носит систематический характер и приводит к ошибке измерения координат около 0.6 м.

3. Инструментальная ошибка приемника. Обусловлена, прежде всего, наличием шумов в электронном тракте приемника. Отношение сигнал/шум приемника определяет точность процедуры сравнения принятого от ИСЗ и опорного сигналов, т.е. погрешность вычисления псевдодальности. Наличие данной погрешности приводит к возникновению координатной ошибки порядка 1.2 м.

4. Многопутность распространения сигнала. Появляется в результате вторичных отражений сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника. При этом возникает явление интерференции, и измеренное расстояние оказывается больше действительного. Аналитически данную погрешность оценить достаточно трудно, а наилучшим способом борьбы с нею считается рациональное размещение антенны приемника относительно препятствий. В результате воздействия этого фактора ошибка определения псевдодальности может увеличиться на 2.0 м.

5. Ионосферные задержки сигнала. Ионосфера— это ионизированный атмосферный слой в диапазоне высот 50 - 500 км, который содержит свободные электроны. Наличие этих электронов вызывает задержку распространения сигнала спутника, которая прямо пропорциональна концентрации электронов и обратно пропорциональна квадрату частоты радиосигнала. Для компенсации возникающей при этом ошибки определения псевдодальности используется метод двухчастотных измерений на частотах L1 и L2 (в двухчастотных приемниках). Линейные комбинации двухчастотных измерений не содержат ионосферных погрешностей первого порядка. Кроме того, для частичной компенсации этой погрешности может быть использована модель коррекции, которая аналитически рассчитывается с использованием информации, содержащейся в навигационном сообщении. При этом величина остаточной немоделируемой ионосферной задержки может вызывать погрешность определения псевдодальности около 10 м.

6. Тропосферные задержки сигнала. Тропосфера - самый нижний от земной поверхности слой атмосферы (до высоты 8-13 км). Она также обуславливает задержку распространения радиосигнала от спутника. Величина задержки зависит от метеопараметров (давления, температуры, влажности), а также от высоты спутника над горизонтом. Компенсация тропосферных задержек производится путем расчета математической модели этого слоя атмосферы. Необходимые для этого коэффициенты содержатся в навигационном сообщении. Тропосферные задержки вызывают ошибки измерения псевдодальностей в 1 м.

7. Геометрическое расположение спутников. При вычислении суммарной ошибки необходимо еще учесть взаимное положение потребителя и спутников рабочего созвездия. Для этого вводится –специальный коэффициент геометрического ухудшения точности PDOP (Position Dilution Of Precision), на который необходимо умножить все перечисленные выше ошибки, чтобы получить результирующую ошибку. Величина коэффициента PDOP зависит от взаимного расположения спутников и приемника. Она обратно пропорциональна объему фигуры, которая будет образована, если провести единичные векторы от приемника к спутникам. Большое значение PDOP-говорит, о неудачном расположении ИСЗ и большой величине ошибки. Типичное среднее значение PDOP колеблется от 4 до 6.

4. 2.1. 3. Дифференциальный режим GPS (Относительные определения)

Наиболее эффективным средством исключения ошибок является дифференциальный способ наблюдений -DGPS (Differential GPS). Его суть состоит в выполнении измерений двумя приемниками: один устанавливается в определяемой точке, а другой - в точке с известными координатами - базовой (контрольной) станции.

Поскольку расстояние от ИСЗ до приемников значительно больше расстояния между самими приемниками, то считают, что условия приема сигналов обоими приемниками практически одинаковы. А, следовательно, величины ошибок также будут близки. В режиме DGPS измеряют не абсолютные координаты первого приемника, а его положение относительно базового (вектор базы). Использование дифференци-

ального режима позволяет практически полностью исключить влияние режима SA Selective Aviailability - выборочной доступности) и довести точность кодовых измерений до десятков сантиметров, а фазовых - до единиц миллиметров. Наилучшие показатели имеют фазовые двухчастотные приемники. Они отличаются от фазовых одночастотных более высокой точностью, более широким диапазоном измеряемых векторов баз и большей скоростью и устойчивостью измерений. Однако современные технологические достижения позволяют одночастотным фазовым приемникам по характеристикам приблизиться к двухчастотным.

Одной из особенностей режима DGPS является необходимость передачи дифференциальных поправок от базового приемника к определяемому. При этом различают два метода корректировки информации:

1. Метод коррекции координат, когда на станции и в определяемой точке наблюдают одни и те же ИСЗ, а затем в качестве дифференциальных поправок с базовой станции передают добавки к измеренным в определяемом пункте координатам. Недостатком этого метода является то, что приемники базового и определяемого пунктов должны работать по одному рабочему созвездию. Это неудобно, поскольку все потребители, использующие дифференциальные поправки должны работать по одним и тем же ИСЗ. В этом случае не обеспечивается наилучшее значение PDOP во всех определяемых пунктах.

2. Метод коррекции навигационных параметров, при использовании которого на базовой станции определяются поправки к измеряемым параметрам (например, псевдодальностям) для всех спутников, которые потенциально могут быть использованы потребителями. Эти поправки передаются на определяемые пункты, где уже непосредственно в GPS - приемнике вычисляются поправки к координатам. Недостатком этого метода является повышение сложности аппаратуры потребителей.

Метод DGPS может быть использован двояко. Если необходимо вычислять координаты в режиме реального времени, то необходим надежный радиоканал для передачи дифференциальных поправок, а в состав GPS -приемника должен входить радиомодем. Если же передача поправок не выполняется, то можно использовать режим постобработки. В этом случае результаты измерений обоих приемников записываются на устройства памяти приемников (например, магнитные карты), а после прекращения измерений накопленная информация обрабатывается специальным ПО и вычисляется точное значение вектора базы.

Статический метод (Static Positioning)

Название метода означает, что приемники не перемещаются в течение всего наблюдательного интервала. Базовый приемник и приемник с неизвестными координатами одновременно выполняют наблюдения и записывают данные в течение 15 минут - 3 часов. Такая длительность сессии вызвана необходимостью определения целочисленной неоднозначности фаз в начале сессии. Этому способствует и заметное изменение со временем конфигурации спутниковой системы. Одночастотные приемники используются для измерения баз длиной до 10-15 км, а двухчастотные - для баз длиннее 15 км (преимущества двухчастотных приемников заключаются в возможности адекватного моделирования эффекта воздействия ионосферы, а также меньшей продолжительности наблюдений для достижения заданной точности). После завершения сеансов наблюдений данные, полученные каждым приемником, собираются вместе, вводятся в компьютер и обрабатываются с помощью специальных программ с целью определения неизвестных координат пунктов.

Точность метода при использовании фазовых наблюдений:

I. для двухчастотных приемников:

A. в плане: 5 мм + 1 мм/км * D;

B. по высоте: 10 мм + 1 мм/км * D;

II. для одночастотных приемников:

A. в плане: 5 мм + 1 мм/км * D - (при D < 10 км);

5 мм + 2 мм/км * D - (при D > 10 км);

B. по высоте: 10 мм + 2 мм/км * D).

Данный метод используют для решения задач контроля национальных и континентальных геодезических сетей, мониторинга тектонических движений земной поверхности, наблюдения за состоянием дамб, фундаментов атомных электростанций и др. сооружений.

Псевдостатический метод (Pseudo-Static Positioning)

Отличается от статического тем, что обеспечивает более высокую производительность съемки за счет выполнения наблюдений в течение нескольких коротких сессий вместо одной длинной. Один приемник непрерывно наблюдает на базовом пункте. Перевозимый приемник после наблюдений в течение 5-10 минут на определяемом пункте выключается и перевозится на следующий определяемый пункт, где вновь включается на 5 -10 минут. Затем вновь выключается и перевозится на следующий пункт и т.д. Каждый определяемый пункт необходимо посетить еще раз на 5 минут через 1 час после первого посещения. Этот метод практически эквивалентен статическому, но вместо того, чтобы ожидать в течение 1 часа изменения конфигурации спутников, наблюдения проводятся в течение 5 минут, а следующие 5 минут наблюдаются одним часом позже, когда конфигурация существенно изменилась. Остающиеся 55 минут можно использовать для посещения дополнительных неизвестных пунктов. Точность получаемых результатов будет на уровне статического метода. Для наблюдений могут использоваться как одночастотные, так и двухчастотные приемники. Метод удобен, когда необходимо в течение короткого времени произвести точное измерение координат большого количества точек. Недостатком метода является необходимость точного планирования графика посещения пунктов.

Быстростатический метод (Rapid Static Positioning)

Этот метод был разработан в последние годы. Он позволил значительно увеличить производительность GPS съемки. Метод отличается от псевдостатического тем, что достаточно лишь одного посещения определяемых пунктов (в течение 5-10 минут - в зависимости от расстояния между опорным и определяемым пунктами). Поначалу, на этапе появления данного метода, для наблюдений подходили лишь двухчастотные Р- кодовые приемники. В настоящее время некоторые одночастотные приемники можно также использовать в быстростатическом режиме.

Кинематический метод "стой-иди" (Stop-and-Go Kinematic Positioning)

Метод позволяет получить положения пунктов так же быстро, как и в случае использования электронного тахеометра при решении топографических задач. Метод требует выполнения короткой процедуры инициализации с целью определения целочисленных неоднозначностей фаз. После этого опорный приемник продолжает непрерывно наблюдать на пункте с известными координатами, второй приемник перевозится (во

включенном состоянии) на первый определяемый пункт, где вновь наблюдает 1 минуту. Затем он посещает все остальные определяемые пункты (лишь по одному разу).

Наиболее распространенными являются следующие процедуры инициализации:

• обмен антеннами, когда второй приемник находится на "пункте обмена" (знание его координат не обязательно), выбранном на расстоянии не более 10 м от опорного, выполняется наблюдение 4-8 эпох, затем приемники переставляются (без выключения), меняясь антеннами и наблюдают 4-8 эпох (до нескольких минут), а после происходит обратная процедура обмена антеннами и выполнение наблюдений для 4-8 эпох;

• стояние второго приемника в течение 1 минуты на втором пункте с известными координатами, причем этот второй пункт может быть на расстоянии не более 10 км от опорного пункта;

• статический метод, когда определяемый пункт выбирается на расстоянии не более 10 км от опорного пункта, а сеанс наблюдений имеет продолжительность не менее 30 минут.

Недостаток метода состоит в необходимости непрерывного (и даже во время движения) наблюдения не менее 4 спутников одновременно. Если число наблюдаемых спутников падает до трех хотя бы на миг, необходимо вернуться на последний успешно посещенный определяемый пункт или вновь провести процедуру инициализации. Во избежание этого лучше всего обеспечить возможность наблюдения одновременно пяти или более спутников.

Точность метода при использовании фазовых наблюдений:

I. для двухчастотных приемников (5 спутников и две эпохи (2 сек) наблюдений):

A. в плане: 20 мм + 1 мм/км * D;

B. по высоте: 20 мм + 2 мм/км * D;

II. для одночастотных приемников:

A. в плане: 20 мм + 2 мм/км * D;

B. по высоте: 20 мм + 2 мм/км * D.

Метод эффективен при выполнении топографической съемки, когда за короткое время необходимо определить координаты большого числа точек, при построении цифровых моделей рельефа, определении местоположения объектов местности, имеющих форму ломаной линии (трубопроводы, дороги и пр.).

Кинематический метод со статической инициализацией (Kinematic with Static Initialization)

Метод очень похож на предыдущий. Точно так же на базовом пункте с известными координатами производится процедура инициализации, затем подвижный приемник перемещается в начальную точку маршрута движения и производит там наблюдения в течение нескольких минут. Далее подвижная платформа с приемником начинает движение по маршруту. GPS - измерения выполняются непрерывно во время движения с интервалом 1 сек. Точностные параметры метода те же, что и у "Stop-and-Go". Чаще всего применяется для получения координат линейных объектов типа дорог, рек и т.д.

Кинематический метод с инициализацией "на ходу" (Kinematic with On - the Fly Initialization)

Данный метод не требует для инициализации размещения подвижного приемника на базовой станции - эта процедура выполняется непосредственно при движении транспортного средства по маршруту. Кроме того, если по какой- либо причине произошел срыв наблюдений (например, из-за проезда под железнодорожным мостом), процесс инициализации производится вновь без остановки движения. Точностные параметры и сферы использования метода не отличаются от других кинематических методов.

4. 2. 1. 4. Методы преобразования координатных систем, характерные для спутниковой GPS технологии, и используемые при этом параметры перехода

Различают два типа преобразования координат из одной системы в другую:

-преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием точно определенныхпараметров перехода;

-преобразование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координатыкоторых известных в двух системах.

При этом различают трехмерные, двухмерные и одномерные методы преобразования (трансформирования).

Преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа по достаточно строгим формулам с использованием точно определенных параметров перехода является достаточно простой задачей для трехмерных координатных систем ПЗ-90 и СК-42 и связанных с ними двухмерных топоцентрических систем (Государственная система координат, местные системы координат), а также для трехмерных систем WGS-72 и WGS-84 и связанных с ними двухмерных топоцентрических систем (NAD-87 и других). Параметры связи некоторых координатных систем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры преобразования	Системы координат			
	СК-42 ПЗ-90	WGS-72 WGS-84	СК-42* WGS-84	ПЗ-90* WGS-84
$\Delta X, м$	+25	0	+25	0
$\Delta У, м$	-141	0	-141	0
$\Delta Z, м$	-80	+4.5	-78.5	+1.5
$m' \cdot 10^{-6}$	0	+0.227	0	0
ω_x	0″	0″	0″	0″
ω_y	-0.35″	0″	-0.35″	0″
ω_z	-0.66″	-0.554″	-0.736″	-0.076″

* данные приближенные

Все сказанное справедливо, кроме случая связи систем координат ПЗ-90 и WGS-84 - базовых для национальных космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Параметры связи между ними даны в таблице приближенно. Поскольку международное сотрудничество идет по линии использования навигационных систем независимо от национальной принадлежности, нужна точная связь между двумя координатными системами, чтобы в полной мере воспользоваться их возможностями. В настоящее время в России и за рубежом ведутся разработки навигационных и геодезических приемни-

ков, работающих по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS. Известно, что для решения координатной задачи минимальное число спутников должно быть равно четырем. Из-за отсутствия связи между системами координат потребитель вынужден вести прием сигналов четырех спутников ГЛОНАСС и четырех спутников GPS, получая два не связанных между собой результата. В случае отсутствия четырех спутников в любой из систем получается всего одно решение, а три спутника другой системы не могут использоваться даже для уточнения определений. Таким образом интегрированная система на базе спутников ГЛОНАСС и GPS в ближайшее время вряд ли будет создана. Более того российский потребитель, используя систему GPS, не может получить координаты в системе СК-42 без обязательной привязки к исходным пунктам, имеющим такие координаты. Аналогичные проблемы появятся у американского потребителя с системой ГЛОНАСС и национальной системой координат NAD-83.

Преобразование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является сегодня наиболее распространенным на практике способом преобразования координат. При этом также различают трехмерные, двухмерные и одномерные методы преобразования (трансформирования).

Рассмотрим более подробно трехмерное трансформирование. Параметры трансформирования могут быть определены из решения системы уравнений, которая может быть представлена в следующем виде:

$$\overline{X'} = \overline{X} + \overline{\Delta X'} + mR\overline{X} \quad . \tag{7}$$

Так как каждая точка, заданная в системах координат X и X', позволяет получить три уравнения, то три точки, координаты которых известны в обеих системах, позволяют получить семь параметров перехода ΔX, ΔY, ΔZ, $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$,m. Используя для обозначения приближенных значений параметров перехода $\overline{\Delta X_0}, m_0, \overline{R_0}$, можно представить окончательные значения параметров в следующем виде:

$$\begin{gathered} \overline{\Delta X} = \overline{\Delta X}_0 + d\overline{\Delta X}; \\ m = m_0 + dm; \\ \overline{R} = \overline{R}_0 + d\overline{R}. \end{gathered} \tag{8}$$

При этом линеаризованная модель преобразования координат для одной точки может быть представлена в следующем виде:

$$\overline{X} = \overline{\Delta X}_{0i} + \overline{A}_i d\overline{P}, \tag{9}$$

где $\overline{X_{0i}} = m_0 \overline{R}_0 \overline{X}_i + \overline{\Delta X}_0$ (10)

Матрица проектирования $\overline{A_i}$ и параметрический вектор $d\overline{P}$ определяются следующими соотношениями:

$$\overline{A_i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{0i} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{0i} - \Delta Z_0 & Y_{0i} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{0i} - \Delta Y_0 & Z_{0i} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{0i} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{0i} - \Delta Z & -Y_{0i} - \Delta Y_0 & X_{0i} - \Delta X_0 & 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$d\overline{P} = (dX \quad dY \quad dZ \quad d\omega_X \quad d\omega_Y \quad d\omega_Z \quad dm)^T .$$

При подстановке в уравнение (9) значений из уравнений (10) и (11) получаем систему линейных уравнений для одной точки /. Для n точек матрица проектирования будет иметь вид:

$$\overline{A} = \begin{pmatrix} \overline{A_1} \\ \overline{A_2} \\ \vdots \\ \overline{A_n} \end{pmatrix}. \qquad (12)$$

Для трех точек, координаты которых известны в обеих системах, матрица проектирования может быть представлена следующим выражением:

$$\overline{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{01} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{01} - \Delta Z_0 & Y_{01} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{01} - \Delta Y_0 & Z_{01} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{01} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{01} - \Delta Z_0 & -Y_{01} - \Delta Y_0 & X_{01} - \Delta X_0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & X_{02} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{02} - \Delta Z_0 & Y_{02} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{02} - \Delta Y_0 & Z_{02} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{02} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{02} - \Delta Z_0 & -Y_{02} - \Delta Y_0 & X_{02} - \Delta X_0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & X_{03} - \Delta X_0 & 0 & -Z_{03} - \Delta Z_0 & Y_{03} - \Delta Y_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{03} - \Delta Y_0 & Z_{03} - \Delta Z_0 & 0 & -X_{03} - \Delta X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{03} - \Delta Z_0 & -Y_{03} - \Delta Y_0 & X_{03} - \Delta X_0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (13)$$

Двухмерное трансформирование (преобразование одной плоской координатной системы в другую подобную координатную систему) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является частным случаем трехмерного трансформирования, но одновременно с этим наиболее массовой геодезической задачей как в классической, так и в спутниковой геодезии. Преобразование координат в данном случае представляется в виде поворота и переноса начала координат (рис. 3).

Общее уравнение преобразования имеет вид:

$$X_1 = X_0 + mX\cos\alpha - mY\sin\alpha;.$$

$$Y_1 = Y_0 + mX\cos\alpha + mY\sin\alpha. \qquad (14)$$

При этом используются четыре параметра преобразования X_0, $У_0, \alpha, m$.

Для определения этих четырех параметров достаточно иметь две точки, координаты которых известны в двух системах. Используя вспомогательные параметры P и Q равные:

$$P = m\cos\alpha; \qquad Q = m\sin\alpha \qquad (15)$$

Уравнения (14) можно записать в следующем виде:

$$X_1 = X_0 + PX - QY; \qquad Y_1 = Y_0 + QX - PY. \qquad (15а)$$

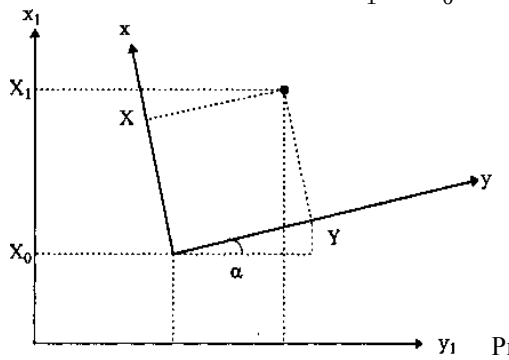


Рис. 3 Двухмерное преобразование координатных систем

При наличии двух точек система уравнений решается по методу наименьших квадратов для определения параметров X_0 и Y_Q, а также вспомогательных параметров P и Q. Затем вычисляются параметры преобразования α и m по формулам:

$$m = \sqrt{P^2 + Q^2}; \qquad tg\alpha = \frac{Q}{P}. \qquad (16)$$

Комбинированное трансформирование (преобразование пространственной координатной системы в другую плоскую координатную систему) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия также является частным случаем трехмерного трансформирования и также наиболее массовой геодезической задачей в спутниковой геодезии.

Наиболее критичным и одновременно наиболее спорным параметром в двухмерном и комбинированном трансформировании является масштабный коэффициент. С одной стороны, спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС являются высокоточными дальномерными системами и введение любого масштабного коэффициента в результаты их измерений недопустимо. С другой стороны, классические геодезические построения выполнены как правило с высокой метрологической точностью, которая обеспечивалась и обеспечивается в настоящее время достаточно надежной системой технологических приемов и контролей, что также делает весьма проблематичным использование любых масштабных коэффициентов. И, наконец, с третьей стороны, формальное трансформирование на основе теории подобия прямоугольной системы координат (пространственной или плоской) в другую прямоугольную систему, созданную на основе одной из классических проекций (UTM, Гаусса-Крюгера или др.) для линейных объектов длиной порядка десятков км или площадных объектов таких же размеров, особенно протяженных вдоль параллели, могут привести к методическим погрешностям трансформирования, превосходящим и точность спутниковых измерений и точность ранее созданных классических геодезических построений (рис.4).

Одномерное трансформирование (преобразование одной координаты в другую подобную координату) с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах, на основе теории подобия является частным случаем трех- и двухмерного трансформирования, и достаточно распространенной геодезической задачей как в классической, так и в спутниковой геодезии. Преобразование в данном случае представляется в виде трансформирования высот и трансформировании базисных линий. Трансформирование высот будет рассмотрено в следующем подразделе. Задача трансформирования базисных линий может быть решена достаточно строго на основе знания точного значения длины базисной линии, измеренной спутниковой системой на физической поверхности Земли, точных параметров системы координат, в которую трансформируется базисная линия, и приближенных координат концов линии в этой системе координат, определенных одним из вышерассмотренных методов.

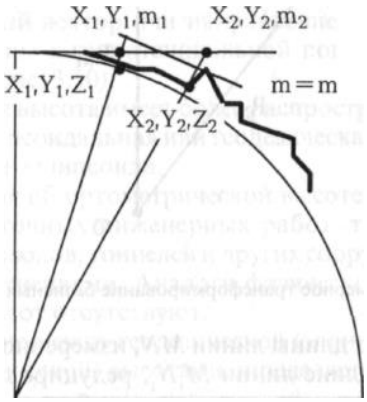


Рис. 4. Искажения из-за методических некорректностей трансформирования

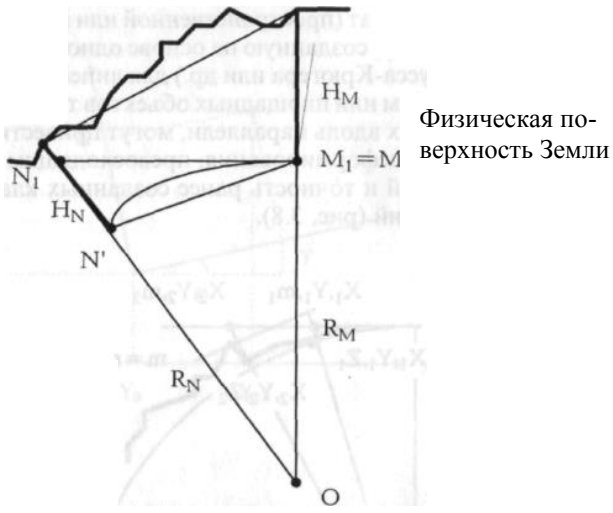


Рис. 5. Одномерное трансформирование базисных линий

Так, например, при одномерном трансформировании линий, измеренных системой GPS, в систему координат СК-42 решается классическая редукционная задача высшей геодезии (рис. 5).

При этом переход от длины линии MN, измеренной на физической поверхности Земли к длине линии M_1 N_1, редуцированной в систему координат СК-42, осуществляется тремя преобразованиями:

1) введение поправок за наклон линии, например, по формуле

$\Delta D_h = -\frac{h^2}{2D} - \frac{h^4}{8D^3}$, где $h=H_M - H_N$, D - длина линии между точками M и N;

2) редуцирование на поверхность референц-эллипсоида по формуле $\Delta D_R = -\frac{H_m}{R} D + \frac{H_m^2}{R^2} D + \frac{D^3}{24R^2}$, где - $H_m = (H_M - H_N)/2, R$ - радиус кривизны нормального сечения между точками M и N;

3) редуцирование с поверхности референц-эллипсоида на плоскость СК-42 по формуле $\Delta D_{42} = \frac{y_m^2}{2R_S} D + \frac{y_m^4}{24R_S^4} D + \frac{\Delta y^2}{24R_S^2}$,

где $y_m = (y_M + y_N)/2, \Delta y = y_M - y_N$.

4. 2.1. 5. Специфика редуцирования результатов спутниковых измерений при внецентренной установке приемников

Спутниковая геодезическая сеть, создаваемая с использованием спутниковых приемников без привязки к исходным пунктам местной системы координат, может быть создана в кратчайшие сроки. Такая сеть обеспечивает высокую точность сохранения параметров ориентации и масштабирования на больших площадях. Но для создания точной геодезической основы для использования в самых разных областях народного хозяйства необходимо совместно использовать результаты спутниковых и наземных геодезических измерений. Для строгого объединения результатов построения спутниковой и наземной геодезической сетей необходимо совмещать при измерениях пункты спутниковой сети с пунктами наземной сети, а затем при обработке выполнять совместное уравнивание объединенной сети, преследуя цель не только достижения высокой точности уравненных координат, но и сохранения местной системы коорди-

нат, используемой для картографических, разбивочных, изыскательских и других работ.

Поскольку условия выбора местоположения пунктов наземной сети и пунктов спутниковой сети существенно отличаются, то в ряде случаев возникает необходимость привязки спутниковых измерений к пунктам наземной сети при внецентренной установке спутникового приемника. При этом возможны два пути решения:

- снесение координат пункта наземной сети на рабочий центр - место установки спутникового приемника;
- передача пространственных координат, определенных спутниковой системой, на пункт наземной сети.

Первый способ неоднократно рассмотрен в геодезической литературе и будет изложен конспективно. При этом следует выделить два варианта: с возможностью установки на пункте наземной сети традиционных геодезических приборов (теодолита, свегодальномера) и при недоступности пункта наземной сети.

Рис. 6. Схема снесения координат пункта наземной сети на рабочий центр спутникового приемника способом полярной засечки

Так, например, для снесения координат пункта наземной сети Л на рабочий центр Р - место установки спутникового приемника способом полярной засечки (рис. 6) - измеряют горизонтальный угол β_1, и линию S_1.

Координаты точки Р вычисляются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} X_P &= X_T + S\cos\alpha; \\ Y_P &= Y_T + S\sin\alpha; \\ \alpha &= \alpha_0 + \beta_1. \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Измерения на пункте В выполняют для контроля.

При недоступности пункта наземной сети для снесения координат способом прямой угловой засечки (рис. 7) в точке Р разбивают два базиса $P1 = b_1, P2 = b_2$, а затем измеряют горизонтальные углы $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$.

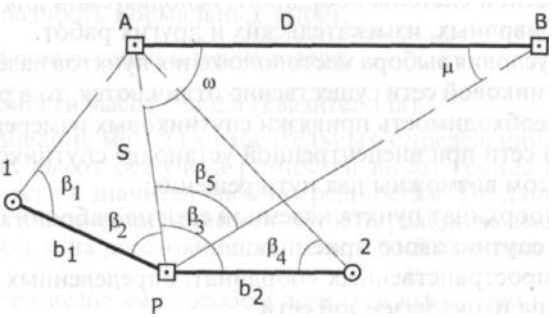


Рис. 7 Схема снесения координат пункта наземной сети на рабочий центр спутникового приемника способом прямой угловой засечки

По результатам измерений вычисляем линейный S и угловой а элементы редукции:

$$\left.\begin{aligned} S = b_1 \frac{\sin\beta_1}{\sin(\beta_1+\beta_2)} = b_2 \frac{\sin\beta_4}{\sin(\beta_3+\beta_4)}; \\ \sin\mu = \frac{S}{D}\sin\beta_5; \omega = 180^\circ - (\beta_5+\mu); \alpha = \alpha_0 + \omega, \end{aligned}\right\} \quad (18)$$

где D - длина опорной стороны между пунктами наземной сети АВ, ω - примычный угол; α_0 - дирекционный угол опорной стороны.

Координаты точки Р вычисляются по формулам:

$$X_P = X_T + S\cos\alpha; \qquad Y_P = Y_T + S\sin\alpha; \quad (19)$$

Передача пространственных координат, определенных спутниковой системой, на пункт наземной сети может быть выполнена двумя способами:

- вычисление пространственных координат пункта наземной сети по пространственным координатам пункта спутниковой сети, элементам редукции (непосредственно измеренным или определенным по формуле (18)) и параметрам связи пространственной и топоцентрической систем координат (17.а, 21. подраздела 8. 1.);
- вычисление пространственных координат пункта наземной сети по спутниковым измерениям на вспомогательных точках.

Для вычисления пространственных координат пункта наземной сети А по спутниковым измерениям на вспомогательных точках P_1, P_2 (рис. 8) разбивают створ P_1, P_2, А, а затем выполняют спутниковые измерения на вспомогательных точках P_1, P_2 и измеряют рулеткой или светодальномером расстояния $P_1 P_2 = b_1$, и $P_2 A = b_2$.

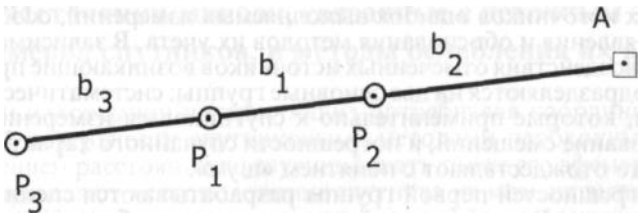


Рис. 8. Схема определения пространственных координат пункта наземной сети по спутниковым измерениям на вспомогательных точках

По результатам измерений определяют приращения пространственных координат между вспомогательными точками P_1 и P_2:

$$\left.\begin{aligned} \Delta X = X_{P2} - X_{P1} \\ \Delta Y = \Delta Y_{P2} - Y_{P1} \\ \Delta Z = Z_{P2} - Z_{P1} \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Координаты точки А вычисляются по формулам:

$$X_A = X_{P1} + \Delta X \frac{b_1+b_2}{b_1}; \quad Y_A = Y_{P1} + \Delta Y \frac{b_1+b_2}{b_1};$$

$$Z_A = Z_{P1} + \Delta Z \frac{b_1 + b_2}{b_1} \qquad (21)$$

Спутниковые измерения на вспомогательной точке P_3 и измерение расстояния $P_1P_3 = b_3$ выполняют для контроля.

4.2.1 6. Особенности современных программ обработки спутниковых измерений

Первичная обработка спутниковых измерений, производимая в приемнике

В процессе проведения спутниковых наблюдений в приемном устройстве производится не только регистрация отсчетов измеряемых величин, но и их первичная обработка. Такая необходимость возникает не только при использовании кинематического режима, когда координаты движущегося объекта должны вычисляться в реальном масштабе времени, т. е. непосредственно в приемнике, но и при статических режимах работы с целью не только формирования компактного, сглаженного массива данных, предназначенных для последующей обработки, но и для получения текущей информации, отображаемой на экране дисплея приемного устройства, на основе которой оператор может следить за процессом выполняемых измерений, а в случае необходимости и корректировать этот процесс.

С учетом вышеизложенного неотъемлемой частью спутниковых GPS приемников является процессорный блок, который не только управляет по заданной программе режимом работы приемника, но и выполняет первичную обработку результатов измерений. При этом обработке подвергается как информация, передаваемая в составе навигационного сообщения, так и результаты измерений, используемые для вычисления псевдодальностей на основе кодовых сигналов и точных значений расстояний между спутником и приемником, базирующихся на фазовых измерениях несущих колебаний.

При обработке передаваемого со спутника навигационного сообщения производится его декодирование, т. е. восстановление информации о текущих эфемеридах спутника, о поправках к показаниям его часов, об ионосферных поправках, об альманахе и о других вспомогательных показателях. Эта информация используется как для формирования файла навигационного сообщения, используемого в дальнейшем при камеральной обработке (пост-обработке), так и для оперативной корректировки показаний часов приемника и для вычисления целого ряда параметров, отображаемых на экране дисплея приемника (приближенные координаты точки стояния, номера наблюдаемых спутников и их расположение на небосводе, геометрический фактор и т. д.).

В процессе предварительной обработки, производимой в приемнике, вычисляются также значения псевдодальностей на основе определения времени прохождения кодовыми сигналами расстояний между спутником и приемником. При этом основным источником ошибок, обуславливающим недопустимо большие уклонения в значениях измеряемых расстояний, является сравнительно низкая стабильность частоты опорных кварцевых генераторов, характеризуемая относительной погрешностью на уровне около $1 \cdot 10^9$.

Для минимизации отмеченного влияния используется более стабильное опорное время, передаваемое со спутника в момент начального захвата приемником излучаемых спутником радиосигналов, которое получило название времени GPS. При этом основная проблема решения такой задачи связана с необходимостью введения в это

опорное время задержки во времени, возникающей на участке прохождения сигналом расстояния между спутником и приемником. С этой целью учитывается тот факт, что отмеченные временные задержки для используемых орбит заключены в диапазоне от 65 до 85 мсек. За счет комбинирования псевдодалыюмерных измерений при многократном использовании спутников удается уточнить значение времени GPS, относящееся к приемнику. При этом остаются только те ошибки в измерении расстояний, которые характерны для конкретно определяемого значения псевдодальности. Без учета действующего в системе GPS "искусственного зашумления" такая погрешность применительно к С/А-коду оценивается величиной около 15 м.

Вычисляемые на стадии предварительной обработки значения псевдодальностей вводятся в состав файла наблюдаемых данных, используемого при проведении постобработки. Кроме того на их основе с применением получаемых из навигационного сообщения эфемерид спутников вычисляются координаты точки стояния приемника на навигационном уровне точности (т. е. с погрешностью в несколько десятков метров).

При выполнении фазовых измерений одно- или двухчастотными приемниками отсчеты в долях фазового цикла производятся на одной или двух несущих частотах с интервалами, исчисляемыми десятыми долями секунды. В результате при проведении сеансов наблюдений, длительность которых может достигать нескольких часов (а иногда и суток) накапливается огромный массив данных, для запоминания которого требуются устройства памяти чрезвычайно большой емкости. Для преодоления таких технических трудностей непосредственно в приемнике производится уплотнение регистрируемых данных. Такой процесс часто называют также компрессией. В процессе его реализации вычисляются осредненные значения производимых выборок с интервалами, задаваемыми оператором на стадии подготовки приемника к наблюдениям. Как уже отмечалось, такой интервал чаще всего выбирается равным 10-15 с.

Наряду с уплотнением непосредственно в приемнике осуществляется фильтрация данных на основе использования фильтра Калмана. В результате такой фильтрации устраняются отсчеты с недопустимо большими уклонениями. Кроме того, при такой процедуре удается ликвидировать отдельные пропуски циклов, обусловленные невозможностью приема в отдельные моменты времени сигналов от спутников по тем или иным причинам.

При автоматическом режиме обработки данных в приемнике должны выполняться следующие условия.

1) Уход показаний часов приемника от упомянутого выше времени GPS не должен превышать одной микросекунды. При соблюдении такого условия удается откорректировать уход показаний часов приемника на основе принимаемого от спутника более точного времени GPS с погрешностью в несколько сотен наносекунд. Отмеченная процедура получила название "восстановления" времени.

2) Для вычисления в дальнейшем на следующей стадии обработки верных значений базисных линий расхождения в показаниях часов двух взаимодействующих приемников не должны превышать одной микросекунды. При выполнении этого условия ошибки из-за несинхронности используемых показаний часов приемников оцениваются величинами не более 2 мм, т. е. находятся на уровне влияния шумов.

3) На стадии первичной обработки должны быть выявлены и устранены пропуски полуциклов, обусловленные несовершенством работы электронных узлов приемника (в частности, отслеживающих цепочек обратной связи).

4)Получаемые непосредственно в приемнике на основе кодовых сигналов значения псевдодальностей, относящиеся к одной эпохе, но к различным несущим частотам, должны быть согласованы между собой.

5)При переходах от одной эпохи к другой закономерности изменения определяемых псевдодальностей должны носить сглаженный характер.

Обработанная в приемнике информация используется для формирования файла наблюдаемых данных, а также файла навигационного сообщения, на основе которых производится дальнейшая обработка. Наиболее наглядную структуру такие файлы имеют при отображении их в формате RINEX.

Каждый из файлов состоит из заголовка и основного массива записанных данных.

В заголовке к файлу результатов наблюдений содержится следующая основная информация:

- версия формата и показатели, идентифицирующие файл;
- дата и время начала сеанса наблюдений;
- условное название пункта;
- информация о наблюдателе и его организации;
- тип приемника и антенны;
- приближенные координаты пункта в системе WGS-84;
- величины, характеризующие вынос фазового центра относительно закрепленной на местности марки;
- система отсчета фазовых измерений (в циклах или полуциклах);
- номера спутников, содержащихся в файле;
- вид наблюдений (кодовые или фазовые наблюдения, к какому коду, и к какой несущей частоте они относятся);
- время записи первого наблюдения, а также некоторая другая вспомогательная информация.

Следующий за заголовком массив записанных данных в рассматриваемый файл данных включает в себя:

- данные, характеризующие эпоху наблюдений (год, месяц, число, а также часы, минуты, секунды);
- количество спутников в записанной эпохе и их номера;
- уход показаний часов приемника (в секундах);
- значения определенных псевдодальностей с использованием C/A -кода и P -кода (в метрах);
- результаты фазовых измерений (для эпохи, начиная со второй приводятся приращения фазы относительно предыдущей эпохи в долях циклах с соответствующим знаком).

В другом файле, получившем название файла навигационного сообщения, приводятся версия формата и идентификация файла, дата и время начала наблюдений, значения коэффициентов к ионосферной модели, поправки к показаниям часов на спутнике, а также записи, относящиеся к каждой эпохе и содержащие точное время GPS, соответствующее моменту посылки со спутника данного сообщениями значения целого ряда поправок для вычисления эфемерид возмущенной орбиты спутника в заданный момент времени.

Предварительная обработка спутниковых измерений, производимая после окончания измерений

Большинство современных программ камеральной обработки спутниковых измерений (пост-обработки) разделяются по методу обработки:

- вычисления отдельных линий;
- многоточечные решения.

Метод вычисления отдельных линий является в настоящее время наиболее распространенным и его в любом случае целесообразно использовать при выполнении предварительной обработки даже если программный пакет позволяет реализовать многоточечные решения. Преимущества метода отдельных линий при выполнении предварительной обработки связаны с наличием на этой стадии обработки достаточно большого числа ошибок в данных и в случае многоточечного решения локализовать и устранить их достаточно сложно.

Программное обеспечение, рассчитанное на обработку отдельных линий, обеспечивает лучший контроль и локализацию некачественных линий и точек. Некачественные точки могут быть локализованы по оценке точности линий, сходящихся в этой точке. Как правило, точность таких линий существенно ниже средней на данном объекте. Другим методом контроля, позволяющим локализовать некачественные линии, является контроль по замкнутым построениям - треугольникам, векторным ходам. Если сумма приращений координат по замкнутому векторному ходу соответствует паспортной точности прибора, то линии, входящие в это построение, являются качественными. Общий алгоритм обработки для метода отдельных линий представлен на рис. 9.

В последнее время практически все фирмы-изготовители спутниковых приемников поставляют программное обеспечение, реализующее оба метода обработки. Но эти программы имеют ограничения и ориентированы, как правило, на стандартные условия измерений и вычислений для максимальной автоматизации процесса обработки и снижения требований к квалификации исполнителя. Так, например, большинство таких программ при реализации метода отдельных линий накладывают ограничения на длину линии, а при реализации многоточечного решения, как правило, накладывают ограничения на число одновременно обрабатываемых точек и продолжительность периода измерений.

Для устранения этих ограничений используются процедуры совместного уравнивания отдельных линий, объединенных в общую сеть или отдельных блоков многоточечного решения, объединенных на общем объекте.

Важным этапом предварительной обработки является получение результатов в формате, пригодном для окончательной обработки. Несмотря на то, что данные практически любой программы могут быть представлены в текстовом формате ASCII, их организация существенно различается в зависимости и от фирмы-изготовителя и даже от конкретного типа приемника. Попытка стандартизации результатов измерений привела к созданию независимого формата обмена данными между различными типами приемников. Этот формат, получивший название RINEX, состоит из трех файлов текстового формата ASCII:

- файл данных, полученных при измерениях, и содержащий дальномерные данные;
- файл с метеорологическими данными;
- файл, содержащий навигационное сообщение

Общая структура формата RINEX приведена на рис. 10. Файлы имеют различную длину, максимальное значение равно 80 символам в строке. Каждый файл содержит секцию заголовков и секцию данных. Файл навигационного сообщения распола-

гается независимо, в то время как файлы измерений и метеорологических данных должны быть созданы для каждого используемого при наблюдениях пункта.

Окончательная обработка в зависимости от точности и размеров геодезической сети, созданной спутниковыми методами может выполняться одним из рассмотренных выше методов:

- вычисления отдельных линий;
- многоточечные решения.

При выполнении окончательной обработки необходимо учитывать следующие соображения. Если данные фазовых измерений и первых разностей являются слабокоррелированными между собой, то вторые и третьи разности являются коррелированными соотношениями и учет этих зависимостей является одной из серьезных проблем окончательной обработки.

При спутниковых определениях в общем случае имеются две группы корреляций:

- физические корреляции;
- математические корреляции.

Рис. 9. Общий алгоритм вычисления отдельной линии

Файл данных об измерениях	Файл метрологических данных	Файл навигационного сообщения
Заголовок	Заголовок	Заголовок
Пункт	Пункт	Примечания
Исполнители	Тип наблюдений	
Оборудование	Примечания	
Редукции		
Типы наблюдений		
Примечания		
Данные	Данные	Данные
Эпохи	Эпохи	Эпохи
Спутники	Измерения	Параметры показаний часов спутников
Измерения		Ионосферные поправки
Признаки		Признаки

Рис. 10 Общая структура формата RINEX

Фазы сигналов $\Phi_A^j(t)$ и $\Phi_B^j(t)$ одновременно поступающих от одного спутника J на входы двух приемников, установленных на двух пунктах A и B, физически между собой взаимосвязаны, так как они относятся к одному спутнику и практически одинаковым атмосферным условиям. Поскольку физическая корреляция имеет значение на несколько порядков меньшее, чем математическая, вводимая через разности, то наибольший интерес представляет анализ способов устранения именно математической корреляции.

Учет корреляций для вторых разностей может быть осуществлен сравнительно легко. Так, например, вторые разности могут быть легко декоррелированы при использовании процедуры ортонормализации. Учет корреляции в третьих разностях оказывается более сложной процедурой.

Для сетевого метода наблюдений использование метода первых разностей обычно подразумевает последовательное вычисление одной за другой базисных линий для всех возможных комбинаций. Так если в сети выполнены измерения на n пунктах, то число базисных линий N можно определить по формуле:

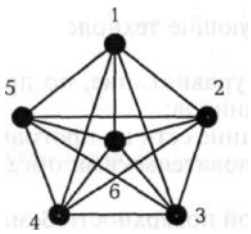
$$N = \frac{n(n-1)}{2}. \qquad (22)$$

При этом следует отметить, что только $(n-1)$ из них являются независимыми.

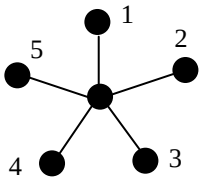
На практике применяются три варианта окончательной обработки:

- обработка всех возможных комбинаций отдельных линий;
- обработка только независимых линий;
- комбинированный вариант, в котором используется число линий большее, чем во втором варианте, или при использовании результатов более, чем одного сеанса измерений.

На рис. 11. приведены примеры всех трех вариантов для локальной сети из 6 пунктов.

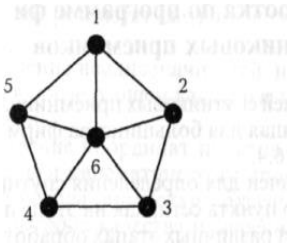


Первый вариант:
6 пунктов, 6 приемников



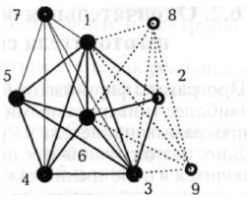
Второй вариант:
6 пунктов, 6 приемников

1 сеанс, 15 линий



Третий вариант:
6 пунктов, 6 приемников
1 сеанс, 10 линий

1 сеанс, 5 линий



Третий вариант:
6 пунктов, 6 приемников
2 сеанса, (1-пункты 1, 2, 3, 6, 8, 9;
2- пункты 1, 3, 4, 5, 6, 7), 13 линий

Рис. 11 Варианты окончательной обработки локальной сети из 6 пунктов

Основным недостатком метода вычисления отдельных линий является достаточно большая корреляция линий одного сеанса измерений. Метод многоточечного решения позволяет учитывать такую корреляцию особенно в одноранговых сетях с единой программой измерений на каждом пункте.

Программа обработки для метода отдельных линий существенно проще, но общее время последовательной обработки всех линий сравнимо с временем многоточечного решения, особенно для локальных сетей из нескольких десятков пунктов.

Некачественные измерения на отдельных точках и линиях гораздо легче локализуются и устраняются в методе отдельных линий, но при многоточечном решении гораздо легче выявляются и устраняются пропуски циклов.

Исходя из вышеизложенного, нельзя отдать преимущество ни одному из методов и на практике применяются оба метода или их комбинации. Небольшие сети со сторонами до 20 км легко обрабатываются по программам фирм-изготовителей приемников. Даже небольшие сети с достаточно большими длинами линий до 100 и более километров лучше обрабатывать по специальным программам. И наконец, сети, состоящие из сотен пунктов, созданные за достаточно большие интервалы времени, целесообразно обрабатывать, комбинируя программы и методы обработки.

На практике нашли применение следующие технологические схемы:

- окончательная обработка, включая уравнивание, по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников;
- окончательная обработка и уравнивание сети по программе, разработанной независимыми научно-исследовательскими организациями;
- вычисление длин линий на физической поверхности Земли по одной из вышеперечисленных программ, а затем редуцирование этих длинна нужную поверхность относимости и уравнивание сети трилатерации по известным программам.

Окончательная обработка по программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников

Программы фирм-изготовителей спутниковых приемников являются наиболее универсальными. Общая для большинства фирм структура программы приведена на рис. 12.

Блок планирования предназначен для определения спутников, находящихся в поле зрения каждого пункта сети, как на этапе подготовки к полевым измерениям, так

и на различных этапах обработки и анализа результатов измерений. Кроме таблицы видимости, включающей в себя местоположения спутников в течение всего периода работ на объекте, как правило, создаются полярные диаграммы видимости неба с нанесенными траекториями движения спутников. И в таблице и на диаграмме отображаются зоны экранировки различными предметами. Блок планирования предназначен также для определения и анализа геометрии расположения спутников. Для этого определяется таблица и график значения DOP, по которому планируются периоды благоприятные для работы.

Блок передачи данных предназначен для преобразования данных из компактного формата, используемого в приемниках, в текстовый типа ASCII. Кроме того этот блок предназначен для компоновки данных разных приемников, участвующих в измерениях, в соответствии с выбранной технологией обработки.

Блок предварительной обработки предназначен для преобразования данных в обменный формат RINEX, объединения точных эфемерид с полевыми данными, обработки кодовых данных для получения предварительных координат точек, обработки фазовых измерений, анализа полевых данных и моделирования атмосферы. Данный блок, как правило, реализует следующие вычислительные и контрольные операции:

-разрешение неоднозначностей, на первом этапе как реальные величины, а в последующем как целые числа с уточнением их различными методами;

-вычисление координат пунктов (векторов базисных линий) для статического и кинематического способов измерений, при этом доступны оба метода обработки - отдельных линий и многоточечный.

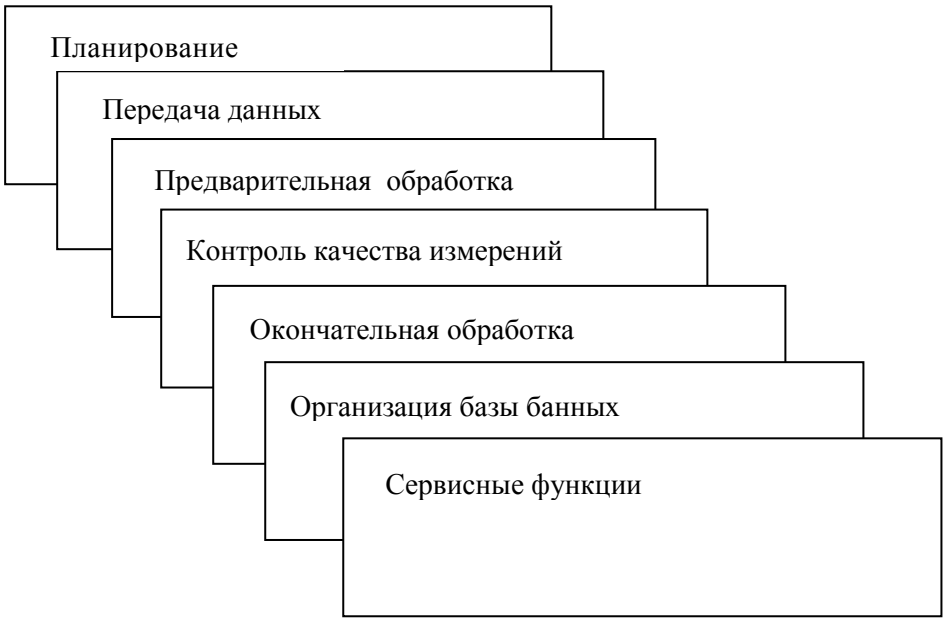


Рис. 12. Общая структура программы обработки фирмы-изготовителя спутниковых приемников

Блок контроля качества измерений предназначен для оценки статистических данных матриц апостериорных местоположений и взаимных положений, контроля замкнутых построений по различным маршрутам, остаточных величин при вычислении базисных линий и результатов исправления пропусков циклов.

Блок окончательной обработки в программе фирмы-изготовителя спутниковых приемников, как правило, позволяют выполнять семипараметрическое преобразование (по Гельмерту) по имеющимся опорным точкам, а также осуществлять объединение и совместное уравнивание нескольких многоточечных решений, спутниковых измерений и наземных линейно-угловых построений.

Блок организации базы данных предназначен для упорядочения хранения полевых данных и результатов обработки для возможного повторного перевычисления при уточнении эфемерид или опорных пунктов, их архивирования для длительного хранения, графического отображения в виде схем или на основе цифрового картографического материала.

Блок сервисных программ предназначен для редактирования файлов данных, оптимизации схемы объекта, преобразования координат в другие системы по заданным параметрам связи и документирования промежуточных и окончательных результатов.

Учитывая имеющийся практический опыт в работе с комплектом спутниковых приемников WILD GPS System 200 и программного обеспечения SKI, вопросы окончательной обработки спутниковых измерений рассмотрены применительно к спутниковым приемникам и программному обеспечению этого типа.

Комплекс программ SKI позволяет обрабатывать результаты измерений, выполненные с помощью WILD GPS System 200, осуществлять предполевое планирование процесса измерений, выбирать установочные параметры, составлять расписание сеансов измерений. Комплекс программ SKI позволяет обрабатывать данные, полученные с помощью аппаратуры других фирм-изготовителей и введенных в формате обмена RINEX.

Комплекс программ SKI является программным обеспечением для обработки большого числа базисных линий, которые измерены в различных режимах работы. При этом не имеет значения, включает ли объект данные, полученные в статическом, кинематическом режимах или в режиме "стою-иду". Программное обеспечение учитывает это автоматически.

Особенным свойством комплекса программ SKI является обработка данных, полученных в ускоренном статическом режиме (Rapid Static), дающая сантиметровый уровень точности при измерении базисных линий до 10 км в течение нескольких минут.

Программное обеспечение SKI позволяет также обрабатывать данные, полученные при особом режиме работы на местности, известном как режим измерений с возвращением (Reoccupation). Эта возможность программы позволяет определять координаты точек в пределах точности съемки по данным двух (или более) небольших интервалов наблюдений, которые были выполнены с интервалом в один час и более, но только в том случае, если наблюдались, по крайней мере, 4 различных спутника.

Основными блоками программы SKI на этапе окончательной обработки являются:

-"Просмотр/Редактирование";

-"Уравнивание";

-"Преобразование координат";

-"Сервисные программы".

Данные выбранного объекта можно просматривать и редактировать в графическом и цифровом виде в блоке "Просмотр/Редактирование". Информацию, относящуюся к точкам, такую как идентификатор точки, атрибуты, смещение антенны, координаты и т. д. можно просматривать и редактировать в любое время. Использова-

ние фильтров позволит выводить на экран только те точки, которые удовлетворяют определенным критериям.

Блок "Уравнивание" обеспечивает пользователя полезным средством для выполнения уравнивания векторов базисных линий по методу наименьших квадратов в системе WGS-84. Данные могут импортироваться непосредственно из любого объекта или же импорт данных может быть осуществлен из подходящего по формату ASCII файла. Может выполняться свободное или несвободное уравнивание. Реализуется графический интерфейс подобный графическому интерфейсу блока "Просмотр/Редактирование".

Для получения результатов в системе координат пользователя, необходимо провести преобразования координат из одной системы в другую. Для этой цели предоставляется несколько возможностей:

1)создавать библиотеки наборов координат, эллипсоидов, параметров трансформации и наборов проекций;

2)определять различные типы параметров трансформации;

3)осуществлять различные типы трансформаций;

4)использовать картографические проекции;

5)объединять программы вычисления картографических проекций, определенных пользователем.

Блок "Сервисные программы" содержит, как правило, загрузочные модули для нового программного обеспечения сенсора и контроллера.

Процесс обработки данных (Data Processing) состоит из трех основных этапов. Первый этап заключается в выборе данных и параметров вычислений. Большинство решаемых в этой части задач поддерживается графическими средствами. На втором этапе происходят непосредственно вычисления, выполняемые автоматически, и не требующие никакого вмешательства оператора. Результаты для последующего анализа и хранения в базе данных представляются на последнем этапе.

Выбор данных включает в себя выбор объекта; выбор рабочей временной зоны; выбор пунктов, участвующих в обработке; выбор опорной станции; задание начальных координат опорной станции; определение мобильных станций; выбор интервалов времени для полевых данных, включаемых в обработку.

Выбор параметров вычислений включает в себя корректировку угла отсечки; выбор тропосферной модели; выбор ионосферной модели; выбор варианта использования эфемерид; выбор используемых данных (код, фаза); выбор комбинации частот; выбор максимальной длины вычисляемой линии; корректировка априорного значения средней квадратической ошибки.

Повторные измерения ("реоккупация") могут выполняться только на точках, наблюдения на которых проводились в статическом режиме. При указании на некоторую точку для реоккупации, на экран выводятся все периоды наблюдения для этой точки из всей рабочей зоны, а не только для определенного дня. Выбранные интервалы наблюдений, по крайней мере два, будут объединены. Максимальное число выбираемых интервалов ограничено числом неизвестных (максимально 40), которое необходимо найти для решения этой задачи. Если это число больше допустимого, появляется сообщение об ошибке. Число неизвестных может быть получено по формуле:

$$U = 3 + (L \cdot N), \qquad (23)$$

где U- число неизвестных;

L=l для определения фазы только на частоте L1;

L=2 для определения фазы на частотах L1 и L2;

N - общее число спутников.

Используемые данные. SKI предлагает следующий выбор используемых данных:

1) код и фаза;
2) только код;
3) только фаза.

По умолчанию принимается "Код и фаза". Это гарантирует, что при кинематическом режиме, например, в случае потери захвата спутника, будет доступно решение по коду.

Использование варианта "Только код" ускорит процесс вычисления в тех случаях, когда не требуется очень высокая точность, например, для дифференциальных решений по коду в прикладных задачах при нахождении на некотором расстоянии от берега.

Вариант "Только фаза" может быть полезен в случаях, где измерения по коду по какой-либо причине испорчены.

Частоты. SKI предлагает следующие комбинации частот:

1) LI +L2;
2) L1;
3) L2.

По умолчанию принимается L1+L2. Если доступны измерения только на частоте L1 (для отдельных эпох или даже для всего набора данных), а выбран вариант "LI + L2", то система автоматически использует L1, игнорируя L2. Выборы или L2 заставит систему использовать для вычисления только данную частоту.

Ограничение. Эта величина определяет максимальную длину базисной линии, для которой система пытается разрешить неоднозначности. Нет особого смысла увеличивать эту величину до большого значения, поскольку даже если при этом и удастся разрешить неоднозначности, возможны ошибки (обусловленные атмосферными возмущениями). В таком случае, значительно более надежным является решение, полученное без попытки разрешения неоднозначности, хотя значения средних квадратических ошибок могут быть весьма высокими. Это значение не должно превышать 20-30 км. По умолчанию принимается 20 км.

Априорное значение средней квадратической ошибки. Это значение представляет собой порог для отделения фазовых помех от фазы измерений. Если фазовые помехи Ваших измерений превышают данное значение, для разрешения неоднозначностей не предпринимается никаких попыток. При неудачном разрешении неоднозначности (возможно, вследствие шумов в ионосфере) это значение может быть увеличено, чтобы допустить большее количество шума. Однако, следует быть очень осторожным с увеличением данного значения. Хотя это может и помочь разрешить неоднозначности, но нет гарантии, что неоднозначности разрешены правильно. Таким образом, никогда не увеличивайте пороговое значение свыше принятого по умолчанию без возможности перекрестной проверки решения.

Для статических наблюдений пользователь может определять какое количество регистрируемых данных использовать в процессе обработки. Например, частота регистрации наблюдений используемая в полевых условиях, может быть равна 1 с. В процессе обработки данных в камеральных условиях можно использовать каждую секунду или каждую третью секунду наблюдения. Обработка данных возможна с частотой 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 и 60 секунд.

Сенсор SR 299 Wild GPS автоматически исправляет потери половины цикла, которые случаются при отслеживании циклов приемника. Таким образом, в течение обработки данных SKI обычно нет необходимости проверять потерю половины цик-

лов. Однако, при обработке данных от иных приемников, которые импортируются через компоненту RINEX, возможно появится необходимость "заставить" SKI отслеживать потерю половины циклов на частоте L1 и/или L2.

Существуют три доступных в SKI режима обработки. Первый режим предназначен для оценки всех возможных комбинаций одновременно измеряемых базисных линий, другой - только для базисных линий (обычный выбор) и третий режим выбирается для оценки положения отдельной точки. Обычно используется режим обработки базисной линии.

Координаты выбранного местоположения опорной станции для вычисления базисных линий в идеале должны быть известны с точностью в пределах Юм. Большие ошибки в координатах местоположения опорной станции могут привести к ошибкам при вычислении базисной линии. Такие ошибки могут привести к ошибкам масштаба, элементов разворота и, возможно, скажутся на неудачном разрешении неоднозначности.

Если надежные начальные координаты места расположения опорной станции (которые могут вводиться через компоненту "Просмотр/ Редактирование") недоступны, за начальное принимается навигационное положение, полученное приемником. Следует отметить, что навигационное положение может расходиться с истинным до 100 м из-за режима SA.

Режим обработки отдельной точки дает возможность вычислить лучшее абсолютное положение, по сравнению с навигационным определением, путем использования кодовых измерений. Однако, чтобы учитывать действие SA необходимо знать, что для определения наилучшего положения отдельной точки должны использоваться минимум одно- двухчасовые данные наблюдений.

Конспект лекций по теме
"Основы спутниковой геодезии"
Раздел 4.2 Позиционные и относительные определения системой GPS - измерений. Спутниковое нивелирование
Лекция4.2. 2 Спутниковое нивелирование (GPS - level) .
(2часа, 4 страницы)

Составитель: ст. преподаватель Товбас С. К.

2004 год

8.4.1 Особенности определения высот с помощью спутниковых систем

Традиционным способом развития высотной сети является геометрическое нивелирование, которое, несмотря на автоматизацию отдельных процессов, до сих пор является одним из самых трудоемких процессов топографо-геодезического производства. В результате геометрического нивелирования определяются нормальные или ортометрическиё высоты, необходимые для решения большинства практических задач.

Нормальная высота определяется от поверхности геоида или квазигеоида. Геоид (квазигеоид) является одной из семейства эквипотенциальных или уроненных Поверхностей гравитационного поля Земли. Гравитационный вектор или направление вертикали в любой точки перпендикулярны к гепотенциальной поверхности, проходящей, через эту точку (рис.)

Нормальная высота имеет более распространенное физические значение, чем эллипсоидальная или геодезическая высота, отсчитываемая от поверхности эллипсоида.

Информация об ортометрической высоте необходима при выполнении высокоточных инженерных работ, таких как строительство дамб, трубопроводов, тоннелей и других сооружений, связанных с жидкостями и их течениями. Аналог физической интерпретации эллипсоидных высот отсутствует.

Соотношение между геодезической (эллипсоидальной) и нормальной (ортометрической) высотами определяется следующей формулой:

$$H^{\gamma} = H + \varsigma ,$$

где H^{γ} - нормальная высота;
H - геодезическая высота ;
ς - высота геоида (квазигеоида).

Как показано на рисунке (см: рис:), эта формула является достаточно точной для всех практических приложений.

Угол ε характеризует уклонение между линией отвеса и нормалью к поверхности эллипсоида. Для большинства регионов этот угол непревышает 30 угловых секунд .

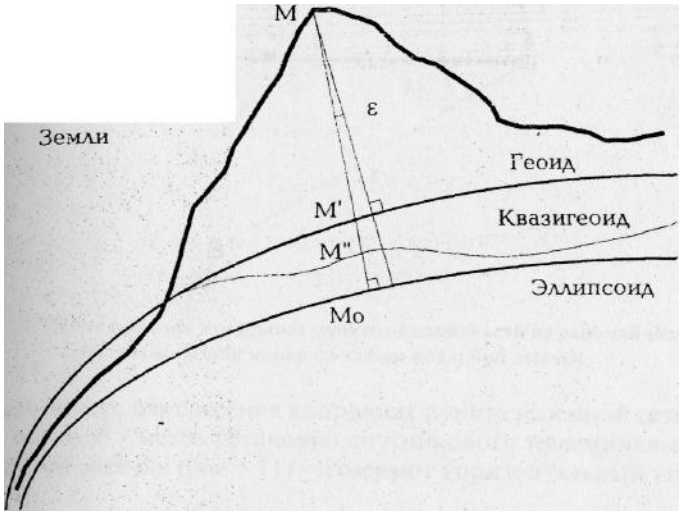


Рис. К определению высоты

Таким образом, для получения нормальных высоте помощью спутниковых измерений необходимо с высокой точностью знать высоты геоида и квазигеоида в каждой определяемой точке.

Поскольку спутниковые координатные определения, выполняемые с геодезической точностью, являются относительными, то и определение высот нормальных и геодезических следует рассматривать как относительные определения. В этом случае основное уравнение связи высот будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta H^{\gamma} = \Delta H + \Delta\varsigma ,$$

где ΔH^{γ} - разность нормальных высот;

ΔH - разность геодезических высот;

$\varsigma\Delta$ - разность высот геоида (квазигеоида).

Использование метода относительных определений для передачи нормальных высот без учета разностей высот геоида (квазигеоида) может привести к значительным погрешностям. По данным среднеквадратические погрешности неуче та разности высот геоида составляет от 1 м на расстоянии до 50 км и до 5 м на расстоянии до 200км.

Наиболее массовым способом передачи высот при использовании спутниковых координатных определений является одномерное трансформирование высот с использованием нормальных высот опорных точек. Так знание нормальных высот опорных точек в начале и в конце линейного сооружения позволяет выполнить высотную съемку этой трассы, а знание нормальных высот трех опорных точек позволяет определить методом интерполяции разности высот геоида на площадном объекте, ограниченном опорными точками.

Как и двумерное трансформирование с использованием опорных точек, трансформирование высот имеет свои методические ограничения, связанные с необходимой точностью определения нормальных высот, с точностью опорных точек, с размером объекта, и равномерностью в пределах объекта поверхности квазигеоида. Формальное трансформирование высот на основе теории подобия для лилейных объектов длиной порядка десятков км или площадных объектов таких же размеров, особенно протяженных вдоль параллели, могут привести к методическим погрешностям трансформирования, превосходящим и точность спутниковых измерений и точность используемых опорных высотных точек.

Вопрос преобразования геоцентрических (X,Y,Z) декартовых координат в геодезические (B,L,H) был рассмотрен ранее.

Остановимся на и превышений измеренных спутниковыми методами. Этим методом можно получить приращения геодезических высот:

$$\Delta H_{12} = \Delta X_{12}\cos B_1 \cos L_1 + \Delta Y_{12}\cos B_1 \sin L_1 + \Delta Z_{12}\sin B_1 + \frac{\Delta X_{12}^2 + \Delta Y_{12}^2 + \Delta Z_{12}^2}{2R}$$

где R= 6371000м; $\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta Z_{12}$- приращения координат пункта 2 относительно пункта 1, определяемые GPS системой; B_1,L_1 - геодезические координаты точки 1, в системе эллипсоида относительно которого ведется отсчет геодезических высот на данной территории.

Для преобразования высот (превышений) полученных GPS - level, в систему высот принятую на данной территории, выполняют одномерное преобразование геодезических высот в систему нормальных или ортометрических высот.

В общем случае необходимо иметь 4 параметра преобразования.

Это - 1) смещение по вертикали, 2) повороты вокруг осей x и y (в системе x, y, H) , 3) масштабный множитель.

В большинстве случаев масштабным множителем можно пренебречь.

По сути преобразование геоида на локальном участке и превышение геоида над отсчетной GPS поверхностью.

Для преобразования с использованием трех параметров и оценки качества необходимо иметь высоты четырех пунктов в системе нормальных или ортометрических высот. (Три необходимых, четвертый контрольный).

Пусть для трех пунктов GPS сети известны нормальные высоты Hi и высоты из GPS определений H_i^G. Преобразование имеет вид:

$$H_i - H_i^G = dH - y_i\eta + x\xi,$$

где dH - смещение по вертикали,

$\xi -$ поворот вокруг оси y.

$\eta -$ поворот вокруг оси x.

В частном случае высоты H_i^G могут быть определены в любой местной системе высот, относительно условного нуля.

Координаты $x_{i,} y_i$ могут быть приближенными, например снятыми с карты.

Полученные элементы преобразования используют для вычисления высот всех точек сети, расположенных в периметре замыкающих совмещенных пунктов.

Поэтому GPS сети должны быть привязаны не менее чем к четырем пунктам с хорошим геометрическим распределением по площади проекта.

При количестве пунктов более трех выполняют уравнивание по МНК и оценивают единицу веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[V^2]}{n-3}},$$

где n -количество совмещенных пунктов.

При нормальных условиях эти отклонения должны быть на уровне нескольких сантиметров. Обычно превышения в сети малых размеров, например 10х10км, можно определить с точность, около 3см.