

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОГО УРАВНИВАНИЯ ГНСС-ВЕКТОРОВ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Пигин А.П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Васильков Д.М.<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
Чадович Д.В.<sup>3</sup>, Яковенко М.П.<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3</sup>*«Кредо-Диалог» (г. Минск, Республика Беларусь)*

<sup>4</sup>*«Кредо-Диалог» (г. Москва, Россия)*

*В новой версии популярного программного продукта CREDO\_DAT реализован ряд инновационных решений, одно из них - обработка и уравнивание (совместно с наземными или отдельно) результатов спутниковых измерений. Это решение является в определенной степени альтернативным по отношению к принятым в фирменных программных продуктах. В предлагаемой статье описывается принцип и основные алгоритмы этого решения.*

Одной из задач, реализованных в новой версии системы CREDO\_DAT, является совместная обработка спутниковых и наземных измерений. В публикации [1] мы предварительно рассматривали этот вопрос. Нами проведен более детальная проработка алгоритмов, анализ и практическая проверка предложений из статьи [1]. Результаты приведены ниже.

В литературе и практике имеет место несколько подходов к совместной обработке спутниковых и наземных измерений. Варианты таких подходов для локальных геодезических построений рассмотрены в [2]. На этой основе, а также с учетом разработок и практического опыта, изложенных в работе [3], для реализации нами апробирован следующий вариант. В основу положений обработки принят принцип – пространственные измерения в геоцентрических координатах  $\Delta X_{ki}, \Delta Y_{ki}, \Delta Z_{ki}$ , полученные в результате постобработки в пакетах производителей оборудования, преобразовываются в горизонтную (топоцентрическую) систему координат точки  $k$ , т.е. в «измерения» наклонных дальностей, направлений и зенитных расстояний, выполненных с базовых станций  $k$  на определяемые пункты  $i$ .

Далее данные обрабатываются на плоскости в рабочей системе координат в обычном порядке, на основе уже реализованного и выверенного математического аппарата CREDO\_DAT.

Исходными данными, включаемыми в совместную обработку являются приближенные (навигационные) геодезические координаты базовых станций (B, L), приращения геоцентрических координат, полученные в системах постобработки из решения базовых линий в СК WGS84 ( $\Delta X_{ki}$ ,  $\Delta Y_{ki}$ ,  $\Delta Z_{ki}$ ), их точностные характеристики  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ .

Эти данные читаются из файлов соответствующих форматов – SNAP-файлы (PINACLE), данные по станциям и базовым линиям \*.txt, \*.csv (LGO), \*.asc (TGO, TBC), \*.tvf (Topcon Tools), отчеты по решению базовых линий (Spectrum Survey).

При уравнивании сети используются также координаты и нормальные высоты исходных пунктов на участке работ в рабочей системе координат (x, y, H<sub>γ</sub>).

Для перехода от эллипсоидальных (геодезических) превышений к превышениям нормальных<sup>4</sup> высот используются аномалии высот из модели геоида EGM2008 [4].

Рабочие формулы для плановых «измерений» (из [2,3])

Измеренные наклонные дальности:

$$SD_{ki} = \sqrt{\Delta X_{ki}^2 + \Delta Y_{ki}^2 + \Delta Z_{ki}^2} . \quad (1)$$

Значение SD подлежит исправлению поправками за приведение линии к горизонту, редуцированию на поверхность эллипсоида и плоскость в текущей проекции в рабочей СК (HD).

Измеренные углы:

$$\beta_{ki} = A_{ki} - A_{kj} ,$$

---

<sup>4</sup> Строго говоря, высоты геоида в модели EGM2008 позволяют определить ортометрические высоты, но так как в расчете превышений используются разности аномалий высот, методика предназначена для обработки в сетях кадастровых съемок, инженерных изысканиях, инженерных и городских сетях, разностью высот геоида и квазигеоида мы пренебрегаем.

где

$$ctg A_{ki} = \frac{\Delta Z_{ki} * \cos B_k - (\Delta X_{ki} * \cos L_k + \Delta Y_{ki} * \sin L_k) * \sin B_k}{\Delta Y_{ki} \cos L_k - \Delta X_{ki} * \sin L_k} \quad (2)$$

Для обработки используются «измеренные» направления. В значения «измеренных» направлений вносятся просто значения азимутов  $A_{ki}$ , т.е.  $M_{ki} = A_{ki}$ . Значения  $M_{ki}$  исправляются поправками за редуцирование на плоскость в рабочей проекции.

Рабочие формулы для высотных «измерений»

Для расчета «измеренных» превышений и уравнивания высот можно рассчитать зенитные расстояния [2, 3], которые в принципе можно использовать как данные тригонометрического нивелирования. В этом случае геодезическое (эллипсоидальное) зенитное расстояние рассчитывается по следующей формуле:

$$\cos hZ_{ki} = \cos B_k * \cos L_k * \frac{\Delta X_{ki}}{SD_{ki}} + \cos B_k * \sin L_k * \frac{\Delta Y_{ki}}{SD_{ki}} + \sin B_k * \frac{\Delta Z_{ki}}{SD_{ki}} \quad (3)$$

«Измеренное» зенитное расстояние определяется по известной формуле:

$$Z_{ki} = hZ_{ki} - \xi * \cos A_{ki} - \eta * \sin A_{ki} \quad (4)$$

При расчете превышения по «измеренному» зенитному расстоянию учитывается только поправка за кривизну земли и поправка за переход к нормальным высотам:

$$h_{ki} = HD_{ki} * ctg Z_{ki} + \frac{HD_{ki}}{2R \sin^2 Z_{ki}} - (\Delta H^{\gamma}_i - \Delta H^{\gamma}_k) \quad (5)$$

где  $R$  – средний радиус кривизны эллипсоида линии  $ki$ .

$$R = \frac{a\sqrt{1-e^2}}{1-e^2 \sin^2((B_k + B_i)/2)}$$

Здесь  $a$  и  $e$  – параметры текущего эллипсоида.

Для использования этого пути пользователь должен знать не всегда доступные ему разности геодезических и нормальных высот, уклонения отвесных линий.

Однако, при расчете геодезических (эллипсоидальных) превышений вектора с  $k$  на  $i$  после некоторых преобразований формулы расчета  $\cos hZ_{ki}$  превышение можно получить проще:

$$\Delta H_{k \rightarrow i} = \Delta X * \cos B_k * \cos L_k + \Delta Y * \cos B_k * \sin L_k + \Delta Z * \sin B_k. \quad (6)$$

При этом среднее превышение между нормальными (точнее – ортометрическими) высотами конечной (i) и начальной (k) точками вектора свободно от влияния кривизны эллипсоида и вычисляется по формуле:

$$H_i - H_k = (\Delta H_{k \rightarrow i} - \Delta H_{i \rightarrow k}) / 2 + \zeta_k - \zeta_i, \quad (7)$$

где  $\Delta H_{k \rightarrow i}$ ,  $\Delta H_{i \rightarrow k}$  – вычисленное геодезическое превышение в горизонтной СК соответственно точки «k» и точки «i»,

$\zeta_k, \zeta_i$  – аномалии высот, выбираемые из модели геоида EGM2008 по навигационным координатам пунктов.

Установление весов «измерений»

В [2] для установления весов рекомендуется использовать паспортные характеристики приборов. В CREDO\_DAT для установления весов наземных измерений используются точностные характеристики измерений линий, направлений и превышений, устанавливаемые для каждого класса (группы) измерений либо на основе требований нормативных документов, либо назначаемые пользователем в соответствии с методикой измерений в классе (группе).

Для обеспечения гибкости, выбора стиля уравнивания ГНСС-векторов в CREDO\_DAT используются точностные характеристики векторов  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ , кроме того предоставлена возможность введения некоторого множителя для RMS, а также возможность с той или иной степенью (от 0 % до 100 %) учитывать для установления весов точностные характеристики класса (группы) измерений.

Анализ точности предлагаемого метода

Расстояния, получаемые из (1) – это физические длины, точность которых зависит только от точности полученных в постобработке приращений координат и не зависит от предлагаемой методики (естественно, не считая точности редуцирования и масштабного коэффициента в параметрах связи рабочей СК и WGS84).

Точность рассчитанных по (2) направлений в определенной степени зависит от точности полученных навигационных координат. Но степень влияния незначительна. Изменения для редуцированных линий длиной 25 км при изменении навигационных координат на 1” (~30 м в плане) дает погрешность в 0,001”, чем вполне

можно пренебречь в сетях кадастровых съемок, инженерных изысканий, городских сетях.

Точность рассчитанных по (7) превышений существенно зависит от точности значений навигационных координат и точности модели геоида. На сегодня модель EGM2008 превышает по точности все доступные общеземные и некоторые локальные модели. Собственно, определение гравитационного поля земли – постоянная задача геодезии и создаваемые модели постоянно уточняются, поэтому более детально рассмотрим вторую составляющую – влияние точности получения навигационных координат на точность превышения.

Для оценки влияния значения широты и долготы места наблюдения на точность получения значения превышения в горизонтной системе координат, продифференцировав формулу (6) по  $B$  и  $L$ , численным методом детально оценено влияние значения широты и направления вектора на точность превышения. Результаты эксперимента показали, что широта и долгота места наблюдения, направление вектора не влияют на точность получения значения превышения в горизонтной (топоцентрической) системе координат.

Наиболее существенна потеря точности в превышении вызывается точностью определения навигационных координат, причем имеет место линейная зависимость. В таблице приведена требуемая точность определения навигационных координат (в метрах) для обеспечения соответствующей погрешности превышения.

Таблица 1

Влияние погрешности навигационных координат		0,006	0,008	0,010	0,014
Длина вектора	10 км	4,42	5,89	7,36	10,30
	15 км	2,94	3,93	4,91	6,87
	20 км	2,21	2,94	3,68	5,15
	30 км	1,47	1,96	2,45	3,43

Для проверки предлагаемой методики авторами, с привлечением специалистов фирм – поставщиков и пользователей ПО и ГНСС-оборудования (ГФК Лейка и ГСИ (Москва), Белаэрокосмогеодезия и Экомир (Минск)) проведены многочисленные проверки методики на

производственных объектах. Результаты обработки по предлагаемой методике сравнивались с результатами обработки в Pinnacle, LGO, Topcon Tools, Spectrum Survey, TGO.

Следует отметить, что расчеты, проведенные в этих продуктах для одного и того же набора данных в Rinex-файлах, отличались на первые сантиметры и в плане, и по высоте. При этом результаты уравнивания по предлагаемой методике, как правило, находились близкими к среднему из уравнивания в разных пакетах.

В целом же результаты сравнения можно оценить как удовлетворительные, позволяющие сделать вывод о пригодности методики для обработки данных ГНСС измерений, в том числе совместно с наземными измерениями, в сетях кадастровых съемок, инженерных изысканиях, инженерных и городских сетях.

### **Литература**

1. Пигин, А.П. К реализации совместной обработки спутниковых и наземных измерений локальных сетей в системе CREDO\_DAT/ А.П. Пигин, Д.В Чадович // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, 2003. – с. 63.

2. Бойко, Е.Г. Методы совместной обработки локальных наземных и спутниковых геодезических сетей / Е.Г Бойко, В.М. Зимин, М.Г. Годжаманов. – М.: Геодезия и картография. – 2000. – № 8.

3. Глушков, В.В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития/ В.В. Глушков, К.К. Насретдинов, А.А. Шаравин. – М.: Институт политического и военного анализа, 2002.

4. Интернет – <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>.