

## Программный комплекс определения параметров ионосферы средствами радиозондирования

И.В. Суровцева, В.О. Скрипачев, Д.Л. Спиричев, И.О. Скрипачев

*НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы»  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32,  
E-mail: skripatchevv@inbox.ru*

Рассмотрен программный комплекс определения параметров ионосферы средствами радиозондирования. Представлены результаты работы программного модуля обработки данных наземного вертикального зондирования на примере временных вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы по экспериментальным данным августа 2010 г.

**Ключевые слова:** программный комплекс, радиозондирование, навигационный космический аппарат, эксперимент, возмущения ионосферы, ионосфера, полное электронное содержание, навигационный приемник, ионограмма, электронная плотность.

Изучение структуры ионосферы важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных практических задач, связанных с распространением радиоволн. Исследование ионосферных параметров проводится в следующих направлениях (Гершман Б.Н. и др., 1984):

– Морфологическое рассмотрение структуры ионосферы. Для этого требуются детальные и точные измерения мгновенных значений важных ионосферных параметров. Данные такого типа необходимы для изучения физики верхней ионосферы.

– Определение характеристик ионосферы, ее изменений в зависимости от других явлений, требующее статистически репрезентативных и более полных рядов данных.

В настоящее время радиозондирование является методом, позволяющим эффективно вести мониторинг состояния ионосферы.

Глобальный мониторинг ионосферы на основе системного радиозондирования предполагает использование следующих видов зондирования: наземного вертикального и наклонного, осуществляемого наземными ионозондами, и спутникового внешнего и транс-ионосферного зондирования, осуществляемого бортовыми ионозондами. При системном зондировании можно наиболее полно вести контроль и диагностику планетарной ионосферы, исследовать развитие динамических процессов, происходящих в планетной ионосфере в целом.

Данные радиозондирования используются для решения практических задач (расчет условий распространения радиоволн для целей КВ и УКВ радиосвязи) и для теоретических исследований, направленных на изучение процессов, протекающих в ионосфере.

Учет и компенсация ионосферных погрешностей в работе радиоэлектронных средств, использующих ионосферное распространение радиоволн, требуют обеспечения потребителя оперативной и достоверной информацией о структуре и состоянии ионосферы. Представление о профиле электронной концентрации, величине полного электронного содержания и его пространственно-временном распределении можно получить, например, на основании данных измерений, полученных радиофизическими методами. Эти методы базируются на исследовании параметров радиосигналов искусственного или естественного про-

исхождения, для которых ионосферная плазма является существенной средой при распространении радиоволн (Смирнов В.М., 2008).

Разработанный программный комплекс предназначен для восстановления профилей электронной концентрации в ионосфере по сигналам навигационных КА ГЛОНАСС/GPS и данным наземного вертикального зондирования с целью диагностики возмущений ионосферы.

Структурная схема программного комплекса определения параметров ионосферы средствами радиозондирования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Программный комплекс определения параметров ионосферы средствами радиозондирования

Программный комплекс построен по модульному принципу. Такая архитектура программного комплекса позволяет для его отладки применить модульное тестирование, целью которого является изолирование отдельных частей программного комплекса и демонстрации их работоспособности (Roy Osherove, 2009).

В работе рассмотрен программный модуль обработки данных наземного вертикального зондирования и по результатам его работы определен основной ионосферный параметр – критическая частота слоя F2. В практическом плане особенно важным представляется прогноз критических частот, поскольку они используются при расчетах максимальных применимых частот (МПЧ) в точках скачков на радиотрассах (Зевакина Р.А. и др., 1990).

Метод вертикального радиозондирования ионосферы является одним из распространенных методов ионосферного мониторинга. Измеряя высоты отражения радиоимпульсов, определяя критические частоты различных областей, можно рассчитывать значение и восстанавливать вертикальные профили электронной концентрации в слоях, находить действующие высоты для заданных частот, выбирать оптимальные частоты для заданных радиотрасс.

В ходе проведения натурного эксперимента в районе г. Васильсурск Нижегородской области в августе 2010 г. получены 615 ионограмм зависимости амплитуды зондируемого сигнала от частоты и действующей высоты, которые были обработаны соответствующим модулем программного комплекса.

Ионограммы наземного цифрового ионозонда «Базис» представляют интерес для уточнения параметров ионосферы по данным радиозондирования. Мониторинг ионосферы осуществлялся в режиме вертикального зондирования. Дата и время фиксировались автоматически. Частотный диапазон ионозонда составляет  $1\div 8$  МГц, шаг по высоте – 50 км.

Ионограммы содержат разные сведения об условиях в ионосфере. Поэтому с помощью рассматриваемого программного модуля изучены те характеристики ионосферы, которые особенно важны для научных и оперативных исследований, и разработана методика оценки этих характеристик. По ионограммам возможно определить критические частоты слоев  $f^oE$ ,  $f^oF1$ ,  $f^oF2$  и другие параметры ионосферы, восстановить вертикальный профиль электронной концентрации  $N(h)$  (Huang Xueqin and B.W. Reinisch, 1983).

Дешифрирование ионограмм проводилось в соответствии с Руководством URSI по их интерпретации и обработке. С помощью разработанного программного комплекса производилась оцифровка ионограмм, по которым определялись критические частоты обыкновенной составляющей радиосигнала F2-слоя ионосферы.

В результате, для каждого дня экспериментов было получено среднесуточное значение критической частоты (рис. 2). При этом ионограммы, на которых невозможно было определить критическую частоту (из-за воздействия на ионосферу или других явлений, вызывающих образование неоднородных областей), в рассмотрение не входили.

Для анализа полученных среднесуточных значений критической частоты F2-слоя ионосферы была изучена геомагнитная обстановка в период с 16.08.10.-31.08.10. и построен график среднесуточного Kp-индекса.

Отметим, что ввиду неравномерно распределенного по дням зондирования ионосферы, для 22 и 25 августа 2010 г. получено недостаточное количество ion-файлов, поэтому реальные значения критических частот в слое F2 могут быть выше рассчитанных.

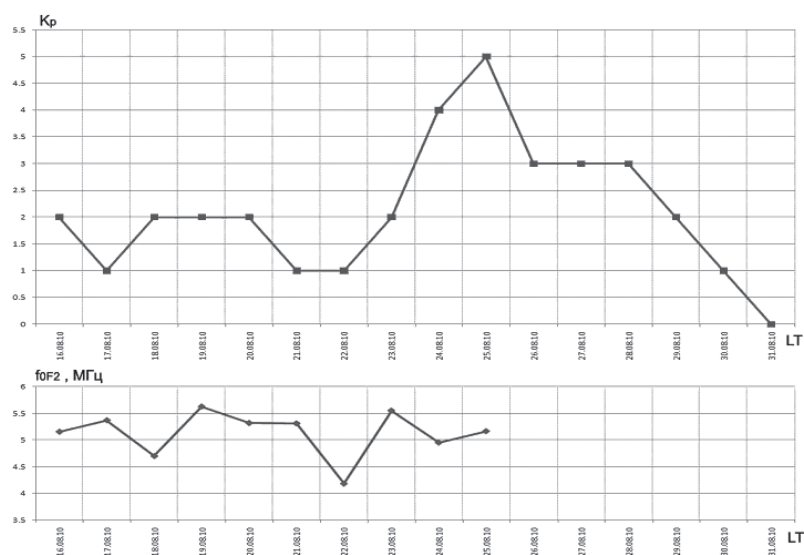


Рис. 2. Среднесуточные значения Kp-индекса с 16-31 августа 2010г. и критической частоты F2-слоя ионосферы с 16-25 августа 2010г.

В период с 16 по 23 августа наблюдается спокойная или слабовозмущенная ( $Kp \leq 2$ ) обстановка, что соответствует незначительным колебаниям среднесуточной критической частоты по экспериментальным данным. Однако, 25 августа зафиксирована магнитная буря ( $Kp = 5$ ), последствия которой невозможно было оценить по результатам вертикального зондирования из-за отсутствия данных  $f^oF2$ .

Для детального анализа хода критической частоты F2-слоя ионосферы в течение суток было выбрано 21 августа 2010 г. с наибольшим количеством ионограмм вертикального зондирования (125 ion-файлов) и наличием факта нагрева на ионосферу. Геомагнитная обстановка в этот день была спокойной. Результаты дешифрования ионограмм представлены на рис. 3.

На рис. 3 (кривая 1) прослеживаются разрывы при нагреве ионосферы в определенное время или в течение временного периода, при котором невозможно было оценить ионосферные параметры, в том числе и критическую частоту. Также отмечено, что после нагрева наблюдается понижение значений критической частоты F2-слоя.

Для наглядности и отображения тенденции изменения критической частоты F2-слоя ионосферы в течение выбранных суток была построена линия тренда с линейной фильтрацией (рис. 3, кривая 2), которая позволила сгладить колебания и разрывы на графике исследуемого параметра, а также наглядно показать характер построенной временной зависимости.

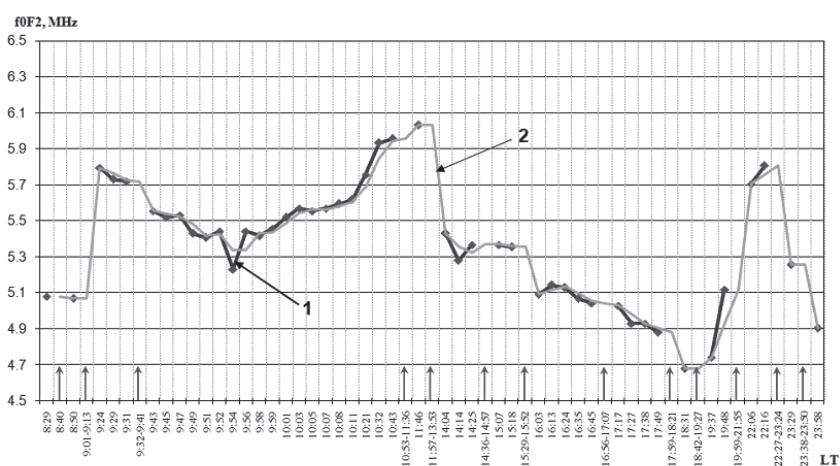


Рис. 3. Вариации критической частоты слоя F2 ионосферы для 21.08.2010г.  
 1 – результаты наземного вертикального зондирования;  
 2 – аппроксимация результатов линейной фильтрацией;  
 стрелками на оси времени отмечены искусственные ионосферные возмущения

При анализе результатов работы программного модуля обработки данных наземного вертикального зондирования, полученные критические частоты сравнились с аналогичным параметром, рассчитанным по модели ионосферы IRI-2007 с учетом времени и координат, соответствующих расположению и режиму работы ионозонда «Базис» (рис.4).

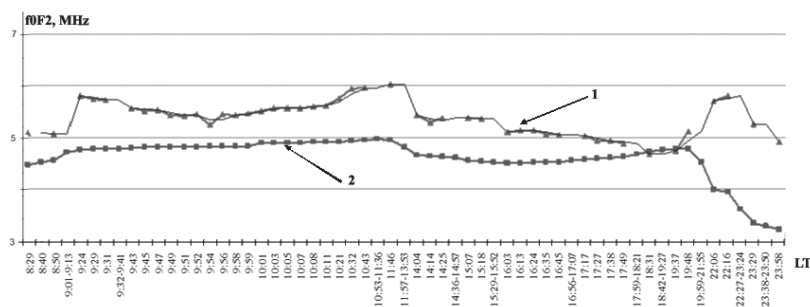


Рис. 4. Вариации критической частоты слоя F2 ионосферы для 21.08.2010 г. по:  
 1 – данным ионозонда «Базис»;  
 2 – результатам модели IRI-2007

Сравнение обработанных результатов вертикального зондирования с рассчитанными данными наглядно показывает схожесть в вариациях критической частоты в течение 21 августа 2010 г.

При определении степени зависимости экспериментальных и рассчитанных данных (по времени) было учтено спокойное состояние среды или уже восстановленные параметры после искусственных ионосферных возмущений. Для оценки полученных результатов на рис. 4 был рассчитан коэффициент корреляции по критерию Спирмена  $r = 0,56$  ( $p < 0,05$ ), что подтверждает умеренную тесноту связи между модельными значениями и данными прямых измерений (Кобзарь А.И., 2006).

Таким образом, в работе предложен программный комплекс определения параметров ионосферы средствами радиозондирования, который способствует получению информации о параметрах среды с целью дальнейшей диагностики возмущений как естественного, так и искусственного характера, и уточнению известных ионосферных моделей.

Представлены результаты работы программного модуля обработки данных наземного вертикального зондирования в Нижегородской области на примере временных вариаций среднесуточного значения критической частоты слоя F2 ионосферы в период с 16-25 августа 2010 г.

Проведен анализ суточного хода критической частоты при сопоставлении результатов прямых измерений и модельных значений. Полученные соответствия достаточно хорошо согласуются как качественно, так и количественно.

Отметим, что обработка результатов работы наземного ионозонда «Базис» с помощью программного модуля способствует построению высотного распределения заряженных частиц в ионосфере.

Перспективы дальнейших исследований связаны с наращиванием возможностей представленного программного комплекса, в том числе по восстановлению профилей электронной концентрации по характеристикам сигналов навигационных спутниковых систем с целью мониторинга аномальных явлений и процессов в ионосфере (Тертышников А.В., Суровцева И.В. и др., 2010).

## Литература

1. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука. Главная ред. физ-мат. лит., 1984.– 392 с.
2. Смирнов В.М. Радиофизические методы исследований и мониторинга ионосферы Земли // Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т. II / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 351-367.
3. Roy Osherove. The Art of Unit Testing: With Examples in .NET. - Manning Publications, 2009. - 320p.
4. Зевакина Р.А., Жулина Е.М. и др. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы. - М.: Межвед. геофиз. комитет АН СССР, 1990. – 71 с.
5. Huang Xueqin and B.W. Reinisch. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms // Radio Science. 1983. №18(3), P.477-492.
6. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Пер. с англ. второго издания «URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction» / Под ред. Н.И. Медниковой. - М.: Наука, 1978. - 342 с.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.– 816 с.
8. Тертышников А.В., Суровцева И.В., Скрипачев В.О., Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Фролов В.Л. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Том 7. №3. С. 115-119.

## **Programs set determine the parameters of the ionosphere by means of radiosounding**

**I.V. Surovtseva, V.O. Skripachev, D.L. Spirichev, I.O. Skripachev**

*S&T center «Cosmonit» JSC «RSS»,  
Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.  
E-mail: skripachevv@inbox.ru*

There are presented programs set of determining the ionosphere parameters by means of radiosounding. The results of data processing of ground vertical sounding for an example of temporal variations of the critical frequency F2-layer of the ionosphere from the experimental data of August 2010 are given.

**Keywords:** programs set, radiosounding, navigation satellite, experiment, disturbances of ionosphere, ionosphere, total electron content, navigation receivers, ionogram, electron density.