

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ИЗМЕРЕННОМУ ПРОФИЛЮ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ПОЧТИ РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Т.Н. Савченко

## METHODS AND ALGORITHMS FOR DETERMINATION OF ELECTRON CONCENTRATION BY MEASURED PROFILE OF INCOHERENT SCATTER SIGNAL POWER IN AUTOMATIC MODE AND QUASI-REAL TIME

T.N. Savchenko

Настоящая работа посвящена определению профилей электронной концентрации в автоматическом режиме и почти реальном времени по данным Иркутского радара НР, имеющего одну линейную поляризацию поля, что существенно отличает его от специализированных радаров НР. Сигнал на входе линейно поляризованной антенны испытывает квазипериодические замирания (вследствие эффекта Фарадея), и это вносит существенные осложнения при создании методов вторичной обработки.

The present work is devoted to definition of electron density profile in an automatic mode and almost real time according to Irkutsk radar IS data. Irkutsk radar IS has one linear polarization of field that essentially differences it from specialized IS radars. Signal on the input of the linear polarized antenna has quasiperiodic fading (due to Faraday effect). Faraday fading of signal brings essential complications at creation of secondary processing methods.

Метод некогерентного рассеяния радиоволн является наиболее информативным из наземных средств диагностики верхней атмосферы в большом интервале высот и позволяет измерять одновременно несколько параметров ионосферной плазмы с высоким пространственно-временным разрешением. С помощью метода НР можно получать информацию о распределении таких параметров ионосферной плазмы, как электронная концентрация, электронная и ионная температуры, ионный состав, скорость дрейфа плазмы и др.

Иркутский радар НР, переданный несколько лет назад институту по конверсии, имеет одну линейную поляризацию поля, что существенно отличает его от специализированных радаров НР. Вследствие эффекта Фарадея – вращения плоскости поляризации высокочастотной радиоволны в плазме, находящейся во внешнем магнитном поле, сигнал на входе линейно поляризованной антенны испытывает квазипериодические замирания, когда поляризации антенны и волны ортогональны. На существующих в мире станциях НР данная проблема обходится с помощью применения антенн, измеряющих две скрещенные поляризации сигнала, или применения при передаче и приеме сигналов с круговой поляризацией. На радаре НР ИСЗФ такие возможности отсутствуют.

Фарадеевские замирания сигнала вносят существенные осложнения при создании методов вторичной обработки, но их можно преодолеть, разработав соответствующие методы и алгоритмы. Важно, что фарадеевские вариации можно использовать для абсолютных измерений высотных профилей электронной концентрации по вариациям мощности НР-сигнала. Это можно видеть из уравнения радиолокации, учитывающего фарадеевские вариации мощности НР-сигнала для линейно поляризованной антенны (1.1), и формулы, связывающей угол фарадеевского вращения с профилем электронной концентрации (1.2):

$$\frac{1}{A_0} \int_0^r \tilde{P}(r') \cdot r'^2 \cdot (1 + T_e(r')/T_i(r')) dr' = \Omega + \frac{\sin(2\Omega)}{2} + C, \quad (1.1)$$

$$N_e(r) = \frac{1}{\gamma} \frac{d\Omega}{dr}; \quad (1.2)$$

здесь  $\tilde{P}(r')$  – профиль мощности,  $\Omega(r)$  – угол поворота плоскости поляризации,  $T_e(r)$  – электронная температура плазмы,  $T_i(r)$  – ионная температура плазмы,  $N_e(r)$  – электронная концентрация,  $A_0$  – радиолокационная константа,  $\gamma$  – известная константа.

Данная работа основана на предыдущих исследованиях, проведенных в нашем институте, и использует методы и алгоритмы, разработанные ранее. Основная цель данной работы – усовершенствовать имеющиеся или разработать новые методы и алгоритмы, позволяющие не просто определять пространственно-временные распределения параметров ионосферы, но определять их автоматически в реальном или почти реальном времени. Необходимость в данном усовершенствовании вызывают современные требования эксперимента.

Обработка данных осуществляется в два этапа: первичная и вторичная обработка.

Первичная обработка включает в себя исключение из исходного профиля мощности ложных всплесков, вызванных спутниками, и фильтрацию шума. Вторичная обработка состоит из следующих этапов: нахождение радиолокационной константы, определение параметра  $T_e/T_i$ , входящего в профиль мощности, с целью учета его влияния на профиль электронной концентрации, и вычисление собственно профиля концентрации.

### Первичная обработка:

1) На высотах выше 500–800 км встречается много спутников, вносящих существенные помехи в регистрируемый НР-сигнал и серьезно влияющих на результат расчетов. В итоге значительная часть данных оказывается полностью или частично испорчена. Следовательно, при обработке важной задачей является исключение из расчетов помех от спутников.

В работе предложен простой метод исключения спутниковых всплесков из профилей мощности. На

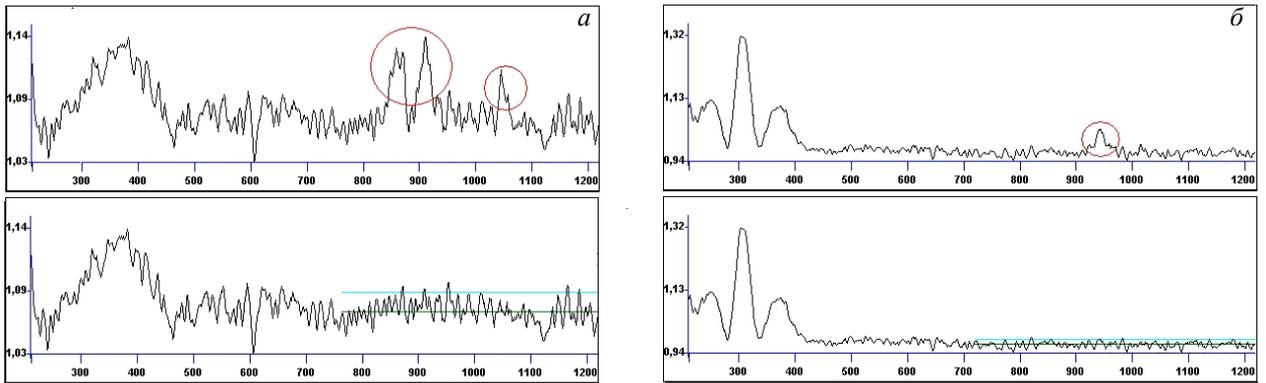


Рис. 1. Примеры исключения спутниковых всплесков из профилей мощности: ночные данные (а); дневные данные (б). Спутниковые всплески обрисованы окружностями.

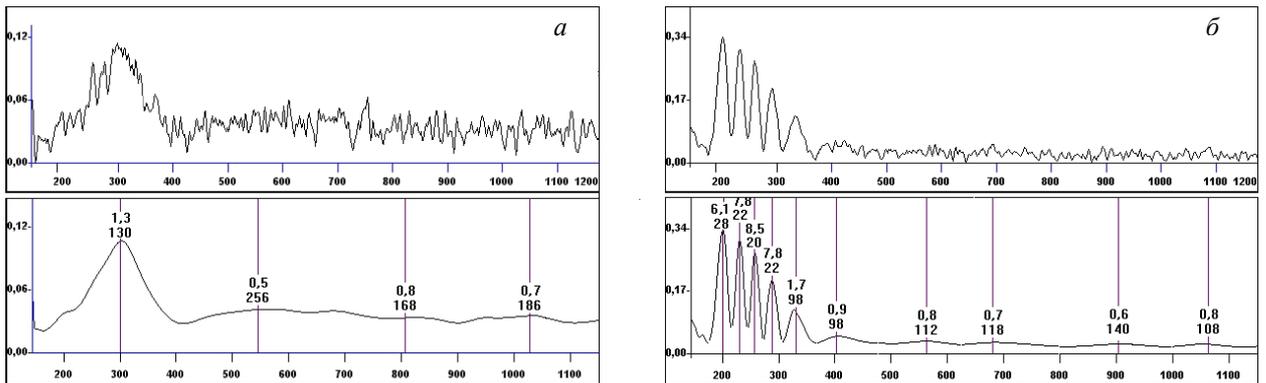


Рис. 2. Примеры фильтрации шума адаптивным фильтром с переменными параметрами: ночные данные (а); дневные данные (б). Числа на нижних графиках – значения переменных параметров фильтра в экстремальных точках профиля: верхняя группа чисел – частота отсечки фильтра, нижняя группа чисел – ширина фильтра.

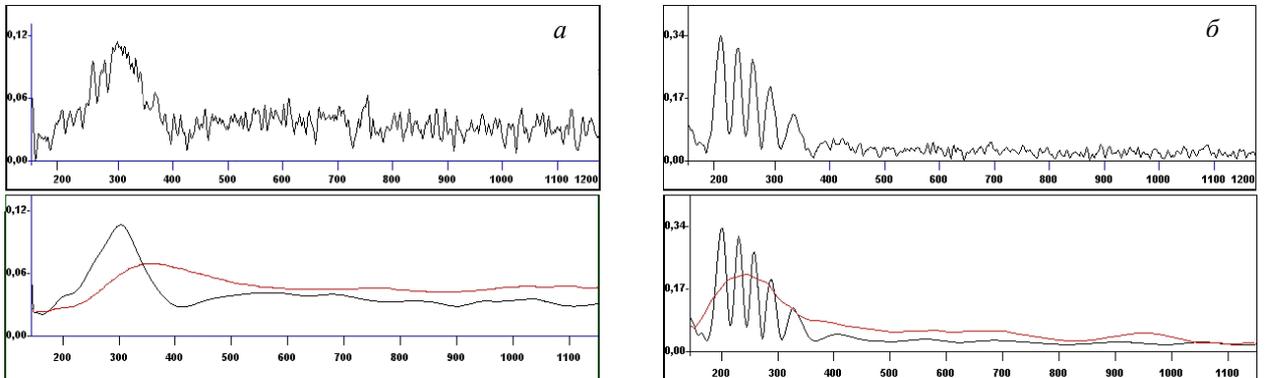


Рис. 3. Примеры рассчитанных профилей концентрации: ночные данные (а); дневные данные (б).

первом этапе осуществляем пороговое определение местоположения всплеска. В качестве порога берется удвоенная дисперсия профиля мощности на больших и средних высотах. Сигнал, отраженный от спутника, является когерентным, а рассеянный сигнал и шум представляют собой случайный сигнал. В области обнаруженного всплеска производится фильтрация случайного сигнала с помощью фильтра, согласованного по длительности с длительностью всплеска, которая приблизительно равна длительности зондирующего импульса (ЗИ). Определив таким образом точное местоположение и мощность всплеска, мы вычитаем из исходного профиля форму ЗИ, которая является почти прямоугольной.

На рис. 1 приведены примеры исключения спутниковых всплесков из профилей мощности.

2) При обработке сигнала важную роль играет очищение от шума, что особенно актуально, учитывая высокую зашумленность сигнала НР, особенно на больших высотах, а также в ночное время.

Был разработан алгоритм адаптивной фильтрации с переменными параметрами, плавно меняющимися в зависимости от высоты. Автоматически подбирается верхняя частота пропускания и ширина окна фильтра отдельно для каждой фарадеевской вариации, в результате чего отфильтрованный сигнал получается одинаково гладким (не зашумленным) на всем интервале высот. Критериями для выбора частоты пропускания фильтра для конкретной вариации служат: на малых высотах, где фарадеевские максимумы мощности отчетливо видны, – ширина пика по уровню 0.5, на больших высотах –

расстояния между нулями мощности, определенные при обработке предыдущего профиля мощности.

Точный подбор параметров фильтрации для каждой вариации способствует более точному нахождению границ вариации и, соответственно, более точному вычислению профиля электронной концентрации.

На рис. 2 приведены примеры фильтрации шума для ночных (а) и дневных (б) профилей мощности. На нижних графиках указаны значения переменных параметров фильтра в экстремальных точках профиля: верхняя группа чисел – частота отсечки фильтра, нижняя группа чисел – ширина фильтра.

#### Вторичная обработка:

Как видно из формул (1.1) и (1.2), для расчета профиля электронной концентрации кроме профиля мощности нужно знать радиолокационную константу  $A_0$  и приблизительный профиль отношения электронной температуры к ионной  $T_e(r)/T_i(r)$ . Для ночных данных, как правило, можно считать электронную температуру приблизительно равной ионной. В этом случае нормировочная константа зависит только от профиля мощности, и ее можно определить непосредственно по профилю мощности, из условия, что между двумя минимумами мощности плоскость поляризации повернется на  $180^\circ$ .

На первом этапе значение  $A_0$  будет приблизительно, так как определенные из графика минимумы концентрации могут не совсем совпадать с их истинным положением, поэтому величина  $A_0$  уточняется на каждой последующей реализации (но только на ночных данных).

По вычисленному значению радиолокационной константы и приблизительному профилю  $T_e/T_i$ , найденным из предыдущей реализации, определяются местоположения неявных минимумов мощности (опять же из условия, что между минимумами плоскость поляризации повернется на  $180^\circ$ ). Уточняется значение радиолокационной константы и параметр  $T_e/T_i$ , и вычисляется функциональная зависимость угла поворота плоскости поляризации от расстояния.

Профиль электронной концентрации пропорционален производной угла поворота по расстоянию и легко определяется на данном этапе, так как функция угла уже известна.

Описанные действия повторяются для каждого последующего профиля мощности.

Тестирование разработанного алгоритма и программного обеспечения показывает хорошую работоспособность применяемых методик. На рис. 3, а, б приведены рассчитанные профили электронной концентрации для ночных и дневных данных соответственно.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея: Канд. диссерт. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2000. С. 66–92.
2. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. Л.: Наука, 1979. С. 105–135.
3. Nygren T. Introduction to incoherent scatter measurements // Inverse Publications N1. Finland, 1996. С. 14–63.