

# Реконструкция пространственно-временной структуры ионосферы по данным спутниковых наблюдений

В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова

*Институт радиотехники и электроники РАН*  
*E-mail: [vsmirnov@ire.rssi.ru](mailto:vsmirnov@ire.rssi.ru)*

Дана оценка возможности реконструкции двух-трехмерной структуры регулярных параметров ионосферы, приведены результаты реализации такого определения. Проведена аналогия с методом компьютерной томографии. Показано, что полученные в результате применения метода радиопросвечивания высотные профили распределения могут служить основой построения пространственно-временной структуры ионосферы Земли.

Ионосфера как среда, содержащая наибольшее количество электрических зарядов в атмосфере, занимает ключевое место как в протекании физических и химических процессов в околоземной плазме, так и в диагностических возможностях для наблюдения процессов, которые происходят в земной атмосфере и в околоземном космическом пространстве.

Из-за сильной пространственной и временной изменчивости регулярных параметров ионосферы и наличия в ней неоднородностей актуальной становится задача построения трехмерных моделей ионосферы. Главную роль в реконструкции двух- и трехмерных параметров среды должны играть методы мультитрассового радиозондирования, позволяющие получать информацию в реальном времени, имеющие развитую техническую базу и хорошо проработанные методики измерений и интерпретации результатов.

Под восстановлением пространственной структуры подразумевается определение плотности электронной концентрации  $N(r, t)$  в ионосфере как функции трех пространственных координат  $\mathbf{r}$  и времени  $t$ . В случаях, когда по данным радиозондирования известны какие-либо проекции (сечения, ракурсы и т.п.) исследуемого объекта и ставится задача восстановления структуры объекта, задачу принято считать томографической. От других методов вычислительной диагностики томография принципиально отличается тем, что информацию от одного и того же объекта можно получать многократно при различных ракурсах наблюдения исследуемого объекта.

Обобщенная схема эксперимента для реализации трехмерной радиотомографии ионосферы Земли с применением навигационных спутников и метода радиопросвечивания показана на рис. 1.

Спутники движутся относительно горизонта на разных высотах и в разных направлениях, а наземные пункты осуществляют одновременный прием радиосигналов в некоторых точках поверхности Земли. Измеряемые параметры радиосигналов (например, фаза, амплитуда или, соответственно, псевдодальность, псевдоскорость и т.д.) содержат информацию об интегральных характеристиках среды, через которую прошли радиоволны. Движение спутника с зондирующими передатчиками позволяет получать на одном из наземных приемных пунктов серии томографических разрезов при разных азимутах и углах путей распространения радиоволн в исследуемой среде.

При определенных предположениях о среде распространения такие данные дают возможность построить для нее двумерное сечение. Одновременный прием сигналов спутника на нескольких наземных пунктах, расположенных вблизи плоскости орбиты спутника, либо прием сигналов от нескольких спутников, плоскости орбит которых близки, а наземный пункт находится вблизи плоскости орбит, позволяет получать двумерное сечение среды без привлечения каких-либо предположений о ее структуре.

В общем случае при одновременном многопозиционном приеме сигналов со спутников, плоскости орбит которых не совпадают, появляется возможность получить достаточно репрезентативную серию двумерных сечений среды в плоскостях, наклоненных под разными углами к горизонту, и на основе этих данных восстановить трехмерную глобальную структуру исследуемой среды.

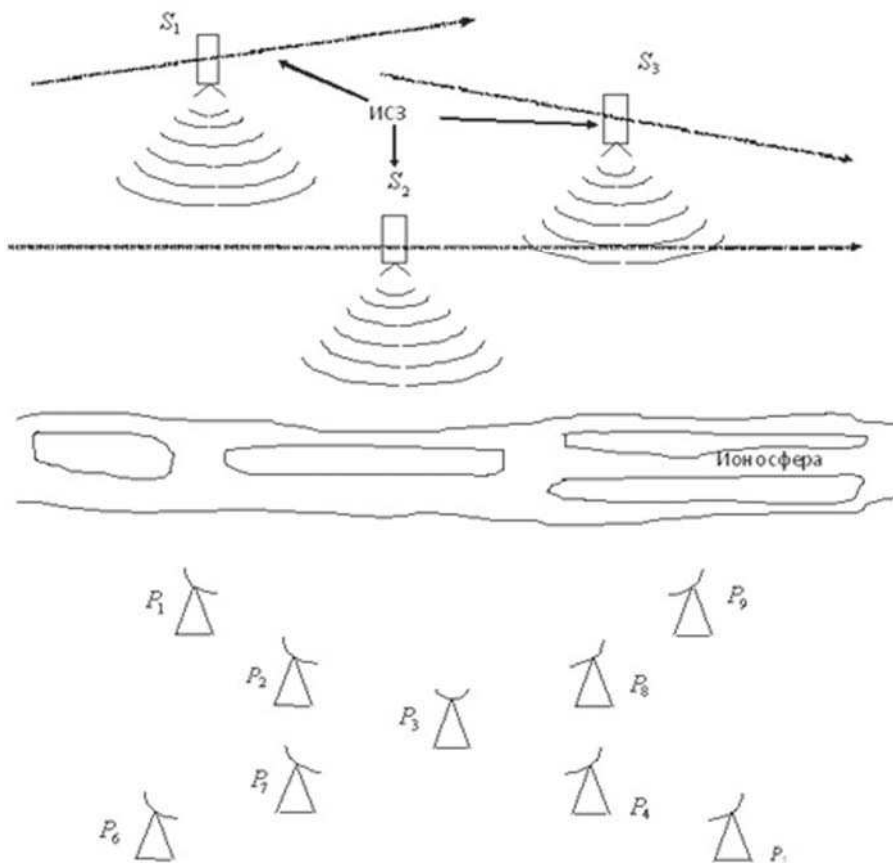


Рис. 1. Схема эксперимента по трехмерной радиотомографии

В настоящее время такие эксперименты реальны: баллистическое размещение навигационных спутников таково, что в зоне видимости пункта находятся обычно не менее шести спутников, а имеющаяся стандартная аппаратура навигационно-геодезических приемников позволяет задействовать множество наземных пунктов.

Практическая возможность определения электронной концентрации в ионосфере была реализована с использованием экспериментальных данных, полученных на одном пункте во время одновременного наблюдения за сигналами шести-семи спутников системы GPS [1-4]. Было показано, что непрерывные наблюдения за несколькими космическими аппаратами возможны и позволяют практически в реальном масштабе времени осуществлять мониторинг ионосферы.

При использовании разработанного метода радиопросвечивания данные о первом профиле электронной концентрации можно получать уже через 3-5 минут с начала наблюдений. Высокая точность определения электронной концентрации и короткое время для получения каждого профиля - 5 минут - позволяют уже сейчас ставить задачу реконструкции серии двумерных разрезов ионосферы и синтеза трехмерной глобальной структуры ионосферы в области диаметром до 2000 км при наличии только одного наземного пункта (рис. 2) [3]. Цифры на окружности показывают номер наблюдаемого спутника, стрелки – направления их движения, ось ординат – географическую широту наблюдения, сектора указывают зону сканирования радиолуча.

Интегральные уравнения радиопросвечивания, определяющие функциональную зависимость измеряемых параметров сигнала от высотного распределения электронной концентрации, которое в свою очередь является функцией пространственных координат и времени, можно считать математической моделью физических процессов, происходящих при радиопросвечивании ионосферы Земли. Их же можно рассматривать как уравнения компьютерной томографии, осуществляемой с достаточно большого числа ракурсов (при использовании глобальных навигационных систем

число ракурсов при дискретности измерений 30 секунд может превышать 3000). Многоракурсный способ реализуется в компьютерной томографии обычно при диагностике несимметричных объектов. Если же объект не обладает какой-либо симметрией, то для восстановления его количественных характеристик необходимо получать информацию с большого числа ракурсов. Ионосферу Земли в полной мере можно отнести к такой среде. Поэтому для её диагностики целесообразно использовать многоракурсный метод компьютерной томографии. Одним из вариантов аппаратурной реализации такой томографии является метод радиопросвечивания, осуществляемый с одного пункта наблюдения.

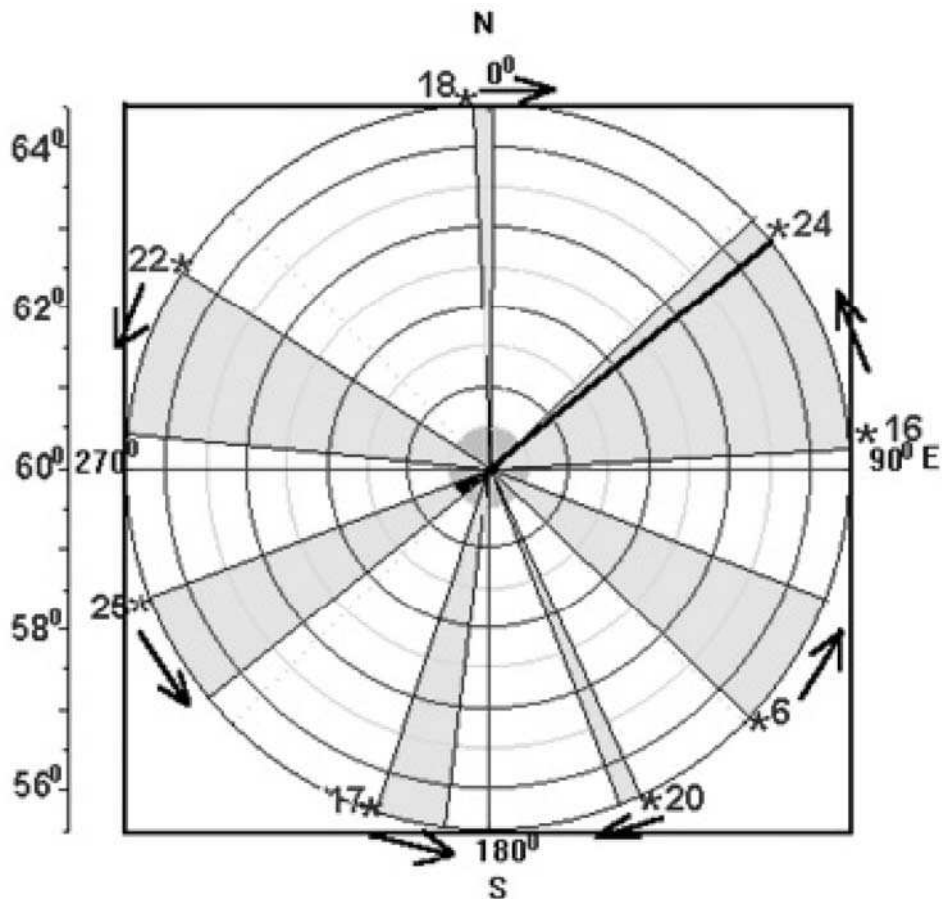


Рис. 2. Зоны видимости КА при проведении измерений с одного пункта наблюдения в течение часа

В этом случае метод позволяет определять одномерные разрезы ионосферы вдоль трассы, аналогичной по форме проекции траектории движения подспутниковой точки. Получаемые при этом профили относятся к вертикальному разрезу ионосферы, географическое положение которого определяется положением проекции подионосферной точки, которая определяется как место пересечения траектории луча распространения электромагнитной волны с максимумом электронного распределения для данного профиля.

Рассмотрим возможность применения получаемых при этом высотных профилей  $N_e(z)$  для 2D реконструкции ионосферы. Основой для построения пространственных разрезов распределения электронной концентрации ионосферы являются приведенные на рис. 3 профили. Эти результаты получены в течение суток при наблюдении 15 космических аппаратов с одного пункта для моментов времени, когда спутники наблюдались под минимальными зенитными углами, т.е. при минимальных расстояниях от пункта наблюдения. Наличие высотных профилей, полученных для разных азимутальных направлений (фактически для разных географических точек), позволяет синтезировать пространственные сечения ионосферы, используя только один пункт наблюдения. Таким образом, в течение суток можно получить

свыше 10000 высотных профилей распределения электронной концентрации с дискретностью наблюдения 30 секунд для территории площадью около 3 млн. кв. км.

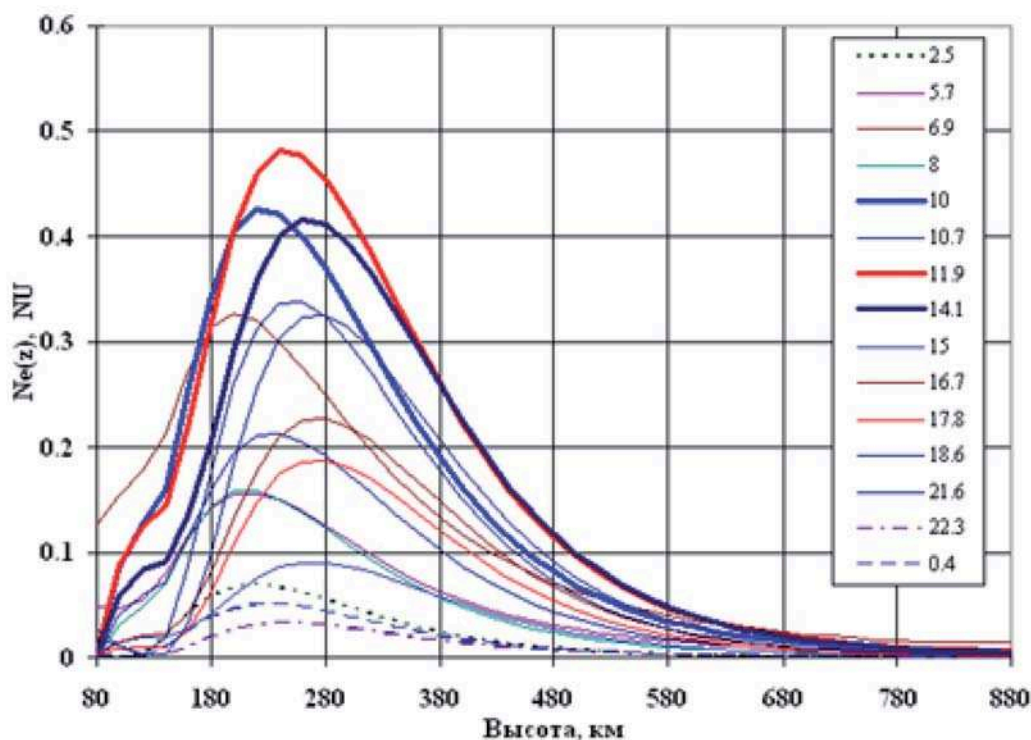


Рис. 3. Временные вариации высотных профилей электронной концентрации, полученные по данным спутников

На рис. 4. показана двумерная структура высотного распределения профиля электронной концентрации, полученная при наблюдении 15 космических аппаратов. Здесь по оси Z отложено значение электронной концентрации в зависимости от высоты, по оси X - текущая высота ионосферы, по оси Y - время наблюдения, которое можно интерпретировать как азимут наблюдения конкретного спутника или как географические координаты подионосферной области, для которой приведен данный разрез ионосферы. Более детально это можно продемонстрировать на примере одного спутника.

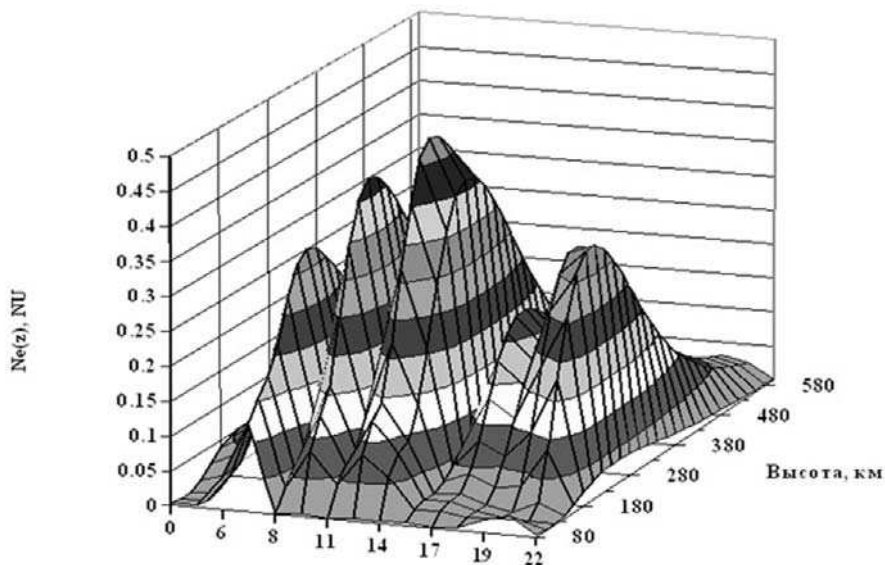


Рис. 4. Высотные профили электронной концентрации ионосферы в течение суток по данным спутников GPS при наблюдении с одного пункта

Поведение максимума электронной концентрации в зависимости от географического расположения подионосферной области показано на рис. 5. Географические координаты этой области определялись как координаты точки пересечения максимума ионосферы с траекторией луча распространения радиосигнала. Высота максимума ионосферы в этом случае определяется из решения обратной задачи определения высотного профиля электронной концентрации, в то время как при создании карты распределения интегральной электронной концентрации используется, как правило, среднее значение высоты максимума ионосферы  $H_{\max} = 400$  км.

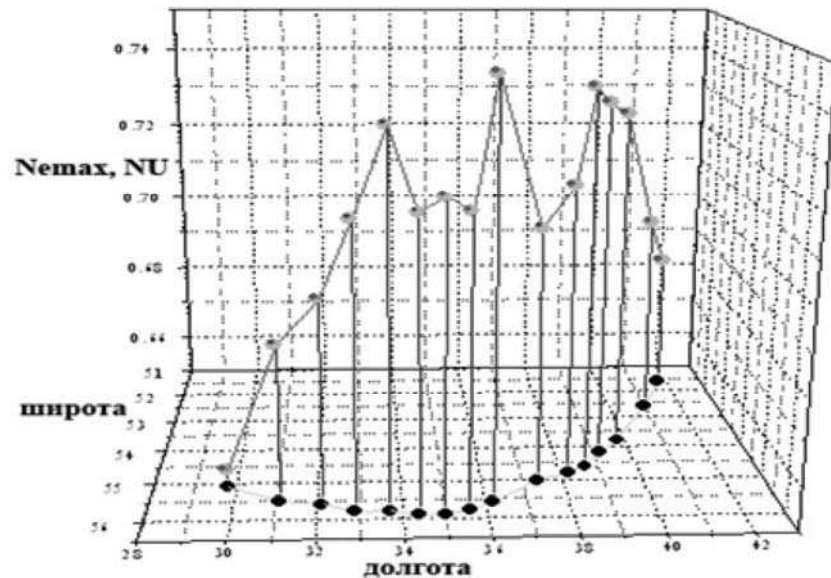


Рис. 5. Поведение максимума электронной концентрации в зависимости от широты и долготы проекции подионосферной точки

Траектория изменения географических координат точки максимума ионосферы в проекции на поверхность Земли показана на рис. 5 в плоскости XY (широта - долгота). Приемник при этом располагался в пункте с координатами примерно  $56^\circ$  с.ш. и  $37^\circ 30'$  в.д. Для суточного сеанса наблюдений траектории подионосферной точки показаны на рис. 6. Вдоль этих траекторий могут быть восстановлены высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы, каждый из которых привязан к конкретной географической точке на этой траектории.

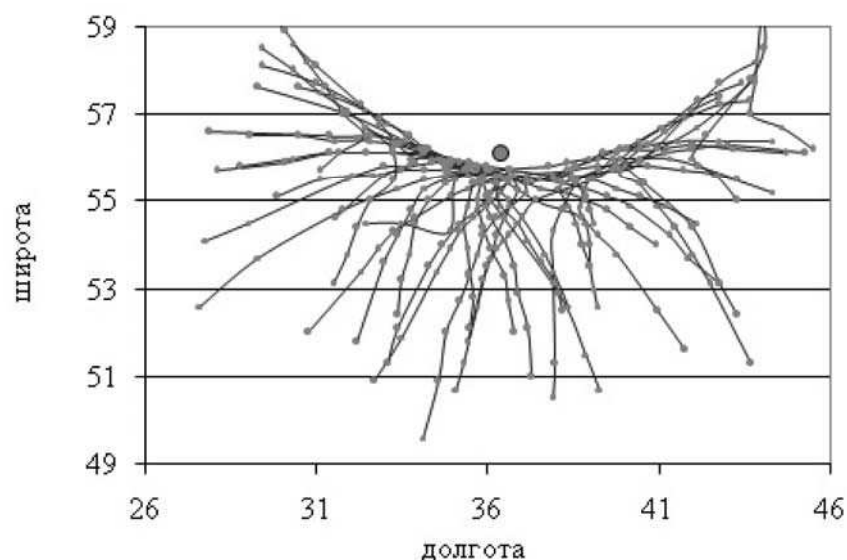


Рис. 6. Траектории подионосферных точек в течение суток



Двумерные сечения ионосферы для одного спутника приведены на рис. 7. Высотные сечения ионосферы представлены здесь для 8 моментов времени наблюдения с интервалом в 30 минут. Координаты этих разрезов могут быть точно приведены в соответствие с координатами проекции подионосферной области. Аналогичную схему можно использовать для каждого спутника, находящегося одновременно в зоне видимости приемного пункта, и тем самым строить двумерные сечения ионосферы одновременно для нескольких географических точек на поверхности Земли. На основе этих двумерных сечений уже можно синтезировать и трехмерную пространственно-временную структуру ионосферы.

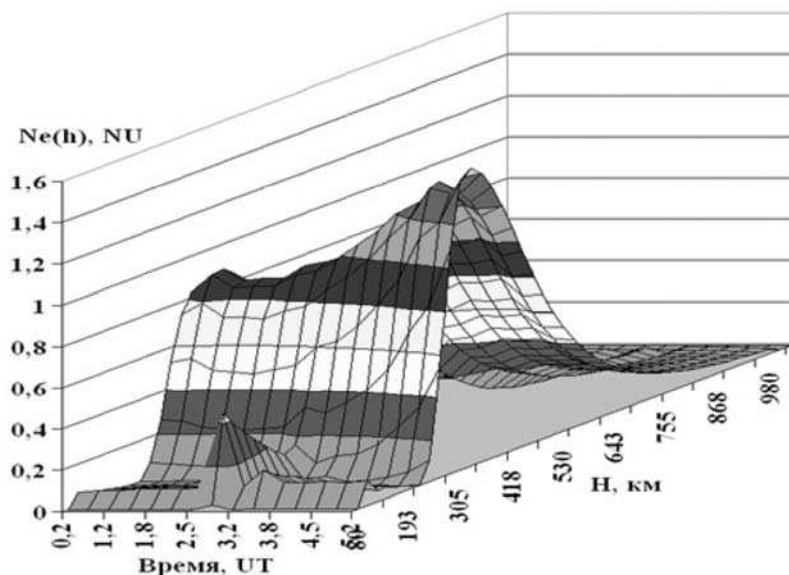


Рис. 7. Пространственно-временной вид высотного распределения электронной концентрации

Таким образом, разработанный метод радиопросвечивания позволяет строить высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы вдоль всей траектории проекции подионосферной области, т.е. осуществлять практически томографию ионосферы при наличии только одного пункта, так как одновременно можно получать от 4 до 8 (а в перспективе до 16) траекторий. Этим он существенно отличается от классического метода радиотомографии, основанного на расположении приемных пунктов вдоль одной линии наблюдения [5].

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН РАН «Плазменные процессы в солнечной системе».

## Литература

1. Андрианов В.А., Арманд Н.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Применение радиосигналов спутниковой навигационной системы для зондирования ионосферы Земли. Препринт ИРЭ РАН, 1995. №5(605). 24 с.
2. Андрианов В.А., Арманд Н.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Зондирование ионосферы Земли с помощью спутниковых навигационных систем // Электроника: Наука, технология, бизнес. 1997. №2. С.11-17.
3. 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.10-16.
4. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Определение регулярных вариаций F2- области ионосферы Земли по измерениям параметров сигналов навигационных спутников. //Исследование Земли из космоса, 2000. №1. С.15-22.
5. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.