

Яковлев Владимир Викторович
Yakovlev Vladimir Victorovich
Доцент/ Assistant professor

Яковлев Антон Владимирович
Yakovlev Anton Vladimirovich
Аспирант/ Graduate student

Ростовский Государственный Строительный Университет
Дорожно-транспортный институт
Кафедра «Прикладная геодезия»
Rostov State University of Civil Engineering
Road and Transport institute
E-Mail: yak4@rambler.ru

Вопросы программного обеспечения спутниковых геодезических измерений

Software matters of satellite geodetic measurements

Аннотация: Рассматриваются задачи специального программного обеспечения различных этапов спутниковых геодезических изысканий от проектирования, выполнения полевых измерений и составления технического отчета. Особое внимание уделено трансформированию координат различных спутниковых радионавигационных систем.

The Abstract: Special software matters of different stages of satellite geodetic research from design, field measurements performance up to the formulation of the technical report are considered. Special attention is given to coordinate transformations of various satellite radio navigation systems.

Ключевые слова: высокоточные геодезические сети, программа, спутниковые радионавигационные системы.

Keywords: high precision geodic networks, programme, satellite radio navigation systems.

Программное обеспечение является неотъемлемой частью технической комплектации приемников спутниковых сигналов. Прилагаемое стандартное программное обеспечение независимо от фирм - изготовителей по своей структуре и функциональному назначению аналогичны и используются для планирования и управления процессом спутниковых наблюдений, а также для постобработки измерений и составления технического отчета. Стандартные программные пакеты обычно объединяют модули, каждый из которых управляет конкретным процессом спутниковых измерений. Например, целевое назначение модулей практически всех программ это:

- перенос файлов из приемников в компьютер;
- планирование технологии спутниковых наблюдений с соблюдением технических допусков для данного класса геодезической сети;
- обработка файлов полевых измерений;
- уравнивание геодезических построений;

- ввод технических характеристик существующей и проектной схем геодезической сети на объекте;

- преобразование координат;

- составление отчетной технической документации;

- установка и изменение параметров программы и другие функции.

Исходной технической информацией при выполнении данных функций являются: информация о станции и приемнике спутниковых сигналов; эфемеридные данные ИСЗ, отнесенные к референцному моменту; текущий альманах орбитальных данных спутников в заданном районе; техническая информация по кодовым и фазовым спутниковым измерениям в конкретном пункте геодезической сети и др.

Программа планирования спутниковых наблюдений с использованием альманаха (данных, передаваемых спутниками радионавигационных систем в навигационных сообщениях), примерных координат местоположения пункта, маски ограничений видимости спутников, даты и времени измерений позволяет выбрать периоды нормальных условий определения навигационных параметров с учетом необходимого количества наблюдаемых спутников и геометрического фактора пространственной засечки (величины PDOP). В программе обработки данных спутниковых полевых наблюдений помимо измеренных кодовых псевдодальностей и фаз несущих в качестве исходных использует также координаты исходных (референцных) пунктов (B, L, H), высоты установки антенн над центрами пунктов, текущие координаты (эфемериды) спутников, отнесенные к референцному моменту, поправки часов спутников и элементы ионосферной задержки спутниковых радиосигналов (из навигационных сообщений), измеренные метеорологические данные в наземном пункте, особенности принятых методов (программ) засечки [6].

В итоге программа планирования спутниковых наблюдений решает следующие задачи:

- моделирование на основе рекогносцировки объекта работ схемы препятствий наблюдений на каждом пункте проектной геодезической сети с записью их в компьютерную базу данных;

- составление графиков прохождения спутниками в заданном районе с обязательным указанием их номеров на основании компьютерной обработки материалов навигационного сообщения;

- представление в графическом виде количества видимых и доступных для измерений ИСЗ в заданный интервал времени;

- вычисление и представление в графическом виде показателей факторов геометрической засечки, определяющих выбор интервалов времени спутниковых наблюдений с допустимым значением PDOP для заданного класса точности геодезической сети.

Компьютерная программа обработки материалов кодовых и фазовых спутниковых измерений предусматривает предварительную и окончательную обработку материалов полевых измерений

Предварительная обработка выполняется непосредственно в полевых условиях с целью оценки качества спутниковых наблюдений на всех проектируемых пунктах геодезической сети, что позволяет выявить недопустимые погрешности полевых измерений, выполнить отбраковку некачественных материалов и решить вопросы повторных измерений или передачи материалов для окончательного уравнивания геодезической сети и составления технического отчета.

Основанием для данных выводов являются: принятая методика инициализации спутниковых наблюдений, внутренняя сходимость результатов дублирующих измерений, допустимые невязки в замкнутых геодезических построениях, допустимые расхождения измерений на базисных направлениях, сходимость с результатами предыдущих измерений на пунктах, используемых в качестве референчных, и ряд других критериев.

Модуль окончательного уравнивания геодезических измерений в компьютерной программе позволяет вводить исходные координаты базовых пунктов, придавать им веса, учитывать погрешности исходных данных, исключать пункты или вектора из уравнивания, выполнять уравнивание в трехмерной системе координат и другие функции.

Важнейшим программным продуктом спутниковых геодезических измерений является представление окончательных координат пунктов сети (объекта) в заданной (референчной) системе координат, отличной от отсчетных систем используемой СРНС, то есть широкое внедрение спутниковых навигационных систем требует постоянного совершенства координатной основы и уточнения взаимосогласованных параметров общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли [1]. Для решения многочисленных задач спутниковой геодезии применяются различные системы координат, которые отличаются по форме их задания, выбора начала, основной плоскости и главной оси координат [2].

В спутниковых методах геодезических измерений наибольшее применение нашли как прямоугольная система координат X, Y, Z , так и геодезическая эллипсоидальная B, L, H . Исходной системой координат, в которой задаются положения пунктов на поверхности Земли, является геодезическая с принятыми параметрами общеземного эллипсоида XV11 Генеральной ассамблеей Международного геодезического и геофизического союза (МГГС) – параметры Земли 1980. В этой системе относимости параметры общеземного эллипсоида приняты [3]:

$a_e = 6\,378\,137$ м – большая полуось общеземного эллипсоида;

$GM = \mu = 3.986\,004\,418 \cdot 10^{14}$ м³ с⁻² – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (включая атмосферу);

$J_2 = 0.0018263$ – коэффициент второй зональной гармоники геопотенциала;

$\omega = 7.292\,115 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ – угловая скорость вращения Земли;

$b = 6\,356\,752.3141$ м – малая полуось земного эллипсоида;

$f = 1 / 298.257\,223\,563$ – сжатие.

Параметры общеземного эллипсоида определяют и принятую в 1984 году международным соглашением всемирную геодезическую систему координат WGS 84.

Координаты точек на земной поверхности в этой системе определяются геодезической широтой B , геодезической долготой L и геодезической высотой H . При этом геодезическая широта B точки M на земной поверхности определяется как угол между нормалью к эллипсоиду, проходящей через эту точку, и плоскостью экватора данного эллипсоида. Геодезическая долгота L определяется как двугранный угол, образованный плоскостью начального меридиана PEP_1 плоскостью меридиана пункта $PmCP_1$ - (рис.1).

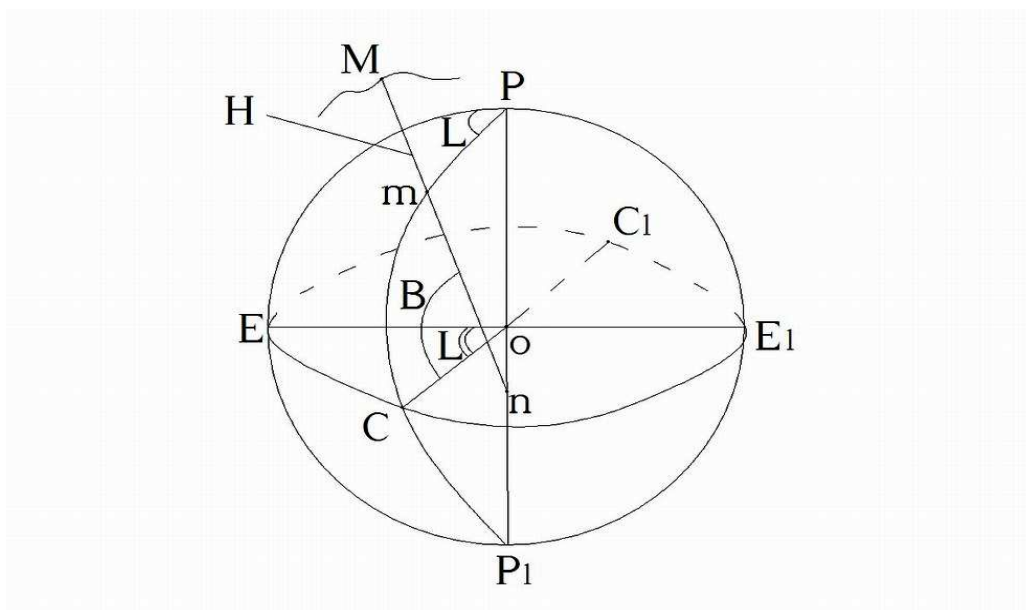


Рис. 1. Эллипсоидальная система координат

Геодезическая высота H определяется длиной отрезка нормали к эллипсоиду между точкой на поверхности Земли M и поверхностью эллипсоида (рис.2)

Переход от геодезических координат B, L, H к прямоугольным осуществляется по формулам:

$$X = (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L; \quad (1)$$

$$Y = (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L; \quad (2)$$

$$Z = [N (1 - e^2) + H] \cdot \sin B; \quad (2)$$

В формулах (1 – 3):

N - радиус кривизны первого вертикала эллипсоида в данной точке;

e – эксцентриситет меридианного эллипса, определяемый по формуле

$$e^2 = (a^2 - b^2) / a^2.$$

Переход от прямоугольных координат X, Y, Z к эллипсоидальным B, L, H осуществляется более сложными математическими выражениями и различными методами.

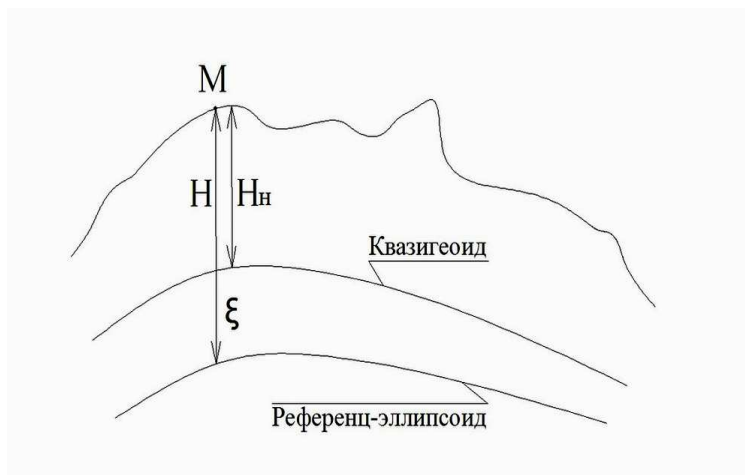


Рис. 2. Высоты пунктов, где H - геодезическая высота; H_n - нормальная высота; ξ - аномалия высоты.

Геодезическую долготу, например, можно вычислить по формуле

$$L = \arctg \frac{Y}{X} \quad (4)$$

и геодезическую широту – по формуле Боуринга [4]

$$\operatorname{tg} B = (Z + a \cdot e \cdot e' \cdot \sin^3 \Theta) / [\sqrt{X^2 + Y^2} - (a \cdot e^2 \cdot \cos^3 \Theta)], \quad (5)$$

где $e' = e / \sqrt{1 - e^2}$ и $\Theta = \arctg Z / (\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \sqrt{1 - e^2})$.

Наибольшая ошибка определения широты этим методом не превосходит 0.002". При вычисленном значении геодезической широты геодезическая высота определяется по формуле

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos B + Z \cdot \sin B - a e \cdot \sqrt{1 - e^2} B. \quad (6)$$

Приемники спутниковых сигналов системы NAVSTAR определяют свои эллипсоидальные координаты B , L , H в системе WGS 84.

Система координат ГЛОНАСС несколько отличается от GPS. В основе её системы координат ПЗ - 90 (Параметры Земли, 1990) принят общеземной эллипсоид с параметрами:

большая полуось - $a = 6\,378\,136$ м; сжатие $f = 1 / 298.257\,839\,303$.

Положение центра общеземного эллипсоида ПЗ-90 совмещено с центром массы Земли. Ось вращения эллипсоида параллельна направлению на Международное Условное Начало (МУН), принятому Международной Службой Вращения Земли. Плоскость нулевого меридиана параллельна плоскости начального астрономического меридиана. Геометрические параметры общеземного эллипсоида приняты равными параметрам уровенного эллипсоида вращения, а их поверхности – совпадающими между собой. При этом за уровенный эллипсоид вращения принята внешняя поверхность нормальной Земли, масса и угловая скорость вращения которой задаются равными массе и угловой скорости вращения Земли.

На рис.2 показана аномалия высоты геоида над эллипсоидом. Этот параметр определяет взаимное положение геоида и принятого в той или иной системе координат эллипсоида. Параметры эллипсоида подбирают таким образом, чтобы сумма квадратов аномалий была минимальна, то есть чтобы поверхность эллипсоида в большей степени приближалась к поверхности геоида. Если аномалия высоты анализируется по многочисленным пунктам гло-

бальной международной геодезической сети, то принятый на основании этого эллипсоид является международным, параметры которого определяют и принятую международную геодезическую систему координат, например WGS 84. Если же эллипсоид подбирают с учетом минимального значения суммы квадратов аномалий высоты в пунктах геодезической сети на заданной ограниченной территории, то в результате принимают параметры референц – эллипсоида. Например, на территорию бывшего СССР принят эллипсоид Красовского со следующими параметрами: большая полуось $a = 6\,378\,245$ м; сжатие $f = 1/298.3$.

В настоящее время в практику геодезических работ вводится новая референцная система координат СК-95, полученная в результате совместного уравнивания геодезических координат пунктов на эпоху 1995 года с принятой на данной территории отсчетной поверхностью на основании референц – эллипсоида Красовского. Координаты пунктов государственной геодезической сети (ГГС) определены в двух системах координат - Общеземной (ПЗ-90) и референцной (СК-95). Между обеими системами координат установлена связь, определяемая параметрами взаимного перехода (элементами ориентирования). Референцная система координат СК-95 установлена так, что её оси параллельны осям общеземной системе координат ПЗ-90.

Переход от общеземной системы координат ПЗ-90 к СК-95 выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X_{95} &= X_{ПЗ(90)} - \Delta X_0 \\ Y_{95} &= Y_{ПЗ(90)} - \Delta Y_0 \\ Z_{95} &= Z_{ПЗ(90)} - \Delta Z_0, \end{aligned} \right\} (7)$$

где ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 - линейные элементы ориентирования, задающие координаты начала системы координат СК-95 в общеземной системе координат ПЗ-90. Они составляют: $\Delta X_0 = +25.90$ м; $\Delta Y_0 = -130.94$ м; $\Delta Z_0 = -81.76$ м.

Средняя квадратическая погрешность преобразования плоских прямоугольных координат пунктов X , Y из СК-95 в СК-42 равна в среднем по сети 3.5 м, что обусловлено, главным образом, деформациями в сети СК-42. Создание геодезических сетей на более высоком техническом уровне с учетом широкого применения GPS – технологий затрудняет существующая государственная геодезическая сеть (ГГС), которая является основой многогранного по назначению существующего картографического материала. Использование пунктов ГГС или пунктов GPS – наблюдений решается индивидуально в зависимости от задач и объемов инженерно-геодезических работ.

При использовании приемников, работающих по сигналам радионавигационной системы NAVSTAR, координаты пунктов на земной поверхности определяются в международной системе координат WGS 84, тогда как топографо – геодезическая документация, составленная за многие десятилетия на данный географический или административный район, отнесена к той или иной локальной или региональной системе координат (практически к референцной системе координат). Именно в этой системе потребитель должен представлять техническую документацию спутниковых наблюдений. Преобразование координат из одной системы в другую (локальную или региональную) называется трансформированием координат.

Для того чтобы выполнить трехмерное трансформирование этих координат, необходимо определить с достаточной для решения проектируемых инженерно-геодезических задач точностью семь параметров преобразования: три параметра сдвига центров систем координат ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 ; три параметра разворота координатных осей ω_x , ω_y , ω_z и один масштабный коэффициент $m = 1 + \mu$, в котором малая величина μ представляет собой отклонение масштаба от единицы и учитывает систематическую разность в масштабах сети, созданной классическими наземными методами и сетью, созданной спутниковыми радионавигационными систе-

мами. Для определения семи параметров преобразования необходимо выполнить спутниковые наблюдения на трех или четырех (при условии избыточных измерений) пунктах геодезической сети, имеющих координаты в локальной или региональной системах координат. Такое трехмерное трансформирование выполняется обычно в высокоточных геодезических сетях большой протяженности. При создании геодезических сетей спутниковыми методами на относительно небольших территориях в практике наиболее часто используется так называемое двумерное трансформирование, при котором в первоначальной стадии трехмерный вектор базы редуцируют на референционную или локальную геодезическую проекцию. В этом случае имеем четыре параметра трансформирования [5]: два параметра сдвига начала координат, один угловой параметр вращения осей и масштабный параметр. Четыре пункта спутниковых наблюдений с известными в референционной (локальной) системе координатами составляют три независимые базы, образующие четыре уравнения с четырьмя неизвестными параметрами трансформирования. На практике большинства инженерно-геодезических изысканий угловой параметр вращения и масштабный коэффициент преобразования координат используются только в том случае, если они определяются в процессе измерений с большой степенью достоверности при наличии избыточных измерений. В большинстве программ геодезических измерений трансформирование координат сводится только к определению двух параметров сдвига начала координат. Для определения этих параметров используется обычно один из трех пунктов с локальными или региональными системами координат, расположенный примерно в центре района проектируемых работ. На остальных пунктах спутниковые наблюдения производятся только для контроля трансформирования координат.

Трансформирование координат из одной системы в другую выполняется обычно по специальным программам в процессе компьютерной постобработки спутниковых наблюдений.

Компьютерная распечатка материалов окончательного уравнивания геодезических построений практически для всех типовых программ, входящих в комплект различных фирм – изготовителей спутниковых приемников, включает следующую примерную информацию:

- название файла, геодезические координаты центра сети;
- параметры эллипсоида, принятого для уравнивания геодезической сети (большая полуось a , эксцентриситет e , сжатие $1/f$);
- предварительные геодезические координаты пунктов (B, L, H) в системе используемой спутниковой радионавигационной системы (СРНС);
- исходные вектора с указанием названия пунктов, приращений ΔX , ΔY , ΔZ и априорных значений СКП σ_B , σ_L , σ_H ;
- уравненные вектора с поправками v_{XYZ} в системе координат X, Y, Z и других;
- S_E – стандартную ошибку единицы веса;
- уравненные координаты пунктов B, L, H и их средняя квадратическая погрешность ;
- результаты оценки точности уравненных значений векторов с характеристиками их положения в трехмерном пространстве и относительных ошибок их уравненных значений.

В окончательном техническом отчете обязательно приводятся название программы и номер версии обработки и уравнивания спутниковых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т.2. М.: ФГУП "Картгеоцентр", 2006. – 360 с.
2. Изотов А.А., Зубинский В.И., Голубев А.Н. и др. Основы спутниковой геодезии. – М.: Недра, 1974.- 320 с.
3. Крылов В.И. Космическая геодезия. Учебное пособие. М.: Изд. МИИГАиК. УПП "Репрография", 2002. – 175 с.
4. Ключин Е.Б., Куприянов А.О., Шлапак В.В. Спутниковые методы измерений в геодезии (Часть1). Учебное пособие. М.: Изд. МИИГАиК. УПП "Репрография", 2006.- 60 с.
5. Шануров Г.А. Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ: Учебное пособие- М.: МИИГА и К, 2001. - 136 с.
6. Яковлев В.В. Спутниковые радионавигационные системы (Часть1). Учебное пособие. - Ростов-на-Дону: РГСУ. 2010.- 112 с..