

ПОЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ОДНОЧАСТОТНЫМ ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

¹А.А. Мыльников, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич, ²В.Б. Иванов

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

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
manna@iszf.irk.ru

ESTIMATING THE ABSOLUTE TOTAL ELECTRON CONTENT FROM SINGLE-FREQUENCY GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM DATA

¹A.A. Mylnikova, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich, ²V.B. Ivanov

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе представлен метод оценки абсолютного вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Оценка основана на использовании одночастотных совместных измерений фазового и группового запаздывания сигнала GPS/ГЛОНАСС по данным отдельных измерительных станций. Качественно и количественно вертикальное ПЭС, рассчитанное по одночастотным измерениям, согласуются с аналогичными оценками, основанными на использовании двухчастотных измерений. Типичное значение разности вертикального ПЭС, полученного одночастотным и двухчастотным методом, для анализируемых станций в основном не превышает величины ~ 1.5 TECU с СКО до ~ 3 TECU.

Ключевые слова: ионосфера, GPS, ГЛОНАСС, полное электронное содержание, одночастотные данные.

Abstract. We present a technique to estimate the absolute vertical total electron content (TEC) of the ionosphere. Estimating is based on single-frequency GPS/GLONASS data of joint phase and group pseudo range measurements from individual stations. Estimated single-frequency vertical TEC agrees qualitatively and quantitatively with the dual-frequency vertical TEC. A typical value of the difference between the single-frequency vertical TEC and the dual-frequency one for the analyzed stations generally does not exceed ~ 1.5 TECU with RMS up to ~ 3 TECU.

Keywords: ionosphere, GPS, GLONASS, total electron content, single-frequency data.

Введение

Существующие в настоящее время в работах оценки абсолютного вертикального ПЭС выполнены почти исключительно на основе обработки данных двухчастотных (L1, L2) радионавигационных приемников. Представляет интерес изучение возможности определения ПЭС по данным одночастотной аппаратуры ГНСС. В 2012 г. в работе [Schuler, Oladipo 2012] была реализована схема определения вертикального ПЭС с использованием одночастотных измерений. К сожалению, в этой статье не описан в деталях алгоритм определения ПЭС, в результате чего, представляет сложность получить аналогичные результаты. В 2014 г. нами был предложен алгоритм восстановления вертикального ПЭС — TauAbsTEC [Мыльников и др., 2014; Ясюкевич и др., 2015], а также его градиентов (линейных и квадратичных) и временной производной (первой и второй) по данным двухчастотных измерений отдельной станции GPS/ГЛОНАСС. С некоторыми незначительными изменениями данный алгоритм может быть применен и для работы с одночастотными данными.

В настоящей работе мы приводим методику определения абсолютного ПЭС, его градиентов и временной производной, а также неоднозначности фазовых измерений для отдельных рядов наклонного

ПЭС вдоль луча «спутник-приемник» по одночастотным измерениям.

Методика определения абсолютных ионосферных параметров с использованием одночастотных данных

Для определения абсолютного ПЭС, его градиентов и временной производной был использован следующий алгоритм, аналогичный алгоритму, используемому для двухчастотных наблюдений [Ясюкевич и др., 2015].

1. Вычисление ПЭС ($I_{p\phi}$) по одновременным групповым и фазовым измерениям [Афраймович, Первалова, 2006].

$$I_{p\phi} = \frac{1}{2} \frac{f_1^2}{40.308} [(P_1 - L_1 \lambda_1) + K + aLP], \quad (1)$$

где f_1 — основная рабочая частоты ГНСС (GPS, ГЛОНАСС или др.); P_1 — дополнительный путь радиосигнала, обусловленный групповым запаздыванием в ионосфере, м; $L_1 \lambda_1$ — дополнительный путь радиосигнала, обусловленный фазовым запаздыванием в ионосфере, м; L_1 — число оборотов фазы на основной частоте ГНСС; λ_1 — длина волны, м; K — постоянная величина, определяемая неоднозначностью фазовых измерений и временем распространения сигнала в аппаратуре спутника и прием-

ника; aLP — суммарные шумы фазовых и групповых измерений на основной частоте. Используется отсечка по углу возвышения 10° .

2. Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы. Данный этап является достаточно важным, т.к. фазовая неоднозначность при разрыве данных, как правило, меняется.

3. Детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС [Blewitt, 1990].

4. Оценка абсолютного вертикального ПЭС, его градиентов, временной производной с привлечением простой модели измерений. Одновременно осуществляется оценка неоднозначности измерений K . Параметры модели определяются на основе минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальных и модельных данных (см. далее).

5. Устранение неоднозначности в данных наклонного ПЭС, полученного в п. 3.

В общем виде модель измерений имеет следующую форму:

$$I_M = S_j^i I_V(\varphi, l, t) + I_{K,j} \quad (2)$$

где индекс i ставится в соответствии с дискретным временем измерения, j — в соответствии с номером непрерывного интервала (отдельный для каждого спутника и каждого непрерывного интервала). I_V — абсолютное вертикальное значение ПЭС; I_K — константа для непрерывного интервала обусловленная неоднозначностью фазовых измерений и задержкой сигнала в трактах спутника и приемника. S_j^i — наклонный фактор, в приближении тонкой однослойной ионосферы.

Используя разложение в ряд Тейлора в точке (φ_0, l_0, t_0) :

$$I_V(\varphi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta\varphi)^m (\Delta l)^n (\Delta t)^k}{m!n!k!} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \varphi^m \partial l^n \partial t^k} \quad (3)$$

Ограничиваясь первыми тремя членами разложения можно записать:

$$I_M = S_j^i [I_V(\varphi_0, l_0, t_0) + G_\varphi \Delta\varphi_j^i + G_{q_\varphi} (\Delta\varphi_j^i)^2 + G_l \Delta l_j^i + G_{q_l} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{q_t} (\Delta t_j^i)^2] + I_{K,j} \quad (4)$$

здесь I_V — абсолютное вертикальное значение ПЭС; $\Delta\varphi$ — разница по широте между координатой подионосферной точки и станции φ_0 ; Δl — разница по долготе между координатой подионосферной точки и станции l_0 ; Δt — разница между временем измерения и временем, для которого осуществляется расчет, t_0 ; $G_\varphi = \partial I_V / \partial \varphi$, $G_l = \partial I_V / \partial l$, $G_{q_\varphi} = \partial^2 I_V / \partial \varphi^2$, $G_{q_l} = \partial^2 I_V / \partial l^2$ — линейные и квадратичные пространственные градиенты ПЭС; $G_t = \partial I_V / \partial t$ и $G_{q_t} = \partial^2 I_V / \partial t^2$ — первая и вторая производные по времени. Смешанными производными по пространству и времени можно пренебречь, если предположить, что характерные градиенты ПЭС за время, для которого производится расчет, меняются медленнее, чем само значение вертикального ПЭС.

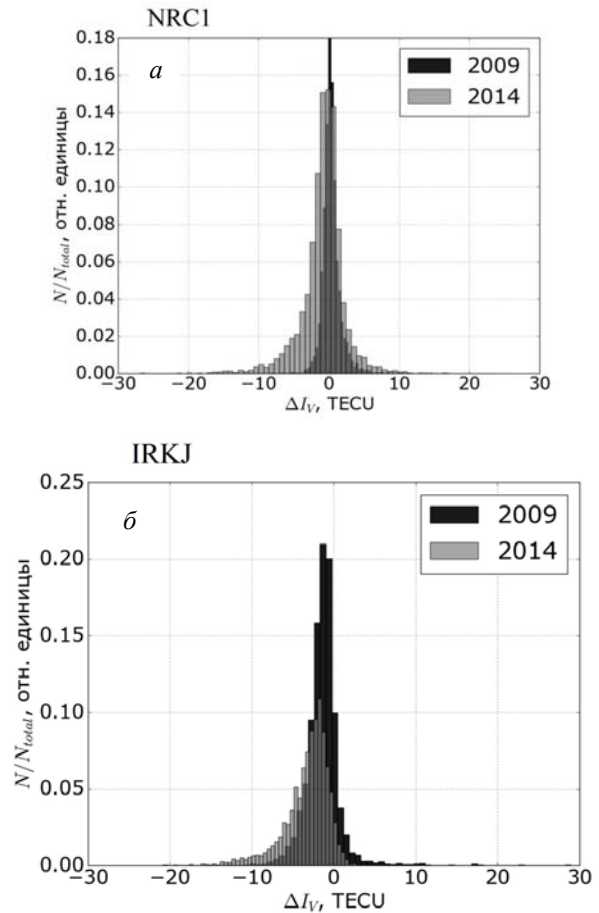
Мы осуществляем одновременный расчет параметров за полные сутки для различных моментов времени, используя метод наименьших квадратов, решая согласованную систему уравнений. Разре-

ние по времени для оцениваемых параметров может составлять от нескольких часов до 10 мин (как показало тестирование).

Экспериментальные результаты

Для проведения анализа мы использовали данные двухчастотных приемников сети IGS [Dow et al., 2009] в Азиатском и Американском секторах северного полушария (станции IRKJ, 52.2° N, 104.3° E, и NRC1, 45.5° N, 104.4° W). Использование таких данных позволяет наряду с измерениями в одночастотном режиме получить оценки ПЭС с использованием аналогичной методики TayAbsTEC для двухчастотных одновременных фазовых и групповых измерений [Ясюкевич и др., 2015].

Чтобы оценить какие ошибки могут появляться, мы посчитали распределение разностей значений, получаемых для двухчастотных и одночастотных измерений. Для этого для каждого из дней двух лет — 2009 г. (минимум солнечной активности) и 2014 г. (максимум солнечной активности) на основе данных GPS/ГЛОНАСС станций IRKJ и NRC1 были рассчитаны ряды вертикального абсолютного ПЭС с использованием одночастотных и двухчастотных измерений, и построена гистограмма распределения разности этих параметров в двух методах. Результаты представлены на рисунке.



Гистограмма распределения разности значений вертикального ПЭС полученных по одночастотным и двухчастотным измерениям на станциях NRC1 (а) и IRKJ (б), для 2009 г. (черная гистограмма) и 2014 г. (серая гистограмма)

Для станции NRC1 можно видеть систематическую составляющую ~ 0.5 TECU и разброс с СКО ~ 1.5 TECU для низкой солнечной активности и ~ 0.5 TECU и ~ 3.5 TECU — для высокой. Для станции IRKJ эти значения более высокие: систематическая составляющая ~ 1.5 TECU и СКО ~ 2.5 – 3 TECU. Стоит отметить, отклонения соответствуют по порядку величины систематическим и случайным отклонениям различных лабораторий, публикуемых карты GIM. В этой связи полученные отклонения могут считаться вполне приемлемыми.

Заключение

Получение абсолютных значений ПЭС по одночастотным измерениям представляет на наш взгляд большие перспективы для развития мониторинга ионосферы, особенно на территории Российской Федерации, где число двухчастотных приемников не так велико, как, например, в Японии или США. Как показал наш анализ качество одночастотных измерений вертикального ПЭС лишь незначительно уступает таким оценкам в двухчастотном режиме.

Работа выполнена при поддержке гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

Список литературы

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

Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Демьянов В.В. Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 24. С. 70–77.

Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А., Куницын В.Е., Падохин А.М. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 6. С. 790–796. DOI: 10.7868/S0016794015060176.

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

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.

Schuler T., Oladipo O.A. Single-frequency GNSS ionospheric delay estimation — VTEC monitoring with GPS, GALILEO and COMPASS // 1st Edition, Lulu Press. 2012. ISBN 978-1-4716-4225-8.