

ВЗАИМНОЕ СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА АБСОЛЮТНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

¹А.А. Мыльникова, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич, ¹А.М. Веснин

¹Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
manna@iszf.irk.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

MUTUAL COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING THE ABSOLUTE VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT

¹A.A. Mylnikova, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich, ¹A.M. Vesnin

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
manna@iszf.irk.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе описан метод оценки абсолютного вертикального полного электронного содержания, пространственных и временных градиентов полного электронного содержания и дифференциальных кодовых задержек — TayAbsTEC. Проведено статистическое сравнение результатов, полученных с помощью TayAbsTEC с результатами, полученными другими методами, лаборатории IONOLAB, группы Gopi Seemala, карт GIM. Получены распределения разностей близкие к нормальным распределениям со случайной и систематической ошибками. Наибольшее расхождение получено с методом Gopi Seemala (10 TECU среднее значение разности для 2014 г.).

Ключевые слова: ГНСС, абсолютное вертикальное полное электронное содержание, TayAbsTEC.

Abstract. In this paper we present a technique for estimation of absolute vertical total electron content, its gradients and differential code biases. The technique named TayAbsTEC. A statistical comparison was carried out of TayAbsTEC results with the results estimated by other methods, IONOLAB laboratories, Gopi Seemala group, GIM data. Distributions of differences close to normal distributions with random and systematic errors are obtained. The largest discrepancy is evaluated with the Gopi Seemala method (10 TECU average difference for 2014).

Keywords: GNSS, absolute vertical total electron content, TayAbsTEC.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставили огромный экспериментальный материал для изучения ионосферы Земли. Основным измеряемым параметром является полное электронное содержание (ПЭС) рассчитываемое по двухчастотным кодовым и фазовым измерениям псевдодальности [Афраймович, Перевалова, 2006]. ПЭС определяется вдоль наклонного луча «спутник — приемник». При этом, для ряда задач является важным оценить вертикальное абсолютное ПЭС на основе набора наклонных измерений, определяемых с систематической ошибкой (фазовая неоднозначность и дифференциальные кодовые задержки).

Для решения данной задачи ранее была разработана методика определения абсолютного вертикального ПЭС и дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ) по данным ГНСС-приемников и на ее основе создан программный комплекс TayAbsTEC [Ясюкевич и др., 2015]. В настоящей работе проведено сравнение результатов TayAbsTEC с данными, полученными с помощью других методов. Сравнение проводилось для данных за полный 2009 год (минимум солнечной активности) и 2014 г. (максимум солнечной активности).

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЭС И ДКЗ

Разработанный алгоритм имеет следующую структуру:

1. Вычисление наклонного ПЭС по данным ГНСС. ПЭС вычисляется по фазовым и групповым измерениям на двух частотах.

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

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

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

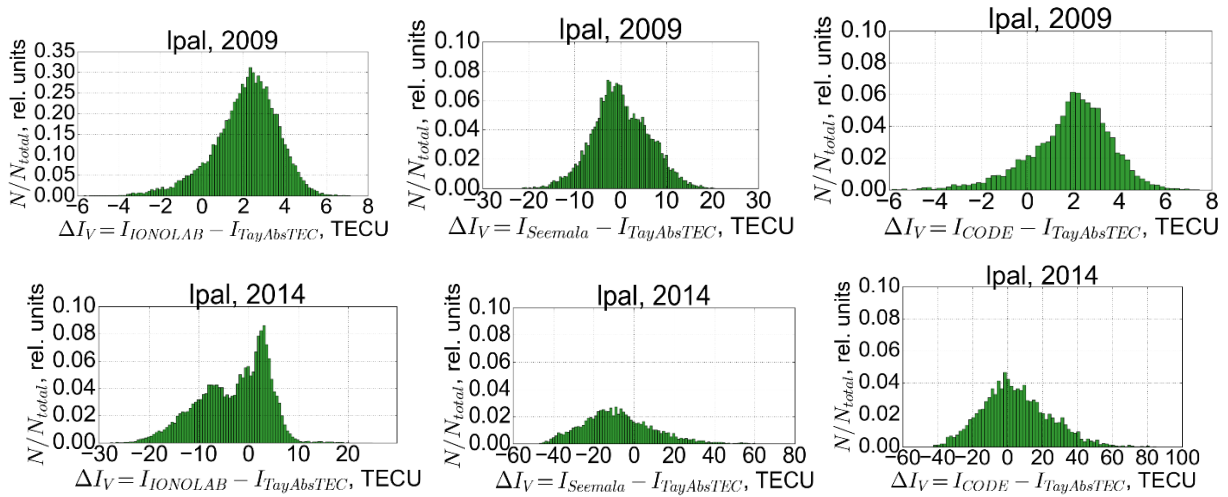
3. Устранение неоднозначности фазовых измерений. Неоднозначность устраняется, используя среднюю разность групповых (2) и фазовых (1) измерений ПЭС.

4. Оценка вертикального ПЭС, градиентов, ДКЗ 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 нужно провести оценку ее параметров. Наряду с I_V и I_{BIAS} параметрами модели являются широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС.

Модель измерений ПЭС имеет следующий вид:

$$I_M = S_i^j \left\{ I_V(\varphi_0, l_0, t_0) + G_{\varphi} \Delta \varphi_j^i + G_{q-\varphi} (\Delta \varphi_j^i)^2 + \right. \\ \left. + G_l (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{q-t} (\Delta t_j^i)^2 \right\} + I_{BIAS} \quad (3)$$



и является разложением вертикального ПЭС I_V в ряд Тейлора по пространству и времени.

В модели также задается функциональная зависимость вертикального ПЭС от угла места (θ_i^j) посредством проекционного оператора S_j^i , с учетом сферичности Земли:

$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin [\alpha (90 - \theta_j^i)] \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где R_E — радиус Земли, h_{\max} — высота тонкого сферического слоя (450 км), θ_j^i — угол пролета спутника над горизонтом.

Далее определяются параметры модели посредством минимизации квадрата разности ПЭС, вычисленного по данным фазовых измерений с учетом фазовой неоднозначности, и модели ПЭС (3).

СРАВНЕНИЕ СУТОЧНОЙ ДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЭС

В работе проведено сравнение полученных с помощью TayAbsTEC данных I_V с данными вертикального ПЭС, рассчитанными с помощью других методов. Для сравнения выбраны данные, рассчитанные с помощью программного обеспечения лаборатории IONOLAB [http://www.ionolab.org], данные, рассчитанные с помощью программного обеспечения группы ученых, под руководством Gopi Seemala [Seemala et al., 2014] и данные глобальных ионосферных карт GIM, лаборатории CODE [Dow et al., 2009].

Выбранные методы расчета вертикального ПЭС схожи с TayAbsTEC. Основные отличия заключаются в том, что значения ДКЗ в этих методах, кроме GIM, не оцениваются, а берутся априорно из глобальных ионосферных карт GIM, также в этих методах не оцениваются пространственные градиенты (см. [Arikan et al., 2003; Seemala et al., 2014]).

Сравнение проведено для данных за 2009 г., минимум солнечной активности и за 2014 г., максимум солнечной активности, для пяти станций, расположенных в разных частях Земли: alrt (82.5° N, 62.34° W), lpal (28.76° N, 17.9° W), irkj (52.22° N,

104.32° E), ntus (1.35° N, 103.68° E), thu2 (76.54° N, 68.82° W).

На рисунке представлены гистограммы разности абсолютного вертикального ПЭС лаборатории IONOLAB (а), группы Seemala (б) и лаборатории CODE (в) с вертикальным ПЭС, вычисленным TayAbsTEC для данных станции lpal.

Все гистограммы на рисунке имеют вид Гауссова распределения, присутствует систематическая и случайная ошибка. Значения моды и стандартного отклонения (σ) для года максимума солнечной активности (2014) больше, чем для года минимума солнечной активности, для всех сравниваемых методов. Значения мод и стандартного отклонения разностей представлено в таблице. Синхронное увеличение отклонений со всеми методами, в 2014 г. говорит о том, что все рассматриваемые методы одинаково корректно отрабатывают в условиях высокой солнечной активности. Наибольшие отклонения у метода TayAbsTEC наблюдается с результатами метода Seemala, наименьшие — с данными лаборатории CODE.

Значение моды разности

	2009 г.		2014 г.	
	Мода	σ	Мода	σ
IONOLAB-TayAbsTEC	2.5 TECU	1.5 TECU	-5 TECU	7 TECU
Seemala-TayAbsTEC	-5 TECU	6 TECU	-10 TECU	18 TECU
CODE-TayAbsTEC	2 TECU	1.8 TECU	0 TECU	19 TECU

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено статистическое сравнение значений абсолютного вертикального ПЭС, рассчитанных по методу TayAbsTEC со значениями ПЭС, рассчитанными лабораторией IONOLAB, группой руководством Seemala и с ПЭС из карт GIM, лаборатории CODE. Все распределения разностей имеют вид нормального распределения, присутствует систематическая и случайная ошибка. Систематическая ошибка для разности значений вертикального ПЭС TayAbsTEC и IONOLAB составляет ~5 TECU для

2014 г. (2.5 TECU для 2009 г.). Для разности с результатами Seemala систематическая ошибка ~10 TECU (5 TECU для 2009 г.), для разности с CODE систематическая ошибка ~0 TECU для 2014 г. (2 TECU для 2009 г.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 18-35-20038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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.

Arikan F., Erol C.B., Arikan O. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data // J. Geophys. Res.-Space Phys. 2003. V. 10. P. 1469–1480.

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, N 3-4. P. 191–198.

Seemala G.K., Yamamoto M., Saito A., Chen C.-H. Three-dimensional GPS ionospheric tomography over Japan using constrained least squares // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 3044–3052. DOI: [10.1002/2013JA019582](https://doi.org/10.1002/2013JA019582).

URL: <http://www.ionolab.org> (дата обращения 25.05.19).