

УДК 004:[316.3:008]

ББК 74.58:73

Г672

О. А. Горбачев

Иркутск, Россия

Д. А. Затолокин

Иркутск, Россия

В. Б. Иванов

Иркутск, Россия

А. А. Холмогоров

Иркутск, Россия

О НОВОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ОДНОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Задача повышения точности позиционирования глобальных спутниковых навигационных систем является одной из важнейших задач навигации. Одним из самых недорогих способов решения этой задачи является предложенный ранее авторами дифференциально-временной режим работы СРНС. Данная статья посвящена модернизации дифференциально-временного режима для спутниковых радионавигационных систем (СРНС) при их функционировании в одночастотном режиме.

Ключевые слова: навигационная задача; одночастотный приемник; фазовый центр антенны; дифференциальный режим; контрольно-корректирующая станция; псевдодальность.

O.A. Gorbachev
Irkutsk, Russia
D.A. Zatolokin
Irkutsk, Russia
V.B. Ivanov
Irkutsk, Russia
A.A. Kholmogorov
Irkutsk, Russia

CONCERNING A NEW POSSIBILITY OF INCREASING THE POSITION- ING ACCURACY IN SINGLE-FREQUENCY EQUIPMENT OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

The problem of increasing the positioning accuracy of global navigation satellite systems is one of the most important problems of navigation. One of the most inexpensive ways to solve the problem is the time-differential mode of GNSS proposed by the authors earlier. The article focuses on modernization of the time-differential mode for satellite radio navigation systems (SRNS) operating in a single-frequency mode.

Keywords: navigation problem; single-frequency receiver; antenna phase center; differential mode; control and correction station; pseudorange.

1 Введение

В предыдущих экспериментальных исследованиях авторов [Горбачёв, Иванов, Хазанов, Холмогоров, 2013; Kholmogorov, Ivanov, Gorbachev, 2013] был выявлен следующий интересный эффект, заключающийся в том, что измерения отклонений определяемых координат антенн навигационных приемников от их истинных значений имеет хорошо выраженную повторяемость в двух и более последовательных сутках. Эффект представляет собой короткопериодические

флуктуации с характерными временами в десятки – тысячи секунд и, следовательно, не связан с суточным ходом полного электронного содержания в ионосфере, имеющим период 24 часа. Эффект наиболее выражен для высоты фазового центра антенны. 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 [Kholmogorov, Ivanov, Gorbachev, 2013]. По вертикальной оси отложены определяемые высоты антенн h . Здесь нам интересны только относительные вариации высот, поэтому по 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 определяемых высот антенн в двух соседних сутках и присутствие флуктуаций различных временных масштабов. Из последних можно выделить менее интенсивные короткопериодические флуктуации с характерными временами в десятки секунд и более интенсивные длиннопериодические вариации с характерными временами порядка тысяч секунд.

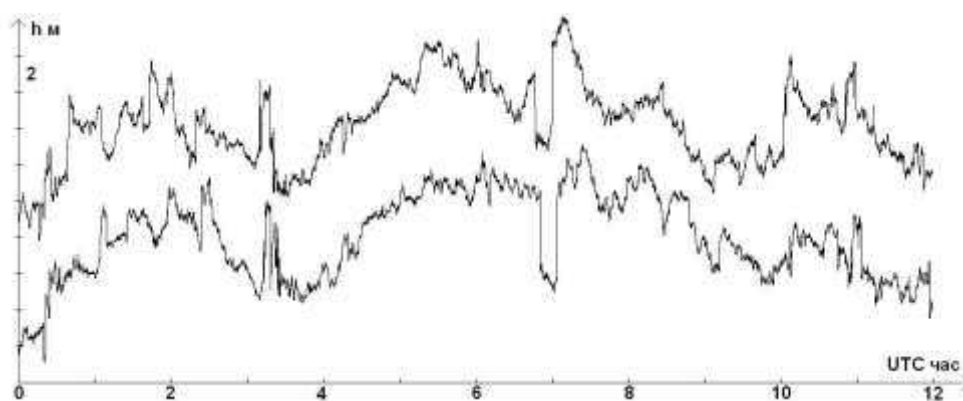


Рис. 1. Временной ход определяемой высоты антенны в соседних сутках

2 Дифференциально-временная коррекция

Представленный выше эффект – повторяемость суточного хода ошибок позиционирования – может быть применен для повышения точности определения положения потребителя с использованием данных реперных станций в данном

регионе. Идея состоит в том, чтобы на опорном пункте с известными координатами антенны навигационного приемника формировать и записывать в файл (возможно, с применением сглаживания) временные ходы ошибок позиционирования по высоте, широте и долготе. Записанные данные необходимо предоставить в следующие сутки потребителям, которые вычитают эти ошибки из текущих координат, определяемых приемниками. В работе [Горбачёв, Иванов, Холмогоров, 2014] приведены результаты предварительного исследования эффективности предлагаемого подхода. Они показали, что такое применение описанного выше эффекта способно обеспечивать весьма заметное повышение точности позиционирования.

По сути, здесь имеет место определенная аналогия с известным дифференциальным режимом СРНС [Roel J. P. van Bree · Christian C. J. M. Tiberius, 2012], который далее будем называть стандартным дифференциальным режимом (ДР). В простейшем варианте стандартный ДР 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.

Хорошо известны недостатки стандартного дифференциального режима: высокая стоимость реализации и уменьшение точности позиционирования с ростом расстояния между ККС и потребителем.

Учитывая вышесказанное, в работах [Kholmogorov, Ivanov, Gorbachev, 2013; Горбачёв, Иванов, Холмогоров, 2014] нами предложен простой и дешевый метод коррекции определяемых координат, основанный на применении эффекта

повторяемости суточного хода ошибок позиционирования. По аналогии с дифференциальным режимом, мы назвали метод дифференциально-временным режимом (ДВР), так как в нем используются поправки с ККС не в данный момент времени, а извлеченные из заранее записанного временного хода ошибок позиционирования ККС в предыдущие сутки.

3 Альтернативный дифференциально-временной режим

В работе [Горбачёв, Иванов, Холмогоров, 2014] указывалось, что возможна модернизация ДВР. Существенным отличием описанного выше ДВР от стандартного дифференциального режима является то, что при использовании последнего, как правило, потребителям с ККС передаются поправки к псевдодальностям, а не непосредственно к координатам, как в ДВР. Поэтому была рассмотрена возможность передачи поправок к псевдодальности и в ДВР. Такая процедура является значительно более трудоемкой, но была нами выполнена. В результате мы получили режим позиционирования, названный нами альтернативным дифференциально-временным режимом (АДВР).

Суть метода АДВР заключается в следующем. На ККС в контрольный день вычисляются погрешности к псевдодальности для каждого спутника путем минимизации остаточной ошибки позиционирования в каждый момент времени. Затем, на приемнике, включенном в режим АДВР, данные поправки вычитаются на следующие сутки относительно контрольного дня.

4 Тестирование альтернативного ДВР

Целью данного раздела является оценка качества альтернативного дифференциально-временного режима в сравнении с иными методами повышения точности позиционирования.

Для тестирования альтернативного ДВР были выбраны 2 среднеширотные станции сети IGS, расположенные в Европе: ONSA (станция А) и SPT0 (станция В). Были взяты 3 пары данных для 23 и 24 чисел марта, июня и декабря 2015 г. Метод АДВР использовался как для корректировок А по В, так и для обратной корректировке В по А с усреднением всех данных. Эффективность

АДВР, представленная в *табл. 1*, оценивалась в сравнении со следующими режимами:

1. Без коррекции.
2. С использованием стандартной модели Клобучара.
3. С использованием модели GEMTEC [Ivanov, Gefan, Gorbachev, 2011].
4. С использованием обычного ДВР.
5. С использованием альтернативного ДВР.
6. С использованием двухчастотного режима.

В столбцах *табл. 1* представлены:

- dlat – средняя ошибка по широте;
- dlon – средняя ошибка по долготе;
- dh – средняя ошибка по высоте;
- dhor – модуль средней ошибки в горизонтальной плоскости;
- dfull – модуль средней полной ошибки.

Все числовые данные представлены в метрах.

Таблица 1

	dlat	dlon	dh	dhor	dfull
Без коррекции	1,47	0,52	4,25	1,56	4,53
Модель Клобучара	1,54	0,47	0,36	1,61	1,65
Модель GEMTEC	1,04	0,55	0,71	1,18	1,38
ДВР	0,00	0,14	-0,02	0,14	0,14
АДВР	-0,24	-1,35	0,64	1,37	1,51
Двухчастотный режим	0,52	0,43	0,63	0,67	0,92

Как и ожидалось, использование АДВР уменьшает ошибку позиционирования по сравнению с режимом без коррекции и моделью Клобучара. Однако следует отметить, что в данном тестировании АДВР оказался на уровне модели GEMTEC и хуже обычного ДВР и двухчастотного режима. Интересно и то, что в данной серии расчетов обычный ДВР показал наилучшие результаты коррекции, даже по сравнению с двухчастотным режимом.

На *рис. 2* приведен пример временного хода остаточной ошибки позиционирования для станции ONSA 24 июня, после коррекции по станции SPT0 за 23 июня, с использованием плавающего среднего с 10-минутным интервалом сглаживания. Сплошной линией изображен режим работы без коррекции, далее показана коррекция с использованием:

- длинный пунктир – модели Клобучара;
- короткий штрих – модели GEMTEC;
- точечная линия – обычного ДВР;
- длинный штрих-пунктир – альтернативного ДВР;
- короткий штрих-пунктир – двухчастотного режима.

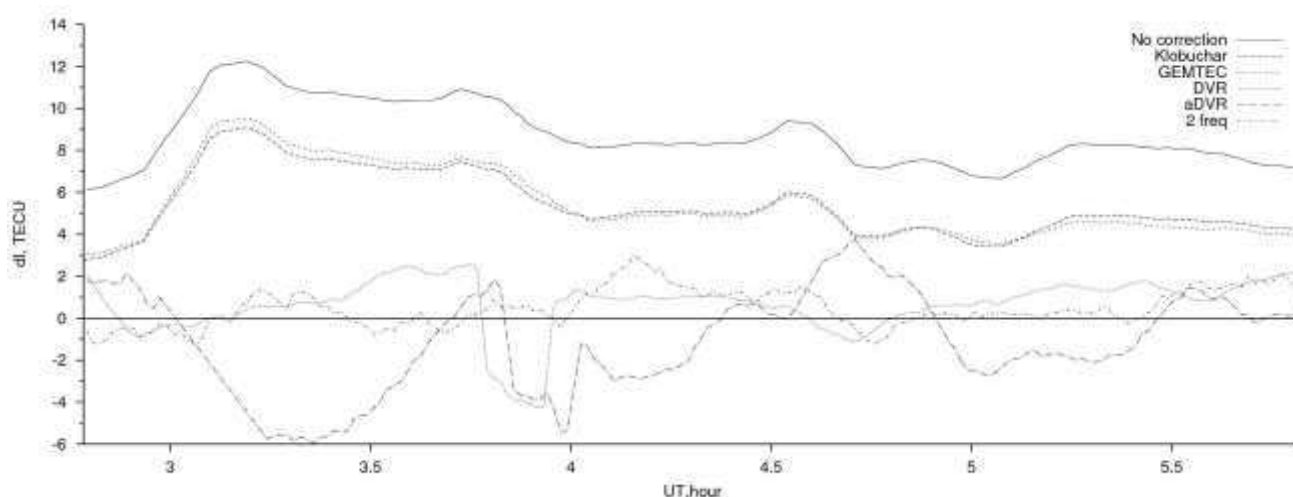


Рис. 2. Временной ход остаточной ошибки позиционирования при коррекции различными методами

Показанные на *рис. 2* результаты расчетов подтверждают выводы, полученные из анализа экспериментальных данных, приведенных в *табл. 1*, а именно: альтернативный ДВР работает не лучше обычного ДВР. При этом оба режима уменьшают остаточную ошибку позиционирования эффективнее, чем модель Клобучара и модель GEMTEC.

5 Заключение

Из проведенного исследования следует, что реализация альтернативного ДВР с передачей поправок к псевдодальностям существенно более сложна и не дает выигрыша в уточнении координат по сравнению с обычным ДВР с передачей поправок к координатам. Поэтому в качестве рабочего авторы рекомендуют

к использованию обычных ДВР при коррекции определяемых координат в одностототных приемниках СРНС.

Библиографический список

1. Горбачёв О. А. Временные вариации ошибок позиционирования в спутниковой навигационной системе GPS / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, Д. В. Хазанов, А. А. Холмогоров // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 23–31.
2. Горбачёв О. А. Дифференциально-временная коррекция ошибок позиционирования для спутниковых радионавигационных систем / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 207. С. 90–96.
3. Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. Global Empirical Modeling of the Total Electron Content in the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems // Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. v.73. P. 1703-1707.
4. Kholmogorov A.A., Ivanov V.B., Gorbachev O.A. New Possibility Of Increase Of Positioning Accuracy In Satellite Navigation Systems // International scientific conference, METF 2013. Krasnoyarsk, February 6-8. P. 36-44.
5. Roel J. P. van Bree · Christian C. J. M. Tiberius Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment. GPS Solution. 2012. v.16. P.259–266.

References

1. Gorbachev O.A. (2013). Time variations of positioning errors in GPS satellite navigation system / O. A. Gorbachev, V. B. Ivanov, D. V. Hazanov, A. A. Holmogorov // Scientific Bulletin of MSTU CA. 2013. № 198. P. 23–31. (in Russian)
2. Gorbachev O.A. (2014). Time-differential correction of positioning errors for satellite radio navigation systems / O. A. Gorbachev, V. B. Ivanov, A. A. Holmogorov // Scientific Bulletin of MSTU CA. 2014. № 207. P. 90–96. (in Russian)
3. Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. (2011). Global Empirical Modeling of the Total Electron Content in the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems // Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. v.73. P. 1703-1707. (in English)
4. Kholmogorov A.A., Ivanov V.B., Gorbachev O.A. (2013). New Possibility Of Increase Of Positioning Accuracy In Satellite Navigation Systems // International scientific conference, METF 2013. Krasnoyarsk, February 6-8. P. 36-44. (in English)
5. Roel J. P. van Bree · Christian C. J. M. (2012). Tiberius Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment. GPS Solution. 2012. v. 16. P.259–266. (in English)