

УДК 528.2:629.78

А.И. ГОРЬ, Р.В. НЕЖАЛЬСКИЙ, Р.Н. ФЕДОРЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТОБРАБОТКИ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ В СЕТИ ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрены возможности двух программных комплексов для постобработки GPS измерений. Экспериментальным путем показана достижимость геодезических уровней точности определения координат искомым точек в сети станций при длинах базовых линий порядка 60 ... 100 км. Установлен характер зависимости точности определения координат точки от времени накопления информации при использовании статического режима работы спутникового геодезического оборудования.

**глобальная спутниковая навигационная система, GPS, дифференциальная коррекция, сети перманентных станций, геодезия, обработка GPS-измерений, статический режим измерений**

### Введение

Для повышения точности, доступности и надежности геодезических измерений с использованием глобальных навигационных систем (GNSS) в Харьковской области планируется развертывание сети перманентных базовых станций, работающих с системой GPS NAVSTAR (США) [1]. Использование сети позволяет упростить и удешевить потребителям процесс определения координат в дифференциальном режиме с точностью, достаточной для геодезических приложений [2]. Пользователю сети больше не требуется устанавливать собственную базовую станцию, ему достаточно одного мобильного приемника (ровера). Это уменьшает стоимость необходимого оборудования и повышает производительность труда. Более того, потребителю не обязательно знать, где расположен ближайший опорный пункт государственной сети. Однако на пути становления такой региональной сети возникает ряд научно-практических задач. Для получения координат потребителя с сантиметровой точностью необходимо использование более совершенных специализированных алгоритмов постобработки результатов измерений в условиях разреженной сети перманентных станций. Поэтому *важной задачей* является определение возможностей существующего про-

граммного обеспечения (ПО). На сегодняшний день на рынке представлен ряд специализированных приложений, предназначенных для реализации сетевых решений: Geonap (фирмы Geo++) [3], GrafNet (WAYPOINT Consulting Inc.), Bernese (AIUB).

Кроме того, существует множество стандартных программ обработки спутниковых измерений, которые не предназначены для работы в сети, однако также могут быть использованы в ряде случаев: Pinnacle (Topcon Positioning Systems) [4], Trimble Geomatic Office (Trimble), Ashtech Solution (Thales Navigation). В данной статье производится анализ двух коммерчески распространяемых пакетов Geonap и Pinnacle, которые являются типичными представителями двух вышеуказанных групп. Geonap является специализированным ПО для работы в сетях перманентных станций. Pinnacle предназначен для постобработки GPS-данных в локальном дифференциальном режиме.

### Описание исследуемых программных продуктов

Программный комплекс Geonap имеет модульную структуру. Каждый такой исполняемый модуль производит один из этапов обработки GPS-данных, направленный на вычисление координат интере-

сующих пользователя точек. Процесс вычисления GPS-векторов сводится к последовательному запуску соответствующих модулей. В зависимости от типа решаемой задачи используется тот или иной набор модулей.

Запуск модулей можно производить двумя способами.

*Первый способ* состоит в запуске соответствующих модулей из командной строки. При этом, кроме самого модуля, необходимо вводить дополнительные опции, позволяющие управлять алгоритмом обработки измерений. Этот способ является достаточно трудоемким при ручном вводе соответствующих команд и опций. Однако при помощи дополнительных программных средств имеется возможность осуществить автоматизацию процесса вычислений.

*Второй способ* – использование входящей в комплект поставки графической оболочки GNHPPS. Этот способ является попыткой создателей программы частично автоматизировать процесс обработки. При этом последовательность выполнения операций определяется шаблонами, так называемыми, «темплейтами». Несколько типичных шаблонов входят в стандартный комплект поставки программы. В зависимости от особенностей той или иной задачи, существует возможность редактирования существующих и создания новых шаблонов. Однако графическая оболочка GNHPPS обладает рядом недостатков, основными из которых являются некоторые неточности в работе и некорректность отображения некоторых пунктов меню.

Программное обеспечение Pinnacle представляет собой стандартное Windows-приложение. Все действия по выбору режима обработки и управлению процессом вычисления GPS-векторов производятся из графической оболочки программы.

Любой программный продукт постобработки GPS измерений условно можно разбить на следующие блоки:

- блок импорта GPS-данных;
- блок работы с «сырыми данными»;
- блок обработки GPS-векторов;
- блок уравнивания;
- блок создания отчетов о результатах работы программы;
- блок планирования GPS наблюдений.

**Блок импорта** предназначен для загрузки файлов наблюдений GPS-приемников в программу. При этом возможны следующие варианты:

- загрузка файлов непосредственно из приемника;
- загрузка файлов с жесткого диска персонального компьютера или контроллера;
- загрузка файлов с серверов удаленного доступа, используя соответствующие WEB-протоколы.

В настоящее время каждый производитель GPS аппаратуры для накопления информации, передаваемой со спутников, использует свой формат данных. Для обработки в одном программном обеспечении измерений, накопленных приемниками различных фирм, используется унифицированный формат Rinex. Большинство современных программ постобработки GPS-измерений кроме формата Rinex поддерживают входные форматы фирм Ashtech и Trimble.

**Блок работы с «сырыми данными»** предназначен для выполнения следующих основных операций:

- переименование полученных в процессе измерений точек;
- задание/изменение соответствующих высот антенн;
- задание/изменение используемых при измерениях типов антенн;
- изменение времени наблюдения на точке;
- получение дополнительной информации:
  - навигационные координаты;
  - количество наблюдаемых спутников;

- отношение сигнал/шум для каждого наблюдаемого спутника;
- геометрический фактор;
- тип приемника, используемого для накопления информации на точке;
- экспорт информации в файл формата Rinex.

**Блок обработки GPS-векторов** предназначен для выполнения следующих основных операций:

- ввод и назначение координат опорных пунктов;
- выбор режима обработки (статический, кинематический или «Stop&Go»);
- настройка режима обработки (изменение угла маски; обработка с использованием одной или двух несущих частот;
- обработка с использованием кодовой информации или информации, содержащейся как в коде, так и в фазе несущей;
- использование или неиспользование соответствующих моделей атмосферы);
- анализ результатов вычисления координат измеряемых точек.

**Блок уравнивания** используется в тех случаях, когда в проекте имеется более чем одна опорная точка. Определение координат неизвестных точек происходит относительно всех имеющихся в проекте опорных точек.

**Блок создания отчетов о результатах работы программы** предназначен для формирования и выдачи пользователю каталогов координат определяемых точек в требуемой системе координат. Как правило, в таких отчетах приводится среднеквадратическое отклонение (СКО) определения каждой координаты. Кроме каталогов координат отчет может содержать информацию о длинах соответствующих векторов, типах решений (плавающим, фиксированным или частичным), полученных при вычислениях векторов и т.д. Большинство современных программ постобработки GPS измерений позволяют не только

сохранить сформированный отчет в текстовый файл или в HTML файл, но и экспортировать результаты в различные САД-приложения для дальнейшей обработки.

Перед проведением геодезических измерений с использованием GPS-оборудования необходимо провести сеанс планирования наблюдений. Это позволит определить оптимальное время наблюдения для каждой измеряемой точки. Для этого используется **блок планирования GPS наблюдений**. Входной информацией для блока планирования являются альманахи (расписание движения спутников по орбитам), предполагаемая дата проведения измерений, примерные координаты измеряемых точек или района проведения работ. Выходной информацией являются графики видимости спутников и графики DOP (геометрического фактора). Руководствуясь такими графиками, пользователь может определить оптимальный интервал времени наблюдения для измеряемых точек. Априорная информация о наличии препятствий (лесополос, различных сооружений и т.д.), окружающих определяемую точку, может быть использована для более точного нахождения промежутков времени наблюдения на точке.

На основании вышеизложенной информации краткий сравнительный анализ программных комплексов Geonap и Pinnacle приведен в табл. 1.

## Постановка задачи

Задачей данной работы является оценка точности статических GPS измерений координат точек в сети перманентных базовых станций. При этом необходимо получить сантиметровые уровни точности определяемых точек на больших длинах базовых линий (30 ... 150 км) и установить зависимость точности определения координат точки от времени накопления информации на точке. С этой целью была произведена проверка работоспособности программных комплексов Pinnacle и Geonap. Оценка

Таблица 1

## Основные характеристики программных продуктов Pinnacle и Geopar

Операции	Geopar	Pinnacle
Импорт данных в программу	Только с жесткого диска компьютера в форматах фирм Ashtech, Trimble; Rinex; файлы точных эфемерид.	Непосредственно с приемников фирмы TPS, с жесткого диска компьютера, с серверов удаленного доступа в форматах TPS, Ashtech; Rinex; файлы точных эфемерид.
Задание / изменение используемых при измерениях типов антенн	Возможность ввода параметров антенн пользователем.	В базе данных программы имеется информация о фазовых центрах антенн фирм Ashtech, Trimble, Leica, NovAtel, Topcon/Javad, Spectra Precision, Sokkia. Возможность ввода параметров антенн пользователем.
Работа с «сырыми данными»	Возможность просмотра навигационных координат, информации о типе антенны и приемника.	Возможность просмотра навигационных координат, информации о типе антенны и приемника. В графическом виде может быть представлена информация о количестве наблюдаемых спутников, отношении сигнал/шум для каждого наблюдаемого спутника, значении геометрического фактора, фазы несущей, псевдодалности, значении доплеровского сдвига.
Системы координат	Работа в геодезических системах координат. Возможность задания новой системы координат, используя 7 параметров перехода.	Работа в геодезических, картографических и местных системах координат. Возможность задания новой системы координат, используя 7 параметров перехода.
Режимы обработки	Статика, Stop&Go	Статика, кинематика, Stop&Go.
Настройка режима обработки	Программа позволяет менять угол маски, исключать из обработки вторую частоту. Имеется возможность не использовать при обработке соответствующие модели ионосферы и тропосферы.	Программа позволяет менять угол маски, исключать из обработки вторую частоту. Имеется возможность не использовать при обработке соответствующие модели ионосферы и тропосферы.
Отчет о выполнении работы программы	Последовательность действий, выполняемых программой, в виде соответствующих сообщений сохраняется в текстовом файле. Там же сохраняются и полученные координаты точек. При этом экспорт координат в другие программные продукты возможен только вручную.	Программа позволяет формировать различные типы отчетов. Пользователь может настроить собственный формат отчета. Программа позволяет сохранить сформированные отчеты в текстовом файле и в HTML-файле. Имеется возможность экспортировать координаты полученных точек в формат AutoCAD.
Возможность автоматизации процесса обработки	При использовании дополнительных программных средств процесс обработки может быть полностью автоматизирован.	Программа не позволяет автоматизировать процесс обработки.

программного обеспечения проводилась на примере американской сети CORS (Continuously Operating Reference Stations), а именно ее сегмента, состоящего из четырех станций. Схематическое расположение станций приведено на рис. 1.

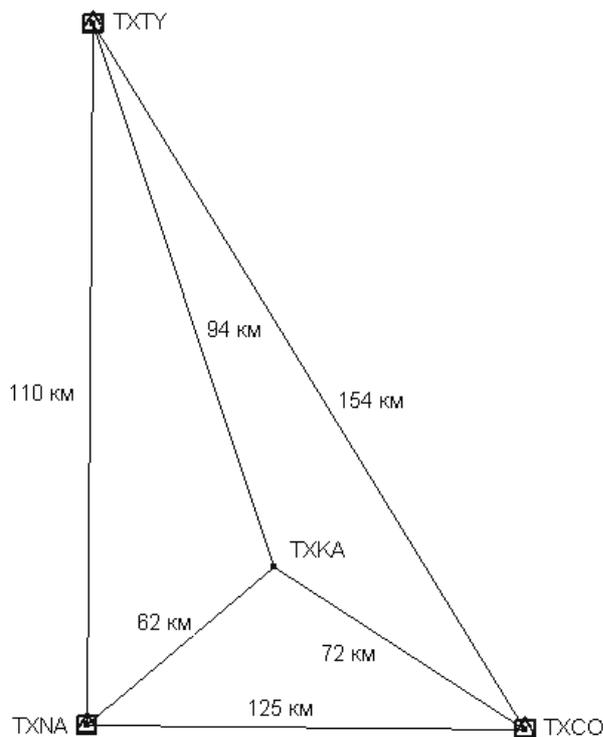


Рис. 1. Сегмент перманентных GPS-станций в системе CORS

Сегмент состоит из станций TXNA, TXY, TXCO, TXKA. Файлы наблюдений являются двухчастотными с интервалом записи 5 секунд и углом маски  $10^\circ$ . В качестве эталонных координат были взяты координаты фазовых центров антенн, представленных на сайте NGS (National Geodetic Survey).

Для проведения эксперимента в качестве опорных использовались станции TXNA, TXY, TXCO с суточными наблюдениями. Как станция с неизвестными координатами использовалась TXKA. Опорные координаты рассматриваемых станций в системе WGS 84 приведены в табл. 2.

Для анализа брались следующие интервалы наблюдений: 1 час, 30 мин, 20 мин, 10 мин, 5 мин. При этом обработка измерений определяемой станции проводилась как на двух частотах (L1 и L2), так и на

одной (L1), что характерно для украинских пользователей, так как одночастотные приемники более распространены в этом регионе. Возможность получения координат с геодезической точностью при использовании одночастотных приемников имеет большое значение, так как это существенно сокращает стоимость необходимого для измерений оборудования.

Эксперимент проводился следующим образом: координаты TXKA определялись на основе собственных измерений и суточных измерений трех базовых станций. Затем вычислялось расстояние между полученными и опорными значениями координат. Для каждого эксперимента проводилась серия из 10 опытов для усреднения погрешностей расчета координат. Более подробно описание каждого эксперимента приведено ниже.

### Решение задачи

При проведении экспериментов использовались настройки программ «по умолчанию». При обработке двухчастотных измерений в программном комплексе Pinnacle установка «по умолчанию» означает, что на больших длинах базовых линий обработка производится, в так называемом, режиме «Wide Lane». При этом используется вычисление широкополосных комбинаций с разрешением неоднозначностей. При обработке одночастотных измерений в Pinnacle использовался режим «L1 only». В этом случае вычисления производятся только на частоте L1.

Этот режим является стандартным для обработки измерений одночастотных приемников в Pinnacle.

Обработка в Geopar производилась с использованием «темплейтов», поставляемых разработчиком вместе с программой. При обработке одночастотных измерений в файле определяемой станции была отключена обработка измерений на частоте L2. При этом данные базовых станций обрабатывались в двухчастотном режиме.

Таким образом, было проведено четыре эксперимента:

1. Определение координат точки в программном обеспечении Pinnacle в двухчастотном режиме измерений.

2. Определение координат точки в программном обеспечении Pinnacle при имитации одночастотного режима измерений.

3. Определение координат точки в ПО Geonap в двухчастотном режиме измерений.

4. Определение координат точки в ПО Geonap при имитации одночастотного режима измерений.

Усредненные погрешности оценки координат приведены в табл. 3.

По результатам, приведенным в табл. 3, на рис. 2 построены графики.

Таблица 2

Координаты станций в системе WGS 84

Координаты	TXNA	TXTY	TXCO	TXKA
X, м	-616256,43867	-507532,69181	-616883,05858	-591734,96797
Y, м	-5376488,42730	-5375534,53260	-5308885,53140	-5347650,66910
Z, м	3364415,68449	3383937,25452	3469404,56897	3414094,07195

Таблица 3

Усредненные погрешности оценки координат

№ эксп.	Время накопления данных, мин.					Примечания
	60	30	20	10	5	
1	0,01861768	0,021579993	0,027579094	0,033964727	0,101566004	Pinnacle L1+L2
2	0,049430777	0,045429204	0,076255896	0,152215838	0,258153463	Pinnacle L1
3	0,008104387	0,010422077	0,03862593	0,020499908	0,310084698	Geonap L1+L2
4	0,075300494	0,109337881	0,216172213	0,337904838	0,572065981	Geonap L1

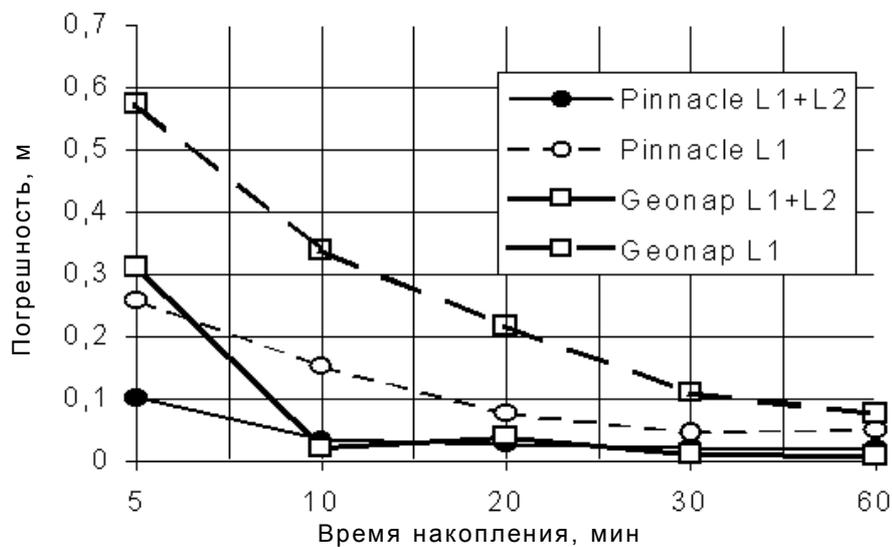


Рис. 2. Погрешности оценки координат станций

## Выводы

Оба программных продукта показали неожиданно хорошие результаты при реализации сетевой обработки измерений на больших длинах базовых линий. Однако необходимо учитывать, что в реальных условиях следует ожидать ухудшения точности, так как в экспериментах в качестве определяемого использовался приемник, расположенный на открытой местности.

Как и следовало ожидать, использование двухчастотных измерений значительно повышает точность оценки координат.

Полученные результаты следует считать предварительными, так как использовались режимы обработки «по умолчанию». Особенно это касается программного обеспечения Geonap, так как данный продукт имеет широкие возможности по настройке процесса обработки.

Из графиков видно, что в двухчастотном режиме обработки качество оценок координат двух программных комплексов сравнимо между собой. Следует ожидать повышения качества оценивания координат в программном обеспечении Geonap при более детальной настройке программы под конкретный вид сети. В еще большей мере это касается одночастотного режима, где Pinnacle неожиданно показал значительно лучшие результаты. В большинстве геодезических задач требуемая точность определения координат составляет величину порядка 5 см.

Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что при использовании одночастотного оборудования такой уровень точности может быть достигнут при времени накопления не менее 30 минут.

При использовании двухчастотного оборудования такой уровень точности может быть достигнут при времени накопления не менее 10 минут.

Необходимо учесть, что для получения более достоверных результатов требуется проведение серии экспериментов в реальных условиях, где мобильная станция будет подвержена влиянию различных дестабилизирующих факторов, ухудшающих качество измерений, таких как ограничение видимости спутников и многолучевое распространение.

Данная работа была выполнена в рамках проекта 2167 «Региональная система высокоточных спутниковых геодезических определений», финансируемого Украинским научно-технологическим центром (УНТЦ).

## Литература

1. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и её применение в геодезии. – М.: Геодезиздат, 1999. – 270 с.
2. Топографо-геодезична та картографічна діяльність. Законодавчі та нормативні акти. – Вінниця: Укргеодезкартографія, 2000. – 408 с.
3. Geonap. Reference manual. – Garbsen, Germany: Geo++, 2004. – 270 p.
4. Pinnacle. Руководство пользователя. – М.: Дженс, 2002. – 300 с.

*Поступила в редакцию 4.04.05*

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук А.В. Прокопов, Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков.