

Пассивный аппаратно-программный комплекс мониторинга ионосферы

В.М. Смирнов¹, Е.В. Смирнова¹, В.Н. Скобелкин², С.И. Тынянкин²

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
г. Фрязино, vsmirnov@ire.rssi.ru

²Инновационный научно-технический центр
г. Москва

Представлен автоматизированный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для мониторинга состояния ионосферы в пассивном режиме по сигналам спутниковых навигационных систем. Показаны возможности комплекса и приведены результаты его работы. Проведено сопоставление ионосферных данных, полученных комплексом и ионозондом вертикального зондирования DPS-4.

An automated hardware and software system designed to monitor the state of the ionosphere in the passive mode, by the signals of satellite navigation systems is presented. The possibilities of the complex are shown and the results of its work are resulted. A comparison of the ionospheric data from complex and vertical sounding ionosonde DPS-4 carried out.

Введение

Сложное строение среды распространения, а также непрерывное во времени изменение параметров ионосферной плазмы оказывают влияние на распространение радиоволн. Поэтому задачи исследования процессов в ионосфере связаны как с практическими задачами обеспечения устойчивой работы систем радиосвязи, так и с не менее важными научно – исследовательскими задачами мониторинга околоземного пространства.

Оперативный контроль ионосферы может осуществляться различными методами и соответствующим этим методам техническими средствами: с помощью вертикального, возвратно-наклонного и трассового зондирования, с помощью передачи контрольно-маркерных сигналов и т.д. Наиболее изученным и, как следствие, наиболее распространённым методом является вертикальное зондирование ионосферы, осуществляемое с помощью наземных ионозондов.

Необходимо отметить, что все существующие в настоящее время наземные технические средства ионосферного контроля являются активными (т.е. излучающими радиосигналы) средствами, как следствие, возникает задача обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и средств ионосферного обеспечения. Кроме того, данные средства ионосферного обеспечения имеют ограниченные по пространству зоны контроля ионосферы и обладают значительными массогабаритными характеристиками, обусловленными, прежде всего, большими габаритами антенно-фидерных устройств, используемых в КВ диапазоне.

Перспективный подход к контролю ионосферы базируется на использовании метода радиопросвечивания и заключается в определении основных ионосферных параметров (полного электронного содержания, критической частоты и высоты ионосферного слоя F2) по результатам приёма и обработки радиосигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Для решения этой задачи развита теория решения обратной задачи радиопросвечивания ионосферы по трассе спутник-Земля, основанная на использовании функциональных связей параметров зондирующих сигналов и среды их распространения и математического аппарата решения интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода, относящихся к классу

обратных некорректно поставленных задач атмосферной рефракции [1-3]. На её основе разработана технология непрерывного мониторинга, предназначенная для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы методом радиопросвечивания на трассе спутник - Земля с использованием радиосигналов навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС в реальном масштабе времени.

На базе развитой технологии непрерывного мониторинга создан автоматизированный аппаратно-программный комплекс для определения параметров высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли, работающий в режиме реального времени по радиосигналам навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [4-7]. Комплекс разработан на базе двухчастотного приемника фирмы NovAtel, работающего по сигналам навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС, и в настоящее время является уникальным изделием. Единственным аналогом по своим функциональным возможностям является приемник GPStation-6 производства компании NovAtel (Канада), однако данный приемник GPStation-6 позволяет определять лишь ПЭС ионосферы; иные ионосферные параметры могут быть оценены только на основе модельных представлений, что значительно сужает области его возможного использования.

Комплекс позволяет определять параметры ионосферы Земли методом радиопросвечивания на трассе спутник – Земля одновременно по 10-20 азимутальным направлениям над территорией, площадью около 3 млн. кв. км.

Метод радиозондирования изменений ионосферной плазмы

В настоящее время существуют различные методы контроля состояния ионосферы. Среди них центральное место занимает метод вертикального радиозондирования ионосферы. Он дает наиболее полную и легко интерпретируемую информацию о состоянии ионосферы ниже максимума электронной концентрации. Причиной этого является высокая точность измерений - информацию приносит резонансное взаимодействие радиоволн с ионосферной плазмой. Методы и аппаратура радиозондирования ионосферы Земли классифицируются по зонам контроля, по точности определения параметров и по используемым технологиям:

- **по зонам контроля** - наземные станции радиозондирования (ионозонды) контролируют параметры плазмы над пунктами наблюдения с высот около 60 км до высот максимума ионосферы (т.е. до высот ориентировочно 300 км), спутниковые ионозонды контролируют ионосферу под собой, станции наклонного и трансionoсферного радиозондирования – в стороне от своего месторасположения;

- **по точности определения параметров** - наиболее полно определяет совокупность процессов в атмосфере ионозонд, если используются все параметры диагностирующей радиоволны и установлены все существенные связи в системе протекающих процессов.

Учет фактического состояния ионосферы при анализе и прогнозировании работы радиосредств (прогнозирование значений максимально применимых частот) в настоящее время затруднен из-за крайне ограниченного количества станций вертикального зондирования или же их полного отсутствия вдоль выбранного направления связи. Ликвидировать этот пробел можно только при наличии глобальной системы мониторинга ионосферы, использующей спутниковые навигационные системы. Внимание этим системам следует уделить не только благодаря высоким

техническим характеристикам, но также в силу их пригодности к решению задач дистанционного зондирования.

Появившиеся в последние годы возможности по использованию в качестве источника сигналов, применяемых для определения параметров ионосферы космические аппараты глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, не находят в настоящее время широкого использования в практической деятельности ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской служб радиоцентров. Учитывая актуальность обсуждаемого направления исследований, в 2013 г. был начат длительный эксперимент, целью которого является проведение сравнительного анализа результатов определения критической частоты F2-слоя ионосферы двумя способами – вертикального зондирования (ионозонд DPS-4) и радиопросвечивания по трассе «спутник-Земля» с использованием сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS.

Для проведения сравнительного анализа результатов работы аппаратно-программный комплекс (АПК) зондирования ионосферного зондирования располагался на территории Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук. Внешний вид аппаратно-программного комплекса (см. рис.1) свидетельствует о его малогабаритности в отличие от известных «классических» средств контроля ионосферы. Данный АПК позволяет в реальном масштабе времени на основе обработки радиосигналов ГНСС типа ГЛОНАСС/GPS определять параметры ионосферы (ПЭС, высотный профиль электронной концентрации, критическая частота и высота ионосферного слоя F2) на удалении до 1000 км по 10...20 одновременно наблюдаемым спутникам ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

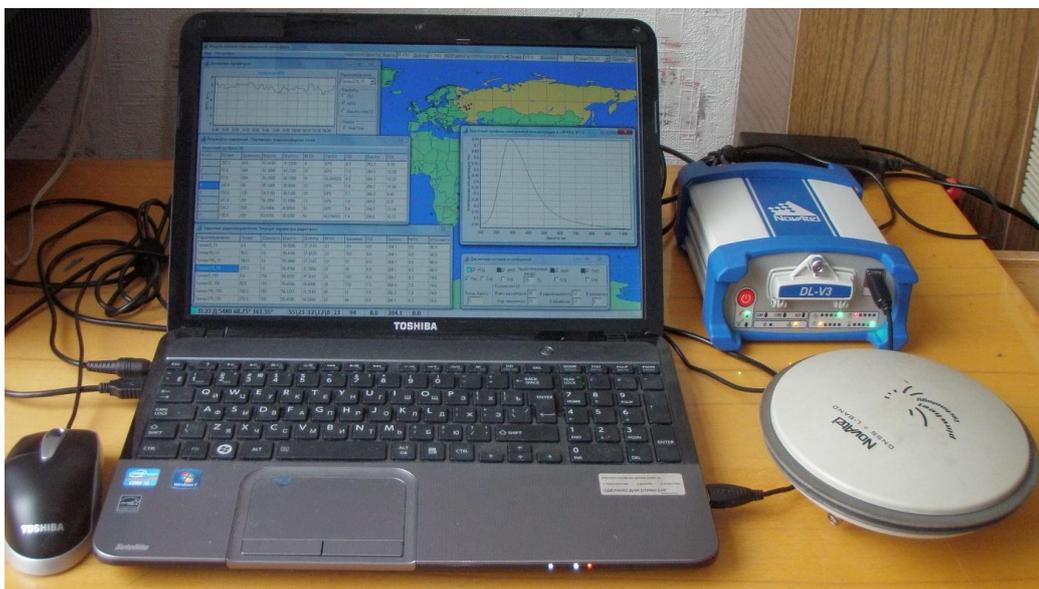


Рис. 1. Вид АПК в сборе

Изделие АПК-ИМ включает в себя персональный компьютер с установленным в нем специализированным программным обеспечением, двухчастотный навигационный приемник и малогабаритную приемную антенну [4]. Используемый в изделии приемник, разработанный фирмой NovAtel, позволяет принимать сигналы навигационных систем GPS/ГЛОНАСС и вести их обработку в режиме реального времени. Местоположение приемника определялось автономно: координаты антенны – 55.76° с.ш., 37.94° в.д. Координаты расположения ионозонда DPS-4 – 55.5° с.ш., 37.3°

АПК имеет высокую степень автоматизации, обеспечивает круглосуточный непрерывный режим функционирования с сохранением (архивированием) тематической и служебной информации. Пользователям АПК предоставляется возможность использования удобного для них картографического фона для отображения информации.

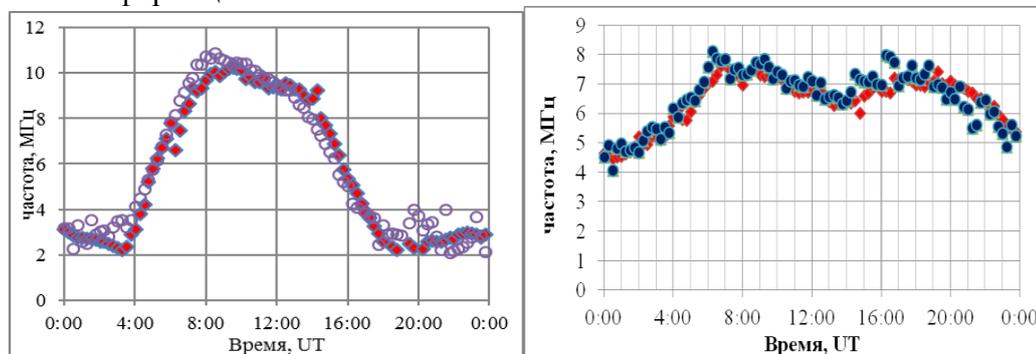


Рис. 3. Сравнение данных АПК (кружки) с данными ионозонда DPS-4 (ромб)

На основе территориально распределённых АПК возможно создание единой (региональной, глобальной) системы ионосферного контроля, которая обеспечит конечных потребителей необходимой ионосферной информацией. Оснащение наземных пунктов расположения ионозондов вертикального зондирования аппаратно-программным комплексом, основанным на использовании двухчастотных навигационных приемников и специализированного математического аппарата, обеспечивающего решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли, позволит существенно расширить область зондирования ионосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН №14 «Фундаментальные проблемы воздействия источников естественного и техногенного происхождения на ионосферу и плазмосферу Земли».

Литература

1. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. 2001. Т.46. №1. С.47-52.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука. 1987.
3. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника. 1993. Т.38. №7. С.1326.
4. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Журнал Радиозлектроники. – 2010. -№6 <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
5. Смирнова Е.В., Смирнов В.М., Скобелкин В.Н., Тынянкин С.И., Мальковский А.П., Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени // Гелиогеофизические исследования. 2013. В.4. С.32–38.
6. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н., Мальковский А.П., Тынянкин С.И. Распространение радиоволн коротковолнового диапазона и возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли для расчета максимально применимых частот. Радиотехника и электроника. -2008. -Т.53. -№9. С.1112-1120.

7. Смирнова Е.В., Смирнов В.М., Скобелкин В.Н., Тынянкин С.И. Мониторинг состояния ионосферы в режиме реального времени. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №4. С.135-141.