
„НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ И МАЛЫХ СПУТНИКАХ“

По материалам IV Международной конференции,
сентябрь 2018 г., Самара

УДК 550.388.2; 551.510.413.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-462-469

АЛГОРИТМ СВЕРТКИ КАК МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ В ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВ

О. В. ФИЛОНИН, П. Н. НИКОЛАЕВ

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(Самарский университет),
443086, Самара, Россия
E-mail: pnikolayev@gmail.com*

Рассматривается задача восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников, решение которой позволит производить оперативный мониторинг состояния ионосферы. Для решения задачи предложен метод томографической реконструкции двумерного распределения электронной концентрации, основанный на алгоритме свертки. Метод состоит из трех этапов: формирование начального приближения электронной концентрации; доопределение недостающих проекционных данных в радоновском образе по априорной информации о его форме; использование известного алгоритма свертки. Произведен анализ точности предложенного метода по результатам статистического моделирования. Произведена оценка качества восстановления небольших локальных возмущений.

Ключевые слова: *томография ионосферы, прекурсоры землетрясений, метод свертки, спутниковый мониторинг, статистическое моделирование*

Введение. Мониторинг электронной концентрации ионосферы осуществляется посредством оценки полного электронного содержания (ПЭС), которое представляет собой интеграл электронной концентрации по пути распространения электромагнитной волны и выражается в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл} \cdot \text{м}^{-2}$). Линейный интеграл от функции распределения $f(x, y)$ вдоль прямой, находящейся на расстоянии l от начала координат и составляющей угол θ с положительным направлением оси OX , соответствует радоновскому образу в точке (l, θ) :

$$[\tilde{R}f](l, \theta) = p(l, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - l) dx dy.$$

Решение задачи томографии, которая является обратной, заключается в нахождении оценки $f^*(x, y)$ функции $f(x, y)$ из радоновского образа $[\tilde{R}f]$.

В работе [1] рассмотрены основные томографические методы оценки $f^*(x, y)$ в задаче радиотомографии ионосферы. Эта группа методов, согласно [2], называется методами, основанными на разложении функции в ряд. Преимущество этих методов заключается в том, что они применимы к более общим схемам регистрации данных, когда количество ракурсов получения линейных интегралов мало.

Ионосфера способна „отражать“ геофизические события; так, в работе [3] описывается связь изменений в ионосфере с землетрясениями. В случае появления предвестника землетрясения (ионосферное возмущение) в ионосфере важно вовремя его обнаружить — согласно [3] они появляются за 1—10 дней до землетрясения. Это обуславливает необходимость использования приемных и передающих устройств на спутниках группировки, расположенных в одной орбитальной плоскости. Кроме того, актуальна разработка специализированных, обладающих простотой и быстродействием методов, которые позволят решать задачу томографии на борту спутника, что обеспечит раннее обнаружение предвестника землетрясения и соответственно более раннюю разработку комплекса мер по предотвращению его последствий.

Методы, основанные на разложении функции в ряд, неприменимы для использования на борту спутников, поскольку требуют большого объема вычислений. В случае решения задачи томографии на борту можно обратиться к алгоритмам, основанным на разрешении обратной к $[\tilde{R}f]$ функции $[\tilde{R}^{-1}p] = f$, которые называются группой алгоритмов, основанных на использовании преобразований. Применение таких алгоритмов приводит к эффективной реконструкции при сравнительно небольших вычислительных затратах, но при этом предполагается, что известно точное значение $p(l, \theta)$ для всех l и θ . Другими словами, для решения задачи томографии с помощью данной группы алгоритмов требуется набор интегральных характеристик, полученных под всевозможными ракурсами, что не выполняется в задаче радиотомографии ионосферы с помощью спутников.

В настоящей статье для оперативного восстановления электронной концентрации ионосферы в глобальном масштабе предлагается применение метода свертки, относящегося к группе алгоритмов, основанных на использовании преобразований. Недостаток ракурсов при использовании данного метода компенсируется априорной информацией о форме ионосферного профиля. Томографическая реконструкция будет производиться во всей плоскости орбиты с использованием измерений ПЭС на межспутниковых трассах.

Постановка задачи. Рассмотрим группировку спутников, геометрия которой предложена в работе [4]. Высота орбиты спутников составляет $h_{orb} = 1000$ км. Область реконструкции ограничена диапазоном высот $H \in [200; 500]$ км, выбор которого обусловлен тем, что слой максимальной концентрации, отображающий воздействия как природного, так и антропогенного характера, в подавляющем большинстве случаев лежит в границах этого диапазона.

Выбор количества спутников в группировке зависит от требуемого высотного разрешения реконструкции, например, для решения томографической задачи в диапазоне H с разрешением $\Delta h = 50$ км потребуется 5 спутников: 3 спутника с передатчиками ($T_1—T_3$) и 2 с приемниками (R_1, R_2), что обеспечит покрытие диапазона с шагом Δh . Выбранный шаг реконструкции позволяет не учитывать рефракцию и рассматривать межспутниковую радиотрассу к прямую линию. На рис. 1 показано расположение радиотрасс для группировки в прямоугольной (а) и полярной (б) системах координат; здесь по осям отложено расстояние от центра Земли (r), а по оси абсцисс (рис. 1, б) — географическая широта (φ).

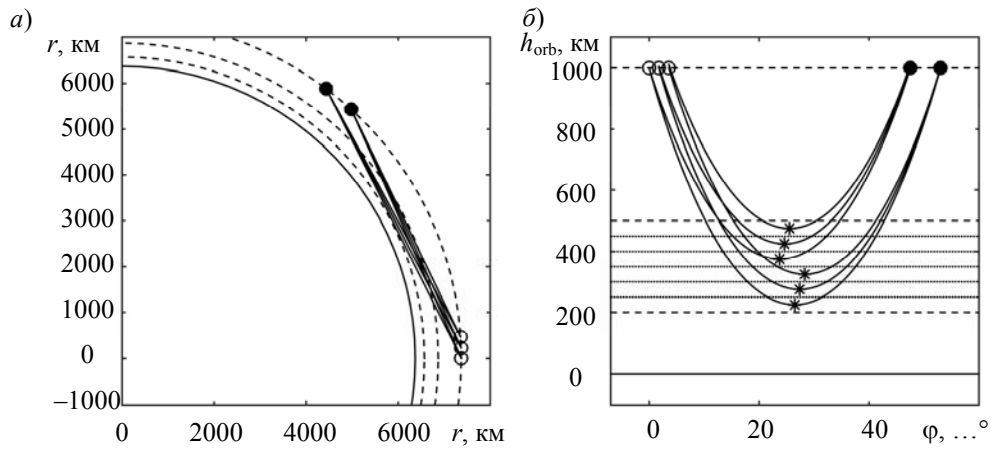


Рис. 1

Для покрытия диапазона высот ионосферы $H \in [200; 500]$ км с шагом $\Delta h = 50$ км рассчитаны угловые координаты спутников, представленные в таблице.

Спутник	T ₁	T ₂	T ₃	R ₁	R ₂
Угловое расстояние, ...°	0	1,75	3,57	47,5	53

Схема регистрации данных абсолютного ПЭС группировкой спутников не позволяет получить радоновский образ профиля электронной концентрации во всей области его определения, так как координата l радоновского образа определена в диапазонах $-E_{top} < l < -E_{down}$ и $E_{down} < l < E_{top}$, где $E_{down} = R_{Earth} + 200$ км, $E_{top} = R_{Earth} + 500$ км, R_{Earth} — средний радиус Земли.

Для решения задачи восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников с помощью алгоритма, основанного на использовании преобразований, необходимо последовательно решить следующие задачи:

- формирование начального приближения профиля электронной концентрации в плоскости орбиты группировки спутников с использованием измерений ПЭС [5];
- допределение недостающих данных в радоновском образе с использованием априорной информации о его виде [5];
- восстановление электронной концентрации методом свертки.

Восстановление распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием группировки спутников. Точность восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников определяется на основе численного моделирования, для чего последовательно решаются прямая и обратная задачи. Прямая задача заключается в расчете абсолютного ПЭС по имеющемуся набору радиотрасс зондирующих сигналов для заданного по динамической модели распределения электронной концентрации в плоскости орбиты. Обратная задача состоит в реконструкции распределения электронной концентрации в узлах сетки по имеющемуся набору измерений абсолютного ПЭС.

Проведено численное моделирование распределения электронной концентрации в плоскости полярной орбиты (10 000 экспериментов). Распределение задавалось с помощью динамической модели ионосферы NeQuick [6]: размер элемента изображения по вертикали — 12,5 км; размер элемента изображения по горизонтали — 50 км. Частота регистрации данных 10 Гц. Остальные параметры модели распределялись по равномерному закону: индекс солнечной активности $F_{10.7} \in [63,7; 193] \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²·Гц⁻¹; месяц $m \in [1, 12]$; время по Гринвичу $t \in (0:00; 24:00]$ UTC; географическая широта (долгота восходящего узла орбиты)

$\lambda \in (0; 360]^\circ$. Разброс параметров модели NeQuick обуславливает разброс ошибок решения задачи томографии.

В работе [5] предложен метод оперативного формирования начального приближения профиля электронной концентрации в плоскости орбиты группировки спутников с использованием измерений ПЭС. Такой подход применим к случаю получения интегральных характеристик приемопередающими устройствами группировки спутников, расположенных в одной орбитальной плоскости.

В настоящей статье используется вариант алгоритма формирования начального приближения при высоте максимума ионизации, принятой постоянной, и высоте перигея радиотрассы зондирующего сигнала, равной 225 км. На рис. 2, а, б представлены гистограммы ошибок формирования начального приближения в метриках l^2 и l^∞ для 10 000 модельных вариантов распределения электронной концентрации.

На рис. 2, в приведен пример одной из реализаций распределения электронной концентрации, сформированной по модели NeQuick для следующих условий: $F_{10.7} = 127,6 \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$, октябрь, $t = 10:00 \text{ UTC}$, $\lambda = 50^\circ$; на рис. 2, г — начальное приближение, сформированное для соответствующей реализации модельного распределения.

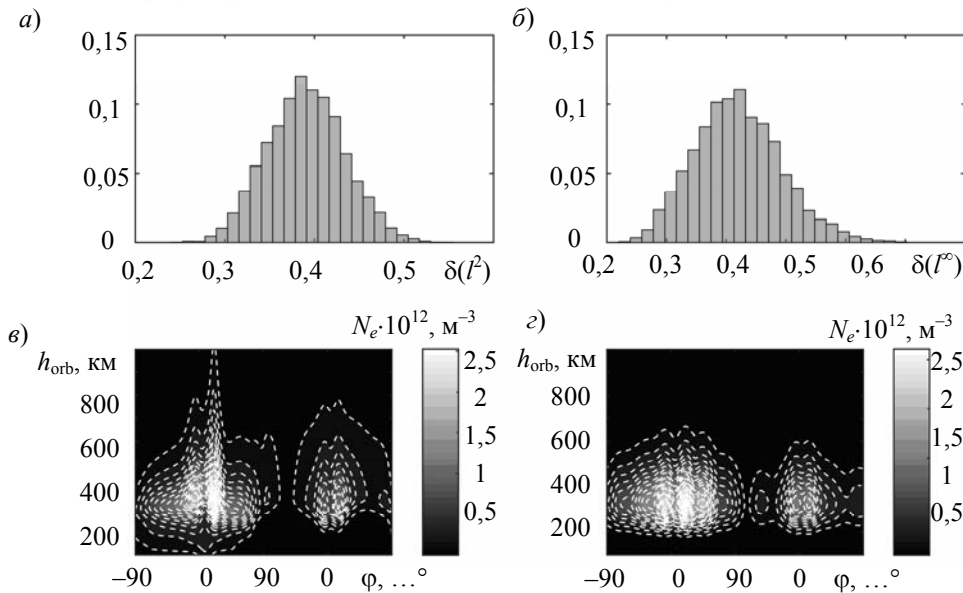


Рис. 2

В работе [5] было рассмотрено формирование радоновского образа с использованием начального приближения. С помощью этого алгоритма радоновский образ $p(l, \theta)$ доопределяется во всей требуемой области задания l : $-E < l < E$. В настоящей работе посредством этого алгоритма получены гистограммы распределения ошибок доопределения радоновского образа в метриках l^2 и l^∞ для 10 000 вариантов сформированного начального приближения (рис. 3, а, б); на рис. 3, в представлен результат доопределения радоновского образа для модельного распределения, приведенного на рис. 2, в.

На третьем этапе восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников производится методом свертки [7]:

$$f^*(r, \varphi) = [Bp_\theta^w](r, \varphi),$$

где $[Bt](r, \varphi) = \int_0^\pi t(r \cdot \cos(\theta - \varphi), \theta) d\theta$ — оператор обратного проецирования;

$p_\theta^w(l) = (p_\theta \otimes w)(l)$ — свертка проекции $p_\theta(l)$ и ядра $w(l)$.

В качестве ядра свертки $w(l)$ использовалось ядро Рамачандрана — Лакшминараянана [8]:

$$w(l) = \frac{w_0^2 \sin(\pi l w_0)}{2\pi l w_0} \frac{w_0^2 \sin^2(\pi l w_0)}{4(\pi l w_0)^2},$$

где w_0 — ширина полосы пропускания.

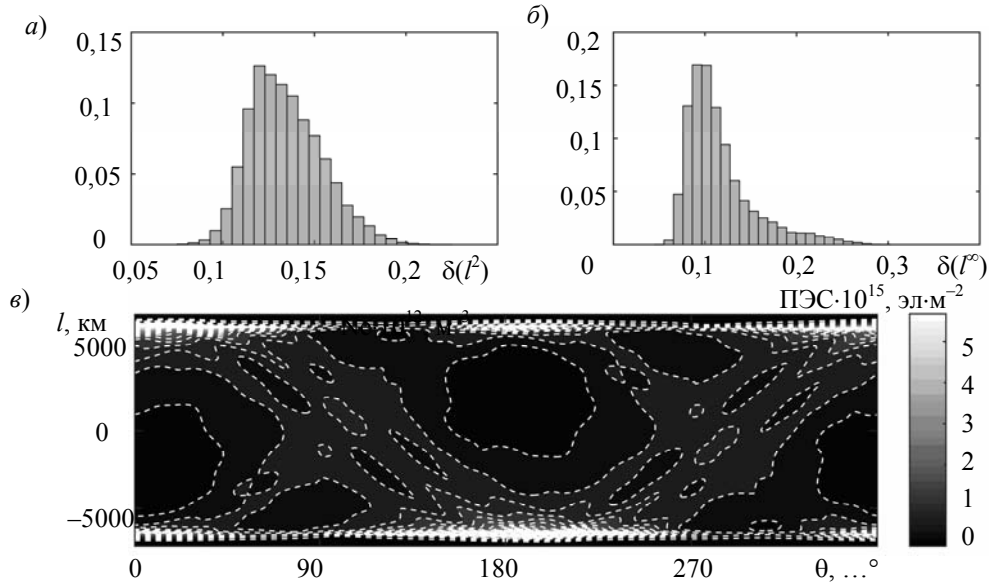


Рис. 3

На рис. 4, а, б представлены гистограммы ошибок решения задачи томографии в метриках l^2 и l^∞ для 10 000 модельных вариантов распределения электронной концентрации; на рис. 4, в — результат решения задачи томографии для модельного распределения, приведенного на рис. 2, в; 4, г — модуль невязки.

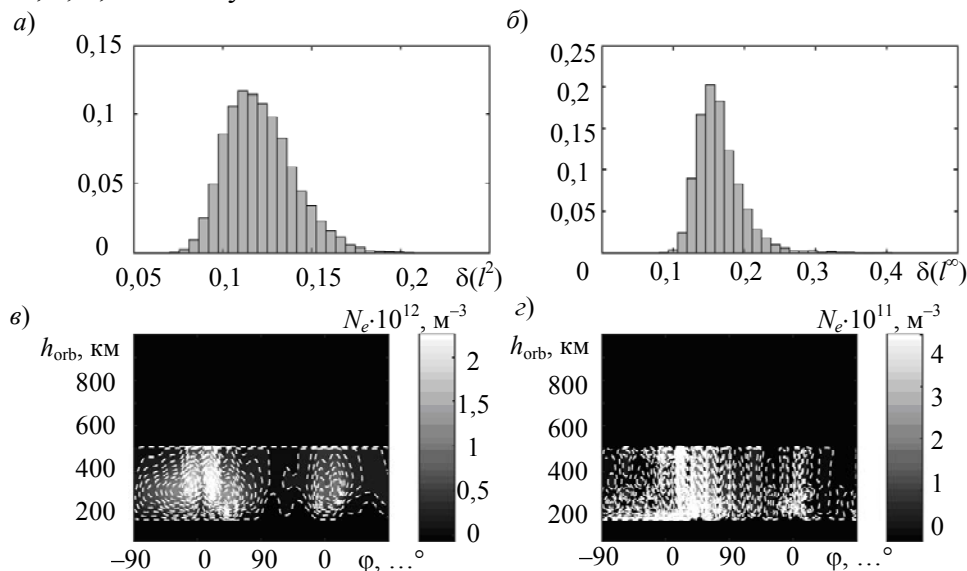


Рис. 4

В работе [4] была решена задача томографии для группировки спутников (см. рис. 1, а) алгебраическим методом реконструкции. При несоответствии начального приближения реконструируемому профилю, составляющему от 5 до 30 %, ошибки в метрике l^2 лежат в диапазоне от 6 до 11 %, а ошибка в метрике l^∞ является постоянной и составляет $\delta(l^\infty) = 0,21$. Ошибки в метрике l^2 для рассматриваемого в настоящей статье метода лежат в диапазоне от 8 до 20 %, что хуже, чем в работе [4], но несоответствие начального приближения, исполь-

зуемого в данном методе, составляет от 20 до 70 %. Из этого следует, что предложенный метод позволяет использовать худшее начальное приближение по сравнению с методом реконструкции, приведенным в [4].

Благодаря достигнутой точности решения задачи томографии, рассматриваемый подход может быть использован для выявления локальных возмущений в ионосфере.

Выявление ионосферного предвестника землетрясения. Статистический анализ данных наземных и спутниковых измерений свидетельствует, что аномальные возмущения в ионосфере появляются за несколько суток—часов до землетрясений. В монографии [3] рассматривается применение метода распознавания образов для выявления подобного рода предвестников. Отклонение значения вертикального ПЭС от фонового значения при этом составляет 40—60 %.

Для выявления аномалий в ионосферном профиле целесообразно сравнить текущие значения реконструируемого профиля $f^*(x, y)$ с фоновым, в качестве которого можно использовать скользящее среднее с диапазоном окна 10—15 дней. Отклонение текущего рассчитанного профиля $f^*(x, y)$ от скользящего фонового значения $f^*_{\text{cp}}(x, y)$ оценивается по формуле

$$df^*(x, y) = \frac{f^*(x, y) - f^*_{\text{cp}}(x, y)}{\|f^*_{\text{cp}}(x, y)\|} \cdot 100 \%$$

Рассмотрим два крайних случая из представленных выше 10 000 экспериментов, ошибки формирования начального приближения в которых составляют $\delta(l^\infty) = 0,25$ и $\delta(l^\infty) = 0,65$. Модели сформированы для следующих условий: $F_{10.7} = 127,6 \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ и $F_{10.7} = 108,0 \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$; октябрь и август; $t = 10:00 \text{ UTC}$ и $t = 01:00 \text{ UTC}$; $\lambda = 50^\circ$ и $\lambda = 140^\circ$. К этим модельным распределениям были добавлены положительные неоднородности в виде функций Гаусса, среднеквадратические отклонения которых составляют 200 км по широте и 75 км по высоте. Каждая неоднородность примерно в 2,5 раза выше уровня концентрации области, в которой она расположена. Использованные параметры задания неоднородностей соответствуют 50 %-ному отклонению вертикального ПЭС от фонового значения. Чтобы реконструируемые неоднородности были визуально различимы, распределения, представленные на рис. 5, а—г, ограничены одним полушарием; на рис. 5, в, г приведены соответствующие этим распределениям результаты решения задачи томографии.

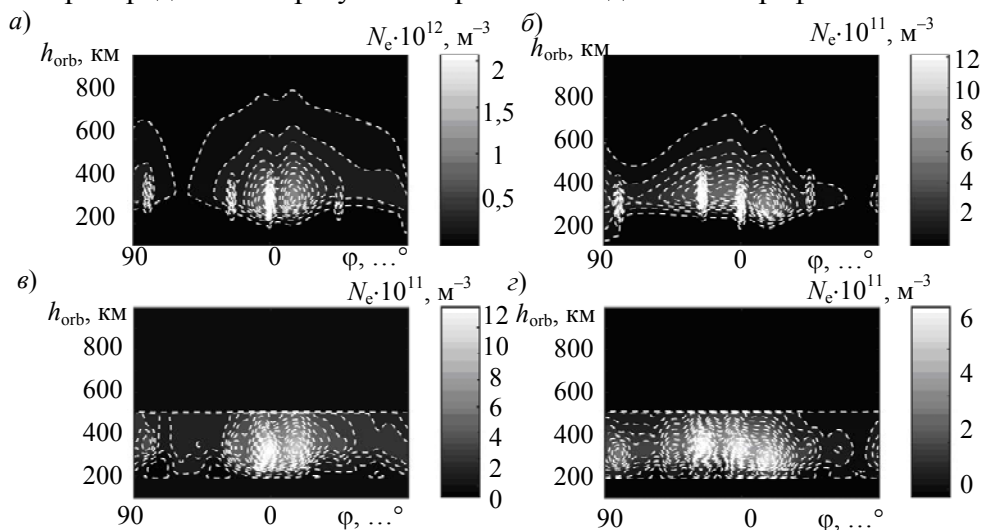


Рис. 5

На рис. 6, а, б показаны отклонения $df^*(x, y)$ реконструированных профилей $f^*(x, y)$, содержащих ионосферные возмущения, от 15-дневного скользящего среднего $f^*_{cp}(x, y)$. Значения $df^*(x, y)$, превышающие уровень в 100 %, соответствуют искомым возмущениям. Не удалось различить лишь одну неоднородность на рис. 6, а. Возмущения, находящиеся ниже уровня 100 %, вызваны ошибкой метода.

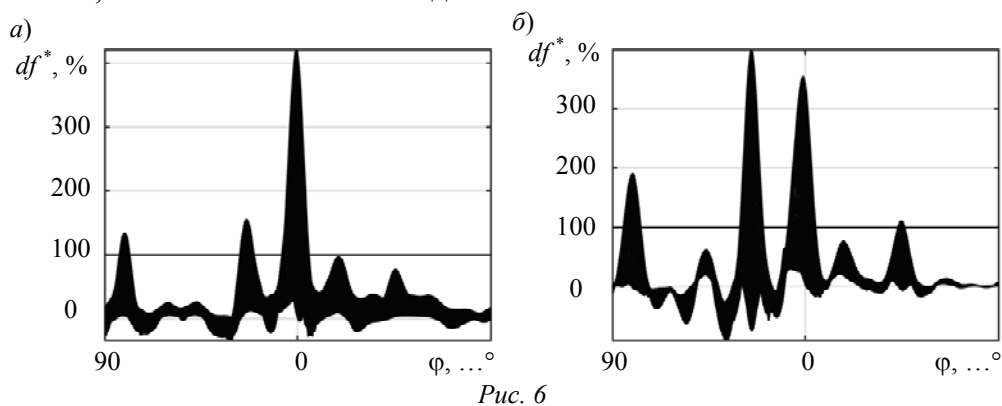


Рис. 6

Заключение. С помощью статистического моделирования проведен анализ точности метода восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников, основанного на алгоритме свертки. Предложенный метод позволяет использовать несоответствие начального приближения порядка 70 %, обладает хорошей точностью и высоким быстродействием и может быть использован для решения задачи томографии на борту спутника совместно с алгоритмом формирования начального приближения.

Произведена оценка качества восстановления локальных возмущений в ионосфере. Рассмотренный метод позволяет выявить ионосферные возмущения путем сравнения получаемых томограмм со скользящим средним полученных ранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 316 с.
2. Herman G. T. Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections. London: Springer-Verlag Lim., 2009. 297 p.
3. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И. Прогноз землетрясений возможен?! М.: Троянт, 2014. 144 с.
4. Романов А. А., Трусов С. В., Урличич Ю. М. Спутниковая радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 296 с.
5. Николаев П. Н. Метод реконструкции электронной концентрации в ионосфере по схеме регистрации данных спутник — спутник // 15-я конф. молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“: Сб. тр. / Под ред. А. М. Садовского. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 73—80.
6. Giovanni G. Di., Radicella S. M. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Advances in Space Research. 1990. Vol. 10, N 11. P. 27—30.
7. Bracewell R. N., Riddle A. C. Inversion of fanbeam scans in radio astronomy // Astrophys. J. 1975. Vol. 150. P. 427—434.
8. Ramachandran G. N. V, Lakshminarayanan A. V. Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolutions instead of Fourier transform // Proc. Natl. Acad. Science. USA. 1971. Vol. 68. P. 2236—2240.

Сведения об авторах

Олег Васильевич Филонин

— д-р техн. наук, профессор; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований, E-mail: phylonin@gmail.com

Петр Николаевич Николаев

— аспирант; Самарский университет; межвузовская кафедра космических исследований; E-mail: pnikolayev@gmail.com

Поступила в редакцию
07.12.18 г.

Ссылка для цитирования: Филонин О. В., Николаев П. Н. Алгоритм свертки как метод восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 5. С. 462—469.

CONVOLUTION ALGORITHM AS THE METHOD FOR RECONSTRUCTION OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN THE SATELLITE CONSTELLATION ORBITAL PLANE

O. V. Philonin, P. N. Nikolaev

Samara National Research University, 443086, Samara, Russia
E-mail: pnikolayev@gmail.com

The problem of reconstructing the two-dimensional distribution of electron concentration of the ionosphere in the plane of the orbit of a cluster of satellites is considered. Solution to the problem is believed to allow for an operative monitoring of the ionosphere state. To solve the problem, a method of tomographic reconstruction of two-dimensional electron density distribution based on the convolution algorithm is proposed. The method includes three stages: formation of an initial approximation to the electron concentration; redefining the missing projection data in the radon image of a priori information about its form; application of the known convolution algorithm. Accuracy of the proposed method is analyzed using results of statistical modeling. The quality of recovery of small local disturbances is estimated.

Keywords: ionosphere tomography, earthquake precursors, convolution method, satellite monitoring, statistical modeling

REFERENCES

1. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreyeva E.S. *Radiotomografiya ionosfery* (Radiotomography of the Ionosphere), Moscow, 2007, 336 p. (in Russ.)
2. Herman G.T. *Fundamentals of Computerized Tomography. Image Reconstruction from Projections*, London, Springer-Verlag Lim., 2009, 297 p.
3. Pulinets S.A., Uzunov D.P., Davidenko D.V., Dudkin S.A., Tsadikovskiy Ye.I. *Prognoz zemletryaseniy vozmozhen?!* (Earthquake Forecast Possible?!), Moscow, 2014, 144 p. (in Russ.)
4. Romanov A.A., Trusov S.V., Urlichich Yu.M. *Sputnikovaya radiotomografiya ionosfery* (Satellite Radio Tomography of the Ionosphere), Moscow, 2013, 296 p. (in Russ.)
5. Nikolayev P.N. *Fundamental'nyye i prikladnyye kosmicheskiye issledovaniya* (Fundamental and Applied Space Research), The 15th Conference of Young Scientists, Moscow, 2018, pp. 73–80. (in Russ.)
6. Giovanni G.Di., Radicella S.M. *Advances in Space Research*, 1990, no. 11(10), pp. 27–30.
7. Bracewell R.N., Riddle A.C. *Astrophys. J.*, 1975, vol. 150, pp. 427–434.
8. Ramachandran G.N.V., Lakshminarayanan A.V. *Proc. Natl. Acad. Science.*, USA, 1971, vol. 68, pp. 2236–2240.

Data on authors

Oleg V. Philonin

— Dr. Sci., Professor; Samara University; Interuniversity Department of Space Research, E-mail: phylonin@gmail.com

Petr N. Nikolaev

— Post-Graduate Student; Samara University; Interuniversity Department of Space Research; E-mail: pnikolayev@gmail.com

For citation: Philonin O. V., Nikolaev P. N. Convolution algorithm as the method for reconstruction of two-dimensional electron density distribution in the satellite constellation orbital plane. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 5. P. 462—469 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-462-469