

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК

О.В. Филонин, И.В. Белоконов, П.Н. Николаев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика Королева С.П.
(Национальный исследовательский университет), Самара, Россия

phylonin@gmail.com, ibelokonov@mail.ru, nibelung63@gmail.com

Состояние ионосферы определяет важнейшие жизненные процессы на нашей планете. В настоящее время во всех развитых странах осуществляется мониторинг ионосферы, множеством различных способов используя разные спутниковые группировки. ПЭС (полное электронное содержание) является одной из важнейших характеристик ионосферы Земли, однако, на сегодняшний день, на территории России в глобальном масштабе его мониторинг не осуществляется. Аналитические модели дают хорошую оценку этого параметра при условии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка ПЭС становится существенно менее точной [1], что негативно сказывается на работе различных (в частности навигационных) спутниковых систем.

Мониторинг ионосферы в настоящее время реализуется, как правило, с помощью наземных станций вертикального зондирования ионосферы (СВЗИ). СВЗИ позволяют определять значительное число характеристик ионосферы с высокой точностью, однако они обладают рядом недостатков: значительные массогабаритные характеристики, высокое энергопотребление и высокая стоимость эксплуатационных расходов. Перспективный подход к мониторингу ионосферы заключается в определении основных параметров ионосферы по результатам обработки принимаемых радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Радиопросвечивание атмосферы с помощью сигналов спутниковых радионавигационных систем [2] и сети наземных станций является легкодоступным и не требующим больших затрат способом мониторинга ионосферы в реальном времени.

Не смотря на все преимущества современных систем мониторинга, в том числе и использующих сигналы ГЛОНАСС и GPS, эти системы обладают одним существенным недостатком – необходимость иметь сеть наземных приемных станций. Этому недостатка лишены методы и системы зондирования ионосферы с помощью спутниковых группировок [3.4]. В работе [3] предложен способ радиотомографического зондирования ионосферы с помощью спутниковой группировки, содержащей спутники излучающее когерентное радиоизлучение на частотах f_1, f_2 и спутники – приемники, регистрирующие излучение передатчиков на указанных частотах. Просвечивание атмосферы двухчастотными радиосигналами основано на существовании явления дисперсии радиоволн микроволнового диапазона в электронной плазме, образующей ионосферу Земли. Коэффициент преломления радиосигнала, при прохождении через атмосферу от передатчика, расположенного на спутнике – излучателе, определяется формулой:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 40.3 \frac{n_e}{f^2}, \quad (1)$$

где P - давление сухого воздуха в Паскалях, P_w - парциальное давление водяного пара, T - температура в Кельвинах, f - несущая частота, n_e - концентрация электронов, n - коэффициент преломления.

Таким образом, полное электронное содержание (ПЭС) вдоль луча визирования от фазового центра антенны приёмника на антенну передатчика пропорционально разности набегов фазы на двух частотах. Учитывая, что фазовая скорость равна по знаку и

Секция 2. Математическое обеспечение космических экспериментов

противоположна по величине групповой скорости, нетрудно видеть, что ПЭС пропорционально модулю разности фаз или разности псевдодальностей, определяемых из навигационных сигналов на двух частотах. Однако не трудно понять, что для фазовых измерений величина ПЭС может быть определена лишь с точностью до постоянной (в пределах одного сеанса) константы.

Зарегистрировав на спутниках - приемниках разность фаз испущенных со спутников - излучателей электромагнитных излучений, после их прохождения через ионосферу, можно рассчитать полное электронное содержание в ионосфере на пути распространения электромагнитного излучения в соответствии со следующим соотношением:

$$TEC \sim \Delta\phi = \lambda r_e \int N d\sigma, \quad (2)$$

где TEC (ПЭС) - полное электронное содержание, ϕ - разность фаз когерентного электромагнитного излучения после прохождения через ионосферу, λ - длина волны электромагнитного излучения с наименьшей частотой f_1 , r_e - радиус электрона, N - электронная концентрация и $d\sigma$ - элемент дискретизации пространства вдоль луча визирования спутник - спутник, имеющий размерность длины [5].

Стоит отметить также, что измерения сдвига фазы на несколько порядков точнее кодовых измерений псевдодальности, поэтому для определения абсолютного ПЭС удобнее всего использовать кодовые и фазовые измерения совместно. Следующим шагом является переход от измеренных абсолютных или относительных задержек вдоль наклонного луча визирования к вертикальным задержкам. Можно выделить два подхода к решению этой задачи:

- первый заключается в том, что надо характеризовать все одновременные измерения лишь одним средним значением вертикального значения ПЭС, привязанным к координатам антенны приёмника;
- второй предполагает расчет «вертикального» значения ПЭС непосредственно в «подионосферных точках» (точках, соответствующих, пересечению луча визирования на спутник с гипотетическим бесконечно тонким ионосферным слоем, находящимся на выбранной высоте).

Авторами разработан способ восстановления пространственного распределения электронной плотности в ионосфере, отличающийся от известных методов, тем что, используя моделирование процесса прохождения радиоимпульса вдоль зондирующего направления – расстояния между спутниками, задачу радиотомографии можно свести к обычной задаче малоракурсной реконструкции. Данный подход, позволяет решать в общем случае, задачу прямой 3D реконструкции ПЭС в шаровом слое ионосферы, либо двумерную задачу в ее, каком либо, выбранном сечении.

Сущность данного способа заключается в том, что группировка мини спутников пространственно располагается на нескольких плоских орбитах, развернутых друг относительно друга, например, так как это показано на рис. 1 а). При такой конфигурации спутниковой группировки можно решать задачу прямой трехмерной реконструкции ПЭС. Поясним содержание предлагаемого способа реконструкции ПЭС на примере 2D восстановления функции распределения электронной компоненты на кольцевом носителе, соответствующем некоторому – заданному сечению ионосферы. Для этого на плоскую круговую орбиту необходимо вывести, как показали модельные эксперименты, 24 миниспутника. Каждый такой миниспутник должен содержать приемники и передатчики, работающие на частотах f_1, f_2 . Кроме того, для регистрации фазовой компоненты, для каждой из частот, каждый миниспутник в своем составе должен иметь по два наноспутника, снабженных приемниками для этих частот.

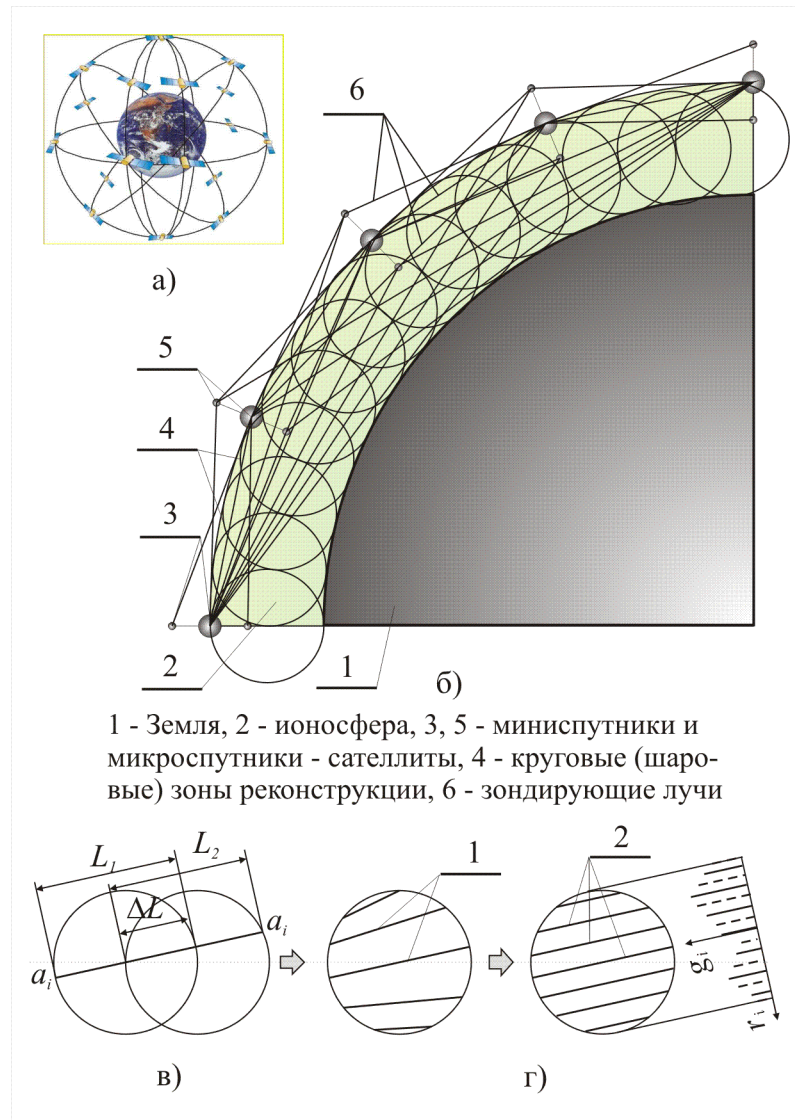


Рис. 1

Геометрия расположения спутниковой группировки для радиотомографического зондирования ионосферы

После отделения микроспутников от средства доставки и распределения их по круговой орбите на одинаковых расстояниях друг от друга, каждый из них, производит «запуски» наноспутников в радиальном направлении, так как это показано на рис. 1 б). Наноспутники удаляются от своего носителя – миниспутника на расстояния (2÷5) км, и остаются на этих фиксированных расстояниях. Удержание наноспутников – спутеллитов осуществляется с помощью микротросовых систем фиксации. Такая конфигурация спутниковой группировки дает возможность вдоль данного направления зондирования – б (рис. 1 б)) регистрировать фазовые составляющие зондирующего импульса, аналогично тому, как это делается наземными антенными устройствами регистрирующими излучение навигационных группировок. Кроме того, что каждый миниспутник содержит приемопередатчик (номиналы частот: 150, 400 МГц), он должен иметь двигатели ориентации (ионно-плазменного типа), лазерный дальномер, гироскопические устройства и пр. На каждом миниспутнике необходимо также поместить многопроцессорный модуль для предварительной обработки исходных данных, и радиоканалы для обмена данными между спутниками и орбитальной или наземной системой сопровождения.

Обратную задачу реконструкции ПЭС на кольцевом носителе можно свести к обычной малоракурсной задаче восстановления на основе свертки проекций с малоракурсным ядром и процедуре обратного проецирования можно двумя путями. Первый

заключается в том, что можно переформулировать теорему Радона для кольцевого носителя, при условии, что искомые функции можно доопределить, на основе известных экспериментальных данных на круговую область реконструкции. Однако, в силу того, что высота ионосферы принимается равной 1500 км, а радиус нашей планеты 6300 км, кольцевая зона реконструкции оказывается слишком малой, в том плане, что количество, реально получаемых, хордовых данных оказывается ничтожным по сравнению с их числом на круговом носителе, радиусом 7800 км. Кроме того, следует учитывать, что хордовые данные, которые впоследствии необходимо привести к проекционным данным, могут быть определены в довольно малом угле конвергенции. С учетом, того, что пространственное разрешение, даже в двумерном случае, должно определяться элементарной площадкой не менее $(500 \div 500) \text{ м}^2$, т.е. каждая проекция должна содержать 15 600 отсчетов, а реконструируемый формат соответственно $(15\ 600 \div 15\ 600)$ элементов, становится понятно, что этот подход потребует колоссальных вычислительных затрат, что делает его малоэффективным.

Другой путь, предложенный авторами, заключается в том, что, например, для задачи 2D реконструкции:

- Кольцевой слой ионосферы представляется в виде набора круговых (элементарных) носителей, диаметр которых, равен высоте ионосферы, частично перекрывающихся друг друга, см. рис. 1 б).

- Таким образом, элемент хорды между спутниками излучающих и принимающих радиопульс, может быть представлен суммой отрезков $a_i a_i$ (см. рис. 1 в)).

- Каждый такой отрезок $a_i a_i$, в свою очередь определяется хордами элементарных круговых зон реконструкции L_1, L_2 , с областью перекрытия ΔL .

- Если априорно известны такие параметры ионосферы как давление воздуха, водяного пара, температура и т.д. см. выражение (1), то можно путем моделирования рассчитать ослабление радиоизлучения на каждой частоте для хордовых направлений L_1, L_2 , с учетом зон перекрытия ΔL_i .

- Следовательно, используя данные о поглощении вдоль направлений зондирующих лучей – 6 (рис. 1 б)) можно сформировать набор хордовых данных – 1, для каждой элементарной круговой зоны реконструкции (рис. 1 г)). Далее производится пересчет хордовых данных из «вверной» геометрии в ортогональную (рис. 1 г)), их доопределение до заданного формата реконструкции, т.е. формирование классической ортогональной проекции $g_i(r_i)$.

Однако, так же как и в первом случае, при данном подходе, мы можем получить наборы проекционных данных в довольно малых углах конвергенции ракурсов, порядка $(15 \div 30)^\circ$. Это справедливо для соседних миниспутников, находящихся в зонах прямой видимости, по отношению друг к другу (рис. 1 б)). Для эффективной процедуры реконструкции с помощью быстродействующих сверточных алгоритмов и операции обратного проецирования необходимо доопределить проекционные данные в Фурье – пространстве, используя свойства симметрии Фурье – образов и априорные данные о давлении воздуха, водяного пара и пр. Вычисление необходимого количества промежуточных проекций производится по кольцевым гармоникам в полярной системе Фурье пространства. Далее, осуществляется перевод одномерных Фурье – образов, вычисленных недостающих проекций в пространство сигналов, и сворачивание функций проекций с низкочастотным малоракурсным ядром. После операции обратного проецирования и перевода данных в декартову систему координат получаем искомую реконструкцию элементарном круговом носителе - согласно геометрии приведенной на рис. 1 б), таких элементарных носителей для ионосферного кольца 48. С учетом аддитивности наложения данных на зонах пересечения осуществляется окончательная реконструкция искомого распределения ПЭС по кольцевой зоне ионосферы.



Рис. 2 Структурная схема ППП для реконструкции ПЭС на кольцевом носителе

На рис. 2 а) показана структурная схема ППП, позволяющего моделировать процедуры двумерной реконструкции функций распределения ПЭС в кольцевой зоне ионосферы. Для удобства восприятия программные модули пакета представлены в виде трех колонок. Левая колонка содержит модули, отвечающие за местоположение миниспутников на орбите, их взаимную ориентацию, также модули формирующие управляющие сигналы для оптимизации местоположения каждого МС на орбите, при помощи микродвигателей ориентации (ДО). В средней колонке приведены модули, отвечающие за реконструкцию искомого распределения ПЭС в данном кольцевом сечении. Правая колонка включает модули, связанные с моделированием процессов ослабления радиоизлучения вдоль каждой зондирующей хорды в элементарных круговых зонах реконструкции. При этом учитываются функциональные распределения давлений воздуха, парциального давления водяного пара с высотой. Серым цветом выделены модули, играющие главную роль в своем классе. При этом предполагается, что рассмотренные процедуры управления, моделирования и реконструкции могут выполняться многопроцессорным вычислительным комплексом, установленным на борту каждого МС.

На рис. 2 б) приведена модельная функция распределения ПЭС по данным [2], полученным при радиотомографии ионосферы с помощью системы навигационных спутников и сети наземных приемных станций. На рис. 2 в) приведен пример реконструкции искомого распределения ПЭС с помощью описанных выше методов. На рис. 2 г) показан

Секция 2. Математическое обеспечение космических экспериментов

пример отображения искомой функции распределения в виде проекционного изображения. В модельном эксперименте формат реконструкции был выбран (512×512) элементов, при 512 градациях по амплитуде. Выбор такого формата связан с временными ограничениями стандартного четырех ядерного процессора ПК. При использовании многопроцессорных систем, реализующих процедуры распределенных вычислений в UNIX среде, формат реконструкции можно увеличить на порядок, что даст возможность получить разрешение (500×500) м² и выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 9.1421.2014/К).

Список литературы

1. Орбитальный мониторинг ионосферы и аномальных явлений на малом спутнике “Вулкан-Компас-2” / В. Кузнецов, Л. Боднар, Г. Гарипов и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2011. — Т. 51, № 3. — С. 333–345.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. *Радиотомография ионосферы*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
3. Романов А.А., Трусов С.В., Аджалова А.В., Романов А.А., Урличич Ю.М. // *Способ мониторинга вертикального распределения электронной концентрации ионосферы* / Патент РФ, RU⁽¹¹⁾ 2445652⁽¹³⁾ С1.
4. Филонин О.В., Талызин Ю.Б., Николаев П.Н. *Математическое моделирование поведения группировок миниспутников на планетарных орбитах, решающих задачи томографической реконструкции параметров атмосфер* // *Международный научно-исследовательский журнал* 2013. № 11-1 (18). С. 31-33.
5. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. *Фазоразностная радиотомография ионосферы* // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1992. 32, N1. С.104-110.