

II. Материалы семинара, посвященного памяти профессора Э.Л. Афраймовича

УДК 550.388.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ГЛОНАСС/GPS

¹А.А. Мыльникова, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич, ^{1,3}В.В. Демьянов

ESTIMATION OF ABSOLUTE VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE IONOSPHERE FROM GLONASS/GPS DATA

¹А.А. Mylnikova, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich, ^{1,3}V.V. Demyanov

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 разницей времен прохождения сигналов диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приемника и спутника (дифференциальные кодовые задержки, ДКЗ). ДКЗ в 1 нс приводят к ошибке определения ПЭС ~2.9 TECU. В работе приведен алгоритм оценки абсолютного значения вертикального ПЭС и ДКЗ. Представлены результаты их вычислений на основе описанного алгоритма.

Ключевые слова: полное электронное содержание, дифференциальные кодовые задержки, GPS, ГЛОНАСС, ионосферное зондирование.

When determining absolute ionospheric vertical total electron content (TEC) using pseudo range and phase measurements from GLONASS/GPS data, the systematic error occurs. It is caused by the time difference between passing signals of L1 and L2 ranges in radio-frequency paths of the receiver and satellite (differential code bias, DCB). DCB of 1 ns results in TEC estimation error of ~2.9 TECU. The algorithm for estimating the absolute vertical TEC and DCB is given, and the results of their computation are presented.

Key words: Total electron content, differential code bias, GPS, GLONASS, ionosphere sounding.

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 псевдодальности определяется полное электронное содержание в ионосфере (ПЭС) [Афраймович, Перевалова, 2006]. Фазовые измерения слабо зашумлены, однако они являются относительными вследствие неоднозначности определения начальной фазы. Кодовые измерения являются абсолютными, однако шумы измерений очень велики: до сотен процентов при низких углах места [Куницын и др., 2007].

При определении абсолютного ПЭС с использованием одновременно кодовых и фазовых измерений [Татаринов и др., 2011] возникает систематическая ошибка, зависящая и от спутника, и от приемника, связанная с тем, что времена прохождения сигналов диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приемника и спутника различаются и зависят от частоты сигнала. При этом на точность определения абсолютного значения ПЭС влияет именно разностная величина времен запаздывания в радиочастотных каналах L1 и L2.

В результате влияния этой погрешности, носящей в литературе название дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ), ПЭС может принимать отрицательные нефизические значения. Таким образом, для получения значений абсолютного ПЭС необходимо учитывать ДКЗ.

1. Динамика дифференциальных кодовых задержек

Нами был проведен анализ динамики ДКЗ в частотных каналах спутников и приемников и связанной с ДКЗ ошибкой ПЭС за 2000–2012 гг. ДКЗ в 1 нс приводят к ошибке определения ПЭС ~2.9 TECU (подробнее см. п. 2, (3)). Для оценки были использованы данные лаборатории CODG [<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>], получаемые при анализе данных мировой сети станций GPS и ГЛОНАСС.

Пример динамики ошибки ПЭС, связанной с ДКЗ, для двух спутников 04 ГЛОНАСС и PRN03 GPS, усредненной по всем приемникам сети IGS (International GNSS Service) [<http://igscb.jpl.nasa.gov/>], приведен на рис. 1. Шкала для спутника GPS инвертирована для сравнения систематического изменения.

Видно, что существует систематическое изменение погрешности определения ПЭС, связанной с ДКЗ. Систематическое изменение погрешности ПЭС для спутника GPS (~1 TECU/год) в три раза меньше, чем для спутника ГЛОНАСС (~3 TECU/год). Существуют также вариации значений погрешности ПЭС для спутника ГЛОНАСС-04. Амплитуда вариаций достигает 5 TECU. Для спутника PRN03 вариации сравнительно небольшие. Подобные значительные различия между системами ГЛОНАСС и GPS имеют место и для других спутников.

Проанализирована также динамика ДКЗ в частотных каналах приемников для нескольких станций, входящих в состав IGS. Получено, что ДКЗ для приемников в частотном канале ГЛОНАСС могут достигать 17.4 нс, что соответствует погрешности ПЭС ~50 TECU, в канале GPS – 21 нс (60 TECU). Данные оценки согласуются с работой [Schaer, 2012], где было показано, что ДКЗ могут достигать

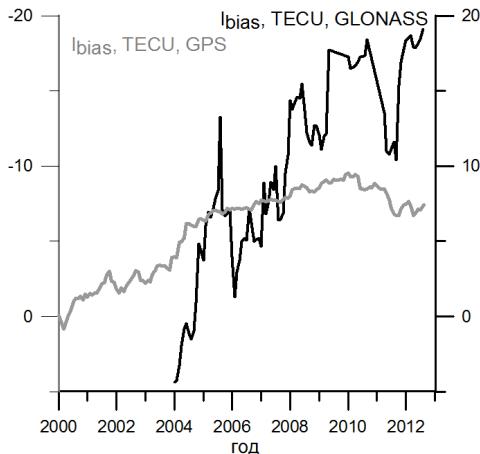


Рис. 1. Динамика погрешности определения ПЭС, связанная с ДКЗ в частотных каналах спутника 04 ГЛОНАСС (черная кривая, правая шкала) и PRN03 GPS (серая кривая, левая шкала).

20 нс в каналах приемников и 10 нс в каналах спутников.

Вследствие существования систематических изменений погрешности определения ПЭС, обусловленной ДКЗ в частотных каналах ГЛОНАСС и GPS, невозможно на длительный срок откалибровать приемник для определения абсолютного ПЭС. Требуется многократная калибровка приемников измерительной сети в процессе мониторинга. Это можно выполнить на основе обязательной регулярной оценки этой погрешности определения ПЭС.

2. Алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ

На основе методов, описанных далее, нами был разработан алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ по данным двухчастотных приемников ГЛОНАСС/GPS. Алгоритм имеет следующую структуру:

- 1) вычисление ПЭС по данным ГНСС;
- 2) разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы;
- 3) детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС;
- 4) устранение неоднозначности фазовых измерений;
- 5) оценка вертикального ПЭС, ДКЗ и других параметров на основе модели измерений ПЭС.

Остановимся подробнее на этих пунктах.

Вычисление ПЭС по данным ГНСС

ПЭС может определяться по фазовым измерениям на двух частотах [Hofmann-Wellenhof, 1992; Афраймович, Перевалова, 2006]:

$$I_{\varphi} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const + \sigma L], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере; $L_1 = \Delta\varphi/2\pi$ и $L_2 = \Delta\varphi/2\pi$ – фазовые измерения GPS-приемника, выполненные на частотах соответственно f_1 и f_2 (целое и дробное число циклов π фазы);

$const$ – неоднозначность фазовых измерений; σL – ошибка измерения фазы.

Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit – единица измерения полного электронного содержания, равная 10^{16} м^{-2}).

Измерения фазы в системах ГЛОНАСС и GPS производятся с высокой степенью точности, так что ошибка в определении ПЭС при 30-секундных интервалах усреднения не превышает 10^{14} м^{-2} (или 0.01 TECU). В то же время начальное значение ПЭС, измеренное по разности фаз, остается неизвестным в силу существования фазовой неоднозначности данных измерений [Дэвис, 1973; Hofmann-Wellenhof, 1992].

С другой стороны, ПЭС можно получать и по данным кодовых измерений псевдодальности на двух частотах [Hofmann-Wellenhof, 1992].

$$I_p = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma P + \delta P], \quad (2)$$

где P_1, P_2 – групповые пути для частот соответственно f_1 и f_2 , σP – случайная ошибка измерения дальности по коду, δP – систематическая ошибка измерения дальности по кодовым измерениям, обусловленная в основном дифференциальными кодовыми задержками $\delta P = c\Delta\tau$, где $\Delta\tau$ – ДКЗ, c – скорость света.

Ошибка определения ПЭС вследствие ДКЗ определяется следующим выражением:

$$I_{bias} = -\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} c\Delta\tau = -\beta c\Delta\tau. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что задержка одной частоты относительно другой $\Delta\tau$ на 1 нс приводит к ошибке в ПЭС для частот GPS ($f_1=1575.42$, $f_2=1227.6$ МГц) $I_{bias}=2.85$ TECU, для центральных частот ГЛОНАСС ($f_1=1602$ МГц, $f_2=1246$ МГц) $I_{bias}=2.92$ TECU.

Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы

Ряды данных ПЭС, вычисленные по фазовым (1) и групповым (2) измерениям, разбиваются на интервалы так, чтобы в каждом интервале разрывы по времени между соседними измерениями не превышали заданного значения (напр., 2 мин).

Детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС (п. 3 алгоритма) и устранение неоднозначности фазовых измерений (п. 4 алгоритма) осуществляется независимо для каждого из непрерывных интервалов.

Детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС

Для устранения влияния грубых погрешностей в рядах ПЭС (1), (2), таких как срывы слежения и выбросы, требуется проведение предварительной обработки данных. Алгоритм выделения грубых погрешностей предложен в [Blewitt, 1990].

С этой целью сначала вычисляется линейная комбинация ПЭС, полученного по групповым и фазовым измерениям:

$$b_i = (P_2 - P_1 - (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2))_i = \frac{1}{\beta} (I_p - I_\phi)_i. \quad (4)$$

Далее проверяется условие:

$$|b_{i+1} - \langle b \rangle_i| < 4\sigma_i, \quad (5)$$

где $\langle b_i \rangle$ – усреднение значений ряда b_i , с 1 по i измерение (4), $i+1$ – номер текущего измерения, σ_i – текущее значение среднеквадратического отклонения (СКО) для ряда b_i , рассчитываемое по формуле

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} \left\{ (b_i - \langle b \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2 \right\}. \quad (6)$$

Условие (5) означает, что отклонение значения ПЭС от текущего среднего $\langle b_i \rangle$ не должно выходить за доверительный интервал, определяемый по текущему СКО.

Если условие (5) не выполняется, то происходит проверка этого условия для следующих двух значений отклонений ПЭС от среднего ($|b_{i+2} - \langle b \rangle_i| < 4\sigma_i$ и $|b_{i+3} - \langle b \rangle_i| < 4\sigma_i$). Если оно выполняется для двух следующих значений, то b_{i+1} определяется как выброс и заменяется на среднеарифметическое значение ближайших членов ряда:

$$b_{i+1} = (b_i + b_{i+2})/2.$$

Если два следующих отклонения ПЭС от среднего выходят за доверительный интервал, но при этом разности между b_i , b_{i+1} и b_{i+2} лежат в доверительном интервале, то это событие фиксируется как срыв в сопровождении фазы. В этом случае осуществляется «сшивка» ряда с учетом непрерывности производной, для этого ко всем значениям начиная с b_{i+1} прибавляется величина Δb_i :

$$\Delta b_i = (b_i - b_{i+1}) + \left\langle \frac{db}{dt} \right\rangle_i dt, \\ \left\langle \frac{db}{dt} \right\rangle_i = \frac{1}{2} \left(\frac{b_i - b_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + \frac{b_{i+2} - b_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} \right), \quad (7)$$

где dt – временное разрешение, t_i – текущий момент времени.

Устранение неоднозначности фазовых измерений на основе усреднения разности фазовых и групповых измерений

Неоднозначность фазовых измерений для каждого непрерывного интервала может быть определена следующим образом [Татаринов и др., 2011]:

$$const = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i = \frac{1}{\beta} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_p - I_\phi)_i, \quad (8)$$

где I_p и I_ϕ – ПЭС, вычисленные по групповым (2) и фазовым (1) измерениям.

При накоплении N независимых измерений отношение сигнал/шум оценки этой неоднозначности возрастает в \sqrt{N} раз. На рис. 2 приведен пример устранения фазовой неоднозначности. На панели a показана временная динамика ПЭС, вычисленного по групповым (серая кривая) и фазовым (черная кривая) измерениям без учета фазовой неоднозначности,

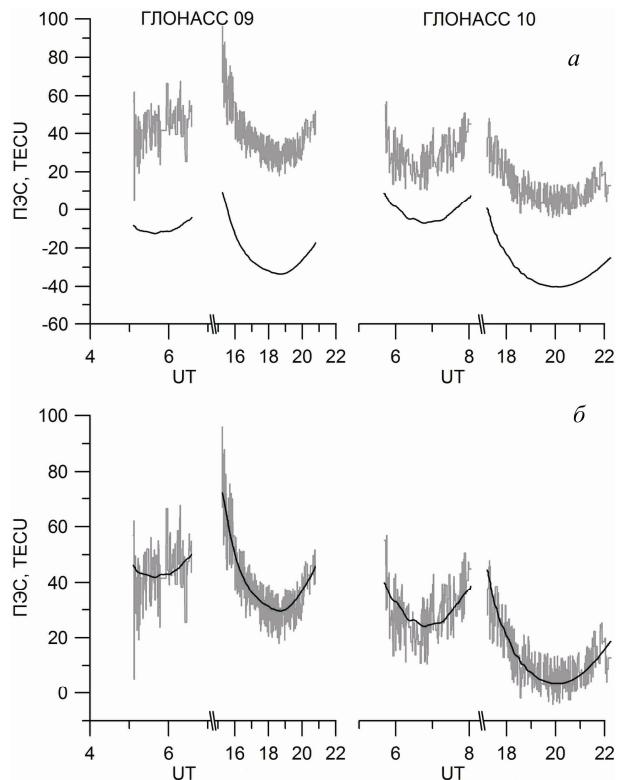


Рис. 2. ПЭС, вычисленные по групповым (серая кривая) и фазовым (черная кривая) измерениям без учета (а) и с учетом фазовой (б) неоднозначности, для спутников 09 и 10 ГЛОНАСС. Расчеты выполнены для 11 апреля 2012 г.

а на панели б – с учетом фазовой неоднозначности. Для построения использовались данные двух спутников 09 и 10 ГЛОНАСС.

Можно видеть, что фазовые и групповые измерения ПЭС достаточно хорошо соответствуют друг другу после устранения фазовой неоднозначности с использованием (8).

Оценка вертикального ПЭС, дифференциальных кодовых задержек и других параметров на основе модели измерений ПЭС

Для определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ необходимо задать модель измерений ПЭС, где одними из параметров являются вертикальное ПЭС I_V и погрешность ПЭС вследствие ДКЗ I_{bias} . Далее методом наименьших квадратов нужно провести оценку параметров модели. В данной работе оценка проводится для двухчасовых интервалов. Наряду с I_V и I_{bias} параметрами модели также могут являться широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС. В дальнейшем могут использоваться более сложные модели с различными методами интерполяции и экстраполяции данных эксперимента [Mannucci et al., 1998; Schaer et al., 1998; Orus et al., 2002].

Модель измерений ПЭС включает в себя два основных слагаемых: ПЭС ионосфера I_{ion} вдоль луча спутник–приемник и ПЭС, обусловленное ДКЗ, I_{bias} [Otsuka et al., 2002]:

$$I_M = I_{ion} + I_{bias}. \quad (9)$$

В первом приближении выражение (9) можно переписать через вертикальное ПЭС в некоторой

ионосферной точке с координатами \square (широта), l (долгота):

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{bias_j}, \quad (10)$$

где i – номер измерения, j – номер спутника; S_j^i – фактор наклона (12);

Выражение (10) можно разложить в ряд Тейлора по трем координатам $-\square$, l и t в точке \square_0 , l_0 – месте расположения станции в некоторый выбранный момент времени t_0 :

$$I_M = S_j^i \left\{ I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta \phi_j^i + G_{q-\phi} (\Delta \phi_j^i)^2 + G_l \Delta l_j^i + G_{q-l} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{q-t} (\Delta t_j^i)^2 \right\} + I_{bias_j}, \quad (11)$$

где I_V – абсолютное значение ПЭС; $\Delta \square$ – разница по широте между координатой ионосферной точки и станции \square_0 , Δl – разница по долготе между координатой ионосферной точки и станции l_0 ; Δt – разница между временем измерения и временем, для которого осуществляется расчет t_0 ; $G_\phi = \frac{\partial I_V}{\partial \phi}$, $G_l = \frac{\partial I_V}{\partial l}$,

$G_{q-\phi} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial^2 \phi}$, $G_{q-l} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial^2 l}$ – линейные и квадратичные пространственные градиенты ПЭС; $G_t = \frac{\partial I_V}{\partial t}$ и $G_{q-t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial^2 t}$ – первая и вторая временные производные. При этом пренебрегаем смешанными пространственными и временными производными. Это предполагает, что ПЭС в пространстве в течение интервала времени, для которого производится расчет (2 ч), меняется медленнее, чем само значение вертикального ПЭС за это же время.

В модели задается функциональная зависимость вертикального ПЭС от угла места посредством фактора наклона S_j^i . Зависимость от угла места в модели необходима для разделения абсолютного ПЭС и ПЭС, связанного с ДКЗ, так как абсолютное ПЭС зависит от угла пролета спутника, а ДКЗ, которые являются аппаратными погрешностями, не зависят. С учетом сферичности Земли [Klobuchar, 1986]

$$S_i^j = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{max}} \cos \theta_i^j \right) \right\} \right]^{-1}. \quad (12)$$

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

$$U = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} w_i^j (I_{Mi}^j - I_{izmi}^j)^2, \quad (13)$$

где $w_i^j = \frac{1}{S_i^j} \left[1 + \left(\frac{2\Delta t_i^j}{UT_{end} - UT_{beg}} \right)^2 \right]^{-1}$ – весовой множитель; $UT_{end} - UT_{beg}$ – временной интервал, на котором производится расчет вертикального ПЭС; I_{izmi}^j – ПЭС, вычисленное нами по данным фазовых измерений (1) с учетом фазовой неоднозначности (8).

После дифференцирования по параметрам модели выражения (13) получаем систему уравнений (14), которую можно представить в виде $Ax=B$, где A – матрица коэффициентов (15), x – столбец неизвестных параметров модели, B – столбец свободных членов (16).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} w_i^j (I_{Mi}^j - I_{izmi}^j) = 0, \\ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} w_i^j (I_{Mi}^j - I_{izmi}^j) \Delta \phi_i^j = 0, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_j} w_i^j (I_{Mi}^j - I_{izmi}^j) (\Delta t_i^j)^2 = 0, \\ \sum_{i=1}^{N_1} w_i^1 (I_{Mi}^1 - I_{izmi}^1) = 0, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{N_k} w_i^k (I_{Mi}^k - I_{izmi}^k) = 0, \end{array} \right. \quad (14)$$

$$A = \left(\begin{array}{cccccc} \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \dots & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 & \sum_i w_i^1 S_i^1 & \dots & \sum_i w_i^k S_i^k \\ \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 (\Delta \phi_i^j)^2 & \dots & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \sum_i w_i^1 S_i^1 \Delta \phi_i^1 & \dots & \sum_i w_i^k S_i^k \Delta \phi_i^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \dots & \sum_i \sum_j w_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^4 & \sum_i w_i^1 S_i^1 (\Delta t_i^1)^2 & \dots & \sum_i w_i^k S_i^k (\Delta t_i^k)^2 \\ \sum_i w_i^1 S_i^1 & \sum_i w_i^1 S_i^1 \Delta \phi_i^1 & \dots & \sum_i w_i^1 S_i^1 (\Delta t_i^1)^2 & \sum_i w_i^1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \sum_i w_i^k S_i^k & \sum_i w_i^k S_i^k \Delta \phi_i^k & \dots & \sum_i w_i^k S_i^k (\Delta t_i^k)^2 & 0 & 0 & \sum_i w_i^k \end{array} \right), \quad (15)$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_i \sum_j w_i^j S_i^j I_{\text{изм}i}^j \\ \sum_i \sum_j w_i^j S_i^j I_{\text{изм}i}^j \Delta \Phi_i^j \\ \dots \\ \sum_i \sum_j w_i^j S_i^j I_{\text{изм}i}^j (\Delta t_i^j)^2 \\ \sum_i w_i^1 I_{\text{изм}i}^1 \\ \dots \\ \sum_i w_i^k I_{\text{изм}i}^k \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} I_V \\ G_\phi \\ G_{q_\phi} \\ G_l \\ G_{q_l} \\ G_t \\ G_{q_t} \\ I_{\text{bias } l} \\ \dots \\ I_{\text{bias } k} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где k – полное число спутников. Суммирование производится по всем измерениям i и всем спутникам j .

3. Тестирование алгоритма

Для тестирования алгоритма определения абсолютного ПЭС и ошибок ПЭС, связанных с неучтеными ДКЗ, моделировались данные группового и фазового ПЭС. Входными данными являлись параметры модели (11) с добавлением шума, зависящего от угла места.

Была проанализирована точность восстановления абсолютного ПЭС и ошибок ПЭС, связанных с неучтеными ДКЗ, в зависимости от задаваемой модели в алгоритме определения ПЭС.

Из модели исключались по очереди временная производная, квадратичные и линейные пространственные градиенты и проводился расчет.

Результаты тестирования представлены в табл. 1. Видно, что при исключении из модели в алгоритме определения ПЭС первой и второй временных производных значение вертикального ПЭС восстанавливается с высокой точностью (ошибка определения ~0.2 %). Значения пространственных градиентов и ДКЗ при этом восстанавливаются с большой ошибкой, достигающей 500 %. При исключении из модели пространственных градиентов ошибка определения вертикального абсолютного ПЭС и значения временных производных составляет ~5 %; ошибка определения ДКЗ в каналах спутников GPS и ГЛОНАСС при этом составляет примерно 50 %.

Таким образом, на точность определения абсолютного вертикального ПЭС временные производные и пространственные градиенты влияют несущественно. На точность определения пространственных градиентов и ДКЗ их влияние значительно.

4. Результаты расчетов значения абсолютного ПЭС и ДКЗ

На основе алгоритма, описанного в п. 2, проведен расчет абсолютного ПЭС и ДКЗ для нескольких станций IGS [<http://igscb.jpl.nasa.gov/>]. Полученные результаты сравнивались со значениями абсолютного ПЭС и ДКЗ, рассчитанных лабораторией CODG [<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>]. На рис. 3–5 представлена зависимость абсолютного вертикального ПЭС I_V от времени для Иркутской станции IRKJ (104.31° E, 52.21° N); станции GOPE, расположенной в Чехии (14.78° E, 49.91° N), и североамериканской станции DUBO (84.13° W, 50.25° N) для трех дней 2012 г.: 10–12 апреля (101–103 дни года). Геомагнитная обстановка в эти дни была спокойная

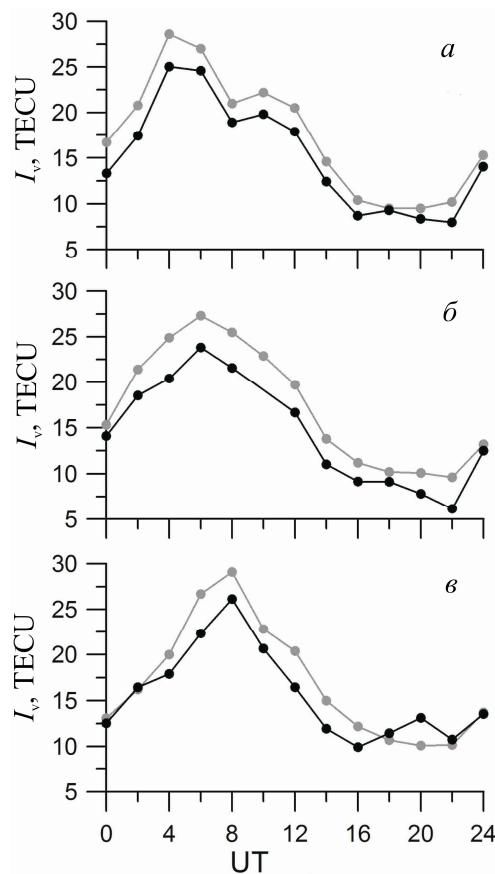


Рис. 3. Зависимость абсолютного вертикального ПЭС от времени для станции IRKJ 10–12 апреля 2012 г. (а–с). Серая кривая – расчеты по данным CODG, черная – результаты расчета по алгоритму, описанному в п. 2.

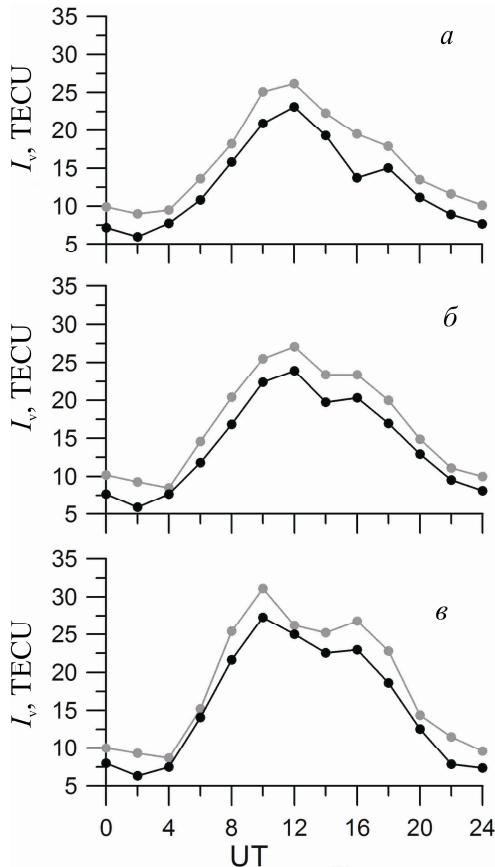


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для станции GOPE.

Таблица 1

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

Параметр	Заданное значение	Значение, полученное со всеми параметрами модели	Без G_t и $G_{q,t}$		Без $G_{q,\square}$ и $G_{q,l}$		Без G_{\square} и $G_{q,\square}$	
			I	II	I	II	I	II
I_v	25	24.953	25.061	25.052	25.668	25.635	25.516	25.678
G_{\square}	0.5	0.434	2.885	2.982	0.607	0.726	–	–
G_l	0.5	0.512	0.053	0.062	0.382	0.342	0.498	0.474
$G_{q,\square}$	0.2	0.191	0.242	0.266	–	–	–	–
$G_{q,l}$	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
ДКЗ PRN-04	4	4.38	–5.194	–5.534	2.31	1.818	4.569	4.831
ДКЗ PRN-10	10	9.614	6.167	6.233	8.775	8.775	9.641	9.594
ДКЗ PRN-13	13	12.409	6.435	5.807	11.28	10.465	12.687	13.203
ДКЗ ГЛО № 04	4	3.712	1.668	1.462	2.678	2.532	3.637	2.95
ДКЗ ГЛО № 14	14	14.696	18.146	17.898	13.639	12.04	13.583	13.897
ДКЗ ГЛО № 19	19	18.625	15.857	16.136	17.833	17.597	18.1	18.204

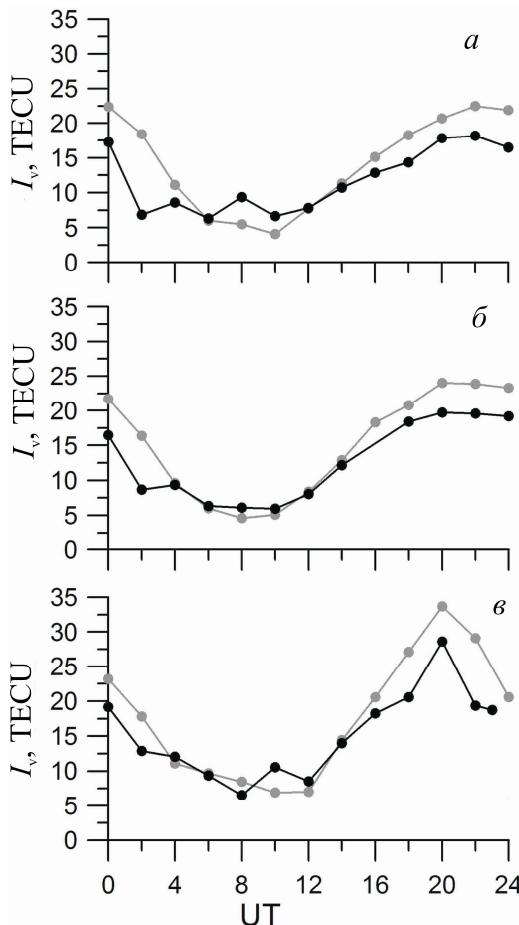


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для станции DUBO.

и слабовозмущенная: 10 апреля $K_p=3$; 11 апреля $K_p=2$; 12 апреля $K_p=4.7$.

На всех графиках видно хорошее качественное и количественное согласие с данными лаборатории CODG. Абсолютное расхождение составляет в среднем не более 3 ТЕСУ, в дневное время – не более 10 ТЕСУ. Подобное среднее расхождение наблюдается, например, для карт GIM, полученных в разных лабораториях [Афраймович и др., 2008; Schaefer et al., 1998]. Наибольшее расхождение с данными лаборатории CODG наблюдается в дневные часы, что, возможно, связано с тем, что ночью ионосфера меняется медленнее, чем днем. Вследствие этого абсолютное ПЭС и ДКЗ точнее определяются ночью.

Была рассчитана суммарная погрешность ПЭС, обусловленная ДКЗ в каналах спутника и приемника для этих же станций. Полученные результаты сравнивались с данными по ДКЗ в каналах спутников и приемников, публикуемыми лабораторией CODG. Результаты расчетов для станции DUBO за 10 апреля 2012 г. представлены в табл. 2. В первом столбце указан номер спутника: R – спутник ГЛОНАСС, G – спутник GPS.

Среднее отклонение значений погрешности ПЭС, связанной с ДКЗ, полученных на основе изложенного выше алгоритма, от данных CODG для станции DUBO составляет ~3.5 ТЕСУ, для станций IRKJ ~5 ТЕСУ, для станции GOPE ~4 ТЕСУ.

Заключение

Дифференциальные кодовые задержки в каналах приемников и спутников могут достигать 24 нс, что существенно влияет на определение абсолютного

Таблица 2

Ошибка определения ПЭС, обусловленная ДКЗ в каналах приемника и спутника, по данным станции DUBO.

Спутник	$I_{bias, CODG}$	$I_{bias, алгоритм}$	$I_{bias, CODG}$ $I_{bias, алгоритм}$
G01	5.0008	4.092	0.9088
G03	28.1596	28.453	-0.2934
G06	29.1536	29.689	-0.5354
G09	30.562	30.054	0.508
G11	41.1432	42.076	-0.9328
G12	42.2072	48.218	-6.0108
G14	36.5792	35.228	1.3512
G15	38.7212	39.395	-0.6738
G18	40.11	38.577	1.533
G19	46.3792	51.197	-4.8178
G21	40.3424	38.79	1.5524
G22	51.2232	50.324	0.8992
G27	28.0336	30.885	-2.8514
G31	44.4388	43.455	0.9838
R05	36.3384	33.766	2.5724
R06	47.3116	48.919	-1.6074
R07	54.4712	64.086	-9.6148
R08	60.704	69.405	-8.701
R09	35.4368	23.44	11.9968
R14	24.1528	32.275	-8.1222
R15	35.098	38.294	-3.196
R16	34.2916	30.66	3.6316
R21	61.558	64.32	-2.762

ПЭС, приводя к ошибке в 70 ТЕСУ. Поэтому необходимо учитывать ДКЗ в процессе мониторинга состояния ионосферной плазмы.

Был разработан и реализован алгоритм определения вертикального ПЭС, пространственных и временных производных ПЭС и погрешности ПЭС, связанной с ДКЗ.

Тестирование алгоритма показало, что на точность определения абсолютного вертикального ПЭС временные производные и пространственные градиенты влияют несущественно. В то же время на точность определения пространственных градиентов и ДКЗ это влияние значительно.

Рассчитанные на основе разработанного алгоритма значения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ качественно и количественно согласуются со значениями, публикуемыми лабораторией CODG. Абсолютное расхождение в среднем составляет ~ 3 ТЕСУ при определении ПЭС и до 5 ТЕСУ при определении ошибки ПЭС, связанной с ДКЗ.

Расхождения между значениями погрешности ПЭС, связанной с ДКЗ, полученные нами и лабораторией CODG, все же достаточно велики, особенно для спутников ГЛОНАСС. Для улучшения точности определения не учтенного ПЭС, связанного с ДКЗ, по данным отдельного приемника, по-видимому, необходимо использовать данные за несколько временных интервалов. Кроме того, необходимо изначально исключать из рассмотрения спутники с малым количеством данных.

Авторы выражают благодарность И.К. Едемскому, В.И. Куркину, А.В. Медведеву, П.В. Татаринову за плодотворное обсуждение и помочь при выполнении работы, а также особую благодарность Н.П. Переваловой за ценные замечания и существенную корректировку статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 12-05-33032_мол_а_вед, 12-05-31279 а), а также гранта Президента РФ № МК-3771.2013.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Астафьев Э.И., Живетьев И.В. и др. Глобальное электронное содержание в 23-м цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 2. С. 195–208.

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.

Татаринов П.В., Ясюкевич Ю.В., Косогоров Е.А. Определение абсолютного значения полного электронного содержания по данным ГЛОНАСС // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: Труды XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 19–24 сентября 2011 г. С. 255–257.

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

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice // New York; Wien: Springer-Verlag, 1992. 327 p.

Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics System. 1986. V. 23, N 3. P. 325–331.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.

Orus R., Hernandez-Pajares M., Juan J.M., et al. Performance of different TEC models to provide GPS ionospheric corrections // J. Atmos. Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 2055–2062.

Otsuka Y., Ogawa T., Saito A., et al. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan // Earth, Planets and Space. 2002. 54. P. 63–70.

Schaer S. Overview of GNSS biases // International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases. http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.3.1.pdf.

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany. February 9–11. 1998. P. 307–320.

Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) // <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>.

International GNSS Service (IGS), formerly the International GPS Service // <http://igscb.jpl.nasa.gov/>.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия