

Метод радиопросвечивания ионосферы Земли и его практическая реализация

В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, Email: vsmirnov@ire.rssi.ru

Рассмотрены возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами спутниковых навигационных систем. Приведены результаты его применения при определении параметров ионосферы в период воздействия на неё факторов естественного и искусственного происхождения. Представлены результаты работы аппаратно-программный комплекса, предназначенного для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени.

The possibilities of the radiotranslucence method of the Earth's ionosphere by signals of satellite navigation systems are considered. The results of its application in determining the parameters of the ionosphere during the impact on it of natural and artificial factors are shown. The operation data of the hardware-software complex intended for monitoring the ionosphere state in real time are presented.

Введение

Исследование физической природы, морфологии и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Это вызвано не только чисто научным интересом к проблеме изучения атмосферы Земли как единой динамической системы, но и необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, радионавигации. Исследование структуры ионосферы важно для понимания физики протекающих в ней процессов и решения разнообразных радиофизических задач, связанных с распространением радиоволн. Появление таких задач послужило стимулом как для развития существующих, так и для разработки новых эффективных методов изучения и мониторинга ионосферы Земли, одним из которых является радиопросвечивание сигналами спутниковых навигационных систем.

Измерения параметров этих сигналов в сочетании с методами математической обработки и моделирования нашли широкое применение в связи с внедрением в практику исследований современных вычислительных средств и экспериментальных исследований. Наличие штатных измерений радионавигационных параметров дает возможность использовать спутниковые радионавигационные системы как уже существующий, технически совершенный, надежный, широко распространенный и в этом смысле относительно дешевый инструмент получения диагностической информации об ионосфере Земли.

1. Метод радиопросвечивания

Метод радиопросвечивания опирается на обращение приведенной разности фаз радиоволн и математически соответствует обращению интегрального уравнения первого рода. Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе “спутник - наземный пункт“ по наблюдениям с одного пункта [1]. В этом случае соответствующее интегральное уравнение первого рода не имеет аналитического обращения и требует разработки методов обращения в классе решения т.н. некорректных задач. Эти методы в настоящее время достаточно хорошо развиты в первую очередь благодаря трудам математической школы академика А.Н. Тихонова. В существенной мере они опираются на численные алгоритмы расчета и с

учетом широкого распространения компьютерной техники могут быть применены для обращения измерений параметров радиосигналов.

В основе аналитического описания параметров радиосигналов, принимаемых от космического аппарата, лежит геометрикооптическое решение задачи о распространении радиоволн в неоднородной сферически - слоистой атмосфере (коэффициент преломления атмосферы n зависит только от высоты $z=r-a$ над земной поверхностью или расстояния от ее центра r , a - радиус Земли, см. рис. 1) [1]:

$$\vec{E}(r,t,\omega_i) = \vec{E}_0(r) \exp\{-j[\omega_i t - k_i \Psi(\omega_i, r)]\}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где $\Phi = k_i \Psi(\omega_i, r) - \omega_i t$ - фаза волны,

$$k_i = \omega_i / c, \quad \omega = 2\pi f,$$

f - частота излучения,

c - скорость света в вакууме.

Здесь Ψ - решение уравнения эйконала [1, 2]:

$$\Psi(\omega_i) = \int_{(L)} n(\omega_i, r) dl = R_p = R + \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_i), \quad (2)$$

$$n(\omega_i, r) = 1 + N_T(r) + N_I(\omega_i, r),$$

где $\Delta R_T = \int_{(L)} N_T(r) dl, \quad \Delta R_I(\omega_i, r) = \int_{(L)} N_I(\omega_i, r) dl,$

$dl = dr / \cos \vartheta$ - элемент пути распространения радиоволны,

ϑ - текущий зенитный угол вдоль пути распространения.

При проведении измерений на двух частотах f_1 и f_2 можно сформировать разность псевдодальностей $R(f_1)$ и $R(f_2)$:

$$\Delta R(f_1, f_2) = R_I(f_1) - R_I(f_2) + \delta, \quad (3)$$

где δ - неустранимая погрешность измерений, обусловленная зависимостью от частоты, а $R_I(f)$ можно определить по формуле [1,2]:

$$R_I(f) = \frac{40,4 \cdot 10^6}{f^2} \int_L N(l) dl, \quad (4)$$

где f - частота сигнала в Гц,

dl - элемент пути распространения,

$N(l)$ - распределение электронной концентрации ионосферы вдоль траектории распространения радиолуча, $эл/см^3$.

Учитывая это, можно записать, что

$$\Delta R(f_1, f_2) = 40,4 \cdot 10^6 \frac{k}{f_1^2} \int_L N(l) dl + \delta, \quad k = 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}. \quad (5)$$

Полученное в предположении локальной сферически слоистой среды интегральное уравнение (5) связывает измеренную радиотехническим способом разность псевдодальностей с функцией высотного распределения электронной концентрации $N(z)$ следующим образом [1]:

$$\int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z) dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}} = 2,475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta], \quad (6)$$

где z_1 и z_2 - предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно,

ϑ - зенитный угол наблюдения спутника с пункта измерений,

a - радиус Земли,

z - текущая высота от поверхности Земли.

Выражение слева представляет собой полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы вдоль пути распространения навигационного сигнала:

$$TEC = \int_L N(l)dl = 2,475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta]. \quad (7)$$

Таким образом, формирование разности псевдодальностей, измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению полной интегральной концентрации ионосферы. Кроме этого, уравнение (7) является интегральным уравнением 1-го рода типа Фредгольма. Решение его относительно неизвестной функции $N(z)$ сводится к решению обратных некорректно поставленных задач рефракции [3, 4].

Использование сигналов навигационных спутниковых систем дает возможность определять параметры ионосферы практически для любого региона поверхности Земли, поскольку зона действия одного приемника охватывает область, радиус которой может составлять более 1000 км [1, 5]. Для зенитных углов наблюдения $\vartheta \leq 80^\circ$ проекция траектории радиоволн в максимуме электронной концентрации ионосферы (подионосферная точка на поверхности Земли) может быть удалена от пункта измерения на расстояние свыше 1000 км. Численные значения зависимости удаления подионосферной точки от зенитного угла наблюдения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость расстояния проекции на поверхность Земли подионосферной точки от зенитного угла наблюдения

Зенитный угол, град	Верхняя граница, км	Максимум ионосферы, км	Нижняя граница, км
10.	152.1	50.5	10.6
20	311.9	104.	21.7
40	694.9	236.8	49.7
60	1282.8	467.	101.6
80	2408.1	1096.5	297.8

Видно, что проекция всей существенной для распространения радиоволн ионосферной области на поверхность Земли может находиться на расстоянии до 2500 км от пункта измерений. Результаты, приведенные в таблице, получены для случая распространения радиоволн в сферически-слоистой ионосфере. Это означает, что возмущения среды достаточно малы и дают поправку только в подынтегральную функцию.

На позиционные измерения в спутниковых навигационных системах оказывают влияние области ионосферы, удаленные от пункта измерений вплоть до 2500 км. На таких дальностях может сказаться горизонтальная неоднородность ионосферы. Оценку влияния ионосферы на искривление траектории радиоволн можно получить из решения лучевых уравнений. Для модельной задачи распространения радиоволн в ионосфере, профиль распределения электронной концентрации которой описывается

параболической зависимостью типа $N_e(h) = N_{\max} \left(1 - \left(\frac{h - H_{\max}}{h_m} \right)^2 \right)$, величину смещения

траектории Δx и отклонение траектории Δy от прямолинейной можно оценить следующими соотношениями:

$$\Delta x = \frac{h_m \operatorname{tg} \vartheta}{3 \cos^2 \vartheta} \left(\frac{f_o}{f} \right)^2, \quad \Delta y = \frac{h_m}{3 \cos^2 \vartheta} \left(\frac{f_o}{f} \right)^2,$$

где N_{\max} - значение электронной концентрации в максимуме ионосферы на высоте H_{\max} ,

h_m - полутолщина слоя,

ϑ - зенитный угол наблюдения,

$f_o = (r_e N_{\max} c^2 / \pi)^{1/2}$ - критическая частота для заданного параболического слоя,

f - частота распространения радиосигнала.

Для критических частот F2-слоя ионосферы $f_o \sim 5-10$ МГц и диапазона частот навигационных сигналов $f \sim 1,2-1,6$ ГГц смещение Δx и отклонение Δy траектории луча от прямолинейного не превышает соответственно 0,004 и 0,0008 полутолщины слоя h_m в диапазоне зенитных углов наблюдения $0 \leq \vartheta \leq 80^\circ$.

Рассмотрим более подробно схему проведения радиотехнических измерений, показанную на рис.1 для одного из наблюдаемых спутников. Предположим, что приемник находится в точке А, измерения радиосигналов спутника проводятся в угловой области DAE при перемещении спутника из D в E. Наклонные трассы распространения радиоволн (AD, AE и между ними) пересекают область максимума электронной концентрации ионосферы на высоте Z_m (в общем случае переменной) вдоль дуги BC.

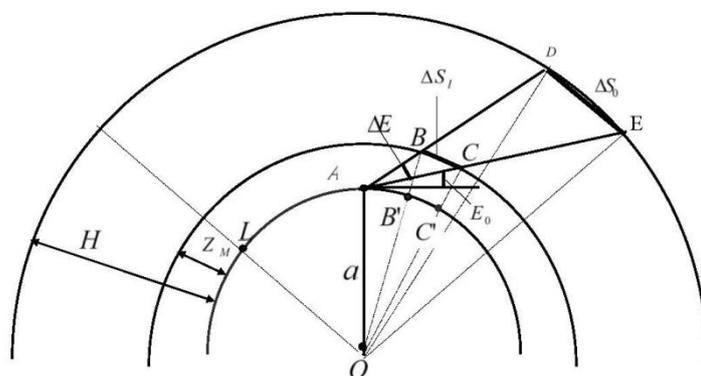


Рис.1. Схема

измерений и интерпретации данных

проведения

Результаты зондирования вдоль наклонной трассы для малой угловой области ΔE в форме высотных профилей электронной концентрации предлагается относить к области на земной поверхности, которая является проекцией дуги BC на эту поверхность (проекция вдоль радиус-векторов OB и OC).

В таблице 2 представлены оценки размеров дуги BC и соответствующей ей проекции на земную поверхность для разных углов места E в пределах общепринятой области измерений сигналов ИСЗ $E = 10-90^\circ$ и времени наблюдения $T=600$ и 30 секунд. При угле места $E = 90^\circ$ осуществляется вертикальное зондирование. Из данных таблицы 2 видно, что проекция всей существенной для распространения радиоволн области ионосферы на поверхность Земли может быть удалена на расстояние свыше 1000 км от места проведения измерений.

Таблица 2. Геометрические масштабы при радиопросвечивании ионосферы (интервал наблюдения $T = 600/30$ секунд)

E_0 , град	10	30	50	70	90
ΔE , град	5,8/0,29	6,3/0,31	6,8/0,34	7,1/0,35	7,2/0,36
ΔS_l , км	282/16,8	96/5,4	53/2,9	40/2,1	38/1,9
$B'C'$, км	268/16,1	92/5,2	51/2,7	39/2,0	36/1,8
AC' , км	1096	467	237	104	0

Интервал наблюдения $T=600$ секунд при стандартной дискретности проведения измерений $\Delta T=15-30$ секунд обеспечивает получение 40-20 измерений. В предположении, что максимум ионосферы расположен на высоте примерно 300 км, изменение угла места наблюдения не превышает 8° при наблюдении вблизи зенита и 6° при зенитных углах места наблюдения менее 20° . Область осреднения ионосферы в максимуме составляет при этом 35 и 280 км, соответственно. Размер этой области пропорционален длительности интервала наблюдения. Поэтому повышение дискретности измерений дает возможность проводить зондирование узких областей ионосферы, что позволяет локализовать в ней наличие крупных неоднородностей.

При измерениях в пределах диапазона углов ΔE , минимальный размер которого определяется алгоритмом решения обратной задачи, длину дуги ВС можно рассматривать как горизонтальный масштаб усреднения ΔS_l в пределах ионосферы при восстановлении высотного профиля электронной концентрации, а сам профиль относить к середине проекции дуги ВС на земную поверхность.

Из таблицы 2 следует, что масштаб усреднения $\Delta S_l < 100$ км, в пределах которого ионосферу можно считать горизонтально однородной, зависит как от угла наблюдения, так и от интервала наблюдения, который в свою очередь зависит от дискретности и количества измерений. Кроме этого, учитывая, что в зоне действия приемника одновременно может находиться до 20 спутников навигационной системы, появляется возможность определять параметры ионосферы по 20 азимутальным направлениям, т.е. изучать ее широтно-долготные свойства. Фактически можно обсуждать реконструкцию двумерной (2D) и трехмерной (3D) регулярной структуры ионосферы для всей зоны действия приемника и времени суток с дискретностью, определяемой режимом работы приемника практически в реальном масштабе времени [6, 7].

2. Роль априорной информация при решении некорректно поставленных задач градиентными методами

При численном решении обратной задачи радиопросвечивания существенное значение имеет тот факт, будет ли искомое решение рассматриваемой задачи устойчивым по отношению к возмущениям исходных данных. Если такое решение будет устойчиво, то достаточно малые погрешности в задании исходных данных приведут к малым погрешностям в определении решения. Иное дело решать неустойчивую или некорректно поставленную задачу, решение которой не является непрерывно зависящим от исходных данных измерений. В таких задачах, к которым относится и рассматриваемая задача радиопросвечивания ионосферы на трассе “наземный пункт – спутник”, приближенное решение, отвечающее неточным исходным данным, может, как угодно сильно отличаться от искомого точного решения. Возникает конкретная проблема – как численно решать такие задачи.

При решении некорректно поставленных задач качество получаемых приближений существенно зависит оттого, насколько полно удалось учесть всю имеющуюся априорную информацию об искомом решении. Решение уравнения радиопросвечивания, исходя из физической постановки задачи, целесообразно искать в классе непрерывных на отрезке $[a, b]$ функций. В конкретных задачах можно из тех или иных физических соображений значительно сузить класс допустимых решений, что приводит к существенному улучшению получаемых приближений. Простейшим примером ограничения класса приемлемых функций может служить требование неотрицательности решения, которое следует из физического понятия распределения электронной концентрации: $N(z) \geq 0$. Учет такого простого и естественного условия приводит к значительному улучшению качества получаемого решения. Это следует из

того, что решение, ограниченное приведенным требованием, не может иметь сильных флуктуаций. Если это трактовать с точки зрения широты класса возможных решений, то требование неотрицательности приводит к его сужению. Более общим видом приведенного условия является случай априорного знания нижней и верхней границы значений допустимого решения, например, $a \leq N(z) \leq b$. Учет этого условия приводит к ещё большему сужению класса допустимых функций и улучшает качество получаемого решения. Реализация алгоритма восстановления высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли в существенной мере основана на использовании априорной информации об искомом решении.

Основными свойствами высотного профиля ионосферы являются его положительная определенность и выпуклость - наличие точки максимума электронной концентрации. Кроме этого, с одной стороны, существенная для радиотехнических измерений область ионосферы расположена в пределах 80-1000 км. Использование такой информации об искомом решении позволяет успешно решать задачу определения высотного профиля распределения электронной концентрации. С другой стороны, создано большое количество как региональных, так и глобальных теоретических и полуэмпирических моделей ионосферы. Однако ввиду сильной изменчивости состояния земной ионосферы, созданные модели хорошо описывают ее поведение только в среднем. Даже для близких магнитно-спокойных дней значение электронной концентрации в максимуме слоя $F2$ может отличаться более чем в 2 раза [8]. Ни одна модель такие вариации не прогнозирует, так как этот процесс носит, в некоторой степени, вероятностный характер.

Следует отметить, что при прогнозировании условий распространения важно знание не только значения критической частоты слоя $F2$, но и значения высотного профиля электронной концентрации с необходимым вдоль радиотрассы шагом. Разработанный метод радиопросвечивания позволяет определять текущее состояние ионосферы, близкое к реальному [1, 9-11]. Учитывая, что существующие модели ионосферы в среднем достаточно полно описывают её состояние, их можно использовать в качестве дополнительной априорной информации при реализации алгоритма решения обратной задачи определения высотного распределения электронной концентрации. В частности, при практической реализации алгоритма обращения может быть использована модель ионосферы, рекомендованная комитетом URSI в качестве стандарта [12]. Применение данной модели IRI (International Reference Ionosphere) при реализации алгоритма обращения не требует прогноза каких-либо параметров ионосферы.

3. Практическое применение метода радиопросвечивания

Метод радиопросвечивания может успешно использоваться для мониторинга состояния ионосферы при возникновении гелиофизических возмущений (солнечные вспышки и затмения) (рис.2) и импульсных воздействий (запуски ракет и воздействие на ионосферу космических объектов, наземные и воздушные взрывы) (рис.3, 4) [13-14].

Важной задачей является мониторинг ионосферы над потенциально сейсмоопасными районами. Наблюдения показали, что в ионосфере над эпицентрами готовящихся землетрясений модифицируются спектры вариаций ряда ионосферных параметров [15-18] (рис.5).

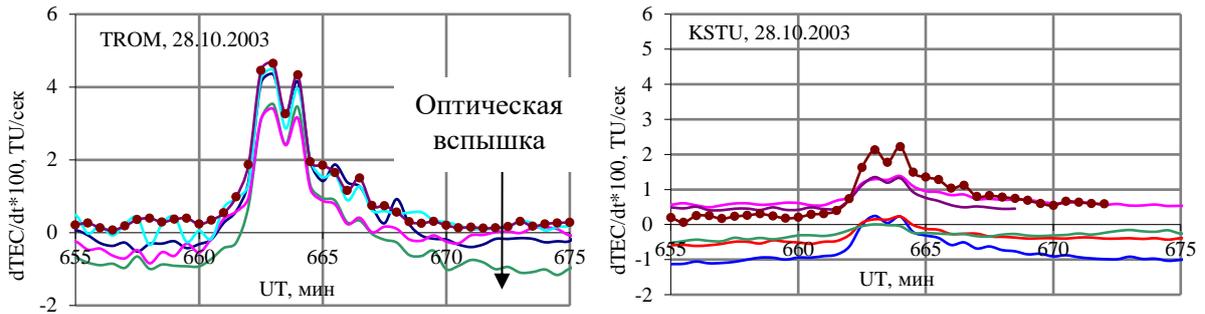


Рис. 2. Реакция ионосферы на прямой эффект солнечной вспышки в зависимости от географического расположения станций наблюдений [13]

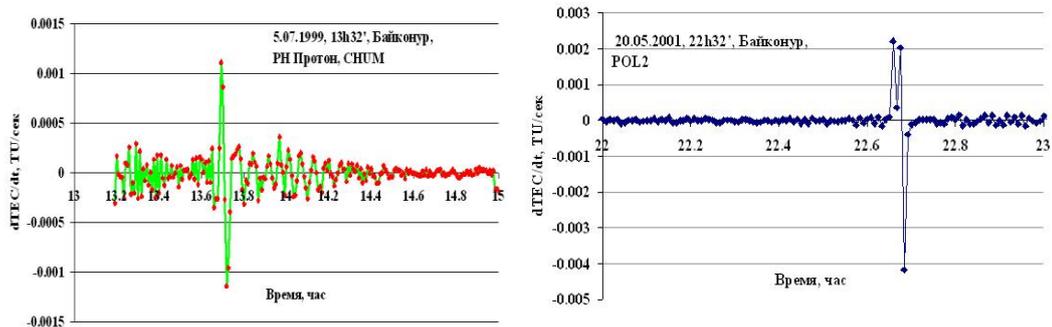


Рис. 3. Ионосферный отклик на запуск ракет с космодрома Байконур

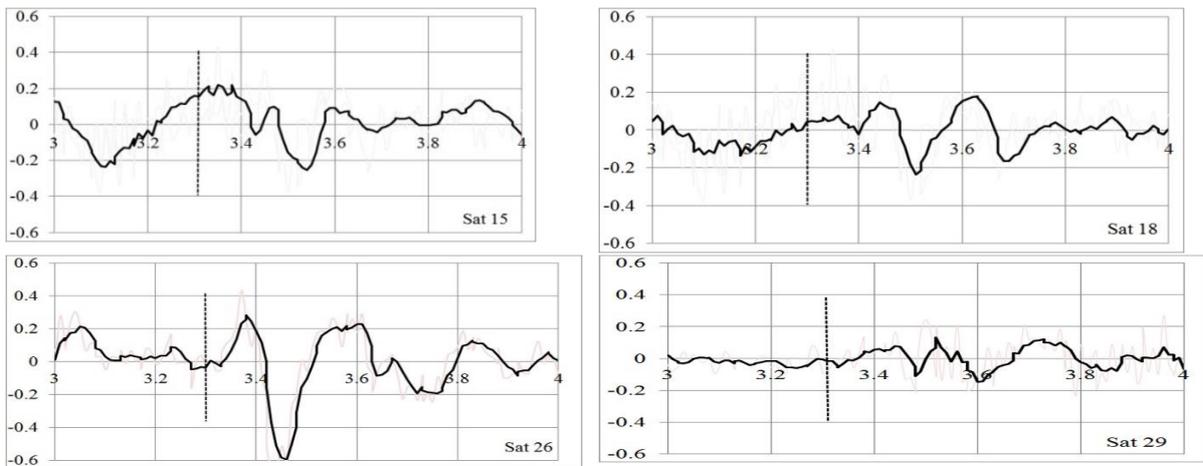


Рис. 4. Возмущение в ионосфере по радиопросвечиванию ее спутниками №№ 15, 18, 26 и 29 во время взрыва Челябинского суперболида. Штриховой линией отмечен момент основной вспышки (взрыва) суперболида [14]

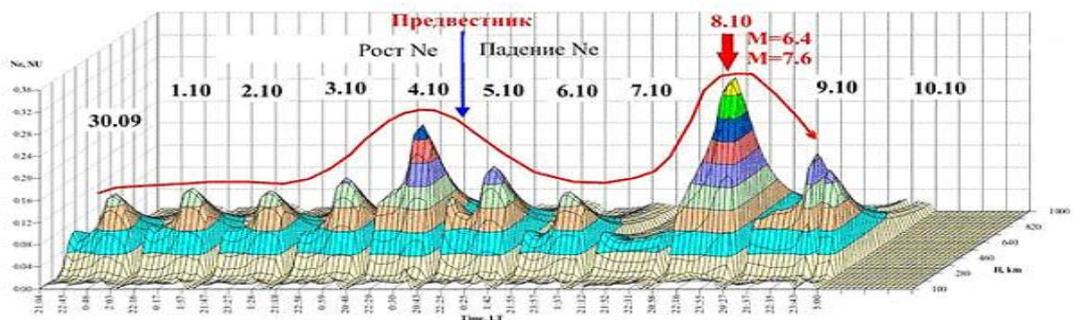


Рис. 5. Реакция ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясения в Пакистане 8 октября 2008 г. [17]

Прогнозирование состояния ионосферы необходимо для систем радиосвязи и исследования ионосферного распространения радиоволн, для эффективного функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, навигационных систем космической навигации (рис.6).

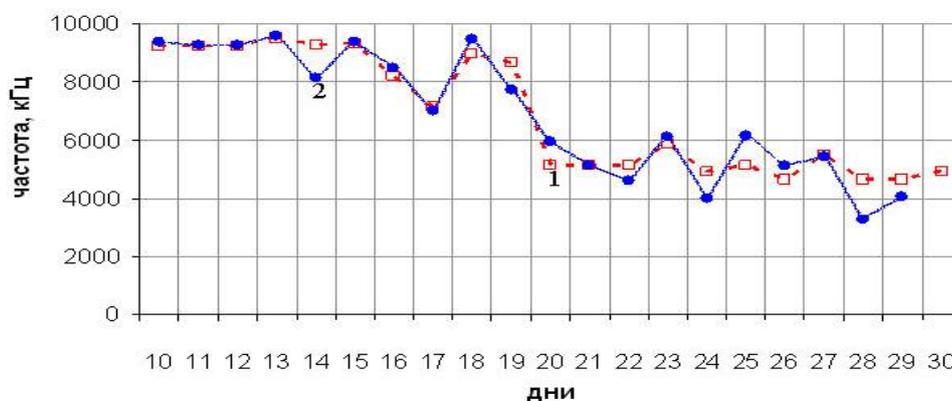


Рис. 6. Сопоставление данных трассового зондирования (1) и метода радиопросвечивания (2) [19]

Получение полной планетарной картины распределения основных параметров ионосферы требуется при проведении геофизических исследований, установлении механизма солнечно-земных связей, позволяющих создать единую динамическую глобальную модель ионосферы, простирающуюся от поверхности Земли до границ магнитосферы. Многообразие параметров, необходимых для описания ионосферы, и обуславливает, в основном, сложность создания приемлемой для практических применений модели.

4. Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы

Для оперативного определения в пассивном режиме ионосферных параметров разработан аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы (АПК-ПМИ). Он позволяет определять основные параметры ионосферы в радиусе до 1000 км от места его установки по результатам приема и обработки радиосигналов навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Подробно описание комплекса и его функциональные возможности изложены в работах [11, 20-22]. Основные функциональные элементы АПК-ПМИ показаны на рис. 7.

АПК-ПМИ может применяться для прогнозирования условий распространения радиоволн коротковолнового диапазона для односторонних радиотрасс и проведения научных исследований гелиогеофизических процессов, происходящих в ионосфере. По сравнению с традиционными средствами ионосферного контроля он обладает рядом преимуществ: - является малогабаритным, что значительно облегчает его развёртывание и эксплуатацию; - не излучает радиосигналы, как следствие, имеет низкое энергопотребление и не создаёт радиопомех другим техническим средствам.

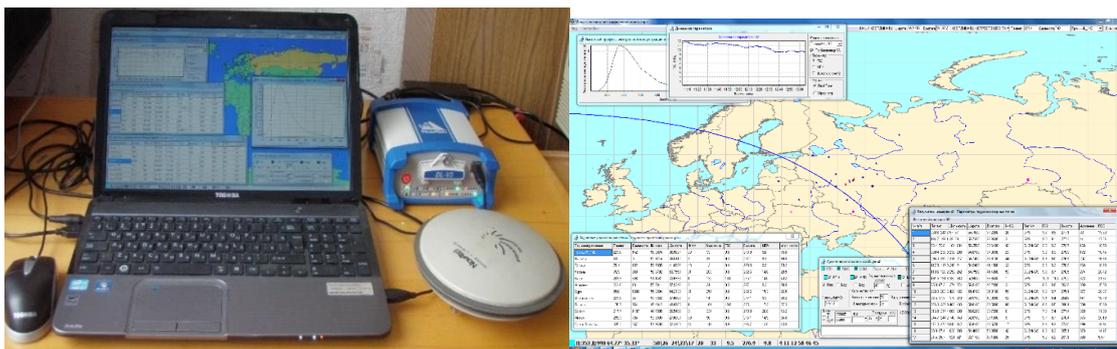


Рис. 7. Общий вид аппаратно-программного комплекса и результаты его работы

Комплекс обладает следующими функциональными возможностями:

- автоматическое определение географических координат своего местоположения;
- определение параметров ионосферы (ПЭС ионосферы, критическая частота и высота максимума слоя F2, высотный профиль электронной концентрации) для подионосферных точек, соответствующих находящимся в зоне радиовидимости космическим аппаратам ГЛОНАСС и GPS, на удалении до 1000 км от места установки комплекса;
- автоматический расчет полярных и географических координат подионосферных точек, для которых определяются параметры ионосферы;
- возможность графического отображения на экране компьютера высотного профиля электронной концентрации для одной из регистрируемых подионосферных точек, выбираемых оператором;
- определение значений максимально применимых частот для задаваемых оператором односкачковых радиолиний коротковолнового диапазона;
- сохранение (архивирование) результатов определения ионосферных параметров и значений МПЧ путем формирования на жестком диске соответствующих файлов в текстовом формате;
- отображение на экране текущего местоположения космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS на картографическом фоне;
- отображение зоны радиовидимости космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS на картографическом фоне относительно места установки комплекса.

Результаты работы ионозонда и аппаратно-программного комплекса показаны на рис. 8. Для сравнения использовались результаты, полученные по данным навигационных спутников, координаты подионосферных точек для которых были наиболее близки к месту расположения ионозонда DPS-4.

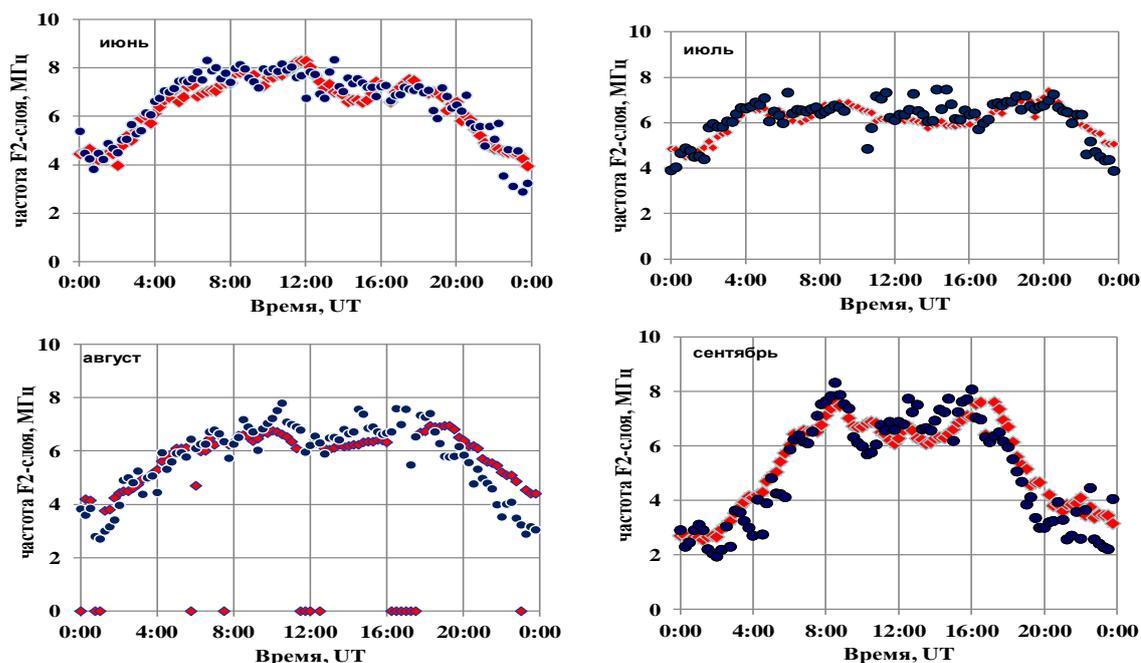


Рис. 8. Результаты сравнения данных АПК-ПМИ и ионозонда DPS-4 (кружки – данные АПК-ПМИ, ромбы – данные ионозонда)

Таким образом, приведенные результаты показали, что метод радиопросвечивания на трассе спутник-Земля, базирующийся на использовании глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, является новым высокоэффективным средством для исследования и непрерывного мониторинга пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы Земли в реальном масштабе времени в различных гелиогеофизических условиях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы ОФН РАН 14 «Фундаментальные проблемы воздействия мощными радиоволнами на ионосферу и магнитосферу Земли».

Литература

1. 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.
2. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь. 1969, 155 с.
3. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами. //Радиотехника и электроника. 2001, №1, с.47-52.
4. Павельев А.Г. К решению обратной задачи рефракции. //Радиотехника и электроника. 1980, т.25, №12, с.2504.
5. Андрианов В.А., Арманд Н.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Результаты использования навигационной системы «Навстар» для мониторинга ионосферы Земли. //Исследование Земли из космоса. 1996, №2, с.10.
6. Alpatov V.V., Andrianov V.A., Smirnov V.M et al. The investigations of the ionosphere variability by radiotranslucence method. //Ad. Space Research. 2001, V. 27, Is. 6-7, p. 1327.
7. Рыжиков Г.А., Троян В.Н. Томография и обратные задачи дистанционного зондирования. СПб.: СПбУ, 1994, 220 с.

8. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980, 190 с.
9. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Определение регулярных вариаций F_2 -области ионосферы Земли по измерениям параметров сигналов навигационных спутников. // Исследование Земли из космоса. 2000, №1, с.15.
10. Смирнов В.М., Смирнов Е.В., 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. 136-141.
11. Смирнов В.М., Смирнов Е.В., С.И. Тынянкин, В.Н. Скобелкин, А.П. Мальковский. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени //Гелиогеофизические исследования. 2013,в.4, с.32–38.
12. Bilitza D. International reference ionosphere: recent developments. //Radio Sci., 1986, v.21, n.3, p.343.
13. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Отклик ионосферы на экстремальную вспышку 28 октября 2003 года. //Геомagnetизм и аэрономия. 2014, т. 54, № 1, с. 94.
14. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Смирнов В.М. Отклик ионосферы на вторжение и взрыв южноуральского суперболида. //Геомagnetизм и аэрономия. 2014, т.54, № 5, с. 646.
15. Липеровский, В.А., О.А. Похотелов., С.Л. Шалимов. Ионосферные предвестники землетрясений М.: Наука, 1992. 304 с.
16. Кузнецов, В.Д. Изучение ионосферных явлений, предшествующих землетрясениям и другим природным и техногенным катастрофам (проект Вулкан) / В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин // Сб. докл. XXI Всерос. науч. конф. Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005 г.- Йошкар-Ола : 2005, т.1, с.27-38.
17. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами. //Доклады Академии наук. 2005, т.402, №5, с.675-679.
18. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем. //Электронный журнал "Исследовано в России", <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf>. 2001 г., № 153, с. 1759-1767.
19. 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.
20. Гузенко О.Б., Смирнов В.М., Тынянкин С.И. Ионосферное обеспечение корабельных средств декаметровый радиосвязи с использованием спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. //Морской сборник. 2015, №2, с. 60-63.
21. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. //Журнал радиоэлектроники. 2010, № 6, с. 5.
22. V. M. Smirnov, E. V. Smirnova, Y. Y. Ruzhin, S. I. Tynyankin and V. N. Sobelkin, "Passive method and hardware-software complex for monitoring and research of the ionosphere," General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI, Beijing, 2014, pp. 1-4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.6929799.