

## Сетевой программно-аппаратный комплекс двумерной томографии ионосферы

С.В. Трусов<sup>1</sup>, А.А. Романов<sup>1</sup>, А.В. Аджалова<sup>1</sup>,  
С.А. Бобровский<sup>1</sup>, А.А. Романов<sup>1</sup>, В.О. Лось<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Российские космические системы»

111250 Москва, ул. Авиамоторная, 53

E-mails: romulas@rniikp.ru

<sup>2</sup> ГУП НПП «СПУРТ»

124460 Москва, Зеленоград, 4-ый Западный пр-д, корпус Д

Разработанный сетевой программно-аппаратный комплекс предназначен для автоматического проведения измерений относительного полного электронного содержания в ионосфере. Подобные данные являются исходными в задаче двумерной томографии ионосферы.

Последовательно было разработано две версии комплексов, способных принимать когерентные сигналы радиомаяков с частотами 150, 400 и 1067 МГц  $\pm$  300 ppm. Комплексы имеют встроенную поддержку сетевых возможностей, что позволяет оперативно передавать результаты наблюдений, а также осуществлять удаленный контроль работы через встроенный веб-интерфейс. Разработанные комплексы отличаются компоновкой элементов. Первая версия состоит из трехчастотного приемника с соответствующей антенны, промышленного компьютера, источника бесперебойного питания и коммутатора. Вторая версия построена по принципу «все в одном»: в корпусе высотой 2U размещены приемник, ЭВМ и источник бесперебойного питания.

Помимо автономной работы, в программно-аппаратном комплексе поддерживается режим «В составе томографической сети», который обеспечивает синхронизацию комплекса относительно целевых спутников с другими станциями сети, что является одним из важнейших условий для решения задачи томографии, посредством обмена технической информацией с управляющим центральным сервером. На этот же сервер оперативно передаются результаты измерений. Синхронизированность измерений на сети приемных комплексов, оперативная передача данных на сервер и обработка этих данных с помощью специального томографического программного обеспечения позволяют получать широтные разрезы электронной концентрации в ионосфере в течение 5-10 минут после регистрации измерений.

**Ключевые слова:** ионосфера, ионосферный приемник, мониторинг ионосферы, томография ионосферы.

### Введение

Одним из наиболее эффективных способов определения электронной концентрации в ионосфере на всем диапазоне высот является томография среды с использованием сигналов низкоорбитальных спутников (150 и 400 МГц). Регистрация разности фаз двух когерентных сигналов от спутников с приполярной орбитой на сети приемных установок, расположенных в меридиональном направлении, дает возможность реконструировать распределение электронной концентрации по полученным проекциям интегральной характеристики. Подобный подход (Куницын и др., 2007) используется уже около 20 лет.

До последнего времени единственным приемным комплексом, используемым у нас в стране для радиопросвечивания ионосферы спутниковыми сигналами 150 и 400 МГц был комплекс, изготавливаемый Полярным Геофизическим институтом на базе серийной аппаратуры АДК-3М (Куницын, Терещенко, 1991). В силу конструктивных особенностей этого типа приемников данный комплекс не может принимать сигналы 65% действующих в на-

стоящее время передатчиков. В то же время управление приемной аппаратурой происходит через АЦП с устаревшим интерфейсом, а управляющее ПО функционирует только в старых версиях ОС Windows.

Зарубежные аналоги также не полностью удовлетворяют требованиям по приему максимального количества спутников. CIDR (<http://cidrray.siena-space.org>) (Coherent Ionosphere Doppler Receiver, Applied Research Laboratories The University of Texas at Austin, USA) – программно-аппаратный комплекс, способный принимать сигналы спутников с фиксированными отклонениями -80 ppm,+80 ppm,-145 ppm от номиналов частот 150.012 и 400.032 МГц.

Наиболее современный аналог ITS33S (<http://www.nw-re.us>) (Ionosphere Tomography Receiver, Northwest Research Engineering, LLC, USA) – программно-аппаратный комплекс, способный принимать сигналы спутников с номиналами частот 150.012, 400.032, 1067.67 МГц. Однако, даже его ширина полос от -220 ppm до + 80 ppm не позволяет ему принимать сигналы 4 из 5 российских спутников типа COSMOS-2414.

Во время проведения Пилотного проекта по диагностированию землетрясений в Дальневосточном регионе России в 2007 г. мы приобрели опыт эксплуатации российских приемников (Романов и др., 2008). Анализ этого опыта позволил сформировать требования к новому оборудованию, которое изначально было бы ориентировано на работу в сети Интернет и прием сигналов максимального количества спутников.

### **Подходы и результаты**

На основе анализа характеристик и функциональности существующей аппаратуры регистрации сигналов 150/400 МГц и выделения из них ионосферной составляющей были сформулированы следующие требования новым образцам техники.

- конструкция антенны и приемного оборудования должны обеспечивать прием сигналов всех современных радиопередатчиков целевого диапазона;

- аппаратные средства комплекса должны обеспечивать возможность штатного подключения к сети Интернет;

- программные средства комплекса должны обеспечивать кроссплатформенную возможность удаленного доступа к оборудованию по сети с целью доступа к данным и изменения режимов работы и получения телеметрической информации;

- конструкция приемного комплекса должна быть по возможности миниатюризована.

В соответствии с предъявленными требованиями было последовательно разработано 2 версии программно-аппаратного комплекса, идентичные по функциональным характеристикам и отличающиеся компоновкой структурных элементов.

В состав варианта 1 входят приемное устройство, антенна, промышленный компьютер, источник бесперебойного питания и коммутатор (рис. 1б). Все оборудование (кроме антенны) имеет стойное исполнение и размещается в телекоммуникационном шкафу 9U (60x60x70 см). По сравнению с прежними отечественными приемниками, вес нового приемного устройства был уменьшен с 25 до 6 кг. Однако общий вес комплекса остался достаточно большим.

Вариант 2 сделан по принципу «все в одном». Источник бесперебойного питания и ЭВМ встроены в корпус приемного устройства (рис. 1в). В результате такой компоновки

общий вес программно-аппаратного комплекса (без учета антенны и телекоммуникационного шкафа) был уменьшен с 50 до 9 кг, а занимаемый объем с 9U до 2U. Встроенный источник бесперебойного питания обеспечивает до 25 минут автономной работы при отключении внешнего питания.

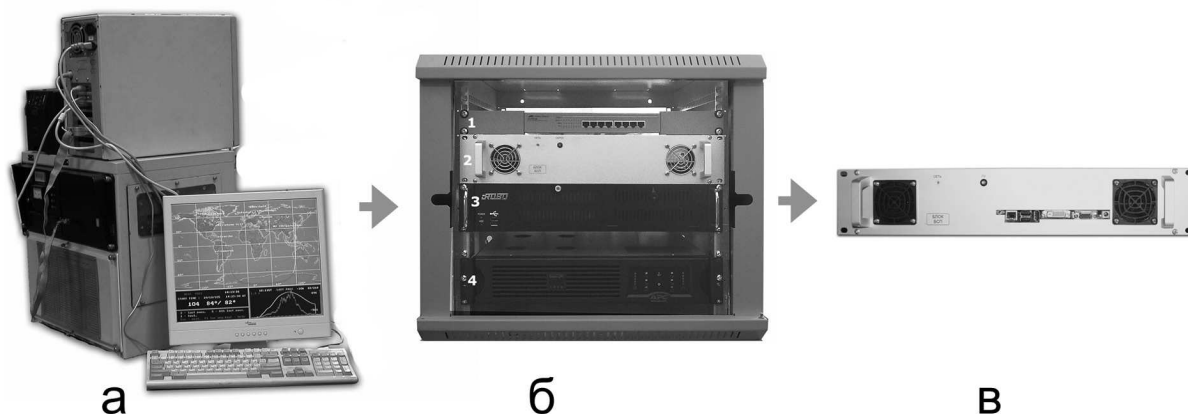


Рис. 1. Внешний вид программно-аппаратных комплексов приема и обработки данных радиопросвечивания ионосферы: а – 1 поколение (на базе аппаратуры ПГИ КНЦ РАН); б и в – версии 1 и 2 нового сетевого комплекса соответственно

Разработанные версии сетевых программно-аппаратных комплексов имеют идентичные функциональные возможности, основные из которых представлены ниже:

- прием и тематическая обработка когерентных сигналов находящихся в диапазоне  $\pm 300$  ppm относительно центральных частот 150, 400 и 1067 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;
- расчет разностной фазы и относительной интегральной электронной концентрации и ее градиента на линиях визирования спутник-приемник;
- осуществление координатно-временной привязки измерений;
- обмен технической и тематической информацией с указанными серверами сети Интернет;
- представление данных, а также изменение настроек и режимов работы комплекса посредством веб-интерфейса с использованием локальной или глобальной сети;
- подключение периферийных устройств (клавиатура, мышь, монитор) а также внешних USB-носителей.

Программно-аппаратный комплекс функционирует под управлением операционной системы OpenSuSe 11.1. Программное обеспечение написано на языках PERL, C++, Javascript. Для обработки и представления данных используются программные продукты GMT v.4, Apache v.2, PostgreSQL v.8., NetCDF v.4, jQuery v.1.7 и ряд модулей PERL.

Все функции управления приемным комплексом, а также контроль текущей работы доступны через многофункциональный веб-интерфейс (рис. 2). Регистрируемые данные сохраняются в формате NetCDF, который является одним из стандартов хранения данных геофизических наблюдений.

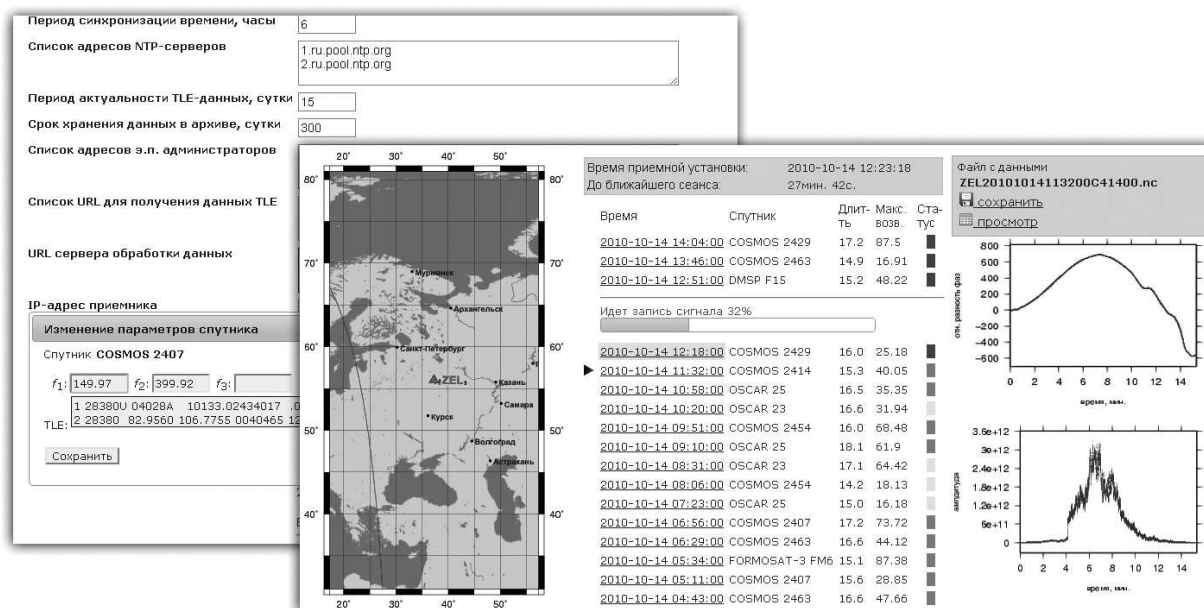


Рис. 2. Фрагменты страниц веб-интерфейса (задний план – интерфейс изменения настроек, передний план – интерфейс оперативного контроля работы изделия)

В приемном комплексе реализованы два режима работы: «В составе томографической сети» и «Автономная работа».

Режим «В составе томографической сети» предназначен для работы в составе томографической сети, при котором важна синхронизация приемных установок относительно целевого спутника. Это достигается использованием единого расписания, рассчитываемого на сервере обработки данных. Использование данного режима также обеспечивает оперативную томографическую обработку результатов радиопросвечивания на сервере посредством немедленной отправки результатов измерений.

Режим «Автономная работа» предназначен для работы комплекса без использования сервера обработки данных. Этот режим используется во время первичного тестирования на месте установки, или при невозможности подключить комплекс к сети Интернет. Принципиальными его отличиями от режима 1 являются:

- расчет расписания сеансов измерений на основе TLE-файла (а не получение от сервера);
- отключение функций отправки данных наблюдений и системных сообщений.

Проведение регистрации сигналов целевых спутников на сети из нескольких приемных комплексов, расположенных на расстоянии 200-300 км в меридиональном направлении, позволяет получать измерения необходимые для решения задачи двумерной томографии ионосферы. Для того чтобы оперативно получать сведения о распределении электронной концентрации в районе расположения приемных комплексов, требуется технология томографической обработки данных радиопросвечивания ионосферы. Такая технология была нами разработана и реализована параллельно с разработкой приемных комплексов, что позволило обеспечить согласованность обмена тематическими и техническими данными, между приемными комплексами и сервером сбора и обработки данных (Трусов и др., 2009).

Поскольку в большинстве случаев дорого или невозможно получить статический внешний IP-адрес для приемного комплекса, при организации обмена данными с сервером была выбрана схема, при которой подключение всегда инициирует приемный комплекс. Кроме отправки на сервер результатов измерений и выдержек из журнала системных сообщений, приемный комплекс периодически обращается к серверу за расписанием пролетов спутников, а также проверяет наличие инструкций для выполнения. Т.е. чтобы осуществить некоторую сервисную операцию (например, синхронизировать время, пересчитать расписание, перезагрузить ЭВМ, использовать новые параметры) необходимо указать подобную необходимость в веб-интерфейсе сервера.

Технология сбора и томографической обработки OXENGY позволяет получать карты высотного распределения электронной концентрации в течение 5-10 минут после пролета спутника над сетью приемных установок. Реализована поддержка одновременной работы с данными 10 территориально разнесенных сетей. Серверное ПО имеет широкие возможности по изменению параметров работы технологии и контролю процесса обработки, реализованных посредством веб-интерфейса. На рис. 3 приведены примеры карт распределения электронной концентрации в ионосфере, полученные в автоматическом режиме использованием приемных комплексов второй версии расположенных на о. Сахалин и технологии OXENGY, работающей на сервере в Москве (<http://ionospace.ru>).

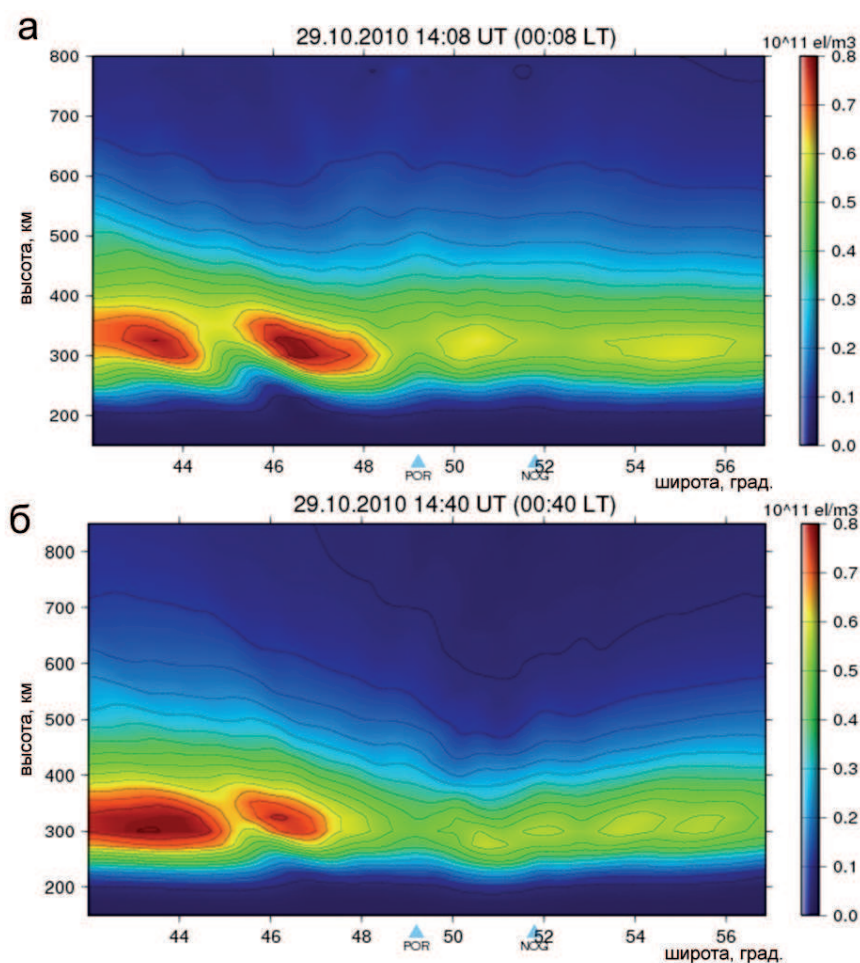


Рис. 3. Томографические реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере над о. Сахалин, полученные в автоматическом режиме с использованием разработанных приемных комплексов и технологии OXENGY. Данные получены с интервалом в 30 минут

## Заключение

В результате проведенных исследований было разработано два варианта программно-аппаратного комплекса для радиопросвечивания ионосферы, характеризующихся использованием новой элементной базы и современных технологических решений. Изначальная ориентированность комплекса на работу в сети Интернет позволяет существенно ускорить передачу данных для дальнейшей обработки, а также предоставляет возможность упростить удаленное администрирование приемника. Широкая полоса частот позволяет использовать сигналы всех доступных сегодня спутниковых радиомаяков с частотами 150, 400 и 1067 МГц  $\pm 300$  ppm. Миниатюризация приемного комплекса должна способствовать упрощению его транспортировки и эксплуатации.

Разработана информационная технология, позволяющая получать реконструкции электронной концентрации ионосферы в течение 5-10 минут после регистрации данных на приемных установках. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие работоспособность выбранных технических решений. Работы по созданию приемных комплексов осуществлялось в рамках ФЦП «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008-2015 годы» и Федеральной Космической программы РФ на 2006-2015 гг.

## Литература

1. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 С.
2. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д.*, Радиотомография ионосферы. М.: Наука, 1991. 210 с.
3. *Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г.* Томографическая реконструкция вертикального распределения электронной концентрации ионосферы в дальневосточном регионе России // Труды научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», посвященной 50-летию Первого искусственного спутника Земли, 19-21 июня 2007 г. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 278-284.
4. *Трусов С.В., Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А.* Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009. Вып. 6. Т. 2. С.317-323.

## Network receiver for 2D ionosphere tomography

S.V. Trusov<sup>1</sup>, A.A. Romanov<sup>1</sup>, A.V. Adjalova<sup>1</sup>,  
S.A. Bobrovskij<sup>1</sup>, A.A. Romanov<sup>1</sup>, V.O. Los<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC “Russian space systems”

111250 Moscow, 53 Aviamotornaya str.

E-mail: romulas@rniikp.ru

<sup>2</sup> SUE SPC “SPURT”

124460 Moscow, Zelenograd, 4 1-st Zapadnyj str.

Special network receiving complex has designed for relative total ionosphere content measuring. In practice the chain of several receivers are used for 2D ionosphere tomography problem solving.

We developed two generations of the receiving complexes. The first one can receive signals 150,400,1067 MHz  $\pm$  300ppm, that covers all frequencies of existing LEO satellites with 150/400(1067) MHz coherent radiobeacons. This kind of complex has Ethernet network card on-board. It provides data transfer and remote control via built-in web-interface. This version of receiving complex consist of 3-band receiver with corresponding antenna, industrial computer, UPS and network commutator. The second one has same functional characteristics, but it constructed by “all-in-one” principle. There are receiver, computer, and UPS assembled in one case with height of 2U.

The receiving complex has two operation modes: standalone and tomography-chain ones. The tomography –chain mode allows synchronizing all receivers in chain relative to certain satellite throw central control web-server, for, because simultaneous satellite signal reception is critical condition for tomography problem solving. It was shown that the automated technology implemented at the central server with special tomography software in conjunction with the number of network receivers were able to reconstruct the vertical distributions of ionosphere electron density after 5-10 minutes after satellite pass over receivers had finished.

**Keywords:** ionosphere receiver, ionosphere monitoring, ionosphere tomography.