

УДК 621.391

Анализ возможности применения квази-зенитной спутниковой системы QZSS в качестве источника эфемеридно-временной информации для режимов высокоточного местоопределения

Валайтите А.А.*, Никитин Д.П.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

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

***e-mail: nikitindmitriy@mail.ru*

Аннотация

В работе рассматривается возможность использования информации, передаваемой в сигнале MADOCA-LEX японской спутниковой навигационной системы (СНС) QZSS в качестве источника высокоточной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) для организации режима высокоточного абсолютного местоопределения (англ. Precise Point Positioning - PPP). Приводится сравнительный анализ результатов вычисления позиции приемника в режиме PPP с использованием высокоточной ЭВИ от системы QZSS и других источников данных. Сделаны выводы о целесообразности применения ЭВИ, поставляемой системой QZSS для задач реального времени.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), высокоточная эфемеридно-временная информация (ЭВИ), квази-зенитная спутниковая система (англ. The Quasi-Zenith Satellite System - QZSS), сообщение MADOCA-LEX, Precise Point Positioning (PPP), GPS, ГЛОНАСС.

Введение

В настоящее время увеличивается количество областей применения, в которых необходимо достижение субдециметровой точности местоопределения потребителя с использованием приемников сигналов навигационных спутниковых систем. Одним из способов достижения высокой точности местоопределения является использование метода относительного местоопределения с разрешением целочисленных неоднозначностей по фазе несущей частоты. Применение данного метода обеспечивает возможность определения относительных координат приемника потребителя с точностью до единиц сантиметров. Однако ограничивающим фактором рассмотренного метода является использование информации от опорных (базовых) станций и, соответственно, накладываются ограничения на расстояния между опорной станцией и подвижным приемником потребителя. Точность определения позиции потребителя, необходимую для ряда современных высокоточных приложений может обеспечивать также режим PPP. Данный режим работы - это режим обработки наблюдений ГНСС в приемнике потребителя, позволяющий получать высокоточные результаты местоопределения при использовании только одного приёмника и высокоточной ЭВИ без использования дифференциальных коррекций от базовой станции. Точность местоопределения при этом зависит от качества используемой в обработке ЭВИ.

В силу данного обстоятельства очень важно осуществлять анализ новых источников ЭВИ. В работе рассматривалась возможность использования данных, передаваемых в сообщениях сигнала японской квази-зенитной спутниковой системы QZSS в качестве высокоточной эфемеридно-временной информации для организации режима абсолютного высокоточного позиционирования.

Обеспечение режима высокоточного абсолютного позиционирования

Обеспечение режима высокоточного абсолютного позиционирования строится из трех основных этапов:

- 1) Формирование высокоточной эфемеридно-временной информации.

Формирование ЭВИ происходит в несколько этапов. Сначала с сети базовых станций, расположенных по всему миру, собираются двухчастотные фазовые и кодовые измерения. Далее данные измерения поступают сервер - формирователь, на котором рассчитываются в режиме реального времени или в режиме пост-обработки высокоточные коррекции к орбитам и часам навигационных космических аппаратов (НКА).

2) Процесс передачи высокоточной ЭВИ.

На данный момент существует несколько способов передачи высокоточной ЭВИ потребителю[4], в данной статье рассмотрено лишь два из них. Первый способ заключается в передаче высокоточной ЭВИ по сети интернет с помощью наземных коммуникаций (GPRS, 3G, WiFi) по протоколу NTRIP (Network transport rtcn via internet protocol). Таким способом передачи пользуются международные исследовательские институты и сервисы: IGS, CNES, DLR, NRCAN. Преимущество данного способа заключается: в возможности принятия высокоточной ЭВИ в приполярных зонах при доступности функционирования сети интернет. А недостатком является: необходимость стабильного интернет подключения.

Иной способ передачи - передача корректирующей информации с геостационарных спутников. Такой метод, как правило, используют коммерческие компании, которые, арендуя геостационарные спутники типа Inmarsat, вещают высокоточную ЭВИ. Основным недостатком использования данного типа передачи ЭВИ является невозможность использования такого сервиса в приполярных широтах и дороговизна аренды спутникового оборудования. Однако, например, СНС QZSS, на бесплатной основе вещает высокоточную ЭВИ в рамках сигнала MADOCA-LEX.

3) Формирование высокоточного решения

В процессе формирования решения в режиме PPP на навигационный приемник с антенны поступают навигационные измерения и по специализированному каналу передачи поступает ЭВИ.

Квази-зенитная спутниковая навигационная система QZSS

Квази-зенитная Спутниковая Система (The Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)), разработанная в Японии, обеспечивает региональную спутниковую навигацию в Восточной Азии и Океании. Система QZSS была сконструирована для обеспечения определения местоположения в городских условиях и гористой местности в режиме абсолютного местоопределения, либо для использования в качестве системы дифференциальных коррекций и функционального дополнения ГНСС. Космический сегмент системы QZSS состоит из квази-зенитных спутников (The Quasi-Zenith Satellite System - QZSS), которые работают на высокой эллиптической орбите. Система спроектирована так, что по крайней мере, три спутника на трех орбитальных плоскостях с геосинхронным периодом гарантируют доступность сигнала даже в условиях городской застройки и гористой местности. Созвездие спутников, работающих на высокой эллиптической орбите, представляет собой характерную, ассиметричную орбиту в форме фигуры-восьмерки, со средней центральной долготой 135°E (Рис. 1). Таким образом, один из этих трех спутников всегда будет расположен над Японией, с углом наклона 70° .

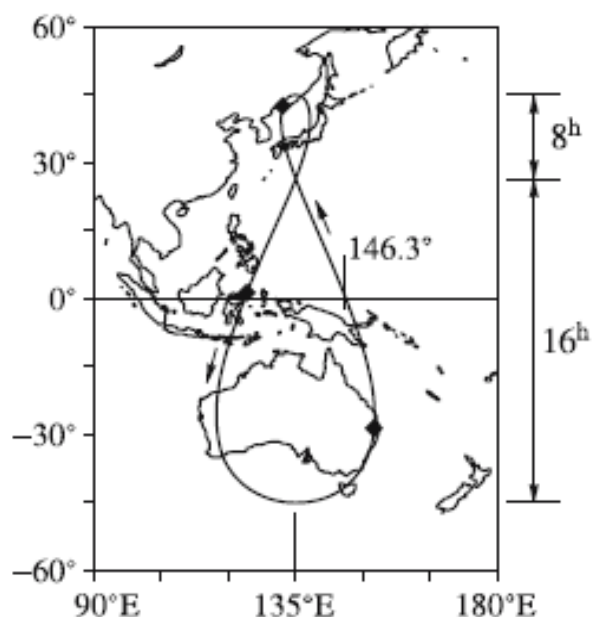


Рисунок 1 - Орбита созвездия спутников космического сегмента системы QZSS.

Структура сигнала MADOCA – LEX

Данные сообщения типа MADOCA-LEX включает корректирующую информацию орбит и спутниковых часов для четырех созвездий спутников (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и QZSS). Отсюда название MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis). Однако, когда передается данное сообщение, другие сообщения транслироваться с ним одновременно не могут.

На рис. 2. представлена структура сообщения MADOCA-LEX.

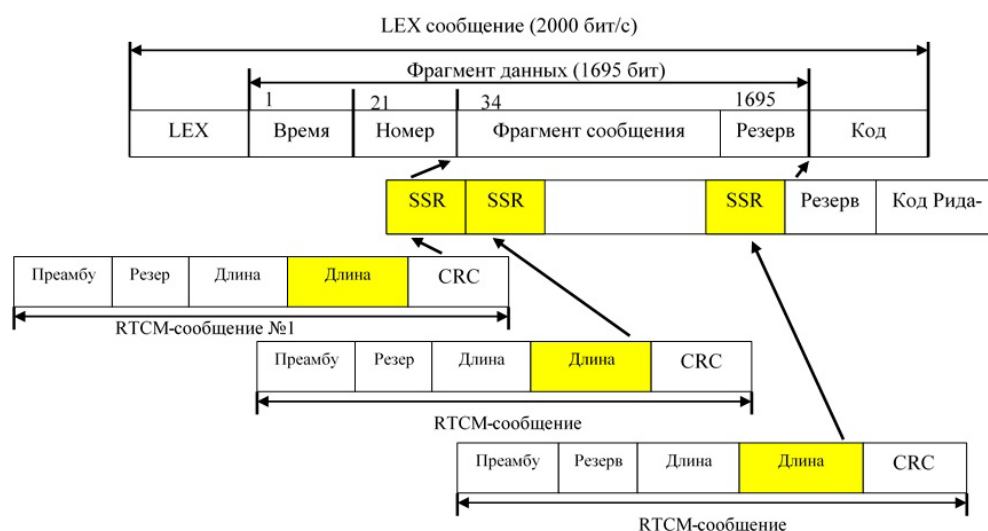


Рисунок 2 - Структура LEX-сообщения

Представлены основные блоки структуры сообщения:

– *время недели*

20-битное время недели считается в начале фрагмента данных сообщения 12 и выражает время (секунды за неделю) в начале следующего односекундного сообщения. Допустимый диапазон от 0 до 604799. Время недели, которое включается в последнее сообщение недели, равно «0». Время недели, включенное в первое сообщение недели, равно «1».

– *номер недели*

13 битов с 21-го до 33-го во фрагменте данных сообщения 12 представляют собой бинарное выражение modulo-8192 номера недели GPS в начале этого сообщения.

– *информационное сообщение с корректирующей информацией в формате RTCM3 (SSR)*

Остальные биты во фрагменте данных сообщения MADOCA-LEX, начиная с 34-го по 1695-ый запоминаются как SSR пакетная информация, эквивалентная сообщению данных переменной длины, определенной в RTCM10403.2. Пакет SSR состоит из заголовка и специальной части. 12 бит в начале части заголовка определяют номер типа сообщения RTCM 3, передаваемого LEX сообщением. Ниже приведено описание протокола дифференциальных данных RTCM 3, в котором

хранится SSR данные, содержащие информацию об ошибках измерений спутниковых часов и орбит.

Таблица 1. SSR пакет из сообщения MADOCA-LEX.

SSR пакет	Номер сообщения				Интервал обновления
	GPS	QZSS	Galileo	GLONASS	
Orbit Correction	1057	1246	1240	1063	30 сек
Satellite Code Bias	1059	1248	1242	1065	1 день
User Range Accuracy	1061	1250	1244	1067	30 сек
High Rate Clock Correction	1062	1251	1245	1068	2 сек

Формат RTCM 3 используется для передачи дифференциальных данных и обеспечения высокоточных дифференциальных режимов местоопределения работы навигационного приёмника потребителя. Помимо своего основного предназначения данный формат также используется для записи сырых измерений приемника для их дальнейшей постобработки. В таблице 1 представлены формат сообщения RTCM 3 и пакет данных SSR, передающийся в сигнале MADOCA-LEX для использования в PPP. Этот пакет включает в себя:

- *Orbit Correction* (поправки к орбитам спутников);
- *Satellite Code Bias* (оценка систематической ошибки кодового сигнала);
- *User Range Accuracy* (значение точности измерения расстояния от спутника до пользователя);
- *High Rate Clock Correction* (коррекции для высокочастотных часов).

После получения потребителем пакетов SSR данных из них необходимо получить высокоточные значения координат и смещений показаний часов НКА относительно системного времени. В силу того, что SSR сообщения, представляют собой поправки к данным, передаваемым с навигационных спутников (ниже данные

передаваемые с навигационных спутников будут упоминаться как бортовые эфемериды) их необходимо должным образом восстановить. Алгоритм восстановления SSR сообщений рассмотрен в следующем разделе статьи.

Применение корректирующей SSR информации

Сообщение для коррекций орбиты НКА содержит коррекции ($\delta 0$) в системе координат, связанной с движением спутника, соответственно, по радиальной компоненте, компоненте вдоль направления и перпендикулярно направлению движения НКА. Эти коррекции используются для вычисления высокоточной позиции спутника (X_{prec}) путем комбинации с позицией спутника (X_{brd}), рассчитанной по эфемеридам, передаваемым с борта НКА. Для этого производится пересчет коррекций из системы координат, связанной с движением спутника, в геоцентрическую (связанную с Землей) систему координат. Значение этой коррекции определяется как:

$$X_{prec} = X_{brd} - \delta X, \quad (1.1)$$

где:

X_{prec} – положение спутника, скорректированное SSR сообщением;

X_{brd} – положение спутника, рассчитанное, согласно ИКД ГНСС, по эфемеридам, передаваемым с борта НКА;

δX – коррекция положения спутника.

В свою очередь, коррекция положения спутника δX вычисляется следующим образом:

$$e_{\text{ПО НВ}} = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|} \quad (1.2)$$

$$e_{\perp \text{НВ}} = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \quad (1.3)$$

$$e_{\text{АДИЛ}} = e_{\text{ПО НВ}} \times e_{\perp \text{НВ}} \quad (1.4)$$

$$\delta X = [e_{РАДИАЛ} \quad e_{ПО НВ} \quad e_{\perp НВ}] \delta \theta, \quad (1.5)$$

где:

$e_{ПО НВ}$ – компонента по направлению движения;

$e_{\perp НВ}$ – компонента перпендикулярная направлению движения;

$e_{РАДИАЛ}$ – радиальная компонента;

r – вектор положения НКА;

\dot{r} – вектор скорости НКА;

e_i – вектор направления;

$\delta \theta$ – вектор корректировки орбиты.

\times - означает векторное произведение

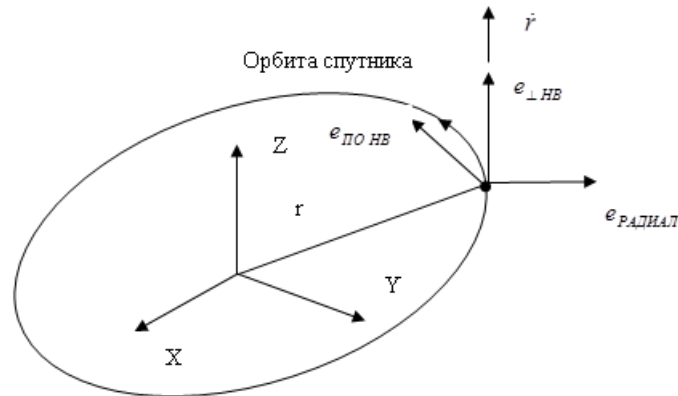


Рис 3. Радиальные компоненты, компоненты по и перпендикулярно направлению движения НКА.

Полный вектор коррекции орбит $\delta \theta$ на заданный момент времени t вычисляется из индивидуальных составляющих коррекций и их скоростей:

$$\delta \theta = \begin{bmatrix} \delta \theta_{РАДИАЛ} \\ \delta \theta_{ПО НВ} \\ \delta \theta_{\perp НВ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{\theta}_{РАДИАЛ} \\ \delta \dot{\theta}_{ПО НВ} \\ \delta \dot{\theta}_{\perp НВ} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1.6)$$

где:

t – время, на которое необходимо определить коррекции;

t_0 – референсное значение времени, взятое из SSR сообщения;

$\delta 0_{РАДИАЛ}$; $\delta 0_{ПО\ НВ}$; $\delta 0_{\perp\ НВ}$ – коррекции орбит по SSR сообщению. Сообщение часов содержит параметры для вычисления коррекций часов, включенных в передаваемые параметры спутниковых часов. Полиномиальное представление описывает различия часов для конкретного периода. Значение коррекций определяется следующим образом:

$$\delta t_{prec} = \delta t_{brd} - \frac{\delta C}{c}, \quad (1.7)$$

где:

δt_{brd} – время спутника, вычисленное, согласно ИКД ГНСС, по передаваемым эфемеридам с борта НКА;

δt_{prec} – время спутника, скорректированное SSR сообщением корректировки времени;

δC – коррекции часов, полученные из SSR сообщения;

c – скорость света.

Полином вычисляется по формуле:

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2, \quad (1.8)$$

где:

t – время, на которое необходимо определить коррекцию;

t_0 – начальное значение времени;

C_0, C_1, C_2 – полиномиальные коэффициенты.

Типы эфемеридных данных

Как говорилось ранее для обеспечения работы режима высокоточного абсолютного местоопределения необходимо использование эфемеридно-временного обеспечения, и точность полученного решения будет напрямую зависеть от качества представленной ЭВИ. Существует несколько типов эфемеридно-временной информации, различающихся по времени формирования и соответственно точности [1]. В таблице 2 представлены некоторые типы ЭВИ [7]. Рассмотрим кратко каждый из них.

Таблица 2 - Типы эфемеридно-временной информации.

	Тип данных	Точность	Время подготовки
Бортовые эфемериды (Broadcast)	Орбиты	≈ 100 см	Реальное время
	Часы спутника	≈ 5 нс (RMS)	
Сверхбыстрые предсказанные (Ultra-Rapid (predicted half))	Орбиты	≈ 5 см	Реальное время
	Часы спутника	≈ 3 нс (RMS)	
Сверхбыстрые (Ultra-Rapid (observed half))	Орбиты	≈ 3 см	3 - 9 часов
	Часы спутника	≈ 150 пс (RMS)	
Быстрые (Rapid)	Орбиты	≈ 2.5 см	17 - 41 часов
	Часы спутника	≈ 75 пс (RMS)	
Финальные (Final)	Орбиты	≈ 2.5 см	12 - 18 дней
	Часы спутника	≈ 75 пс	
Реальное времени (Real Time)	Орбиты	≈ 4 см	Реальное время
	Часы спутника	≈ 1.5 нс (RMS)	

Переданные (бортовые) эфемериды, как видно из их названия, передаются непосредственно от ГНСС спутников. Финальные (Final) эфемериды состоят из геоцентрических координат каждого спутника, определенных в наземной системе отчета и включают поправки часов. Эфемериды вычисляются для каждого спутника

с интервалом 15 мин. Финальные эфемериды – это продукт постобработки. Данные собираются станциями слежения, расположенными по всей территории Земли. Далее эти данные передаются в Международную Службу, допустим GPS (IGS), где и происходит вычисление точных эфемерид. Финальные эфемериды становятся доступными приблизительно через 2 недели после времени сбора данных и имеют точность данных по орбитам - менее 2.5 см и точность по часам - 75 пс. Быстрые (Rapid) эфемериды вычисляются по тому же принципу, что и точные эфемериды, однако при обработке используется меньший набор данных. Быстрые орбиты, как правило, “выкладываются” на службы международных агентств на следующий день. Точность быстрых эфемерид составляет по орбитам - 2.5 см и точность по часам- 75 пс. Сверхбыстрые эфемериды передаются, как и бортовые эфемериды, но обновляются они дважды в день. Точность сверхбыстрых эфемерид составляет ~ 3 см и ~ 150 пс. Эфемериды реального времени передаются в режиме псевдо-реального времени (с задержкой 5-8 секунд). Точность данных по орбитам составляет ~ 4 см, точность по часам ~ 1.5 нс.

Задача экспериментального исследования

Главная задача исследования заключалась в анализе возможности получения высокоточного решения в режиме PPP с использованием ЭВИ из сообщения MADOCA- LEX.

Второстепенная задача состояла в выборе источников ЭВИ с целью получения позиции в режиме высокоточного абсолютного позиционирования для сравнения с полученным с решением в аналогичном режиме использованием высокоточной ЭВИ с сообщения MADOCA- LEX.

Методика экспериментального исследования

При проведении исследования необходимо было исключить все возможные факторы, влияющие на качество проведенного эксперимента. В связи с этим была разработана следующая методика эксперимента:

- Разработка экспериментального макета (стенда) для проведения натурального лабораторного исследования, способного принимать, обрабатывать и записывать сигналы и необходимые измерения от ГНСС GPS и ГЛОНАСС, а также специальную корректирующую информацию, содержащуюся в MADOCA-LEX сигнале системы QZSS;
- Для уменьшения влияния ошибок многолучевости на навигационные измерения необходимо было обеспечить проведение эксперимента в условиях открытого неба, когда антенна навигационного приемника находится в зоне видимости большого количества НКА;
- Использование специализированных программных продуктов компании Торсон для настройки навигационного приемника и записи навигационных измерений ГНСС GPS и ГЛОНАСС;
- Определение ошибок позиционирования в статическом режиме работы потребителя. Для определения данных ошибок были использованы заранее вычисленные с высокой точностью координаты тестируемого приемника.

Экспериментальные исследования.

Для проведения натуральных экспериментов был спроектирован стенд, в составе профессионального навигационного приемника, навигационной антенны геодезического класса точности, коммуникационных кабелей, персонального компьютера.

Экспериментальный стенд для проведения натурального исследования имел вид, представленный на рисунке 4.



Рисунок 4 - Экспериментальный макет (стенд) для проведения натурного исследования

Сигналы ГНСС с выхода навигационной антенны поступают на двухчастотный двух-системный высокоточный приемник NET-G3 компании Topcon. С помощью специального программного обеспечения компании Topcon навигационные измерения с выхода приемника попадали в персональный компьютер для дальнейшей пост-обработки в режиме высокоточного абсолютного местоопределения, вместе с потоком навигационных измерений по сети интернет на персональный компьютер поступала высокоточная эфемеридно-временная информация сигнала MADOCA-LEX. Помимо высокоточной ЭВИ от системы QZSS для качественного проведения анализа полученных результатов при расчете позиции, в качестве эталона были также использованы эфемериды Final сервиса NRCAN и эфемериды реального времени CNES Real-Time. В результате проведенных экспериментов были получены оценки точности позиционирования в режиме PPP и данные об эффективности применения дифференциальной коррекции системы QZSS к НКА GPS и ГЛОНАСС.

Анализ результатов экспериментов и выводы.

В результате пост-обработки записанных навигационных измерений и высокоточной ЭВИ было получено навигационное решение в режиме PPP и были оценены широта, долгота в зависимости от времени. Данные зависимости представлены на рисунках 5-6

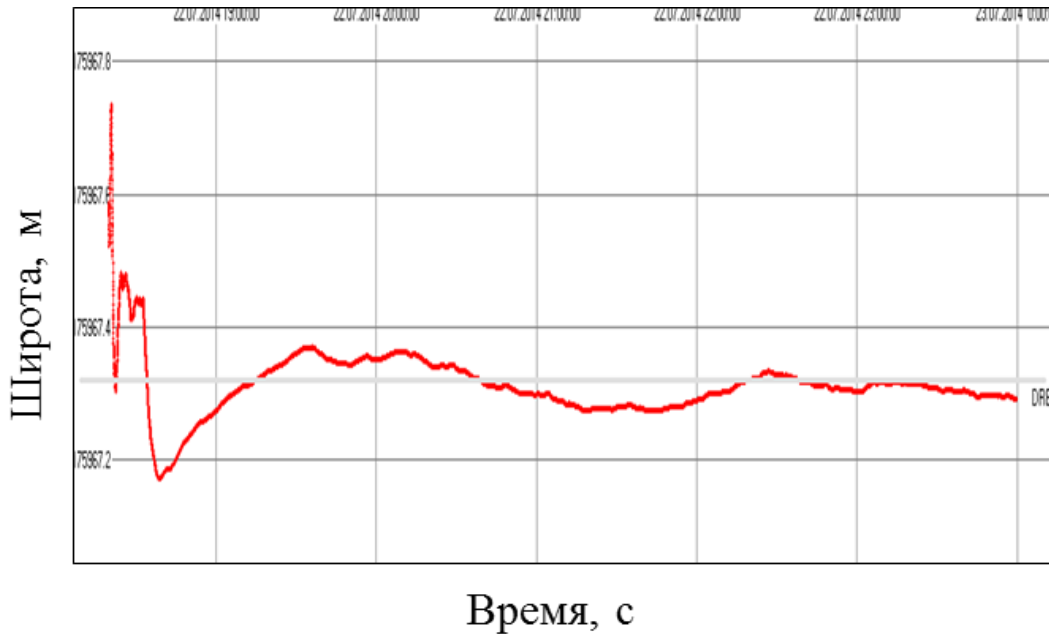


Рисунок - 5. Результат позиционирования в режиме PPP с использованием коррекций сообщения MADOCA-LEX системы QZSS

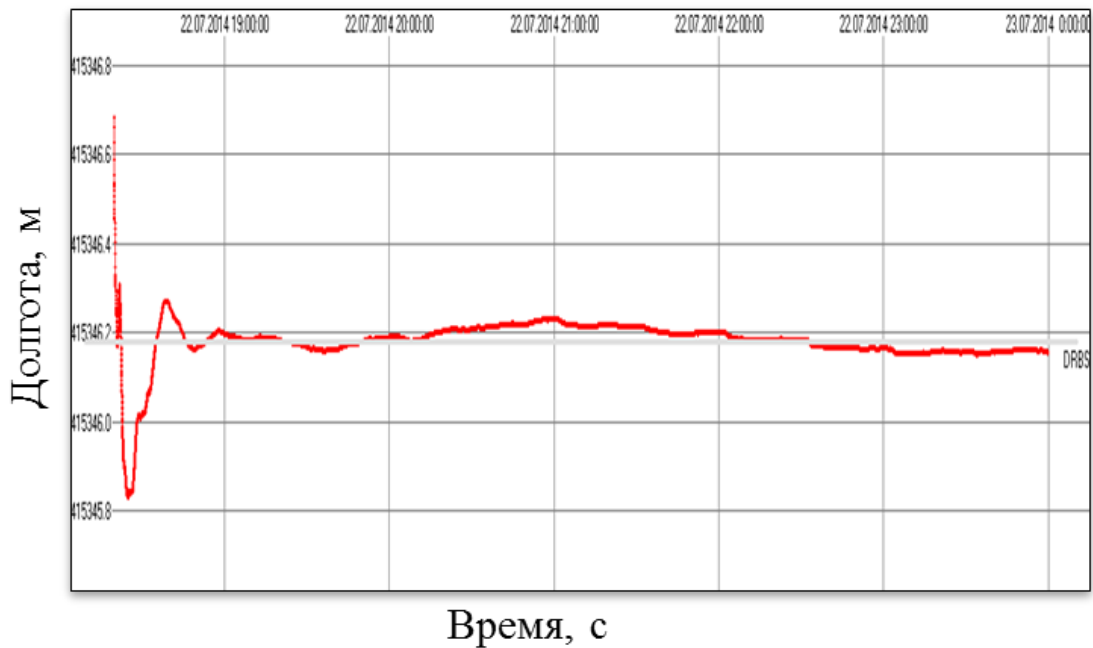


Рисунок - 6. Результат позиционирования в режиме PPP с использованием коррекций сообщения MADOCA-LEX системы QZSS

В результате проведения анализа данных, изображенных на рисунках 5-6, был сделан вывод, что в промежутке времени, равном порядка 30 минут в режиме PPP имеется некий период сходимости, по завершении которого достигаются точности определения координат не хуже 7 см.

Далее был проведен второй эксперимент для анализа точности позиционирования с использованием коррекций от сервиса NRCAN и CNES

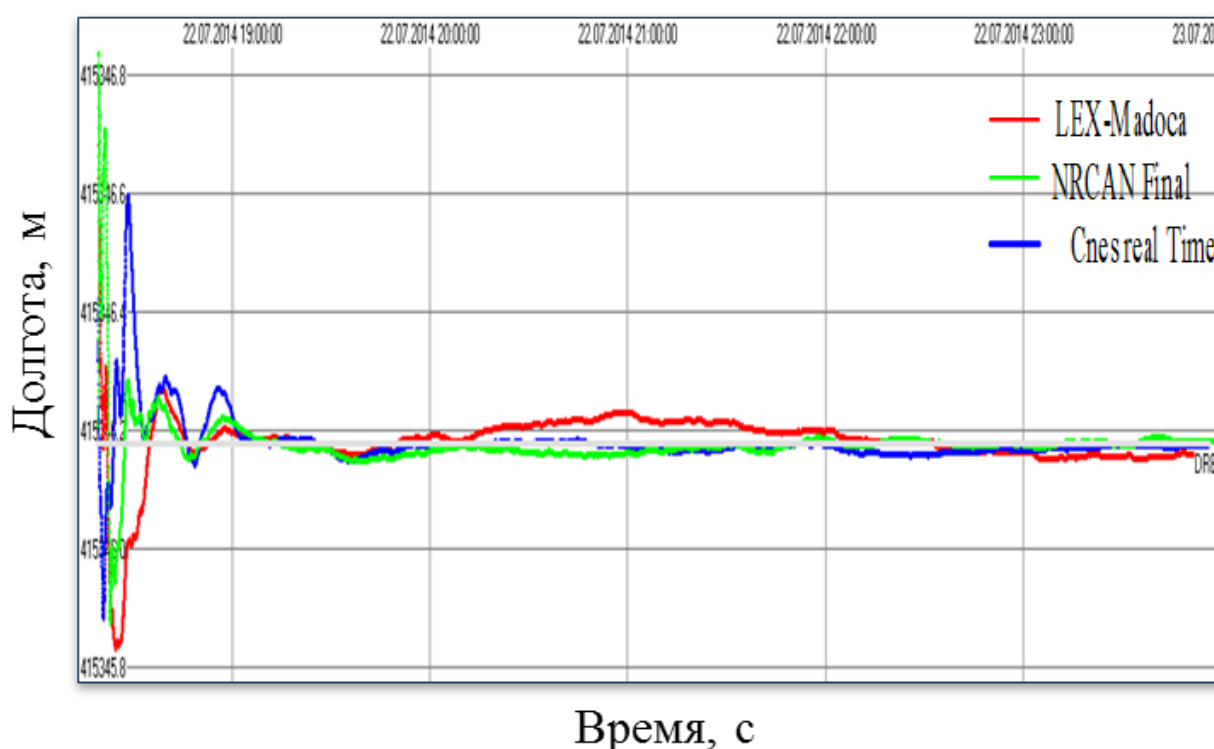


Рисунок - 7. Результат позиционирования по долготе в режиме PPP с использованием ЭВИ от различных источников.

На рисунках 7-8 приведены графики координат потребителя при использовании ЭВИ из сообщения MADOCA-LEX, с сервиса NRCAN и CNES Real-Time. В таблице 3 представлены значения RMS расчета позиции с использованием трех источников эфемеридно-временной информации.

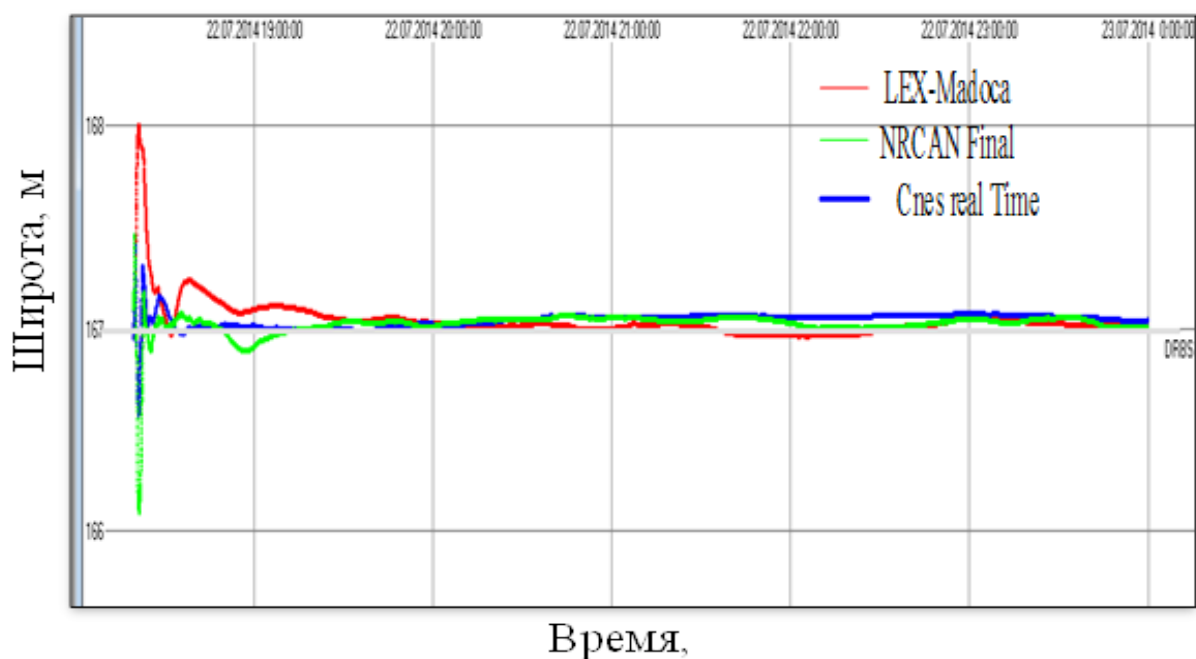


Рисунок - 8. Результат позиционирования по широте в режиме PPP с использованием ЭВИ от различных источников.

Таблица 3 - Ошибки определения широты, долготы и высоты при позиционировании в режиме PPP с использованием ЭВИ от различных источников.

RMS, m	Ошибки определения широты, долготы и высоты при позиционировании в режиме PPP с использованием ЭВИ:		
	MADOCA- LEX	CNES Real-Time	NRCAN Final
Широта	0.044	0.024	0.029
Долгота	0.044	0.041	0.028
Высота	0.093	0.061	0.049
2D	0.066	0.047	0.040

Из результатов эксперимента, представленных на Рисунках 7 - 8 и в таблице 3 сделан вывод, что точность позиционирования в плановых координатах в режиме PPP с использованием ЭВИ от сигнала MADOCA- LEX не хуже 7 см, а с использованием ЭВИ от иных сервисов не хуже 4-5 см. Проигрыш по точностным

характеристикам в режиме PPP с использованием ЭВИ MADOCA-LEX в сравнении с сервисом CNES возможно обусловлен тем, что эксперимент проводился в Москве и качество ЭВИ, поставляемой QZSS, на европейской территории РФ может ухудшаться из-за неплотной сети базовых станций в данной области. В азиатской зоне возможен обратный эффект, однако данное предположение требует дополнительных исследований.

Выводы

В процессе проведения исследований было изучено функционирование режима высокоточного абсолютного местоопределения PPP приемника при использовании MADOCA-LEX сигнала системы QZSS в качестве источника высокоточной эфемеридно-временной информации. Также было проведено сравнение результатов позиционирования в режиме PPP при использовании ЭВИ от международных сервисов NRCAN и CNES.

В ходе практических экспериментов были оценены характеристики точности решения навигационной задачи при реализации режима PPP. Результаты тестов показали, что в режиме позиционирования с использованием корректирующей информации от сигнала LEX системы QZSS можно достигнуть точности определения местоположения менее 7 см в плановых координатах в хороших условиях. Точность определения координат потребителя достижима при использовании высокоточной ЭВИ от квазизенитной системы QZSS в качестве корректирующей информации в режиме высокоточного абсолютного местоопределения, позволяет использовать данный метод коррекции режима PPP для ряда задач, требующих высокую точность местоопределения.

Библиографический список

1. Борискин А.Д., Вейцель А.В., Вейцель В.А., Милютин Д.С. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных

- систем: Приемник – потребитель навигационной информации -М.: Изд-во МАИ ПРИНТ, 2010. - 292 с.
2. Parkinson B. Spilker J. (ed.). Global Positioning System: Theory and Practice. Volumes I (694 p) and II (632 p). Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc. 1996.
 3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования./ Под редакцией Перова А.И., Харисова В.Н.. 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Радиотехника, 2010. - 800 с.
 4. Никитин. Д.П. Формирование и методы передачи высокоточной эфемеридно-временной информации для организации режима PPP в реальном времени.// Телекоммуникации. 2012. № 6. С. 8-33.
 5. Валайтите А.А. Никитин Д.П. Садовская Е.В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС при помощи имитатора навигационного поля // Электронный журнал "Труды МАИ", 2014, выпуск №77: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53172> (дата публикации 02.10.2014)
 6. Милютин Д.С., Никитин Д.П., Вейцель А.В. Повышение точности местоположения с использованием новых сигналов спутниковых навигационных систем // Вестник Московского Авиационного института, 2009. т. 16. № 6. С. 120-124.
 7. GPS Satellite Ephemerides/ Satellite & Station Clocks. In IGS Products. Ссылка активна на 10.06. 2015, с ресурса : <http://igs.org/products>.
 8. Вейцель А.В., Вейцель В.А., Татарников Д.В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных систем: высокоточные антенны, специальные методы повышения точности позиционирования. - М.: Изд-во МАИ ПРИНТ, 2010. -386 с.