

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ГРУППИРОВКОЙ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

© 2016 О. В. Филонин, П. Н. Николаев

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Существующие радиолокационные средства исследования ионосферы и ионозонды позволяют проводить лишь локальную диагностику ионосферы. Создание достаточно плотной сети традиционных средств радиозондирования ионосферы весьма сложно и дорого. Использование группировок низкоорбитальных спутников в задачах радиотомографии ионосферы является на сегодняшний день перспективным направлением исследования ионосферы, позволяющим получать оперативную информацию о её состоянии. Требуется разработка новых, высокопроизводительных методов и средств для решения задач этого класса. В статье рассматривается подход по реконструкции вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере путём обработки радиосигналов спутник-спутник. Определён облик перспективной орбитальной группировки малых спутников, позволяющей получать сечения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты. Установлено, что задачу 2D-реконструкции вертикального распределения электронной концентрации в кольцевом слое ионосферы можно решить за период обращения спутников группировки, количество спутников в которой составляет от 5 до 7 в зависимости от высоты орбиты. Показано, что при увеличении количества аппаратов в группировке до объёмов, заполняющих орбиту, время реконструкции можно уменьшить до 10 минут. Показано, что задача сводится к малоракурсной томографической задаче с применением метода фильтрации свёрткой.

Ионосфера, малые спутники, радиотомография, радиозондирование, малоракурсная томография.

Исследование состояния ионосферы, в частности получение информации о высотном распределении электронной концентрации, как правило, осуществлялось с помощью ионозондов, установленных на малых космических аппаратах (МКА). Кроме того, были созданы в небольшом количестве установки некогерентного рассеяния радиоволн [1], которые позволяли определять параметры ионосферной плазмы в диапазоне высот от 70 до 1500 км. Дополнительным источником данных о состоянии ионосферы стал метод зондирования, использующий высокоорбитальные спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS/Galileo и сети наземных приёмных станций [2]. Полученные результаты измерений размещаются в базах данных, доступных только на следующие сутки, то есть фактически реализован режим *постмониторинга*.

В [3] предложен метод, основанный на решении обратной задачи радоновского типа с помощью радио- и лазерного (лидарного) зондирования атмосферного (ионосферного) слоя с помощью группировки МКА. Для этого используются основные средства доставки, которые транспортируют на орбиту семейство МКА с массами порядка $10 \div 100$ кг в зависимости от содержания исследований, точности реконструкции и др. Основными требованиями к МКА являются обеспечение их высокоточной пространственно-временной привязки и возможность проведения межспутниковых измерений с помощью лазерных дальномеров. В простейшем случае для осуществления 2D-реконструкции электронной концентрации используются МКА, размещённые в одной плоскости (рис. 1).

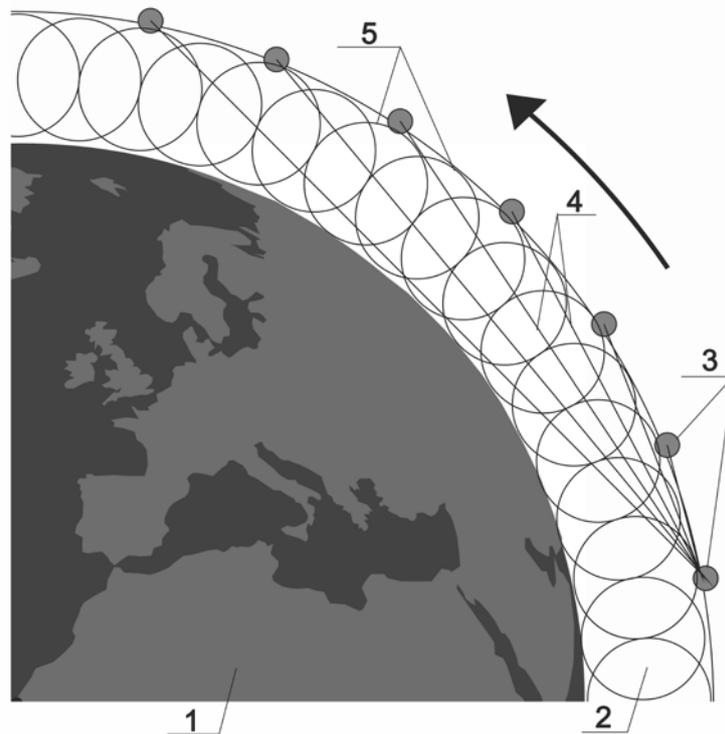


Рис. 1. Геометрия расположения группировки МКА для радиотомографического зондирования ионосферы:
 1 – Земля, 2 – ионосфера, 3 – МКА, 4 – лучи зондирования, 5 – круговая зона реконструкции

Реконструкция изображения по проекциям есть процесс получения изображения двумерного распределения по оценкам его линейных интегралов вдоль конечного числа линий с известным положением [4]. В случае электронной концентрации ионосферы такой интегральной характеристикой является полное электронное содержание (ПЭС), которое представляет собой интеграл электронной концентрации по пути распространения электромагнитной волны и выражается в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$). При диагностике ионосферы для определения ПЭС на пути распространения сигналов используются две характеристики: разность фаз между когерентными широко разнесёнными по частотам сигналами (частотные измерения). При этом имеет место явление фазовой неоднозначности (незнание начальной фазы), за счёт которого ПЭС возможно определить только с точностью до аддитивной константы.

Данную неоднозначность можно понизить, используя сигналы на трёх разнесённых частотах [5] или четырёх [6].

Для осуществления 2D-реконструкции с помощью методов, основанных на обращении Радона, прежде всего необходимо точно знать конфигурацию орбиты движения каждого спутника и точные значения расстояний между ними. Даже в простейшем случае, в предположении круговой орбиты и распределённых на равных расстояниях совокупности спутников (рис. 1), получение линейных интегралов в задаче радиотомографии электронной компоненты ионосферы достаточно сложно. В этом случае кольцевую зону реконструкции при двумерной реконструкции целесообразно разбить на пересекающиеся круговые зоны восстановления (рис. 1). Траектория зондирующего сигнала, таким образом, оказывается распределённой в нескольких зонах реконструкции, при этом геометрия зонди-

рования напоминает геометрию веерного пучка. Следовательно, возникает задача по разделению хордовых данных (частей линейных интегралов на кругах) для данной круговой зоны реконструкции. С другой стороны, необходимо в каждой такой зоне свести хордовые данные к ортогональной геометрии проецирования и далее доопределить недостающие данные до заданного формата реконструкции.

Число аппаратов группировки, необходимых для осуществления 2D-реконструкции электронной концентрации, определяется условиями геометрии получения исходных хордовых данных (угол раскрытия веера хордовых значений, углы конвергенции веерных пучков, алгоритмы пересчёта веерных данных в ортогональные наборы и т.д.). На рис. 2 показана веерная проекция на кольцевой области при высоте орбиты $h = 1600$ км, для хорошей интерполяции которой достаточно 6 отсчётов, 6 радиотрасс спутник – спутник. Важно, чтобы одна из трасс спутник – спутник максимально проходила через F слой ионосферы (рис. 3, 4), то

есть отсчёт лежал бы как можно ближе к максимуму веерной проекции. Таким образом, для получения одной веерной проекции в данном случае достаточно 7 спутников. Задача реконструкции на одном круге решается за время порядка 10 минут. Это обусловлено тем, что за время порядка 10 минут направляющая веерной проекции поворачивается на угол, соответствующий изменению угла истинной аномалии за то же время. Для реконструкции на круговой области необходим поворот направляющей веерной проекции не менее чем на 12 градусов. Поскольку период квазистационарности ионосферы не превышает 15 минут, то группировкой из 7 спутников нельзя получать непрерывную информацию об изменениях в ионосфере. Но при распределении на орбите 32 спутников время реконструкции в кольцевой области будет соответствовать времени реконструкции на одном круге. В табл. 1 приведены характеристики группировок МКА, используемых для осуществления 2D-реконструкции электронной концентрации на иных высотах.

Таблица 1. Характеристики группировки МКА

Высота орбиты, км	Количество спутников	Период обращения группировки МКА, мин	Секторальный угол для спутников, находящихся в зоне радиовидимости, град.	Количество спутников в случае их равномерного распределения по орбите	Время решения задачи на одном круге, мин	Угол раскрытия веера хордовых значений, град.
1000	5	104,97	58	28	8,75	18
1250	6	110,35	66	32	9,2	24
1600	7	118,04	71	32	9,84	30
1750	7	121,39	75	32	10,11	30
2000	7	127,04	79	28	10,59	30

Авторами разработан пакет прикладных программ, позволяющий моделировать поведение группировки МКА, движущихся по почти круговой орбите для задач томографической диагностики электронной концентрации ионосферы.

На рис. 5, б приведены результаты математического моделирования рекон-

струкции распределения электронной плотности на одном из кругов из кольцевого сечения ионосферы (рис. 5, а). Реконструкция была произведена с помощью алгоритмов свёртки, вид ядра показан на рис. 5, г. На рис. 5, в показано поле ошибок реконструкции.

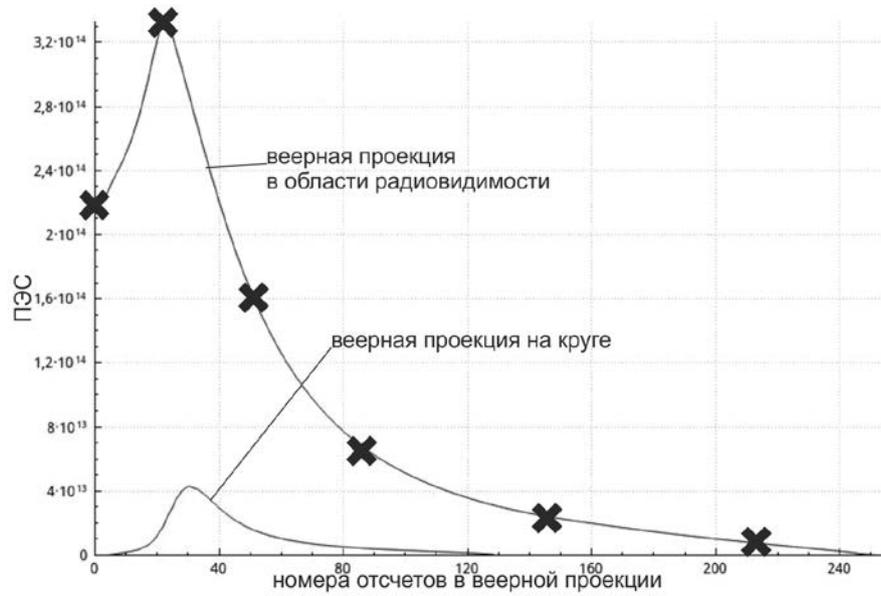


Рис. 2. Верная проекция на кольцевой и круговой областях реконструкции при высоте орбиты $h = 1600$ км (крестиками показаны отсчёты верной проекции на траассах спутник – спутник)

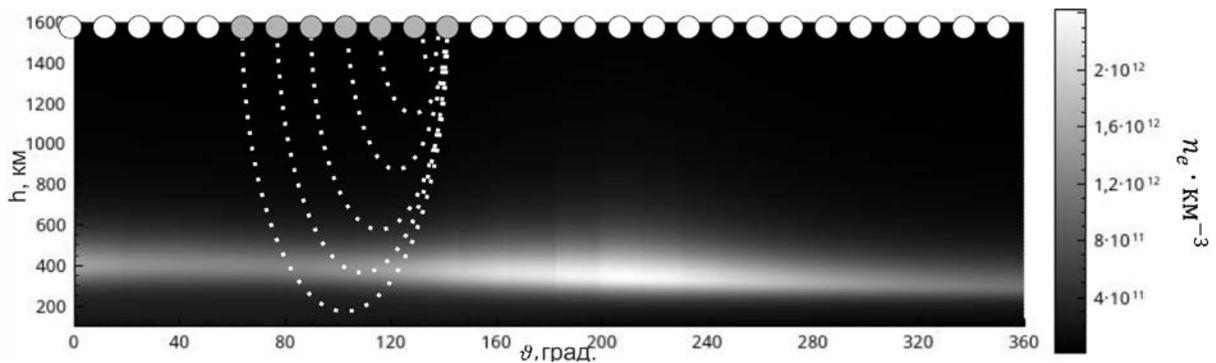


Рис. 3. Распределение электронной концентрации в плоскости полярной орбиты при высоте $h = 1600$ км

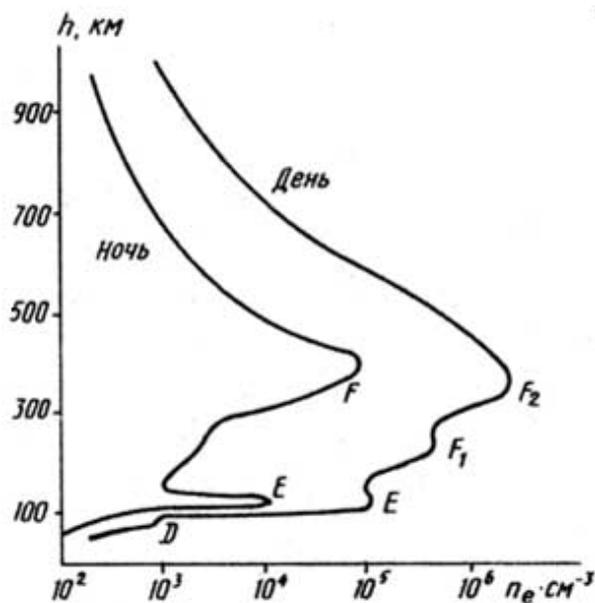


Рис. 4. Типичное вертикальное распределение электронной концентрации в ионосфере для дневных и ночных условий

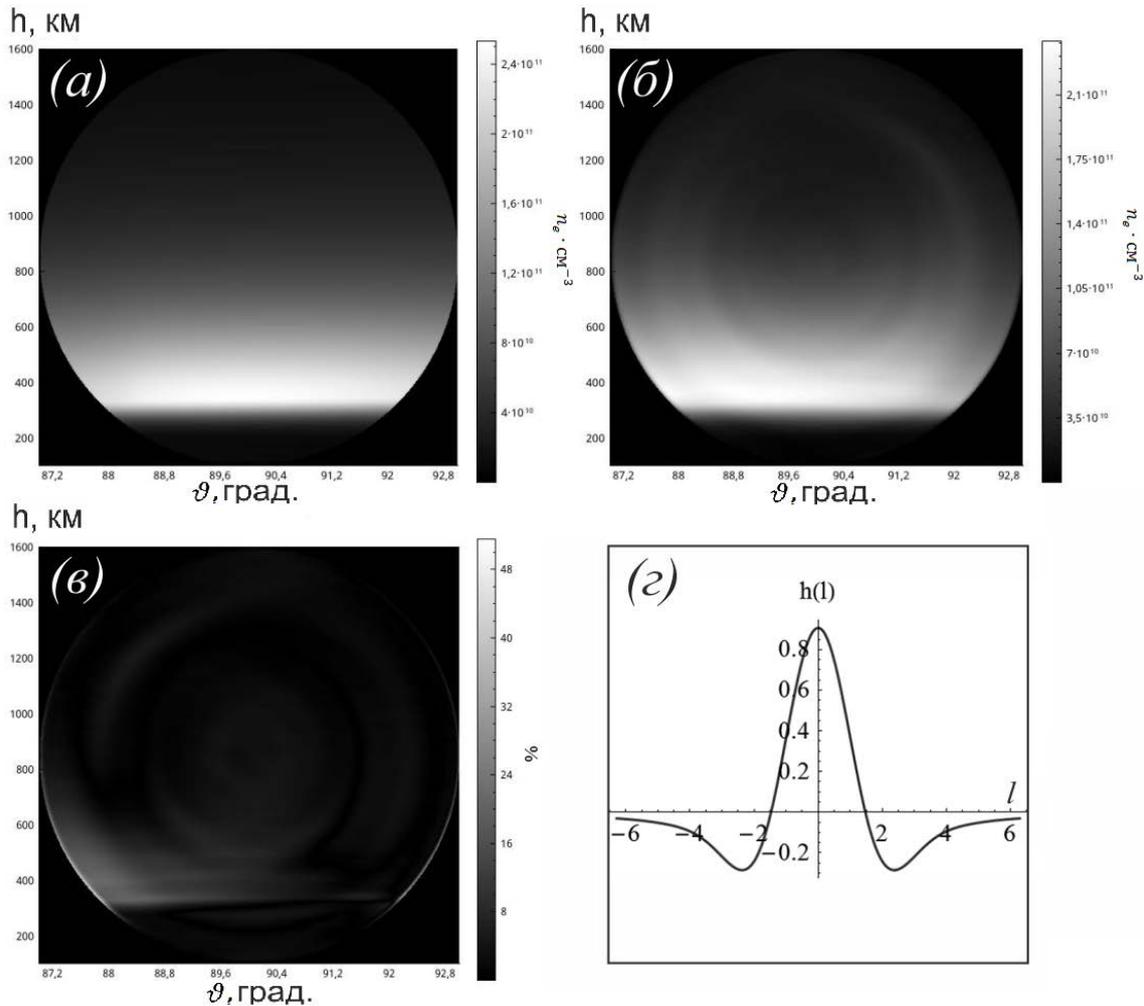


Рис. 5. Иллюстрации работы ППП по реконструкции функций распределения электронной плотности

Поскольку предполагается, что каждый МКА оборудован каналом обмена цифровыми данными с ближайшими аппаратами, то в такой системе возможно организовать процессы параллельных вычислений, связанных с задачами реконструкции искомым функциональных распределений электронной концентрации ионосферы Земли. Это обстоятельство позволяет описанной выше исследова-

тельской группировке МКА самостоятельно решать как задачи навигации, так и задачи реконструкции и передачи информации на Землю.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках проектной части госзадания (проект № 9.1421.2014/К).

Библиографический список

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
2. Романов А.А., Трусев С.В., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 14-20.
3. Филонин О.В., Талызин Ю.Б. Математическое моделирование процессов исследования планетарных атмосфер с помощью колоний малых спутников // Материалы

3-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (III Козловские чтения). Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 367-371.

4. Хермен Г. Восстановление изображения по проекциям. М.: Мир, 1983. 52 с.

5. Bernhardt P.A., Seifring C.L. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument, Taiwan, Joint Geosciences Assembly, 2004.

6. Романов А.А., Новиков А.В. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2009. Т. 111, № 4. С. 31-36.

Информация об авторах

Филонин Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: phylonin@gmail.com. Область научных интересов: приборы и методы экспериментальной физики, обратные некорректные задачи в физических исследованиях, обратные задачи в космических исследованиях.

Николаев Петр Николаевич, аспирант межвузовской кафедры космических исследований, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pnikolayev@gmail.com. Область научных интересов: радиотомография, компьютерное моделирование физических процессов.

MONITORING OF THE EARTH'S IONOSPHERE BY A SMALL SATELLITE CONSTELLATION

© 2016 O. V. Phylonin, P. N. Nikolayev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Existing radar aids for the research of the ionosphere and ionosondes allow only local diagnostics of the ionosphere. Creating a network of traditional tools of radio sounding of ionosphere is quite difficult and expensive. Using constellations of LEO satellites in ionospheric radio-tomography problems is today a promising direction of ionospheric research that allows getting the latest update about its condition. It is necessary to develop new, highly efficient methods and tools for solving problems of this class. An approach for the reconstruction of vertical distribution of ionospheric electron density by processing satellite-to-satellite signals is discussed in the article. The form of a promising orbital constellation of small satellites that makes it possible to obtain the cross section of the ionospheric electron density in the plane of the orbit is determined. It was found that the problem of 2D reconstruction of electron density vertical distribution in the ring layer of the ionosphere can be solved during the orbital period of the satellite in the constellation, the number of satellites in which is 5 to 7, depending on the height of the orbit. It is shown that as the number of vehicles in the constellation increases up to the amount that fills the orbit, the reconstruction time could be reduced to 10 minutes. It is shown that the problem is reduced to a few-view tomography problem using the method of convolutional filtering.

Ionosphere, small satellites, radiotomography, radio sounding, few-view tomography.

Citation: Phylonin O.V., Nikolayev P.N. Monitoring of the earth's ionosphere by a small satellite constellation. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 1. P. 132-138. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-132-138

References

1. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionospheric radiotomography]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2007. 336 p.
2. Romanov A.A., Trusov S.V., Kryuchkov V.G. The study of ionospheric irregularities phase difference tomography method in Far East Russia. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008. No. 2. P. 14-20. (In Russ.)
3. Filonin O.V., Talyzin Yu.B. Mathematical modeling of the study processes of planetary atmospheres via small satellites constellation. *Materialy 3-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki» (III Kozlovskie chteniya)*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2013. P. 367-371. (In Russ.)
4. Herman G. *Vosstanovlenie izobrazheniya po proektsiyam* [Image back projecting]. Moscow: Mir Publ., 1983. 352 p.
5. Bernhardt P.A., Seifring C.L. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument, Taiwan, Joint Geosciences Assembly, 2004.
6. Romanov A.A., Novikov A.V. Measuring full electronic content of the earth's ionosphere with the help of multifrequent coherent sounding signal. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*. 2009. V. 111, no. 4. P. 31-36. (In Russ.)

About the authors

Phylonin Oleg Vasilevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Physics, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: phylonin@gmail.com. Area of Research: devices and methods of experimental physics, inverse ill-posed problems in physical research, inverse problems in space research.

Nikolayev Peter Nikolayevich, postgraduate student, Department of Space Research, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: pnikolayev@gmail.com. Area of Research: radiotomography, computer modeling of physical processes.