

Реализация режима позиционирования PPP в ГНСС-приемниках компании НТЛаб

Д. Черняковский¹, А. Зиновьев², А. Мамаев³, К. Юрьев⁴,
А. Новичков⁵, С. Жуков⁶, В. Карцев⁷

УДК 621.396 | ВАК 05.11.03

В настоящее время режим высокоточного автономного позиционирования (ВАП; англоязычный термин – PPP (Precise Point Positioning), который будет использоваться далее) является одним из наиболее актуальных и востребованных режимов работы ГНСС-оборудования. Наряду с RTK (Real Time Kinematic – кинематика реального времени) PPP относится к классу высокоточных режимов позиционирования, позволяющих работать на сантиметровом, а в ряде случаев – миллиметровом, уровне точности. В статье рассказывается о реализации режима PPP в ГНСС-приемниках компании НТЛаб.

Принято различать два основных варианта режима PPP: 1) PPP-AR (PPP with Ambiguity Resolution), предполагающий целочисленное разрешение фазовых неоднозначностей и имеющий точность, сравнимую с RTK, и 2) PPP с «плавающими» фазовыми неоднозначностями, точность которого составляет величину порядка 5–10 см в горизонтальной плоскости.

По сравнению с режимом работы RTK PPP имеет ряд преимуществ:

- отсутствие необходимости иметь ГНСС-измерения от базовой станции, что для случая уже развернутой сети базовых станций означает минимизацию потока данных в канале связи между сервером и ГНСС-приемником, и, соответственно, уменьшение общей стоимости оборудования. Различие в общей стоимости оборудования становится особенно заметным в случае использования «стандартной» пары база-ровер, предполагающей наличие двух физических приемников для работы в режиме RTK;
- в отличие от режима статической виртуальной базовой станции (VRS), нет необходимости в использовании двунаправленного канала связи. Единое поле PPP-поправок можно применять для любого

местоположения, входящего в зону покрытия данной сети базовых станций. Также для режима кинематики не возникает проблемы разрыва решения при удалении от начальной виртуальной базовой станции;

- возможность работы в труднодоступных районах на одинаково высоком уровне точности (например, для мониторинга трубопроводов при помощи беспилотных летательных аппаратов);
- инфраструктура PPP с точки зрения провайдера PPP-сервиса допускает охват гораздо большей зоны работы вплоть до глобального (общемирового) уровня при умеренном количестве общего числа базовых станций;
- вычисление PPP-поправок выполняется по информации, полученной от всей сети базовых станций, что позволяет в некоторых случаях лучше сгладить эффекты, присущие данной базовой станции и связанные с особенностями окружающей среды и месторасположения станции (многолучевость и т. п.);
- преобразование к единой системе координат на стороне аппаратуры потребителей выполняется автоматически (PPP-поправки уже включают в себя эту информацию).

Основным недостатком режима PPP принято считать медленную сходимости (порядка 15–30 мин) по сравнению с RTK. Однако если плотность сети базовых станций достаточно хорошая, возможна передача тропосферных и ионосферных поправок для выбранного района, что позволяет существенно уменьшить время сходимости и сделать его практически равным времени получения RTK-решения с целочисленными фазовыми неоднозначностями.

¹ ООО «НТЛаб-СК», директор.

² ООО «НТЛаб-СК», главный конструктор направления ГНСС, alexei.zinoviev@ntlab-sk.ru.

³ ООО «НТЛаб-СК», ведущий специалист.

⁴ ООО «НТЛаб-СК», начальник отдела.

⁵ ООО «НТЛаб-СК», инженер.

⁶ ООО «НТЛаб-СК», инженер.

⁷ ООО «НТЛаб-СК», инженер.

Учитывая востребованность режима PPP для приложений, требующих высокоточного определения координат потребителя, была поставлена задача реализации режима PPP в приемниках НТЛаб. Данная статья содержит описание методологии выполненной работы, а также демонстрирует достигнутый уровень точности при работе PPP как в режиме постобработки, так и в режиме реального времени. Но сначала в следующем разделе приводится краткая информация о ГНСС-приемниках компании НТЛаб.

ГНСС-ПРИЕМНИКИ НТЛаб ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ

В настоящее время компания НТЛаб располагает линейкой ГНСС-приемников геодезического класса точности, поддерживающих сигналы ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou, NavIC (IRNSS), QZSS, SBAS в частотных диапазонах L1, L2, L5 и других. В частности, уникальной особенностью приемников НТЛаб является поддержка S-band сигнала индийской навигационной системы NavIC (2492,028 МГц). Важно отметить, что все ключевые компоненты ГНСС-приемников (цифровая СБИС, включающая корреляторы для цифровой обработки ГНСС-сигналов, СБИС для приема входящих аналоговых ГНСС-сигналов (РПУ 1065, 1066 и др.), схемотика платы, программное обеспечение и т. д.) сделаны в НТЛаб, что означает отсутствие «черных ящиков» в технологической цепочке и позволяет выполнять гибкую адаптацию ГНСС-продуктов к требованиям заказчиков, а также допускает тесную интеграцию различных компонентов ГНСС-приемника для повышения показателей точности и надежности, включая интеграцию с инерциальными системами практически на любом уровне.

В качестве примера линейки ГНСС-приемников на рис. 1 показан двухантенный навигационный модуль NTL105, предназначенный для определения пространственной ориентации объекта (истинный азимут направления между двумя антеннами и соответствующий этому

направлению угол наклона). Данный модуль является мультисистемным и многочастотным, работающим на геодезическом уровне точности, что доказано многочисленными сравнениями и экспериментами в режиме постобработки, а также в режиме реального времени [1]. Например, на рис. 2 показан результат работы в режиме RTK приемника NTL105 при использовании приемника BD930 производства компании Trimble в качестве базовой станции на интервале времени 1 ч 15 мин. Горизонтальная точность при этом составила величину порядка 2 мм – это соответствует лучшим промышленным показателям такого рода. Кроме демонстрации достижимой точности позиционирования, этот результат также говорит о совместимости приемников НТЛаб с приемниками производства Trimble.

Наряду с возможностью определять с высокой точностью позицию в режиме реального времени важной характеристикой ГНСС-приемников геодезического класса точности является возможность формирования высокоточных ГНСС-измерений (фазовых, кодовых и доплеровских). Это необходимо с точки зрения построения инфраструктуры базовых станций, предназначенных, например, для работы в одном из сетевых режимов RTK (VRS, FKP, MAC) или для расчета PPP-поправок к орбитам и часам спутников. Рис. 3 показывает пример оценки шума фазовых измерений по двойным разностям для сигналов GPS L1, Galileo E5b, IRNSS L5. Во всех случаях шум фазовых измерений составил величину, меньшую 0,8 мм, что открывает большие возможности по использованию приемников НТЛаб в качестве базовых станций для генерации ГНСС-измерений высокой точности. На рис. 4 показан корпусной приемник НТЛаб, специально

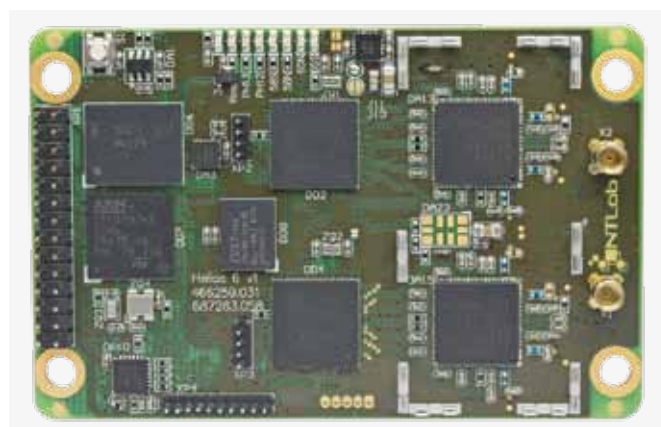


Рис. 1. Навигационный модуль NTL105

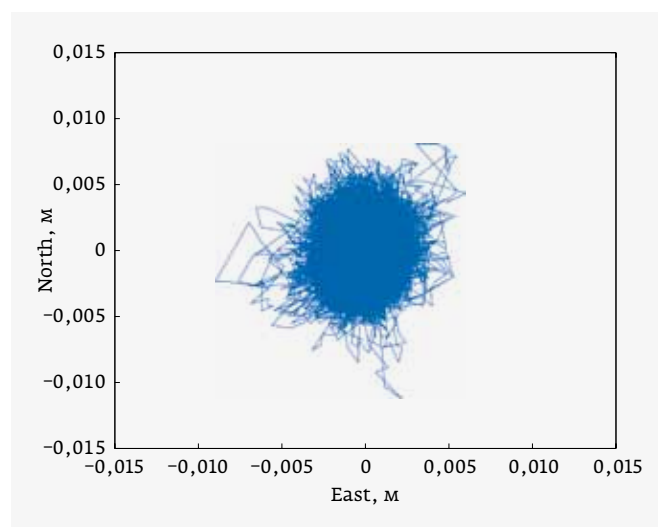


Рис. 2. Горизонтальные координаты (плоскость East-North), полученные при работе приемника NTL105 в режиме RTK

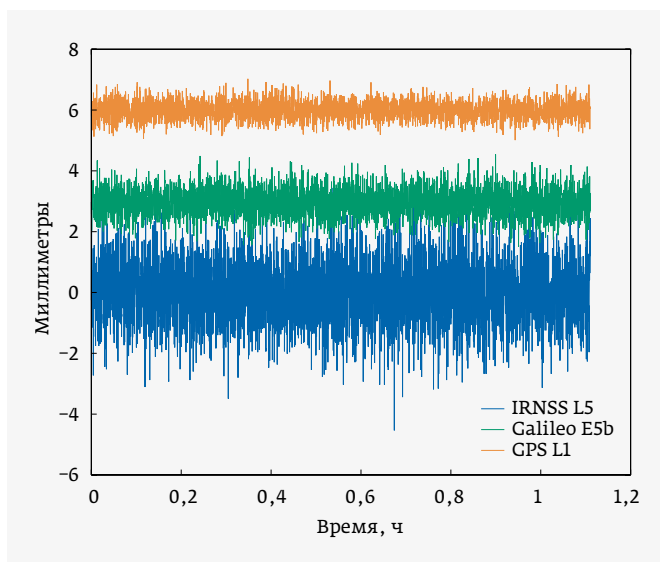


Рис. 3. Двойные разности фазовых измерений

спроектированный для работы в качестве базовой станции – например в составе сети IGS.

МЕТОДОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ PPP

За основу реализации режима позиционирования PPP была принята концептуальная модель, разработанная в средах MATLAB и Octave. Данная модель удобна для реализации новых алгоритмов и получения быстрых результатов их оценки. В качестве исходных данных используются файлы в формате UFFI (Unified Format For Interfacing). Он был разработан с целью унификации входных данных, поступающих на вход PPP-алгоритмов, и представляет собой универсальный бинарный формат, в который могут быть сконвертированы наиболее популярные форматы ГНСС-данных (RINEX, RTCM 3.X Legacy, RTCM 3.X MSM, CMR и другие), включая собственный бинарный формат передачи ГНСС-данных, разработанный в НТЛаб. В рамках UFFI-формата в настоящее время поддерживаются сообщения, включающие в себя ГНСС-измерения, широкоэвентральные ГЛОНАСС и GPS эфемериды, а также ГЛОНАСС/GPS PPP-поправки в формате SSR-сообщений, определенных в текущем стандарте RTCM [2]. UFFI является гибким форматом в том смысле, что обеспечивает единообразную работу со всеми источниками ГНСС-измерений, предоставляя возможность индикации наличия тех или иных данных в зависимости от специфики данного формата. Также такой подход является удобным с точки зрения использования унифицированных входных данных как для модулей, реализованных в MATLAB, так и для модулей, реализованных на C++.

Реализация на языке программирования C++ шла параллельно с разработкой концептуальной модели на MATLAB/Octave. Особое внимание уделялось созданию



Рис. 4. Приемник компании НТЛаб для базовой станции

полностью портируемой версии C++, способной работать на различных аппаратно-программных платформах как в составе отдельного модуля на ПК в режиме постобработки, так и в составе встроенного программного обеспечения, работающего под управлением RTOS в режиме реального времени. Состав алгоритмов полностью подобен для обеих реализаций (MATLAB и C++), и данное соответствие планируется сохранять и в будущих разработках, используя MATLAB/Octave-версию в качестве средства апробации новых алгоритмов и подходов.

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ PPP

Фундаментальный набор навигационных уравнений для кодовых и фазовых измерений может быть представлен следующим образом для приемника k , спутника v и индекса частотного диапазона i [3]:

$$P_{ki}^v = \rho_k^v + cdt_k - cdt^v + \left(\frac{f_{L1}^v}{f_i^v} \right)^2 I_{k,L1}^v + T_k^v + d_{ki,P}^v + M_{ki,P}^v - D_{i,P}^v + \epsilon_{ki,P}^v,$$

$$\varphi_{ki}^v = \frac{f_i^v}{c} \rho_k^v + f_i^v dt_k - f_i^v dt^v + N_{ki}^v - \frac{1}{c} \left(\frac{f_{L1}^v}{f_i^v} \right) I_{k,L1}^v +$$

$$+ \frac{f_i^v}{c} T_k^v + d_{ki,\varphi}^v + M_{ki,\varphi}^v - D_{i,\varphi}^v + \epsilon_{ki,\varphi}^v.$$

Здесь: ρ_k^v – расстояние, которое сигнал проходит от момента излучения антенной спутника до момента приема антенной приемника;
 f_i^v – частота несущей сигнала (v, i);
 $I_{k,L1}^v$ – ионосферная задержка сигнала ($v, L1$) на пути к приемнику k ;
 T_k^v – тропосферная задержка сигнала (не зависит от частоты) на пути от спутника v к приемнику k ;

c – скорость света в вакууме;
 dt_k – сдвиг шкалы времени приемника k относительно системных часов;
 dt^v – сдвиг шкалы бортовых часов спутника v ;
 $d_{ki,p}^v, d_{ki,\phi}^v$ – аппаратные задержки сигнала (v, i) в приемнике k для кодовых и фазовых измерений соответственно;
 $D_{i,p}^v, D_{i,\phi}^v$ – аппаратные задержки в спутнике для кодовых и фазовых измерений соответственно;
 $M_{ki,p}^v, M_{ki,\phi}^v$ – ошибка многолучевости для сигнала (v, i) в приемнике k для кодовых и фазовых измерений соответственно;
 N_{ki}^v – фазовая неоднозначность сигнала (v, i) в приемнике k ;
 $\epsilon_{ki,p}^v, \epsilon_{ki,\phi}^v$ – шум кодовых и фазовых измерений соответственно.

Также при использовании не разностных кодовых и фазовых измерений в режиме PPP требуется моделировать многие физические эффекты, оказывающие влияние на точность получаемого решения: «твердые приливы», вращение антенны спутника, тропосферная модель для зенитной составляющей и функции пересчета на угол возвышения, релятивистские эффекты и др. [4].

С учетом всех основных факторов, влияющих на точность PPP-решения, были реализованы соответствующие алгоритмы на основе расширенного фильтра Калмана. В настоящее время поддерживается работа с двухчастотными измерениями ГЛОНАСС/GPS, при этом используются две комбинации фазовых измерений: безионосферная; L1/L2 с оценкой ионосферной ошибки.

Для оценки точности и времени сходимости реализованных алгоритмов использовались разнообразные

исходные данные, полученные как в статике, так и в кинематике при использовании как точных эфемерид и поправок часов (финальные продукты IGS), так и потоков PPP-поправок, формируемых в реальном режиме времени (на основе потоков данных, формируемых организациями, входящими в IGS). Два последующих раздела содержат результаты таких оценок.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ PPP ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Прежде всего для оценки точности реализованных PPP-алгоритмов использовались данные, полученные из сети IGS [5] в комбинации с финальными IGS-продуктами (файлы в форматах SP3 и CLK). Табл. 1 содержит результаты таких оценок для десяти станций IGS, расположенных в Европе, Северной и Южной Америке, Азии и Австралии.

По этим результатам видно, что время сходимости до заданной точности может варьироваться в довольно больших пределах, но в среднем составляет примерно 8 и 15 мин для критериев сходимости 10 и 5 см в горизонтальной плоскости соответственно. Также, получена очень хорошая сходимость – на уровне лучше 1 см в большинстве случаев – при сравнении с заранее известными точными координатами IGS-пунктов (SINEX-файлы), что говорит об отсутствии каких-либо значимых систематических ошибок в PPP-решении.

Результаты в сети IGS были получены по измерениям, выполненным приемниками различных производителей. Для оценки точности решения PPP, получаемого приемником НТЛаб NTL105, ГНСС-измерения были проведены с использованием антенны, установленной на крыше Технопарк в Сколково (рис. 5), и обработаны с помощью

Таблица 1. Результаты оценки точности и времени сходимости PPP на станциях IGS

IGS-станция (название- страна)	Дата (YYMMDD – (GPS-неделя, день недели WWWWD))	Время наблюдений	Время сходимости до 10 см (2D)	Время сходимости до 5 см (2D)	Горизонтальная ошибка относи- тельно точных IGS-координат, м
ALGO-CAN	191018 – (20755)	23:59:30	0:05:00	0:06:00	0,004
CCJ2-JPN	191018 – (20755)	23:59:30	0:11:30	0:14:00	0,008
GANP-SVK	191018 – (20755)	23:59:30	0:02:30	0:16:30	0,006
GRAZ-AUT	191018 – (20755)	23:59:30	0:13:30	0:16:00	0,008
MDVJ-RUS	191018 – (20755)	23:59:30	0:08:30	0:15:30	0,038
GANP-SVK	200124 – (20895)	23:59:30	0:06:30	0:10:00	0,003
ALGO-CAN	200124 – (20895)	23:59:30	0:04:30	0:27:00	0,019
NNOR-AUS	200124 – (20895)	23:59:30	0:09:00	0:20:00	0,004
MGUE-ARG	200124 – (20895)	23:59:30	0:16:30	0:21:30	0,004
MIZU-JPN	200124 – (20895)	23:59:30	0:05:00	0:09:30	0,017



Рис. 5. Антенна Zephyr 3 (компании Trimble)

онлайн-сервиса PPP от NRCan (Natural Resources Canada). Точность этого решения по результатам суточного файла измерений составила 3, 5 и 11 мм по широте, долготе и высоте соответственно (в системе координат ITRF2014 (2019)). В дальнейшем, результаты работы PPP-алгоритмов при использовании финальных продуктов IGS, а также потоков SSR-сообщений, формируемых в режиме реального

времени, оценивались относительно этих координат, принятых за точные. Полученные результаты показаны на рис. 6 и 7. Рис. 6 содержит результаты, полученные по SP3-файлам, рис. 7 – по потоку реального времени SSR от одного из источников, основанного на данных сети IGS. Точность в горизонтальной плоскости, полученная по SP3-файлам, составила около 1,3 см, что хорошо согласуется с данными из табл. 1. При использовании потока реального времени на основе SSR-сообщений горизонтальная точность составила порядка 3 см (см. рис. 7), что является хорошим результатом для режима реального времени. С точки зрения времени сходимости уровень точности в 10 и 5 см в горизонтальной плоскости был достигнут примерно через 14 и 17 мин, соответственно, для обоих источников PPP-данных. В этом случае соответствие между результатами, полученными по финальным IGS-данным и по потоку SSR-сообщений, сгенерированных в режиме реального времени, оказалось хорошим. Но в общем случае SSR-потоки от IGS-центров могут не всегда давать результаты, близкие к финальным продуктам IGS. В экспериментах использовались SSR-сообщения от таких организаций как CNES, CODE, GMV. Иногда наблюдались перерывы в работе этих источников PPP-поправок, что, вообще говоря, является допустимым, так как данные источники SSR-сообщений служат главным образом для исследовательских и научных целей и не дают гарантию непрерывности и надежности работы. Следует ожидать, однако, что в скором времени появятся источники SSR-поправок, предназначенные для работы в режиме 24/7 и дающие гарантии своей работы, которые будут приемлемы для приложений, выдвигающих наиболее строгие требования к непрерывности и надежности потока SSR-сообщений.

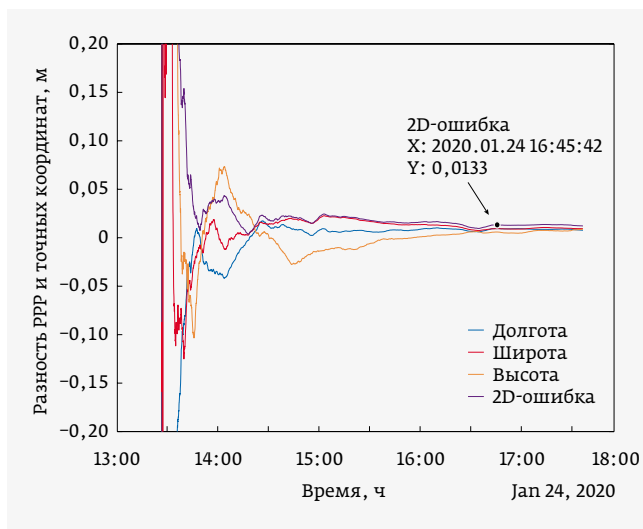


Рис. 6. PPP-решение по SP3-файлам (финальным продуктам IGS)

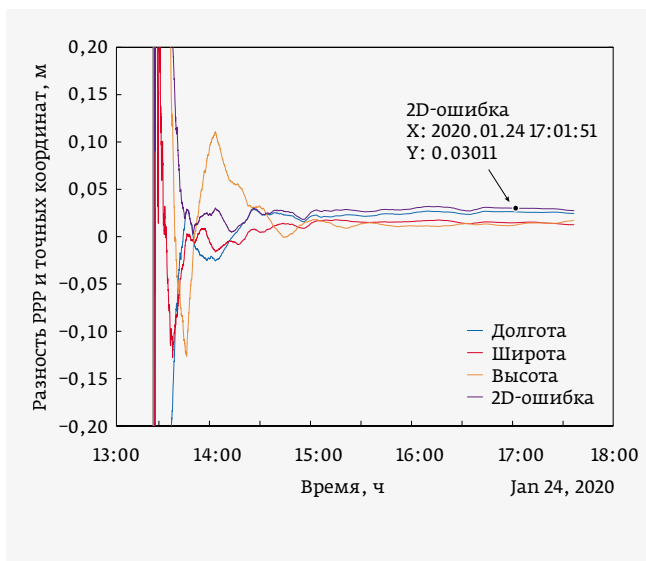


Рис. 7. PPP-решение по SSR-сообщениям

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ PPP В КИНЕМАТИКЕ

Результаты, полученные в статике – важны, но с точки зрения практического использования для большого количества пользовательских приложений основной интерес представляет использование PPP в режиме кинематики. Для проверки точности PPP в режиме кинематики использовались файлы, полученные с помощью системы LabSat, позволяющей записывать ГНСС-сигналы в полевых условиях с последующим их воспроизведением в офисе. Антенна была установлена на крышу автомобиля, двигавшегося со скоростью порядка 60 км/ч по открытой местности с хорошей видимостью спутников.

Записанные ГНСС-сигналы затем обрабатывались в офисных условиях с помощью приемников NTL105 и Novatel OEM 617. В качестве референсной траектории была принята RTK-траектория, рассчитанная относительно базовой станции, находящейся в нескольких километрах от траектории движения. Эта траектория показана на рис. 8.

В процессе записи файла первые 30 мин приемник находился в статике, затем двигался по прямолинейному участку траектории с поворотом примерно на 45° и последующим разворотом для проезда в обратном направлении в течение примерно 1,5 ч. При этом была остановка на интервале времени 20 мин, и снова движение по данной траектории. Наличие статических участков не связано с инициализацией PPP-фильтра – фильтр сходится в условиях кинематики за то же время, что и в статике: эти остановки были запланированы для проведения некоторых дополнительных экспериментов.

На рис. 9 показано сравнение траекторий PPP и RTK в горизонтальной системе координат по трем компонентам, соответствующим широтной, долготной и высотной составляющим. На всём протяжении траектории после интервала времени сходимости фильтра (первые 20 мин) отличие PPP-решения от RTK не превышало 5 см, что следует признать очень хорошим результатом. В данном случае для PPP-решения использовались SP3-файлы (финальный продукт IGS), так как целью этого исследования была оценка возможностей PPP-алгоритмов в условиях кинематики – для этого все остальные источники возможных ошибок, включая неточности потока PPP-поправок, формируемых в режиме реального времени, имело смысл сделать близкими к нулю.

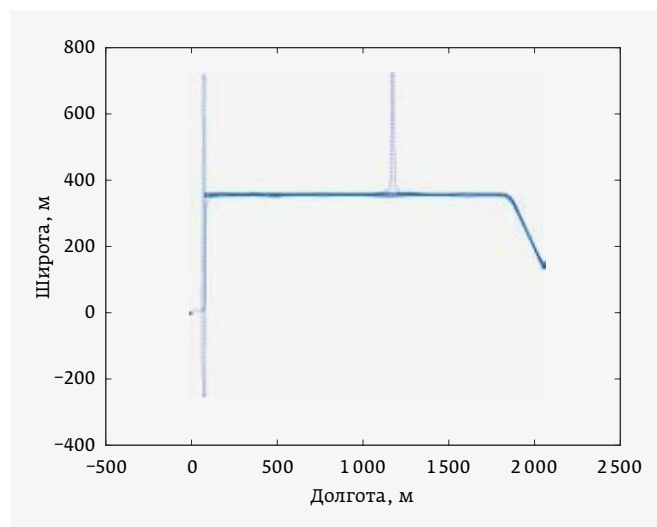


Рис. 8. Траектория движения для оценки точности PPP

Таким образом, в результате работы по реализации PPP-алгоритмов получены версии для MATLAB/Octave и C++. Точность и время сходимости PPP-решения являются достаточно хорошими для класса алгоритмов, работающих с плавающими фазовыми неоднозначностями, а в некоторых случаях точность намного выше

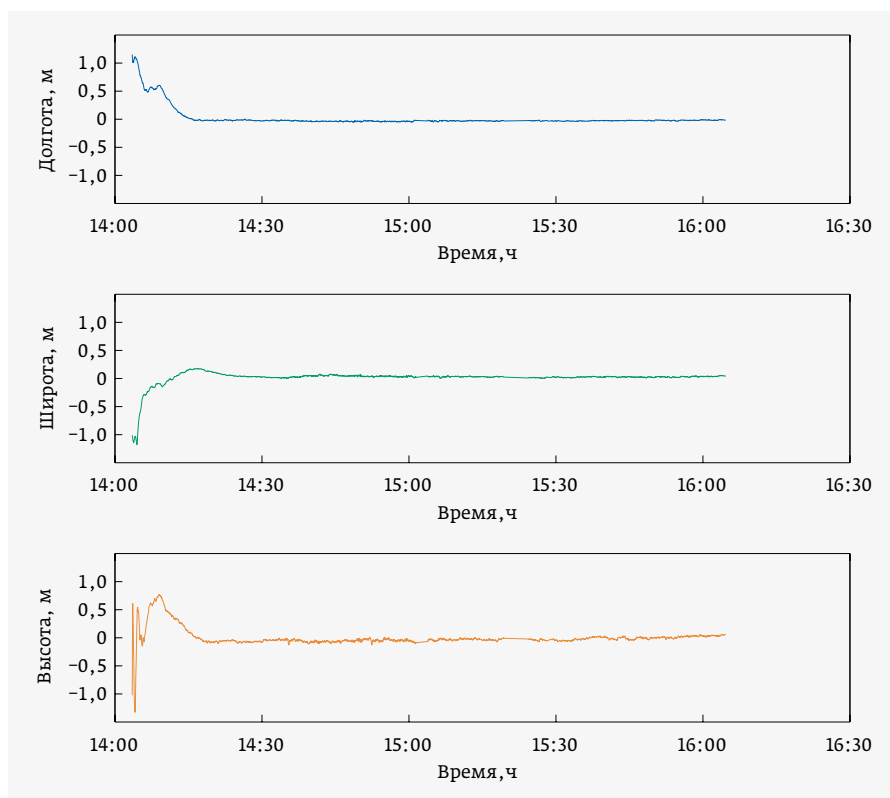


Рис. 9. Разность траекторий RTK-PPP, 24 января 2020 года

ожидаемого уровня. Версия на C++ может использоваться для очень широкого круга приложений, работающих как в режиме постобработки, так и в режиме реального времени. Основным применением является работа в составе встроенного программного обеспечения приемников НТЛаб, но с тем же успехом PPP-модули могут использоваться, например, в режиме постобработки или в качестве приложения для смартфонов, работающего в режиме реального времени. Версия PPP-режима реального времени способна работать с любым потоком PPP-поправок, передающим данные в формате SSR-сообщений [2].

В настоящее время алгоритмы PPP работают в составе приемника НТЛаб NT105 и готовы для практического использования.

Текущая версия построена с учетом возможности расширения для поддержки новых систем и сигналов (например, Galileo, BeiDou, NavIC, L5 и т. д.), а также возможности целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей при помощи использования L1/L2/L5 комбинаций фазовых измерений. Поддержка таких возможностей наряду

с улучшением и тонкой настройкой текущих алгоритмов составляет основу будущей работы в направлении дальнейшего развития PPP-алгоритмов.

Авторы выражают признательность организациям и обрабатывающим центрам, входящим в IGS, за возможность доступа к IGS продуктам и данным, а также организациям IGS, поддерживающим генерацию потоков SSR-сообщений в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черняковский Д. Н., Юрьев К. В., Сакович Р. В., Зиновьев А. Е.** ГНСС модули от НТЛаб: оценка параметров высокоточного позиционирования. – ГЛОНАСС Форум, 2019.
2. RTCM Standard 10403.3, Differential GNSS Services – Version 3. October 7, 2016.
3. **Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D.** GPS satellite surveying, 4th Edition. – Wiley, 2015.
4. **Kouba J.** A guide to using international GNSS service (IGS) products, Updated September 2015 (статья с сайта www.igs.org).
5. <http://www.igs.org/network>

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 975 руб.

МОЩНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛИ

Сечи Ф., Буджатти М.

При поддержке АО «НПП „Исток“ им. Шокина»

Перевод с англ. под ред. д. т. н. А. А. Борисова

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 416 с., ISBN 978-5-94836-415-5

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

POWER ELECTRONICS



17-я Международная выставка
компонентов и модулей
силовой электроники

27-29 октября 2020

Москва, Крокус Экспо

Силовая Электроника

Единственная в России
специализированная
выставка компонентов
и модулей силовой электроники
для различных отраслей
промышленности

Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге



Международная
Выставочная
Компания

+7 (812) 380 6000
power@mvk.ru

Запросите
условия участия:

powerelectronics.ru

12+