

Численное моделирование восстановления вертикального распределения электронной концентрации ионосферы с использованием сигналов, регистрируемых на борту космических аппаратов

А.А. Романов¹, С.В. Трусов¹, А.В. Новиков¹, А.В. Аджалова¹, А.А. Романов¹,
В.А. Селин²

¹ ОАО «Российские космические системы»

111250 Москва, ул.Авиамоторная, 53

E-mails: romulas@rniikp.ru ;

² Федеральное Космическое Агентство

107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42

В работе представлены результаты моделирования реконструкции вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере путем обработки когерентных сигналов на трассе спутник-спутник. Рассмотрены различные схемы регистрации данных. Продемонстрирована возможность диагностики состояния ионосферы методом томографии в плоскости орбиты перспективной орбитальной группировки с помощью 4х космических аппаратов без использования наземных приемников.

Ключевые слова: ионосфера, спутниковый мониторинг ионосферы, томография ионосферы

Введение

С появлением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS, а также спутниковых систем просветного зондирования атмосферы CHAMP, FORMOSAT-3/COSMIC появилась реальная возможность глобальных исследований профилей атмосферы и ионосферы [1-2]. Информация систем затменного зондирования, в настоящее время, активно используется для прогнозирования атмосферных процессов. При традиционной спутниковой радиотомографии ионосферы с помощью сетей наземных приемных установок получают двумерные высотные разрезы поля электронной концентрации (ЭК) [3-4]. Это накладывает ограничения, как на область исследований, так и непрерывность измерений. Теоретически применение методов томографической реконструкции к данным о полном электронном содержании (ПЭС) в ионосфере, получаемым на трассах спутник-спутник, должно решить эти проблемы и обеспечить непрерывное получение информации о двумерном распределении электронной концентрации в ионосфере в глобальном масштабе.

Для оценки возможности реализации такого подхода были рассмотрены две основные схемы получения данных. В первом случае были использованы радиосигналы ГНСС ГЛОНАСС и GPS, регистрируемые на борту низкоорбитальных (НО) космических аппаратов (КА). Во втором случае радиосигналы распространялись между низкоорбитальными НО КА модельной орбитальной группировки. В обоих случаях основной задачей являлось

определение распределения электронной концентрации в ионосфере в плоскости орбиты КА-приемников по набору измерений ионосферной задержки когерентного радиосигнала. При проведении численных экспериментов с использованием указанных схем были введены следующие ограничения на данные, используемые для решения задачи томографии: плоскости орбит КА-приемников и КА-передатчиков радиосигнала должны максимально совпадать, время экспозиции не должно превышать 15 минут, в течение которых ионосферу Земли можно полагать квазистационарной.

Условия моделирования

Томографические исследования ионосферы проводятся уже более 20 лет [3]. Задача томографии ионосферы в общем виде формулируется как восстановление пространственного распределения ЭК на основе измерений полного электронного содержания (ПЭС), полученных под разными ракурсами. В качестве источников зондирующего сигнала традиционно используются спутники навигационных систем первого и второго поколения. При этом сигналы первых (150 и 400 МГц) обеспечивают высокую точность определения относительного ПЭС, а сигналы вторых (1.2 и 1.6 ГГц) позволяют получить абсолютные значения ПЭС, но с ошибками порядка 3 TECU (1 TECU = 10^{16} эл/м²). В данной работе полагается, что абсолютные значения ПЭС известны с высокой точностью (0,01 TECU), благодаря применению многочастотного (150, 400, 1067, 2844 МГц) приемника, принцип работы которого описан в [5]. При численном моделировании томографии ионосферы с помощью сигналов спутник-спутник получение измерений ПЭС проводилось с использованием модели Quick, а реконструкция распределения ЭК осуществлялась с использованием кусочно-планарной аппроксимации и алгоритма ART [6]. Сетка реконструкции в плоскости орбиты ИСЗ, т.е. в плоскости измерений задавалась с шагом 50-100 км по высоте и 1° по широте. Более подробно методика решения прямой и обратной задач томографии для в рамках данной работы представлена в [7].

Для количественной оценки качества восстановления двумерной реконструкции традиционно используются числа δ , характеризующие относительное отклонение реконструируемой функции \tilde{F} от модельной (истинной) функции F : $\delta = \frac{\|F - \tilde{F}\|}{\|F\|}$. Наиболее часто используются нормы в пространствах l^2 и l^∞ ($\delta(l^2)$ и $\delta(l^\infty)$) [3]:

$$\delta_2 = \delta(l^2) = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \quad \delta_m = \delta(l^\infty) = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|}. \quad (1)$$

Величина относительного квадратичного отклонения реконструируемой функции от исходной (δ_2) дает хорошее представление о том, насколько качественно может быть решена задача реконструкции при заданных условиях, поэтому при оценке результатов моделирования эта величина будет использоваться в качестве основного критерия пригодности выбранных параметров орбитальной группировки.

Результаты моделирования

Были рассмотрены варианты размещения приемников на низкой орбите и использования сигналов ГНСС, однако большие скорости взаимной прецессии орбит низко- и среднеорбитальных КА, а также значительная разница в скоростях КА не позволяют получать достаточное количество проекций ПЭС за время квазистационарности ионосферы (15 минут) (рис. 1, табл. 1). Подробные результаты моделирования использования сигналов ГНСС для томографии ионосферы сигналами спутник-спутник можно найти в работе [7].

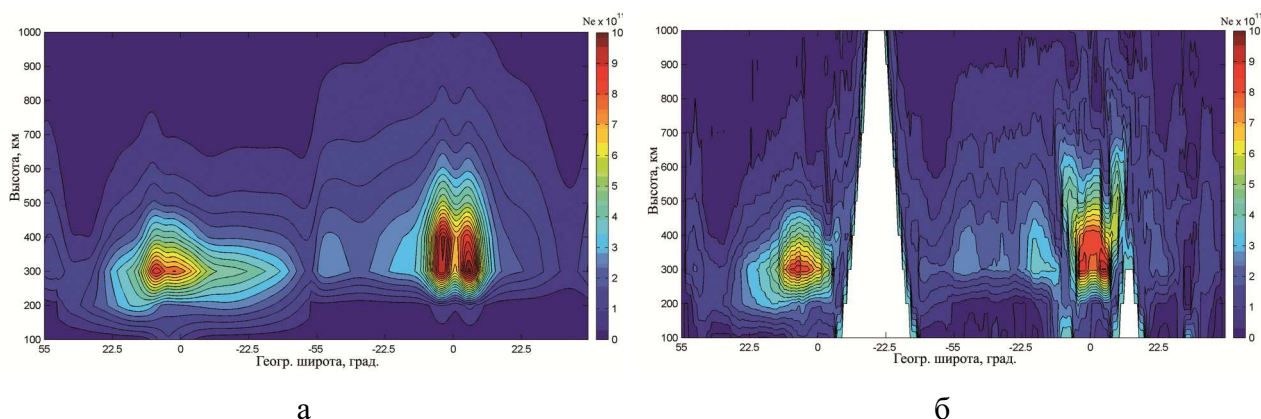


Рис. 1. Распределение электронной концентрации в ионосфере в плоскости орбиты ГНСС в координатах широта – высота над уровнем моря, цветом кодированы значения электронной концентрации (10^{11} эл.м⁻³); а – модельное распределение, б – реконструкция, полученная при использовании в качестве источников сигнала 5 КА GPS и 6 КА ГЛОНАСС

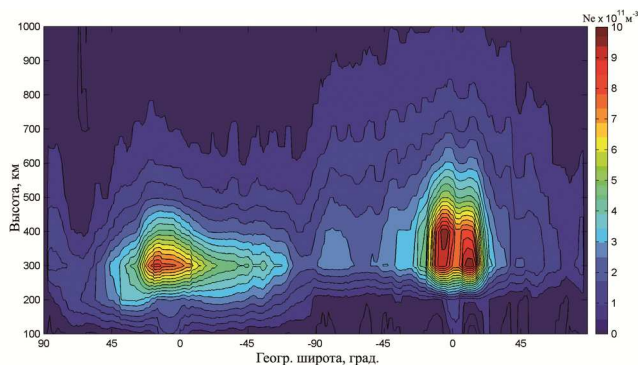


Рис. 2. Распределение электронной концентрации в ионосфере в плоскости полярной орбиты в координатах широта-высота. Реконструкция по данным от модельной группировки из 36 КА. Время экспозиции 15 минут.

Таблица 1. Ошибки реконструкции при использовании произвольного количества приемников и различных комбинаций ГНСС

Ошибка/ОГ	5 КА GPS	6 КА ГЛОНАСС	5 КА GPS+6 КА ГЛОНАСС
δ_2	0.44	0.34	0.34
δ_m	0.71	0.67	0.59

Для оценки качества реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием НО КА, было проведено томографическое восстановление модельного распределения электронной концентрации. В качестве схемы регистрации ПЭС использовались полученные в результате моделирования различных вариантов следующие конфигурации размещения КА на низкой орбите:

- 72 КА (40 передатчиков, 32 приемника, разнонаправленное движение);
- 56 КА (32 передатчика, 24 приемника, сонаправленное движение);
- 36 КА (20 передатчиков, 16 приемников, сонаправленное движение).

Распределение электронной концентрации задавалось с помощью модели ионосферы NeQuick аналогично предыдущему случаю (рисунок 1а), размер элемента изображения 100×100 км. Частота регистрации данных составляла 0,1 Гц.

На рисунке 2 приведены результаты восстановления распределения электронной концентрации с помощью алгоритма ART за 20 итераций на основе данных от группировки из 36 КА. В качестве начального приближения использовалось постоянное значение $4 \cdot 10^{11}$ эл·м⁻³. Ошибки реконструкции δ_2 и δ_m для соответствующих орбитальных группировок (ОГ) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Ошибки реконструкции для различных вариантов модельных орбитальных группировок

Ошибка/ОГ	72 КА	56 КА	36 КА
δ_2	0.05	0.06	0.09
δ_m	0.09	0.09	0.13

Таким образом, с помощью группировки из 36 НО КА можно решить задачу томографической реконструкции ионосферы в плоскости орбиты спутников с ошибкой около 10% без использования априорной информации за период 15 минут. Однако большое количество КА в одной орбитальной плоскости делает эту схему регистрации малопривлекательной для практической реализации. В связи с этим были проведены исследования по оптимизации состава орбитальной группировки. Для этого было снято ограничение на время экспозиции, уменьшена уверенно диагностируемая область ионосферы. В результате был создан концептуальный элемент орбитальной группировки, названный кластером. Под кластером подразумевается несколько КА в одной орбитальной плоскости, находящихся в зоне полной взаимной радиовидимости.

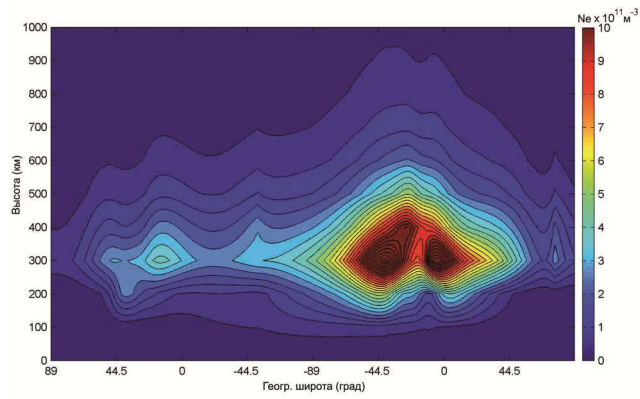


Рис. 3. Модельное распределение электронной концентрации в ионосфере для элемента реконструкции 50×100 км

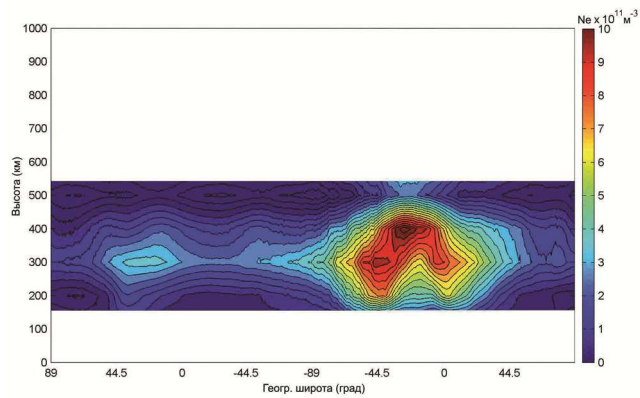


Рис. 4. Реконструкция модельного распределения электронной концентрации в ионосфере (рис. 3) с использованием кластера из 4 КА за 1 виток без использования начального приближения

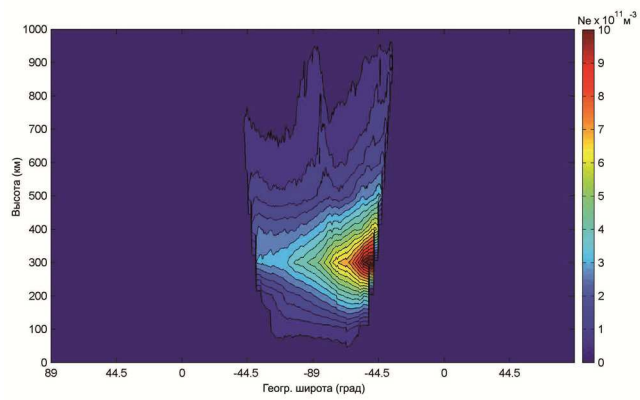


Рис. 5. Реконструкция модельного распределения электронной концентрации (рис. 3) с использованием одного кластера из 4 КА за период 15 минут с использованием начального приближения

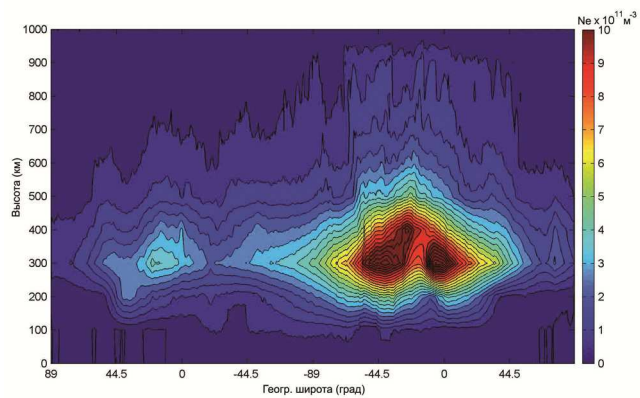


Рис. 6. Реконструкция модельного распределения (рис. 3) электронной концентрации с использованием четырех кластеров из 4 КА за период 20 минут с использованием начального приближения

В рамках этой части исследований было проведено моделирование решения обратной задачи реконструкции вертикального распределения электронной концентрации ионосферы без использования априорной информации на основе данных, получаемых с помощью кластера из 4-5 космических аппаратов. Средние ошибки для восстанавливаемой области высот ионосферы составили 33-35 % ($\delta_2 = 0.33-0.35$, рис.3,4).

Для этих же конфигураций КА были проведена оценка эффективности использования начального приближения на базе модели ионосферы IRI-2007. Результаты расчетов показали, что средние ошибки реконструкции для этого случая могут быть снижены до 8-12% ($\delta_2 = 0.8-0.12$).

Для кластерного расположения КА была проведена оценка предельной разрешающей способности подобной перспективной системы с использованием сигналов типа КА-КА. Численное моделирование продемонстрировало принципиальную возможность восстановления неоднородностей с вертикальным размером 50-100 км, горизонтальным 150 км и величиной электронной концентрации, на 30 % и более превышающих фоновые значения в данной области.

Была исследована возможность частичного восстановления распределения электронной концентрации в плоскости орбиты низкоорбитальных КА за период времени, равный 15 минутам. На рисунке 5 представлен результат реконструкции ионосферы с помощью одного кластера из 4 КА с использованием начального приближения (погрешность 20 %) и при размере элемента изображения 50 x 100 км по данным, полученным за 15 минут. При таком подходе можно восстановить только ту область ионосферы, через которую прошли радиотрассы спутниковых сигналов. Размер подобной области абсолютно аналогичен области реконструкции с использованием наземного сегмента, однако, необходимо отметить, что при использовании исключительно космических данных появляется возможность восстановления ионосферы в любой области пространства. Для получения полной широтной картины ионосферы за 15 минут необходимо использовать 4 кластера из 4 КА каждый (всего 16 КА в орбитальной плоскости), разнесенных по орбите на 90° (рис. 6). 3 подобных кластера (всего 12 КА), отстоящих друг от друга на 120° позволят достичь того же результата за 30 минут.

Таким образом, кластерное расположение приемников и передатчиков позволяет на первом этапе развертывания космической системы использовать 1 кластер из 4 или 5 космических аппаратов, данные с которого могут быть использованы для восстановления глобального распределения электронной концентрации ионосферы за время около 100 мин или сектора плоскости за 15 мин. При этом ошибки реконструкции не превысят 35 % без использования априорной информации, и 10-15 % с использованием начального приближения, рассчитываемого на основе модели ионосферы IRI-2007.

Заключение

В работе проведены исследования возможности восстановления вертикального распределения ионосферы методом радиотомографии без использования наземных приемных установок.

Результаты моделирования задачи реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием сигналов существующих КА ГНСС и регистрируемых с помощью приемников, размещенных на низкой орбите показали, что существующее расположение навигационных КА и их количество не позволяют получить достаточного для реконструкции количества данных за период 15 минут.

Результаты моделирования задачи получения необходимого для томографической реконструкции количества данных с помощью специально создаваемого созвездия передатчиков показали, что существует ряд вариантов расположения КА при которых возможно получение достаточного для реконструкции количества проекций ПЭС в течение 15 минут. Наиболее оптимальным по соотношению количества КА и ошибки реконструкции является вариант с неравномерным размещением 20 приемников и 16 передатчиков на высоте около 1000 км. Средняя ошибка восстановления модельного распределения электронной концентрации составила 9%. При этом имеющееся количество проекций ПЭС позволяет решать задачу реконструкции без использования начального приближения, т.е. без априорной информации, что при решении задач томографии ионосферы было недостижимо ранее.

Были проведены исследования по оптимизации предложенной низкоорбитальной группировки из 36 КА в одной орбитальной плоскости с целью уменьшения количества КА. На основе результатов численного моделирования показана возможность реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере Земли в плоскости орбиты с помощью одного или нескольких кластеров, состоящих из 4-5 КА каждый. Определены оптимальные конфигурации кластеров для различных вариантов пространственного разрешения. Показано, что при ограничении исследуемой области ионосферы по высоте, можно определить распределение электронной концентрации в ионосфере в плоскости орбиты с помощью 12 КА за 30 минут или с помощью 16 КА за 20 минут.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 08-07-12014-офи)

Литература

1. *Yakovlev O. I., Matyugov S. S., Vilkov I. A.* Attenuation and scintillation of radio waves in the Earth's atmosphere from radio occultation experiment on satellite-to-satellite links // *Radio Science*, 1995, V.30, №3, p.591-602.
2. *Kursinski E. R., Hajj G.A., Bertiger W. I., Leroy S. S. et al.* Initial Results of Radio Occultation Observations of Earth's Atmosphere Using the Global Positioning System, // *Science*, 1996, №271, p.1107-1110.
3. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 С.
4. *Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г.* Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // *Исследование Земли из космоса*, 2008, №2, С. 14-20
5. *Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А.* Измерение ПЭС ионосферы Земли с помощью многочастотного зондирующего сигнала // *Вопросы электромеханики*, 2009. Т.111, №4, С.31-36
6. *Ценсор Я.* Методы реконструкций изображений, основанные на разложении в конечные ряды // *ТИИЭР.*- 1983.- Т.71.- №3 - С.148-160
7. *Романов А.А., Трусов С.В., Новиков А.В., и др.* Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения // *Вопросы электромеханики*, 2009. Т.111, №4, С.37-42

The numerical modeling of vertical ionosphere electron density reconstruction based on signals, registering onboard satellites

A.A. Romanov¹, S.V. Trusov¹, A.V. Novikov¹, A.V. Adjalova¹, A.A. Romanov¹, V.A. Selin²

¹ *JSC "Russian Corporation Of Space Device Engineering And Information Systems"*
111250 Moscow, 53 Aviamotornaya str.

E-mails: romulas@rniikp.ru ;

² *Federal Space Agency*
107996 Moscow, 42 Shchepkina str.

The results of the vertical distribution of the ionosphere electron concentration reconstruction due to satellite-satellite coherent signal processing modeling are represented in the frameworks of the research. The different schemes of data registration are considered. The possibility of the diagnosis of ionosphere state by tomography method is showed in the orbit plane of the perspective satellite system included minimum 4 satellites without any ground receiving stations.

Keywords: ionosphere, ionosphere satellite monitoring, ionosphere tomography