

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПЛАНЕТАРНЫХ АТМОСФЕР С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК

О.В. Филонин, П.Н. Николаев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Рассмотрена возможность исследования параметров планетарных атмосфер, с помощью спутниковых группировок, используя методы малоракурсной многочастотной томографии. Приведены результаты математического моделирования процедур реконструкции пространственного распределения вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере Земли путем обработки сигналов спутник-спутник. Определён облик перспективной орбитальной группировки малых спутников, позволяющей получать сечения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты. Описаны методы и алгоритмы реконструкции пространственного распределения электронной концентрации в ионосферном слое плоскости орбиты с помощью лучевого радиозондирования, осуществляемого группировкой малых спутников.

Ключевые слова: ионосфера, малые спутники, радиотомография, радиозондирование, малоракурсная томография.

Введение

Разработка новых высокоинформативных и достоверных методов исследования параметров планетарных атмосфер с помощью автоматических аппаратов является одной из актуальных задач в области исследования ближнего и дальнего Космоса. В настоящее время для исследования состояния ионосферы Земли, в частности получение информации о высотном распределении электронной концентрации, как правило, осуществляется 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 км до 1500 км. Эти системы не позволяют решить основную задачу диагностики параметров ионосферы, а именно получение 3D информации, например, об электронной плотности во всем шаровом слое ионосферы в реальном времени. Дополнительным источником данных о состоянии ионосферы стал метод зондирования, использующий высокоорбитальные спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS/Galileo и сети наземных приемных станций и антенн [2]. Полученные результаты измерений размещаются в базах данных, доступных только на следующие сутки, то есть фактически реализован режим постмониторинга.

Таким образом, задача 3D реконструкции параметров плазмы ионосферы в реальном времени с помощью современных навигационных систем, а также спутниковых группировок оказывается весьма актуальной. Наиболее эффективно обратные задачи о пространственном распределении электронно-ионной компоненты ионосферы можно решить с помощью группировки МКА. Эта идея была высказана и детально обоснована в [3] для исследования пространственного распределения электронной компоненты для

Земли и в работе [4] для анализа состояния других планетарных атмосфер в оптическом диапазоне с помощью группировки миниспутников.

Для решения данного класса задач, авторами разработан метод исследования планетарных атмосфер, с помощью группировок МКА, реализующих алгоритмы реконструкции параметров на основе алгоритмов, использующих обращение Радона.

1. Особенности формирования спутниковой группировки для радиотомографического исследования планетарных атмосфер

Для решения такого рода задач, например, реконструкция пространственного распределения параметров атмосферы планеты, с помощью методов основанных на обращении Радона, прежде всего, необходимо точно знать конфигурацию орбиты, параметры движения каждого спутника и точные значения расстояний между ними. Даже в простейшем случае, в предположении круговой орбиты и строго распределённых на равных расстояниях совокупности спутников (рис. 1 а)) получение хордовых данных.

В таких случаях зону восстановления искомым данным – кольцевую зону при 2D - реконструкции целесообразно разбить на пересекающиеся круговые зоны восстановления см. рис. 1 д). Траектории зондирующих сигналов, таким образом, оказываются распределёнными в нескольких зонах восстановления, а геометрия зондирования напоминает веерную геометрию получения томографических данных. На первый взгляд может оказаться, что введение круговых зон восстановления – излишнее усложнение задачи реконструкции искомым параметров. Действительно, возможно переформулировать теорему Радона для кольцевого носителя для 2D – задачи, или для шарового слоя для решения задачи 3D реконструкции (рис. 1 б)). Но в таком случае, бортовые вычислительные комплексы должны работать с матрицами, например, для Земли имеющих форматы (16 000 × 16 000) элементов чтобы получить разрешение (500 × 500) м². Разбиение кольцевой зоны реконструкции, для решения плоской задачи, на круговые зоны дает возможность работать с полярными дискретными отсчетами, число которых для ионосферы Земли можно ограничить 3 000 элементов в каждом диаметре, для того же разрешения, что значительно упрощает процедуры вычислений. Это обстоятельство становится решающим преимуществом при исследовании планетарных атмосфер таких планет гигантов как Юпитер, Сатурн с помощью автоматических МКА. Некоторое усложнение вычислительных процедур, связанное с задачей по разделению хордовых данных для данной круговой зоны, решается достаточно просто путем предварительного прямого многочастотного зондирования атмосферы вдоль наибольшей хорды.

Точность реконструкции параметров планетарных атмосфер зависит от количества используемых аппаратов, способа зондирования, конфигурации орбиты, точности определения расстояния между МКА. Оптимальным числом МКА, как показано в работах [5, 6], можно считать 24 аппарата. Их можно располагать как на одной плоской траектории (рис. 1 а)) так и группировать их, например по 8 спутников на 3 орбитах позволяющих решать задачи по 3D реконструкции (см. рис. 1 б), в), г)). Плоскости этих орбит могут образовывать различные углы конвергенции от $\pi/6$ (рис. 1 г) до взаимно ортогональной

ориентации (рис. 1 в)). Взаимная ориентация плоскостей орбит определяется задаваемой точностью 3D - реконструкции при заданном количестве аппаратов.

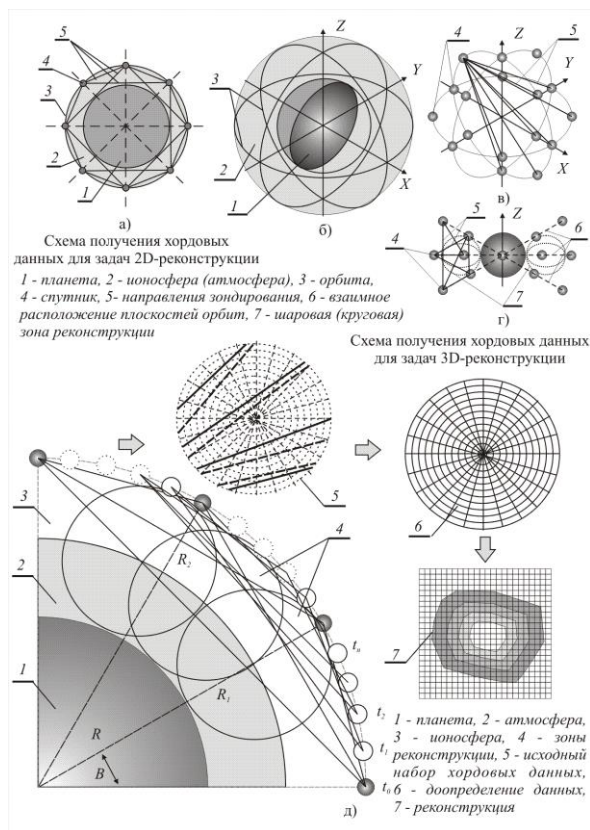


Рис.1. Геометрия расположения спутников группировки для получения исходных хордовых данных

2. Особенности формирования группировки для радиотомографического исследования планетарных атмосфер

Реконструкция изображения по проекциям есть процесс получения изображения двумерного распределения по оценкам его линейных интегралов вдоль конечного числа линий с известным положением. В случае 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 разнесенными по частотам сигналами (частотные измерения). Но здесь имеет место явление фазовой неоднозначности (отсутствие информации о начальной фазе), за счет которого ПЭС возможно определить только с точностью до аддитивной константы. Данную неоднозначность можно понизить, используя сигналы на трех разнесенных частотах [7] или четырех [4].

Поэтому в ионосферных исследованиях наиболее предпочтительным является использование методики определения ПЭС по фазовым измерениям псевдодальности на четырех частотах [4]:

$$ПЭС = \frac{n_1^2 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} [(\Delta\phi_{13} x_{12} - \Delta\phi_{12} x_{13})_{\text{mod } 1} + k], \quad (1)$$

где mod_1 - функция ограничивающая выражение $\Delta\phi_{13} x_{12} - \Delta\phi_{12} x_{13}$ в пределах интервала $(0 \div 1)$, k - целое число, характеризующее шаги неоднозначности ПЭС, $n_1^2 n_2^4 c f_0 / (n_2^2 - n_1^2) \varepsilon = 0.81 ПЭС$ - величина неоднозначности ПЭС, c - скорость света, $f_0 = 16.668 \text{ МГц}$ - основная частота, ε - диэлектрическая проницаемость среды, $x_{12} = -7$, $x_{13} = 8$ - минимальные корни уравнения $x_{12}(n_1^2 + n_2^2) - x_{13} n_2^2 = 1$, где $(n_1 = 3, n_2 = 8)$. Несущие частоты, в данном случае связаны выражениями:

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1^3 f_0 = 150 \text{ МГц}, & f_2 &= n_1^2 n_2 f_0 = 400 \text{ МГц}, \\ f_3 &= n_1 n_2^2 f_0 = 1066 \text{ МГц}, & f_4 &= n_2^3 f_0 = 2844 \text{ МГц}, \\ f_0 &= 5.5 \text{ МГц}, & n_1 &= 3, & n_2 &= 8. \end{aligned} \quad (2)$$

Последовательное использование комбинаций, дающих грубые результаты для разрешения неоднозначностей более точных, позволяет снизить требования к точности определения фазы сигналов в приемной аппаратуре. Применение комбинаций 2434, 1323, 2334 и 1223 позволяет получить неоднозначность 66,6 TECU при точности не хуже 0,01 TECU, не требуя при этом высокоточной приемной аппаратуры.

3. Методы математического моделирования 2D – реконструкции параметров планетарных атмосфер

Чтобы проверить точность работы любого метода компьютерной томографии используется математическое моделирование. То есть, сначала по заданной функции распределения ионосферы получают набор ПЭС, что является решением прямой задачи. Затем по полученным наборам ПЭС восстанавливается исходная функция распределения, что является решением обратной задачи. Такое последовательное решение прямой и обратной задач позволяет верифицировать используемый метод томографии. В качестве исходных данных прямой задачи использовалась модель NeQuick [8]. Сетка бралась с разрешением 3км по высоте и $23.44 \cdot 10^{-3}$ градуса по широте.

Решение обратной задачи томографии по сути является обратным преобразованием Радона, которое действует на проекции и дает оценку функции f^* по набору проекций, описывается выражением:

$$\begin{aligned} \left[\tilde{R}^{-1} p \right] (n; \Theta) &= \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi d\phi \\ &\int_{-E}^E \frac{1}{r \cdot \cos(\Theta - \phi) - n} \frac{\partial p(n, \Theta)}{\partial n} dn \end{aligned} \quad (3)$$

Обратное преобразование Радона можно свести к методу свёртки:

$$f^* = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi (p_\theta * h) d\phi. \quad (4)$$

Поскольку в постановке задачи оценки ПЭС в узком угле конвергенции (угле в котором спутники проводят измерения), обусловленным областью взаимной радиовидимости спутников, не превышающем 20 градусов, необходимо доопределить проекционные данные за пределами этого угла. Здесь возможно воспользоваться теоремой о центральном сечении: Фурье-образ проекции $G_{x_1}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$, т.е. проекция в частотной области представляет собой сечение Фурье-образа $F(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$, получаемое при $\omega_1 = 0$. На рис 2 а) приведено разъяснение для двумерного случая теоремы.

Отсюда вытекает возможность доопределить недостающие образы, посредством экстраполяции функции $F(\omega_1, \omega_2)$ за пределами угла конвергенции. Это возможно сделать, поскольку круговые гармоники (Рис. 3) являются функциями непрерывными и гладкими, подчиняющимися закону, который выявляется, используя модельные функции.

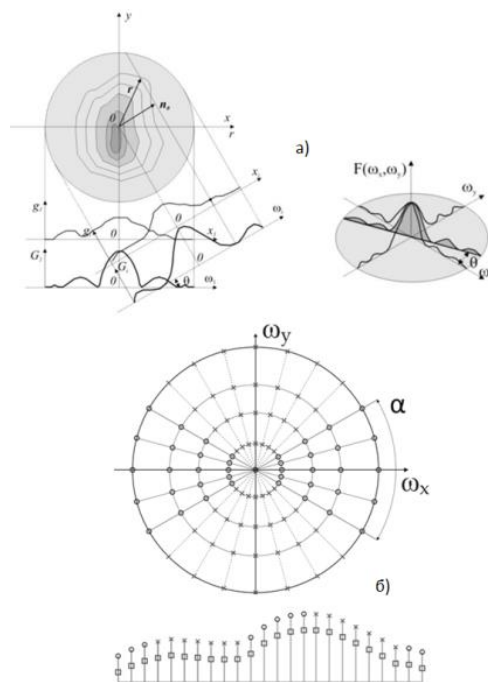


Рис.2. Иллюстрация к теореме о центральном сечении, схема формирования отсчетов в Фурье – пространстве и экстраполяция отсчетов на круговой гармонике

Получив недостающие проекционные данные ПЭС в кольцевом слое, далее необходимо используя выражение (3) получить оценку искомой функции. Для этого производится реконструкция в приближении метода свёртки.

Для задач реконструкции рассмотренного типа разработано специализированное «низкочастотное» ядро вида:

$$\begin{aligned}
 h(l) = & a_0(1/2\text{sinc}(\pi l\omega_0) - 1/4\text{sinc}^2((\pi l\omega_0)/2)) + \\
 & + a_1(1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 + \pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 + \pi)/2)) + \\
 & + 1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 - 2\pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 - \pi)/2)) + \\
 & + a_2(1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 + 2\pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 + 2\pi)/2)) + \\
 & + 1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 - 2\pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 - 2\pi)/2)) + \\
 & + a_3(1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 + 3\pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 + 3\pi)/2)) + \\
 & + 1/4\text{sinc}(\pi l\omega_0 - 3\pi) - 1/8\text{sinc}^2((\pi l\omega_0 - 3\pi)/2)), \\
 a_0 = & 0,3635819, \quad a_1 = 0,4891775, \\
 a_2 = & 0,1365995, \quad a_3 = 0,0106411.
 \end{aligned}$$

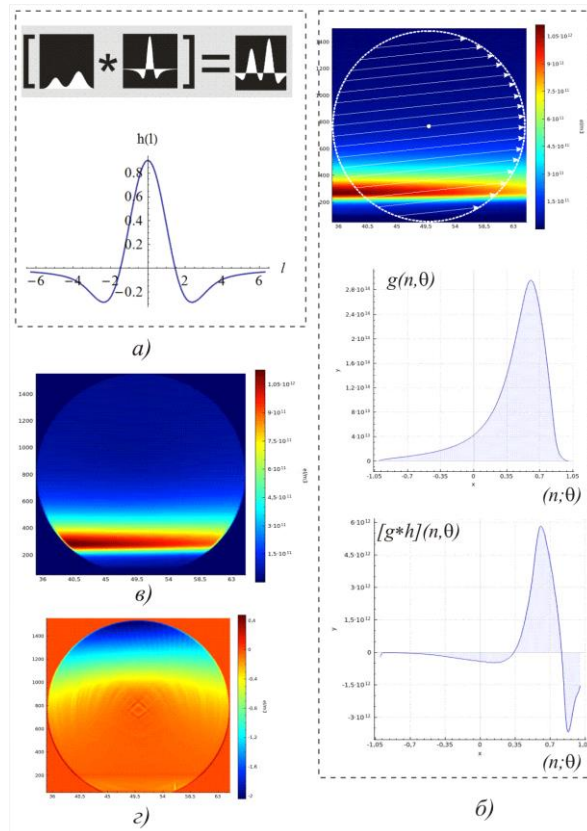


Рис. 3. Иллюстрации методов многочастотного радиотомографического исследования

Для исследования предложенного метода реконструкции электронной концентрации в кольцевом слое ионосферы с помощью автоматической группировки МКА был проведен полный цикл математического моделирования. На рис. 3 приведены некоторые этапы и результаты процедур моделирования. Вид ядра в сигнальной области показан на рис. 3 а). На рис. 3 б) представлены: рассчитанный набор хорд проекционных данных для одного угла, на основе двухчастотного лучевого зондирования, соответствующая функция проекции $g(n; \theta)$ и вид отфильтрованной функции $[g * h](n; \theta)$. На рис. 3 в) показан вид реконструированной искомой функции распределения ПЭС (число проекций 180, вместе с доопределенными), а на рис. 3 г) отображено поле ошибок на круговом носителе.

Выводы:

1. Показана принципиальная возможность радиотомографического исследования параметров планетарных атмосфер автоматическими МКА.
2. Предложены новые лучевые схемы многочастотного зондирования планетарных атмосфер. Это позволило значительно упростить процедуры реконструкции искомым функций, и дало возможность получать искомые распределения в реальном масштабе времени.

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

Литература

1. В.Е. Куницын Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 336 с.
2. А.А. Романов, С.В. Трусов, А.А. Романов Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса. – М., 2008. – №2. – С. 14 – 20.
3. А.А. Романов, С.В. Трусов, А.В. Новиков, А.В. Аджалова, А.А. Романов Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИЗС на основе анализа характеристик когерентного излучения // Вопросы электромеханики Т. 111. 2009. С. 37 – 42.
4. А.А. Романов, А.В. Новиков, А.А. Романов Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала // Вопросы электромеханики Т. 111. 2009. С. 31 – 36.
5. О.В. Филонин, Ю.Б. Талызин Математическое моделирование процессов исследования планетарных атмосфер с помощью колоний малых спутников. Труды III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара. 2013. С. 245-248.
6. О.В. Филонин Обратные некорректные задачи в космических исследованиях, СНЦ РАН, Самара, 2014, С. 478.
7. Bernhardt P. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument /P. Bernhardt, C. Seifring // Joint Geosciences Assembly. – Taiwan, 2004.
8. Angrisano, A. Assessment of NeQuick ionospheric model for Galileo single-frequency users /A. Angrisano, S. Gaglione, C. Gioia, U. Robustelli – Acta Geophysica. Springer Vienna. – 2013. – Vol. 61 pp. 1457-1476.