

# О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПУНКТОВ ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

## Г.А. Шануров (МИИГАиК)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий 20-го ЦПИ МО РФ. С 1975 г. работает в МИИГАиК, в настоящее время — профессор кафедры высшей геодезии. Профессор геодезического факультета Мадридского политехнического университета, член Международной ассоциации геодезии (IAG).

## В.З. Остроумов (ГУ «ГОИН»)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в Казахском АГП, с 1992 г. — в Главном управлении геодезии и картографии при Кабинете Министров Республики Казахстан. С 1994 г. работает в ГУ «Государственный океанографический институт», в настоящее время — заведующий лабораторией. Доцент кафедры высшей геодезии МИИГАиК. Кандидат технических наук.

## Л.В. Остроумов (ГУ «ГОИН»)

В 2006 г. окончил факультет прикладной космонавтики МИИГАиК по специальности «информационные системы в технике и технологиях». В настоящее время — ведущий специалист ГУ «Государственный океанографический институт». Аспирант кафедры высшей геодезии МИИГАиК.

Данная работа имеет практическую направленность, ее теоретические основы изложены в статьях [1, 2]. Наиболее производительным методом создания опорных геодезических сетей (ОГС) является спутниковый метод. Основными проблемами в практической реализации этого метода являются следующие:

— согласование результатов наземных и спутниковых измерений;

— метрологическое обеспечение спутниковых измерений;

— учет влияния атмосферы на результаты спутниковых измерений (определений);

— учет влияния геометрии

спутниковых измерений на точность создания опорной геодезической сети.

Именно последнему аспекту, из указанных выше, и посвящена данная статья.

Из опыта работ известно, что у специалистов — практиков (наблюдателей, операторов) часто возникают вопросы: почему в результате спутниковых определений разности высот пунктов ОГС вычисляются, как правило, с большей погрешностью, чем разности плановых координат тех же пунктов, и от чего это зависит. Одним из факторов, влияющих на величину погрешности определения компонентов вектора базы,

т. е. вектора, связывающего центры пунктов опорной геодезической сети, является пространственное положение спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) относительно этого вектора во время измерений — геометрия спутниковых измерений. Другими словами, погрешность определения компонентов вектора базы зависит от взаимного положения спутников ГНСС, используемых при измерениях, и пунктов, образующих базу. При дальнейшем рассмотрении данного аспекта проблемы авторы постараются избежать использования громоздких формул, сделав основ-

ной упор на наглядность изложения.

Погрешности определяемого параметра и измеряемой величины связаны между собой коэффициентом потери точности **DOP** (Dilution Of Precision) — «размывание» точности. **DOP** часто называют геометрическим фактором. Чем меньше этот фактор, тем лучше геометрия спутниковых наблюдений. Поскольку погрешность определяемого параметра не может быть меньше погрешности измеряемой величины, то наименьшее (наилучшее) значение коэффициента **DOP** равно единице. На практике этот идеальный случай встречается редко и только при полностью открытом небосводе, а геометрический фактор в благоприятных условиях наблюдений лежит в интервале от 1 до 2. Результатом выполнения сессии спутниковых наблюдений с помощью двух геодезических приемников, установленных на пунктах опорной геодезической сети, является вектор базы  $\bar{D}$ , соединяющий центры пунктов:

$$\bar{D} = (\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z)^T, \quad (1)$$

где  $T$  — транспонирование;

$\Delta X$ ,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  — разности прямоугольных (декартовых) пространственных координат в системах ПЗ-90 или WGS-84.

Следовательно, под погрешностью определений ( $m_{\text{опр.}}$ ) необходимо понимать погрешность определения каждого из трех компонентов вектора базы  $\bar{D}$ .

При создании (обновлении, сгущении, совершенствовании) ОГС на конкретном объекте и/или в конкретном регионе используют региональную (местную, локальную) систему координат  $x$ ,  $y$ ,  $h$ . Эта система координат зафиксирована координатами пунктов опорной геодезической сети, созданной несколько десятков лет тому на-

зад наземными методами, такими как триангуляция, полигонометрия, трилатерация, геометрического нивелирования, гравиметрия. Плановое положение каждого существующего и вновь создаваемого пункта ОГС задано в проекции Гаусса-Крюгера. Высота этих пунктов определена в системе нормальных высот. При использовании спутниковой аппаратуры и соответствующего программного обеспечения высоты пунктов получают в системе геодезических высот. Другими словами, плановое и высотное положение пунктов ОГС относительно исходных пунктов определяют раздельно, так, как это делали ранее, с использованием наземных средств измерений.

В такой системе координат вектор базы  $\bar{D}$  имеет вид:

$$\bar{D} = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta h)^T. \quad (2)$$

Погрешность определения планового положения пункта связана с погрешностью измерений коэффициентом потери точности **HDOP**, где **H** (horizontal) означает горизонтальный или плановый. Погрешность определения высотного местоположения пункта связана с погрешностью измерений коэффициентом потери точности **VDOP**, где **V** (vertical) означает вертикальный или высотный. Эти факторы (коэффициенты) связаны между собой соотношением [3, 4]:

$$\text{HDOP}^2 + \text{VDOP}^2 = \text{PDOP}^2. \quad (3)$$

В последнем символе буква **P** (positioning) означает определение местоположения в плане и по высоте. Существует также **TDOP**, где **T** (time) — время. Этот геометрический фактор (коэффициент) характеризует точность определения поправки часов спутникового приемника относительно времени спутников ГНСС GPSTime (GPST) [3, 4]. Геометрические факторы **PDOP** и **TDOP** связаны соотношением:

$$\text{PDOP}^2 + \text{TDOP}^2 = \text{GDOP}^2. \quad (4)$$

В последнем символе буква **G** (geometrical) означает геометрический. Можно сказать, что **GDOP** — это «всеобъемлющий» фактор, но чаще всего используют **PDOP**.

Рассмотрим для начала элементарный случай. На пунктах 1 и 2 геодезической сети установлены антенны спутниковых приемников, которые принимают и регистрируют сигнал, излучаемый одним и тем же спутником ГНСС. Сигнал сначала приходит на антенну, установленную на пункте 2, а затем, с временной задержкой  $\tau$ , на антенну, установленную на пункте 1. Для простоты будем полагать, что часы приемников работают синхронно. Эти приемники регистрируют моменты прихода сигнала со спутника на их антенны. Требуется определить расстояние **D** между антеннами, установленными на пунктах 1 и 2, т. е. расстояние между этими пунктами. Можно, избегая сложных, но громоздких формул, показать, что наиболее благоприятной геометрией спутниковых измерений будет такая, когда спутник находится на одной линии с пунктами 1 и 2, т. е. сигнал распространяется вдоль линии 2-1. В этом случае расстояние между пунктами 1 и 2 можно вычислить по формуле:

$$D = \tau V,$$

где **V** — скорость распространения радиосигнала спутника от пункта 2 до пункта 1.

Геометрия спутниковых измерений благоприятна в том смысле, что расстояние **D** получится с меньшей погрешностью, чем в случае, когда спутник находится в стороне от линии, соединяющей пункты 1 и 2. При наличии такого отклонения погрешность определения расстояния увеличится обратно пропорционально косинусу угла этого отклонения. Продол-

жая рассуждения в этом же направлении, можно сделать следующий вывод. Если мы хотим получить разность координат  $\Delta$  с наивысшей возможной точностью, в смысле геометрии спутниковых измерений, например,  $\Delta X$ , определяющую взаимное местоположение пунктов 1 и 2, то необходимо, чтобы сигнал спутника распространялся вдоль соответствующей оси координат, т. е. вдоль оси  $X$ . Рассмотрим это подробнее на простом примере.

Выберем прямоугольную (декартову) трехмерную систему координат таким образом, чтобы начало координат совпало с пунктом 1, ось  $x$  была направлена на север, ось  $y$  — на восток, а ось  $z$  — в сторону зенита пункта 1, т. е. перпендикулярно осям  $x$  и  $y$ . В этом случае формула (2) будет иметь еще более простой вид:

$$\bar{D} = (\mathbf{x} \mathbf{y} \mathbf{z})^T. \quad (5)$$

Расстояние между пунктами 1 и 2 невелико, и имеется возможность одновременно наблюдать достаточное количество одних и тех же спутников ГНСС, например, 6–8. Пусть это расстояние лежит в пределах 100 км. Таким образом, направления в зенит на этих пунктах, а также направления на любой из наблюдаемых спутников, можно считать параллельными. Из вышесказанного можно заключить, что для обеспечения наиболее выгодной геометрии спутниковых измерений на пункте 2 следует выполнять следующие условия:

1. При определении высоты  $H$  наблюдать спутники, находящиеся в зените над пунктом.

2. При определении плановой координаты  $y$  наблюдать спутники, находящиеся в направлении на восток и/или на запад.

3. При определении плановой координаты  $x$  наблюдать спутники, находящиеся в на-

правлении на север и/или на юг.

Как известно, приемник регистрирует сигналы всех спутников ГНСС, находящихся над маской, устанавливающей ограничения на спутники ГНСС, включаемые в измерения. Поэтому речь идет скорее о соответствующем выборе спутников на этапах планирования наблюдений и постобработки.

Теперь следует рассмотреть вопрос о том, насколько возможно практически реализовать эти условия. Будем считать, что возле обоих пунктов отсутствуют препятствия, закрывающие небосвод выше маски, устанавливающей стандартный угол наклона над горизонтом, равный  $15^\circ$ . Уже само по себе наличие этой маски препятствует строгому выполнению условий 2 и 3. Если спутник ГНСС находится не на горизонте, а на высоте маски, то  $DOP$  увеличится и вместо 1 станет равным 1,02.

Возможность выполнения условия 1 определяется тем, что орбиты спутников наклонены к плоскости экватора под углом примерно в  $60^\circ$  (над полюсами спутники ГНСС не летают). Поэтому наблюдать спутник, находящийся в зените, можно на пунктах, расположенных на параллели с широтой около  $60^\circ$ . При отклонении от этой широты  $HDOP$  будет увеличиваться обратно пропорционально косинусу угла этого отклонения. Следовательно, будет увеличиваться и  $PDOP$ . Особенно это критично для пунктов, расположенных в северных широтах, — там, вблизи зенита, никогда не будут находиться спутники ГНСС. Чем севернее, тем больше  $HDOP$ .

Условие 2 можно реализовать, выполняя наблюдения на пунктах, расположенных на любой широте. При этом можно

наблюдать спутники, расположенные как на востоке, так и на западе. Другими словами, сигналы спутников ГНСС будут распространяться между пунктами 1 и 2 в обоих направлениях, позволяя уменьшить влияние некоторых источников на погрешность результатов измерений, таких как влияние атмосферы и остаточной несинхронности часов приемников. Это достоинство отсутствует при определении разности высот пунктов. Наблюдая спутник в зените, мы не имеем возможности наблюдать спутник в надире. Это — дополнительный фактор, увеличивающий погрешность определения разностей высот пунктов в сравнении с погрешностью определения разностей плановых координат пунктов.

Условие 3, в части наблюдения спутников ГНСС, расположенных над маской на юге, также можно реализовать, выполняя наблюдения на пунктах, расположенных на любой широте. Сложнее обстоит дело с возможностью в северном полушарии наблюдать спутники ГНСС, расположенные над маской на севере. На пунктах со сравнительно малой широтой на севере можно наблюдать только спутники ГНСС, находящиеся с той стороны полюса, с которой выполняются измерения. На пунктах, расположенных на широте  $50^\circ$  и более, в направлении севера можно наблюдать спутники ГНСС, находящиеся по другую сторону полюса, т. е. восходящие над маской и вскоре заходящие.

Из вышесказанного можно заключить, что наиболее выгодные в геометрическом смысле условия наблюдений можно реализовать на широте в  $50$ – $60^\circ$ . Именно в этом интервале широт расположена Москва с ее окрестностями. Следовательно, здесь целесообразно

создавать метрологические полигоны для аттестации спутниковой аппаратуры и ее программного обеспечения. Их можно создавать и севернее, но будет увеличиваться погрешность определения высот пунктов.

Рассмотрим методику наблюдений и постобработки результатов спутниковых измерений, предлагаемую авторами и позволяющую реализовать наиболее выгодные условия геометрии спутниковых наблюдений.

Места расположения пунктов опорной спутниковой геодезической сети следует выбирать таким образом, чтобы горизонт был открыт, в том числе и в направлении севера. Опыт показывает, что удобнее всего организовывать наблюдения, используя 6 спутниковых приемников. Почему не 5 или 7 — не вполне понятно, но именно с шестью приемниками нам удавалось работать наиболее эффективно в организационном смысле. Длительность программы наблюдений должна составлять, как минимум, сутки. За сутки на данной группе пунктов будут иметь место все возможные геометрические условия наблюдений. Программа наблюдений должна состоять из сессий, длительностью 1–2 часа. Другими словами, операторы должны синхронно осуществлять перезапуск приемников. Это позволит избежать создания громоздких файлов, содержащих необработанные данные (raw data).

При выполнении постобработки целесообразно использовать подход, описанный в работе [2] и оказавшийся эффективным. Его суть состоит в том, чтобы определять плановые и высотные координаты пунктов (векторов баз) раздельно. В данной статье поста-

раемся развить этот подход. Суть усовершенствования процесса постобработки состоит в обработке данных в несколько этапов. На первом этапе постобработку выполняют стандартным образом, получая плановые и высотные координаты пунктов геодезической сети совместно. На втором этапе фиксируют плановые координаты пунктов и выбирают интервалы времени наблюдений, когда спутники ГНСС находились вблизи зенита, т. е., когда **VDOP** был как можно меньшим. Затем постобработку повторяют, получая уточненные значения геодезических высот пунктов [2], и фиксируют их значения. На третьем этапе еще раз повторяют постобработку, выбрав интервалы времени, когда геометрия наблюдений была благоприятна для определения плановой составляющей вектора базы, т. е., когда **HDOP** был как можно меньшим. Получают уточненные плановые координаты и фиксируют их. При необходимости и желании эту последовательность обработки повторяют второй и третий раз. В процедуру включают и результаты обработки измерений, когда **TDOP** был наименьшим из возможных.

Существующие программы обработки позволяют определять только значения **PDOP**. Это вызывает необходимость дополнительной активности операторов при измерениях на станциях. Помимо обычных действий, на пункте измерений оператор (наблюдатель) должен фиксировать значения геометрических факторов **VDOP**, **HDOP** и **TDOP** для того, чтобы на соответствующем этапе постобработки иметь возможность выбрать интервалы времени, когда геометрия спутниковых наблюдений близка к наиболее выгодной. Для дости-

жения этой же цели оператор должен отслеживать и регистрировать азимуты и зенитные расстояния спутников ГНСС, находящихся вблизи зенита и горизонта.

Практическая реализация описанной выше методики наблюдений и постобработки позволит определить координаты и высоты пунктов с наименее возможными на данной широте погрешностями, которые, кроме того, будут наименее зависимыми.

#### ▼ Список литературы

1. Шануров Г.А., Мельников С.Р., Лопес-Кьерво С., Месква Х., Роблес Х. Геометрия спутниковых наблюдений при создании метрологического полигона // Геодезия и картография. — 2001. — № 7. — С. 7–14.
2. Шануров Г.А., Остроумов В.З. Влияние геометрии спутниковых наблюдений на точность определения геодезических высот уровневных постов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2004. — № 1. — С. 3–12.
3. В. Hofmann-Wellenhof et. al. Global positioning system. Theory and practice. Second edition. Springer-Verlag. — Wien, New York. — p. 326.
4. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. — М.: МИИГАиК, 2001. — 136 с.

#### RESUME

Positioning accuracy in geodetic observations static mode depends on the observations geometry. It means that positioning error depends on system satellites positions on celestial sphere relative to ground based satellite receivers. The least positioning error takes place if directions towards the satellites from the ground based points are orthogonal and pointed locally to the east, to the west, to the south, to the zenith and to the north, if possible. The satellite receiver operator is obliged to record regularly HDOP, VDOP and TDOP values (factors). The results post-processing is to be made by iterations.