

УДК 629.783:527

Исследование вопросов мониторинга системы ГЛОНАСС при использовании высокоточных методов позиционирования

Платонов С.А.^{1*}, Глотов В.Д.²

¹ *Специализированное опытно-конструкторское бюро систем и средств измерений*

«Вектор», «СОКБ систем и средств измерений "Вектор»,

ул. Авиамоторная, 55, Москва, 111024, Россия

² *Центральный научно исследовательский институт машиностроения,*

ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, 141070, Россия

**e-mail: sergeyplatonovcgs@gmail.com*

Аннотация

В статье показано, что реализованные методы и системы мониторинга радионавигационного поля ГЛОНАСС направлены, в основном, на контроль кодовых измерений и режима абсолютного позиционирования, проводимого в настоящее время на метровом уровне точности. Представлены примеры мониторинга позиционирования в различных системах с использованием кодовых измерений. Примеры текущих точностей для высокоточных методов позиционирования показывают, что мониторинг радионавигационного поля для таких приложений должен выполняться в высокоточном режиме. Рассмотрены два высокоточных метода (RTK и PPP) и представлены некоторые результаты их реализации. В связи с тем, что появляются многочисленные пользователи высокоточных режимов

позиционирования и различные программно-аппаратные средства их реализации сделан вывод о том, что становится актуальной задача проведения высокоточного мониторинга радионавигационного поля ГЛОНАСС в режимах PPP и RTK в глобальном масштабе, для локальных зон и внутри приёмника.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, точность, мониторинг радионавигационного поля, относительный режим, точное точечное позиционирование, высокоточная эфемеридно-временная информация.

Введение

Работы по мониторингу характеристик радионавигационного поля (РНП) ГЛОНАСС проводятся в России несколькими службами, работающими в рамках: Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО), Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), Системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП).

Мониторинг характеристик РНП в данных организациях проводится для кодовых измерений по классической схеме – оцениваются контролируемые параметры на основе существующих стандартов на ГЛОНАСС[1]. При этом проводятся оценки пользовательской ошибки измерения дальности (UserRangeError – URE), включающей в себя либо только ошибки космического сегмента и подсистемы контроля и управления (ПКУ), либо все остаточные ошибки при абсолютном позиционировании [2]. Такие методики позволяют оценивать точность

измерений (и, соответственно, всего РНП) на уровне единиц метров. В то же время, пользователями, работающими в высокоточных режимах позиционирования, эта информация не может быть использована для контроля и улучшения качества получаемых ими результатов. Например, данные о том, что средняя по орбитальной группировке (ОГ) URE равна 1.4 метра, не информативны для пользователей, выполняющих позиционирование с сантиметровой точностью. Для примера на рисунке 1 приведены значения остаточных ошибок фазовых измерений навигационных космических аппаратов при выполнении обработки в относительном режиме, а на рисунке 2 – остаточные ошибки фазовых измерений в режиме PPP.

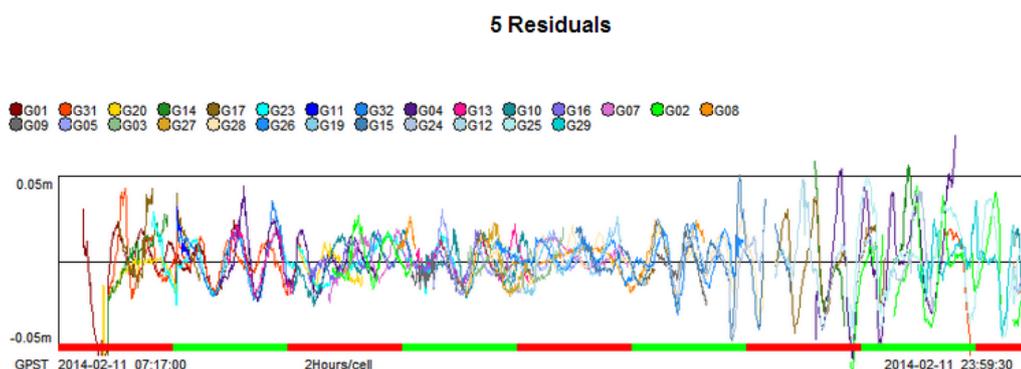


Рисунок 1. Остаточные ошибки фазовых измерений (L1) в относительном режиме позиционирования (программа «CHC Geomatics Office»).

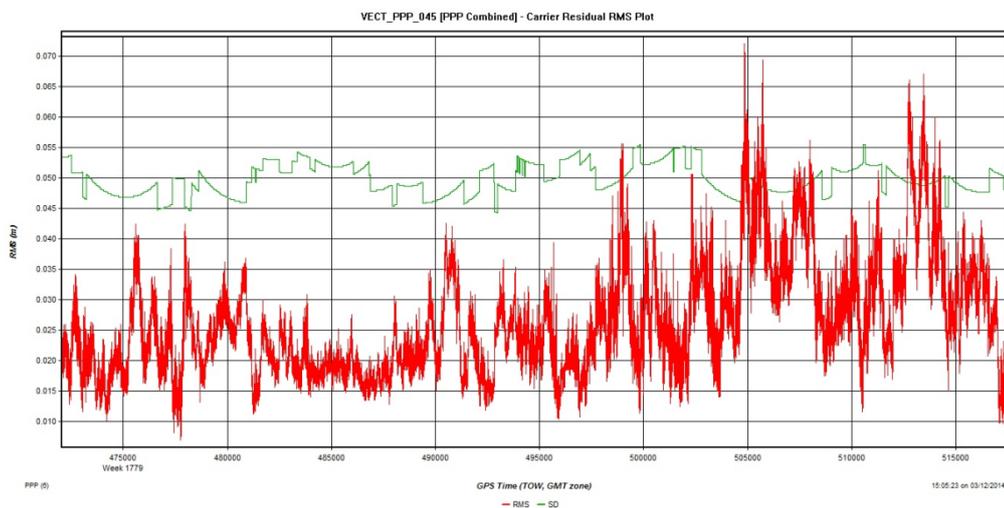


Рисунок 2. Остаточные ошибки фазовых измерений в относительном режиме позиционирования (программа «GrafNav»).

Как видно из рисунков, для высокоточных режимов позиционирования пользовательские ошибки измеряемых параметров (фаза несущая) составляют, как правило, около 5 см.

Также необходимо отметить, что и доступность, и непрерывность, и целостность в существующих работах по мониторингу определяются на основе тех же оценок URE [1], а для высокоточных приложений сигнал целостности должен вырабатываться совсем при других значениях точностных характеристик.

Оценка точности РНП ГЛОНАСС в существующих методиках мониторинга проводится путём оценки ошибок позиционирования в абсолютном режиме. Существует два варианта оценки точности [1,2]:

1) Ошибки позиционирования, получаемые как произведение геометрических факторов ухудшения точности (DOP) на URE за счёт космического сегмента и ПКУ:

$$\sigma = DOP \times URE.$$

2) Абсолютные ошибки позиционирования, вычисляемые как разности между координатами пункта, полученными из решения, и истинными координатами пункта, на котором установлен приёмник для проведения мониторинга РНП: $\sigma_X = X_{\text{реш}} - X_{\text{ист}}$ ($X \rightarrow Y, Z$). В данной методике решение в абсолютном режиме проводится по кодовым измерениям, и в состав конечной оценки входят все остаточные ошибки, не исключаемые в процессе обработки.

Разумеется, использование таких методик не даёт возможность проводить мониторинг РНП ГЛОНАСС на высоком уровне точности. Для сравнения на рисунках 3–7 приведены результаты мониторинга РНП ГЛОНАСС в существующих системах мониторинга, и для сравнения – ошибки позиционирования в высокоточных режимах.

Точность местоопределения (ГЛОНАСС)



Рисунок 3. Мониторинг точности РНП ГЛОНАСС в ИАЦ КВНО [3].

Дата: 2014-03-10

Станция	Ошибка навигационных определений (p=0,95)			Среднее кол-во КА в навиг. определениях
	по широте (м.)	по долготе (м.)	по высоте (м.)	
Арти	8.46	5.37	18.73	9
Билибино	5.86	6.89	19.90	9
Владивосток	6.82	6.27	16.45	8
Геленджик	7.56	7.73	18.67	8
Иркутск	6.53	6.63	17.04	9
Камчатка	9.27	7.94	19.70	9
Кисловодск	7.80	8.40	17.44	8
Магадан	6.57	5.79	16.49	9
Менделеево	7.54	5.42	16.39	9
Новолазаревская	5.35	5.86	16.81	9
Новосибирск	7.33	6.78	17.46	9
Норильск	6.59	6.23	18.82	9
Ноябрьск	7.03	6.04	18.34	9
Прогресс	4.38	4.93	12.65	8
Пулково	11.78	10.32	29.45	9
РНИИ	8.10	7.05	15.70	9
Ревда	6.25	6.84	18.53	9
Светлое	9.18	6.89	21.55	9
Тикси	5.66	6.19	17.61	9
Южно-Сахалинск	7.15	6.68	15.73	8
Якутск	7.33	5.99	19.16	9

Рисунок 4. Мониторинг точности РНП ГЛОНАСС в СДКМ [4].

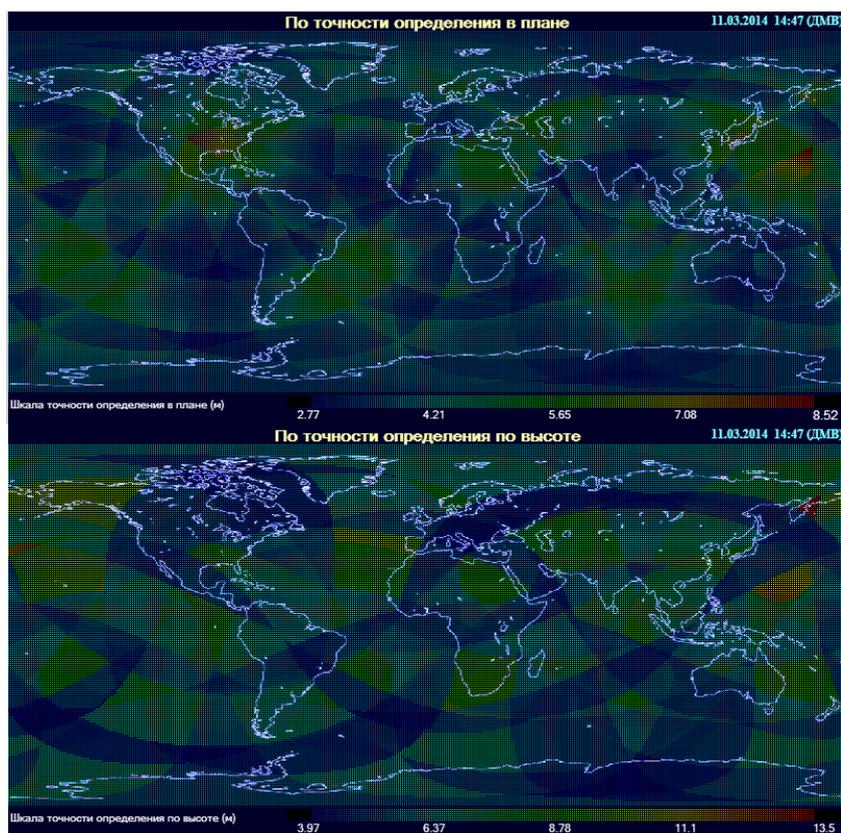


Рисунок 5. Мониторинг точности РНП ГЛОНАСС в СВОЭВП [5].

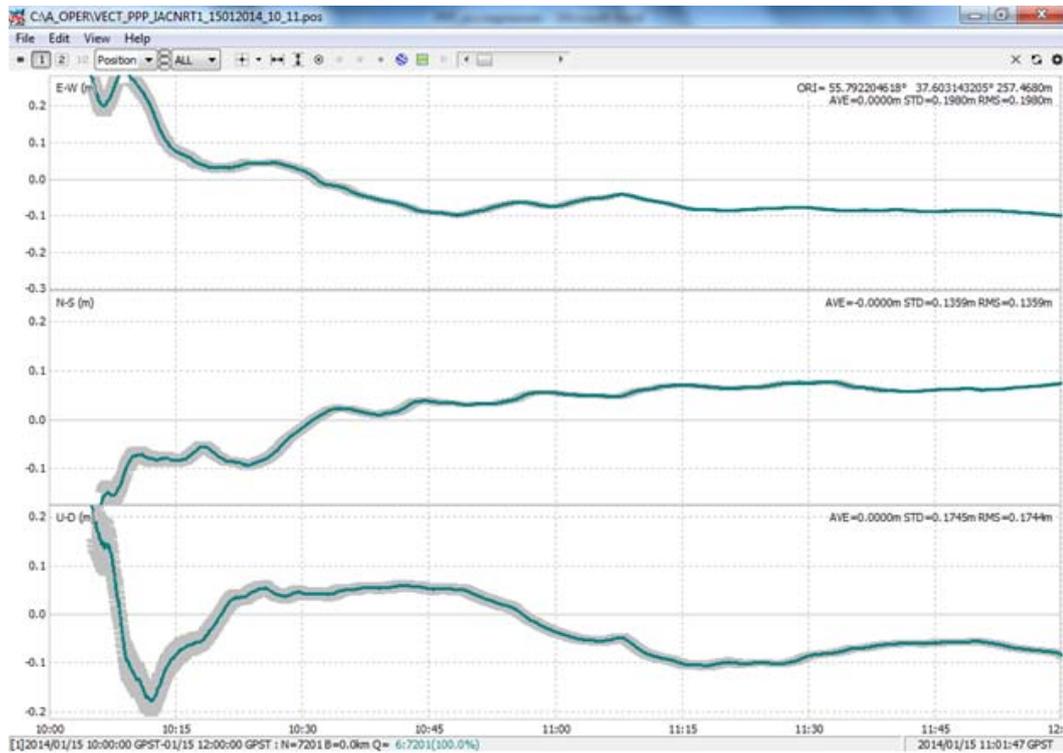


Рисунок 6. Оценка точности позиционирования в режиме PPP.

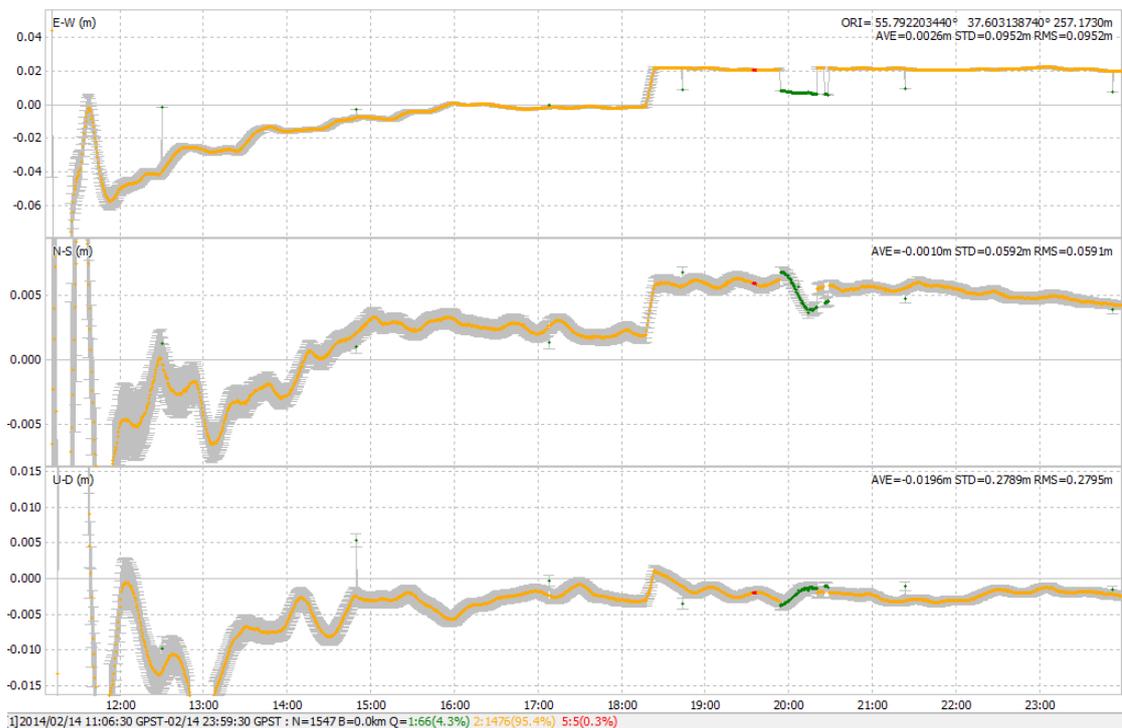


Рисунок 7. Оценка точности позиционирования в относительном режиме по фазовым измерениям.

Как видно из приведенных рисунков, существующие системы мониторинга обеспечивают мониторинг точностных характеристик РНП ГЛОНАСС на уровне ошибок в несколько метров, что соответствует только абсолютному режиму позиционирования, в то время как существующие высокоточные методы позиционирования способны обеспечивать потребительскую точность на уровне дециметров и сантиметров.

Таким образом, в условиях роста числа потребителей, использующих высокоточные методы позиционирования, целесообразно рассмотреть возможность проведения мониторинга РНП ГЛОНАСС на максимально высоком уровне потребительской точности для информационно-аналитической поддержки данных групп пользователей.

Относительный режим по фазовым измерениям

Относительный режим позиционирования по фазовым измерениям заключается в обработке разностей фазовых измерений:

1. Первые разности – разности измерений, выполненных на 2-х приёмниках по одним и тем же НКА: позволяют исключить ошибки, связанные с ионосферной задержкой и штатной эфемеридно-временной информацией (ЭВИ), и ослабить ошибки, вызванные прохождением сигнала через тропосферу. Ошибки штатной ЭВИ для двух НАП одинаковы, поэтому полностью исключаются в разности измерений. Ионосферные задержки практически одинаковы при расстоянии между 2-мя НАП до нескольких

десятков километров. Тропосферная задержка будет различаться, но большая её часть всё же исключится в 1-ых разностях. Частично убираются фазовые неоднозначности.

2. Вторые разности – составляются как разности между 1-ой разностью по НКА, который произвольно выбирается «опорным», и 1-ыми разностями по всем остальным НКА. Здесь в первую очередь исключаются сдвиги часов двух НАП друг относительно друга.

3. Третьи разности – разности 2-ых разностей, сформированные на 2-х соседних эпохах измерений. Здесь полностью исключаются фазовые неоднозначности и оставшиеся ошибки тропосферы.

При этом даже после формирования 3-их разностей остаются некоторые ошибки: случайные ошибки фазовых измерений, остаточная многолучёвость, остаточные ионосферные задержки, остаточные тропосферные задержки. Некоторые из этих ошибок носят, как правило, случайный характер, поэтому усредняются и исключаются на относительно непродолжительном интервале. Однако некоторые из них носят систематический характер (многолучёвость) и с трудом поддаются исключению. Тем не менее, процесс разрешения фазовых неоднозначностей и усреднения некоторых других ошибок (так называемая «инициализация») в современной высококачественной НАП занимает очень мало времени (не более 5 минут), поэтому решение в относительном режиме по фазовым измерениям позволяет получать высокую точность (1–2 см) в режиме реального времени.

Также возможно использование в разностных методах в качестве исходных данных для составления разностей не «сырые» фазовые измерения, а различные комбинации измерений (по сути – разности измерений на двух частотах с различными коэффициентами), позволяющие исключать уже в них некоторые источники ошибок (ионосфера, тропосфера, штатная ЭВИ).

Отдельно необходимо отметить проблему, связанную с обработкой наблюдений ГЛОНАСС – при составлении 2-ых разностей возникают дополнительные ошибки, связанные с разными значениями группового времени запаздывания (ГВЗ) сигналов ГЛОНАСС в НАП. Данную проблему необходимо решать путём либо калибровки каналов НАП для каждой литеры ГЛОНАСС, либо использовать одинаковые НАП на базе и ровере для исключения данных ошибок уже в 1-ых разностях.

Точное точечное позиционирование PPP

PPP – это метод обработки данных наблюдений ГНСС, позволяющий получать высокоточные результаты позиционирования в автономном режиме (при использовании только одного приёмника, без базовой станции).

Обработка в режиме PPP имеет следующие отличительные черты:

– использование в обработке высокоточных «быстрых» (с частотой обновления в несколько секунд) поправок в штатную ЭВИ, определяемых в режиме реального времени (не прогноз как SP3 UltraRapid);

- использование в обработке данных о систематических ошибках двухчастотных кодовых измерений («DifferentialCodeBiases»);
- совместная обработка кодовых и фазовых измерений;
- уточнение фазовых неоднозначностей как дополнительных неизвестных;
- уточнение тропосферной задержки на станции как дополнительной неизвестной;
- формирование многочастотных комбинаций измерений, в том числе – кодовых и фазовых;
- использование метода наименьших квадратов внутри фильтра Калмана в процессе уточнения всех определяемых параметров (координаты станции, уход часов НАП, фазовые неоднозначности, тропосферная задержка и др.).

Проблема данного метода заключается в сложности разрешения фазовых неоднозначностей в целых числах, в невозможности исключения или уточнения многолучёвости, в сложности уточнения дифференциальных фазовых сдвигов и ухода часов НАП. Некоторые из остаточных источников ошибок носят случайный характер, поэтому для достижения максимальных точностей требуется некоторое время сходимости. В настоящее время в классическом методе PPP оно составляет примерно 30 минут, что приводит к точности местоопределения в пределах от 15 до 50 см.

В настоящее время проводятся разработки методик PPP, позволяющих разрешать фазовые неоднозначности в целых числах [6,7,8], что потенциально

позволит получать точность порядка 10 см при времени сходимости порядка 5 минут.

Экспериментальные результаты

Рассмотрим некоторые результаты высокоточного позиционирования в разных режимах и при разных условиях обработки.

Для относительного режима по фазовым измерениям сначала рассмотрим результаты позиционирования с использованием в качестве «ровера» российской одночастотной (L1) НАП «NV-08» (КБ «Навис»), а в качестве базы НАП «Flex6» («Novatel») на интервале с 00:00 по 18:00 UTC 25.02.2014. Обе НАП подключены к одной антенне, то есть – длина базы равна нулю.

На рисунке 8 представлен результат постобработки в программе «RTKpost» [9].



Рисунок 8. Относительное решение «Flex6–NV-08».

Как видно из графика, относительный режим даёт возможность получать координаты с абсолютными ошибками не более 1 см при получении фиксированного решения (с целочисленным разрешением фазовых неоднозначностей).

Рассмотрим решение в относительном режиме на нулевой базе для двух образцов одинаковой НАП на базе и «ровере» – отечественный одночастотный приёмник «МНП-7» (Ижевский радиозавод). Результаты обработки в программе «CGO» приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Относительная обработка «МНП-7– МНП-7» в «CGO».

ГНСС:	GPS	ГЛО	ГЛО/GPS
Тип решения:	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное
Длина базовой линии, см:	0.003	0.033	0.020
СКО базовой линии, см	0.039	0.065	0.050

Результаты показывают, что возможно получение высокоточного решения только по ГЛОНАСС при использовании одинаковой НАП на базе и «ровере», что позволяет в разностях фазовых измерений исключить ГВЗ сигналов ГЛОНАСС.

Рассмотрим также решение в относительном режиме на ненулевой базовой линии. Для этого рассмотрим следующий пример: в качестве базовой станции используется НАП «NovatelFlex6», установленный на закреплённом пункте в Москве, а в качестве «ровера» – НАП «JAVAD E_GGD», установленный на пункте в шведском городе Онсала. Расстояние между пунктами составляет около 1,500 км. Оба приёмника – двухчастотные. Решение выполнено на суточном интервале за

21/01/2014 в программе «CGO» («CHCNavigation», Китай). Результаты приведены в таблице 2 для разных режимов обработки.

Таблица 2.

Обработка линии «Москва–Онсала» в «CGO».

ГНСС:	GPS	ГЛО	ГЛО/GPS
Тип решения:	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное
Длина базовой линии, м:	1573968.038	1573968.105	1573967.979
СКО базовой линии, м	0.029	0.023	0.017

Из таблицы видно, что при использовании двухчастотной аппаратуры возможно получать высокоточное решение (СКО – 2 см) в относительном режиме даже на очень длинных базовых линиях.

Особенно стоит отметить то, что в данном эксперименте точность определения длины базовой линии только по наблюдениям ГЛОНАСС немного лучше, чем решение только по GPS. Также заметно улучшение точности при совместном решении.

Исследования режима PPP проводились с использованием НАП «NovateIFlex6», установленного на пункте слежения в СОКБ «Вектор».

Для обработки использовались программы «RTKlib» и «GrafNav».

В качестве высокоточной ЭВИ использовалась высокоточная ЭВИ в виде файлов в формате SP3, которую вычисляют и публикуют Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО, Россия) и Международная служба ГНСС (IGS).

В качестве интервала испытания был выбран интервал с 00:00:00 по 23:59:30 (GPSTime) 25/03/2014. Результаты приведены в таблицах 3 (абсолютные ошибки относительно известных координат пункта) и 4 (СКО).

Таблица 3.

Ошибки позиционирования в режиме PPP с разной высокоточной ЭВИ.

ПО:	RTKpost						GrafNav			
ЭВИ:	UltraRapid		Rapid		Final		NRT SP3	Ultra Rapid	Rapid	Final
Source:	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS		
Е, см	0.4	10.4	0.65	9.6	0.4	10.0	5.4	2.8	2.4	2.4
N, см	6.2	7.5	6.0	7.6	3.2	7.6	10.4	4.8	5.5	5.5
U, см	4.3	6.0	3.2	0.9	2.7	1.3	2.7	9.6	8.2	8.1
R, см	7.6	14.1	6.8	12.3	4.2	12.6	12.0	11.1	10.1	10.1

Примечания:

1. В ПО «GrafNav» обработка выполнялась только по GPS, в то время как в ПО «RTKpost» выполнялась совместная обработка ГЛОНАСС/GPS.

2. Файлы SP3 из IGS содержат ЭВИ только для GPS.

Таблица 4.

СКО позиционирования в режиме PPP с разной высокоточной ЭВИ.

ПО:	RTKpost						GrafNav			
ЭВИ:	UltraRapid		Rapid		Final		NRT SP3	Ultra Rapid	Rapid	Final
Source:	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS	ИАЦ	IGS		
Е, см	6.0	11.5	5.8	11.0	6.3	10.9	4.1	2.6	0.8	0.7
N, см	0.8	1.6	0.7	1.3	0.8	1.4	2.2	1.7	0.8	0.8
U, см	2.5	6.7	2.3	2.0	2.2	1.9	5.3	2.6	1.5	1.5
R, см	6.5	13.4	6.3	11.3	6.7	11.2	7.0	4.0	1.9	1.9

Результаты показывают, что потенциально метод PPP может конкурировать с относительным режимом, и уже получаемые точности позиционирования могут быть востребованы у ряда потребителей.

Но также видно, что ошибки и точности позиционирования сильно зависят от используемой ЭВИ и программного обеспечения, в котором выполняется обработка.

Из таблицы 3 видно, что совместная обработка ГЛОНАСС/GPS приводит к уменьшению ошибок позиционирования по сравнению с решением только по GPS.

Выводы

Ввиду того, что появляются различные программно-аппаратные средства реализации высокоточных режимов позиционирования, в том числе, создаваемые в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 - 2020 годы», становится весьма актуальной задача проведения высокоточного мониторинга радионавигационного поля ГЛОНАСС в режимах PPP и RTK в глобальном масштабе, для локальных зон и внутри приёмника, а также контроль и оценка потребительских характеристик различных сервисов по высокоточному позиционированию. При этом в качестве контролируемых параметров при проведении мониторинга высокоточных режимов позиционирования могут использоваться, прежде всего, достигаемая точность сервиса, время начальной инициализации (начальное время сходимости), устойчивость получаемых решений в условиях реальной эксплуатации и т.д.

Высокоточные режимы позиционирования сильно зависят от условий приёма сигнала (помеховая обстановка и затенения), поэтому оптимальным вариантом решения задачи мониторинга высокоточного позиционирования является автономный мониторинг в НАП, способный выявлять помехи, затенения, систематические ошибки в фазовых измерениях и исключать их в процессе обработки для получения максимальной точности.

Также есть ряд факторов, влияющих на точностные характеристики высокоточных режимов, которые не зависят от условий приёма и их исследование в глобальном масштабе может быть целесообразно путём создания следующих систем мониторинга:

– Глобальный мониторинг режима PPP: оценка точности режима PPP по глобальной сети постоянно действующих станций с использованием в обработке разных источников поправок и высокоточной ЭВИ может быть полезна для потребителей при выборе источника ЭВИ. Например, на основе оценок точности с разной ЭВИ в формате SP3 пользователь может решить – ждать появления SP3 Final или воспользоваться SP3 Rapid для достижения требуемой им точности.

– Мониторинг по сети станций, снабжённых различной НАП позволит провести классификацию различной НАП по характеристикам высокоточного позиционирования (точность, время сходимости), что поможет потребителю выбрать необходимую ему аппаратуру в зависимости от её класса точности и ценового сегмента.

- Мониторинг высокоточных режимов позиционирования, реализованных в разном программном обеспечении, позволит пользователю выбрать ПО, удовлетворяющее его потребностям (точность, реальное время или постобработка, возможность использования корректирующей информации или файлов SP3 и т.д.).
- Контроль качества навигационных сигналов, передаваемых с НКА, в том числе, мониторинг мощности сигнала, количества «разрывов фаз» на заданном интервале времени для разных НКА орбитальной группировки.

Предлагаемая система мониторинга имеет основную цель – информационное обеспечение потребителей о возможных реализациях высокоточных режимов позиционирования в зависимости от используемой корректирующей информации, типа НАП и программного обеспечения. Основываясь на этих данных, потребитель может выбирать конкретные аппаратно-программные средства для решения своих задач.

Библиографический список

1. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. ГОСТ Р-52865-2009. – М.: Изд-во стандартов, 2009. - 20 с.
2. Платонов С.А. Сетевой мониторинг радионавигационного поля глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в режиме реального времени // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 4 (65), С. 56-72.

3. Точность местоопределения (ГЛОНАСС), <http://www.glonass-iac.ru/>, 11.03.2014.

4. Точность навигационных определений ГЛОНАСС, http://www.sdcм.ru/smglo/st_glo?repdate=2014-03-10&submitbutton=%F3%CD%CF%D4%D2%C5%D4%D8&site=extern&version=rus, 11.03.2014.

5. Плотность навигационного поля ГЛОНАСС, http://glonass-svoevp.ru/plotnost_navigatsionnogo_polya_glonass, 11.03.2014.

6. Shi J. *Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks*, University of Calgary, Calgary, 2012, 192 p.

7. Laurichesse D. The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator, *ION GNSS 2011*.

8. Laurichesse D., Mercier F. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results, *EGU Vienna*, 2010.

9. RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, available at: <http://www.rtklib.com/>, 26.08.2013.

10. GNSS Data Center, available at: <http://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>, 11.10.2013.