

## ВЛИЯНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОДОВЫХ ЗАДЕРЖЕК НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ГЛОНАСС/GPS

А.А. Мыльникова, Ю.В. Ясюкевич

## IMPACT OF DIFFERENTIAL CODE BIASES ON DETERMINATION OF ABSOLUTE IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT FROM GLONASS/GPS DATA

A.A. Mylnikova, Y.V. Yasyukevich

При определении абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере с использованием одновременно кодовых и фазовых измерений по данным ГЛОНАСС/GPS, возникает систематическая ошибка, связанная с различием времен прохождения сигналов диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приемника и спутника (дифференциальные кодовые задержки, ДКЗ). ДКЗ, равные 1 нс, приводят к ошибке определения ПЭС ~2.8 TECU. В работе оценивается временная динамика поведения этой погрешности для нескольких станций сети IGS, расположенных в разных частях земного шара. Для оценки использованы данные лаборатории CODG. Приведен алгоритм определения абсолютного ПЭС и ДКЗ.

When determining the absolute ionospheric total electron content (TEC) from GLONASS/GPS code and phase measurements, the systematic error appears. This error is related with different times of L1 and L2 signal propagation for each satellite and receiver (differential code bias, DCB). One nanosecond DCB results in ~2.8 TECU error. We estimated DCB time changes for several IGS stations located in different parts of the world. CODG Laboratory data are used. The algorithm of determining the absolute TEC and DCB is presented.

### Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System) были разработаны для определения точных координат приемника, регистрирующего сигналы от навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) при их известных координатах.

Кроме решения навигационных задач, ГНСС используются для дистанционного радиозондирования ионосферы: по двухчастотным кодовым и фазовым измерениям псевдодалности определяется полное электронное содержание в ионосфере (ПЭС) [Афраймович, 2006].

При определении абсолютного ПЭС с использованием одновременно кодовых и фазовых измерений, возникает систематическая ошибка, зависящая и от спутника и от приемника, связанная с тем, что время прохождения сигналов диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приемника и спутника различно и зависит от частоты сигнала. При этом на точность определения абсолютного значения ПЭС влияет именно разностная величина времен запаздывания в радиочастотных каналах L1 и L2.

Таким образом, имеет место рассинхронизация частотных каналов (Differential code bias, ДСВ дифференциальные кодовые задержки, ДКЗ). В результате влияния этой погрешности ПЭС может принимать отрицательные нефизические значения. Для получения значений абсолютного ПЭС необходимо учитывать ДКЗ. Один из вариантов решения проблемы – калибровка приемников на основе данных одной из станций, входящих в состав IGS.

### Динамика дифференциальных кодовых задержек

Для анализа ДКЗ были использованы данные лаборатории CODG [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex]. Пример изменения ДКЗ для двух спутников приведен на рис. 1. Черная кривая – для частотных каналов спутника ГЛОНАСС 04; серая – для GPS PRN03.

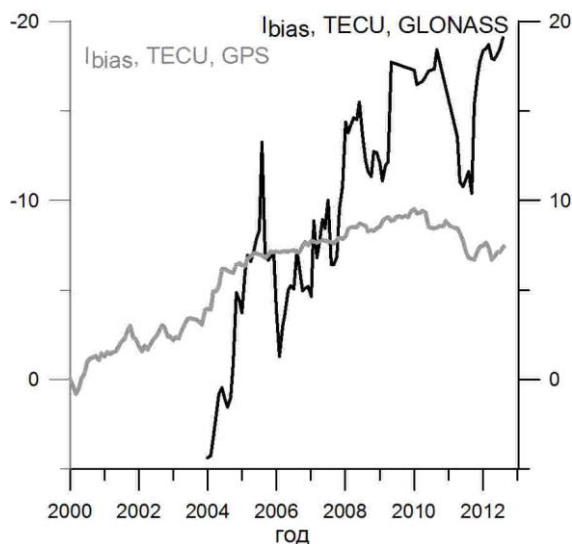


Рис. 1. Динамика погрешности определения ПЭС, связанная с ДКЗ в частотных каналах спутника ГЛОНАСС 04 (черная кривая, правая шкала) и GPS PRN03 (серая кривая, левая шкала).

Было получено, что ДКЗ для приемников в частотном канале ГЛОНАСС достигают 17.4 нс (50 TECU), в канале GPS – 21 нс (60 TECU). Для спутников ГЛОНАСС ДКЗ достигают 24 нс (70 TECU). Для спутников GPS величина составляет 10.5 нс (30 TECU). Также существует систематическое изменение ДКЗ в каналах ГЛОНАСС и GPS (см. рис. 1). Полученные результаты согласуются с работами Schaer [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\_1.3.1.pdf].

Вследствие существования систематических изменений погрешности определения ПЭС, обусловленной ДКЗ в частотных каналах ГЛОНАСС и GPS, невозможно на длительный срок один раз откалибровать приемник. Требуется многократная калибровка приемников измерительной сети в процессе мониторинга. Это можно сделать с помощью обязательных регулярных измерений этой погрешности определения ПЭС.

**Алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ**

Был разработан алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ по данным двухчастотных приемников ГЛОНАСС/GPS. Алгоритм имеет следующую структуру.

1. Разделение рядов данных на непрерывные временные интервалы.
2. Детектирование и устранение выбросов и срывов сопровождения сигнала (cycle slip) по алгоритму Blewitt [Blewitt, 1990].
3. Вычисление неоднозначности фазовых измерений и ПЭС на основе усреднения разности фазовых и групповых измерений.

Неоднозначность фазовых измерений для каждого непрерывного интервала определяется как

$$const_{1,2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_2 - P_1 - (L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2))_i, \quad (1)$$

где  $P_1, P_2$  – кодовые измерения псевдодалности,  $L_1, L_2$  – фазовые измерения псевдодалности на двух частотах,  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн,  $N$  – число измерений.

При накоплении независимых измерений интенсивность шума определения этой неоднозначности падает в  $\sqrt{N}$  раз. На рис. 2 приведен пример устранения фазовой неоднозначности.

4. Вычисление погрешности  $I_{BIAS}$  определения ПЭС из-за ДКЗ в частотных каналах по методу наименьших квадратов.

Для расчетов задается модель фазовых измерений (2). Параметрами модели могут являться вертикальное ПЭС, широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС, ДКЗ.

$$I_M = S_j^i (I_V + G_{Lon} \Delta Lon_j^i + G_{q\_Lon} (\Delta Lon_j^i)^2 + G_{Lat} \Delta Lat_j^i + G_{q\_Lat} (\Delta Lat_j^i)^2 + G_i \Delta t_j^i + G_{q\_t} (\Delta t_j^i)^2) + I_{BIAS,j}. \quad (2)$$

В модели задается функциональная зависимость градиентов и производных, а также зависимость ПЭС от угла места посредством фактора наклона  $S_j^i$

$$S_j^i = \frac{\sqrt{R^2 \sin^2 \theta_j^i + 2Rh_2 + h_2^2} - \sqrt{R^2 \sin^2 \theta_j^i + 2Rh_1 + h_1^2}}{h_2 - h_1}. \quad (3)$$

Далее по методу наименьших квадратов определяются параметры модели. Для этого осуществляется минимизация функционала:

$$U = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} W_i^j (I_{M_i}^j - I_{изм_i}^j)^2, \quad (4)$$

где  $W_i^j = \frac{1}{S_i^j \sum_i \frac{1}{S_i^j}}$  – весовой множитель.

После дифференцирования по параметрам модели получаем набор уравнений. Далее формируется матрица коэффициентов для полученной системы уравнений  $ax=b$ , которая решается численным методом.

Для тестирования алгоритма определения абсолютного ПЭС и ошибок ПЭС, связанных с неучтенными ДКЗ, моделировались данные ГЛОНАСС/GPS-измерений. Для моделирования использована

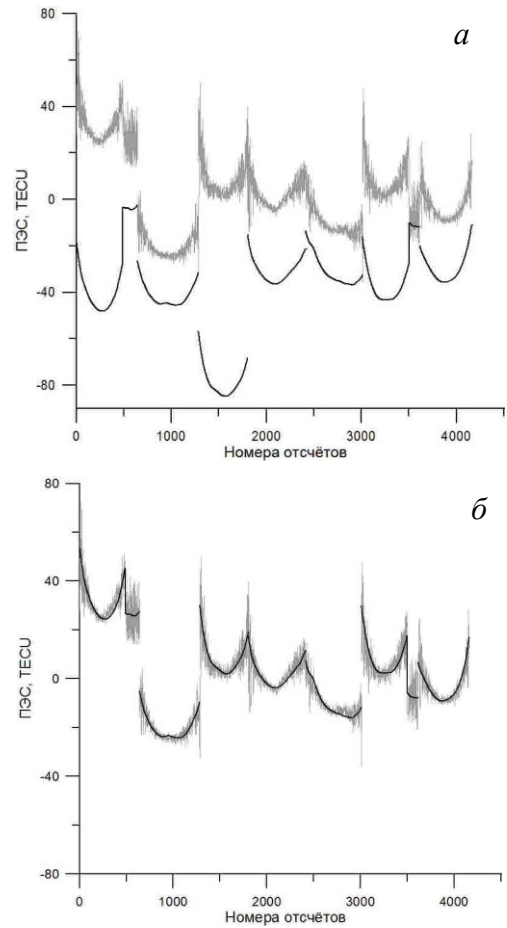


Рис. 2. ПЭС по групповым (серая кривая) и фазовым (черная кривая) измерениям без учета (а) и с учетом фазовой неоднозначности (б).

та же модель (2), что и для восстановления абсолютного ПЭС, но с добавлением шума, зависящего от угла места.

Была проанализирована точность восстановления абсолютного ПЭС и ошибок ПЭС, связанных с неучтенными ДКЗ в зависимости от задаваемой модели в алгоритме определения ПЭС. Из модели по очереди исключались временная производная, квадратичные и линейные пространственные градиенты. Далее проводилось тестирование алгоритма. Данные смоделированы с амплитудой шума групповых и фазовых измерений, примерно соответствующей амплитуде шума реальных данных. Восстановление абсолютного ПЭС и ДКЗ выполнялось для двухчасового интервала.

Результаты тестирования представлены в таблице. Видно, что при исключении из модели в алгоритме определения ПЭС первой и второй временной производных значение вертикального ПЭС восстанавливается с высокой точностью, а значения пространственных градиентов восстанавливаются с большой ошибкой, доходящей до 500 %. Значения ДКЗ в каналах спутников GPS и ГЛОНАСС также определяются с ошибкой в сотни процентов. При исключении из модели пространственных градиентов ошибка определения вертикального абсолютного ПЭС составила ~2.5 %; ошибка определения значения временных производных ~5 %; ошибка определения ДКЗ в каналах спутников GPS и ГЛОНАСС примерно ~50 %.

Результаты тестирования алгоритма по восстановлению параметров модели (I и II – два эксперимента с разными значениями случайного шума).

	Задано	Получено со всеми параметрами модели	Исключили $G_t$ и $G_{q_t}$		Исключили $G_{q_{lon}}$ и $G_{q_{lat}}$		Исключили $G_{lon}$ и $G_{q_{lon}}$	
			I	II	I	II	I	II
Iv	25	24.953	25.061	25.052	25.668	25.635	25.516	25.678
$G_{lon}$	0.5	0.434	2.885	2.982	0.607	0.726	–	–
$G_{lat}$	0.5	0.512	0.053	0.062	0.382	0.342	0.498	0.474
$G_{q_{lon}}$	0.2	0.191	0.242	0.266	–	–	–	–
$G_{q_{lat}}$	0.2	0.358	–0.601	–0.499	–	–	0.184	0.113
$G_t$	2	1.913	–	–	1.887	1.875	2.088	2.105
$G_{q_t}$	0.2	0.223	–	–	0.21	0.34	0.186	0.13
PRN 04	4	4.38	–5.194	–5.534	2.31	1.818	4.569	4.831
PRN 10	10	9.614	6.167	6.233	8.775	8.775	9.641	9.594
PRN 13	13	12.409	6.435	5.807	11.28	10.465	12.687	13.203
ГЛО № 04	4	3.712	1.668	1.462	2.678	2.532	3.637	2.95
ГЛО № 14	14	14.696	18.146	17.898	13.639	12.04	13.583	13.897
ГЛО № 19	19	18.625	15.857	16.136	17.833	17.597	18.1	18.204

### Заключение

Влияние ДКЗ на определение абсолютного ПЭС существенно, при этом присутствует систематическое изменение погрешности ПЭС, связанной с ДКЗ, поэтому необходимо учитывать ДКЗ в каждый момент времени для точного определения абсолютного ПЭС.

В результате тестирования алгоритма на точность восстановления абсолютного ПЭС и ошибок ПЭС, связанных с неучтенными ДКЗ, получено, что в большей степени на точность определения влияет отсутствие первой и второй временных производных. Отсутствие пространственных градиентов на точность определения вертикального ПЭС и временных производных влияет незначительно, на точность определения ДКЗ влияет существенно, но в несколько раз меньше, чем исключение временных производных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-33032 мол а вед), Министерства образования и науки РФ (соглашение № 8699 и 8388, ГК № 14.518.11.7065), гранта Президента РФ МК-№ 3771.2013.5.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data // Geophys. Res. Lett. 1990. N 17. P. 483–492.

Schaer S. Overview of GNSS biases [Электронный ресурс] // International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases. [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\\_1.3.1.pdf](http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.3.1.pdf) (дата обращения 21.08.2013).

The Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [Электронный ресурс] // URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex> (дата обращения 20.08.2013).

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*