

КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГЕОИНФОРМАТИКА

SPACE INFORMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATICS



УДК 550.388.2
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-1-48-64>

Оригинальная статья
Original Paper

Алгоритм оценки абсолютного полного электронного содержания ионосферы по данным двухчастотных фазовых и дальностных спутниковых измерений

А. С. Шапкин

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
E-mail: al_shapkin@newman.bas-net.by, shap1kin2@gmail.com*

Аннотация

Цели. Решается задача разработки алгоритма оценки абсолютного полного электронного содержания ионосферы по данным двухчастотных фазовых и дальностных спутниковых измерений для одиночной приемной станции глобальных навигационных спутниковых систем.

Методы. Для получения оценки корректируются данные фазовых измерений методами цифровой обработки сигналов, применяются и комбинируются известные формулы полного электронного содержания для фазовых и дальностных измерений, оценивается дифференциальная кодовая задержка приемной станции методом наименьших квадратов.

Результаты. Показано, что полное электронное содержание, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, но с точностью до неизвестной константы, а рассчитанное по дальностным измерениям позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и дифференциальной кодовой задержкой аппаратуры спутника и приемника. Разработан алгоритм оценки абсолютного полного электронного содержания ионосферы, приведены его описание и схема. Алгоритм применен для оценки полного электронного содержания за полгода наблюдений, рассчитана средняя ошибка полученной оценки.

Заключение. Разработанный алгоритм может быть использован для оценки абсолютного полного электронного содержания ионосферы для одиночной приемной станции глобальных навигационных спутниковых систем. В отличие от теоретически известных формул для фазовых и дальностных измерений в настоящей статье содержатся сведения о корректировке фазовых измерений и оценке дифференциальной кодовой задержки приемной станции. Дальнейшие исследования могут быть связаны с адаптивным подбором параметров и тестированием алгоритма для работы с наноспутниками формата CubeSat.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, глобальная навигационная спутниковая система, показатель преломления, дифференциальная кодовая задержка, метод наименьших квадратов

Благодарности. Работа выполнена в рамках договора № 220/12 «Разработать алгоритмические и программные средства обработки радиотомографических данных низкоорбитального контроля ионосферы» (04.05.2022–31.12.2025 гг.), заключенного с УП «Геоинформационные системы» по проекту «Разработать космическую систему радиометрического контроля околоземного пространства на базе малого космического аппарата и специализированных наземных средств» (мероприятия 8 подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «Научно-технические технологии и техника» на 2021–2025 гг.), а также в рамках подпрограммы «Разработка аппаратного и программно-алгоритмического комплекса радиометрического анализа динамических состояний ионосферы» научно-технической программы Союзного государства «Комплекс-СГ» (2022–2026).

Для цитирования. Шапкин, А. С. Алгоритм оценки абсолютного полного электронного содержания ионосферы по данным двухчастотных фазовых и дальностных спутниковых измерений / А. С. Шапкин // Информатика. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 48–64. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-1-48-64>

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 24.09.2023

Подписана в печать | Accepted 03.01.2024

Опубликована | Published 29.03.2024

Algorithm for estimating the absolute total electron content of the ionosphere from dual-frequency phase and range satellite measurements

Aliaksandr S. Shapkin

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
E-mail: al_shapkin@newman.bas-net.by, shap1kin2@gmail.com*

Abstract

Objectives. The problem of developing an algorithm for estimating the absolute total electron content of the ionosphere from dual-frequency phase and range satellite measurements for a single receiving station of global navigation satellite systems is being solved.

Methods. To obtain an estimate the phase measurement data are corrected using digital signal processing methods, well known total electron content formulas for phase and range measurements are applied and combined, and also the differential code bias of the receiving station is estimated using the least squares method.

Results. It is shown that the total electron content calculated from phase measurements provides high accuracy, but up to an unknown constant, but the content calculated from range measurements allows one to obtain the absolute value, but with a large noise component and differential code bias of a satellite and receiver equipment. An algorithm for estimating the absolute total electron content of the ionosphere has been developed, its description and diagram are given. The algorithm was used to estimate the total electronic content within six months of observations, and the average error of the resulting estimate was calculated.

Conclusion. The developed algorithm can be used to estimate the absolute total electron content of the ionosphere for a single receiving station of global navigation satellite systems. In contrast to theoretically known formulas for phase and range measurements, this article contains information about adjusting phase measurements and estimating the differential code delay of receiving station. Further research may be related to the adaptive selection of parameters and testing of the algorithm for working with nanosatellites of the CubeSat format.

Keywords: ionosphere, total electron content, global navigation satellite systems, refractive index, differential code bias, least squares method

Acknowledgements. The work is carried out within the agreement no. 220/12 "Development of algorithmic and software tools for processing radio tomographic data of low-orbit ionosphere monitoring" (05.05.2022–12.31.2025) with UE "Geoinformation Systems" on the project "Develop a space system for radiometric monitoring of near-Earth space based on a small spacecraft and specialized ground facilities" (activities of subprogram 6 "Research and use of outer space for peaceful purposes" of the State Program "Science-intensive technologies and engineering" for 2021–2025), as well as within the framework of the subprogram "Development of hardware and software-algorithmic complex for radiometric analysis of dynamic states of the ionosphere" of the scientific and technical program of the Union State "Complex-SG" (2022–2026).

For citation. Shapkin A. S. *Algorithm for estimating the absolute total electron content of the ionosphere from dual-frequency phase and range satellite measurements*. Informatika [Informatics], 2024, vol. 21, no. 1, pp. 48–64 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2024-21-1-48-64>

Conflict of interest. The author declares of no conflict of interest.

Введение. Главными факторами, которые влияют на распространение электромагнитных волн, являются концентрация свободных электронов n_e , внешнее магнитное поле B_0 и эффективная частота соударений между электронами и другими частицами ν , а также такие свойства самой волны, как ее частота f , направление распространения \vec{k} и поляризация – направление вращения электрического (или магнитного) вектора волны [1].

Если для ионосферы справедливы следующие условия [1]:

- статистическая однородность распределения зарядов, так что в результате пространственный заряд отсутствует;
 - влияние на распространение волны только электронов;
 - пренебрежение тепловым движением (холодная плазма);
 - магнитные свойства свободного пространства (магнитная проницаемость среды равна единице);
 - отсутствие поляризационного члена Лоренца (Лоренцова поправка [2]).
 - однородность внешнего магнитного поля \vec{B}_0 ;
 - частота электронных соударений ν не зависит от энергии электрона,
- то показатель преломления определяется формулой Эпплтона – Лассена [1, 2]:

$$\bar{n}^2 = 1 - \frac{a}{1 - ic - \frac{b_{\perp}^2}{2(1-a-ic)} \pm \sqrt{\frac{b_{\perp}^4}{4(1-a-ic)^2} + b_{\parallel}^2}}; \quad \bar{n} = \mu - i\chi, \quad (1)$$

где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $a = (\omega_e / \omega)^2$, ω – радиальная частота волны, $\omega_e = e \sqrt{\frac{n_e}{\epsilon_0 m_e}}$ – плазменная частота ионосферы, m_e – масса электрона, e – заряд электрона, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $b = \omega_H / \omega$; $b_{\perp} = b \sin \theta$; $b_{\parallel} = b \cos \theta$, θ – угол между направлением распространения волны \vec{k} и вектором магнитной индукции \vec{B}_0 , $\omega_H = \frac{|e| B_0}{m_e}$ – гиромагнитная частота; $c = \nu / \omega$.

Поскольку основной вклад в формулу (1) вносит электрическая составляющая, то на практике влиянием магнитного поля и соударениями можно пренебречь ($b = c = 0$). Получаем известную формулу показателя преломления [1], зависящую только от электронной концентрации:

$$\mu^2 = 1 - a = 1 - \left(\frac{\omega_e}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{e^2 n_e}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e f^2}. \quad (2)$$

Основной характеристикой при изучении ионосферы является полное электронное содержание (ПЭС, англ. *TEC*), определяемое как интеграл от электронной концентрации по пути распространения волны между приемной станцией и спутником:

$$TEC = \int_{L_0(t)}^{L(t)} n_e(z) dz, \quad (3)$$

где $L_0(t)$ – нижняя граница ионосферного слоя; $L(t)$ – расстояние от приемной станции до спутника; $n_e(z)$ – электронная концентрация на трассе вдоль оси z . Таким образом, ПЭС характеризует количество свободных электронов, содержащихся на трассе по пути следования радиоволны с поперечным сечением 1 м^2 , и выражается в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$).

Существует несколько методов определения ПЭС, которые основаны на допущении, что показатель преломления ионосферы определяется формулой (2). Методы можно разделить по количеству используемых частот сигнала спутника глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС): одночастотные, двухчастотные, трехчастотные и четырехчастотные, а также по параметру, с помощью которого рассчитывается ПЭС: дальностные (по псевдодальности) и фазовые (по фазе несущей).

Одним из основных способов оценки ПЭС является двухчастотный фазовый метод [3, 4], подробное обоснование которого есть, например, в работе [5]:

$$TEC_{\psi} = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (O_1 \lambda_1 - O_2 \lambda_2 + \text{const}_{1,2} + \sigma O), \quad (4)$$

где $A = \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e} \approx 40,308 \text{ м}^3 \text{ Гц}^2$; O_1 и O_2 – фазы несущих (в оборотах) на частотах f_1 и f_2 ; λ_1 и λ_2 –

длины волн; $\text{const}_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений, вызванная неизвестной начальной фазой; σO – ошибка фазовых измерений. В работе [3] утверждается, что при интервале усреднения в 30 с ошибка расчета не превосходит 0,01 TECU. Несмотря на высокую точность, результаты фазовых измерений являются относительными. В связи с этим требуется применение дополнительных специальных методик для устранения неоднозначности фазовых измерений [6].

Еще одним методом определения ПЭС является двухчастотный дальностный метод [3, 4]:

$$TEC_D = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (D_2 - D_1 + \sigma D), \quad (5)$$

где D_1 и D_2 – псевдодальности на частотах f_1 и f_2 ; σD – ошибка дальностных измерений, связанная главным образом с задержкой радиосигнала в аппаратуре (дифференциальной кодовой задержкой).

В отличие от двухчастотного фазового метода дальностный метод позволяет получить абсолютное значение ПЭС, однако эти результаты будут крайне зашумленными. Согласно [4] уровень шумовой составляющей составляет в среднем от 30 до 50 %, а в некоторых случаях может достигать и 100 %, что затрудняет применение данного метода для определения пространственных и временных возмущений ПЭС. Кроме того, вычисленное таким образом ПЭС также содержит некоторую аддитивную константу, называемую дифференциальной кодовой задержкой (ДКЗ). ДКЗ вызывается частотно-зависимыми задержками в аппаратуре спутника и приемника и может достигать нескольких десятков TECU [7].

Кроме основных двухчастотных методов могут применяться одночастотный [8], трехчастотный [9] и четырехчастотный методы [10]. Последний позволяет довести величину неоднозначности до значений, превосходящих ширину физически возможного диапазона значений ПЭС, т. е. определить ее однозначно. Однако учитывая технические возможности приемопередающей аппаратуры ГНСС, возможным представляется использование одно- и двухчастотных методов. При этом измерения одночастотным методом являются относительными,

а среднеквадратическое отклонение (СКО) вариаций ПЭС не превосходит 0,1 TECU [3], что значительно хуже, чем при использовании формулы (4). В связи с этим использование двухчастотных методов предпочтительнее. На рис. 1 представлены результаты применения различных методов на данных одной реализации спутника ГНСС.

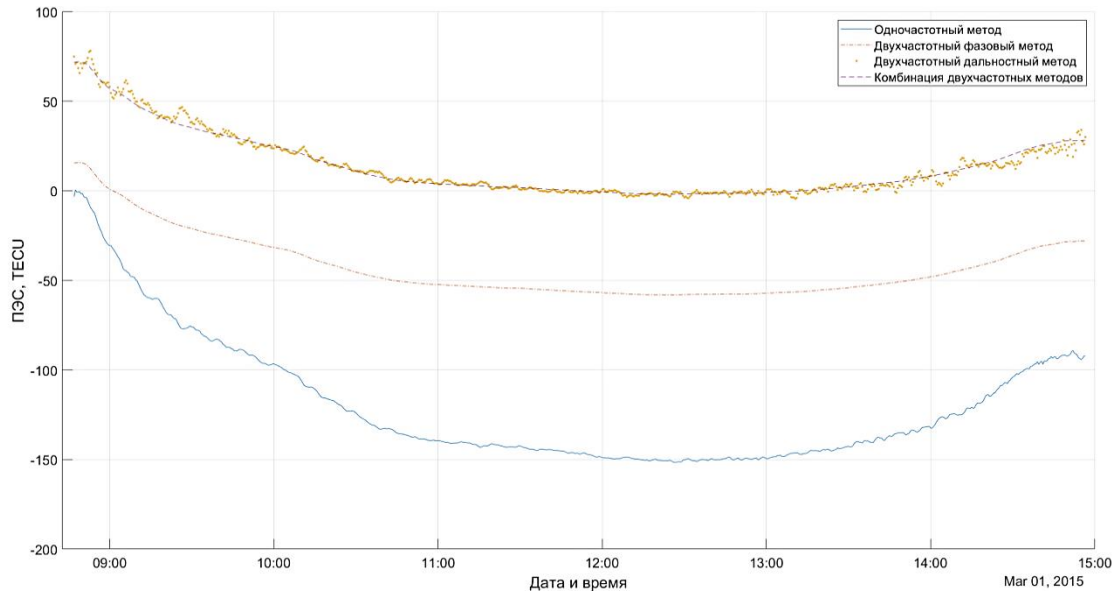


Рис. 1. ПЭС, рассчитанное различными методами на минской станции для одной реализации спутника 7 GPS

Fig. 1. TEC calculated by various methods on Minsk station for single realization of satellite 7 GPS

ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, однако с точностью до неизвестной константы (которая также может меняться в ходе наблюдения), а ПЭС, рассчитанное по дальностным измерениям, позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и ДКЗ аппаратуры спутника и приемника. В связи с этим возникает потребность получения оценки, сочетающей высокую точность фазовых измерений и абсолютный уровень дальностных.

Целью работы является разработка алгоритма оценки абсолютного ПЭС ионосферы по данным двухчастотных фазовых и дальностных спутниковых измерений для одиночной приемной станции ГНСС. Ниже приводятся описание алгоритма, его упрощенная схема, результаты применения и расчет средней ошибки полученной оценки ПЭС.

Описание алгоритма. Пусть в каждый момент времени известны следующие характеристики:

- фазовые (фаза несущей) O_1 и O_2 и дальностные (псевдодальность) D_1 и D_2 измерения на двух частотах f_1 и f_2 ;
- угол места спутника ϵ ;
- ДКЗ спутника DCB_s .

Сущность алгоритма состоит в комбинировании расчетов ПЭС по фазовым и дальностным измерениям, а также в оценке и учете ионосферных задержек, вносимых ДКЗ приемной станции и спутников. Алгоритм оценки абсолютного ПЭС состоит из пяти основных шагов.

Шаг 1. Корректировка фазовых измерений.

Данные фазовых измерений, полученные от спутников ГНСС, необходимо «очистить» за счет корректировки разрывов и скачков в значениях [6]. Скачки (cycle slips) и разрывы (gaps) представляют собой кратковременный срыв в фазовой синхронизации приемника на спутниковый сигнал. При фазовых измерениях мгновенное значение фазы можно представить в виде суммы целой (неоднозначности фазового измерения) и дробной частей:

$$\psi = 2\pi(N + l) + \Delta\psi, \quad (6)$$

где N – неизвестное целое число, l – целое число. При этом N остается постоянным до потери сигнала. После этого неизвестная константа N переопределяется, что приводит к срыву фазовой синхронизации и скачкообразному изменению принимаемого значения фазы.

Причины возникновения разрывов и скачков могут быть условно разделены на три группы [6]:

- 1) препятствия на траектории распространения луча: горы, здания, мосты, деревья и т. д.;
- 2) низкое отношение сигнал/шум, вызванное плохими ионосферными условиями, многолучевостью, низким углом места спутника и т. д.;
- 3) сбои в работе программного обеспечения приемника или неисправность спутникового генератора.

Для исправления скачка необходимо детектировать его на фоне шумов. Существует достаточно большое количество методов детектирования скачков [6, 11]. Учитывая необходимость проведения точных измерений фазовых характеристик, а также наличие двухчастотного канала приема сигналов ГНСС, целесообразно выбрать метод для одиночной двухчастотной приемной станции. В работе [11] для данных с относительно большим временным шагом наблюдения (не менее 5 с) комбинация методов FBMWA – STPIR (forward and backward moving window averaging – second-order, time-difference phase ionosphere residual) [12] показала наилучший результат, поэтому для детектирования и исправления скачков будет использоваться именно она.

Алгоритм FBMWA (forward and backward moving window averaging) базируется на алгоритме TurboEdit [13] и использует линейную комбинацию Мельбурна – Вюббена:

$$L_{MW} = \frac{f_1 \cdot \lambda_1 O_1 - f_2 \cdot \lambda_2 O_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \cdot D_1 - f_2 \cdot D_2}{f_1 + f_2} = \lambda_{wL} N_{wL}, \quad (7)$$

где $\lambda_{wL} = c / (f_1 - f_2)$; $N_{wL} = N_1 - N_2$ – разность неоднозначностей фазовых измерений.

Из формулы (7) найдем разность неоднозначностей фазовых измерений:

$$N_{wL} = O_1 - O_2 - \frac{f_1 \cdot D_1 - f_2 \cdot D_2}{\lambda_{wL} (f_1 + f_2)}. \quad (8)$$

В алгоритме TurboEdit далее рекурсивно находятся среднее и дисперсия выражения (8):

$$\bar{N}_{wL}(k) = \bar{N}_{wL}(k-1) + \frac{1}{k} [N_{wL}(k) - \bar{N}_{wL}(k-1)]; \quad (9)$$

$$\sigma^2(k) = \sigma^2(k-1) + \frac{1}{k} [(N_{wL}(k) - \bar{N}_{wL}(k-1))^2 - \sigma^2(k-1)], \quad (10)$$

где k – номер отсчета внутри одного наблюдения (пролета) спутника.

Считается, что обнаружен скачок, если выполняются следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} |N_{wL}(k) - \bar{N}_{wL}(k-1)| \geq 4\sigma(k); \\ |N_{wL}(k+1) - N_{wL}(k)| \leq 1. \end{array} \right. \quad (11)$$

Величина скачка находится как

$$\Delta N_1(k) - \Delta N_2(k) = N_{wL}(k) - \bar{N}_{wL}(k-1), \quad (12)$$

где ΔN_1 , ΔN_2 – целые величины скачка на частотах f_1 и f_2 .

В алгоритме же FBMWA разность неоднозначностей фазовый измерений (8) усредняется:

$$\bar{N}_{WL,B}(k-1) = \frac{1}{m} \sum_{i=k-1}^{k-m} N_{WL}(i); \quad (13)$$

$$\bar{N}_{WL,F}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} N_{WL}(i); \quad (14)$$

$$\Delta \bar{N}_{WL}(k) = \bar{N}_{WL,F}(k) - \bar{N}_{WL,B}(k-1), \quad (15)$$

где n, m – некоторые целые числа, подбираемые эмпирически. Усреднение (13)–(15) существенно снижает уровень шума и повышает точность алгоритма. Выражение (15) позволяет детектировать скачок, но не дает информации о величине скачка на каждой из частот. Кроме того, алгоритм FBMWA имеет «слепую зону», когда $\Delta N_1 = \Delta N_2$. В связи с этим FBMWA используется совместно с алгоритмом STPIR (second-order, time-difference phase ionosphere residual) [12], который является несколько улучшенной версией PIR [14]. STPIR применяет линейную комбинацию фазовых измерений:

$$L_{PIR} = O_1 - \frac{f_1}{f_2} O_2 = N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_2 + I_{res}, \quad (16)$$

где $I_{res} = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2 \lambda_1} I$, I – задержка сигнала в ионосфере в метрах.

Величина скачка может быть оценена путем нахождения приращения выражения (16) [12]:

$$\Delta N_1(k) - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2(k) = (L_{PIR}(k) - 2 \cdot L_{PIR}(k-1) + L_{PIR}(k-2)) - (I_{res}(k) - 2I_{res}(k-1) + I_{res}(k-2)). \quad (17)$$

При этом величина второго слагаемого близка к нулю и на практике ею пренебрегают:

$$\Delta N_1(k) - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2(k) = L_{PIR}(k) - 2 \cdot L_{PIR}(k-1) + L_{PIR}(k-2) = \Delta L_{PIR}(k). \quad (18)$$

По аналогии с алгоритмом TurboEdit будем считать, что обнаружен скачок, если выполняется одно из условий

$$|\Delta \bar{N}_{WL}(k)| \geq 4\sigma_{FBMWA}(k); \quad (19)$$

$$|\Delta L_{PIR}(k)| \geq 4\sigma_{STPIR}(k), \quad (20)$$

где $\sigma_{FBMWA}(k) = \sqrt{\sigma_F^2(k) + \sigma_B^2(k-1)}$ – СКО метода FBMWA; σ_F – СКО переднего усреднения (14); σ_B – СКО заднего усреднения (13); σ_{STPIR} – СКО выражения (18). Определить величину скачка на каждой из частот можно, решив систему

$$\begin{cases} \Delta N_1 - \Delta N_2 = [\Delta \bar{N}_{WL}(k)]; \\ \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 = \Delta L_{PIR}(k), \end{cases} \quad (21)$$

где $[\Delta \bar{N}_{WL}(k)]$ – округленное до целого значение $\Delta \bar{N}_{WL}(k)$.

Последующие данные исправляются на округленную величину скачка:

$$\begin{aligned} O'_1 &= O_1 - [\Delta N_1]; \\ O'_2 &= O_2 - [\Delta N_2]. \end{aligned} \quad (22)$$

С точки зрения временной последовательности разрыв представляет собой кратковременное (до нескольких минут) отсутствие сигнала. Для корректировки разрыва воспользуемся комбинациями (8) и (18) и найдем их средние приращения слева и справа от разрыва:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{N}_{WL1} &= \frac{1}{(p-1)^2} \sum_{i=l-p+1}^l (N_{WL}(i) - N_{WL}(i-p)); \\ \Delta \bar{N}_{WL2} &= \frac{1}{(p-1)^2} \sum_{i=r}^{r+p-1} (N_{WL}(i+p) - N_{WL}(i)); \\ \Delta \bar{L}_{PIR1} &= \frac{1}{(p-1)^2} \sum_{i=l-p+1}^l (L_{PIR}(i) - L_{PIR}(i-p)); \\ \Delta \bar{L}_{WL2} &= \frac{1}{(p-1)^2} \sum_{i=r}^{r+p-1} (L_{PIR}(i+p) - L_{PIR}(i)), \end{aligned} \quad (23)$$

где m – некоторое целое число, подобранное эмпирически; l – номер отсчета перед разрывом; r – номер отсчета после разрыва.

Величину разрыва определим, решив систему:

$$\begin{cases} \Delta N_1 - \Delta N_2 = \left[\frac{1}{2p} \sum_{i=l-2p+1}^l N_{WL}(i) - \frac{1}{2p} \sum_{i=r}^{r+2p-1} N_{WL}(i) - \left(\frac{\Delta \bar{N}_{WL1} + \Delta \bar{N}_{WL2}}{2} \right) (r-l) \right]; \\ \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 = \frac{1}{2p} \sum_{i=l-2p+1}^l L_{PIR}(i) - \frac{1}{2p} \sum_{i=r}^{r+2p-1} L_{PIR}(i) - \left(\frac{\Delta \bar{L}_{PIR1} + \Delta \bar{L}_{PIR2}}{2} \right) (r-l). \end{cases} \quad (24)$$

Данные справа от разрыва исправляются, как в выражениях (22), а на разрыве заполняются линейно:

$$\begin{aligned} O'_1(i) &= O_1(l) + (O'_1(r) - O_1(l))(r-l-1), \quad i = \overline{l+1; r-1}; \\ O'_2(i) &= O_2(l) + (O'_2(r) - O_2(l))(r-l-1), \quad i = \overline{l+1; r-1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Шаг 2. Подсчет относительного ПЭС по фазовым измерениям.

В условиях отсутствия априорной информации о сигнале в формуле (4) ошибка определения фазы и неоднозначность фазовых измерений приравниваются к нулю и используется формула

$$TEC_{\psi} = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (O'_1 \lambda_1 - O'_2 \lambda_2). \quad (26)$$

Шаг 3. Подсчет ПЭС по дальностным измерениям.

Так как ошибка дальностных измерений σD в формуле (5) связана в первую очередь с ДКЗ приемника и передатчика, ее можно записать следующим образом:

$$TEC_D = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (D_2 - D_1 + cDCB_s - cDCB_r), \quad (27)$$

где c – скорость света; DCB_s – ДКЗ спутника; DCB_r – ДКЗ приемной станции.

В условиях отсутствия какой-либо априорной информации о сигнале ошибка в расчете приравнивается к нулю. Тем не менее на открытом сайте NASA¹ публикуется ежедневная информация о ДКЗ спутников различных ГНСС (включая GPS и ГЛОНАСС) в наносекундах, поэтому будем считать, что ДКЗ спутников известны. Тогда формулу (27) можно записать в виде, который и будет использоваться в дальнейших расчетах:

$$TEC_D = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (D_2 - D_1 + cDCB_s). \quad (28)$$

На рис. 2 представлен результат применения формулы (28).

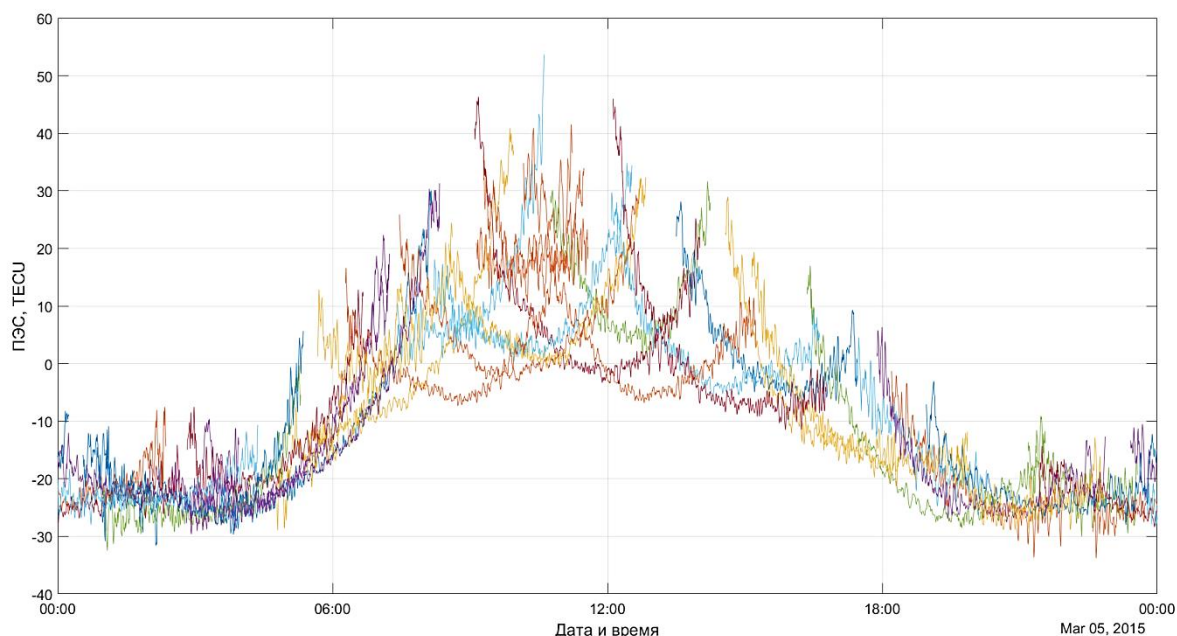


Рис. 2. ПЭС, рассчитанное по формуле (28), в течение дня наблюдений 05.03.2015 г. минской станции

Fig. 2. TEC calculated with formula (28) during the day of observation on 05.03.2015 on Minsk station

Шаг 4. Оценка абсолютного ПЭС с помощью комбинирования оценок ПЭС, полученных по фазовым и дальностным измерениям.

Как уже упоминалось ранее, оценка ПЭС по фазовым измерениям обеспечивает высокую точность, но является относительной, а оценка по дальностным измерениям позволяет получить абсолютное значение, но со значительной шумовой составляющей. Простым решением является подъем относительного ПЭС, посчитанного по фазовым измерениям, до среднего уровня абсолютного ПЭС, посчитанного по дальностным измерениям:

$$TEC_{abs} = TEC_{\psi}''' + \left\langle TEC_D - TEC_{\psi}''' \right\rangle. \quad (29)$$

¹GNSS Differential Code Bias Product [Electronic resource]. – Mode of access: https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/gnss_differential_code_bias_product.html. – Date of access: 14.10.2022.

Результат применения формулы (29) представлен на рис. 3.

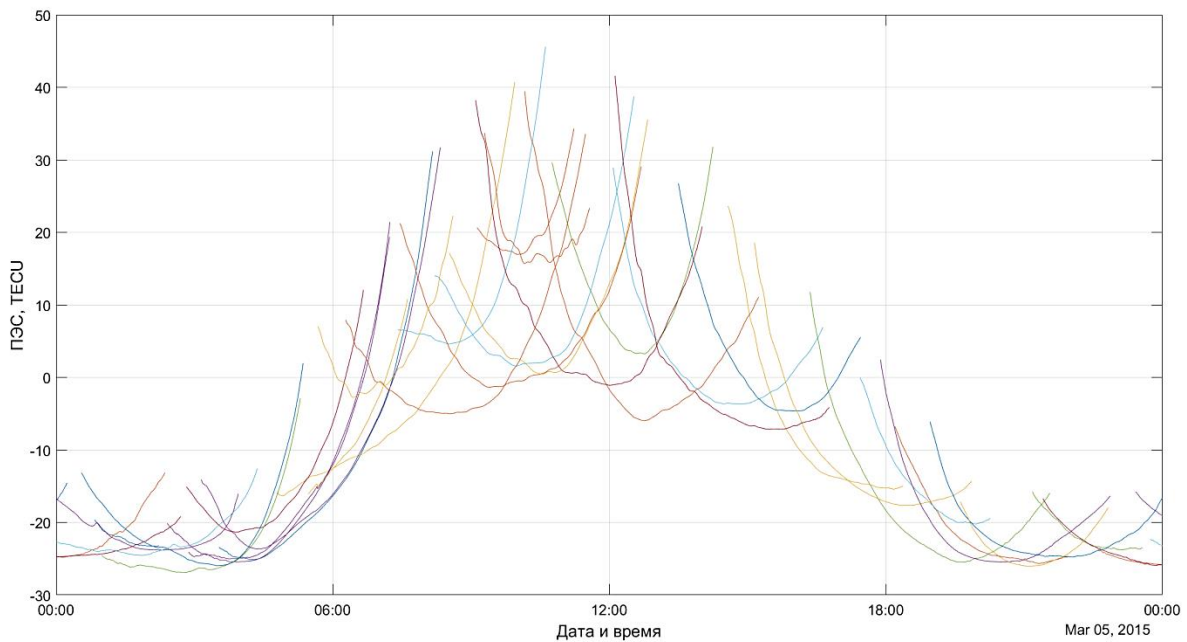


Рис. 3. Абсолютное ПЭС (без учета ДКЗ приемной станции) за день наблюдений 05.03.2015 г. минской станции
Fig. 3. Absolute TEC (excluding DCB of receiving station) for a day of observation on 05.03.2015 on Minsk station

Шаг 5. Уточнение оценки абсолютного ПЭС за счет оценки ДКЗ приемной станции.

Абсолютное ПЭС, рассчитанное по формулам (26), (28) и (29), все еще не является конечным и может быть даже отрицательным, как показано на рис. 3, так как не была принята в расчет ДКЗ приемной станции. Оценим ДКЗ приемной станции на основе метода наименьших квадратов. Для этого для каждой реализации (пролета спутника) минимизируется функция суммы квадратов отклонений вертикального ПЭС:

$$S = \sum_{n=1}^N \left(TEC_V^k - \overline{TEC_V^k} \right)^2, \quad (30)$$

где k – номер реализации, TEC_V^k – вертикальное ПЭС, вычисляемое по формуле

$$TEC_V^k = \left(TEC_{abs}^k - c' DCB_r^k \right) M(\varepsilon, h). \quad (31)$$

Здесь $c' = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} c$, c – скорость света; $M(\varepsilon, h)$ – множитель для отображения наклонного ПЭС в вертикальное:

$$M(\varepsilon, h) = \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + h_{max}} \cos(\varepsilon) \right) \right), \quad (32)$$

где ε – угол места; h_{max} – высота точки вхождения луча в ионосферу (однослойная модель ионосферы [15]); R_e – радиус Земли.

Следовательно, необходимо найти такое значение $c'DCB_r^k$, чтобы минимизировать выражение

$$S = \sum_{n=1}^N \left(TEC_V^k - \overline{TEC_V^k} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (33)$$

Преобразуем функцию (30):

$$S = \sum_{n=1}^N \left(TEC_V^k - \overline{TEC_V^k} \right)^2 = \sum_{n=1}^N \left(\left(TEC_V^k \right)^2 + \left(\overline{TEC_V^k} \right)^2 - 2TEC_V^k \overline{TEC_V^k} \right). \quad (34)$$

Подставим уравнение (31) в (34), для удобства записи сделав замену $x = c'DCB_r^k$:

$$S = \sum_{n=1}^N \left(\left([TEC_{abs}^k - x]M \right)^2 + \left([\overline{TEC_{abs}^k} - x]M \right)^2 - 2[TEC_{abs}^k - x]M[\overline{TEC_{abs}^k} - x]M \right). \quad (35)$$

Раскрывая скобки и приводя подобные, можно получить выражения

$$S = \sum_{n=1}^N \left([TEC_{abs}^k M - \overline{TEC_{abs}^k} M]^2 + 2[M - \overline{M}][\overline{TEC_{abs}^k} M - TEC_{abs}^k M]x + [M - \overline{M}]^2 x^2 \right); \quad (36)$$

$$S' = \sum_{n=1}^N \left(2[M - \overline{M}][\overline{TEC_{abs}^k} M - TEC_{abs}^k M] + 2[M - \overline{M}]^2 x \right) = 0; \quad (37)$$

$$x = - \frac{\sum_{n=1}^N [M - \overline{M}][\overline{TEC_{abs}^k} M - TEC_{abs}^k M]}{\sum_{n=1}^N [M - \overline{M}]^2}. \quad (38)$$

Так как $[M - \overline{M}]^2 > 0$, то x – точка минимума.

После получения значения $c'DCB_r^k$ проверяется, лежит ли результат в пределах от -75 до 75 TECU. Если не лежит, то реализация исключается из рассмотрения. Значение ДКЗ приемной станции принимается равным среднему по всем рассмотренным реализациям. Полученный результат отнимается от значения абсолютного ПЭС (см. формулу (29)).

Отметим две особенности алгоритма. Во-первых, оценка проводится на основании ночных данных, так как в это время ПЭС изменяется относительно слабо. Во-вторых, минимизация целевой функции (33) проводится по данным вертикального, а не наклонного ПЭС для уменьшения влияния распространения сигналов под разными углами.

Итак, запишем полученный алгоритм:

Шаг 5.1. Для k -й реализации находится $M, \overline{M}, \overline{TEC_{abs}^k} M$.

Шаг 5.2. По формуле (38) находится значение ДКЗ в TECU $c'DCB_r$.

Шаг 5.3. Проверяется условие $-75 < c'DCB_r^k < 75$. Если оно не выполняется, то реализации исключается из рассмотрения.

Шаг 5.4. В качестве ДКЗ приемной станции выбирается среднее ДКЗ для всех реализаций:

$$DCB_r = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c'DCB_r^k, \quad (39)$$

где K – количество рассмотренных реализаций.

Таким образом может быть получено окончательное значение абсолютного ПЭС:

$$TEC'_{abs} = TEC_{abs} - c'DCB_r. \quad (40)$$

Упрощенно алгоритм оценки абсолютного ПЭС можно представить в графическом виде (рис. 4).

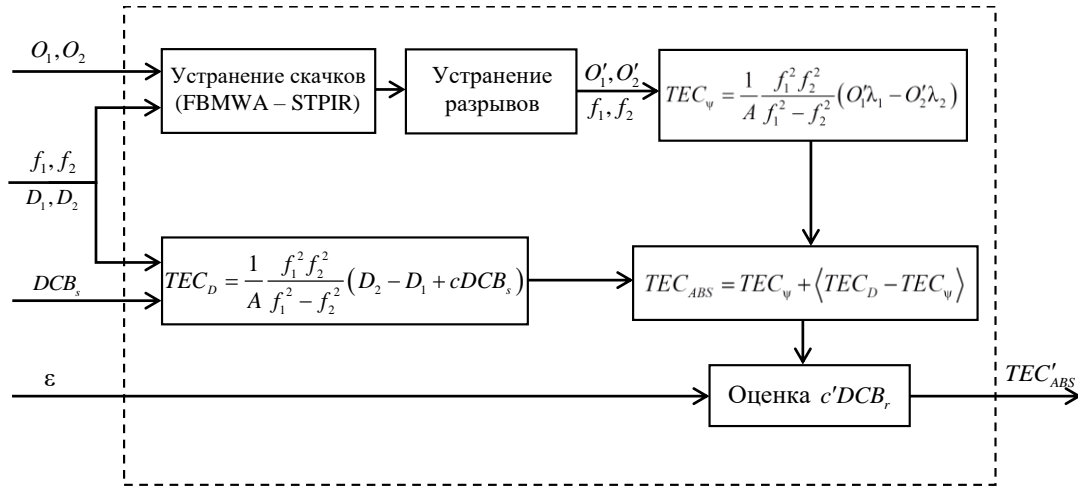


Рис. 4. Упрощенная схема алгоритма оценки абсолютного ПЭС
Fig. 4. Simplified diagram of the algorithm for estimating absolute TEC

Применение алгоритма. Разработанный алгоритм был использован для оценки ПЭС над минской и сокольской станциями, при этом для первой интервал наблюдения был равен $\Delta t = 1c$, а для второй – $\Delta t = 15c$. Так как ДКЗ приемных станций, вообще говоря, непостоянны, предлагается оценивать их величину для данных внутри некоторого окна. Центр окна находится в полночь, для которой оценивается ДКЗ, а размер составляет d дней. В результате будет сформирована последовательность ДКЗ для каждой ночи $\{DCB_s(k)\}$, где k – номер ночи. Найти значение ДКЗ для каждого момента времени t можно, используя соседние ночи:

$$TEC'_{abs}(t) = TEC_{abs}(t) - \left(\frac{DCB_s(t_1)(t - t_2) + DCB_s(t_2)(t - t_1)}{t_2 - t_1} \right), \quad t_1 \leq t < t_2. \quad (41)$$

Полученные результаты можно перевести в вертикальное ПЭС и усреднить:

$$TEC_v^i(t) = TEC_{abs}^i(t) M(\varepsilon^i(t), h); \quad (42)$$

$$\overline{TEC}_v(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(t) TEC_v^i(t)}{\sum_{i=1}^n w_i(t)}, \quad (43)$$

где n – количество видимых спутников в момент времени t ; TEC_v^i – вертикальное ПЭС для i -го видимого спутника; w_i – коэффициент, определяемый равенством

$$w_i = \sin\left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{90^\circ - \varepsilon_0}\right). \quad (44)$$

Здесь ε_i – угол места спутника; ε_0 – минимальный рассматриваемый угол места.

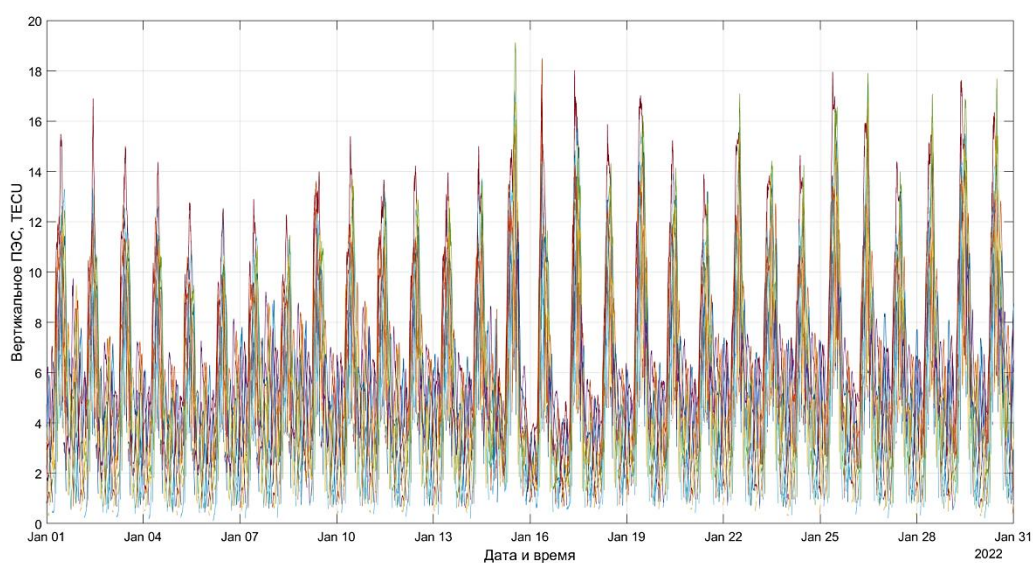
Проведем оценку ПЭС над минской и сокольской станциями при приведенных в табл. 1 значениях параметров.

Таблица 1
Значения параметров при оценке ПЭС

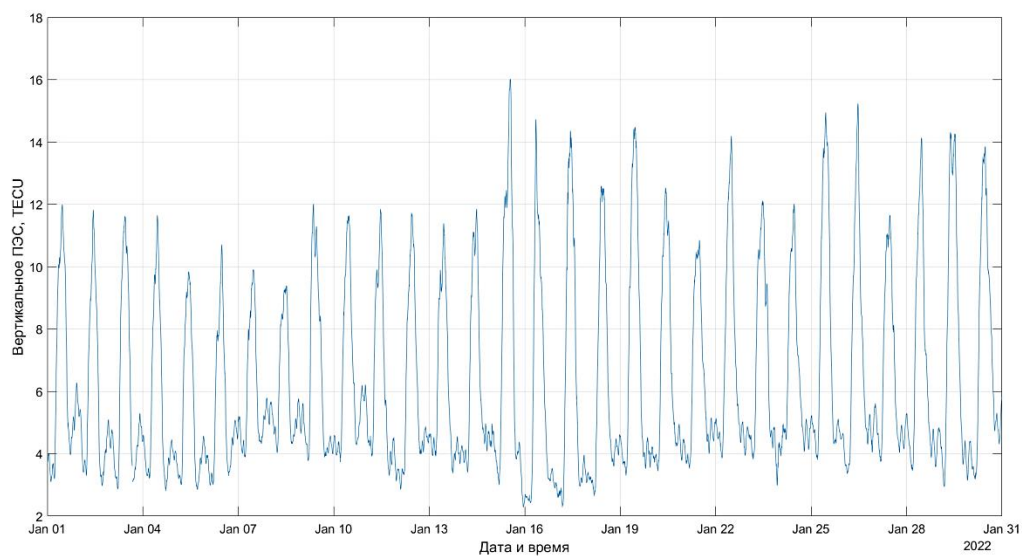
Table 1
Values of parameters when estimating TEC

Станция Station	n	m	p	d	ε_0
Минская	20	20	10	10	10°
Сокольская	3	20	5	10	10°

Полученные результаты для двух станций представлены на рис. 5 и 6.



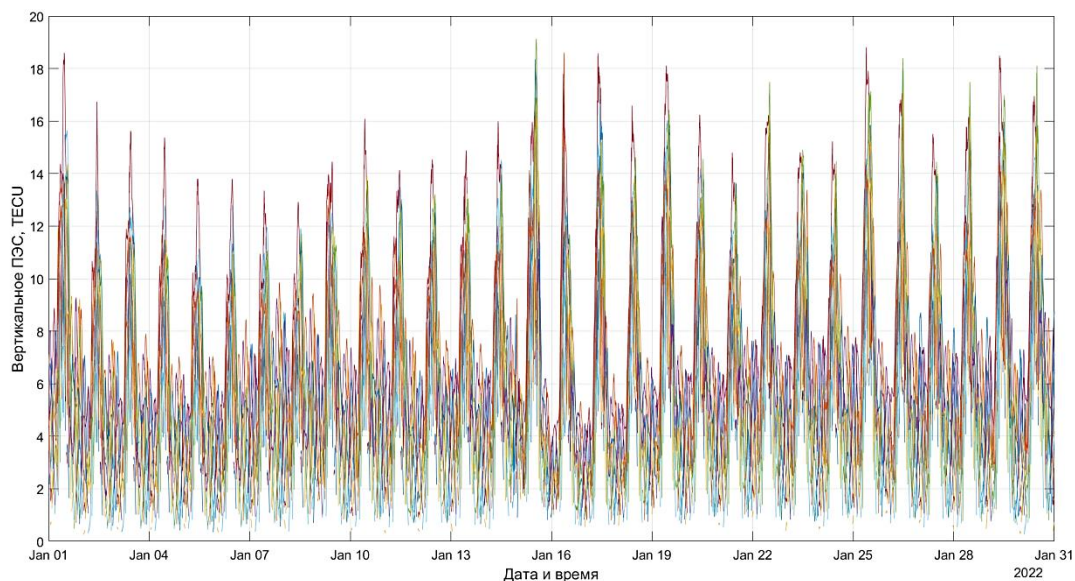
a)



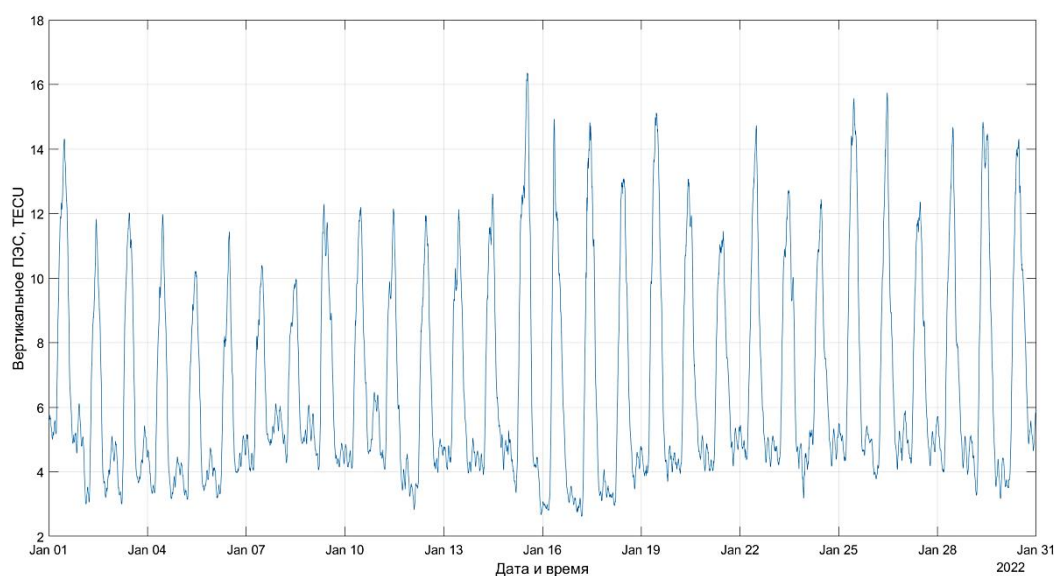
b)

Рис. 5. Результаты оценки ПЭС для минской станции за 1–30 января 2022 г.:
a) все реализации; b) взвешенное среднее

Fig. 5. Results of TEC estimation for the Minsk station for January 1–30, 2022:
a) all realizations; b) weighted average



a)



b)

Рис. 6. Результаты оценки ПЭС для сокольской станции за 1–30 января 2022 г.:
a) все реализации; b) взвешенное среднее

Fig. 6. Results of TEC estimation for the Sokol station for January 1–30, 2022:
a) all realizations; b) weighted average

Оценка ошибки. Так как оценка влияния скачков и разрывов достаточно сложна и выходит за рамки данной работы, допустим, что все присутствующие в сигналах скачки детектированы и оценены верно. В этом случае ошибка измерений будет такой же, как и при оценке ПЭС по фазовым измерениям. Измерения фазы в системе GPS производятся с высокой степенью точности, так что ошибка в определении ПЭС при 30-секундных интервалах усреднения не превышает 0,01 TECU [3, 6]. При этом существует также средняя ошибка оценки ПЭС, зависящая при указанных выше допущениях главным образом от оценки ДКЗ. Согласно работе [7] ДКЗ приемной станции изменяется с течением года. Считая ДКЗ постоянной в течение месяца, можно оценить стандартную ошибку при определении ДКЗ:

$$SE_{e'_{DCB}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (45)$$

где σ – СКО ДКЗ для отдельного наблюдения спутника; n – среднее количество ночных наблюдений за временное окно в d дней.

Оцененные по месяцам за полгода наблюдений стандартные ошибки среднего для минской и сокольской станций и их усредненные значения за полгода приведены в табл. 2.

Таблица 2
Стандартные ошибки среднего оценки ПЭС

Table 2
Standard error of TEC estimation

Характеристика <i>Characteristic</i>	Станция <i>Station</i>	Январь <i>January</i>	Февраль <i>February</i>	Март <i>March</i>	Апрель <i>April</i>	Май <i>May</i>	Июнь <i>June</i>	Среднее <i>Average</i>
SE	Минская	0,58	0,75	0,75	1,13	1,45	0,90	0,93
	Сокольская	0,60	0,74	0,76	1,18	1,46	0,90	0,95
K	Минская	72,75	73,87	67	78,36	78,93	83,27	75,70
	Сокольская	72,39	70,63	66,33	78,36	78,60	82,60	74,82
σ	Минская	5,00	6,49	6,21	10,05	12,93	8,21	8,15
	Сокольская	5,15	6,28	6,21	10,44	13,01	8,21	8,22

Видно, что результаты для обеих станций близки. Стандартная ошибка среднего при оценке ПЭС составляет 0,94 TECU. При этом стоит учитывать, что ДКЗ меняется в течение года [7] и более высокая ошибка в апреле и мае может быть связана со значительным ее изменением. Тогда предположение о постоянстве ДКЗ в течение месяца является не совсем корректным.

Заключение. В работе показано, что ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, но с точностью до неизвестной константы, а ПЭС, рассчитанное по дальностным измерениям, позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и дифференциальной кодовой задержкой аппаратуры спутника и приемника. Для решения этих проблем был разработан алгоритм оценки абсолютного ПЭС ионосферы, который может быть использован для одиночной приемной станции ГНСС. Дальнейшая работа может быть посвящена оценке точности, связанной с корректировкой фазовых измерений, улучшением точности алгоритма, адаптивным подбором параметров, тестированием алгоритма для работы с малыми космическими аппаратами (наноспутниками).

Список использованных источников

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере : пер. с англ. / К. Дэвис. – М. : Мир, 1973. – 504 с.
2. Ратклифф, Дж. А. Магнито-ионная теория и ее приложения к ионосфере : пер. с англ. / Дж. А. Ратклифф. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. – 248 с.
3. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. – Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
4. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М. : Физматлит, 2007. – 336 с.
5. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
6. Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. – N. Y. : Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
7. Variability of GPS/GLONASS differential code biases / A. A. Mylnikova [et al.] // Results in Physics. – 2015. – Vol. 5. – P. 9–10.
8. Kunitsyn, V. E. Ionospheric Tomography / V. E. Kunitsyn, E. D. Tereshenko. – Springer, 2003. – 272 p.

9. Atmospheric studies with the tri-band beacon instrument on the COSMIC constellation / P. Bernhardt [et al.] // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. – 2001. – Vol. 11, no. 1. – P. 291–312. [https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.1.291\(COSMIC\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.1.291(COSMIC))
10. Романов, А. А. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала / А. А. Романов, А. В. Новиков // *Вопросы электромеханики*. Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 111, № 4. – С. 31–36.
11. Ferreira, V. Study on cycle-slip detection and repair methods for a single dual-frequency global positioning system (GPS) / V. Ferreira, X. He, X. Tang // *Boletim de Ciencas*. – 2014. – Vol. 20, no. 4. – P. 984–1004.
12. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observation under high ionospheric activity / C. Cai [et al.] // *GPS Solutions*. – 2012. – Vol. 17, no. 2. – P. 247–260. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0275-7>
13. Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data / G. Blewitt // *Geophysical Research Letters*. – 1990. – Vol. 17, no. 3. – P. 199–202.
14. Goad, C. Precise positioning with the global positioning system / C. Goad // *Proceedings of the Third Intern. Symp. on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, Banff, 16–20 Sept. 1985*. – Banff, 1985. – P. 745–756.
15. Ya'acob, N. Determination of GPS total electron content using single layer model (SLM) ionospheric mapping function / N. Ya'acob, M. Abdullah, M. Ismail // *Intern. J. of Computer Science and Network Security*. – 2008. – Vol. 8, no. 9. – P. 154–160.

References

1. Davies K. *Ionospheric Radio Waves*. Blaisdell Publishing Company, 1969, 460 p.
2. Ratcliffe J. A. *The Magneto-Ionic Theory and its Applications to the Ionosphere*. Cambridge, University Press, 1959, 226 p.
3. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. GPS-monitoring verhej atmosfery Zemli. *GPS Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere*. Irkutsk, Gosudarstvennoe uchrezhdenie "Nauchnyj centr Vostochno-Sibirskogo nauchnogo centra Sibirskogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk", 2006, 480 p. (In Russ.).
4. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. Radiotomografija ionosfery. *Radio Tomography of the Ionosphere*. Moscow, Fizmatlit, 2007, 336 p. (In Russ.).
5. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kapliarchuk Y. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. *A method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of signals from the global navigation satellite system GPS*. *Informatika [Informatics]*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 7–27 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.
6. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. New York, Springer-Verlag Wien, 1992, 327 p.
7. Mylnikova A. A., Yasyukevich Yu. V., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10.
8. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D. *Ionospheric Tomography*. Springer, 2003, 272 p.
9. Bernhardt P., Selcher C., Basu S., Bust G., Reising S. Atmospheric studies with the tri-band beacon instrument on the COSMIC constellation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 291–312. [https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.1.291\(COSMIC\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.1.291(COSMIC))
10. Romanov A. A., Novikov A. V. *Measurement of the total electron content of the Earth's ionosphere using a multi-frequency coherent sounding signal*. *Voprosy jelektromehaniki. Trudy Nauchno-proizvodstvennogo predprijatija Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta jelektromehaniki [Questions of Electromechanics. Proceedings of the Research and Production Enterprise of the All-Russian Research Institute of Electromechanics]*, 2009, vol. 111, no. 4, pp. 31–36 (In Russ.).
11. Ferreira V., He X., Tang X. Study on cycle-slip detection and repair methods for a single dual-frequency global positioning system (GPS). *Boletim de Ciencas*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 984–1004.
12. Cai C., Liu Z., Xia P., Dai W. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observation under high ionospheric activity. *GPS Solutions*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 247–260. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0275-7>
13. Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 1990, vol. 17, no. 3, pp. 199–202.

14. Goad C. Precise positioning with the global positioning system. *Proceedings of the Third International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, Banff, 16–20 September 1985*. Banff, 1985, pp. 745–756.

15. Ya'acob N., Abdullah M., Ismail M. Determination of GPS total electron content using single layer model (SLM) ionospheric mapping function. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2008, vol. 8, no. 9, pp. 154–160.

Информация об авторе

Шапкин Александр Сергеевич, аспирант, лаборатория моделирования самоорганизующихся систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: shap1kin2@gmail.com,
al_shapkin@newman.bas-net.by
<https://orcid.org/0009-0009-4947-7313>
<https://www.researchgate.net/profile/Aliaksandr-Shapkin>

Information about the author

Aliaksandr S. Shapkin, Postgraduate Student, Laboratory of Self-organization System Modeling, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: shap1kin2@gmail.com,
al_shapkin@newman.bas-net.by
<https://orcid.org/0009-0009-4947-7313>
<https://www.researchgate.net/profile/Aliaksandr-Shapkin>