

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ В ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ИСЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. Романов, С.В. Трусов, А.В. Новиков,
А.В. Аджалова, А.А. Романов
(ОАО «Российские космические системы»)
В.А. Селин
(Федеральное космическое агентство)

Рассматриваются аспекты реконструкции вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере путем обработки когерентных сигналов спутник-спутник. Рассмотрена возможность использования данных существующих космических систем. Определен облик перспективной орбитальной группировки ИСЗ, позволяющей получать двумерные разрезы электронной концентрации в ионосфере в плоскости орбиты за период времени 15 мин. Показано, что размещение приемников и передатчиков когерентных радиосигналов на 36-ти низкоорбитальных космических аппаратах позволяет получать данные о распределении электронной концентрации в плоскости орбиты на высотах 100 – 1000 км за период времени 15 мин.
Ключевые слова: томография ионосферы, спутниковый мониторинг 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. Также в существующих системах радиотомографии ионосферы для регистрации спутникового сигнала применяют наземные сети приемных установок [3 – 4], что приводит к ограничению как области исследований, так и непрерывности 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 основных схемы получения данных. В первом случае были использованы радиосигналы ГНСС ГЛОНАСС и GPS, регистрируемые на борту низкоорбитальных (НО) КА. Во втором случае радиосигналы распространялись между 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 мин, в течение которых ионосферу Земли можно полагать квазистационарной. Эффекты рефракции не учитывались, вследствие чего размер элемента реконструируемого изображения составил 100×100 км.

Томографический подход к обработке когерентных радиосигналов спутник-спутник

Томографический подход к восстановлению свойств среды оперирует интегральными характеристиками, которые получают, воздействуя на среду, как правило, одним из видов излучений под разными ракурсами. При томографическом радиопросвечивании ионосферы интегральной характеристикой является 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) и относительная групповая задержка сигналов (кодо-

вые измерения) различных частот. Последняя может быть определена только для сигналов ГНСС. Кроме того, возможно применение комбинаций этих характеристик. Обоим типам измерений присущи недостатки, так фазовые измерения позволяют с высокой точностью определить относительное ПЭС, содержащее неизвестную константу, кодовые же измерения сильно зашумлены, что приводит к невозможности определения абсолютного ПЭС с точностью лучше 3 TECU. Для измерения абсолютного ПЭС авторами предложена схема многочастотных измерений [5].

При диагностике физических сред с помощью решения обратной задачи (в том числе при радиотомографии ионосферы), как правило, невозможно провести верификацию получаемых данных прямыми методами в полном объеме, т. е. получить тот же объем информации методами контактных измерений или другими однозначными методами. Точность реконструкции параметров среды в этих случаях определяют на основе численного моделирования. Для оценки качества реконструкции параметров ионосферы последовательно решают прямую и обратную задачи.

Прямая задача состоит в получении интегральных характеристик среды, в этом случае полного электронного содержания, для заданного распределения электронной концентрации и имеющегося набора путей распространения зондирующих сигналов (лучей) в этой области. В этой работе для решения прямой задачи будет применяться модель ионосферы NeQuick. Обратная задача состоит в реконструкции распределения электронной концентрации в узлах регулярной сетки на основе имеющегося набора интегральных значений и проекционного оператора. В качестве проекционного оператора для дискретизации функции распространения зондирующего сигнала была использована кусочно-планарная аппроксимация. Сетка реконструкции в плоскости орбиты ИСЗ, т. е. в плоскости измерений задавалась с шагом 100 км по высоте и 1° по широте. Для решения системы линейных уравнений применялся метод алгебраической реконструкции ART [6].

Качество восстановления исходного распределения зависит от различных параметров, основным из которых является достаточное количество проекций зондируемой среды в реконструируемой области и количество лучей в каждой проекции [7]. Оценка количества проекций может быть произведена средствами аналитической геометрии. Для этого определяется величина заполнения реконструируемой области лучами (геометрическими путями

сигнала) различных проекций. Далее будем обозначать эту зависимость как коэффициент покрытия зондируемого пространства или просто коэффициент покрытия K_f . Количественная оценка данного коэффициента рассчитывается как отношение количества заполненных ячеек сетки реконструкции N_f к их общему количеству N , приведенное к 100%:

$$K_f = N_f / N \cdot 100.$$

При регистрации максимального количество проекций для всех высот, коэффициент покрытия $K_f = 100\%$, что достаточно для нахождения единственного решения задачи томографической реконструкции. В этом случае для восстановления распределения электронной концентрации может быть использовано обратное преобразование Радона. Как будет показано ниже, для достижения $K_f = 100\%$ за требуемое количество времени (15 мин) необходимо очень большое количество КА. Данный коэффициент был введен для экспресс-оценки потенциала модельной конфигурации схемы регистрации.

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

$$\delta_2 = \delta(l^2) = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \tag{1}$$

$$\delta_m = \delta(l^\infty) = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|}.$$

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 являться основным критерием пригодности выбранных параметров орбитальной группировки.

Восстановление распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием низко- и среднеорбитальных ИСЗ

На первом этапе была проанализирована возможность томографической реконструкции поля электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты КА системы FORMOSAT-3/COSMIC (F3C). В данном случае источником когерентных сигналов являются среднеорбитальные КА системы GPS, а приемники установлены на НО КА системы F3C. Для томографической реконструкции использовались кодовые измерения характеристик прошедших через ионосферу сигналов КА GPS, находящихся в плоскости, максимально приближенной к плоскости орбиты КА F3C. Отобранные измерения ПЭС проецировались на орбитальную плоскость F3C и корректировались с учетом магнитосферной поправки, после чего решалась задача двумерной томографии. При реконструкции разреза электронной концентрации использованы данные за 1 виток НО КА.

Результаты обработки данных с нескольких десятков витков КА F3C показали, что недостаток проекций не позволяет восстановить распределение с достаточной точностью, а недостаток измерений (малое количество источников сигнала) является причиной существования областей, для которых отсутствуют измерения. Площадь этих областей занимает около 50% площади ионосферы, находящейся в плоскости орбиты НО КА.

Недостаточное количество проекций и информации, а также неточности в измерениях ПЭС делают задачу реконструкции распределения электронной концентрации по данным F3C методом лучевой томографии практически неразрешимой.

Тем не менее, реконструкция пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере по данным ПЭС, регистрируемым на КА F3C, представляется возможным. Для этого необходимо отказаться от двумерного подхода и восстанавливать объемное и, возможно временное, распределение электронной концентрации, разложенной в пространственно-временные ряды по набору базисных функций. При такой постановке задачи для выявления глобальных изменений как в пространстве, так и во времени, достаточно восстановить ограниченный набор коэффициентов разложения. Проверка подобного подхода для наземных приемных станций была произведена Кожариным и Кунициным [8].

Второй этап работы состоял в определении облика орбитальной группировки способной пре-

доставлять данные ПЭС ионосферы для восстановления распределения электронного содержания с помощью двумерной томографии. При этом измерения за 1 виток должны собираться в течение 15 мин.

Были рассмотрены два типа конфигурации группировки. Первая аналогична F3C-GPS, однако, с большим количеством приемников на низкой орбите и использованием сигналов не только GPS, но и ГЛОНАСС. Вторая – с размещением как приемников, так и передатчиков на НО КА.

Для оценки качества реконструкции распределения электронного содержания в ионосфере по данным сигналов ГНСС, зарегистрированных на модельных группировках НО КА, было проведено томографическое восстановление модельного распределения электронной концентрации. Количество КА на низкой орбите определялось по насыщению функции зависимости коэффициента заполнения K_f от количества КА. Рассматривались варианты с максимальным в настоящее время заполнением орбитальных плоскостей – 5 КА GPS и 6 КА ГЛОНАСС, а также их совместное использование. Для всех вариантов характерно прекращение роста K_f после увеличения количества НО КА более 60. Величина K_f для 60 НО КА составляет 27–40% в зависимости от количества КА ГНСС. В качестве схемы регистрации ПЭС использованы следующие конфигурации источника радиосигнала:

– 5 КА GPS;

– 6 КА ГЛОНАСС;

– 5 КА GPS + 6 КА ГЛОНАСС.

В каждом случае использовалось 60 НО КА, равномерно размещенных по орбите с высотой 1000 км. Частота регистрации данных составляла 1 Гц. Распределение электронной концентрации (рис. 1, а) задавалось с помощью модели ионосферы NeQuick, размер элемента изображения 100×100 км.

На рис. 1, б, в, г приведены результаты восстановления распределения электронной концентрации с помощью алгоритма ART. В качестве начального приближения использовалось постоянное значение $4 \cdot 10^{11}$ эл·м⁻³.

Как видно из реконструкций, ни один из вариантов, возможных при существующей конфигурации КА ГНСС, не позволяет восстановить распределение электронной концентрации в ионосфере за время 15 мин. Основной причиной этого является недостаточное количество данных, получаемых при такой схеме регистрации.

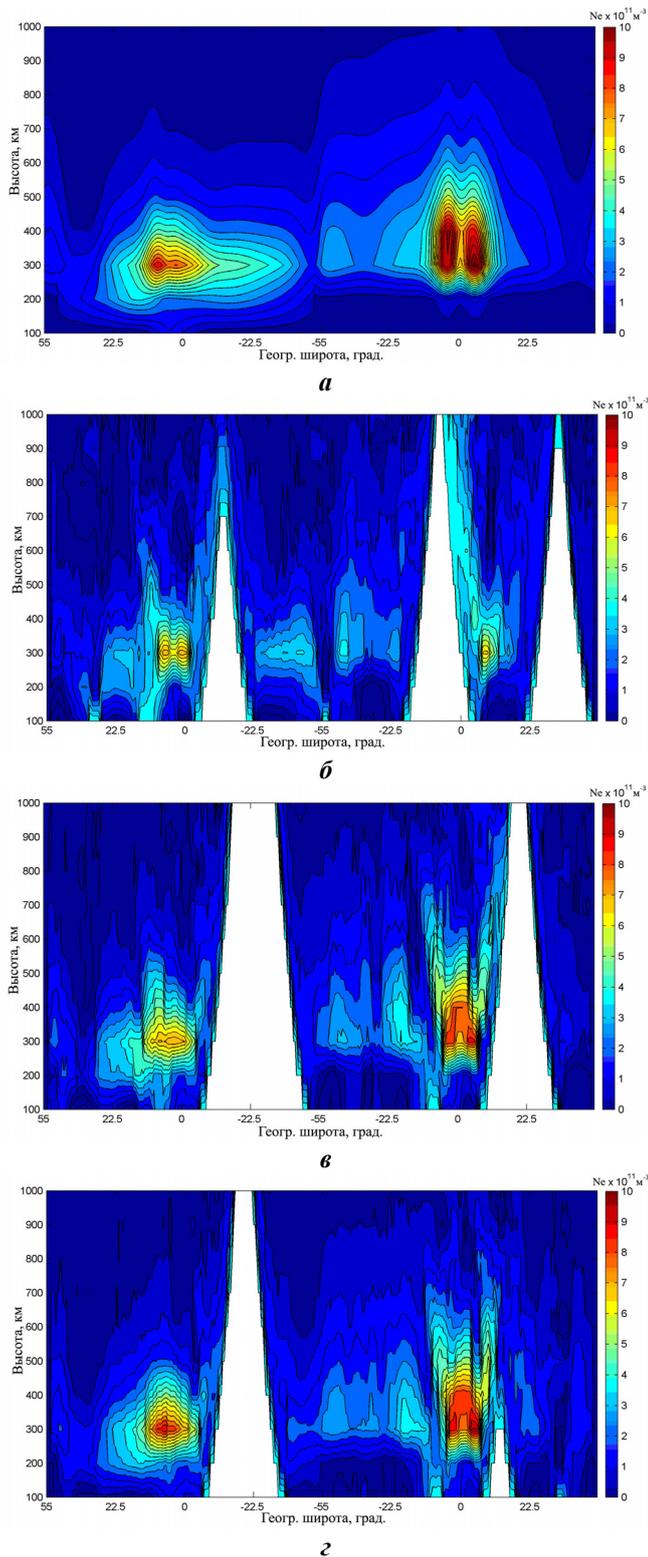


Рис. 1. Распределение электронной концентрации в ионосфере в плоскости орбиты ГНСС в координатах широта – высота над уровнем моря, цветом кодированы значения электронной концентрации (10^{11} эл·м⁻³); а – модельное распределение; б – реконструкции, полученные при использовании 5 КА GPS; в – 6 КА ГЛОНАСС;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

Таблица 1

Ошибки реконструкции (1) при различных вариантах использования 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

Ошибки реконструкции показывают (табл. 1), что при использовании рассмотренных схем регистрации с 60 приемниками на низкой орбите в случае 5 КА GPS или 6 КА ГЛОНАСС, а также при их совместном применении, средняя ошибка будет составлять не менее 34% ($\delta_2 = 0,34$).

Результаты расчета времени, необходимого для достижения коэффициента покрытия K_f 100% при использовании передатчиков ГНСС (для варианта 5 КА GPS + 6 КА ГЛОНАСС), дают величину экспозиции не менее 130 мин при количестве НО КА не менее 50.

Восстановление распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием низкоорбитальных ИСЗ

Для оценки качества реконструкции распределения электронного содержания в ионосфере по данным низкоорбитальных группировок, было проведено томографическое восстановление модельного распределения электронной концентрации. В качестве схемы регистрации ПЭС использовались полученные в результате моделирования различных вариантов и отобранные по максимальному коэффициенту покрытия K_f следующие конфигурации размещения КА на низкой орбите:

- 72 КА (40 передатчиков, 32 приемника, разнонаправленное движение) $K_f = 100\%$;
- 56 КА (32 передатчика, 24 приемника, сонаправленное движение) $K_f = 100\%$;
- 36 КА (20 передатчиков, 16 приемников, сонаправленное движение) $K_f = 95\%$.

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

На рис. 2, а, б, в, приведены результаты восстановления распределения электронной концентрации с помощью алгоритма ART за 20 итераций. 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 табл. 2.

Таблица 2

Ошибки реконструкции (1) для различных вариантов ОГ

Ошибка/ОГ	72 КА	56 КА	36 КА
δ_2	0,05	0,06	0,09
δ_m	0,09	0,09	0,13

Результаты реконструкции модельного распределения электронной концентрации в ионосфере для рассмотренных вариантов низкоорбитальных ОГ демонстрируют хорошее качество восстановления и достаточно низкие значения ошибок. Наилучший результат получен для группировки из 72 КА (рис. 2, а), реконструкция практически идентична модельному распределению, средняя ошибка восстановления 5% ($\delta_2 = 0,05$), максимальная (δ_m) 9%. Подобными характеристиками обладает и реконструкция, полученная при помощи ОГ из 56 КА (рис. 2, б). Томографическая реконструкция, полученная с помощью схемы регистрации (рис. 3) на основе 36 КА (рис. 2, в), характеризуется средней ошибкой 9% и максимальной 13%.

Сравнительный анализ рассмотренных схем регистрации

Схема регистрации ПЭС ионосферы с использованием сигналов ГНСС обладает следующими положительными характеристиками:

- существование и функционирование ОГ ГНСС;
- существование разработанной приемной аппаратуры для навигационных сигналов L-диапазона.

В то же время данному подходу, с учетом введенных ограничений, присущи следующие недостатки:

- существующее количество среднеорбитальных КА в одной орбитальной плоскости, а также их малые угловые скорости недостаточны для получения в течение 15 мин необходимого для качественной реконструкции количества измерений;
- взаимное прецессирование орбит низко- и среднеорбитальных КА предполагает постоянную смену используемой плоскости ГНСС, при этом межплоскостные углы составляют в зависимости от группировки ГНСС 60° или 120°;
- наклонение орбит ГНСС 55° или 64° не позволяют получать данные для полярных областей ионосферы;
- большая протяженность зондирующих сигналов в области магнитосферы и исключение магнитосферной составляющей из измерений может быть источником ошибок определения ПЭС ионосферы;
- большое количество НО КА, требуемых для получения максимального количества проекций.

В схеме регистрации ПЭС с использованием только НО КА, наоборот, преобладают положительные стороны:

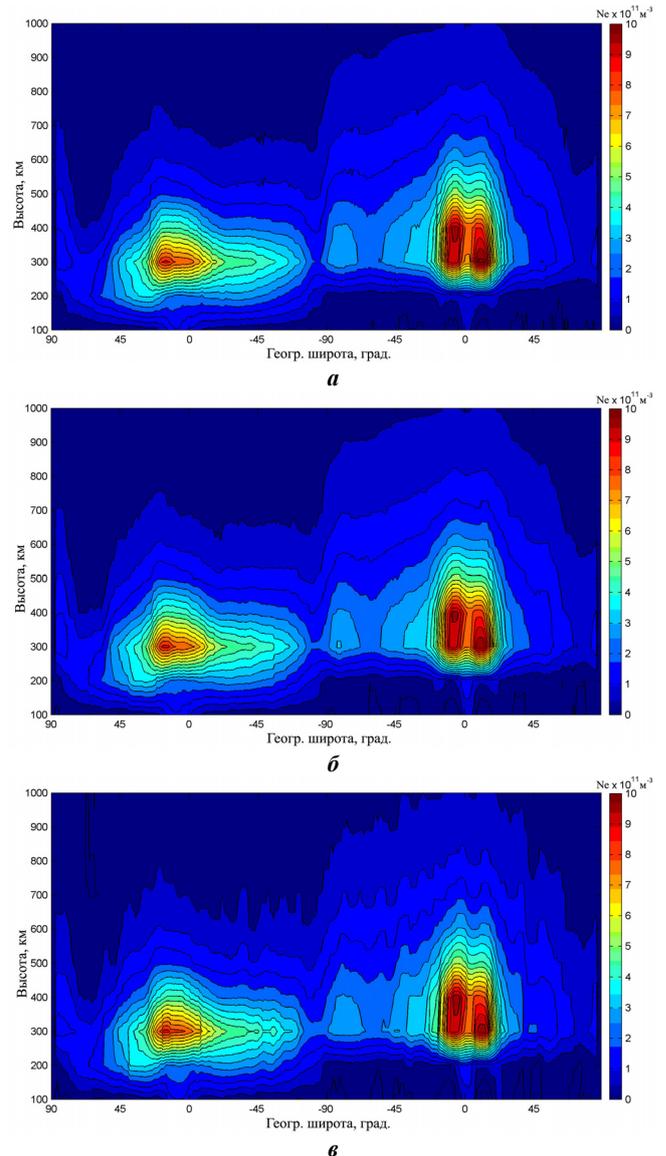


Рис. 2. Распределение электронной концентрации в ионосфере в плоскости полярной орбиты в координатах широта-высота: а – реконструкция 72 КА; б – реконструкция 56 КА; в – реконструкция 36 КА; цветом показана концентрация электронов в элм⁻³

- принципиальная возможность получения полного набора данных, необходимых для качественной реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере за период 15 мин;
- постоянное нахождение как приемников, так и передатчиков в одной орбитальной плоскости (отсутствие взаимной прецессии);
- возможность размещения НО КА на полярных орбитах для получения данных об ионосфере на всех возможных широтах;
- возможность реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере при сравнительно малом количестве КА в орбитальной плоскости (36) с ошибками восстановления ~ 9%.

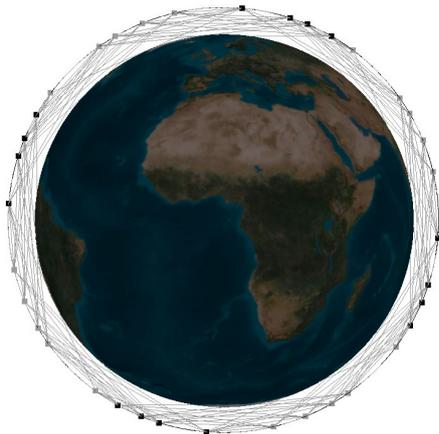


Рис. 3. Расположение 36 КА в плоскости орбиты перспективной группировки; черными значками обозначены КА-передатчики; серыми – КА-приемники

К недостаткам подхода с использованием НО КА следует отнести отсутствие разработанной аппаратуры для многочастотного радиопросвечивания ионосферы, позволяющей определять абсолютное ПЭС.

Заключение

В работе проведены исследования возможности восстановления вертикального распределения ионосферы методом радиотомографии без использования наземных приемных установок. Результаты исследований свидетельствуют, что при постановке задачи (период регистрации 15 мин, приемники и передатчики находятся в одной орбитальной плоскости) использование КА ГНСС в качестве источника зондирующего сигнала не позволяет решить задачу восстановления распределения электронной концентрации с точностью лучше ~ 35% независимо от количества и расположения НО КА. При этом минимальное количество НО КА для достижения указанной точности составляет 60.

В то же время использование приемной и передающей аппаратуры на НО КА, находящихся в одной орбитальной плоскости, позволяет получить распределение электронной концентрации с точностью 5 – 9% в зависимости от количества и расположения НО КА. Из рассмотренных вариантов построения орбитальной группировки наиболее оптимальным по соотношению количество КА – ошибка восстановления является вариант с 36 КА (20 передатчиков и 16 при-

емников) на высоте 1000 км, позволяющий на основе данных, полученных в течение 15 мин, восстановить распределение электронной концентрации в плоскости орбиты на высотах 100 – 1000 км со средней точностью 9%. Основным недостатком этого варианта остается достаточно большое количество КА в ОГ. Уменьшение их количества может быть достигнуто путем увеличения времени экспозиции и разработки специализированных методов обработки данных.

Подобный подход к определению вертикального распределения электронной концентрации в ионосфере может быть использован в перспективе при создании космической системы мониторинга геофизической обстановки.

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

Литература

1. Attenuation and scintillation of radio waves in the Earth's atmosphere from radio occultation experiment on satellite-to-satellite links / O. I. Yakovlev, S. S. Matyugov, I. A. Vilkov // Radio Science. – 1995. – Vol. 30. – № 3. – P. 591 – 602.
2. Initial Results of Radio Occultation Observations of Earth's Atmosphere Using the Global Positioning System / E. R. Kursinski, G.A. Hajj, W. I. Bertiger [et al.] // Science. – 1996. – № 271. – P. 1107 – 1110.
3. Куницын В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 336 с.
4. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России / А.А. Романов, С.В. Трусов, А.А. Романов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – М., 2008. – № 2. – С. 14 – 20.
5. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала / Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 111. – С. 31 – 36.
6. Методы реконструкций изображений, основанные на разложении в конечные ряды / Я. Ценсор // ТИИЭР. – М., 1983. – Т. 71. – № 3. – С. 148 – 160.
7. Malcolm Slaney Principles of computerized tomographic imaging / C. Kak Avansh // IEEE Press. – 1999. – 329 p.
8. Детектирование и исследование временного развития крупных ионосферных структур с помощью данных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС / М. А. Кожарин, В. Е. Куницын // Труды VII Сессии молодых ученых. Секция «Дистанционное зондирование» БШФФ-2004. – С. 60 – 63.

Поступила в редакцию 10.07.2009

Александр Алексеевич Романов, канд. физ.-мат. наук, руководитель Проекта, т. +7(495)673-99-34, e-mail: romulas@rniikp.ru.

Сергей Викторович Трусов, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, т. +7(495)673-99-34, e-mail: trusov@rniikp.ru.

Алексей Васильевич Новиков, науч. сотрудник, т. 7(495)673-99-34, e-mail: novikovav@rniikp.ru.

Анна Владимировна Аджалова, инженер-исследователь, т. +7(495)673-99-34, e-mail: adjalova@rniikp.ru.

Алексей Александрович Романов, д-р техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. +7(495)673-99-34, e-mail: romanov@rniikp.ru.

Виктор Александрович Селин, начальник, т. +7(495)755-54-25.