

Мониторинг состояния ионосферы в режиме реального времени

Е.В. Смирнова¹, В.М. Смирнов¹, В.Н. Скобелкин¹, С.И. Тынянкин²

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)
141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1
vsmirnov@ire.rssi.ru*
² *ЗАО «БЛИКС»*

Показаны возможности глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли в режиме реального времени. На базе приемника ProPak-V3 создан автоматизированный комплекс, предназначенный для мониторинга состояния ионосферы с поверхности Земли. Комплекс позволяет определять высотное распределение электронной концентрации ионосферы для всех находящихся в зоне видимости спутников в режиме реального времени.

Ключевые слова: ионосфера Земли, мониторинг, метод радиопросвечивания, навигационные системы, модуль ионосферного обеспечения, профиль электронной концентрации.

Введение

Исследование физической природы, морфологии и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Диагностика состояния ионосферы, осуществляемая в широком диапазоне пространственно-временных интервалов наблюдений, позволяет следить за процессами, реакция на которые в той или иной степени проявляется в ионосферной плазме.

В настоящее время эффективно вести мониторинг состояния ионосферы можно при помощи наземных ионосферных станций и ионозондов, расположенных на борту космических аппаратов. Результаты такого мониторинга будут действительно ценными только в том случае, если они доступны в режиме реального времени. Основным источником таких результатов сейчас является мировая сеть WDC (World Data Centre), объединяющая 52 наземных станции в различных частях планеты, которые ведут круглосуточное вертикальное радиозондирование и предоставляют его результаты в сети Интернет с минимальной временной задержкой. Использование этих данных вместе с ионосферной моделью в заданном регионе способно значительно повысить прогностические свойства региональных моделей и получить практически реальное представление о состоянии ионосферы в интересующей области. Однако они дают информацию лишь о параметрах ионосферы ниже максимума слоя F2. Что касается верхней ионосферы, то соответствующая информация о высотном распределении электронной концентрации ранее могла быть получена только с помощью ионозондов космического базирования, вертикальных запусков ракет и немногочисленных установок некогерентного рассеяния радиоволн, позволяющих определять параметры ионосферной плазмы в диапазоне высот 70–1500 км. Поскольку эти средства достаточно дорогие, становится актуальным создание методики определения параметров ионосферы на основе анализа свойств сигналов, излучаемых искусственными спутниками Земли. За прошедшее десятилетие дополнительным источником данных о состоянии ионосферы стал метод радиозондирования, использующий высокоорбитальные спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС/Galileo. Сейчас он превратился в эффективный способ мониторинга околоземной плазмы. На поверхности планеты в данное

время насчитывается более 1000 наземных станций и приемников, регистрирующих сигналы навигационных систем. Данные измерений с них находятся, как правило, в базах данных, доступных для любого пользователя сети Интернет на следующие сутки, то есть в этом случае можно говорить только о режиме постмониторинга. Наша цель – показать, что современные навигационные приемники в совокупности с высокопроизводительными компьютерами, оснащенными специализированным программным обеспечением, позволяют определять параметры ионосферы в режиме реального времени.

Структура аппаратно-программного комплекса

Для расширения возможностей наземных ионозондов целесообразно оснастить пункты их расположения аппаратно-программными комплексами радиозондирования окружающего космического пространства, основанными на использовании сигналов навигационных спутниковых систем. В таком комплексе может быть использована технология непрерывного мониторинга, предназначенная для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного определения 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. В настоящее время высокоорбитальные навигационные системы имеют в своем составе свыше пятидесяти спутников, излучающих сигналы на двух когерентных частотах. Размещение их на орбитах таково, что в зоне видимости любого наземного приемника одновременно может находиться минимум 4 спутника, информация с которых пригодна для получения данных об ионосфере.

Структура комплекса, основанная на использовании навигационных систем, показана на рис. 1, его функциональные возможности изложены в работе (Смирнов, Смирнова, 2010). Он содержит два конструктивно разделённых блока: антенный блок и аналого-цифровой модуль. Выход антенного блока соединяется коаксиальным кабелем с входом модуля. Длина антенного кабеля не более 50 м. Приемник соединен с компьютером комбинированным USB/COM кабелем.

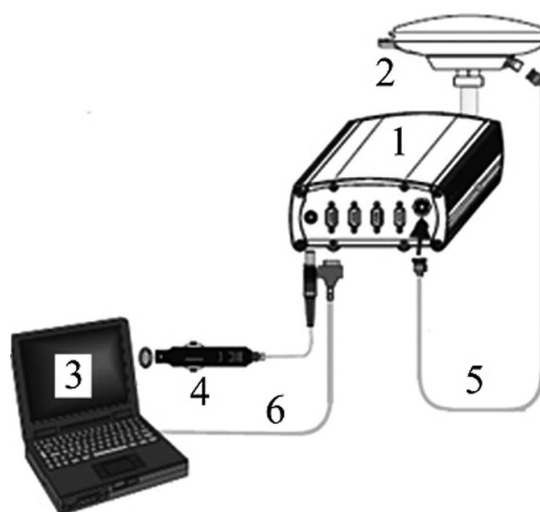


Рис. 1. Комплекс ионосферного обеспечения: 1 – навигационный приемник, 2 – антенна, 3 – компьютер, 4 – адаптер питания, 5 – антенный кабель, 6 – интерфейсный кабель

Основным элементом аппаратно-программного комплекса является модуль ионосферного обеспечения, основанный на реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли по трассе «наземный пункт – навигационный спутник». Возможная блок-схема проведения измерений и интерпретации данных, а также алгоритм параметрической идентификации обратной задачи радиопросвечивания ионосферы приведены на рис. 2. Необходимым условием существования модуля ионосферного обеспечения, построенного по такой схеме, является наличие двухчастотного навигационного приемника или доступа в Интернет и компьютера с установленным на нем специализированным программным обеспечением, реализующим решение обратной задачи радиопросвечивания (Смирнов, 2001).

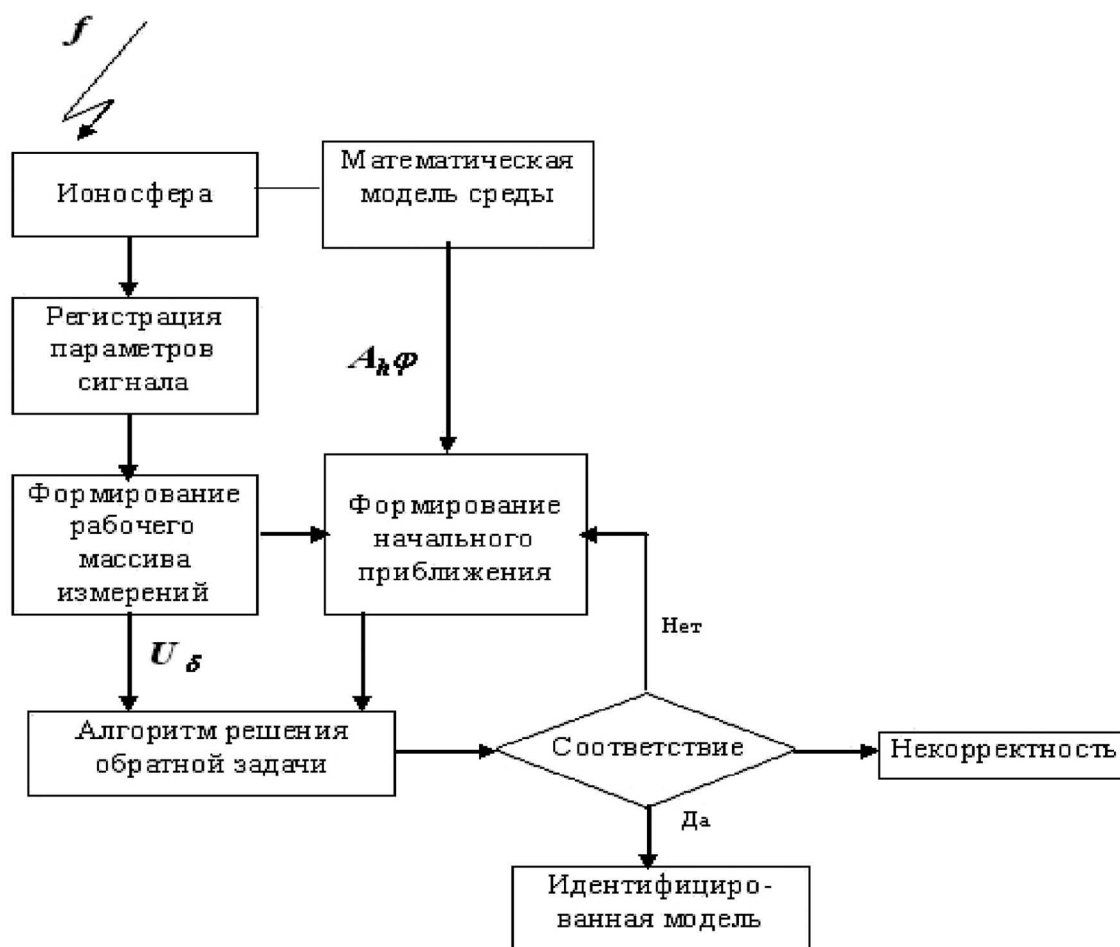


Рис. 2. Блок-схема модуля ионосферного обеспечения

Аппаратно-программное обеспечение позволяет проводить мониторинг состояния ионосферы над территорией, удаленной от пункта приема на расстояние до 1000 км. Одновременно можно определять параметры ионосферы по 16 азимутальным направлениям. Дискретность выдачи информации определяется возможностями используемого компьютера и параметрами навигационного приемника. При этом комплекс может работать как со стационарным, так и персональным компьютером, типа ноутбук. При наличии автономного источника питания работа комплекса может проводиться круглосуточно без участия оператора. Достоверность получаемых таким образом параметров ионосферы была ранее подтверждена при проведении сеансов коротковолновой связи (Смирнов и др., 2008).

На рис. 3 представлен фрагмент работы аппаратно-программного комплекса и выводимые на экран монитора результаты. Здесь отображены координаты подионосферных точек

для всех спутников, находящихся одновременно в зоне действия навигационного приемника для одного из моментов времени. Стрелкой на рисунке отмечено положение приемника, точки вокруг него – координаты подионосферных точек для момента времени наблюдения. Увеличенный фрагмент области мониторинга показан в левом нижнем углу рисунка. В таблице, отображаемой на экране, приведены значения критической частоты и высоты максимума F2-слоя ионосферы для указанных координат точек. Эти данные, а также значения электронной концентрации в зависимости от высоты и времени, записываются в отдельные файлы. Запись результатов обработки организована таким образом, что она позволяет проводить анализ полученных результатов как отдельно для каждого спутника, так и в целом по всем наблюдаемым с данного пункта навигационным аппаратам.

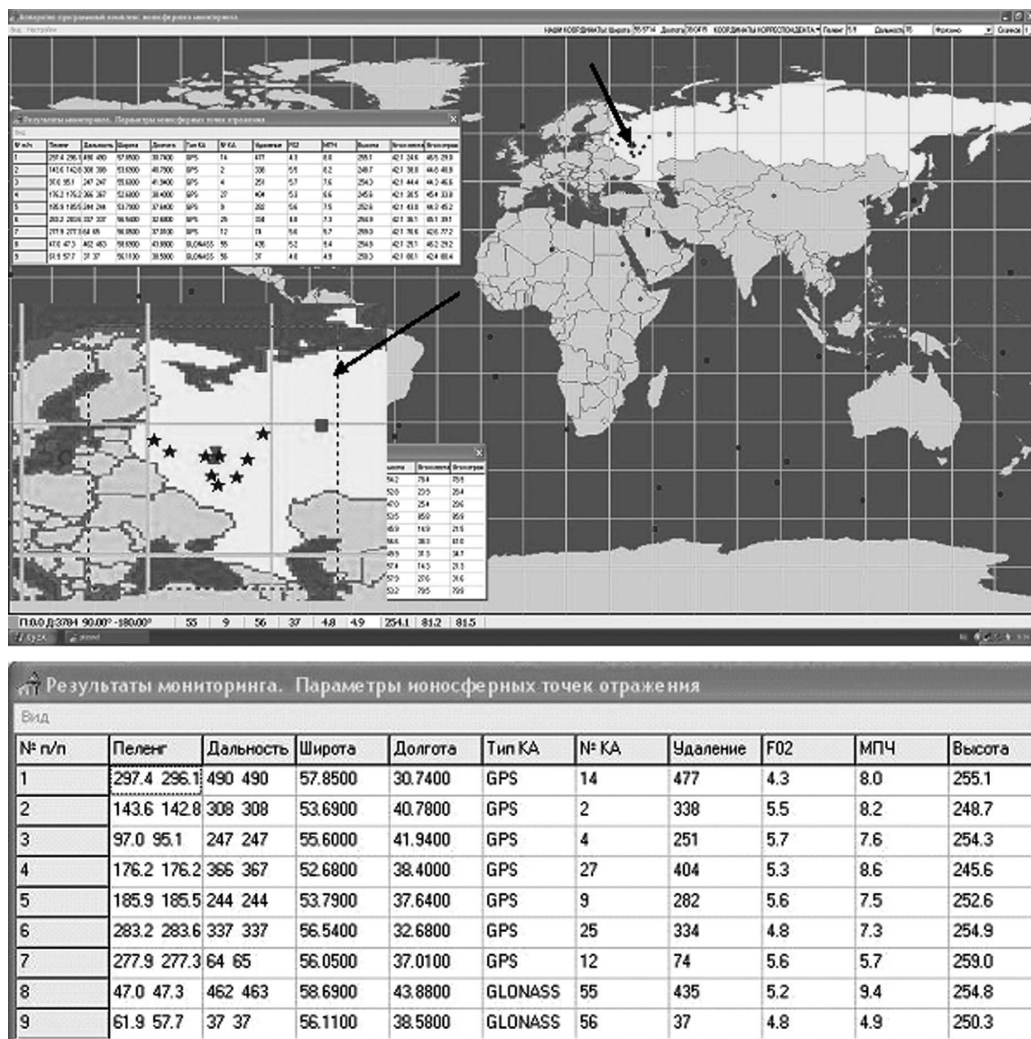


Рис. 3. Фрагмент работы аппаратно-программного комплекса

Результаты работы такого комплекса, расположенного в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (г. Фрязино, Московская область), приведены на рис. 4. Здесь представлены данные работы ионозонда (ромб), расчеты по модели IRI 2007 (Bilutza, 1986) (сплошная линия) и результаты, полученные с помощью комплекса (ломаная линия). За время наблюдения в одни сутки с помощью комплекса получено примерно 13000 измерений для территории, ограниченной кругом радиусом не более 200 км. Из рисунка видно, что изменения хода максимума электронной концентрации в целом сопоставимы с данными ионозонда.

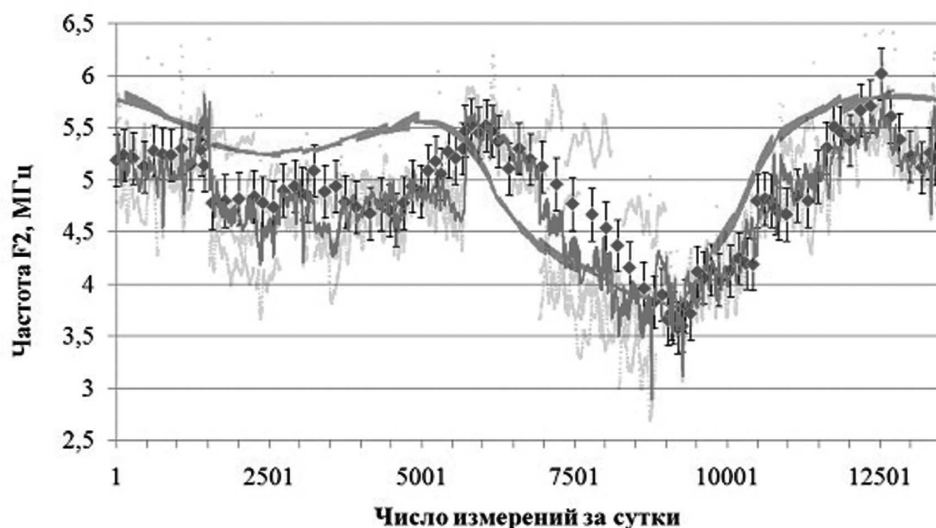


Рис. 4. Сравнение результатов работы ионозонда вертикального зондирования с данными радиопросвечивания и моделью IRI

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются как качественно, так и количественно. Представленный комплекс, после проведения калибровки и разработки оптимальной процедуры сглаживания спутниковых данных, может служить одним из элементов системы глобального мониторинга ионосферы в режиме реального времени. Интервал времени выдачи параметров ионосферы определяется аппаратными возможностями вычислительной техники. Существующие в настоящее время навигационные приемники позволяют получать навигационную информацию с дискретностью до 50 Гц. Результаты, представленные здесь, получены с частотой 1 Гц. Обновление данных осуществлялось с интервалом – 1 минута. Компьютер, включенный в действующий аппаратно-программный комплекс, дает возможность сократить время выдачи информации о параметрах ионосферы до 15 секунд. Такой темп обновления и выдачи ионосферных параметров позволяет использовать данный комплекс для мониторинга мгновенных вариаций ионосферной плазмы.

Заключение

Результаты реальной работы аппаратно-программного комплекса показали, что предложенная структура построения автоматизированного модуля ионосферного обеспечения, предназначенного для непрерывного мониторинга ионосферы методом радиопросвечивания на трассе спутник-Земля с использованием сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, – новое высокоэффективное средство для исследования пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы Земли в реальном масштабе времени. Оснащение таким комплексом станций, оснащенных ионозондами вертикального и наклонного зондирования, может значительно расширить зону мониторинга ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ ОФН РАН «Плазменные процессы в солнечной системе» и «Фундаментальные проблемы воздействия мощными радиоволнами на ионосферу и магнитосферу Земли».

Литература

1. *Смирнов В. М., Смирнова Е. В.* Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 6 <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
2. *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.
3. *Смирнов В.М.* Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. 2001.Т.46. №1. С.47-52.
4. *Bilutza D.* International reference ionosphere // Radio Science. 1986. V.21. №3. P.343.

The ionosphere state monitoring in real-time mode

E.V. Smirnova¹, V.M. Smirnov¹, V.N. Skobelkin¹, S.I. Tuynyankin²

*¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Science
(Fryazino branch)*

141190, Fryazino, Moscow region, B.A. Vvedenskogo square, 1

E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

²ZAO "BLIKS"

The capabilities of global navigating satellite systems GPS/ GLONASS for monitoring the Earth ionosphere in real-time mode are considered. The automated complex intended for the ionosphere state monitoring from the Earth's surface is developed on the basis of the ProPak-V3 receiver. The complex allows receiving of the altitude profiles of electron density for all satellites being a visibility range in real-time mode.

Keywords: Earth ionosphere, monitoring, radio translucence method, global navigating systems, ionospheric support module, altitude profile, electron density.