

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ
СПУТНИКОВОГО НАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА
В ЗАДАЧЕ ТРЕХМЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ**

Н. С. ТИТОВ, П. Н. НИКОЛАЕВ*

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, Самара, Россия
**nikolaev.pn@ssau.ru*

Аннотация. Рассмотрена задача трехмерной томографии верхней ионосферы по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, принимаемым на навигационном приемнике низкоорбитального спутника. Представлена методика предварительной обработки данных спутникового навигационного приемника, которая заключается в прогнозе координат центров масс низкоорбитального спутника и навигационных спутников, оценке полного электронного содержания ионосферы с последующей отбраковкой выбросов, а также в выборе области реконструкции. Методика апробирована на данных, полученных с навигационного приемника космического аппарата из группировки метеорологических спутников FormoSat-7/COSMIC-2. Результаты оценки полного электронного содержания позволяют применить алгоритм непрерывного решения задачи трехмерной томографии ионосферы, что, в свою очередь, позволяет оценить электронную концентрацию ионосферы в верхней ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, наноспутник, томография, псевдодальность, фазовые измерения, полное электронное содержание, COSMIC-2, GPS

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

Ссылка для цитирования: Титов Н. С., Николаев П. Н. Предварительная обработка данных спутникового навигационного приемника в задаче трехмерной томографии верхней ионосферы // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 576—584. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-576-584.

**PRELIMINARY PROCESSING
OF DATA FROM A SATELLITE NAVIGATION RECEIVER
IN THE PROBLEM OF THREE-DIMENSIONAL UPPER IONOSPHERE TOMOGRAPHY**

N. S. Titov, P. N. Nikolaev*

Samará University, Samara, Russia
**nikolaev.pn@ssau.ru*

Abstract. The problem of three-dimensional tomography of the upper ionosphere based on the signals of global navigation satellite systems obtained by the navigation receiver of a low-orbit satellite is considered. A method for preliminary processing of data from a satellite navigation receiver is presented, which consists in predicting the coordinates of the centers of mass of a low-orbiting satellite and navigation satellites, estimating the total electron content of the ionosphere with subsequent rejection of emissions, and also choosing a reconstruction area. The technique was tested with data obtained from the navigation receiver of the spacecraft from the FormoSat-7/COSMIC-2 meteorological satellite constellation. The results of the total electron content estimation make it possible to apply the algorithm for the continuous solution of the problem of three-dimensional tomography of the ionosphere, which, in turn, allows us to estimate the electron concentration of the ionosphere in the upper ionosphere.

Keywords: ionosphere, nanosatellite, tomography, pseudo-range, phases measurements, TEC, COSMIC-2, GPS

Acknowledgment: The work was carried out within the framework of the project 0777-2020-0018, financed from the funds of the state task for the winners of the competition of scientific laboratories of educational institutions of higher education, subordinated to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Titov N. S., Nikolaev P. N. Preliminary processing of data from a satellite navigation receiver in the problem of three-dimensional upper ionosphere tomography. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 7. P. 576—584 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-576-584.

* © Титов Н. С., Николаев П. Н., 2023

Введение. Ионосфера постоянно динамически изменяется под влиянием разнообразных факторов, таких как явления в магнитосфере и литосфере, события на Солнце и многие другие, и ни одна модель ионосферы не может полностью учесть эти факторы. Так, например, изменения в ионосфере могут служить предвестниками больших землетрясений, которые, согласно [1], появляются за 1—10 дней до землетрясения.

При прохождении радиосигнала через ионосферу формируется ионосферная задержка, которая описывается следующим выражением [2]:

$$\tau_p^{\text{ion}} = -k \frac{\text{ПЭС}}{f^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности; $\text{ПЭС} = \int_T^R N_e(s) ds$ — полное электронное содержание (ПЭС), здесь R и T — координаты соответственно приемника и передатчика; f — частота, Гц; N_e — электронная концентрация вдоль пути распространения радиосигнала.

Мониторинг ионосферы актуален в прикладном аспекте для прогнозирования условий распространения коротких волн в спутниковых системах навигации и связи [3]. Согласно Комитету по космическим исследованиям COSPAR, исследование ионосферы также актуально и в фундаментальном аспекте: текущий прогноз электронной плотности в высоком разрешении и краткосрочный прогноз на основе полученных данных, близких к реальному времени, уточнение результатов модели, близких к реальному времени, и общее состояние ионосферы [4].

В силу постоянной изменчивости ионосферы перспективным представляется ее исследование с помощью методов компьютерной томографии, что позволяет оперативно получать информацию об изменениях в ионосфере. На данный момент существуют три подхода к томографии ионосферы. Наиболее разработанный метод — использование цепочек наземных станций, принимающих сигналы от пролетающих над ними спутников, но недостатком данного метода является ограниченность расположения приемных станций [5, 6]. Также существует инновационный метод, разрабатываемый в корпорации „Российские космические системы“, с использованием низкоорбитальных (НО) группировок спутников, содержащих как приемники, так и передатчики, способные измерять ПЭС на трассах между спутниками [7]. Данный подход был подробно рассмотрен в статье [8], в которой авторами предложен быстрый алгоритм для определения возмущений в ионосфере. Существенным недостатком данного метода является дороговизна реализации из-за производства и запуска большого числа спутников для покрытия требуемой области. Приемлемым методом с точки зрения затрат на реализацию и покрытие значительной области является использование НО-спутников, способных принимать сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), что также позволяет проводить эксперименты, используя методы компьютерной томографии, базирующиеся на преобразовании Радона [9], в верхней области ионосферы и в плазмосфере. В этом случае возможно применение хорошо отработанных методов томографии ионосферы с использованием сигналов спутников ГНСС и наземных станций [10, 11].

Среди текущих миссий, исследующих ионосферу, выделяются такие, как полярно-орбитальные метеорологические спутники FormoSat-7/COSMIC-2 [12—14] и MetOp [15]. Также в ближайшее время планируется запуск российского космического комплекса „Ионозонд“ для мониторинга геофизической обстановки („космической погоды“) и решения широкого спектра задач: наблюдения за ионосферой и Солнцем и др. Космический комплекс „Ионозонд“ будет включать в себя четыре спутника „Ионосфера“ для наблюдения за ионосферой и один аппарат „Зонд“ для наблюдения за Солнцем [16].

Малое число функционирующих миссий в области исследования ионосферы определяет актуальность запуска малых спутников и наноспутников на низкие орбиты. В настоящей статье представлена методика формирования томографических данных в задаче трехмерной томографии верхней ионосферы Земли с помощью наноспутника, на котором установлен навигационный приемник. Первичную апробацию методики можно провести с уже существующими космическими аппаратами, например с помощью низкоорбитальной группировки спутников FormoSat-7/COSMIC-2.

Группировка спутников FormoSat-7. Группировка спутников FormoSat-7/COSMIC-2, состоящая из 12 микроспутников дистанционного зондирования для сбора атмосферных данных, данных для прогноза погоды и исследования ионосферы, климата и гравитации, является результатом совместной работы ученых Тайваня и США [14]. На данный момент первые 6 спутников группировки FormoSat-7/COSMIC-2 запущены на круговую орбиту высотой 720 км. После развертывания группировки спутников FormoSat-7 на орбите высотой 550 км с наклоном 24° все 6 спутников совершают оборот вокруг Земли примерно за 97 мин. Спутники имеют следующие номера в системе NORAD ID (каталог командования воздушно-космической обороны северной Америки): 44349, 44351, 44343, 44350, 44358, 44353.

На каждом из 6 спутников установлена следующая научная аппаратура [17]:

— навигационный приемник TriGNSS (TGRS), способный принимать переотраженные сигналы спутников ГНСС, находящихся как в прямой взаимной видимости между спутниками FormoSat-7 и спутниками ГНСС, так и вне ее;

— детектор скорости ионов (IVM), способный измерять температуру, скорость и концентрацию ионов на пути движения спутника FormoSat-7;

— радиомаяк RF Beacon (RFB), способный определять неравномерность концентрации электронов в ионосферном слое, сильно влияющем на стабильность передачи радиосигналов на Землю спутниками ГНСС и другими космическими аппаратами.

Используя „сырые“ измерения псевдодальностей и фаз, полученные с навигационных приемников, установленных на спутниках FormoSat-7, возможно определение абсолютного ПЭС на трассах между спутниками ГНСС и спутниками FormoSat-7.

Постановка задачи трехмерной томографии верхней ионосферы. Рассматривается использование наноспутника, запущенного на круговую солнечно-синхронную орбиту (ССО) с наклоном $97,5^\circ$ и апоцентром 550 км. На борту наноспутника в качестве полезной нагрузки служит двухчастотный навигационный приемник, способный принимать сигналы спутниковых систем ГЛОНАСС и/или GPS. Навигационный приемник выдает „сырые“ измерения на двух частотах таких величин, как псевдодальности и фазы несущего колебания. На основе обработки этих измерений оцениваются значения ПЭС, с помощью которых возможны трехмерная реконструкция электронной концентрации ионосферы и выявление ионосферных возмущений.

Томографическая реконструкция может быть проведена в областях, схематически изображенных на рис. 1, а. В область 1 входит верхняя ионосфера выше F слоя (до $H_{\text{ион}}=1000$ км), влияющая на распространение коротких радиоволн, и плазмосфера — область пространства вокруг Земли в диапазоне высот от 1000 до 20 000 км, на нижней границе которой происходит скачкообразное уменьшение концентрации плазмы. Область 2 включает нижнюю ионосферу ниже F слоя, особенностями которой являются быстрая изменчивость и значительное влияние на распространение средних и коротких радиоволн, отражающихся от этих слоев ионосферы. При этом данные могут накапливаться на интервалах порядка 15 мин, что соответствует периоду квазистационарности ионосферы. К данным, получаемым в этих областях за 15-минутный интервал, может быть применен описанный в монографии [18] алгоритм непрерывного решения задачи трехмерной томографии ионосферы с использованием естественных ортогональных функций.

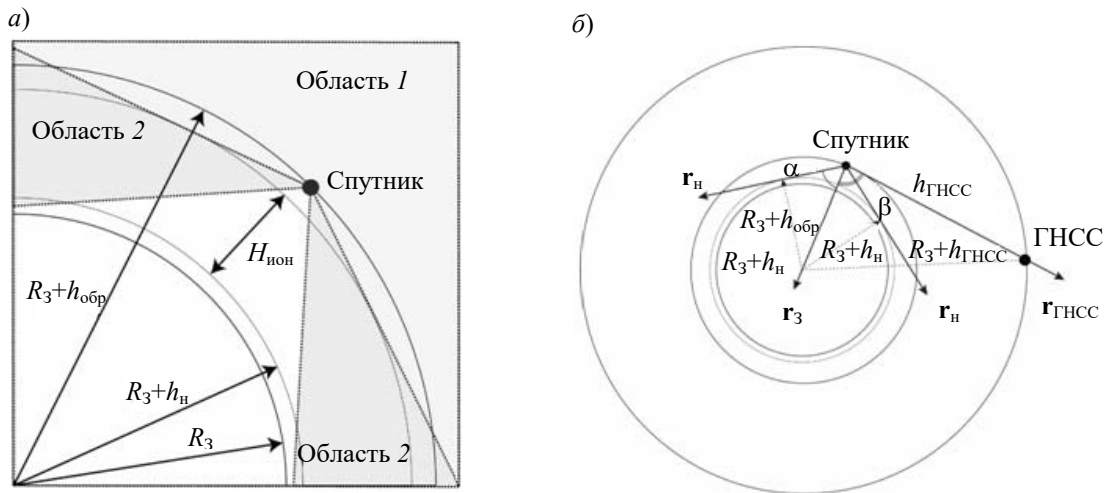


Рис. 1

Методика предварительной обработки данных спутникового навигационного приемника. Методика включает в себя следующие основные шаги.

1. Определение координат центров масс наноспутника и спутников ГНСС на выбранную эпоху в каждой точке исследуемого интервала.
2. Определение взаимной видимости наноспутника и спутников ГНСС на основании их взаимного положения исходя из условия $\beta \geq \alpha$, согласно геометрической схеме, представленной на рис. 1, б, где

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R_3 + h_n}{R_3 + h_{орб}}\right); \quad \beta = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_{ГНСС} \cdot \mathbf{r}_3}{|\mathbf{r}_{ГНСС}| \cdot |\mathbf{r}_3|}\right),$$

где $\mathbf{r}_н$ — вектор, направленный из центра масс НО-спутника к нижней границе исследования ионосферы; $\mathbf{r}_{ГНСС}$ — вектор, направленный из центра масс НО-спутника к центру масс спутника ГНСС; \mathbf{r}_3 — вектор, направленный из центра масс НО-спутника к центру масс Земли; R_3 — средний радиус Земли; $h_{орб}$ — высота орбиты НО-спутника; h_n — высота нижней границы исследования ионосферы; $h_{ГНСС}$ — высота орбиты спутника ГНСС.

3. Определение угла возвышения спутника ГНСС относительно горизонта наноспутника:

а) вычисляется радиус-вектор орбиты НО-наноспутника:

$$R = \sqrt{X_{НО}^2 + Y_{НО}^2 + Z_{НО}^2};$$

б) вычисляется проекция радиус-вектора орбиты НО-спутника на плоскость экватора:

$$R_g = \sqrt{X_{НО}^2 + Y_{НО}^2};$$

в) вычисляется матрица A_x :

$$A_x = \begin{pmatrix} -\frac{Y_{НО}}{R_g} & \frac{X_{НО}}{R_g} & 0 \\ -\frac{X_{НО}Z_{НО}}{R_g R} & \frac{Y_{НО}Z_{НО}}{R_g R} & \frac{R_g}{R} \\ \frac{X_{НО}}{R} & \frac{Y_{НО}}{R} & \frac{Z_{НО}}{R} \end{pmatrix};$$

г) вычисляется вектор b :

$$b = (X_{ГНСС} - X_{НО} \quad Y_{ГНСС} - Y_{НО} \quad Z_{ГНСС} - Z_{НО})^T;$$

д) вычисляется вектор x :

$$x = A_x b;$$

е) вычисляется угол возвышения γ :

$$\sin \gamma = \frac{x_3}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}, \quad \cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma};$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\pi}{2}, \text{ если } \sin \gamma = 1, \\ \gamma &= \arctg\left(\frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}\right). \end{aligned} \right\}$$

4. Извлечение из навигационного файла наноспутника значений псевдодальностей, фаз и времени и их отбраковка.

5. Вычисление значений ПЭС и их отбраковка [11]:

$$\text{ПЭС} = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(\Phi_1 - \Phi_2) + B_{rs}];$$

$$B_{rs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \left[(P_{2i}^{rs} - P_{1i}^{rs} + \text{DCB}^r + \text{DCB}_{12}^s) - (\Phi_{1i}^{rs} - \Phi_{2i}^{rs}) \right] / \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2},$$

где χ — коэффициент пропорциональности, равный $-40,3 \text{ м}^3/\text{с}^2$; $\Phi_1 = L_1 \lambda_1$ и $\Phi_2 = L_2 \lambda_2$ — фазовые задержки несущей для частот f_1 и f_2 соответственно; L_1 и L_2 — измерения несущей фазы; P_1 и P_2 — задержки псевдодальности для частот f_1 и f_2 соответственно; r — номер приемника ГНСС; s — номер спутника ГНСС; σ_i — среднеквадратическое отклонение (СКО) шума псевдодальности; DCB^r , DCB_{12}^s — смещения между двумя кодовыми измерениями сигналов ГНСС на разных частотах, обусловленные аппаратными ошибками приемника и передатчика.

6. Определение зависимости значений ПЭС от угла возвышения.

7. Анализ возможности решения задачи радиотомографии в выбранной области путем поиска пересечений радиотрасс в единичном объеме томографической реконструкции (вокселе). В первую очередь для этого необходимо определить геоцентрические координаты точки пересечения зондирующего луча с ионосферой. Для определения координат точки пересечения используются уравнение сферы с радиусом $R_3 + h_{\text{ион}}$, где $h_{\text{ион}}$ — высота исследуемого слоя ионосферы, и параметрическое уравнение прямой, проходящей через две точки — центры масс спутника ГНСС и НО наноспутника:

$$\left. \begin{aligned} X^2 + Y^2 + Z^2 &= (R_3 + h_{\text{ион}})^2; \\ X &= X_{\text{ГНСС}} + d(X_{\text{НО}} - X_{\text{ГНСС}}); \\ Y &= Y_{\text{ГНСС}} + d(Y_{\text{НО}} - Y_{\text{ГНСС}}); \\ Z &= Z_{\text{ГНСС}} + d(Z_{\text{НО}} - Z_{\text{ГНСС}}). \end{aligned} \right\}$$

Когда прямая пересекает сферу в двух точках, необходимо выбрать первую точку, удовлетворяющую следующему условию:

$$D_{\min} = \sqrt{(X_{\text{ГНСС}} - X_{\text{НО}})^2 + (Y_{\text{ГНСС}} - Y_{\text{НО}})^2 + (Z_{\text{ГНСС}} - Z_{\text{НО}})^2} \rightarrow \min.$$

На основании полученных географических координат точек пересечения строится карта проколов ионосферы. Область реконструкции характеризуется коэффициентом заполнения, означающим долю вокселей, через которые прошли зондирующие лучи (N_1), из общего числа вокселей (N) в исследуемой области:

$$K_f = N_1/N.$$

Для качественной реконструкции необходимо, чтобы коэффициент K_f был не менее 0,2 в желаемом высотном диапазоне.

Проверка методики. Для отработки и верификации разработанной методики использовались данные, полученные низкоорбитальной группировкой спутников COSMIC-2 по навигационным сигналам GPS спутников [19]. Эти данные изначально представлены в формате CompactRinex, подразумевающим сжатие по алгоритму Хатанаки [20]. Для определения угла возвышения спутников GPS относительно спутников FormoSat-7 использовались TLE файлы, обработанные с помощью модели SGP4 [21]. Прогноз движения центра масс осуществлялся с помощью метода численного интегрирования Рунге — Кутты 4-го порядка [22].

На рис. 2, а представлен пример полученной зависимости значений ПЭС от угла возвышения спутника GPS № 6 (NORAD ID 39741) относительно спутника FormoSat-7A (NORAD ID 44349), соответствующей трассе спутника GPS № 6 в географических координатах на 15-минутном временном интервале 14 января 2022 03:30-03:45 UTC (рис. 2, б).

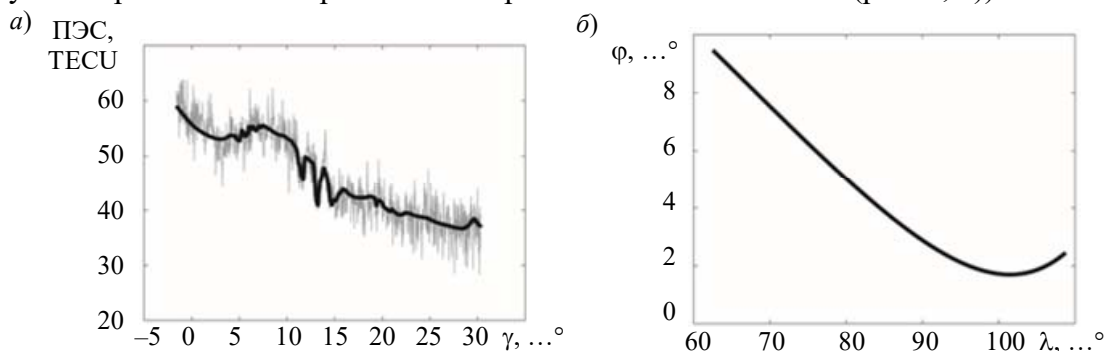


Рис. 2

На рис. 3 показаны пространственные срезы для фиксированной высоты H на 15-минутном временном интервале 14 января 2022 03:30-03:45 UTC, шкала интенсивности показывает число зондирующих лучей, прошедших через воксел. При увеличении числа видимых навигационных спутников облако пересекаемых вокселей будет плотнее близ вершины конуса видимости (на высотах, стремящихся к высоте орбиты НО-спутника). Для этих данных были рассчитаны коэффициенты заполнения в трех различных областях реконструкции. Наибольшая область лежит в диапазоне от 60 до 120° по долготе и от -30 до 30° по широте; средняя область лежит в диапазоне от -70 до 110° по широте и от -20 до 20° по долготе; наименьшая область — в диапазоне от 80 до 100° по широте и от -10 до 10° по долготе (рис. 4).

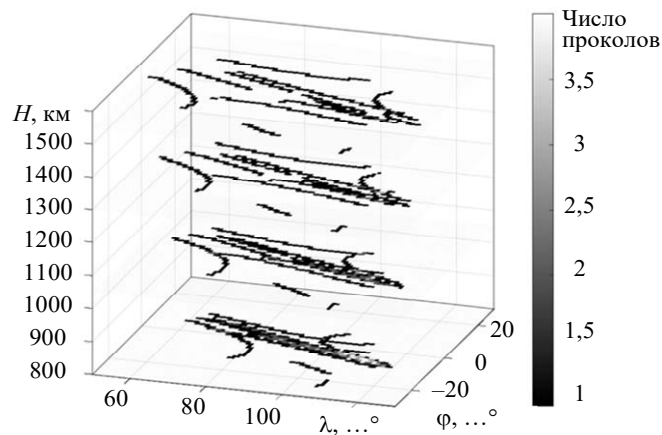


Рис. 3

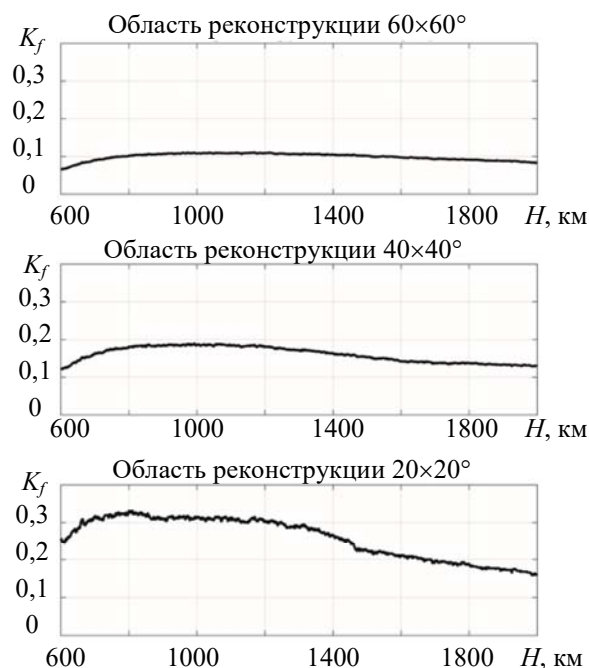


Рис. 4

Соответственно, с учетом точности алгоритма непрерывного решения задачи трехмерной томографии ионосферы [18], ожидаемая средняя ошибка реконструкции для вариантов области реконструкции $60 \times 60^\circ$ и $40 \times 40^\circ$ составляет более 30 %, а для варианта области реконструкции $20 \times 20^\circ$ — порядка 15 %.

Заключение. Разработана методика по формированию и анализу полного электронного содержания для проведения радиотомографического эксперимента с использованием НО-спутника, способного принимать навигационные сигналы спутников ГНСС. С уменьшением области реконструкции увеличивается облако пересекаемых вокселей, что позволяет более точно реконструировать исследуемую область. Так, в локальной области реконструкции $20 \times 20^\circ$ ожидаемая точность алгоритма непрерывного решения задачи трехмерной томографии ионосферы составляет порядка 15 %. Дальнейшее комплексное моделирование позволит лучше оценить точность решения трехмерной задачи томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parrot M., Tramutoli V., Liu T. J. Y. et al. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena associated with large earthquakes // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2021. N 230. P. 197—225. DOI: 10.1140/epjst/e2020-000251-3.
2. Petit G., Luzum B. IERS Technical Note No. [Электронный ресурс]: <<http://www.iers.org>>, 15.02.2022.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. N. Y.: Springer Verlag Wien, 2001. 382 p.
4. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D. et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015—2025 commissioned by COSPAR and ILWS // Adv. Space Res. 2015. N 55 (12). P. 2745—2807. DOI: 10.1016/j.asr.2015.03.023.
5. Leitingner R., Schmidt G., Tauriainen A. An evolution method combining the differential doppler measurements from two stations and enables the calculation of the electron content of the ionosphere // J. Geophys. 1975. N 41 (1). P. 201—213.
6. Солодовников Г. К., Синельников В. М., Крохмальников Е. Б. Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов. М.: Наука, 1988. 191 с.
7. Романов А. А., Новиков А. В. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала // Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2009. Т. 111, № 4. С. 31—36.

8. Nikolaev P., Filonin O., Belokonov I. Rapid filtered back-projection algorithm in 2D ionospheric radio tomography using satellite-to-satellite measurements // *Adv. Space Res.* 2021. N 68 (10). P. 4167—4188. DOI: 10.1016/j.asr.2021.07.042.
9. Radon J. On the Determination of Functions from Their Integral Values along Certain Manifolds // *IEEE Trans. Med. Imaging.* 1986. N 5(4). P. 170—176.
10. Алтатов В. В., Куницын В. Е., Лапшин В. Б., Романов А. А., Тасенко С. В. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы // *Гелиогеофизические исследования.* 2012. Вып. 2. С. 60—71.
11. Aleshin I. M., Alpatov V. V., Vasil'ev A. E. et al. Online service for monitoring the ionosphere based on data from the global navigation satellite system // *Geomag. Aeron.* 2014. N 54 (4). P. 456—462. DOI: 10.1134/S0016793214040094.
12. Yen N. L., Fong C.-J., Chang G. S. Approaching the First Global Radio Occultation Operational Mission Using Constellation LEO Satellites // *EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.* 2012. 9 p.
13. FormoSat-3. eoPortal Directory [Электронный ресурс]: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-3>>, 15.02.2022.
14. FormoSat-7. eoPortal Directory [Электронный ресурс]: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-7>>, 15.02.2022.
15. MetOp. eoPortal Directory [Электронный ресурс]: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/metop>>, 15.02.2022.
16. Ионозонд, Институт космических исследований Российской академии наук [Электронный ресурс]: <<https://iki.cosmos.ru/missions/ionozond>>, 15.02.2022.
17. FORMOSAT-7. National Space Organization [Электронный ресурс]: <<https://www.nspo.narl.org.tw>>, 15.02.2022.
18. Романов А. А., Романов А. А., Трусов С. В., Урличич Ю. М. Спутниковая радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 296 с.
19. UCAR COSMIC Program, 2019: COSMIC-2 Data Products [Data set]. UCAR/NCAR - COSMIC [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.5065/T353-C093>>, 15.02.2022.
20. Hatanaka Y. A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data // *Bull. of the Geographical Survey Institute.* 2008. N 55.
21. Hoots F. R., Roehrich R. L. Models for Propagation of NORAD Element Sets // *Spacetrack Report.* 1980. N 3. 91 p.
22. Press W. H. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing.* Cambridge Univ. Press, 2007.

Сведения об авторах

Никита Сергеевич Титов

— Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований, НИЛ-102 „Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников“; инженер-программист; E-mail: titov.ns@ssau.ru

Петр Николаевич Николаев

— канд. физ.-мат. наук; Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований, НИЛ-102 „Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников“; ст. науч. сотрудник; E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Поступила в редакцию 11.02.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2023; принята к публикации 31.05.2023.

REFERENCES

1. Parrot M., Tramutoli V., Liu T.J.Y. et al. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2021, vol. 230, pp. 197–225, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000251-3>.
2. Petit G., Luzum B. *IERS Technical Note*, <http://www.iers.org>.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*, NY, Springer Verlag, 2001, 382 p.

4. Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D. et al. *Adv. Space Res.*, 2015, no. 12(55), pp. 2745–2807, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>.
5. Leitinger R., Schmidt G., Tauriainen A. *J. Geophys.*, 1975, no. 1(41), pp. 201–213.
6. Solodovnikov G.K., Sinelnikov V.M., Krokhmalnikov E.B. *Distantionnoye zondirovaniye ionosfery Zemli s ispol'zovaniyem radiomayakov kosmicheskikh apparatov* (Remote Sensing of the Earth's Ionosphere Using Radio Beacons of Space Vehicles), Moscow, 1988, 191 p. (in Russ.)
7. Romanov A.A., Trusov S.V., Novikov A.V., Ajalova A.V., Selin V.A. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*, 2009, no. 4(111), pp. 31–36. (in Russ.)
8. Nikolaev P., Filonin O., Belokonov I. *Adv. Space Res.*, 2021, no. 10(68), pp. 4167–4188, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.042>.
9. Radon J. *IEEE Trans Med Imaging.*, 1986, no. 4(5), pp. 170–176.
10. Alpatov V.V., Kunitsyn V.E., Lapshin V.B., Romanov A.A., Tassenko S.V. *Heliogeophysical research*, 2012, no. 2, pp. 60–71. (in Russ.)
11. Aleshin I.M., Alpatov V.V., Vasil'ev A.E. et al. *Geomag. Aeron.*, 2014, no. 4(54), pp. 456–462, <https://doi.org/10.1134/S0016793214040094>.
12. Yen N.L., Fong C.-J., Chang G.S. *2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 2012, 9 p.
13. *FormoSat-3. eoPortal Directory*, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-3>
14. *FormoSat-7. eoPortal Directory*, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-7>.
15. *MetOp. eoPortal Directory*, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/metop>.
16. <https://iki.cosmos.ru/missions/ionozond>. (in Russ.)
17. *FORMOSAT-7. National Space Organization*, <https://www.nspo.narl.org.tw>.
18. Romanov A.A., Romanov A.A., Trusov S.V., Urlichich Yu.M. *Sputnikovaya radiotomografiya ionosfery* (Satellite Radiotomography of the Ionosphere), Moscow, 2013, 296 p. (in Russ.)
19. *UCAR COSMIC Program, 2019: COSMIC-2 Data Products [Data set]*. UCAR/NCAR - COSMIC, <https://doi.org/10.5065/T353-C093>.
20. Hatanaka Y. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 2008, vol. 55.
21. Hoots F.R., Roehrich R.L. *Spacetrack report*, 1980, no. 3, 91 p.
22. Press W.H. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, NY, Cambridge University Press, 2007.

Data on authors

- Nikita S. Titov** — Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102 for Perspective Fundamental and Applied Space Research Based on Nanosatellites; Engineer-Programmer; E-mail: titov.ns@ssau.ru
- Pyotr N. Nikolaev** — PhD; Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102 for Perspective Fundamental and Applied Space Research Based on Nanosatellites; Senior Researcher; E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Received 11.02.2023; approved after reviewing 03.03.2023; accepted for publication 31.05.2023.