

УДК 621.396.933

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

О.А. ГОРБАЧЕВ, В.Б. ИВАНОВ, А.А. ХОЛМОГОРОВ

На основе открытого авторами эффекта повторяемости суточного хода ошибок позиционирования с характерными временами в десятки – тысячи секунд в одночастотной пользовательской аппаратуре предложен новый метод повышения точности спутниковых радионавигационных систем.

**Ключевые слова:** спутниковая навигационная система, точность позиционирования, одночастотная навигационная аппаратура.

### Введение

Задача повышения точности позиционирования спутниковых радионавигационных систем (СРНС) является одной из важнейших проблем навигации. Состояние этой проблемы подробно описано, в частности, в обзорной работе [1]. В данной статье предлагается новый способ повышения точности позиционирования СРНС, связанный с описанной далее особенностью поведения во времени экспериментально наблюдаемых ошибок позиционирования. Особенность заключается в повторяемости в соседних сутках временного хода ошибок определения местоположения радионавигационных приемников.

Типичные значения ошибок позиционирования СРНС при использовании одночастотных навигационных приемников составляют несколько метров [2]. Использование высокоточных навигационных приборов и специальных методик решения навигационной задачи, включая применение нестандартных моделей ионосферного запаздывания сигналов (так называемая концепция PPP – precision point positioning), позволяет в одночастотном режиме выйти на дециметровый уровень точности. Соответствующие подходы описаны, например, в работе [3]. Однако такие средства пока не достигли стадии широкого использования в массовой потребительской аппаратуре. В этой связи представляет интерес использовать для повышения точности позиционирования указанную выше и детально описанную далее особенность.

В предыдущих экспериментальных исследованиях авторов [4; 5] был выявлен следующий интересный эффект, заключающийся в том, что измерения отклонений определяемых координат антенн навигационных приемников от их истинных значений имеют хорошо выраженную повторяемость в двух и более последовательных сутках. Эффект наиболее выражен во временных вариациях определяемой высоты фазового центра антенны. Эффект не связан с суточным ходом полного электронного содержания в ионосфере с периодом в 24 часа. Речь идет о более короткопериодических флуктуациях с характерными временами в десятки-тысячи секунд. Данные получены на специализированных наблюдательных пунктах Иркутского филиала МГТУ ГА в г. Иркутске для навигационной системы GPS.

Для наглядности на рис. 1 представлен типичный временной ход определяемой навигационным приемником высоты антенны в двух соседних сутках из работы [5]. По вертикальной оси отложены определяемые высоты антенн  $h$ . Здесь нам интересны только относительные вариации высот, поэтому на вертикальной оси показан масштаб единицы измерений. Кривые, соответствующие двум суткам, изображены одна под другой с некоторым смещением по вертикали. По горизонтальной оси отложено мировое время UTC в сеансах наблюдений соседних суток. Хорошо видна высокая степень корреляции временных ходов в двух соседних сутках и присутствие флуктуаций различных временных масштабов. Из последних можно выделить менее интенсивные ко-

роткопериодические флуктуации длительностью в десятки секунд и более интенсивные длинно-периодические вариации с характерными временами порядка тысяч секунд.

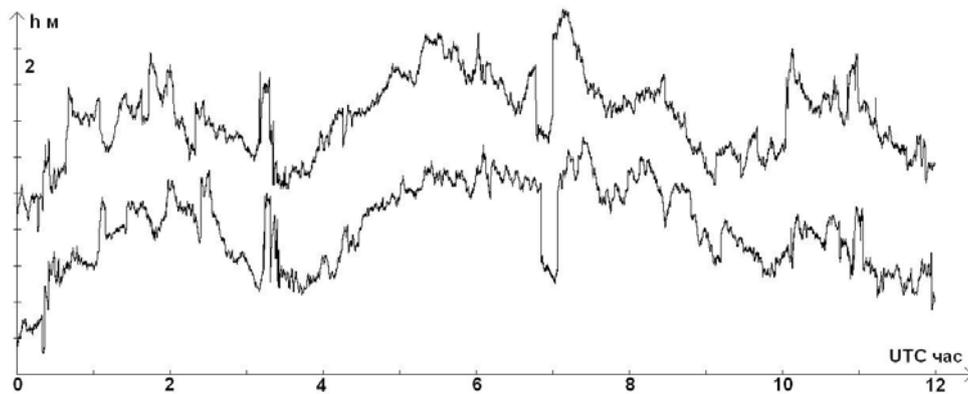


Рис. 1. Временной ход определяемой высоты антенны в соседних сутках

### Дифференциально-временная коррекция

Представленная в работе [5] особенность – повторяемость суточного хода ошибок позиционирования может быть применена для повышения точности определения положения потребителя с использованием данных реперных станций в данном регионе. Здесь имеет место определенная аналогия с известным дифференциальным режимом СРНС [8; 9], который в данном контексте следует назвать пространственно-дифференциальным. В простейшем варианте пространственно-дифференциальный режим реализуется следующим образом. В некотором регионе постоянно функционирует реперный навигационный приемник с известными координатами фазового центра антенны, называемый контрольно-корректирующей станцией (ККС). ККС в режиме реального времени определяет и по специализированным каналам связи передает потребителю текущие значения ошибок позиционирования по широте, долготе и высоте или по декартовым геоцентрическим координатам. Приемники в данном регионе, включенные в дифференциальный режим, непрерывно принимают эти значения, которые в качестве поправок вычитаются из определяемых координат. Скорректированные таким образом итоговые значения имеют существенно более высокую точность по сравнению с автономными измерениями.

Учитывая повторяемость суточного хода ошибок позиционирования, мы предлагаем метод коррекции координат, в котором используются поправки с ККС не в данный момент времени, а извлеченные из заранее записанного временного хода ошибок позиционирования ККС в предыдущие сутки. Для оценки эффективности предлагаемого метода нами было последовательно проведено два тестирования, результаты которых представлены ниже.

В первом тестировании использовались три станции из сети IGS: A1 - BLYT, A2 – JPLM и B – SIC1, расположенные в Калифорнии, США. Расстояние между станциями A1 и B составляет 252 км, между станциями A2 и B – 361 км. Первые две станции использовались в качестве ККС, и с них 22 февраля 2008 года снимался суточный ход ошибок позиционирования. По станции SIC1 производилось собственно тестирование. В следующие сутки производилось измерение координат станции SIC1 без коррекции, с коррекцией по ККС A1 и с коррекцией по ККС A2. Навигационная задача решалась с использованием программы RINEXPVT из инструментария GPStk [6; 7]. В качестве исходных использовались данные, представленные в виде навигационных и наблюдательных RINEX-файлов.

В табл. 1 представлены усредненные за сутки ошибки по широте, долготе и высоте. Ошибки в горизонтальной плоскости, как и по высоте, представлены в метрах. В строках таблицы представлены результаты тестирования без коррекции и с коррекцией по указанным ККС.

Таблица 1

Усредненные за сутки ошибки по широте, долготе, высоте

Средняя ошибка	По широте	По долготе	По высоте
В	0,77	-0,31	1,164
В-А1	-0,36	-0,23	-0,14
В-А2	-0,04	0,04	0,01

Как можно видеть из табл. 1, применение дифференциально-временной коррекции приводит к существенному снижению средней ошибки для обеих контрольно-корректирующих станций. По всем координатам средняя ошибка снижается не менее чем вдвое. Для ККС А2 (станция JPLM) средняя ошибка уменьшается не менее чем в 8 раз. По абсолютной величине достигается сантиметровая точность определения координат.

Другой вариант представления результатов этого же тестирования представлен в табл. 2. Здесь приведены значения усредненных за сутки абсолютных ошибок, т.е. евклидовых расстояний между точным положением антенны и определяемыми положениями по вертикали, в горизонтальной плоскости и для полного расстояния (3D).

Таблица 2

Усредненные абсолютные ошибки по высоте, по горизонтали, 3D

Средняя абсолютная ошибка	По высоте	В плоскости	Полная
В	1,164	0,83	1,43
В-А1	-0,14	0,42	0,45
В-А2	0,01	0,05	0,05

Для абсолютной ошибки эффективность коррекции несколько ниже, но и в этом случае достигается сантиметровая точность определения координат.

Второе тестирование проведено на двух упомянутых выше наблюдательных пунктах в г. Иркутске, принадлежащих Иркутскому филиалу МГТУ ГА. Эксперимент проводился 5 – 6 мая 2014 года. Пункт А являлся ККС, пункт В тестировался. В строках В и В-А табл. 3 и табл. 4, аналогично табл. 1 и табл. 2, представлены соответствующие ошибки позиционирования без применения дифференциально-временной коррекции и с ее применением. Ошибки в горизонтальной плоскости, как и по высоте, представлены в метрах.

Таблица 3

Усредненные за сутки ошибки по широте, долготе, высоте

Средняя ошибка	По широте	По долготе	По высоте
В	0,810	0,649	1,342
В-А	-0,220	0,312	-0,596
(В-А)~	-0,215	0,309	-0,587

В последних строках таблиц представлены результаты тестирования с использованием сглаживания (удаления высокочастотных флуктуаций) в корректирующем временном ходе. Сглаживание выполнялось усреднением по 20-минутным интервалам. Таким образом, суточный временной ход представлялся сеткой из 73 временных точек. В промежуточные моменты времени расчеты проводились с использованием линейной интерполяции. Сглаживание рационально как с точки зрения устранения влияния случайных флуктуаций, так и в плане компактного представления корректирующего временного хода.

Таблица 4

Усредненные абсолютные ошибки по высоте, по горизонтали, 3D

Средняя абсолютная ошибка	По высоте	В плоскости	Полная
B	1,342	1,038	1,697
B-A	0,596	0,382	0,708
(B-A)~	0,587	0,376	0,697

Как можно видеть из табл. 3 - 4, и для данного эксперимента имеет место существенное улучшение точности позиционирования с использованием дифференциально-временного режима, а сглаживание приводит только к дальнейшим уточнениям позиции.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют уверенно говорить о возможности использования в спутниковой навигации нового метода коррекции координат для одночастотной аппаратуры СРНС, базирующегося на открытом авторами эффекте повторяемости в соседних сутках вариаций ошибок позиционирования с характерными временными масштабами от десятков до тысяч секунд. Данный метод, названный авторами дифференциально-временной коррекцией, можно использовать для повышения точности позиционирования навигационной спутниковой аппаратуры массового потребления, что является его несомненным преимуществом перед стандартными методами коррекции (дифференциальным, PPP и др.).

Для реализации дифференциально-временной коррекции на базовой ККС необходимо записать суточный ход ошибок с применением сглаживания. Затем сформировать соответствующий файл числовых данных, выложить его в Интернет или передать оператору сотовой связи. В последующие сутки аппаратура потребителя в автоматическом режиме однократно загружает данный файл из сети Интернет либо получает его по каналам сотовой связи. Затем в аппаратуре потребителя из текущих вычисленных координат вычитаются соответствующие ошибки. Таким образом, существенная часть ошибок текущего позиционирования будет скомпенсирована.

В предлагаемом методе отпадает необходимость использования специализированных радиоканалов и значительно сокращается суточный объем передаваемой информации. Наиболее удобной дифференциально-временная коррекция может быть для потребителей, использующих мобильные устройства со встроенными навигационными приемниками, имеющими доступ к сотовой связи и сети Интернет. Именно для них наиболее просто организовать загрузку данных с корректирующей информацией.

Основным преимуществом дифференциально-временной коррекции является его дешевизна и простота реализации по сравнению со стандартными методами коррекции. В первую оче-

редь предлагаемая методика может быть полезна в условиях, когда реализация стандартных методов коррекции невозможна.

Более широкое применение дифференциально-временной коррекции может основываться на том факте, что подавляющее большинство потребителей навигационных услуг в мире обладают устройствами, совмещающими функции компьютера, сотового телефона и навигационного приемника. С учетом этого организация дифференциально-временного режима работы СРНС на территориях, охваченных сетью Интернет и сотовой связью, приведет к существенному улучшению качества навигационных услуг.

Отметим также, что в стандартном дифференциальном режиме СРНС корректирующая информация с ККС транслируется потребителям обычно не в форме поправок к координатам, а в виде поправок к псевдодальностям. Аналогичная методика может быть применена и к дифференциально-временной коррекции. Такую возможность следует рассматривать как предмет дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Thomas Grinte.** *Precise Point Positioning: Where are we now?* - International Global Navigation Satellite System Society IGNSS Symposium, 2011. [Электронный ресурс]. URL: [www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/grinter&roberts2011a.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/grinter&roberts2011a.pdf).

2. **Boubeker Belabbas, Achim Hornbostel and Mohammed Z. Sadeque.** Error Analysis of Single Frequency GPS Measurements and Impact on Timing and Positioning Accuracy. - PROCEEDINGS OF THE 2nd WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION (WPNC'05) & 1st ULTRA-WIDEBAND EXPERT TALK (UET'05), 2011, pp. 81-86.

3. **Roel J.P. van Bree, Christian C.J.M. Tiberius.** Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment. - GPS Solution, 2012, 16:259–266.

4. **Былинин К.Е., Горбачев О.А., Иванов В.Б., Хазанов Д.В.** Сравнительная оценка точности позиционирования одночастотной аппаратуры систем ГЛОНАСС и GPS // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2011. - № 171. - С. 78 - 83.

5. **Горбачев О.А., Иванов В.Б., Холмогоров А.А.** Временные вариации ошибок позиционирования в спутниковой навигационной системе GPS // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 195. - С. 118 - 125.

6. **Brian Tolman, Benjamin Harris R.** "The GPS Toolkit," Linux Journal, September, 2004, p. 72.

7. **Benjamin Harris R., Richard G. Mach.** The GPSTk: an open source GPS toolkit. - GPS Solution, 2007, 11:145-150.

#### THE TIME-DIFFERENTIAL MODE OF CORRECTING THE POSITIONING ERRORS OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

Gorbachev O.A., Ivanov V.B., Kholmogorov A.A.

The results of research of time variations of positioning errors in consumer's equipment of satellite navigation systems are presented. The shown repetition on adjacent days, peculiarity of day variation of errors, are proposed to be used for increasing accuracy of satellite navigation systems.

**Key words:** satellite navigation system, positioning accuracy, single frequency navigation equipment.

#### Сведения об авторах

**Горбачёв Олег Анатольевич**, 1959 г.р., окончил ИГУ (1982), доктор технических наук, доцент, директор Иркутского филиала МГТУ ГА, автор 52 научных работ, область научных интересов – радиоп физика, спутниковые системы навигации.

**Иванов Всеволод Борисович**, 1948 г.р., окончил ИГУ (1972), доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоп физики ИГУ, автор 100 научных работ, область научных интересов – радиоп физика.

**Холмогоров Андрей Александрович**, 1991 г.р., студент ИГУ, автор 2 научных работ, область научных интересов – радиоп физика.