

Санкт-Петербургский государственный университет

АБДУЛАЗЯНОВ Антон Игоревич

Выпускная квалификационная работа

**РАЗВИТИЕ СЪЕМОЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС В
ТРУДНОДОСТУПНЫХ МЕСТАХ, НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКИХ ПОЛЯРНЫХ
СТАНЦИЙ МОЛОДЕЖНАЯ И ПРОГРЕСС**

Основная образовательная программа бакалавриата
«Картография и геоинформатика»
Профиль «Геоинформатика»

Научный руководитель: к.т.н.,
доцент ТЮРИН Сергей Вячеславович

Рецензент:
СОЛОЩЕНКО Фёдор Викторович

Санкт-Петербург
2018

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Обзор литературы и программного обеспечения	5
1.1. Обзор литературы	5
1.2. Обзор существующего программного обеспечения для обработки спутниковых измерений.	5
Глава 2. Спутниковые методы определения координат	8
2.1 Общие сведения	8
2.2 Абсолютный метод	9
2.2.1 Определение координат по кодовым псевдодальностям	9
2.3. Дифференциальный метод определения координат	13
2.3.1. Метод СРНС	13
2.3.3. Определение координат по фазовым измерениям.....	16
2.4. Относительное позиционирование	17
2.4.1. Статическое относительное позиционирование	18
2.4.2. Кинематическое относительное позиционирование	19
2.5. PPP метод.....	20
2.5.1. Основы PPP	20
2.5.2. Алгоритм работы	21
2.5.3. Точность.....	22
2.5.4. Преимущества и недостатки	24
Глава 3. Практическая часть.....	25
3.1. Источники данных и программное обеспечение	25
3.2. Обработка измерений	25
3.2.1. Статические наблюдения базовой станции	25
3.2.2. Построение трендов и сопоставление результатов	30
3.3.1. Роверные наблюдения в режиме кинематики	34
3.3.2. Анализ серий наблюдений	35
Заключение.....	37
Список литературы.....	38
Приложение 1. Уравненные прямоугольные координаты базовой станции.	40
Приложение 2. Уравненные роверные наблюдения	42
Приложение 3. Результаты обработки роверных наблюдений в районе аэродрома	45
Приложение 4. Результаты обработки роверных наблюдений в районе санно-гусеничного прохода	46

Введение

При исследованиях многих природных процессов появляется необходимость в определении пространственных характеристик тех или иных объектов и их изменений во времени. В решении этих задач на помощь приходят методы геодезического мониторинга. Трудность организации и проведения такого мониторинга на природных объектах вызвана тем, что многие из них находятся в труднодоступных местах и в сложных условиях. Сложность условий обуславливается в первую очередь природными факторами, а также слабым развитием сети опорных пунктов.

Одним из популярных методов геодезического мониторинга является мониторинг с помощью приемников глобальной системы позиционирования (ГНСС). Это вызвано высокой степенью автоматизации таких наблюдений и их всепогодным характером.

Применение современных способов организации и обработки данных такого мониторинга позволяет с достаточной точностью определять пространственное положение объектов, их скорости и направления движений.

В данной работе рассматриваются наблюдения, проведенные в рамках 62 Российской антарктической экспедиции. Работы выполнялись на полярных станциях Молодежная и Прогресс на двух участках – в районе аэродрома и санно-гусеничного прохода.

Таким образом, целью работы является поиск оптимальных методов обработки спутниковых данных мониторинга, выполненного в сложных условиях антарктической экспедиции.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- изучить методы обработки спутниковых определений и соответствующее программное обеспечение;
- обработать данные измерений базовой станции разными способами и выполнить анализ ее устойчивости;
- обработать данные роверных наблюдений на каждом участке работ с учетом изменений в положении базовой станции;
- рассчитать направление и скорость смещения координат между циклами наблюдений.

Структура работы представлена тремя главами. В первой главе дан обзор литературы и обзор программного обеспечения, применяемого при обработке спутниковых наблюдений. Вторая глава содержит описание методов обработки измерений и включает основные математические выкладки и уравнения для каждого из методов. Третья глава посвящена обработке исходных данных в программном продукте и

получению итоговых результатов. В заключении приведены выводы по работе, а также перспективы дальнейшего развития. В приложения включены сводные таблицы с уравненными прямоугольными координатами как для базовой станции, так и для роверных наблюдений, а также расчёт смещений и скорости движения на основе полученных результатов.

Глава 1. Обзор литературы и программного обеспечения

1.1. Обзор литературы

В качестве материалов по теме работы использовалась научная литература, пособия, а также статьи на русском и английском языках.

Основным источником, в котором подробно описаны теоретические основы спутниковых технологий в геодезии, является второй том монографии Антоновича К.М, где представлено подробное изложение всех существующих методов, применяющихся при обработке спутниковых наблюдений. Также по теме работы был рассмотрен ГОСТ Р 51794-2001 «Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек».

В качестве основного источника по теории метода PPP, были рассмотрены научные статьи таких российских авторов, как Войтенко А.В., Виноградов А.В, Жигулин А.Ю, в которых описаны основные алгоритмы действия метода.

Кроме того, в качестве вспомогательной литературы использовался труд зарубежных авторов Sunil Bisanth и Yang Yao, в котором подробно даны способы оценки точности PPP метода.

1.2. Обзор существующего программного обеспечения для обработки спутниковых измерений.

В виду того, что одной из основных задач дипломной работы является обработка данных спутниковых измерений, целесообразно ознакомиться с существующими на рынке продуктами для данного вида работ.

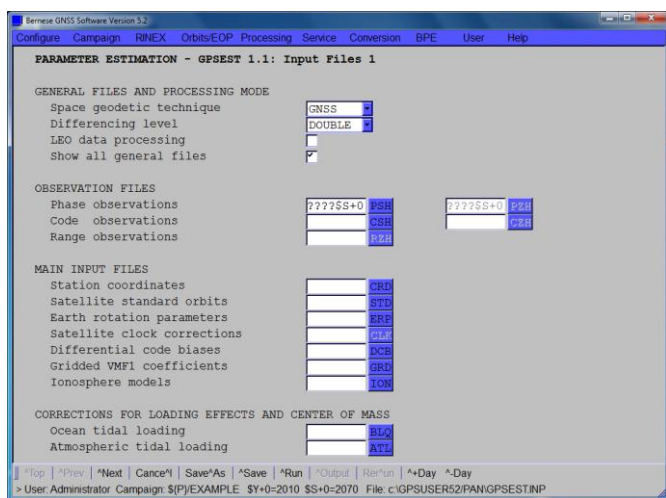


Рис. 1. Интерфейс ПО Bernese (источник: <https://www.gsc-europa.eu/bernese-gnss-software-from-bern-university>)

Одним из таких хорошо известных программных обеспечений является Bernese GNSS Software, разработанный в Астрономическом институте Бернского университета (AIUB), Швейцария. Предназначен для оперативной и высокоавтоматизированной работы по постобработке данных GPS, ГЛОНАСС, Galileo. Данный продукт способен обрабатывать данные методом PPP, определять точные орбиты спутников,

моделировать ионосферные и тропосферные поправки, а также комбинировать различные типы ГНСС приёмников и типов антенн для решения определённых задач.

Подобным продуктом является Waypoint GraftNav (NovAtel), разработанный в Канаде. Способен поддерживать форматы большинства существующих ГНСС приёмников, а также обладает функцией внесения поправок в спутниковые эфемериды и бортовые часы НКА, путём импорта данных из сети Интернет. Кроме того, способен проводить постобработку данных GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. В качестве основных методов при обработке данных использует PPP метод

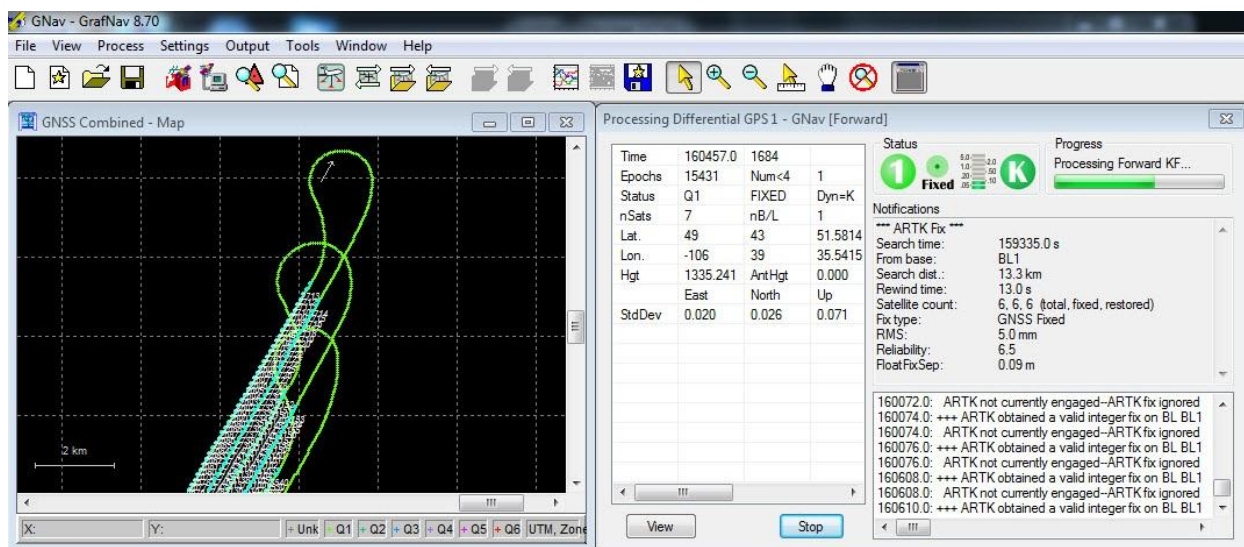


Рис. 2. Интерфейс ПО Waypoint GraftNav
(<https://www.novatel.com/products/software/grafnav/#overview>)

Также на рынке программных обеспечений присутствует Trimble Business Center, разработанный в США. Этот продукт обрабатывает данные спутниковых измерений, но уже относительным методом. Использует в качестве исходных сырых данных RINEX – файлы, обладает функцией подгрузки уточнённых эфемерид спутников при помощи сети Интернет. Продукт имеет широкий функционал создания отчётной документации.

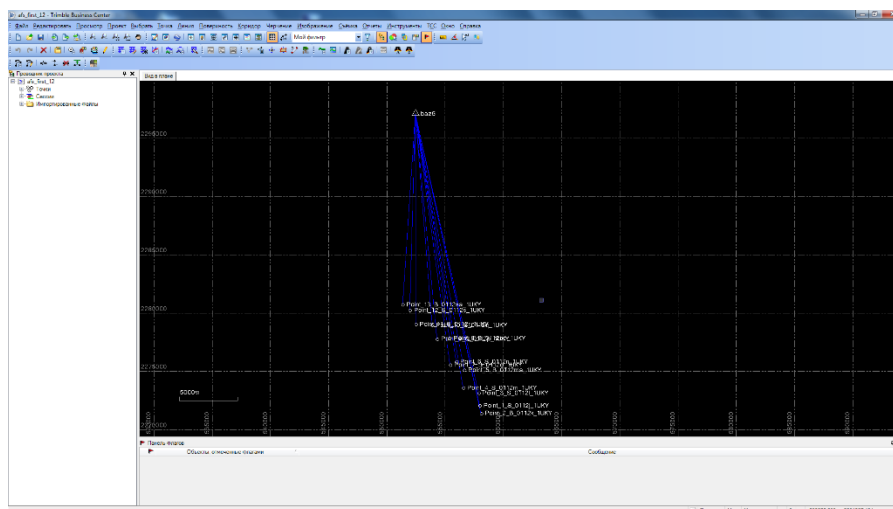


Рис. 3. Интерфейс ПО Trimble Business Center

Ещё одним популярным вариантом на рынке является программный пакет Magnet Office Tools от компании Topcon, Япония. Эта программа включает в себя три модуля, отвечающие за выполнение различных видов работ:

- обработка и уравнивание измерений, полученных электронными и роботизированными тахеометрами, цифровыми нивелирами (модуль Total Station);
- работа с цифровыми моделями рельефа, создание и редактирование объектов, создание поверхностей (модуль Design);
- обработка данных, полученных в результате RTK-съёмки (модуль RTK).

Глава 2. Спутниковые методы определения координат

2.1 Общие сведения

Определение координат по спутниковым наблюдениям может выполняться тремя методами:

- Абсолютный;
- Дифференциальный;
- Относительный;

Сущность абсолютного метода заключается в определении координат при помощи одного приёмника, при этом используется система координат, носителями которой являются как сами группы космических аппаратов, так и спутниковые подсистемы контроля и управления. При этом применяется метод засечки положения приёмника от известных положений групп спутников (Антонович К.М., 2006). Иначе этот метод называется точечным позиционированием.

При применении дифференциального и относительного методов, наблюдения производят уже двумя приёмниками – базой и определяемой станцией. Существенное отличие этих двух методов заключается в обработке наблюдений. Так, в дифференциальном методе, по результатам наблюдений на опорном пункте, вычисляются поправки в соответствующие параметры для получения координат определяемого объекта, то есть, измерения обрабатываются отдельно. При использовании дифференциального способа достигается достаточно высокая точность, но только по отношению к базовой станции. В относительном методе, измерения, полученные с базовой и определяемой станции, обрабатываются совместно.

В каждом из вышеперечисленных способов определения координат возможны измерения:

- по кодовым псевдодальностям;
- по несущей фазе;

Главное отличие двух вышеперечисленных способов измерений заключается в принципе определения псевдодальностей при измерении по кодовой псевдодальности. Для фазовых же измерений главной задачей является устранение или минимизация оных.

Фазовые определения координат основываются на измерении сдвига по фазе Φ между колебаниями принятого от спутника сигнала и собственными колебаниями частоты L1. Эти измерения выполняют на несущей частоте L1, а в современных двухчастотных приемниках – также на частоте L2.

Точности дифференциального и относительного методов значительно выше, нежели у абсолютного (за исключением абсолютного метода PPP, где точность зависит от длительности наблюдений), и могут достигать сантиметровых точностей. Но следует обратить внимание на следующие обстоятельства:

- так как координаты определяемых пунктов находятся относительно базовой станции, то погрешности при определении координат базы полностью перейдут в координаты определяемых пунктов;
- так как координаты неизвестных пунктов применяются для расчёта компонентов базовых линий, то это будет влиять на точности при определении приращений между базовой станцией и неизвестным пунктом;

В каждом из методов возможно применение двух различных режимов наблюдения:

- кинематика
- статика

При наблюдениях в режиме статики оба приёмника находятся в неподвижном состоянии, а при кинематическом режиме – один приёмник остаётся неподвижным, а другой – движется. Съёмка в режиме статики позволяет накапливать информацию, тем самым добиваясь повышения точности. В свою очередь, при кинематическом позиционировании есть возможность получать траекторию движения транспортного средства, на котором установлена аппаратура.

2.2 Абсолютный метод

2.2.1 Определение координат по кодовым псевдодальностям

В абсолютном методе приёмник определяет свои координаты по группировкам спутников (GPS, Глонасс, и т.д.), вне зависимости от других устройств (рис. 4):

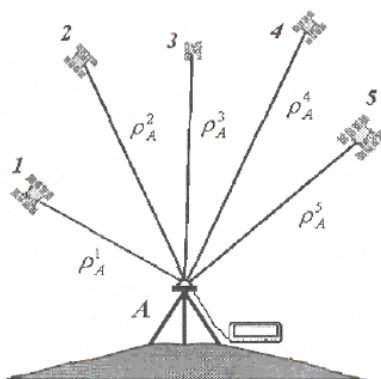


Рис. 4. Абсолютный метод спутниковых определений.
(источник: http://www.astro.tsu.ru/TGP/text/7_1.htm)

Основной параметр – псевдодальность P_A^i , по которому определяют координаты, и уравнение которого имеет вид:

$$P_A^i = \rho_A^i + cdt_A - cdt^i + I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + dm_A^i + e_A^i \quad (2.1)$$

где:

A – номер пункта наблюдений;

i – спутники, ($i = 1, 2, \dots, s$), s – количество наблюдаемых пунктов;

dt_A - сдвиг шкал часов

dt^i – поправки часов (содержится в навигационном сообщении);

I_A^i – ионосферная задержка (вычисляются в соответствии с принятыми моделями);

T_A^i – тропосферная задержка (аналогично);

d^i – задержки сигналов в аппаратуре спутника (определяются путём калибровок или не учитываются);

d_A – задержки сигналов в аппаратуре приёмника (аналогично);

dm_A^i - влияние многопутности (обычно неизвестно);

e_A^i – случайная ошибка измерений;

c – скорость радиоволн в вакууме.

Применение данного уравнения на практике возможно, если в значение псевдодальности ввести все поддающиеся учёту поправки.

Координаты спутников $r_{\text{нав.сооб}}^i$ вычисляются по навигационному сообщению на момент выхода сигнала $t - \tau_A^i$, где $\tau_A^i = \rho_A^i/c$. Так, для спутников системы ГЛОНАСС, применяется численное интегрирование, а для GPS – аналитический метод вычислений. Поскольку векторы положений спутников $r_{\text{нав.сооб}}^i$ задаются в одной из общеземных систем (WGS-84, ПЗ-90), которые не являются инерциальными, то возникает необходимость их корректировки путём поправки за поворот Земли за время прохождения сигнала τ_A^i :

$$r^i = R_3(\omega_+ \tau_A^i) * r_{\text{нав.сооб}}^i = \begin{pmatrix} \cos(\omega_+ \tau_A^i) & \sin(\omega_+ \tau_A^i) & 0 \\ -\sin(\omega_+ \tau_A^i) & \cos(\omega_+ \tau_A^i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * r_{\text{нав.сооб}}^i \quad (2.2)$$

где: ω_+ - угловая скорость вращения Земли. Высота группировки спутников – 19-20 тыс. км, поэтому время прохождения сигнала будет не меньше 63-66 мс. Земля проворачивается со скоростью 15''/с, поэтому угловое смещение Земли при вращении вокруг своей оси составит около 1". Если общеземные координаты применяются без этой поправки, то координаты определяемой станции будет смещены примерно на 1" по долготе (Антонович К.М., 2006).

Воспользовавшись линеаризованным представлением геометрической дальности:

$$\rho_A^i = \|r^i - R_A\| = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2} \quad (2.3)$$

и считая, что координаты спутников известны, можно найти вектор поправок dR_A , уравнение которого будет иметь вид:

$$-u_A^i dR_A + c dt_A + l_A^i = v_A^i \quad (2.4)$$

где:

u_A^i – единичный вектор топоцентрического направления на спутник;

l_A^i – свободный член;

v_A^i – невязка, в которую входят немодулируемые ошибки;

Таким образом, в уравнении (2.1) остаются четыре неизвестных:

X_A, Y_A, Z_A – три координаты станции;

dt_A – сдвиг шкал часов;

Для возможности определения данных четырёх неизвестных, необходимое число наблюдений должно равняться или быть больше числа неизвестных. Если число измерений в каждой эпохе одинаковое, то полное число наблюдений $n = s * E$, где: s – число спутников, E – число эпох.

Для статического позиционирования: $E \geq \frac{3}{s-1}$

Для кинематического позиционирования: $s * E \geq 4E$

2.2.2 Определение координат по фазовым измерениям

Определить координаты пункта можно также и при помощи измерений разности фаз несущих колебаний. Модель для этих измерений можно представить в виде:

$$\varphi_A^i(t) + f^i dt^i(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^i(t) + N_A^i + f^i dt_A(t) \quad (2.5)$$

где:

$\varphi_A^i(t)$ – измеренная фаза несущей, которая выражена в циклах;

λ – длина волны;

N_A^i – целочисленная неоднозначность фазы;

$\rho_A^i(t)$ – геометрическая дальность;

f^i – частота сигнала спутника;

$dt^i(t)$ – поправки часов для спутника;

$dt_A(t)$ – поправки часов для приёмника.

Аналогично с методом кодовых псевдодальностей, если число измерений в каждую эпоху постоянно, то $n = s * E$. Однако стоит учитывать, что количество неизвестных в данном случае больше на число неоднозначностей s .

Число неизвестных при статическом точечном позиционировании состоит из 3 координат наблюдательных станций, E неизвестных поправок часов приёмника и

неизвестных неоднозначностей s . При рассмотрении формулы (2.5) видно, что имеет место так называемый дефект ранга, что означает возможность произвольного выбора одного из неизвестных параметров. Допустим, что в качестве произвольной выбрана поправка часов приёмника за одну эпоху. Тогда, учитывая дефект ранга, количество неизвестных поправок часов приёмника станет равно $E - 1$. Исходя из этого, можно вывести условие для статического точечного позиционирования без дефекта ранга:

$$s * E \geq 3 + (E-1), \quad (2.6)$$

выразим из неравенства необходимое число эпох:

$$E \geq \frac{s+2}{s-1} \quad (2.7)$$

Таким образом, для получения решения требуется минимальное число спутников $s = 2$, что приводит к числу эпох наблюдения $E \geq 4$.

При кинематическом точечном позиционировании мы рассматриваем $3E$ неизвестных координат станций, в сравнении с 3 неизвестными (2.6), что обусловлено движением второго приёмника относительно первого. Остальные условия, включая дефекты ранга, неизменны. Исходя из этого, условие наблюдений будет иметь вид:

$$s * E \geq 3E + (E-1),$$

выразим из неравенства необходимое число эпох:

$$E \geq \frac{s-1}{s-4}$$

Таким образом, для получения решения требуется минимальное число спутников $s = 5$, и их необходимо отслеживать в течение $E \geq 4$ эпох.

Стоит отметить, что решения для одной эпохи ($E = 1$) не существует. Из-за этого кинематическое точечное позиционирование по фазам возможно только в том случае, если s известно заранее (из инициализации). Тогда в этом случае модель фазовой дальности рассматривается в виде модели кодовой дальности.

Теперь следует обратиться к уравнению для фазы Φ_A^i :

$$\Phi_A^i(t) = \rho_A^i(t, t - \tau_A^i) - I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + c [dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c [\delta_A(t) + \delta^i(t - \tau_A^i)] + \lambda [\varphi_A(t_0) - \varphi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \varepsilon_A^i. \quad (2.8)$$

При решении данного уравнения необходимо иметь поправки часов спутников и их координаты значительно более точные, нежели те, которые выдаёт навигационное оборудование. Единственное решение в данном случае - использование дополнительных файлов с точными эфемеридами и поправками часов. Также необходимо иметь очень точные модели для поправок для тропосферы и ионосферы и данные о аппаратурных задержках. Так, например, для учёта тропосферных явлений, спутниковые наблюдения

следует сопровождать путём отслеживания метеорологических параметров. Ионосферное влияние учитывается при помощи максимально точных фазовых двухчастотных измерений. Более того, чтобы иметь возможность разрешать неоднозначности, необходимо с измерениями фаз наблюдать P(Y)-кодовые тональности.

2.3. Дифференциальный метод определения координат

2.3.1. Метод СРНС

В дифференциальном методе позиционирования используется как минимум два приёмника, способные измерять псевдодальности (либо несущей фазы и псевдодальности). Один приёмник всегда установлен в пункте с уже известным положением в общеземной системе координат (WGS-84, ПЗ-90). Второй приёмник установлен в точке, координаты которой необходимо найти (мобильная станция, удалённая станция).

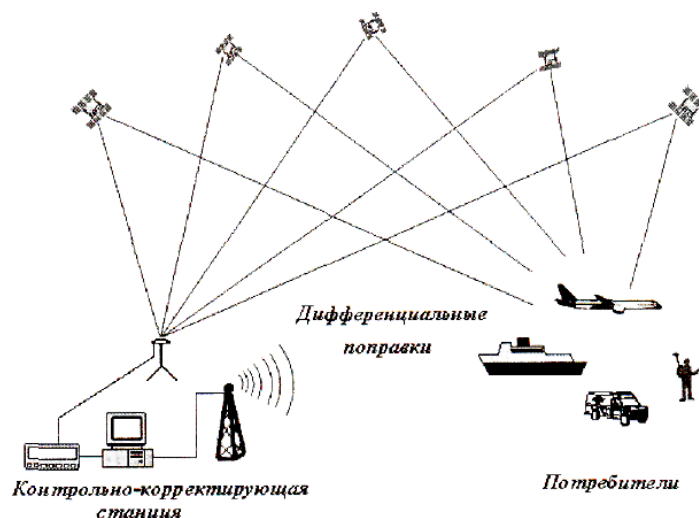


Рис. 5. Дифференциальный метод СРНС
(источник: http://www.astro.tsu.ru/TGP/text/8_1.htm)

Суть данного метода сводится к тому, что приёмник базовой станции (далее - БС), использующий координаты фазового центра своей антенны, должен определять из передвижения спутников поправки для псевдодальностей (фаз) или координат. По определённым поправкам, приёмник мобильной станции (далее - МС), исправляет соответствующие параметры на более точные и получает точные координаты. Основой данного метода является положение, по которому влияние различных источников ошибок на итоговые результаты измерений постоянно как для МС, так и для БС (т.е. используются свойства коррелированных ошибок).

Поправки от базового приёмника к МС передаются как в реальном времени, так и при пост-обработке. Однако в случаях, когда точное положение МС необходимо знать непосредственно на самой базовой станции, применяется обратный (инверсный)

дифференциальный метод (Inverse Differential GPS IDGPS), в котором потоковые данные идут от полевого приёмника к базовому.

Помимо инверсного, существует также локальный дифференциальный метод (Local Differential LDGPS), в котором один базовый приёмник обслуживает все близлежащие МС на значительных расстояниях. При увеличении расстояний происходит падение точности из-за уменьшения корреляции между ошибками. Данный фактор привёл к созданию сетей БС.

Данный метод подразумевает создание пространственно-временной модели поправок (учитываются медленные изменения в поправках) по данным сети БС.

2.3.2. Определение координат в локальном дифференциальном методе по кодовым измерениям

Запишем уравнения псевдодальностей, измеряемых до спутника i БС и МС:

$$P_{BS}^i = \rho_{BS}^i + \Delta\rho_{BS}^i + c(dt_{BS} - dt^i) + I_{BS}^i + T_{BS}^i + e_{BS}^i, \quad (2.9)$$

$$P_{MS}^i = \rho_{MS}^i + \Delta\rho_{MS}^i + c(dt_{MS} - dt^i) + I_{MS}^i + T_{MS}^i + e_{MS}^i. \quad (2.10)$$

Где величины $\Delta\rho_{BS}^i$ и $\Delta\rho_{MS}^i$ характеризуют влияние ошибок в элементах орбиты спутника по линии визирования на спутник (Антонович К.М., 2006).

Геометрическое расстояние от спутников до БС вычислим по их геоцентрическим радиус-векторам:

$$\rho_{BS}^i = \|r^i - R_{BS}\| \quad (2.11)$$

Где R_{BS} - радиус-вектор антенны на БС, а радиус-векторы r^i можно вычислить при помощи навигационного сообщения с учётом поворота Земли за время прохождения сигнала. Чтобы упростить вычисления, будем считать, что измерения выполнены на двух приёмниках в пределах одной – двух минут одно от другого. Ошибка ΔP_{BS} будет транслироваться как дифференциальная поправка и выглядеть в виде:

$$\Delta P_{BS} = \rho_{BS} - P_{BS} = -\Delta\rho_{BS}^i - c(dt_{BS} - dt^i) - I_{BS} - T_{BS} - e_{BS} \quad (2.12)$$

С ней также вычисляется откорректированное значение псевдодальности P'_{MS} :

$$P'_{MS} = P_{MS} + \Delta P_{BS} \approx \rho_{MS} + (\Delta\rho_{MS}^i - \Delta\rho_{BS}^i) + c(dt_{MS} - dt_{BS}) + (I_{MS} - I_{BS}) + (T_{MS} - T_{BS}) + e_{BS} + e_{MS} \approx \rho_{MS} + c(dt_{MS} - dt_{BS}) + e_{MS,BS} \quad (2.13)$$

Ошибка за поправку часов спутника (dt^i) у двух устройств будет практически одинаковой. Единственное различие будет только из-за флуктуаций хода часов за промежуток времени, который равен разности моментов выхода сигналов. Ошибки эфемерид будут влиять на измерения одинаковым образом только в том случае, если расстояние между устройствами относительно невелико и вносимые поправки «достаточно новые», то есть $\Delta\rho_{BS}^i \approx \Delta\rho_{MS}^i$.

На практике для получения дифференциальных поправок по кодовым измерениям используются преимущественно два метода вычислений:

- коррекция по навигационному параметру;
- коррекция координат.

При коррекции по навигационному параметру, на базовой станции необходимо отыскать поправки за псевдодальности для всех обзереваемых спутников. Суть данного метода заключается в измерении базовой станцией псевдодальностей P_{BS}^i до всех спутников, а также получении разностей ΔP^i между P_{BS}^i и геометрической дальностью ρ_{BS}^i . Поправки ΔP^i находятся после удаления ошибок часов приёмника БС из псевдодальностей:

$$\Delta P^i = P_{BS}^i - \rho_{BS}^i - cdt_{BS} \quad (2.14)$$

Полученные поправки добавляются в псевдодальности P_{MS}^i , в свою очередь измеренные МС. Потребитель имеет возможность их откорректировать и выбрать лишь необходимые, получая тем самым уточнённые псевдодальности $P_{MS}'^i$:

$$P_{MS}'^i = P_{MS}^i + \Delta P^i, \quad (2.15)$$

при помощи которых производится непосредственно вычисление координат потребителя.

Коррекция координат производится только тогда, когда базовая и мобильная станции наблюдают идентичное созвездие спутников не менее чем из четырёх штук. Данный способ используется при использовании однотипной приёмной аппаратуры, на небольшом отдалении мобильной станции от базовой и при относительно небольших интервалах времени. Дифференциальные поправки в этом методе получают:

$$\begin{aligned} \Delta R &= R'_{BS} - R_{BS} \\ R'_{MS} &= R_{MS} + \Delta R \end{aligned} \quad (2.16)$$

где

R_{BS}, R_{MS} – векторы оценок координат для БС и МС;

R'_{BS} – координаты, принимаемые за эталон для базовой станции;

$\Delta R = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ – вектор дифференциальных поправок;

R'_{MS} – вектор уточнённых координат потребителя.

Данные, которые передаются от базовой к мобильной станции (или наоборот - в инверсном режиме) включают в себя:

- адреса участников;
- скорость изменения поправок ΔR ;
- возраст эфемерид для каждого спутника;

- вектор поправок ΔR для каждого набора НС.

Преимущество данного метода при работе в режиме РТК заключается доступности в полевом приёмнике уже исправленных положений. Из недостатков можно выделить: требование наличия средств связи для передачи поправок, необходимость сообщения участником рабочего созвездия из четырёх спутников и ограниченная дальность действия.

2.3.3. Определение координат по фазовым измерениям

Вариант локального дифференциального метода с использованием фазовых измерений обычно применяется в режиме кинематики и называется кинематикой реального времени, или РТК (Антонович К.М., 2006). Опишем краткое изложение теории данного метода.

Первым шагом при вычислении поправки для несущей фазы заключается определение целого числа K_{BS}^i из наблюдений первой эпохи на БС:

$$K_{BS}^i = \left[\frac{P_{BS}^i(1) - \Phi_{BS}^i(1)}{\lambda} \right] \quad (2.17)$$

В этом уравнении неоднозначность $N_{BS}^i(1)$ невозможно определить в процессе измерения фазы, поэтому её величина устанавливается произвольно регистром счётчика, что и является показанием $\Phi_{BS}^i(1)$. Далее можно определить дальность по несущей фазе $\Omega_{BS}^i(1)$:

$$\Omega_{BS}^i(1) = \Phi_{BS}^i(1) + \lambda K_{BS}^i \quad (2.18)$$

Таким образом, подставив в уравнение (2.10) уравнение (2.17), получаем, что численное значение дальности по несущей фазе $\Omega_{BS}^i(1)$ близко к кодовой псевдодальности $P_{BS}^i(1)$.

Для каждого спутника, который наблюдался с базовой станции, можно найти топоцентрическое расстояние $\rho_A^i(1)$ и дальность $\Omega_{BS}^i(1)$. Первое находится по формулам (2.2), (2.3). Невязка для $\Omega_{BS}^i(1)$ равна:

$$L_{BS}^i(1) = \rho_{BS}^i(1) - \Omega_{BS}^i(1) = \Delta N_{BS}^i + cdt_{BS} - cdt^i - I_{BS,\Phi}^i - T_{BS}^i - d_{BS,\Phi}^i - d_{BS,\Phi} - d_{BS,\Phi}^i \quad (2.19)$$

Средняя невязка для всех наблюдаемых спутников:

$$\mu_{BS}(1) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s L_{BS}^i(1) \quad (2.20)$$

Поправка к несущей фазе:

$$\Delta \Phi_{BS}^i(1) = \rho_{BS}^i(1) - \Omega_{BS}^i(1) - \mu_{BS}^i(1) \quad (2.21)$$

Изменение невязки от одной эпохи к следующей:

$$L_{BS}^i(t, t-1) = L_{BS}^i(t) - L_{BS}^i(t-1) = [\rho_{BS}^i(t) - \rho_{BS}^i(t-1)] - [\Omega_{BS}^i(t) - \Omega_{BS}^i(t-1)] \quad (2.22)$$

Средняя невязка в эпоху t :

$$\mu_{BS}(t) = \mu_{BS}(t-1) + \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s L_{BS}^i(t, t-1) \quad (2.23)$$

Поправка к фазе для спутника i в эпоху t :

$$\Delta\Phi_{BS}^i(t) = \rho_{BS}^i(t) - \Omega_{BS}^i(t) - \mu_{BS}^i(t) = \rho_{BS}^i(t) - [\Phi_{BS}^i(t) + \lambda K_{BS}^i] - \mu_{BS}^i(t) \quad (2.24)$$

Фазовая поправка передаётся на мобильную станцию, на которой исправляется несущая фаза:

$$\Phi_{MS}^i(t) = \Phi_{MS}^i(t) + \Delta\Phi_{BS}^i(t) \quad (2.25)$$

Соответствующее выражение для координат приёмника мобильной станции:

$$\begin{aligned} \Phi_{MS}^{ik}(t) &\equiv \Phi_{MS}^k - \Phi_{MS}^i = \quad (2.26) \\ &= \rho_{MS}^k(t) - \rho_{MS}^i(t) + \lambda [N_{BS,MS}^{ik}(1) + K_{BS}^i - K_{BS}^k] + I_{BS,MS,\Phi}^{ik}(t) + T_{BS,MS}^{ik}(t) + d_{BS,MS,\Phi}^{ik}(t) \end{aligned}$$

Теперь, исходя из выражения (2.24), положение мобильной станции можно вычислить непосредственно на самой станции, применяя найденные исправленные наблюдения $\Phi_{MS}^i(t)$, как минимум до четырёх спутников. Это и является решением по DGPS по несущей фазе. Оно отличается от обычного решения по двойным разностям тем, что вместо неоднозначностей двойных разностей $N_{BS,MS}^{ik}(t)$ оценивается модифицированная однозначность (Антонович К.М., 2006):

$$N_{BS,MS}^{ik}(t) = N_{BS,MS}^{ik}(t) + K_{BS}^i - K_{BS}^k \quad (2.27)$$

Положение точки мобильной станции, рассчитанное по (26), будет считаться относительно базовой станции, так как координаты БС применялись для вычисления поправки к несущей фазе $\Delta\Phi_{BS}^i(t)$.

Одной из главных целей обработки является получение малых значений для невязок L_{BS}^i и $\mu_{BS}(t)$ через вектор K_{BS}^i (2.10), что сможет обеспечивать минимум телеметрической нагрузки. Одним из способов уменьшения скорости изменения и размера невязки – применение лучших доступных координат для спутниковых эфемерид и фиксированного приёмника.

2.4. Относительное позиционирование

Цель относительного позиционирования – определение координат искомой точки через отношение к известной точке, являющейся стационарной. Или, относительное позиционирование – есть определение вектора между двумя точками (вектор базовой линии, базовая линия). Если принять, что A – опорная точка, B – неизвестная точка, тогда D_{AB} - вектор базовой линии. Введя соответствующие векторы положения R_A, R_B , составим соотношение:

$$R_B = R_A + D_{AB} \quad (2.28)$$

А компоненты вектора базовой линии есть:

$$D_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Координаты опорной точки должны даваться в системе WGS-84, для этого обычно используют решение по кодовым псевдодальностям (Антонович К.М., 2006).

Относительное позиционирование выполняется как по фазовым, так и по кодовым псевдодальностям, требует выполнения одновременных наблюдений и на опорной, и на искомой точке. Если предположить, что такие одновременные наблюдения имеются в двух пунктах А и В на спутники i и j , можно тем самым образовать линейные комбинации, которые приводят к одинарным, двойным и тройным разностям.

2.4.1. Статическое относительное позиционирование

При съёмке в режиме статики отдельного вектора базовой линии между пунктами А и В, два приёмника должны оставаться стационарными в течение всего периода наблюдений. Рассмотрим одинарные, двойные и тройные разности. Предположим, что на пунктах А и В имеется возможность наблюдать одни и те же спутники i и j в одни и те же эпохи. Число эпох – E , число спутников – s .

Допустим, что уравнения измеренных фаз в единицах расстояния имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_A^i &= \rho_A^i(t) + \lambda N_A^i + c dt_A; \\ \Phi_A^j &= \rho_A^j(t) + \lambda N_A^j + c dt_A; \\ \Phi_B^i &= \rho_B^i(t) + \lambda N_B^i + c dt_B; \\ \Phi_B^j &= \rho_B^j(t) + \lambda N_B^j + c dt_B; \end{aligned}$$

При этом ионосферные и тропосферные задержки, параметры часов спутника не определяются, а считаются уже известными или будут вовсе исключаться при обработке.

Для каждого спутника и каждой эпохи можно выразить одинарные разности:

$$\Phi_{AB}^i(t) = \rho_{AB}^i(t) + \lambda N_{AB}^i + c(dt_B(t) - dt_A(t)) \quad (2.30)$$

$$E * s \geq 3 + s + (E - 1). \quad (2.31)$$

Из соотношения (2.31) можно вывести, что:

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}, \quad (2.32)$$

что соответствует неравенству (2.7). Обратим внимание, что один спутник не даёт решения, так как знаменатель в неравенстве становится нулевым.

Для двойных разностей соотношение между измерениями и неизвестными находится аналогично, как и для одинарных. Отметим, что для одной двойной разности

необходимо два спутника. Для s спутников – $s-1$ двойных разностей в каждую эпоху, следовательно, полное число двойных разностей – $E*(s - 1)$:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) = \rho_{AB}^{ij}(t) + \lambda N_{AB}^{ij} \quad (2.33)$$

$$E * (s-1) \geq 3 + (s-1) \quad (2.34)$$

Из соотношения (2.32) получаем:

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}, \quad (2.35)$$

что абсолютно идентично неравенству, полученному при одинарных разностях. Для недопущения линейно зависимых уравнений при формировании двойных разностей, применяется метод базового/последовательного спутника. Например, если под наблюдением были спутники i, j, k, l, m , то при выборе опорного спутника i , образуются разности по парам ij, ik, il, im . В способе последовательного спутника пары будут выглядеть следующим образом: ij, jk, kl, lm .

Тройные разности представляют собой модель, в которой включаются только три неизвестных координаты искомого пункта. Для одной тройной разности необходимо две эпохи (Антонович К.М., 2006). Тогда, при E эпохах возможны $E - 1$ линейно независимых комбинаций эпох, таким образом:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{ij}(t_{12}) &= \rho_{AB}^{ij}(t_{12}); \\ (s - 1)(E - 1) &\geq 3 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Из соотношения (2.36) получаем:

$$E \geq \frac{s+2}{s-1}, \quad (2.37)$$

Что абсолютно идентично неравенствам, полученным при одинарных и двойных разностях.

Таким образом, в относительном методе может использоваться любая математическая модель: одинарные, двойные, тройные разности (Антонович К.М., 2006).

2.4.2. Кинематическое относительное позиционирование

При этом типе съёмки устройство на известной точке A в начале базовой линии зафиксировано, в то время как второе устройство перемещается и положение определяется в произвольные эпохи (движение выражается через геометрическую дальность в уравнениях для одинарных, двойных и тройных разностях).

Геометрическое расстояние выражается:

$$\rho_B^i = \sqrt{(X^i(t) - X_B)^2 + (Y^i(t) - Y_B)^2 + (Z^i(t) - Z_B)^2}, \quad (2.38)$$

В представленной математической модели в каждую эпоху неизвестны три координаты, следовательно, число неизвестных координат пункта при числе эпох E

равняется $3E$. Соотношения между неизвестными для кинематической съёмки идентично модели одинарных, двойных и тройных разностей для статической съёмки (2.31), (2.34), (2.36).

Ограничение доступных данных для определения положения приёмника в одну эпоху связано с его непрерывным перемещением, но ни одна из моделей (2.31), (2.32), (2.36) не даёт приемлемое решение при $E=1$. Поэтому эти модели модифицируются путём уменьшения числа неизвестных при помощи удаления неизвестных неоднозначностей (то есть неоднозначности считаются заранее известными).

Для одинарных разностей: $s \geq 4$

Для двойных разностей: $s \geq 4$

Таким образом, модели одинарных и двойных разностей требуют для своего решения наблюдение не менее четырёх спутников.

Применение тройных разностей в кинематическом методе довольно ограничено. Вообще, нахождение тройных разностей при двух спутниках в две эпохи и двумя станциями с фиксированными позициями по отношению к двум эпохам не имеет смысла, поскольку положение мобильного приёмника будет меняться от эпохи к эпохе. Но тройные разности можно использовать, если известны координаты подвижного приёмника в определённую эпоху. Исходя из неравенства (19), и уменьшив число неизвестных позиций мобильного приёмника на 3, получим:

$$(s - 1)(E - 1) \geq 3(s - 1), \quad (2.39)$$

что приводит к $s \geq 4$.

Уравнения одинарных разностей с известными неоднозначностями:

$$\text{для одинарной разности} - \Phi_{AB}^i(t) - \lambda N_{AB}^i = \rho_{AB}^i(t) + c(dt_B(t) - dt_A(t)), \quad (2.40)$$

$$\text{для двойной разности} - \Phi_{AB}^{ij}(t) - \lambda N_{AB}^{ij} = \rho_{AB}^{ij}(t). \quad (2.41)$$

Теперь, при наличии хотя бы одной известной позиции движущегося приёмника, уравнения могут быть решены. Идеально, если эта позиция – стартовая. Базовая линия, которая связана с этой стартовой позицией называется стартовым вектором, с которым определяются неоднозначности и все следующие позиции движущегося приёмника.

2.5. PPP метод

2.5.1. Основы PPP

PPP (Precise Point Positioning) – метод получения высокоточных координат местности с помощью глобальной навигационных спутниковых систем посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам всех видимых НКА от сетевого источника поправок, которые принимаются аппаратурой пользователя во время

съёмки, является одним из методов абсолютного определения координат. Данные эфемерид и поправок хранятся в свободном доступе в сети Интернет на серверах специализированных организаций (NASA, Роскосмос, и т.д.).

Файлы эфемерид и поправок могут быть:

- быстрыми (Rapid), то есть доступными через небольшой промежуток времени (от нескольких часов до двух суток);
- предварительно рассчитанными (Predicted) – по ним возможна обработка результатов в режиме реального времени;
- окончательными (Final) – доступны через 2-3 недели.

В данном методе используются близкие к реальному времени коррекции параметров орбит спутников, передающиеся при помощи L-диапазонов. Для обеспечения реализации PPP необходимы точные параметры орбит НКА.

При проведении замеров для достижения наиболее оптимальной точности, должны использоваться двухчастотные приёмники (L1, L2), но в интересах снижения затрат на проведение работ могут использоваться и одночастотные устройства.

В настоящее время для PPP метода ведётся разработка режима реального времени.

2.5.2. Алгоритм работы

Наблюдения, поступающие со всех спутников, обрабатываются вместе с неизвестными (координаты и часы приёмника, тропосферная задержка, неопределённость фазы), для которых впоследствии находится решение.

В большинстве случаев обработки методом PPP, используется последовательный фильтр, суть которого заключается в корректировке поправок в координаты в зависимости от подвижек устройства, а также внесения изменений в поправки бортовых часов спутников. Тропосферная задержка корректируется до стандартной тропосферной активности. Фазовые неоднозначности принимаются за константу.

В других реализациях используется пакетный алгоритм, в котором недопустимо внесение корректировок в поправки. В таком случае, подвижки приёмника оцениваются в каждую эпоху измерений, координаты корректируются для всего интервала наблюдений (в статическом режиме), или в эпоху (кинематический). Тропосферные задержки в таком случае оцениваются с регулярными фиксированными интервалами, а неоднозначности – за весь период наблюдений.

Наклонная тропосферная задержка выражается как функция зенитной задержки (параметра, оцениваемого при обработке методом PPP), посредством функции отображения. Точное моделирование динамики Земли, вызывающее изменения координат неподвижного приёмника в отношении наземной системы отсчёта, обычно основывается

на рекомендациях Международной службы вращения Земли (IERS). Такие модели могут включать в себя:

- твёрдые приливы (деформации земной коры под действием приливообразующих сил);
- вращение Земли;
- нагрузки, вызванные океаном.

Важнейшим фактором, влияющим на характеристики PPP, является количество спутников в поле зрения каждой эпохи и качество наблюдений. Например, большее количество спутников улучшает наблюдаемость зенитной и тропосферной задержек. Поэтому одним из возможных способов повышения надёжности этого метода является совместное наблюдение сетей GPS и ГЛОНАСС. Учитывая, что PPP не является дифференциальным методом, он не может разрешать неопределённости несущей фазы, и их необходимо оценивать с помощью определённых измерений. Данный факт делает период конвергенции более длительным, чем в других методах, что требует более длительного периода наблюдения для измерений в режиме статики.

2.5.3. Точность

Основными факторами, ограничивающими точность метода, являются:

- влияние немодулированных ошибок;
- ограниченные точности эфемерид орбит и бортовых часов.

Метод PPP способен обеспечивать точность порядка нескольких сантиметров при съёмке в статическом режиме и на уровне дециметрового уровня в кинематическом режиме. Однако, при использовании двухчастотного приёмника, можно достичь точности порядка нескольких десятков миллиметров в статическом режиме.

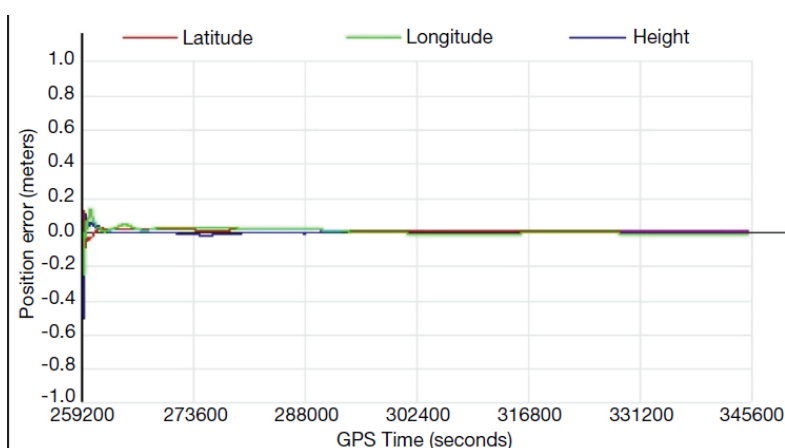


Рис. 6. Результаты позиционирования 24-часового статического набора данных.
(источник: Bisnath S., Gao Y. *Precise Point Positioning — A Powerful Technique with a Promising Future.* // *GPS World.* 2009. №. 4.)

На рис. 6 можно видеть, что ошибки координат могут сводиться к сантиметровому уровню в течение 30 минут. Похожие результаты были получены и при использовании окончательных (Rapid) и финальных (Final) файлов эфемерид и поправок к бортовым часам НКА (рис. 7).

Оценка точности определения местоположения методом PPP по результатам измерений в статическом режиме					
Продолжительность сеанса	Тип решения фазовой многозначности	Тип файлов точных эфемерид и поправок к часам спутников			
		Rapid		Final	
		mxy, м	mh, м	mxy, м	mh, м
1 мин	Кодовое	2,015	2,457	2,215	3,204
10 мин	Плавающее	0,680	0,636	0,701	0,579
30 мин	Плавающее	0,415	0,679	0,404	0,662
60 мин	Фиксированное	0,071	0,377	0,066	0,377

Примечания:
 — mxy — СКП определения плановых координат;
 — mh — СКП определения высот.

Рис. 7. Оценка точности определения местоположения методом PPP по результатам измерений в статическом режиме.

(источник: Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С. Исследования точности метода PPP для навигационно – геодезического обеспечения геофизических работ. // Геопрофи. 2016. №. 3.)

Как видно из рис. 7, различия между решениями при разных типах файлов эфемерид и поправок не превышают нескольких миллиметров, в то время как сами погрешности достигают нескольких дециметров. По рис. 6 и 7 видно, что продолжительность замеров напрямую влияет на конечную точность.

При проведении замеров в режиме кинематики видно, что получаемая точность существенно ниже, нежели при проведении аналогичных измерений в статичном режиме (рис. 8).

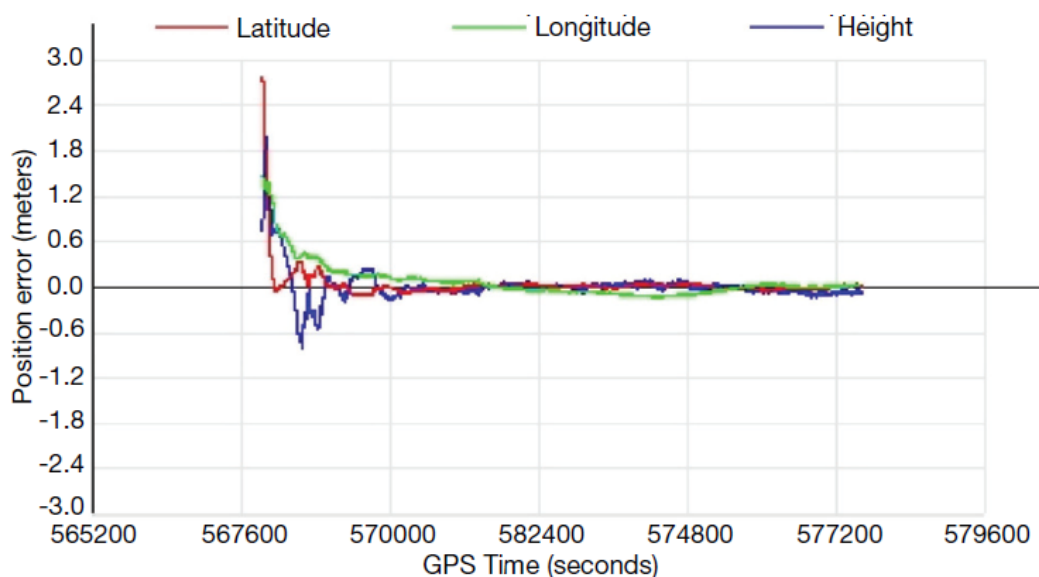


Рис. 8. Результаты позиционирования 24-часового статического набора данных (источник: Bisnath S., Gao Y. Precise Point Positioning — A Powerful Technique with a Promising Future. // GPS World. 2009. №. 4.)

На рис. 8 можно видеть, что ошибки координат могут сводиться к дециметровому уровню в течение 20-30 минут.

Дополнительно улучшить получаемую точность положения PPP можно путём

- дальнейшего уточнения поправок в эфемериды орбит и часов спутников;

- использования целочисленных свойств фазовых неоднозначностей.

Незначительные источники ошибок, включая начальные смещения фазы спутника и приемника, должны быть оценены и удалены в модели измерения, так как они не могут быть устранены при недифференцированной обработке.

2.5.4. Преимущества и недостатки

Преимущества:

- возможность получения плановых координат и высоты с сантиметровой точностью в режиме статики или дециметровой – в режиме кинематики;
- снижение затрат при организации полевых работ, так как отсутствует необходимость в установке базовой станции на точке с известными пространственными координатами;
- обеспечение гораздо большей согласованности позиционирования, чем относительные методы коррекции с использованием базовой станции.

Недостатки:

- высокая стоимость двухчастотного оборудования;
 - чувствительность к срывам измерений фазы;
 - необходимость наличия параметров при переходе из системы WGS-84 к государственной системе координат
- необходимость целочисленного разрешения фазовой неоднозначности.

Глава 3. Практическая часть

3.1. Источники данных и программное обеспечение

При выполнении практической части дипломной работы были использованы данные ГНСС съёмки, полученные в рамках 62 Российской Антарктической экспедиции в районе полярных станций Молодёжная и Прогресс. Данные представляют собой:

- посуточные файлы наблюдения базовой станции в районе аэродрома в режиме статики;
- роверные наблюдения на двух участках (аэродром, путь санно-гусеничного прохода), выполненные в три серии наблюдений для каждого.

В качестве основного программного обеспечения для обработки исходных данных был выбран программный комплекс Trimble Business Center (TBC). TBC позволяет: импортировать измерения в формате RINEX, просматривать и редактировать сеансы наблюдений и вектора, просматривать данные в хронологическом порядке, оценивать согласованность сеансов и входящих в них сессий наблюдений, создавать стили обработки, и использовать их в качестве шаблонов для вычислений в других проектах. Программа обладает широким функционалом создания отчётной документации.

3.2. Обработка измерений

3.2.1. Статические наблюдения базовой станции

В первую очередь, производилась посуточная обработка наблюдений базовой станции, в период с 09.01.17 по 21.02.17 относительным методом. Файлы наблюдений имеют RINEX формат (*.17O). RINEX (Receiver Independent Exchange Format) – стандартный формат обмена исходных данных, позволяющий передавать, хранить посуточные измерения, а так же производить над ними последующую обработку различными приложениями. На рис. 9 представлен пример, как выглядят исходные данные RINEX – файла.

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
JPS2RIN v. 2.0.99 -Unknown- 20170320 121239 UTC PGM / RUN BY / DATE
-Unknown- -Unknown- OBSERVER / AGENCY
baz5 MARKER NAME
1 MARKER NUMBER
BRMR7EJXKAO TPS HIPER_PLUS 3.2 p1 Mar,07,2008 REC # / TYPE / VERS
530891.9508 2184013.9166 -5949248.7932 APPROX POSITION XYZ
-Unknown- TPSHIPER_PLUS NONE ANT # / TYPE
1.2170 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
9 C1 P1 L1 D1 S1 P2 L2 D2 S2# / TYPES OF OBSERV
5.000 INTERVAL
2017 1 9 12 20 20.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2017 1 12 5 16 25.0000000 GPS TIME OF LAST OBS
31 # OF SATELLITES
G 1 16891 16860 16860 16891 16860 16860 16860 16860 16860PRN / # OF OBS
G 2 17942 17923 17923 17942 17923 17923 17923 17923 17923PRN / # OF OBS
G 3 17950 17170 17170 17949 17170 17177 17177 17177 17177PRN / # OF OBS
G 5 16562 16530 16530 16562 16530 16530 16530 16530 16530PRN / # OF OBS
G 6 18753 18589 18589 18753 18589 18597 18597 18597 18597PRN / # OF OBS
G 7 15987 15980 15980 15987 15980 15979 15979 15979 15979PRN / # OF OBS
G 8 15103 15027 15027 15103 15027 15028 15028 15028 15028PRN / # OF OBS
G 9 16867 16824 16824 16867 16824 16823 16823 16823 16823PRN / # OF OBS
G10 16214 16195 16195 16214 16195 16195 16195 16195 16195PRN / # OF OBS
G11 16074 16033 16033 16074 16033 16037 16037 16037 16037PRN / # OF OBS
G12 19010 18936 18936 19010 18936 18939 18939 18939 18939PRN / # OF OBS
G13 16526 16493 16493 16526 16493 16493 16493 16493 16493PRN / # OF OBS
G14 18228 18174 18174 18228 18174 18174 18174 18174 18174PRN / # OF OBS
G15 16316 16285 16285 16316 16285 16285 16285 16285 16285PRN / # OF OBS
G16 15993 15539 15539 15993 15539 15539 15539 15539 15539PRN / # OF OBS
G17 18175 18155 18155 18175 18155 18155 18155 18155 18155PRN / # OF OBS
G18 15425 15398 15398 15425 15398 15398 15398 15398 15398PRN / # OF OBS
G19 19215 19185 19185 19215 19185 19188 19188 19188 19188PRN / # OF OBS
G20 16201 16154 16154 16201 16154 16159 16159 16159 16159PRN / # OF OBS
G21 14777 14746 14746 14777 14746 14746 14746 14746 14746PRN / # OF OBS
G22 17374 17355 17355 17374 17355 17355 17355 17355 17355PRN / # OF OBS
G23 17443 17408 17408 17443 17408 17420 17420 17420 17420PRN / # OF OBS
G24 17516 17483 17483 17516 17483 17485 17485 17485 17485PRN / # OF OBS
G25 18089 18029 18029 18089 18029 18029 18029 18029 18029PRN / # OF OBS
G26 15904 15858 15858 15904 15858 15858 15858 15858 15858PRN / # OF OBS
G27 14588 14546 14546 14588 14546 14548 14548 14548 14548PRN / # OF OBS
G28 16511 16458 16458 16511 16458 16458 16458 16458 16458PRN / # OF OBS
G29 17149 17093 17093 17149 17093 17093 17093 17093 17093PRN / # OF OBS
G30 16183 16141 16141 16183 16141 16141 16141 16141 16141PRN / # OF OBS
G31 17632 17546 17546 17632 17546 17547 17547 17547 17547PRN / # OF OBS
G32 17861 17818 17818 17861 17818 17820 17820 17820 17820PRN / # OF OBS
END OF HEADER

```

Рис. 9. Данные RINEX - файла

При обработке в качестве опорной была выбрана станция DAV1, входящая в систему IGS, как наиболее близкая к региону проведения исследований. Посуточные данные для неё были взяты с сервиса SOPAC Data Browser (Scripps Orbit and Permanent Array Center – база данных по ГНСС). Формат файлов имел разрешение сжатого RINEX (*.17Z), что потребовало в свою очередь его переформатизации, поскольку ТВС способен читать только стандартный формат RINEX файлов. Конвертирование производилось при помощи утилиты Natanaka. На рис. 10 представлен пример форматирования исходных данных.

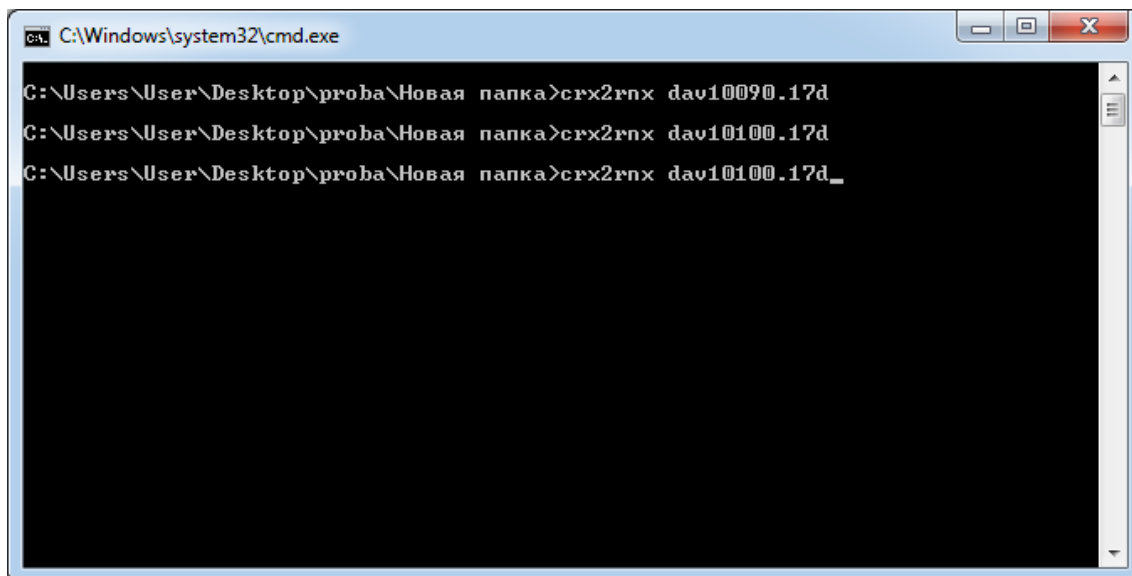


Рис. 10. Форматирование исходных данных в RINEX формат

Ниже будут описаны работы, проводимые непосредственно в Trimble Business Center.

При создании нового проекта, в первую очередь необходимо задать исходную систему координат, в которой будут производиться расчёты. Из удобства и универсальности, была выбрана система координат UTM (Universal Transverse Mercator) (рис. 11).

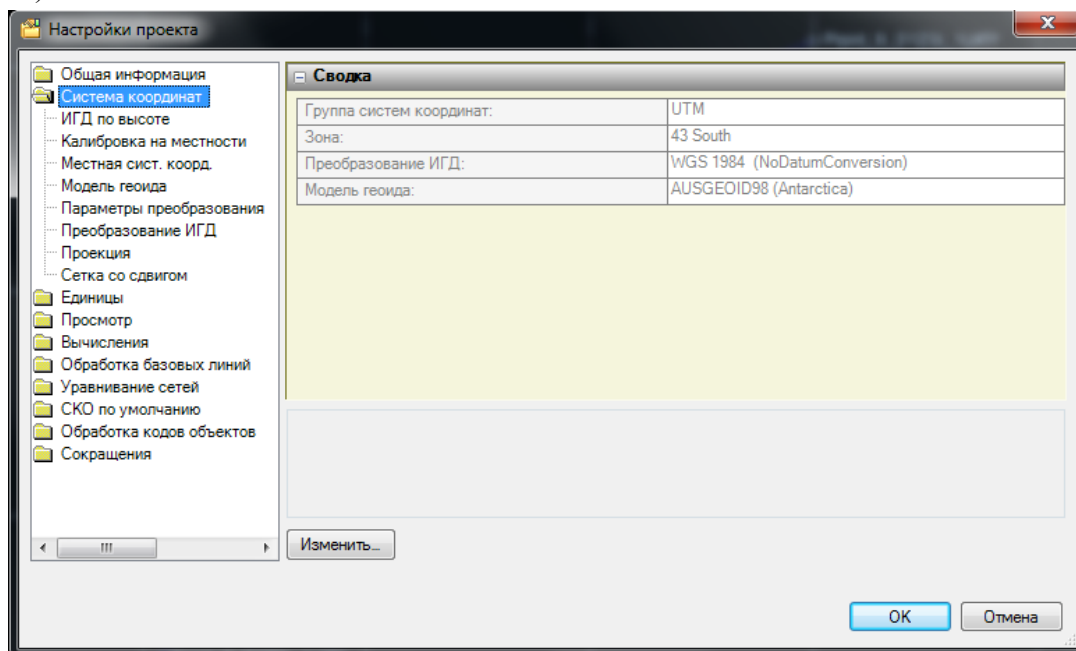


Рис. 11. Задание системы координат

Далее необходимо было загрузить уже готовые к импорту файлы в исходный проект. На рис. 12 представлено окно проверки данных, где так же присутствует возможность задать тип антенны и приёмника (HiPer Plus).

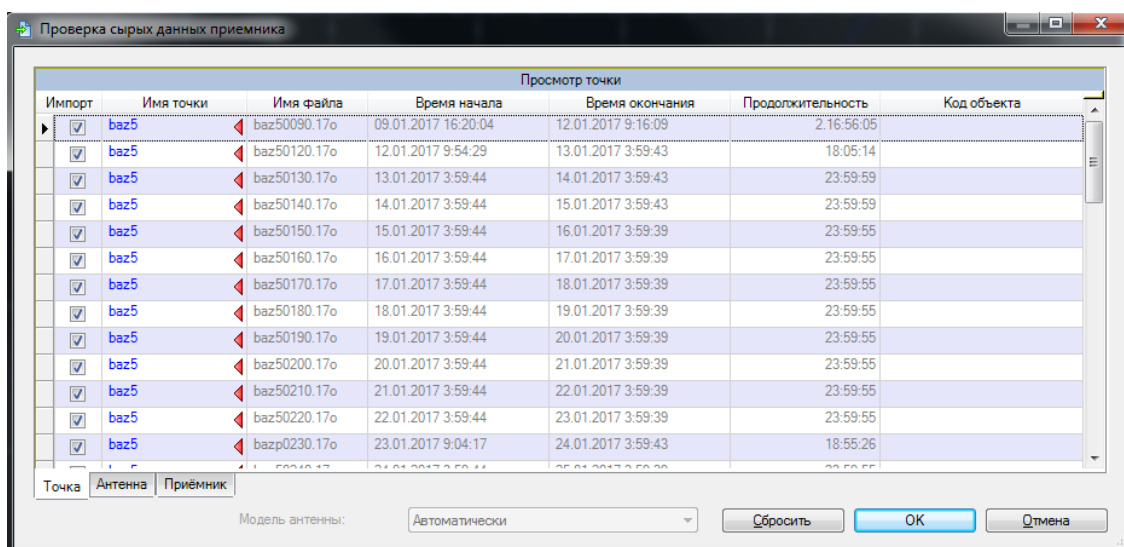


Рис. 12. Окно импорта и проверки данных

На рис.13 изображён вид в плане импортированных сырых данных.

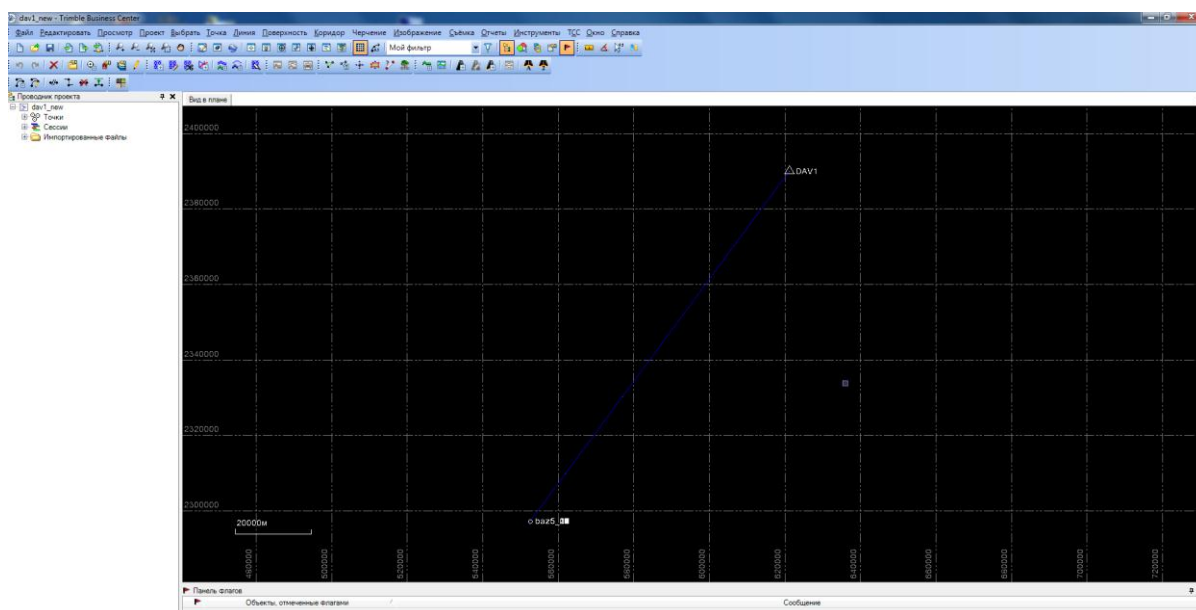


Рис.13. Вид импортированных данных в плане

Перед началом обработки, также было необходимо подгрузить уточнённые эфемериды спутников на необходимый временной диапазон (рис. 14).

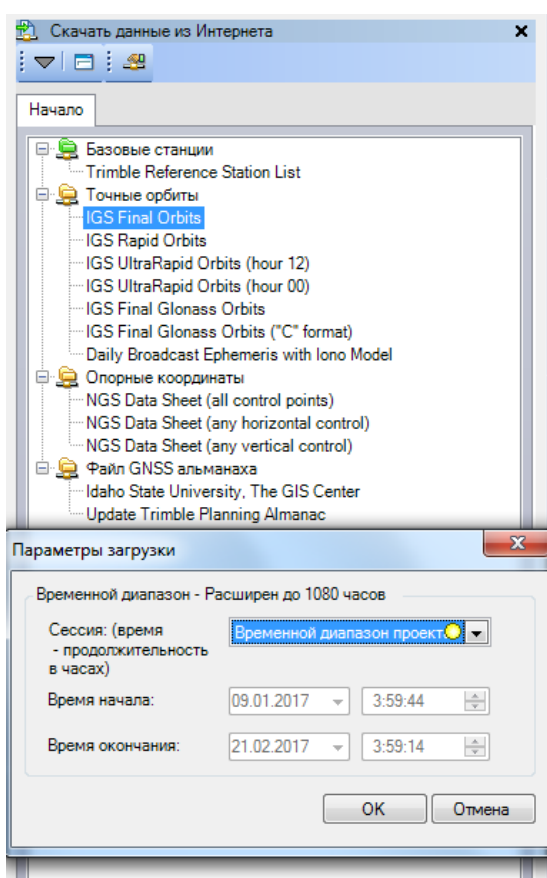


Рис. 14. Загрузка уточнённых эфемерид спутников

Загрузка данных производилась автоматически с сайта NASA (National American Space Agency).

Далее подготовленные сырые данные подверглись обработке (рис. 15).

Сохранение	Измерение	Тип реш	Точн. в плане (95%)	Точн. по высоте (95%)	СКО	Длина
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_1_0123	Фиксиро	0.007	0.013	0.001	332.838
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_2_0123	Фиксиро	0.003	0.005	0.001	454.580
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_3_0123	Фиксиро	0.003	0.005	0.001	366.055
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_4_0123	Фиксиро	0.003	0.005	0.000	284.075
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_5_0123	Фиксиро	0.003	0.005	0.000	217.022
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_6_0123	Фиксиро	0.004	0.007	0.001	199.633
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_7_0123	Фиксиро	0.003	0.006	0.001	334.989
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_8_0123	Фиксиро	0.003	0.005	0.001	422.653
<input checked="" type="checkbox"/>	baz5 --- Point_9_0123	Фиксиро	0.003	0.004	0.000	392.989

Рис. 15. Образец обработки базовых линий и полученная точность

Итоговым результатом обработки данных базовой станции является получение уравненных прямоугольных координат (по X, Y, Z) на каждый день наблюдений. Ознакомиться с соответствующей сводной таблицей можно в приложении 1, Т.1.

В качестве проверки полученных результатов было решено использовать сервис Канадской службы природных ресурсов (Natural Resources Canada), являющейся геодезической информационно – справочной системой. Обработка ведётся методом PPP, что является одним из ключевых критериев выбора. Используются точные эфемериды спутниковых орбит GNSS для получения скорректированных координат с постоянной «абсолютной» точностью независимо от того, где находится пользователь и независимо от близости к известным базовым станциям. Имеется возможность отправлять данные наблюдений RINEX с одно - или двухчастотных приемников, работающих в статическом или кинематическом режиме, через Интернет и восстанавливать улучшенные позиционные уточнения в Канадской пространственной справочной системе (CSRS) и Международной наземной опорной системе (ITRF). Поддерживает системы GPS и ГЛОНАСС.

Пользователь получает общую информацию (название станции, дату наблюдений), информацию об оборудовании, координаты в ITRF, ошибки от априорных значений и движения по орбите, отклонение часов.

Образец обработки конкретного суточного измерения представлен на рис. 16.

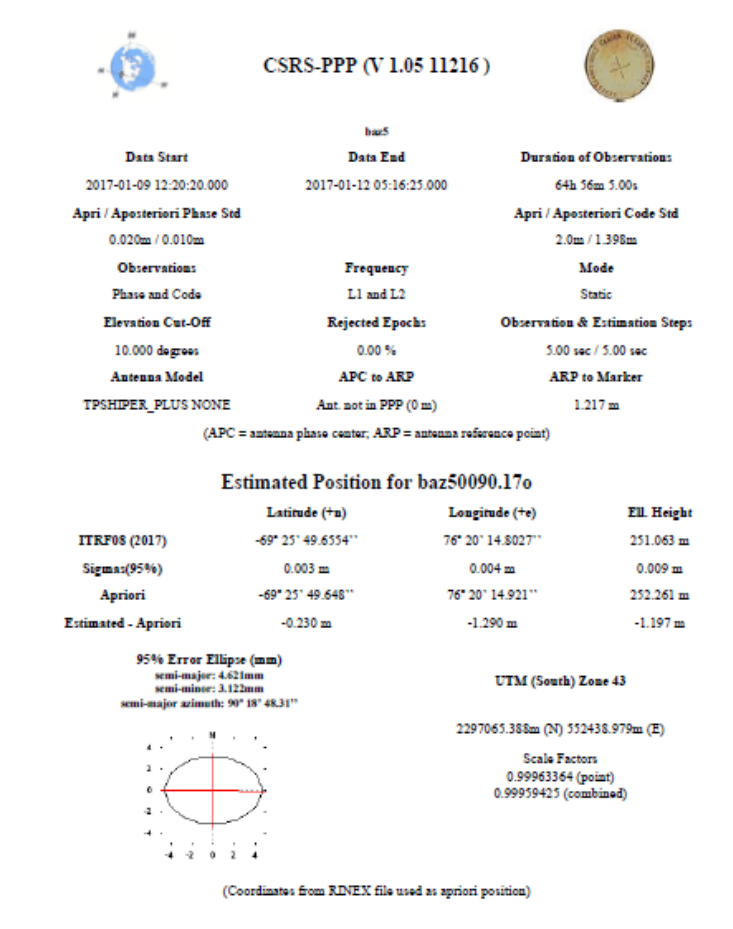


Рис. 16. Обработка суточного наблюдения

Ознакомиться с результатами обработки суточных измерений при помощи канадского сервиса можно при помощи сводной таблицы в приложении 1, Т.2.

3.2.2. Построение трендов и сопоставление результатов

Обработка полученных рядов производилась в MS Excel. Применялась функция ЛИНЕЙН, которая считает статистику для ряда с применением МНК, чтобы вычислить прямую линию, которая наилучшим образом аппроксимирует имеющиеся данные и возвращает их в массив, который описывает полученную прямую. Уравнение прямой линии имеет вид:

$$y = mx + b,$$

где:

y, x – значения, уже известные для расчёта (y – посуточные прямоугольные координаты,

m, b – коэффициенты, находятся непосредственно через функцию ЛИНЕЙН.

Важно, что сперва находятся коэффициенты m, b через известные значения y, x , а затем по ним определяется значение линейного тренда через уравнение прямой линии.

Таким образом, линейные тренды считались поочерёдно, отдельно для результатов, полученных при помощи ТВС, и отдельно для результатов, полученных канадским сервисом. Стоит заметить, что тренды считались отдельно для каждой из полученных координат (x, y) , и высоты.

Результаты расчёта линейных трендов представлены ниже (рис. 17, рис. 18).

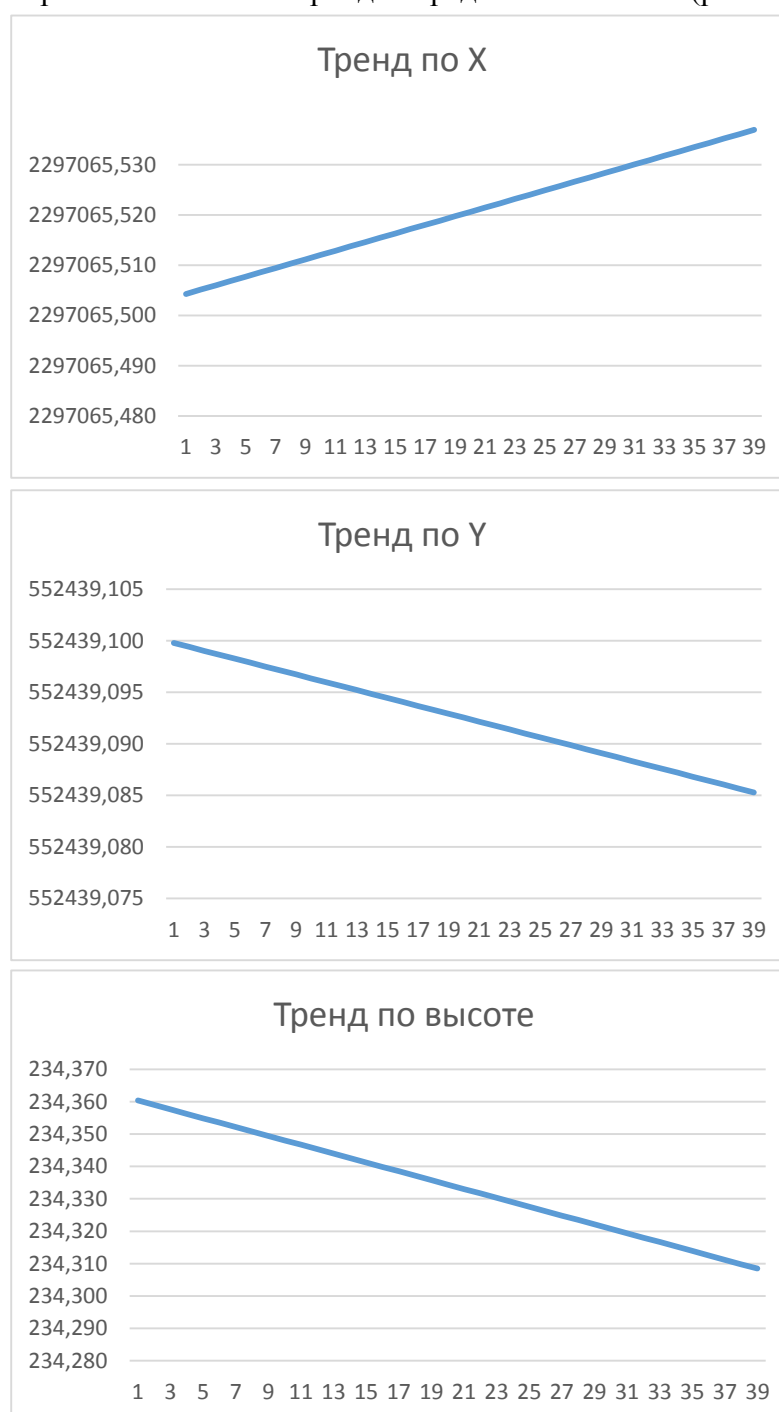


Рис. 17. Линейные тренды для результатов, полученных при помощи ТВС

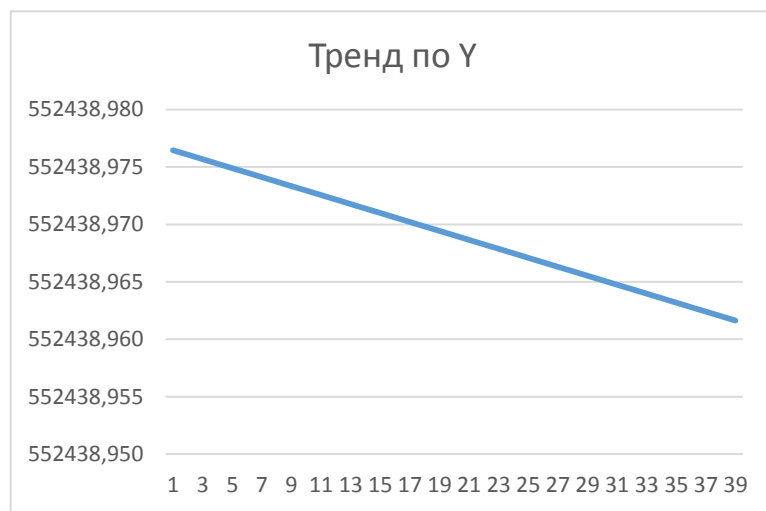


Рис. 18. Линейные тренды для результатов, полученных при помощи канадского сервиса

Анализируя полученные результаты, видно, что по всем осям в обоих случаях смещения примерно одинаковы.

На основании анализа полученных результатов можно сказать, что результаты обработки в ТВС относительным методом примерно соответствуют результатам, полученным при использовании иностранного сервиса, использующего PPP метод.

Кроме этого, были рассчитаны направление движения и общее смещение координат центра базовой станции за весь период наблюдений (09.01.17 – 21.02.17), результаты представлены в таблицах (1-2).

Таблица 1. Расчёт скорости смещения и направления координат по данным, полученным относительным методом

День	Север X (м)	Восток Y (м)	Высота H (м)	Смещение (м)			Дирекц угол	Направле ние движения
				X	Y	H		
1	2297065,500	552439,101	234,366	0,023	-0,013	-0,045	330°31'27"	С - З
39	2297065,523	552439,088	234,321					
скорость смещения (м/день)				0,0006	-0,0003	-0,0012		

:

Таблица 2. Расчёт скорости смещения и направления координат по данным, полученным PPP методом

День	Север X (м)	Восток Y (м)	Высота H (м)	Смещение (м)			Дирекц угол	Направле ние движения
				X	Y	H		
1	2297065,388	552438,979	251,063	0,025	-0,020	-0,052	321°20'25"	С - З
39	2297065,413	552438,959	251,011					
скорость смещения (м/день)				0,0006	-0,0005	-0,0013		

3.3.1. Роверные наблюдения в режиме кинематики

Следующим этапом было исследование роверных наблюдений. Как было сказано в пункте 3.1, измерения проводились в течение месяца на двух участках, а именно: в районе аэродрома и в районе санно-гусеничного прохода, выполненные в три серии наблюдений для каждого участка. Задача состояла в обработке каждой серии наблюдений для каждого участка в отдельности. Для района аэродрома измерения проводились в промежуток с 23.01.17 по 17.02.17, и с 12.01.17 по 19.02.17 для района санно-гусеничного прохода соответственно.

Исходные данные имели формат *.tps, поэтому необходимо было их конвертировать в формат, читаемый Trimble Business Center. Конвертация проводилась при помощи программного продукта Topcon Tools.

С процессом настройки проекта и импорта файлов можно ознакомиться в пункте 3.2.1, поскольку он полностью аналогичен описанному выше.

Роль опорных пунктов играли измерения базовой станции на определённую дату, но уже с уточнёнными координатами, полученными в пункте 3.2.1, и ознакомиться с которыми можно в приложении 1, Т.1. На рис. 19 изображён образец процесса внесения уточнённых координат и присвоения им статуса опорных.

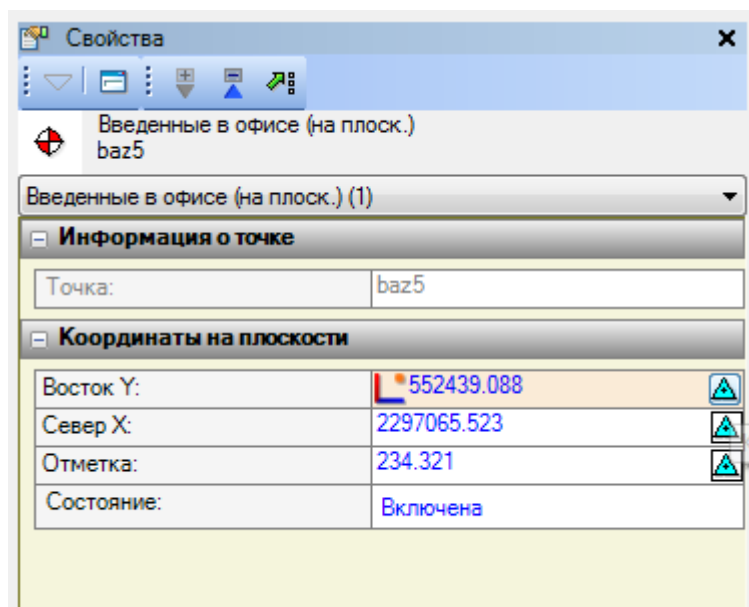


Рис. 19. Уточнение координат опорного пункта

Образец исходного вида в плане для первой серии наблюдений на участке в районе аэродрома изображён на рис. 20.

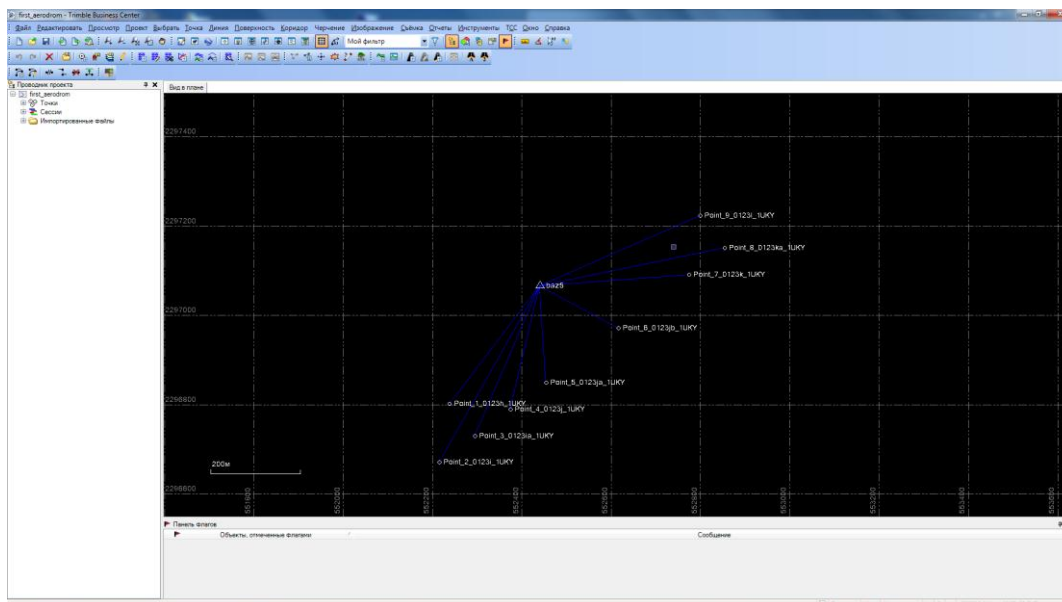


Рис. 20. Вид в плане готовых к обработке данных

Процесс загрузки уточнённых эфемерид спутников и уравнивания базовых линий аналогичен описанному в пункте 3.2.1.

Результатом обработки данных роверных наблюдений является получение уравненных прямоугольных координат (по X, Y, H) на каждую из точек для трёх серий наблюдения на обоих участках. Ознакомиться с соответствующими сводными таблицами можно в приложении 2, Т. 1 – 2.

3.3.2. Анализ серий наблюдений

На основании полученных результатов рассчитывается направление движения и смещения каждой из точек относительно первой - второй, второй - третьей и первой - третьей серий наблюдений соответственно. Образец полученных результатов представлен в таблице:

Таблица 3. Направление и смещение точек относительно первой – второй серии наблюдений, район аэродрома

Точка	X, Y, H	Первая - вторая серия наблюдений (23.01.17 – 10.02.17)		
		смещение (м)	скорость смещения (м/день)	Дир. угол
1	Восток Y	0,009	0,0005	52°7'30"
	Север X	0,007	0,0004	
	Высота H	0,002	0,0001	

Полные таблицы с окончательными результатами находятся в приложениях 3 - 4.

На основе полученных результатов, видно, что смещения групп точек на двух разных участках наблюдений имеют определённые закономерности. Так, полученные смещения точек, расположенных в районе аэродрома, имеют миллиметровые, либо сантиметровые значения, что подтверждается тем, что ледник в районе первого участка наблюдений малоподвижен. И наоборот, смещения точек в районе санно-гусеничного прохода варьируются от метровых до миллиметровых значений, что может говорить о неравномерных подвижках поверхности в районе второго участка наблюдений. Направления дирекционных углов в основном одинаковы для каждой серии наблюдений, за исключением нескольких случаев, и имеют примерно одинаковое значение. В свою очередь, скорости смещения точек на обоих участках наблюдений между всеми сериями наблюдений примерно одинаковы.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы была изучена литература по возможным методам обработки спутниковых геодезических измерений. Рассмотрены абсолютные, относительные и дифференциальные методы обработки измерений. Отдельное внимание уделено методу PPP.

В результате работы выполнена оценка стабильности положения базовой станции, получены тренды ее движения и координаты на каждые сутки мониторинга. С учетом полученных решений для базовой станции, получены оценки положения точек исследуемых объектов на каждый период наблюдений. Вычислены направления и скорости движений этих точек.

Полученные материалы могут быть использованы для анализа поведения ледового покрытия на исследуемых участках.

Список литературы

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
2. Крюков С.В. Особенности совместной обработки фазовых измерений в системах ГЛОНАСС и GPS. // Геодезия и картография. 2001. №. 12. С. 10 – 13.
3. Постоногов, К.Л. Технологические схемы спутниковых наблюдений. // Геодезия и картография. 1994. №. 10. С. 7 – 9.
4. Бойко, Е.Г. Приведение измерений к центрам пунктов в пространственных геодезических сетях. //Геодезия и картография. 2001. №. 10. С. 7 – 10.
5. Глушков, В.В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. – М.: Институт политического и военного анализа. – 2002. – 448 с.
6. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. – М.: Изд-во стандартов. – 2001. – 11 с.
7. Залуцкий, В.Т. О преобразовании координат в спутниковой технологии. // Геодезия и картография. 2000. №. 7. С. 17 – 24.
8. Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С. Исследования точности метода PPP для навигационно – геодезического обеспечения геофизических работ. // Геопрофи. 2016. №. 3. С. 10 – 15.
9. Антонович К.М., Липатников Л.А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС измерений (Precise Point Positioning). // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. №. 4. С. 44 – 47.
10. Bisnath S., Gao Y. Precise Point Positioning — A Powerful Technique with a Promising Future. // GPS World. 2009. №. 4. С. 43–50.
11. Chasagne O. One centimeter accuracy with PPP. // Inside GNSS. 2012. №. 2. С. 49–54.

Интернет ресурсы

12. <http://www.bernese.unibe.ch/> - website of the Bernese GNSS Software
13. <https://www.novatel.com/> - официальный сайт компании NovAtel
14. <http://www.trimble.com/> - официальный сайт компании Trimble
15. <https://www.topconpositioning.com/> - официальный сайт компании Topcon
16. <https://www.nasa.gov/> - официальный сайт «NASA»
17. <https://www.roscosmos.ru/> - официальный сайт госкорпорации «Роскосмос»
18. <http://sopac.ucsd.edu/map.shtml> - база данных по ГНСС SOPAC

19. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php> - онлайн сервис по обработке данных PPP методом от Канадской службы природных ресурсов
20. <https://4analytics.ru/trendi/o-lineienom-trende.html> - справочник по применению линейного тренда в MS Excel
21. <https://www.gsc-europa.eu/bernese-gnss-software-from-bern-university> - официальный сайт Европейского агентства глобальных навигационных спутниковых систем
22. www.astro.tsu.ru/ - сайт кафедры астрономии Томского Государственного Университета

Приложение 1. Уравненные прямоугольные координаты базовой станции.

Таблица 1. Прямоугольные координаты, уравненные относительным методом

День	Север X (м)	Восток Y (м)	Высота H (м)
1	2297065,500	552439,101	234,366
2	2297065,499	552439,101	234,366
3	2297065,502	552439,102	234,358
4	2297065,503	552439,100	234,356
5	2297065,499	552439,101	234,356
6	2297065,505	552439,101	234,349
7	2297065,505	552439,099	234,354
8	2297065,513	552439,099	234,368
9	2297065,507	552439,098	234,334
10	2297065,508	552439,095	234,334
11	2297065,510	552439,103	234,360
12	2297065,506	552439,098	234,350
13	2297065,510	552439,095	234,338
14	2297065,514	552439,090	234,338
15	2297065,517	552439,092	234,342
16	2297065,524	552439,079	234,347
17	2297065,516	552439,091	234,345
18	2297065,519	552439,092	234,319
19	2297065,519	552439,090	234,331
20	2297065,521	552439,091	234,337
21	2297065,521	552439,093	234,343
22	2297065,517	552439,093	234,322
23	2297065,589	552439,091	234,325
24	2297065,589	552439,089	234,328
25	2297065,522	552439,087	234,330
26	2297065,525	552439,086	234,318
27	2297065,527	552439,087	234,328
28	2297065,525	552439,086	234,316
29	2297065,529	552439,089	234,326
30	2297065,531	552439,089	234,320
31	2297065,530	552439,086	234,312
32	2297065,528	552439,086	234,318
33	2297065,527	552439,087	234,317
34	2297065,526	552439,087	234,316
35	2297065,526	552439,088	234,315
36	2297065,525	552439,088	234,314
37	2297065,524	552439,089	234,313
38	2297065,523	552439,089	234,312
39	2297065,523	552439,088	234,321

День	Север X (м)	Восток Y (м)	Высота H (м)	СКО (X)	СКО (Y)	СКО (H)
1	2297065,388	552438,979	251,063	0,003	0,004	0,009
2	2297065,385	552438,977	251,055	0,003	0,005	0,009
3	2297065,385	552438,978	251,056	0,003	0,004	0,010
4	2297065,388	552438,976	251,052	0,002	0,004	0,010
5	2297065,388	552438,976	251,053	0,004	0,006	0,011
6	2297065,391	552438,975	251,051	0,004	0,005	0,013
7	2297065,391	552438,973	251,047	0,004	0,005	0,012
8	2297065,391	552438,974	251,045	0,005	0,006	0,015
9	2297065,394	552438,976	251,044	0,004	0,006	0,014
10	2297065,394	552438,975	251,037	0,004	0,006	0,014
11	2297065,394	552438,974	251,042	0,004	0,006	0,014
12	2297065,391	552438,973	251,040	0,004	0,006	0,015
13	2297065,397	552438,968	251,040	0,003	0,005	0,012
14	2297065,397	552438,967	251,040	0,003	0,005	0,010
15	2297065,397	552438,966	251,040	0,003	0,005	0,011
16	2297065,396	552438,965	251,040	0,004	0,004	0,011
17	2297065,396	552438,964	251,040	0,004	0,006	0,010
18	2297065,396	552438,964	251,040	0,004	0,003	0,013
19	2297065,396	552438,963	251,040	0,005	0,006	0,013
20	2297065,395	552438,962	251,040	0,005	0,006	0,014
21	2297065,404	552438,966	251,032	0,005	0,006	0,014
22	2297065,403	552438,970	251,030	0,003	0,005	0,010
23	2297065,403	552438,970	251,022	0,003	0,003	0,011
24	2297065,400	552438,972	251,036	0,005	0,007	0,015
25	2297065,407	552438,969	251,031	0,004	0,007	0,015
26	2297065,406	552438,968	251,031	0,003	0,005	0,014
27	2297065,405	552438,967	251,031	0,005	0,006	0,013
28	2297065,404	552438,966	251,031	0,004	0,007	0,011
29	2297065,403	552438,965	251,031	0,003	0,003	0,010
30	2297065,402	552438,964	251,031	0,003	0,004	0,012
31	2297065,413	552438,963	251,025	0,003	0,004	0,010
32	2297065,413	552438,963	251,033	0,004	0,006	0,014
33	2297065,413	552438,965	251,022	0,004	0,005	0,013
34	2297065,413	552438,965	251,020	0,004	0,005	0,013
35	2297065,413	552438,964	251,021	0,004	0,005	0,013
36	2297065,413	552438,962	251,016	0,004	0,005	0,013
37	2297065,413	552438,963	251,016	0,004	0,005	0,013
38	2297065,416	552438,963	251,019	0,003	0,004	0,010
39	2297065,413	552438,964	251,022	0,004	0,004	0,010

Таблица 2. Прямоугольные координаты, уравненные методом РРР

Приложение 2. Уравненные роверные наблюдения

Таблица 1. Район аэродрома

Точка	Х,У,Н (м)	Первая серия наблюдений	Вторая серия наблюдений	Третья серия наблюдений
1	Восток Y	552237,231	552237,24	552237,235
	Север X	2296801,069	2296801,076	2296801,062
	Высота Н	230,77	230,772	230,769
2	Восток Y	552214,369	552214,375	552214,398
	Север X	2296670,587	2296670,578	2296670,587
	Высота Н	232,3	232,308	232,312
3	Восток Y	552293,849	552293,852	552293,859
	Север X	2296729,68	2296729,678	2296729,669
	Высота Н	232,103	232,102	232,104
4	Восток Y	552373,278	552373,291	552373,303
	Север X	2296789,302	2296789,296	2296789,283
	Высота Н	231,766	231,763	231,766
5	Восток Y	552453,143	552453,16	552453,17
	Север X	2296849,058	2296849,049	2296849,049
	Высота Н	231,388	231,393	231,391
6	Восток Y	552614,83	552614,839	552614,851
	Север X	2296971,073	2296971,065	2296971,054
	Высота Н	229,974	229,98	229,981
7	Восток Y	552772,955	552772,97	552772,983
	Север X	2297090,423	2297090,41	2297090,396
	Высота Н	227,558	227,559	227,567
8	Восток Y	552852,882	552852,831	552852,842
	Север X	2297150,681	2297150,679	2297150,661
	Высота Н	225,894	225,912	225,916
9	Восток Y	552798,99	552798,999	552799,017
	Север X	2297222,751	2297222,74	2297222,727
	Высота Н	225,747	225,75	225,759

Таблица 2. Район санно – гусеничного прохода

Точка	Х,У,Н (метр)	Первая серия наблюдений	Вторая серия наблюдений	Третья серия наблюдений
1	Восток У	557959,188	557956,693	557954,585
	Север Х	2272024,667	2272025,314	2272025,869
	Высота Н	780,566	780,484	780,473
2	Восток У	558074,184	558071,412	558069,249
	Север Х	2271352,723	2271353,692	2271354,383
	Высота Н	782,1	781,95	781,899
3	Восток У	557868,954	557866,661	557864,758
	Север Х	2273100,221	2273100,824	2273101,388
	Высота Н	780,731	780,638	780,557
4	Восток У	556546,285	556544,031	556542,151
	Север Х	2273554,296	2273554,956	2273555,536
	Высота Н	751,061	751,048	751,027
5	Восток У	556645,995	556644,208	556642,695
	Север Х	2275060,906	2275061,332	2275061,679
	Высота Н	746,179	746,1	746,06
6	Восток У	555960,586	555958,936	555957,528
	Север Х	2275801,807	2275801,238	2275801,649
	Высота Н	732,73	732,662	732,562
7	Восток У	555415,773	555414,019	
	Север Х	2275521,46	2275521,929	
	Высота Н	723,546	723,459	
8	Восток У	555370,971	555369,541	555368,45
	Север Х	2277809,274	2277809,821	2277810,336
	Высота Н	699,979	699,951	699,866
9	Восток У	554296,08	554294,601	554293,411
	Север Х	2277741,424	2277741,965	2277742,492
	Высота Н	684,591	684,529	684,507
10	Восток У	553882,618	553881,137	553880,094
	Север Х	2278920,783	2278921,4	2278921,83
	Высота Н	676,963	676,818	676,74
11	Восток У	552471,33	552469,925	552468,816
	Север Х	2278998,707	2278999,089	2278999,401
	Высота Н	632,616	632,419	632,306
12	Восток У	551962,561	551961,662	551960,963
	Север Х	2280215,892	2280216,217	2280216,492
	Высота Н	621,218	621,132	621,119
13	Восток У	551352,444	551351,834	551351,29
	Север Х	2280702,971	2280703,195	2280704,04
	Высота Н	619,038	620,118	618,878
14	Восток У	549581,437	549580,867	549580,294
	Север Х	2280561,997	2280562,249	2280562,493
	Высота Н	607,037	607,047	607,006

15	Восток Y	549779,238	549778,649	549778,132
	Север X	2281777,422	2281777,844	2281778,198
	Высота H	593,138	593,046	592,978
16	Восток Y	549103,234	549102,591	549102,061
	Север X	2282432,902	2282433,318	2282433,653
	Высота H	559,458	559,511	559,398
17	Восток Y	549061,821	549061,178	549060,614
	Север X	2282378,145	2282378,504	2282378,818
	Высота H	560,284	560,246	560,271
18	Восток Y	549077,008	549076,42	549075,919
	Север X	2283340,467	2283340,859	2283341,177
	Высота H	543,449	543,411	543,407
19	Восток Y	549950,242	549949,683	549949,234
	Север X	2284923,559	2284924,115	2284924,539
	Высота H	539,857	539,794	539,778
20	Восток Y	549292,64	549292,112	549291,655
	Север X	2285560,239	2285560,655	2285561,008
	Высота H	524,117	524,084	524,08
21	Восток Y	550370,947	550370,743	550370,565
	Север X	2286612,687	2286613,099	2286613,419
	Высота H	522,664	522,614	522,59
22	Восток Y	551201,177	551201,161	551201,246
	Север X	2287767,441	2287767,925	2287768,299
	Высота H	496,067	495,944	495,93
23	Восток Y	550223,35	550223,022	550222,907
	Север X	2287962,645	2287963,076	2287963,325
	Высота H	491,798	491,602	491,576
24	Восток Y	550374,839	550374,792	550374,723
	Север X	2289267,58	2289267,792	2289267,938
	Высота H	453,657	453,605	453,607
25	Восток Y	550799,882	550799,89	550799,876
	Север X	2290759,943	2290760,077	2290760,202
	Высота H	410,37	410,325	410,332
26	Восток Y	551126,273	551126,245	551126,24
	Север X	2291854,543	2291855,211	2291855,29
	Высота H	376,559	376,181	376,169
27	Восток Y	550516,928	550516,877	550516,826
	Север X	2292004,052	2292004,278	2292004,298
	Высота H	370,629	370,605	370,582

Приложение 3. Результаты обработки роверных наблюдений в районе аэродрома

Точка	X,Y,H	первая – вторая серия наблюдений (23.01.17 – 10.02.17)			вторая – третья серия наблюдений (10.02.17 – 17.02.17)			первая – третья серия наблюдений (23.01.17 – 17.02.17)		
		смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол
1	Y	0,009	0,0005	52°7'30"	-0,005	-0,0006	199°39'14"	0,004	0,0001	150°15'18"
	X	0,007	0,0004		-0,014	-0,0016		-0,007	-0,0003	
	H	0,002	0,0001		-0,003	-0,0003		-0,001	0,0000	
2	Y	0,006	0,0003	146°18'36"	0,023	0,0026	68°37'46"	0,029	0,0010	90°00'00"
	X	-0,009	-0,0005		0,009	0,0010		0	0,0000	
	H	0,008	0,0004		0,004	0,0004		0,012	0,0004	
3	Y	0,003	0,0002	123°41'24"	0,007	0,0008	142°7'30"	0,01	0,0004	137°43'35"
	X	-0,002	-0,0001		-0,009	-0,0010		-0,011	-0,0004	
	H	-0,001	-0,0001		0,002	0,0002		0,001	0,0000	
4	Y	0,013	0,0007	65°13'30"	0,012	0,0013	137°17'26"	0,025	0,0009	127°14'5"
	X	-0,006	-0,0003		-0,013	-0,0014		-0,019	-0,0007	
	H	-0,003	-0,0002		0,003	0,0003		0	0,0000	
5	Y	0,017	0,0009	117°53'50"	0,01	0,0011	90°00'00"	0,027	0,0010	108°26'6"
	X	-0,009	-0,0005		0	0,0000		-0,009	-0,0003	
	H	0,005	0,0003		-0,002	-0,0002		0,003	0,0001	
6	Y	0,009	0,0005	131°38'1"	0,012	0,0013	132°30'38"	0,021	0,0008	132°8'15"
	X	-0,008	-0,0004		-0,011	-0,0012		-0,019	-0,0007	
	H	0,006	0,0003		0,001	0,0001		0,007	0,0003	
7	Y	0,015	0,0008	130°54'52"	0,013	0,0014	137°7'16"	0,028	0,0010	133°57'30"
	X	-0,013	-0,0007		-0,014	-0,0016		-0,027	-0,0010	
	H	0,001	0,0001		0,008	0,0009		0,009	0,0003	
8	Y	-0,051	-0,0027	267°45'15"	0,011	0,0012	148°34'14"	-0,04	-0,0014	243°26'6"
	X	-0,002	-0,0001		-0,018	-0,0020		-0,02	-0,0007	
	H	0,018	0,0009		0,004	0,0004		0,022	0,0008	
9	Y	0,009	0,0005	140°42'38"	0,018	0,0020	125°50'16"	0,027	0,0010	131°38'1"
	X	-0,011	-0,0006		-0,013	-0,0014		-0,024	-0,0009	
	H	0,003	0,0002		0,009	0,0010		0,012	0,0004	

Приложение 4. Результаты обработки роверных наблюдений в районе санно-гусеничного прохода

Точка	X,Y,H	первая – вторая серия наблюдений (13.01.17 – 02.02.17)			вторая – третья серия наблюдений (02.02.17 – 19.02.17)			первая – третья серия наблюдений (13.01.17 – 19.02.17)		
		смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол
1	Y	-2,495	-0,1188	284° 32' 16"	-2,108	-0,1240	284° 45' 1"	-4,603	-0,1211	284° 38' 6"
	X	0,647	0,0308		0,555	0,0326		1,202	0,0316	
	H	-0,082	-0,0039		-0,011	-0,0006		-0,093	-0,0024	
2	Y	-2,772	-0,1320	289° 16' 5"	-2,163	-0,1272	287° 43' 0"	-4,935	-0,1299	288° 35' 30"
	X	0,969	0,0461		0,691	0,0406		1,66	0,0437	
	H	-0,15	-0,0071		-0,051	-0,0030		-0,201	-0,0053	
3	Y	-2,293	-0,1092	284° 44' 1"	-1,903	-0,1119	286° 30' 30"	-4,196	-0,1104	285° 32' 33"
	X	0,603	0,0287		0,564	0,0332		1,167	0,0307	
	H	-0,093	-0,0044		-0,081	-0,0048		-0,174	-0,0046	
4	Y	-2,254	-0,1073	286° 19' 15"	-1,88	-0,1106	287° 8' 44"	-4,134	-0,1088	286° 41' 48"
	X	0,66	0,0314		0,58	0,0341		1,24	0,0326	
	H	-0,013	-0,0006		-0,021	-0,0012		-0,034	-0,0009	
5	Y	-1,787	-0,0851	283° 24' 30"	-1,513	-0,0890	282° 55' 2"	-3,3	-0,0868	283° 11' 0"
	X	0,426	0,0203		0,347	0,0204		0,773	0,0203	
	H	-0,079	-0,0038		-0,04	-0,0024		-0,119	-0,0031	
6	Y	-1,65	-0,0786	250° 58' 24"	-1,408	-0,0828	286° 16' 22"	-3,058	-0,0805	267° 2' 32"
	X	-0,569	-0,0271		0,411	0,0242		-0,158	-0,0042	
	H	-0,068	-0,0032		-0,1	-0,0059		-0,168	-0,0044	
7	Y	-1,754	-0,0835	284° 58' 12"						
	X	0,469	0,0223							
	H	-0,087	-0,0041							
8	Y	-1,43	-0,0681	290° 55' 58"	-1,091	-0,0642	295° 16' 10"	-2,521	-0,0663	292° 50' 38"
	X	0,547	0,0260		0,515	0,0303		1,062	0,0279	
	H	-0,028	-0,0013		-0,085	-0,0050		-0,113	-0,0030	
9	Y	-1,479	-0,0704	290° 5' 31"	-1,19	-0,0700	293° 53' 11"	-2,669	-0,0702	291° 48' 32"
	X	0,541	0,0258		0,527	0,0310		1,068	0,0281	
	H	-0,062	-0,0030		-0,022	-0,0013		-0,084	-0,0022	

Точка	X,Y,H	первая – вторая серия наблюдений (23.01.17 – 10.02.17)			вторая – третья серия наблюдений (10.02.17 – 17.02.17)			первая – третья серия наблюдений (23.01.17 – 17.02.17)		
		смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол
10	Y	-1,481	-0,0705	292° 37' 2"	-1,043	-0,0614	292° 24' 18"	-2,524	-0,0664	292° 31' 46"
	X	0,617	0,0294		0,43	0,0253		1,047	0,0276	
	H	-0,145	-0,0069		-0,078	-0,0046		-0,223	-0,0059	
11	Y	-1,405	-0,0669	285° 12' 37"	-1,109	-0,0652	285° 42' 47"	-2,514	-0,0662	285° 25' 57"
	X	0,382	0,0182		0,312	0,0184		0,694	0,0183	
	H	-0,197	-0,0094		-0,113	-0,0066		-0,31	-0,0082	
12	Y	-0,899	-0,0428	289° 52' 32"	-0,699	-0,0411	291° 28' 32"	-1,598	-0,0421	290° 34' 47"
	X	0,325	0,0155		0,275	0,0162		0,6	0,0158	
	H	-0,086	-0,0041		-0,013	-0,0008		-0,099	-0,0026	
13	Y	-0,61	-0,0290	290° 9' 50"	-0,544	-0,0320	327° 13' 38"	-1,154	-0,0304	312° 48' 37"
	X	0,224	0,0107		0,845	0,0497		1,069	0,0281	
	H	1,08	0,0514		-1,24	-0,0729		-0,16	-0,0042	
14	Y	-0,57	-0,0271	293° 51' 2"	-0,573	-0,0337	293°3'57"	-1,143	-0,0301	293° 27' 30"
	X	0,252	0,0120		0,244	0,0144		0,496	0,0131	
	H	0,01	0,0005		-0,041	-0,0024		-0,031	-0,0008	
15	Y	-0,589	-0,0280	305° 37' 13"	-0,517	-0,0304	304°24'1"	-1,106	-0,0291	305° 3' 16"
	X	0,422	0,0201		0,354	0,0208		0,776	0,0204	
	H	-0,092	-0,0044		-0,068	-0,0040		-0,16	-0,0042	
16	Y	-0,643	-0,0306	302° 54' 6"	-0,53	-0,0312	302°17'45"	-1,173	-0,0309	302° 37' 44"
	X	0,416	0,0198		0,335	0,0197		0,751	0,0198	
	H	0,053	0,0025		-0,113	-0,0066		-0,06	-0,0016	
17	Y	-0,643	-0,0306	299° 10' 32"	-0,564	-0,0332	299°6'23"	-1,207	-0,0318	299° 8' 36"
	X	0,359	0,0171		0,314	0,0185		0,673	0,0177	
	H	-0,038	-0,0018		0,025	0,0015		-0,013	-0,0003	
18	Y	-0,588	-0,0280	303° 41' 24"	-0,501	-0,0295	302°24'16"	-1,089	-0,0287	303° 6' 12"
	X	0,392	0,0187		0,318	0,0187		0,71	0,0187	
	H	-0,038	-0,0018		-0,004	-0,0002		-0,042	-0,0011	

Точка	X,Y,H	первая – вторая серия наблюдений (23.01.17 – 10.02.17)			вторая – третья серия наблюдений (10.02.17 – 17.02.17)			первая – третья серия наблюдений (23.01.17 – 17.02.17)		
		смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол	смещение (м)	Скорость (м/день)	дир. угол
19	Y	-0,559	-0,0266	314° 50' 45"	-0,449	-0,0264	313°21'35"	-1,008	-0,0265	314° 11' 35"
	X	0,556	0,0265		0,424	0,0249		0,98	0,0258	
	H	-0,063	-0,0030		-0,016	-0,0009		-0,079	-0,0021	
20	Y	-0,528	-0,0251	308° 14' 2"	-0,457	-0,0269	307°41'1"	-0,985	-0,0259	307° 58' 46"
	X	0,416	0,0198		0,353	0,0208		0,769	0,0202	
	H	-0,033	-0,0016		-0,004	-0,0002		-0,037	-0,0010	
21	Y	-0,204	-0,0097	333° 39' 28"	-0,178	-0,0105	330°54'54"	-0,382	-0,0101	332° 26' 31"
	X	0,412	0,0196		0,32	0,0188		0,732	0,0193	
	H	-0,05	-0,0024		-0,024	-0,0014		-0,074	-0,0019	
22	Y	-0,016	-0,0008	358° 6' 24"	0,085	0,0050	12°48'15"	0,069	0,0018	4° 35' 52"
	X	0,484	0,0230		0,374	0,0220		0,858	0,0226	
	H	-0,123	-0,0059		-0,014	-0,0008		-0,137	-0,0036	
23	Y	-0,328	-0,0156	322° 43' 41"	-0,115	-0,0068	335°12'37"	-0,443	-0,0117	326° 55' 1"
	X	0,431	0,0205		0,249	0,0146		0,68	0,0179	
	H	-0,196	-0,0093		-0,026	-0,0015		-0,222	-0,0058	
24	Y	-0,047	-0,0022	347° 29' 59"	-0,069	-0,0041	334°42'16"	-0,116	-0,0031	342° 2' 47"
	X	0,212	0,0101		0,146	0,0086		0,358	0,0094	
	H	-0,052	-0,0025		0,002	0,0001		-0,05	-0,0013	
25	Y	0,008	0,0004	3° 24' 60"	-0,014	-0,0008	353°36'34"	-0,006	-0,0002	358° 40' 23"
	X	0,134	0,0064		0,125	0,0074		0,259	0,0068	
	H	-0,045	-0,0021		0,007	0,0004		-0,038	-0,0010	
26	Y	-0,028	-0,0013	357° 35' 59"	-0,005	-0,0003	356°22'43"	-0,033	-0,0009	357° 28' 14"
	X	0,668	0,0318		0,079	0,0046		0,747	0,0197	
	H	-0,378	-0,0180		-0,012	-0,0007		-0,39	-0,0103	
27	Y	-0,051	-0,0024	347° 17' 0"	-0,051	-0,0030	291°24'47"	-0,102	-0,0027	337° 28' 46"
	X	0,226	0,0108		0,02	0,0012		0,246	0,0065	
	H	-0,024	-0,0011		-0,023	-0,0014		-0,047	-0,0012	

