

УДК 523.31

## **МОДУЛЬ ИОНОСФЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА БАЗЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС**

**В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова**

**Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал**

Получена 2 июня 2010 г.

**Аннотация.** Рассмотрены возможности глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли. На их основе разработана структура спутниковой системы ионосферного обеспечения, состоящая из двух частей: орбитальной и наземной. В качестве наземной части предложено использовать информационно-аналитический стенд для хранения и обработки данных измерений. Ключевым элементом такого стенда является автоматизированный модуль ионосферного обеспечения, основанный на реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли по трассе «наземный пункт - навигационный спутник». Приведена возможная блок-схема модуля и описаны осуществляемые им функции. Показана схема проведения измерений и интерпретации данных, а также алгоритм параметрической идентификации обратной задачи радиопросвечивания ионосферы.

**Ключевые слова:** ионосфера Земли, мониторинг, метод радиопросвечивания, КВ радиосвязь, максимально применимые частоты, навигационные системы, модуль ионосферного обеспечения, информационно-аналитический стенд, высотные профили электронной концентрации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время мониторинг земной ионосферы переходит на новый методический и технологический уровень, обусловленный полным развертыванием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и

GPS и развитием алгоритмов решения обратных задач радиопросвечивания, предназначенных для определения параметров земной ионосферы. Этот переход является новой эрой в ионосферных исследованиях, поскольку основные свойства данных систем - возможность проводить измерения непрерывно во времени и пространстве в любой точке земного шара - непосредственно переносятся на ионосферный мониторинг и позволяют обеспечить исследование глобальных и региональных явлений в ионосфере.

Прогнозирование состояния ионосферы является одной из важнейших составляющих систем декаметровой радиосвязи. Несмотря на ряд недостатков, присущих радиосвязи этого диапазона длин волн, ее роль и место в общей системе связи остаются достаточно высокими. Это объясняется тем, что коротковолновая радиосвязь позволяет оперативно устанавливать прямую связь на больших расстояниях, включая труднодоступные водные и горные районы. Организация же постоянно действующих пунктов связи в таких регионах практически невозможна из-за отсутствия в них какой-либо инфраструктуры.

Работа средств радиосвязи коротковолнового диапазона во многом зависит от рефракционных свойств ионосферы на траектории распространения радиосигнала. Состояние ионосферы, как электрически заряженной среды, зависит от многих факторов естественного и антропогенного характера. Их влияние может приводить как к нарушениям качества радиосвязи в этом диапазоне, так и полному ее исчезновению на выбранной несущей частоте.

Учет фактического состояния ионосферы при анализе и прогнозировании работы радиосредств (прогнозирование значений максимально применимых частот (МПЧ)) 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. Одним из элементов такой системы может быть глобальная навигационная спутниковая сеть, которая наилучшим образом подходит для решения поставленной задачи.

Преимущества использования глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли заключаются в следующем [1]:

- 1) использование существующих спутниковых сигналов;
- 2) наличие хорошо развитой сети наземных пунктов международной геодезической службы (IGS – International Geodynamics Service) и опорных региональных пунктов (CORS – Continuously Operating Reference Station);
- 3) применение для измерений стандартных двухчастотных навигационно-геодезических приемников;
- 4) полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы не зависит от предположений о магнитном поле Земли вплоть до высоты 20000 км;
- 5) данные двухчастотных измерений могут быть получены из многих источников, например из баз данных IGS и CORS через интернет;
- 6) данные измерений содержат информацию о всей толще ионосферы и протоносферы;
- 7) базы данных IGS и CORS содержат измерения разных типов приемников в едином формате RINEX (Receiver Independent Exchange) [2];
- 8) влияния поглощения в ионосфере и магнитного поля Земли на параметры радиоволн можно не учитывать, так как номиналы излучаемых спутниками сигналов  $f_1 \approx 1,6$  ГГц МГц и  $f_2 \approx 1,2$  ГГц достаточно высоки.

## СТРУКТУРА СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИОНОСФЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Систему мониторинга можно представить состоящей из двух основных частей: орбитальной (космический сегмент) и наземной. Структура построения каждой из этих частей должна быть рассмотрена отдельно. Её основные составляющие приведены на рис.1.

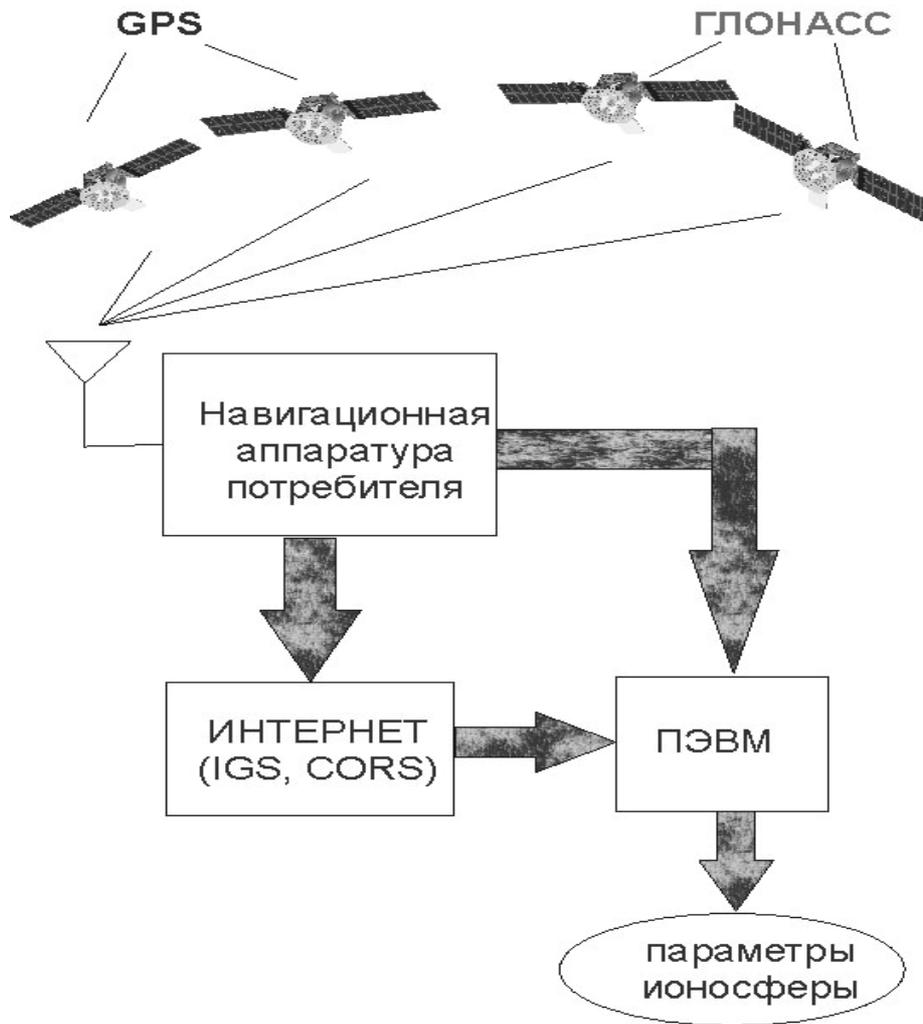


Рис. 1 Структура системы спутникового ионосферного обеспечения.

*Космический сегмент.*

Космический сегмент функционально представляет собой орбитальную группировку спутников, излучающих когерентные сигналы на двух и более частотах. Современное состояние спутниковых систем позволяет в качестве варианта рассматривать глобальные навигационные системы ГЛОНАСС и GPS (рис. 2).

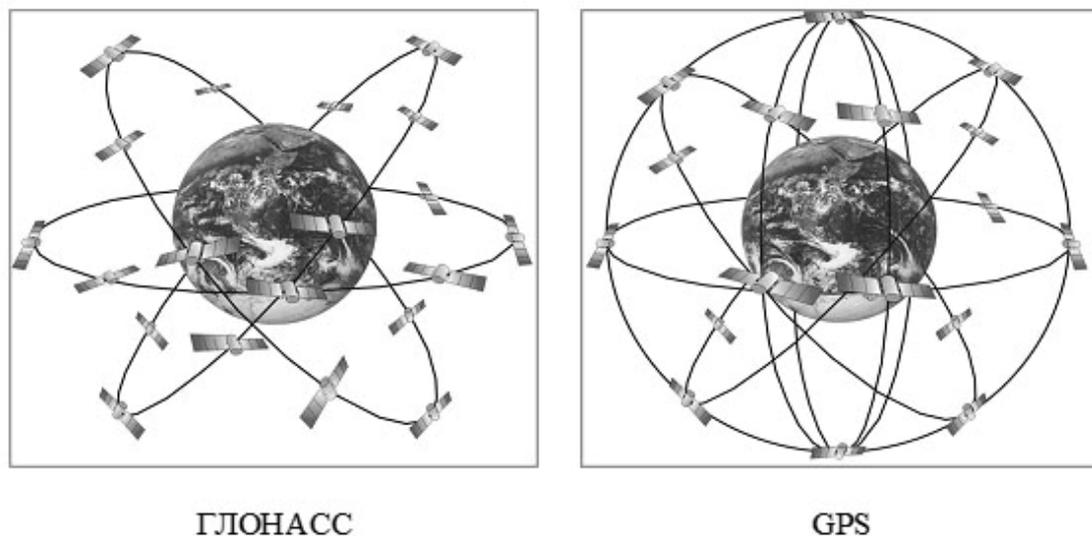


Рис. 2. Космический сегмент навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Внимание этим системам следует уделить не только благодаря высоким техническим характеристикам, но также в силу их пригодности к решению задач дистанционного зондирования. Это объясняется тем, что излучаемые радиосигналы в процессе их распространения во времени и пространстве аккумулируют информацию о среде. Если на пути распространения радиоволн в космосе встречается неоднородная среда (нейтральная атмосфера, ионосфера), то все характеристики зондирующих радиосигналов претерпевают изменения, расшифровка которых обеспечивает информацию о регулярных характеристиках среды и её неоднородной структуре. Наличие в характеристиках сигнала такой информации формирует возможности для последующего восстановления радиофизических параметров среды распространения, т.е. её дистанционного зондирования.

#### *Наземный сегмент.*

В контексте создания системы спутникового мониторинга земной атмосферы концепция структуры наземного сегмента является наименее проработанной. Наземный сегмент должен состоять, как минимум, из двух частей:

- 1) контроль состояния космического сегмента;
- 2) организация сбора, обработки, хранения и выдачи потребителям необходимой информации.

Разработка каждой из этих частей представляет самостоятельную задачу. Рассмотрим первоначальные соображения относительно второй части. Учитывая в определенной степени новизну проблемы, можно предложить процедуру поэтапного создания системы сбора и формирования информации. На данном этапе наряду с обсуждением создания штатной системы для наработки организационно - методического опыта следует рассматривать использование существующих пунктов приема радиосигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Глобальная сеть GPS, насчитывающая в настоящее время свыше 1000 станций, данные которых представлены в интернете, достаточно плотно покрывает Северную Америку, Европу и гораздо хуже Азию. Меньше станций GPS на Тихом и Атлантическом океанах. Однако даже такое заполнение земной поверхности уже сегодня позволяет решать задачу глобального детектирования ионосферных возмущений с высоким пространственным разрешением.

В настоящее время международная геофизическая сеть, данные которой ежедневно выставляются на сайте в интернете, насчитывает свыше 400 постоянно действующих станций, оборудованных высокоточными двухчастотными приемниками сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС (рис.3).

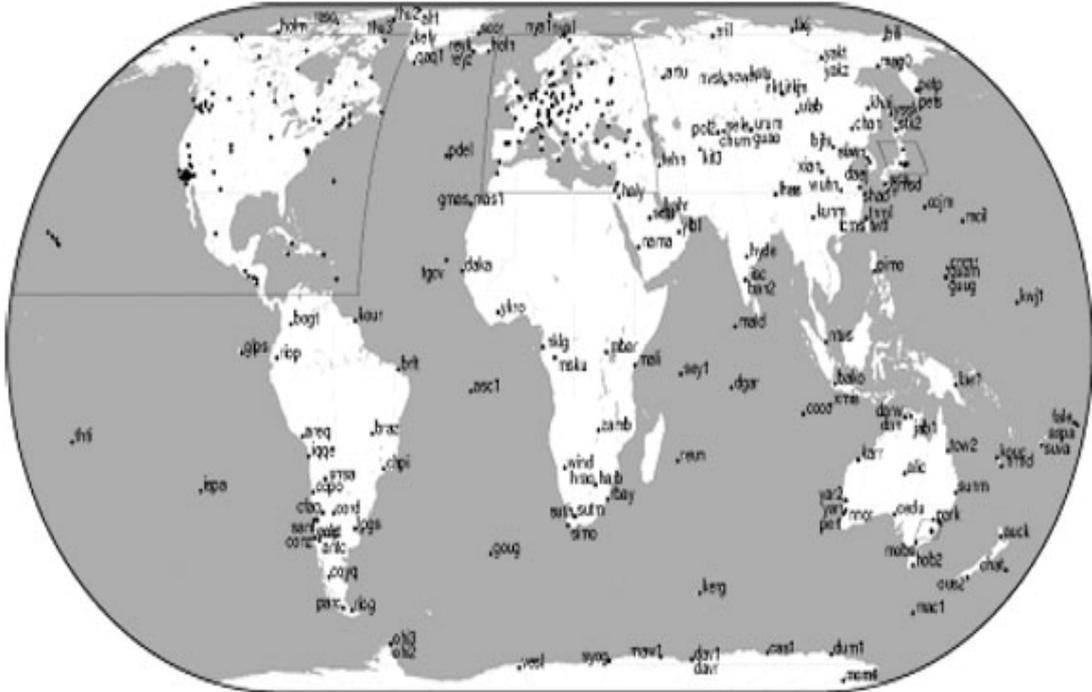


Рис. 3. Расположение станций международной геодинимической сети IGS [3].

Общедоступность этих данных позволяет проводить отработку методик детектирования эффектов воздействия на ионосферу факторов как естественного, так и антропогенного происхождения.

Организация сбора, обработки, хранения и выдачи потребителям необходимой информации может быть реализована на основе существующего в Институте радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук Центра обработки и хранения космической информации (ЦОХКИ). Структура информационно-аналитического стенда для хранения и обработки данных измерений при определении параметров ионосферы Земли, разработанного на базе центра, приведена на рис. 4.

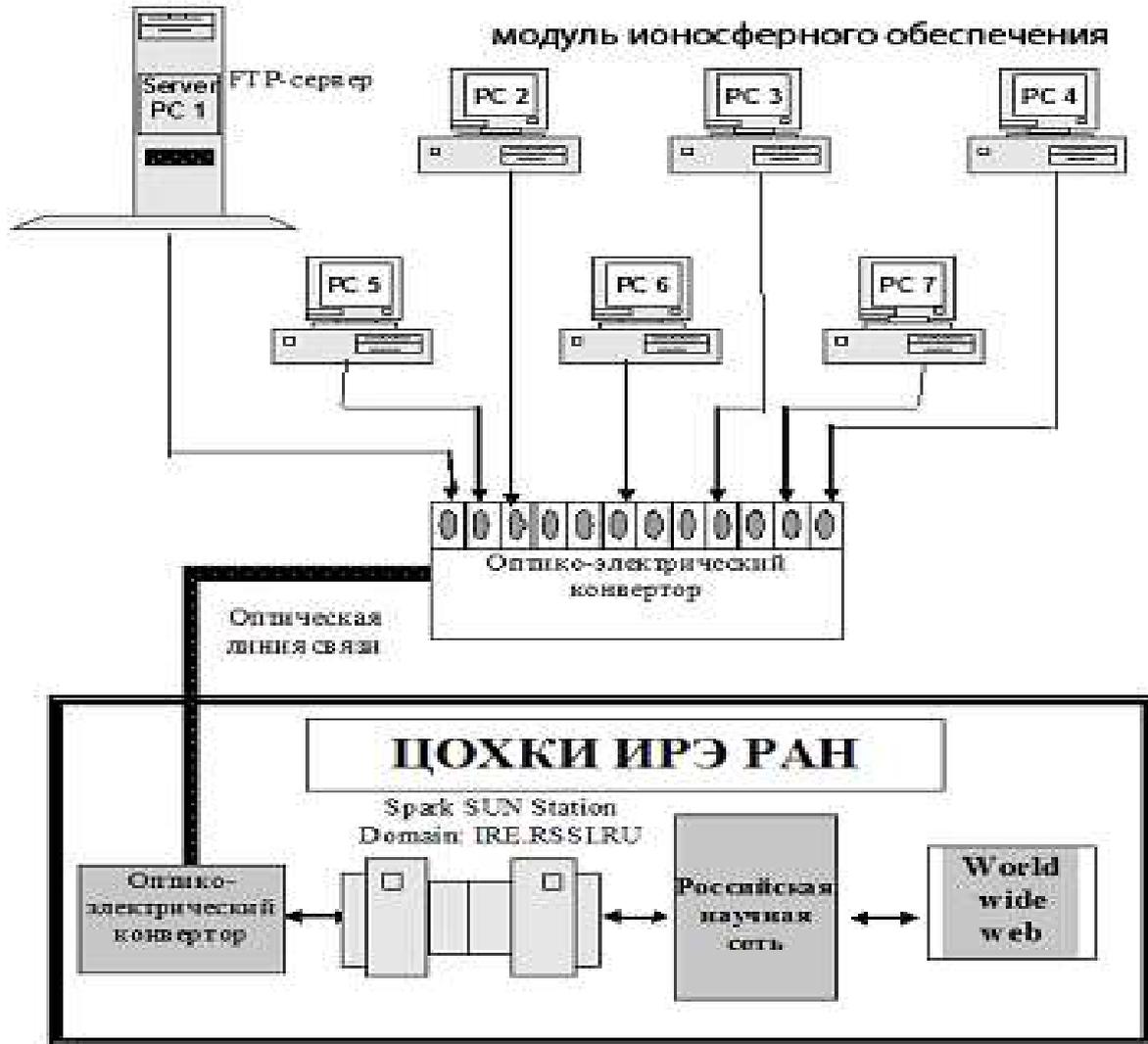


Рис. 4. Информационно-аналитический стенд для хранения и обработки данных измерений при определении параметров ионосферы Земли.

Основным элементом этого стенда является модуль ионосферного обеспечения, основанный на реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли по трассе «наземный пункт - навигационный спутник». Возможная блок-схема модуля приведена на рис. 5.

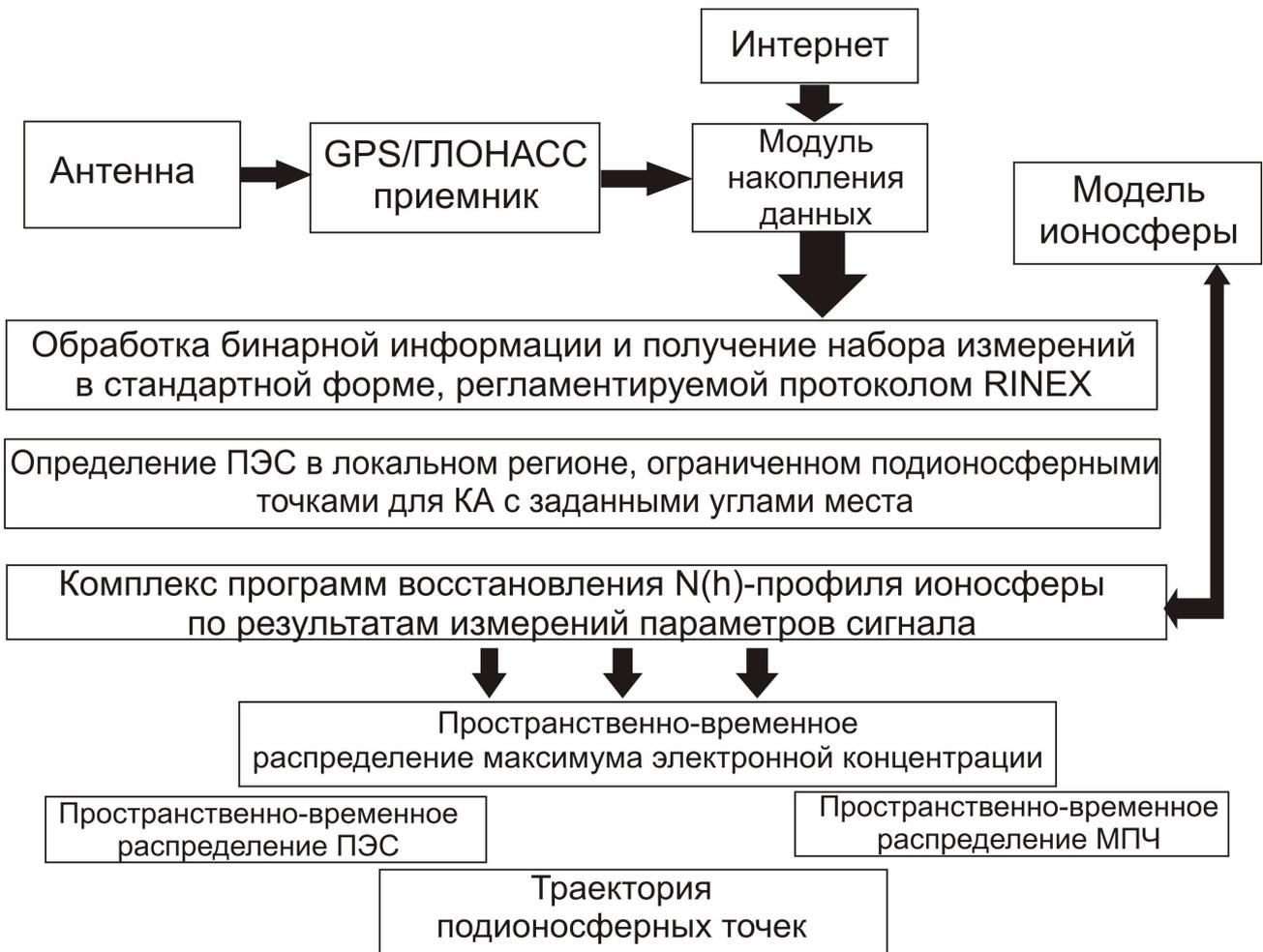


Рис. 5. Блок-схема модуля ионосферного обеспечения.

Модуль ионосферного обеспечения должен осуществлять следующие функции:

1. Прием и накопление исходной навигационной информации от навигационных спутников для двух диапазонов частот L1 и L2.
2. Обработка бинарных данных навигационных измерений и конвертирование их (при необходимости) в стандартную форму записи, регламентируемую протоколом RINEX.
3. Формирование файлов данных измерений по отдельным спутникам.
4. Определение высотных профилей электронной концентрации ионосферы вдоль траектории подионосферных точек для всех спутников, находящихся в зоне видимости наземного приемника.

5. Определение координат подионосферных точек для восстановленных параметров максимума слоя F2.

6. Формирование массива данных, содержащего координаты точки для максимума слоя F2, значения критической частоты слоя и его высоты в зависимости от времени наблюдения.

7. Реконструкция поля параметров максимума слоя F2 для всей зоны видимости наземного пункта.

Создание модуля ионосферного обеспечения, построенного по такой схеме, не требует больших финансовых затрат. Необходимым условием является наличие двухчастотного навигационного приемника (или доступа в интернет) и компьютера с установленным на нем специализированным программным обеспечением, реализующим решение обратной задачи радиопросвечивания.

### МЕТОД РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

Основным ядром предлагаемой технологии мониторинга ионосферы является метод радиопросвечивания. Практическая реализация его базируется на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе «спутник - наземный пункт» по наблюдениям с одного пункта, зона действия которого охватывает область радиусом более 1000 км (рис. 6) [4].

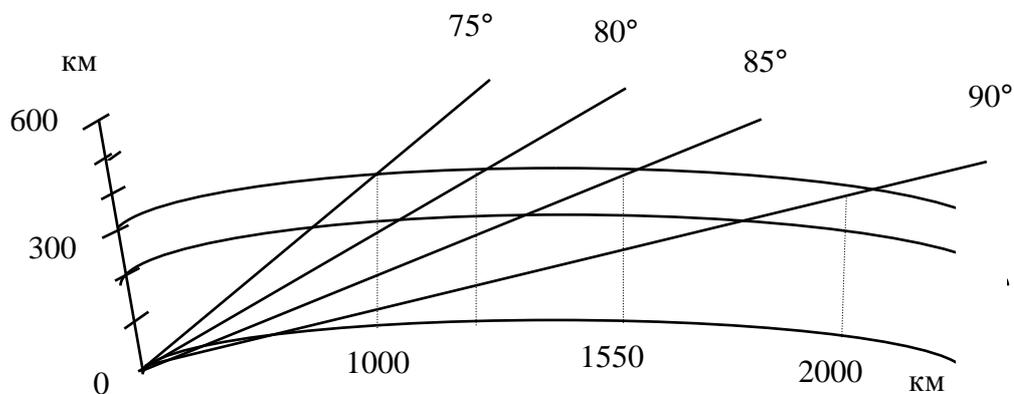


Рис. 6. Истинные расстояния вдоль большого круга от точки наблюдения до проекций точек пересечения лучами максимума ионосферы.

Рассмотрим более подробно схему проведения радиотехнических измерений, показанную на рис. 7 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.

Результаты зондирования вдоль наклонной трассы для малой угловой области  $\Delta E$  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).

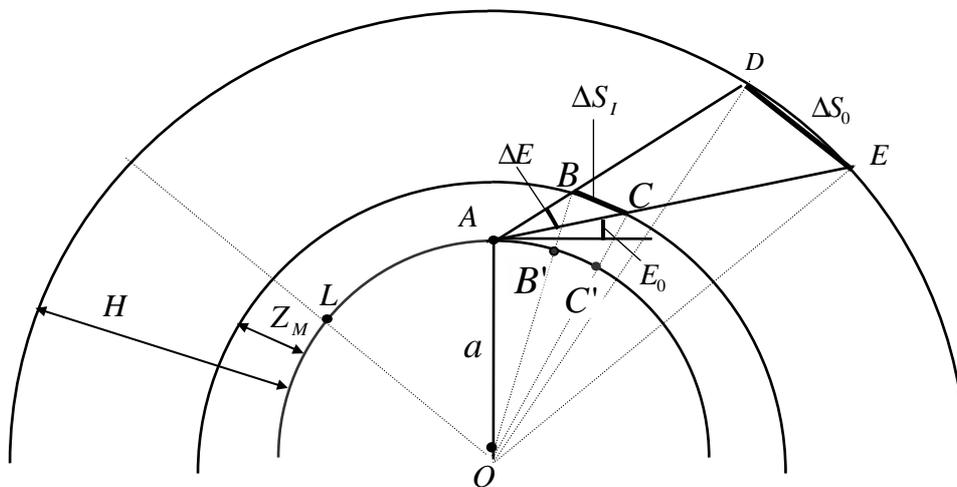


Рис. 7. Схема проведения измерений и интерпретации данных.

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

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

где  $\delta$  - неустранимая погрешность измерений, обусловленная зависимостью от частоты, а  $R_I(f)$  можно определить по формуле [4, 5]:

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

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

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

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

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

где  $z_1$  и  $z_2$  - предполагаемые нижняя и верхняя границы ионосферы соответственно,  $\vartheta$  - зенитный угол наблюдения спутника с пункта измерений,  $z$  - текущая высота от поверхности Земли.

Выражение слева представляет собой полную электронную концентрацию ионосферы (*TEC* в английской аббревиатуре) вдоль пути распространения навигационного сигнала.

Таким образом, формирование разности псевдодальностей, измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению полной электронной концентрации ионосферы. Кроме этого, уравнение радиопросвечивания является интегральным уравнением 1-го рода типа Фредгольма. Решение его относительно неизвестной функции  $N(z)$  сводится к решению некорректно поставленных задач [6]. Алгоритм решения такого уравнения приведен на рис. 8.

Определяя электронную концентрацию ионосферы над конкретной территорией, можно выявить наличие возможных особенностей в её распределении. В течение суток с одного пункта можно получить более 30

траекторий подионосферных точек, каждая из которых содержит в среднем не менее 500 измерений с дискретностью 30 с. Это позволяет получить более 10000 высотных профилей электронной концентрации, примеры которых приведены на рис. 9.

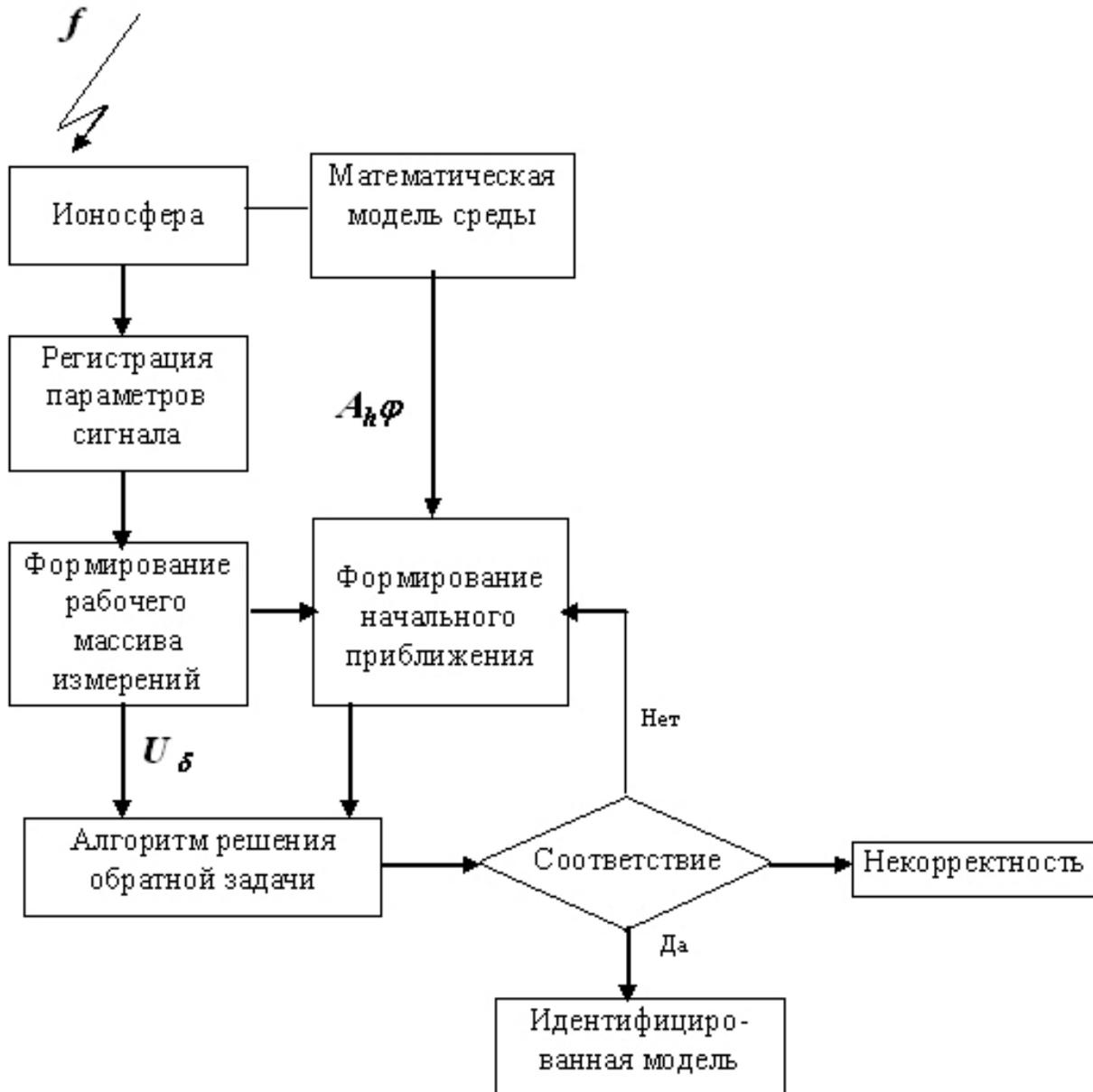
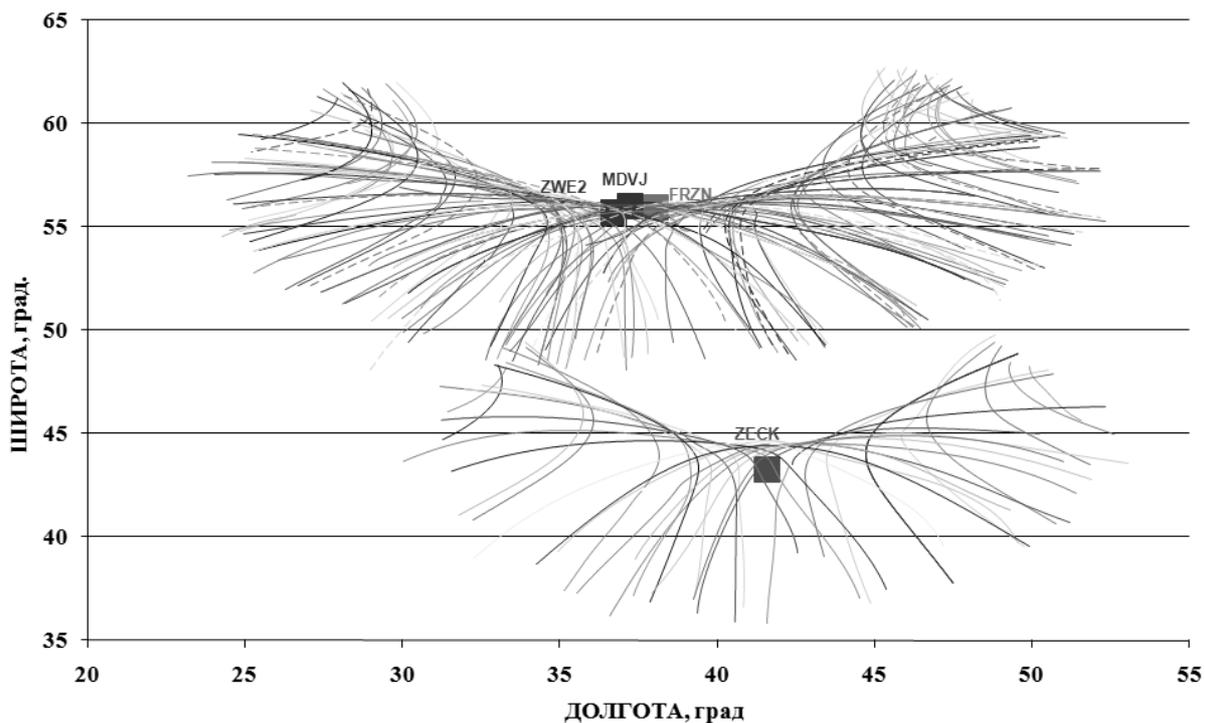
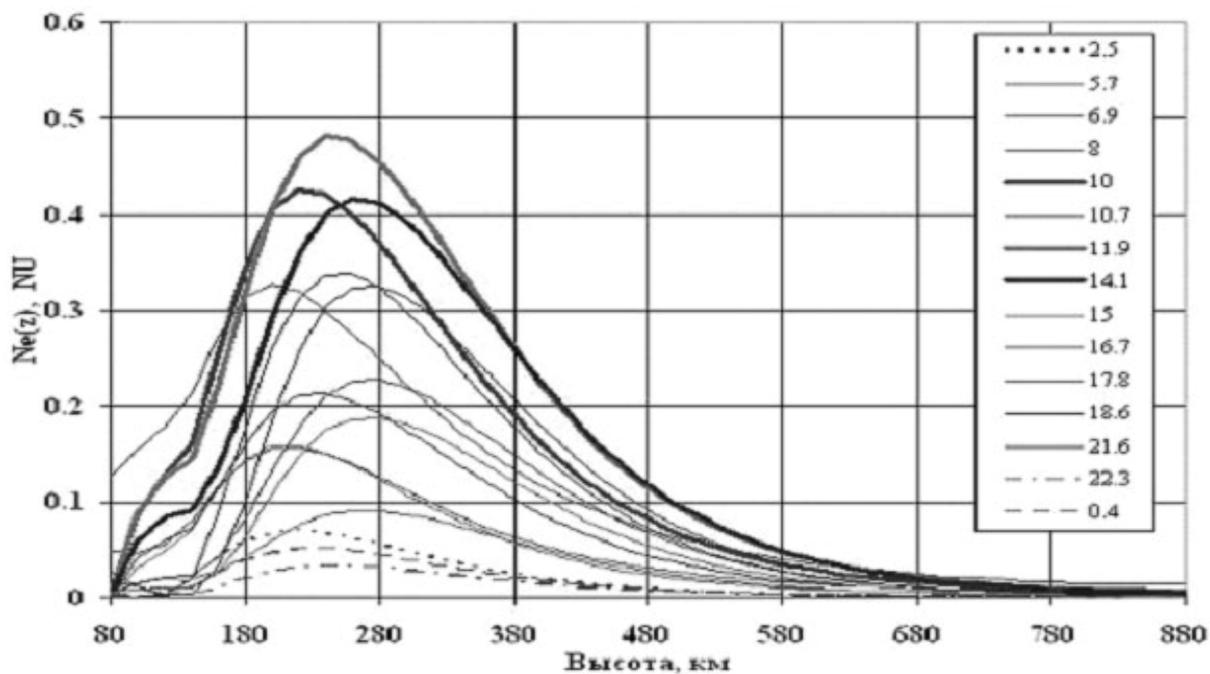


Рис. 8. Алгоритм параметрической идентификации обратной задачи радиопросвечивания ионосферы.

Достаточно плотное покрытие наблюдаемой территории позволяет осуществлять прогноз максимально применимых частот для уверенной работы средств КВ радиосвязи [7].



а)



б)

Рис. 9. Траектории подионосферных точек а) и профили электронной концентрации б), полученные в течение суток по наблюдениям с одного пункта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование навигационных систем для изучения и контроля состояния ионосферы представляет собой научно-технологический прорыв в области дистанционного зондирования верхней атмосферы и обладает глобальной перспективой, обусловленной большим количеством навигационных спутников и наземных пунктов наблюдения.

Предложенная структура построения автоматизированного модуля ионосферного обеспечения, предназначенного для непрерывного мониторинга ионосферы методом радиопросвечивания на трассе спутник-Земля с использованием сигналов навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, - новое высокоэффективное средство для исследования пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы Земли в реальном масштабе времени. Предлагаемый модуль может быть реализован как на базе специализированных центров приема и обработки навигационной информации, так и при использовании отдельных приемников.

Глобальные спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС дают уникальную возможность получения высотного профиля распределения электронной концентрации ионосферы Земли в подорбитальном пространстве космического аппарата для различных гелио- и геофизических условий в любое время суток и любой точке земной поверхности, включая океаны и моря, северный и южный полюса.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davies K, Hartmann G.K.* Studying the ionosphere with the Global Positioning System.//Radio Sci.. 1997. V.32, №.4. P.1695.
2. Receiver Independent Exchange. <http://igscb.jpl.nasa.gov:80/igscb/data/>

format/rinex2.txt.

3. IGS Tracking Network. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>
4. *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.
5. *Смирнов В.М.* Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами //Радиотехника и электроника. 2001. Т.46. №1. С.47-52.
6. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А.* Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука. 1987.
7. *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.