

РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОВАЛА ИОНИЗАЦИИ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ

*Е. С. Андреева, А. В. Галинов, В. Е. Куницын, Ю. А. Мельниченко,
Е. Д. Терещенко, М. А. Филимонов, С. М. Черняков*

Впервые проведено восстановление двумерного сечения главного ионосферного провала методом спутниковой радиотомографии. Неоднократно наблюдалась сложная многоэкстремальная структура провала. Развитый подход фазоразностной радиотомографии дает возможность реконструировать глобальные разрезы околоземной плазмы.

Главный ионосферный провал исследовался в основном с помощью прямых спутниковых измерений на высотах много выше максимума концентрации слоя F_2 , значительно реже на высоте максимума области F_2 , либо с помощью ионозондов в областях ниже максимума F_2 ¹. Несомненный интерес для физики образования ионосферы представляют одновременные наблюдения структуры провала как выше, так и ниже максимума F_2 , иными словами, восстановление двумерного разреза ионизации ионосферы. Сравнительно доступным и дешевым средством, обеспечивающим решение задачи реконструкции двумерного сечения околоземной плазмы является радиотомографический эксперимент, с использованием сигналов навигационных ИСЗ.

При постановке радиотомографического эксперимента по восстановлению структуры провала была выбрана схема с приемными точками, находящимися вблизи городов Мурманска, Кеми (Карелия) и Москвы. Основой для такого выбора послужили следующие причины. Во-первых, эти приемные точки расположены вдоль проекции орбиты на Землю движущегося с севера ИСЗ. При этом проекция орбиты совпадает с геомагнитным меридианом. Во-вторых, по результатам наблюдений с помощью спутника "Интеркосмос-19"² для спокойных условий в зимней ионосфере периода высокой солнечной активности было установлено, что положение минимума концентрации в главном ионосферном провале в полуночное время находится примерно на широте г. Кеми, смещаясь от нее на север или на юг в зависимости от времени суток.

В эксперименте по радиотомографии провала была использована приемная аппаратура системы пассивной навигации, снабженная дополнительными оконечными устройствами: системой выделения амплитудно-фазовых изменений сигнала частоты 150 МГц и устройством сопряжения аналого-цифровых преобразователей с ЭВМ. Дополнительные устройства позволяют выделить ионосферную составляющую доплеровской частоты. Эксперимент реализован на ДВК-ЗМ. Синхронизации разнесенных на значительное расстояние приемных пунктов осуществлена с помощью запуска генератора с секундной меткой, привязанной к бортовой шкале времени на ИСЗ. Размер буфера накопления в оперативной памяти дает возможность проведения непрерывной записи сигналов с частотой отсчета 200 Гц в течение 10 мин, необходимых для проведения эксперимента. Подразумевается, что характерные времена изменения глобальных структур превышают время измерений. В результате обработки двух квадратур находится с точностью до неизвестной постоянной значение фазы ϕ , зависящее от интеграла по распределению электронной концентрации N вдоль линии распространения радиоволны³.

Реконструкцию двумерного распределения электронной концентрации можно реализовать в полярной системе координат (r, a) , связанной с центром Земли. Здесь удобнее использовать координаты (h, τ) , где $h = r - R$ – высота над поверхностью Земли радиуса R , $\tau = aR$ – "поперечная" координата отсчитываемая по поверхности Земли. Тогда с точностью до размер-

ных множителей фаза пропорциональна линейному интегралу I

$$\int_0^{h_0} \frac{N(h, \tau) (R + h) dh}{[R^2 \sin^2 \beta + 2Rh + h^2]^{1/2}} = I(\beta, \tau_i) \quad (1)$$

Здесь τ_i — координаты приемников h_0 — высота и β — угол места ИСЗ. Если бы фаза измерялась абсолютно, то (1) сводилась бы к обычной задаче малоракурсной томографии. Однако, измерить фазу абсолютно, т.е. определить неизвестную постоянную составляющую сложно. Необходимы большие многопозиционные и многочастотные системы. В радиотомографическом эксперименте непосредственно измеряется приведенная доплеровская частота или разности фаз.

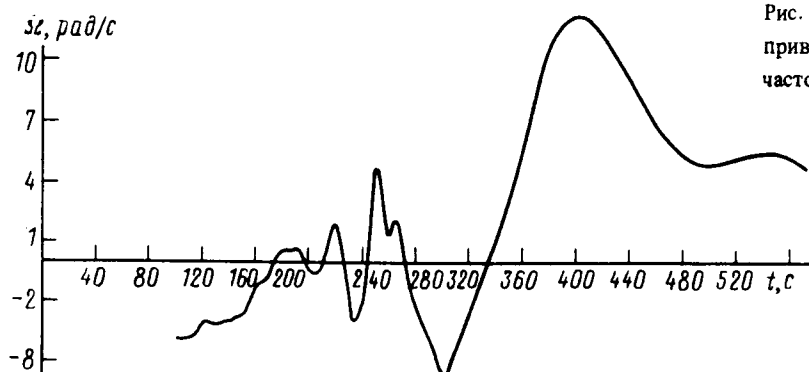


Рис. 1. Пример зависимости приведенной доплеровской частоты от времени

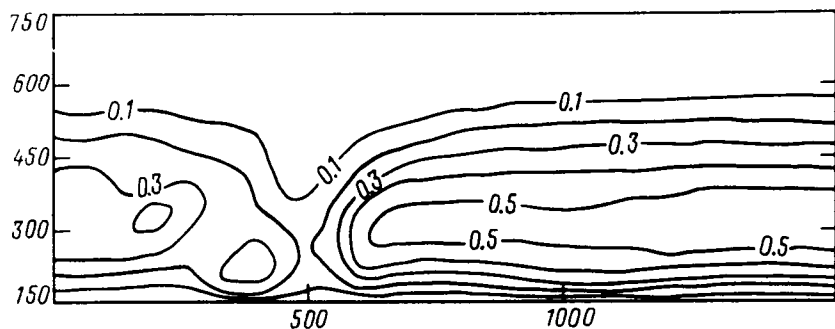


Рис. 2. Реконструкция сечения провала ионизации от 7.04.90, время 22:05:26

Для решения задачи реконструкции по приведенной доплеровской частоте разработан метод фазоразностной радиотомографии. Эта задача соответствует восстановлению распределения N по разности D двух линейных интегралов (1) на близких лучах с небольшим изменением β . С применением кусочно-планарной аппроксимации на треугольных элементах и аппроксимаций более высокого порядка разностная система сводится к системе линейных уравнений. При реконструкции структуры областей размером порядка тысячи километров прямоугольная разреженная матрица системы содержит порядка $10^6 - 10^7$ элементов. Проведенные численные эксперименты показали возможность восстановления глобальной структуры околоземной плазмы методом фазоразностной томографии и тремя приемниками с разрешением в десятки километров. Хорошие результаты получены с помощью ряда итерационных алгоритмов и некоторых вариантов обратного проецирования. Точность реконструкции зависит от метода, числа итераций, и начального приближения. Как правило, 10–20 итераций позволяют достичь 5–10% точности восстановления, основные качественные детали реконструируются правильно. Для неоднородностей размерами в единицы километров уже

необходимо использовать подход дифракционной томографии⁴. Метод спутниковой радиотомографии дает возможность восстанавливать и крупные неоднородности искусственного происхождения, типа дефокусирующей ионосферной линзы⁵.

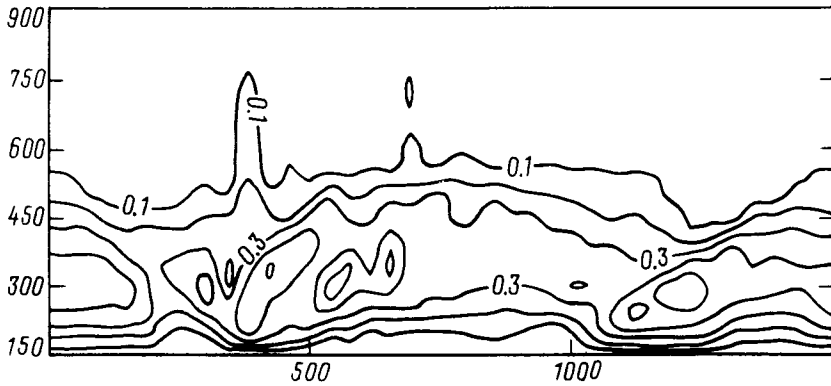


Рис. 3. Реконструкция сечения провала ионизации от 28.03.90, время 5:37:10

В марте – апреле 1990 г. была проведена серия экспериментов по радиотомографии главного ионосферного провала. Восстановленные структуры весьма разнообразны, они заметно меняются как от времени суток, так и день ото дня. Зарегистрирован ряд довольно регулярных и гладких сечений $N(h, \tau)$, при этом доплеровская частота лишь один раз проходит через ноль. Но неоднократно встречались и весьма сложные по структуре сечения провала, тогда доплеровская частота имеет много экстремумов и несколько раз пересекает ноль. Пример такой записи доплеровской частоты Ω в Мурманске от 7.04.90 (время начала записи 22:05:26) приведен на рис. 1. Подобные записи являются следствием сложной структуры провала с наличием нескольких локальных экстремумов. Соответствующая этой записи реконструкция сечения провала изображена изолиниями на рис. 2 в единицах 10^6 эл/см³. Размер кадра изображения по высоте h в пределах 150–1000 км. Расстояние τ меняется от 0 до 1500 км. Координата τ Мурманска равна 10 км, Кеми – 433 км, Москвы – 1475 км. Дискретность сетки реконструкции 50×60 км. Томографическая реконструкция сечения провала от 28.03.90 г. приведена на рис. 3. Здесь также наблюдается сложная многоэкстремальная структура.

Литература

1. Полярная верхняя атмосфера. Под ред. Ч. Дира, Я. Холкета. М.: Мир, 1983.
2. Демин М. Г., Карпачев А. Т. Геомагнетизм и аэрономия, 1986, 26, 63.
3. Терещенко Е. Д. Радиотомографический метод исследования ионосферных неоднородностей. Апатиты, 1987.
4. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D. The reconstruction of the ionosphere irregularities structure. Preprint Polar geophys. inst.-Apatity, 1990.
5. Бойко Г. Н., Васильков В. В., Голян С. Ф. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 533.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию
18 июня 1990 г.