

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.163-166

ОДНОТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ АБСОЛЮТНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ИОНОСФЕРНОГО КАРТИРОВАНИ

И.А. Павлов^{1,2,3}, А.М. Падохин^{1,2,3}

¹ИЗМИРАН, 108840, г. Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4

E-mail: ipavlov@izmiran.ru

²ИСЗФ СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

³МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2

Аннотация. В работе представлен оригинальный метод оценки абсолютного вертикального полного электронного содержания ($vTEC$) над одиночной приемной станцией, основанный только на двухчастотных фазовых GNSS наблюдениях и не требующий оценки дифференциальных кодовых задержек (DCB) спутников и приемников. Производится сравнение результатов оценки $vTEC$ предложенным методом с данными глобальных ионосферных карт UQRG и базы Madrigal в минимуме 24-го цикла солнечной активности. Обсуждается возможность использования разработанного метода для построения ионосферных карт в регионах с развитой сетью приемных станций GNSS.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, GNSS

SINGLE-STATION METHOD FOR ESTIMATING ABSOLUTE VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT AND ITS APPLICATION FOR IONOSPHERIC MAPPING

I.A. Pavlov, A.M. Padokhin

Abstract. The paper presents an original method for estimating the absolute vertical total electron content ($vTEC$) over a single receiving station, based only on dual-frequency phase GNSS observations and not requiring the estimation of differential code biases (DCB) for satellites and receivers. The results of $vTEC$ estimation by the proposed method are compared with the data of UQRG global ionospheric maps and the Madrigal database in the minimum of the 24th solar cycle. The possibility of using the developed method for producing ionospheric maps in regions with a dense networks of GNSS receivers is discussed.

Keywords: ionosphere, total electron content, GNSS

Введение

Для многих прикладных задач, например радиолокации или коррекции радиотехнических систем, необходимо знать абсолютное значение полного электронного содержания в ионосфере, а не его вариации, которые обычно оценивают по данным измерений GNSS и на основе которых исследуют отклики ионосферы на различные гелиогеофизические процессы. К настоящему времени разработан и успешно применяется ряд методов оценки $vTEC$ над одиночной станцией, например [1], однако помимо высокоточных фазовых измерений такие методы зачастую используют существенно более шумные кодовые измерения, для получения абсолютных значений $vTEC$, что требует определения DCB аппаратуры спутников и приемников. Это в свою очередь влечет за собой использование предположения о неизменности DCB приемника и нулевом среднем значении DCB всех спутников на достаточно длительном интервале времени, что далеко не всегда реализуется на практике. В связи с этим в данной работе предлагается использовать для оценки $vTEC$ исключительно малошумные фазовые измерения GNSS на паре рабочих частот, а для исключения неопределенности начальной фазы использовать разностный подход, разработанный еще для задач низкоорбитальной радиотомографии ионосферы [2]. В работе сравниваются результаты, полученные разработанным методом, с данными глобальных ионосферных карт UQRG [3] и базы данных Madrigal [4], а также обсуждается возможность использования одноточечных оценок $vTEC$ в задаче регионального ионосферного картирования

Описание алгоритма

Входными данными для предлагаемого метода являются оценки относительного наклонного полного электронного содержания ($sTEC$) вдоль лучей спутник-приемник, получаемые с использованием двухчастотной фазовой комбинации:

$$sTEC = \frac{c}{K} \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} + const, \quad (1)$$

где L_i – фазовые наблюдения на соответствующих рабочих частотах f_i , c – скорость света, K – числовой коэффициент.

Ионосфера представляется в виде тонкого слоя на высоте $h_{ipp} = 450$ км, распределение $vTEC$ в котором в окрестности станции наблюдения представляется в виде усеченного разложения в степенной ряд до второго порядка по пространству и времени:

$$vTEC = \sum_{i=0}^2 \overbrace{\sum_{i_1=0}^i \sum_{i_2=0}^{i-i_1} \sum_{i_3=0}^{i-i_1-i_2}}^{i_1+i_2+i_3=i} a_{i_1, i_2, i_3} (\phi_{ipp} - \phi_{st})^{i_1} (\theta_{ipp} - \theta_{st})^{i_2} (t_{obs} - t_{est})^{i_3}, \quad (2)$$

где $(\phi_{ipp}, \theta_{ipp})$ и (ϕ_{st}, θ_{st}) широта и долгота подионосферной точки и приемной станции, t_{obs} и t_{est} время наблюдения и время для которого проводится оценка ТЕС, а для пересчета $sTEC$ в $vTEC$ используется картирующая функция:

$$sTEC = MF(el)^* vTEC, \quad MF(el) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R_E * \cos(el)}{R_E + h_{ipp}}}}, \quad (3)$$

где el – угол возвышения спутника, R_E – радиус Земли. Таким образом для определения распределения $vTEC$ в окрестности станции необходимо оценить коэффициенты разложения a_i . При этом только наблюдения, для которых выполняется условие $|t_{obs} - t_{est}| < 15$ мин, вносят вклад в коэффициенты разложения для искомого момента времени t_{est} .

Уравнения для оценки наклонного полного электронного содержания ($sTEC$), коэффициентов разложения и картирующей функции всех видимых спутников образуют систему линейных уравнений (СЛУ) для оценки a_i . Эта система содержит неизвестные константы, которые необходимо устраниить. Для произвольного интервала непрерывности данных, т.е. наблюдений определённого спутника на приёмнике между двумя последовательными срывами сопровождения фазы на рабочей частоте, элементы матрицы определяются значениями соответствующих картирующих функций (3) и приращений аргументов разложения. Для выбранного интервала непрерывности данных константа, входящая в оценку для наклонного ТЕС, сохраняется и может быть легко устранена путём последовательного попарного вычитания уравнений в рассматриваемом фрагменте. Применяя аналогичную операцию ко всем остальным интервалам непрерывности данных, для устранения всех неизвестных констант, связанных с неопределенностью начальной фазы, задача определения неизвестных коэффициентов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\mathbf{A}\mathbf{a} = \mathbf{r} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

где \mathbf{r} – разности оценок наклонного ТЕС на соседних лучах, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – инструментальная ошибка измерений. Решение (4) может быть найдено методом наименьших квадратов (МНК) с весами и условием положительности $vTEC$, которое может быть задано неравенством $\mathbf{G}\mathbf{a} \geq 0$, где матрица \mathbf{G} переводит вектор-столбец оцениваемых параметров в распределение $vTEC$. Это решение будет иметь вид:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{LS} + \mathbf{N}^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y}, \quad (5)$$

где \mathbf{a}_{LS} – решение нормальной системы с матрицей $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{A}$ для МНК без ограничений, $\mathbf{\Omega}$ – ковариационная матрица ошибок наблюдений, а вектор-столбец \mathbf{y} – решение линейной задачи дополнительности:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= \mathbf{M}\mathbf{y} + \mathbf{w}, \\ s.t.: \mathbf{h} &\geq 0, \mathbf{y} \geq 0, \mathbf{y}^T \mathbf{h} \geq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $w = Ga_{LS}$, $M = GN^{-1}G^T$. Решение (6) можно получить, например, используя метод Лемке [5]. Видно, что решение задачи состоит из двух частей – решения (4) без ограничений с использованием МНК с весами и калибровочного слагаемого, связанного с условием положительности $vTEC$.

Полученные результаты

Для тестирования разработанного алгоритма были проведены оценки значений $vTEC$ в европейском регионе за 2018 год, приходящийся на минимум солнечной активности и характерный спокойными геомагнитными условиями. Входные данные в виде RINEX файлов были получены из европейской сети EUREF [6], включающей несколько сотен GNSS приемников. Результаты работы алгоритма сравнивались с глобальной ионосферной картой UQRG [3] и данными $vTEC$ из базы Madrigal [4]. На рис. 1 представлены гистограммы отклонений между различными методами оценки для всех приемников за весь период исследования, сплошные линии соответствуют нормальному распределению с экспериментальными оценками средних и дисперсий отклонений. Видно, что распределение отклонений оценок $vTEC$, полученных разными методами, хотя и близко к гауссовому, но формально не проходит тест Колмогорова-Смирнова на нормальность. Отметим близкое к 0 значение наиболее вероятного отклонения значения оценок $vTEC$ полученных разработанным в работе методом от оценок UQRG. В тоже время, как наши оценки $vTEC$, так и оценки UQRG, демонстрируют существенное смещение относительно данных базы Madrigal. Это можно объяснить тем, что наши оценки соответствуют точкам расположения приемных станций, а оценки UQRG и Madrigal являются результатами интерполяции по ближайшим узлам сетки, а также особенностями оценок $vTEC$ в ночном секторе в алгоритме, используемом в Madrigal [4].

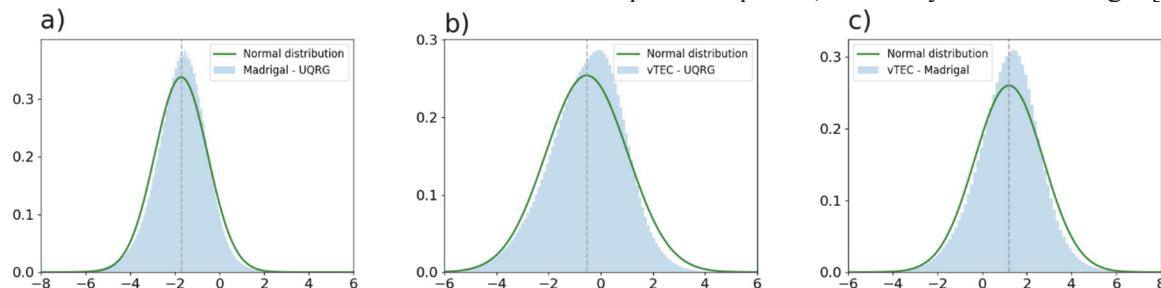


Рис. 1. Сравнительные гистограммы отклонений оценок $vTEC$: (a) Madrigal–UQRG, (b) $vTEC$ – UQRG, (c) $vTEC$ – Madrigal.

Одностанционные оценки $vTEC$, полученные предложенным методом и дополненные эффективным методом интерполяции, могут быть использованы в задачах регионального картирования ионосферы в областях с развитыми сетями наземных приемных пунктов. В частности, хорошие результаты в подобных задачах показывает метод универсального кригинга [7]. На рис. 2 представлен пример полученной таким образом региональной карты $vTEC$ для ночных условий весеннего равноденствия.

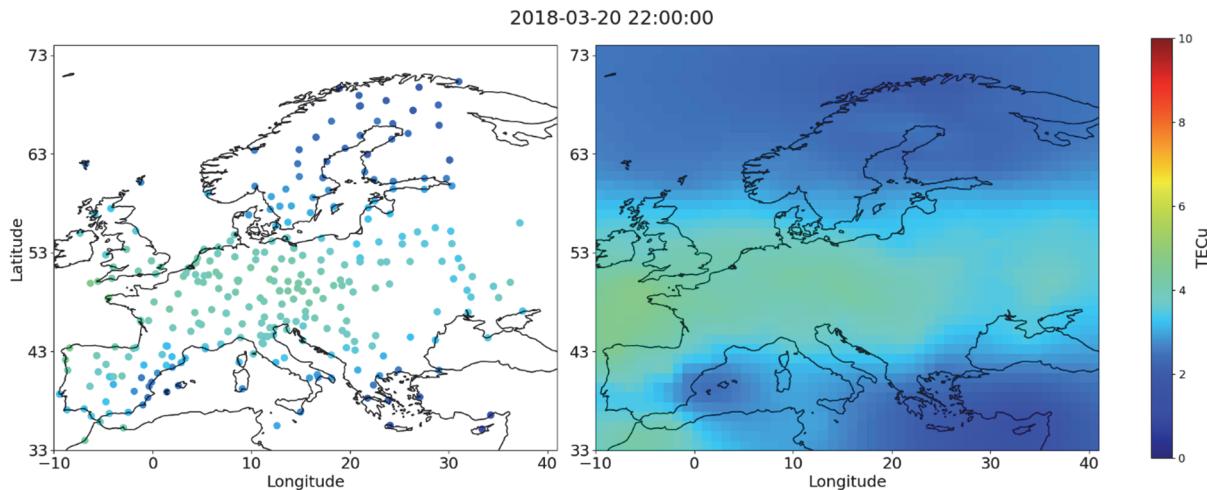


Рис. 2. Пример одностанционных оценок $vTEC$ (левая панель) и полученная на их основе региональная карта (правая панель)

Заключение

В работе представлен оригинальный алгоритм одноточечной оценки абсолютного $vTEC$ гарантирующий положительность получаемых оценок и использующий в своей работе только малошумные фазовые измерения GNSS на паре рабочих частот, не требующий таким образом знания DCB спутников и приемников и использующий разностный подход для исключения неопределенности начальной фазы. Предложенный метод показал хорошее согласие с данными многостанционных методов оценки $vTEC$ и может быть использован для регионального картирования ионосферы в областях с развитыми сетями приемных пунктов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00157).

Список литературы

1. Yasyukevich Yury, Mylnikova Anna, Vesnin Artem. GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: bounded-variable least-squares and Taylor series // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 19. – P. 5702.
2. 2Phase and phase-difference ionospheric radio tomography / V.E. Kunitsyn, E.S. Andreeva, O.G. Razinkov, E.D. Tereshchenko // International Journal of Imaging Systems and Technology. – 1994. – Vol. 5. – № 2. – P. 128–140.
3. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle / David Roma-Dollase, Manuel Hernández-Pajares, Andrzej Krzykowski et al. // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 92. – P. 691–706.
4. Rideout W, Carigilia K. CEDAR Madrigal Database // URL <http://cedar.openmadrigal.org>. – 2025.
5. Kostreva Michael M. Lemke methodLemke Method // Encyclopedia of Optimization / Ed. by Christodoulou A. Floudas, Panos M. Pardalos. – Boston, MA : Springer US, 2001. – P. 1262–1263.
6. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network / Carine Bruyninx, Juliette Legrand, András Fabian, Eric Pottiaux // GPS solutions. – 2019. – Vol. 23. – P. 1–14.
7. Демьянин В.В. Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. – М. : Наука, 2010.