

что в рассматриваемый день наблюдаются синхронные возмущения как в кросскорреляционной фазе сигнала ИР, так и в плотности электронов. Теоретически существует возможность связать скорость изменения фазы со скоростью ветра вдоль угломестного направления в антенной СК. Возможности ИРНР позволяют также исследовать коэффициент корреляции и в азимутальном направлении и получить в итоге размер (в азимутальном и угломестном направлениях) и полный вектор скорости мелкомасштабных неоднородностей пересекающих сектор сканирования ИРНР.

Антенная система ИРНР может рассматриваться как интерферометр с базой 5 м, эффективной шириной ДН передатчика и приемников 4,55 град. Получено выражение, связывающее амплитуду коэффициента когерентности и эффективный размер неоднородности гауссовой формы и аргумент коэффициента когерентности (кросскорреляционная фаза) с положением центра наблюдаемого возмущения. Выражение для коэффициента когерентности получено с учетом особенностей антенной системы ИРНР. Показана возможность использования фазы коэффициента когерентности ИР сигнала для абсолютной калибровки разности фаз между каналами антенны.

В результате проведенных измерений 15 февраля 2011 г. получена синхронная динамика вариаций кросскорреляционной фазы и плотности электронной концентрации. Полученная динамика вариаций кросскорреляционной фазы сигнала ИР и модуля коэффи-

циента когерентности может быть вызвана перемещающимися неоднородностями размером примерно 10 км.

#### Библиографические ссылки

1. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А. П. Потехин, А. В. Медведев, А. В. Заворин и др. // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 356–362.
2. Лебедев В. П. Интерференционные наблюдения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Журн. радиоэлектроники. 2010. Спец. вып. С. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. // Stage 2 report. I: April 2006 [Electronic resource]. URL: [http://eiscat.se/groups/EISCAT\\_3D\\_info/WP5\\_Interferometry\\_Stage2\\_Report\\_April06.pdf](http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf).

#### References

1. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V. et al. Kosmicheskie issledovaniya, 2008. Vol. 46. № 4, pp. 356–362.
2. Lebedev V. P. Zhurnal Radioelektroniki. 2010. P. 555–571.
3. Grydeland Tom and Cesar La Hoz. WP5: Fundamentals of radar interferometry. One baseline. Stage 2 report. I: April 2006. Available at: [http://eiscat.se/groups/EISCAT\\_3D\\_info/WP5\\_Interferometry\\_Stage2\\_Report\\_April06.pdf](http://eiscat.se/groups/EISCAT_3D_info/WP5_Interferometry_Stage2_Report_April06.pdf).

© Лебедев В. П., Медведев А. В., Толстиков М. В., 2013

УДК 551.501.8

### ДВУМЕРНАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. А. Романов, С. В. Трусов, А. А. Романов, О. И. Барабошкин, С. А. Бобровский

ОАО «Российские космические системы»

Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53. E-mail: [gomanov@rniikp.ru](mailto:gomanov@rniikp.ru)

*Представлены результаты создания информационной технологии радиотомографии ионосферы и перспективы ее развития, дано описание применяемых подходов и выходных информационных продуктов. В настоящее время технология используется при создании системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ.*

*Ключевые слова: радиотомография, томография ионосферы, информационная технология.*

### 2-DIMENSIONAL IONOSPHERE RADIOTOMOGRAPHY: THE EXISTING AND PERSPECTIVE TECHNOLOGIES

A. A. Romanov, S. V. Trusov, A. A. Romanov, O. I. Baraboshkin, S. A. Bobrovskij

JSC “Russian Space Systems”

53 Aviamotornaya st., Moscow, 111250, Russia. E-mail: [romanov@rniikp.ru](mailto:romanov@rniikp.ru)

*The results of ionosphere radiotomography information technology development are presented and the ways of their evolution are listed. The used algorithms, techniques and output information flows are described. This technology currently using in the construction of Russia geophysical environment monitoring system.*

*Keywords: radiotomography, ionosphere tomography, information technology.*

Начиная с 2008 г. в России Росгидрометом создается система мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ (СМГФО), основной задачей которой является выявление неоднородностей (неоднородных геофизических структур) различного происхождения в верхней атмосфере, ионосфере, околоземном космическом пространстве [1]. В качестве источников информации о состоянии ионосферы в СМГФО, помимо средств вертикального и наклонного радиозондирования входит подсистема радиотомографии ионосферы, которая состоит из сетей двумерной и трехмерной радиотомографии. Двумерная радиотомография является одним из наиболее эффективных способов определения электронной концентрации в ионосфере на высотах 100–1 000 км, благодаря использованию когерентных сигналов низкоорбитальных спутников. Подобный подход [2] используется уже около 20 лет, однако создание СМГФО потребовало значительного пересмотра реализации метода и модернизации программных и аппаратных средств для обеспечения высокой степени автоматизации процесса регистрации и синхронной работы большого количества территориально разнесенной аппаратуры. В результате была разработана информационная технология радиотомографии ионосферы и соответствующее аппаратное обеспечение, описание которых приводится в данной работе.

**Разработка технологии двумерной РТ ионосферы.** Основным принципом двумерной радиотомографии ионосферы является синхронная регистрация изменения разности фаз двух когерентных сигналов (150 и 400 МГц), пропорциональная изменению относительного полного электронного содержания, от спутников с полярной орбитой на сети приемных установок, расположенных в меридиональном направлении, и последующая реконструкция распределения электронной концентрации по полученным измерениям.

Разработанные до 2008 г. аппаратура приема и методика сбора и обработки данных [2] не позволяли оперативно получать карты распределения электронной концентрации, а также имели ограниченный диапазон используемых спутников. За рубежом единственная система радиотомографии ионосферы, работающая в режиме близком к реальному времени, была только в США, где велись наблюдения ионосферы над нагревным стендом HAARP, однако принципы ее работы в литературе описаны не были. В настоящее время эта система не работает.

Таким образом, для реализации двумерной радиотомографии ионосферы в СМГФО возникла необходимость в создании нового приемного оборудования и программного обеспечения, которое позволяло бы осуществлять мониторинг ионосферы с использованием большого количества удаленных приемных станций и обеспечивало бы быстрое формирование карт распределения электронной концентрации.

Для достижения высокой скорости получения и обработки данных, все новое программное и аппаратное обеспечение изначально разрабатывалось для работы в сети Интернет. В итоге были разработаны типовой сетевой радиотомографический приемник для регистрации ионосферной задержки когерентных сиг-

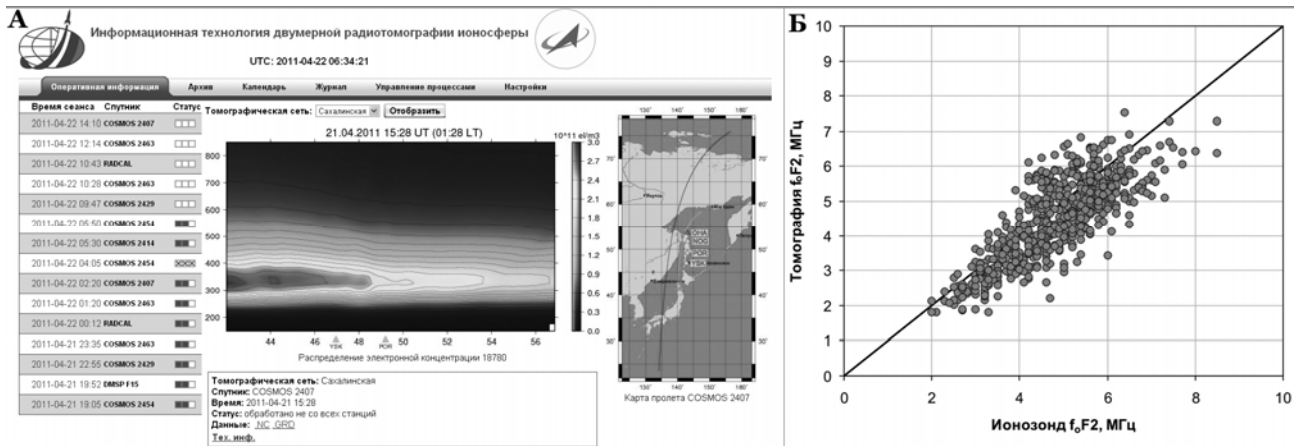
налов и сервер информационной технологии обработки данных от сетей радиотомографических приемников.

Радиотомографический приемник позволяет производить прием и тематическую обработку когерентных сигналов находящихся в диапазоне  $\pm 300$  ppm относительно центральных частот 150, 400 МГц, что позволяет осуществлять наблюдение за ионосферой с использованием соответствующих спутников, в частности COSMOS (2407, 2414, 2429, 2454, 2463), OSCAR (23, 25, 31, 32), FORMOSAT-3 FM (1–6), RADCAL, DMSP F15. В число основных функций входят: расчет разностной фазы и относительной интегральной электронной концентрации и ее градиента на линиях визирования спутник-приемник, а также осуществление координатно-временной привязки измерений [3].

Базовыми элементами информационной технологии являются клиентское и серверное программное обеспечение (ПО). Клиентское ПО осуществляет предварительную обработку результатов наблюдений и передачу их на сервер по протоколу HTTP. Серверное ПО в свою очередь осуществляет получение данных, томографическую обработку информации с сети приемных установок. На основе анализа метаинформации в поступившем с приемника файле, осуществляется идентификация полученных данных определенному, заранее предрасчитанному сеансу радиопросвечивания. После этого данные проходят процедуру координатно-временной привязки. При наличии более двух файлов наблюдений для одного сеанса запускается модуль решения томографической задачи. Применяемая в серверном ПО методика томографической обработки данных имеет в основе своей метод фазоразностной томографии [2].

В логике и структуре серверного ПО реализована возможность одновременной работы с несколькими сетями приемников. По предварительным оценкам один сервер способен одновременно обслуживать до 10 сетей по 5 приемников в каждой. Количество обслуживаемых приемников определяется, преимущественно, параметрами быстродействия вычислительной машины, используемой в качестве сервера. Информация о распределении электронной концентрации в районе мониторинга доступна через 5 мин после регистрации спутникового сигнала на приемных установках. Подробное описание технологии приводится в работе [4].

**Результаты работ.** Основным информационным продуктом информационной технологии являются карты высотного распределения электронной концентрации ионосферы (томограммы) над сетями радиотомографических приемников (см. рисунок). Разрешение карт составляет 25 км по высоте и 50 км вдоль сети. Протяженность томограмм определяется размером сети приемных установок. В настоящее время самая протяженная сеть Мурманск–Майкоп (всего 7 приемников) позволяет получать томограммы протяженностью около 3 300 км. С использованием технологии работают еще 3 сети в России, одна из которых расположена в европейской части страны, одна на о. Сахалин и одна на Камчатке. Первые две сети входят в состав СМГФО, вторые – экспериментальный полигон для отработки технологии радиотомографии, развернутый ОАО «Российские космические системы» (<http://tomo.ionospace.ru>).



Карта распределения электронной концентрации в веб-интерфейсе информационной технологии (а) и график сопоставления определения критической частоты с помощью информационной технологии и ионозонда (б)

Оценка точности получаемых томограмм проводится с использованием измерений ионозондов, расположенных в районе наблюдений. Сопоставление двух рядов наблюдений в течение года показывает (около 700 синхронных измерений в точке), что в целом наблюдается хорошее соответствие, коэффициент корреляции 0,8. Средняя невязка равна 0,67 МГц, что составляет 7 % от максимального значения, зарегистрированного ионозондом за год и 14 % от среднего (см. рисунок).

**Перспективы.** В целях повышения точности реконструкции электронной концентрации ионосферы с помощью описанной технологии, в настоящее время ведется работа по реализации учета эффекта рефракции при решении задачи томографии, учету наклона зондируемого объема ионосферы, поиску наиболее эффективного способа подбора начального приближения. В идеале необходимо уменьшить ошибку в определении электронной концентрации до 0,1 МГц в терминах критической частоты. Также планируется расширить спектр информационных продуктов за счет наблюдений ионосферных мерцаний амплитуды зондирующих радиосигналов (индекс S4), графиков временной изменчивости полного электронного содержания в точке, а также автоматически выделяемых неоднородностей электронной концентрации.

У описанного выше метода радиотомографии есть одно существенное ограничение – система регистрации привязана к определенной территории Земли. Для того чтобы избавиться от этого недостатка была проведена моделирование системы радиотомографии ионосферы, в которой и приемники и передатчики находятся на малоразмерных космических аппаратах (МКА). В итоге были найдены варианты взаимного расположения МКА, которые в перспективе позволят создать систему глобального мониторинга ионосферы. В частности, для формирования орбитальной группировки МКА был предложен кластерный способ размещения спутников, при котором несколько (4–6) МКА размещаются в пределах взаимной радиовидимости и образуют самодостаточную для последующей реконструкции электронной концентрации ионосферы систему регистрации. Для увеличения частоты сканирова-

ния ионосферы в каждую орбитальную плоскость выводится до четырех кластеров МКА. При кластерном расположении спутников средние ошибки реконструкции составили 32–35 %, при количестве аппаратов не более 20 и времени накопления информации около 20 минут. Исследование показало, что использование результатов работы моделей ионосферы в качестве априорной информации, позволяет уменьшить средние ошибки реконструкции до 5–10 % [5].

В результате проведенных работ создана технология для оперативного получения широтных разрезов электронной концентрации ионосферы. Благодаря высокой скорости обработки томографических измерений (5–10 мин) и доступности результатов по сети Интернет, данная технология может быть с успехом использована как для мониторинга ионосферы в гидрометеорологических целях, так и в целях поиска неоднородностей естественного и искусственного происхождения.

#### Библиографические ссылки

1. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы / В. В. Алпатов, В. Е. Куницын и др. // Гелиогеофизические исследования, 2012. Вып. 2. С. 60–71.
2. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
3. Сетевой программно-аппаратный комплекс двумерной томографии ионосферы / С. В. Трусков, А. А. Романов, А. В. Аджалова и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 142–148.
4. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы / С. В. Трусков, А. А. Романов, А. В. Новиков, А. А. Романов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. № 6. С. 317–323.
5. Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения / А. А. Романов и др. // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 111. № 4. С. 37–42.

### References

1. Alpatov V. V., Kunitsyn V. E. et al. Geliogeofizicheskie issledovaniya, 2012, vol. 2, pp. 60–71.
2. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. Radiotomografija ionosfery. Moscow, Fizmatlit, 2007. 336 p.
3. Trusov S. V., Romanov A. A., Adjalova A. V. et al. Sovr. problem dist. zond. Zemli iz kosmosa, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 142–148.
4. Trusov S. V., Romanov A. A., Novikov A. V., Romanov A. A. Sovr. problem dist. zond. Zemli iz kosmosa. No. 6, vol. II, 2009, pp. 317–323.
5. Romanov A. A., Trusov S. V., Novikov A. V et al. Voprosy elektromehaniki, 2009, vol. 111, no. 4, pp. 37–42.

© Романов А. А., Трусов С. В., Романов А. А., Барабошкин О. И., Бобровский С. А., 2013

УДК 621.396.2.029.5

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОНЧ-ИМПУЛЬСНОГО ПОТОКА В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЕ\*

И. Б. Нагуслаева, Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: idam@mail.ru

*Рассмотрены пространственно-временные и частотные характеристики ОНЧ-импульсного потока естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ) в Байкальской рифтовой системе на частотах 2, 7 и 14,5 кГц. Отмечен высокий уровень пространственной корреляции естественного электромагнитного поля.*

*Ключевые слова: естественное электромагнитное поле, ОНЧ-импульсный поток.*

### SPACE-TIME VARIATIONS OF INTENSITY OF VLF-PULSE STREAM IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM

I. B. Naguslaeva, Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
6 Sakhjanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: idam@mail.ru

*The article considers the space-time and frequency characteristics of the VLF-pulse stream of the natural electromagnetic field of the Earth in the Baikal rift system on frequencies 2, 7 and 14,5 kHz., along with the revealed high level of space-time correlation of the natural electromagnetic field.*

*Keywords: natural electromagnetic field, VLF-pulse stream.*

В последнее время возрос интерес к проблемам электромагнитного окружения Земли. Электромагнитное поле является важнейшим фактором окружающей среды, тесно взаимосвязанным с другими составляющими природного комплекса планеты и воздействующим на жизнедеятельность человека. Наряду с традиционными проявлениями грозового электричества (выведение из строя систем электронного обеспечения, воздействие на авиацию, пожароопасность) и совершенствованием методов их контроля, все большее внимание привлекают проблемы электромагнитного загрязнения и его воздействия на экосистемы и человека.

Цель работы – провести сравнительный анализ характеристик ОНЧ-импульсного потока в различных пунктах юга Сибири, разнесенных в пространстве до 300 км. Измерения ОНЧ-импульсного потока магнитной компоненты ЕЭМПЗ проведены в Восточных Саянах (пункты наблюдений (ПН) «Толтой», «Торь»),

на берегу средней части озера Байкал (пункт наблюдения «Горячинск») и на стационаре «Верхняя Березовка» вблизи г. Улан-Удэ с помощью многоканальных геофизических регистраторов МГР-01М и МГР-01 [1]. Следует отметить, что при проведении одновременных измерений работа всех каналов регистраторов синхронизировалась, параметры усилительных трактов каналов и режимы регистрации на одинаковых частотах были идентичны. Измерения в ПН «Толтой» проведены с 18 по 22 июля 2011 г. на частотах 2,7 и 14,5 кГц с помощью МГР-01М. Установлен высокий уровень ОНЧ-импульсного потока на частоте 14,5 кГц в ПН «Толтой» относительно базовой станции «Верхняя Березовка», где с 2008 г. непрерывно работает регистратор МГР-01 на частоте 14,5 кГц (рис. 1, а). Так, в минимуме ОНЧ-импульсного потока на частоте 14,5 кГц по направлению приема «север–юг» с 7 до 8 ч утра 19 июля 2011 г. в ПН «Толтой» зарегистри-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 11 «Литосферно-ионосферные взаимодействия в Байкальской рифтовой системе» и гранта РФФИ №12-02-98002 с использованием стационаров «Верхняя Березовка» и «Горячинск».