

Д. П. БЕЛОЗЁРОВ, м. н. с., Институт ионосферы (г. Харьков)

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИОНОСФЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НР

У статі розглядається можливість урахування перетворень при вимірюванні параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння.

The chances of account transformations measuring during incoherent scatter are discussed in the article.

Введение. Радиофизический метод исследования ионосферы – метод некогерентного рассеяния радиоволн (НР) при оснащении исследовательских установок современными вычислительными средствами позволяет получать информацию о вертикальной структуре ионосферы и протекающих в ней процессах в интервале высот 100 ÷ 3000 км.

Суть метода НР заключается в том, что распространяющаяся в плазме электромагнитная волна рассеивается на неоднородностях электронной концентрации, которые создаются вследствие теплового движения частиц. В зависимости от используемой длины волны спектры рассеяния различны, и если длина волны существенно больше дебаевского радиуса (например, $\lambda = 2$ м), то спектр рассеяния определяется коллективными свойствами плазмы и её взаимодействием с внешними полями. В этом случае характер рассеяния связан с тепловым движением ионов, и они определяют форму и ширину спектра, по которому с привлечением существующей теории можно определить локальные параметры плазмы [1 - 5, 7].

Существующая теория НР [1] позволяет в большинстве реальных случаев решать *прямую задачу*: находить спектр и (или) автокорреляционную (АКФ) функцию сигнала НР. Особенность решения *обратной задачи* на импульсных радарх НР проявляется в процедуре многократного решения прямой задачи до тех пор, пока найденный вектор ионосферных параметров по выбранному критерию не будет удовлетворять данным эксперимента [7].

Целью данной работы является выработка этого критерия, базирующегося на модели измерительных преобразований при зондировании ионосферы методом НР.

Обсуждение. Согласно [8], при заданных в виде диагональных матриц зондирующем сигнале $A(n \times n) = (a_{ii})$ и импульсной характеристике радиоприемной системы $G(m \times m) = (g_{ii})$ мгновенное значение напряжения сигнала на её выходе может быть выражено через сумму элементов матрицы-произведения

$$Z = A \times U \times G. \quad (1)$$

К: следует из [6], участвующий в рассеянии столб ионосферы с продольным размером $cT_q/2$ формируется диаграммой направленности антенны. Его рассеивающие свойства можно описать матрицей $U = (u_{ik})$ которая с шагом по высоте $ct_q/2$ и шагом по времени t_q полностью определяется пространственным распределением флуктуаций электронной плотности в ионосферной плазме в интервале высот $h_0 - cT_q/2$. Элементы матрицы (u_{ik}) – это мгновенные значения коэффициента отражения от элементарных объемов v_i , положение которых в пространстве зафиксировано в первом индексе. Коэффициент отражения является случайной функцией времени (второй индекс), коэффициент корреляции которой определяется флуктуациями плотности электронов, а дисперсия пропорциональна их концентрации.

Каждый j -й отсчет напряжения на выходе радиоприемного устройства фиксирует положение радиопульса в ионосфере и мгновенные значения напряжений на выходе радиоприемного устройства, что согласно (1) можно представить суммой элементов матрицы

$$Z_j = \begin{bmatrix} \alpha_{11}u_{j,j} & \alpha_{12}u_{j-1,j-1} & \alpha_{13}u_{j-2,j-2} & \alpha_{1m}u_{j-m+1,j-m+1} \\ \alpha_{21}u_{j-1,j} & \alpha_{22}u_{j-2,j-1} & \alpha_{23}u_{j-3,j-2} & \alpha_{2m}u_{j-m,j-m+1} \\ \alpha_{31}u_{j-2,j} & \alpha_{32}u_{j-3,j-1} & \alpha_{33}u_{j-4,j-2} & \alpha_{3m}u_{j-m-1,j-m+1} \\ \alpha_{n1}u_{j-n+1,j} & \alpha_{n2}u_{j-n,j-1} & \alpha_{n3}u_{j-n-1,j-2} & \alpha_{nm}u_{j+2-m-n,j-m+1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$j > m + n,$$

из которой можно выделить матрицу коэффициентов

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{2m} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{3m} \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \alpha_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где каждый элемент $\alpha_{ik} = a_i g_k$ определяется параметрами аппаратуры, которые необходимо знать при решении прямой задачи.

Выражение (2) описывает мгновенное значение сигнала НР, однако напрямую оно не применимо в практике моделирования, т.к. рассеяние является случайным процессом, и оно может быть описано, например, с использованием АКФ флуктуаций электронной плотности.

Задача измерительной установки заключается в получении оценки АКФ сигнала рассеяния, что сводится к повысотному выполнению операций вида

$$\sum_j^{n-k} Z_j Z_{j+k}, \quad k = 0, 1, 2 \quad (n-1) \quad (4)$$

При моделировании перемножение и усреднение отсчетов должно учитывать, что коррелируют только те элементы, которые соответствуют одной высоте. Результат представляет собой линейную комбинацию АКФ флуктуаций электронной плотности от всей совокупности высот, которые охватывает выборка. Весовые коэффициенты для каждой ординаты от аппаратурных коэффициентов (3) и высотного положения элемента объема равны v_i . Отсюда следует и способ решения прямой задачи:

- задаются зондирующий сигнал A , импульсная характеристика G и объём выборки l ;
- рассчитывается матрица коэффициентов (3);
- рассчитывается матрица весовых коэффициентов w_{jk} ;
- задается высотный ход АКФ флуктуаций электронной плотности (матрица (u_{ik})), используя модель ионосферы. Он описывают нижеследующей таблицей.

Таблица 1

Изменения АКФ флуктуаций электронной плотности с высотой

Задержка $t = ht$								
K	0	1	2	3	...	...	...	P
h_{max}	R_{m0}	R_{m1}	R_{m2}	R_{m3}	R_{m4}	...	...	R_{mp}
...	
h_i	R_{i0}	R_{i1}	R_{i2}	R_{i3}	R_{i4}	...	...	R_{ip}
...	
h_{11}	$R_{11,0}$	$R_{11,1}$	$R_{11,2}$	$R_{11,3}$	$R_{11,4}$	...	...	$R_{11,p}$
h_{10}	$R_{10,0}$	$R_{10,1}$	$R_{10,2}$	$R_{10,3}$	$R_{10,4}$	...	...	$R_{10,p}$
h_9	$R_{9,0}$	$R_{9,1}$	$R_{9,2}$	$R_{9,3}$	$R_{9,4}$	...	...	$R_{9,p}$
h_8	$R_{8,0}$	$R_{8,1}$	$R_{8,2}$	$R_{8,3}$	$R_{8,4}$	...	...	$R_{8,p}$
h_7	$R_{7,0}$	$R_{7,1}$	$R_{7,2}$	$R_{7,3}$	$R_{7,4}$	...	...	$R_{7,p}$
h_6	$R_{6,0}$	$R_{6,1}$	$R_{6,2}$	$R_{6,3}$	$R_{6,4}$	...	...	$R_{6,p}$
h_5	$R_{5,0}$	$R_{5,1}$	$R_{5,2}$	$R_{5,3}$	$R_{5,4}$	...	...	$R_{5,p}$
h_4	$R_{4,0}$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$	$R_{4,4}$	...	...	$R_{4,p}$
h_3	$R_{3,0}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{3,3}$	$R_{3,4}$	...	...	$R_{3,p}$
h_2	$R_{2,0}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$	$R_{2,4}$	...	...	$R_{2,p}$
h_1	$R_{1,0}$	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$	$R_{1,4}$	...	...	$R_{1,p}$

Применяя матрицу весовых коэффициентов, получим высотный ход АКФ сигнала рассеяния в виде усредненных значений с шагом по высоте

$ct_1/2$. Далее эти данные можно объединять, суммируя по любому числу l с произвольным смещением по шкале высот.

Выводы. Представленные выше результаты могут быть применены для контроля экспериментальных данных и, соответственно, всей технологической цепочки их обработки. Контроль предполагает использование современной компьютерной техники и организуется следующим образом [8].

1. Результаты ионосферных измерений, зафиксированные в виде высотных профилей параметров, которые определяют характер флуктуаций электронной плотности, аппроксимируют непрерывными аналитическими функциями.

2. На их основе и в соответствии с теорией НР формируют массивы автокорреляционных функций флуктуаций электронной плотности (см. табл. 1).

3. Для использованных зондирующего импульса и импульсной характеристики радиоприемного тракта рассчитывается матрица коэффициентов (3).

4. Данные по п.2 и полученную аппаратную матрицу используют для решения прямой задачи применительно к тому варианту разбиения на высотные участки, который реализуется в реальной аппаратуре обработки.

Если исключить ошибки измерений характеристик аппаратуры, то в отсутствие помех результаты решения прямой задачи для заданного высотного интервала и измеренные АКФ должны совпадать. Различия, которые можно оценивать использованием метода наименьших квадратов, могут отражать неадекватность используемых алгоритмов обработки, недостаточную разрешающую способность по высоте, или некорректное применение теоретических представлений (например, об ионном составе).

Дальнейшее развитие исследований заключается в учете статистической погрешности, возникающей в реальных ионосферных измерениях.

Список литературы: 1. *Farley D.T., Dougerty J.P., Barron D.W.* A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma // *Proc.Roy.Soc.* 1961, v. A263, p. 238 - 258. 2. *Рогожкин Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала НР // *Ионосферные исследования.* №27, М., 1979, С. 46 - 59. 3. *Рогожкин Е.В.* Кодирование при ионосферных измерениях методом НР // *Ионосфера.* Сб. науч. тр. Харьков. Вып.1, 1991, С. 77 - 88. 4. *Рогожкин Е.В.* Кодирование элементов составного сигнала при НР // *Вестн. Харьк. политехн. ин-та* 1988, № 259: Исслед. ионосферы методом НР. Вып. 6, С. 19 - 26. 5. *Рогожкин Е.В., Мазманишвили А.С.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР. 1. Структурные особенности. 2. Методы анализа // *Вестник ХГПУ.* Харьков. Вып. 31, С. 54 - 68, 1999. 6. *Рогожкин Е.В., Мазманишвили А.С.* Анализ зондирующих сигналов для исследования ионосферы методом НР // *Электромагнитные явления.* Харьков. Т. 1, № 4, 1998, С. 545 - 551. 7. *Пуляев В.А.* Статистическое оценивание параметров ионосферы в методе НР радиоволн // *Радиотехника: Всеукр. междунауч.-техн. сб.* 2002. Вып. 129, С. 98 - 102. 8. *Рогожкин Е.В., Белозёров Д.П.* Анализ возможности контроля результатов ионосферных измерений при НР // *Вестник НТУ "ХПИ".* 2002, № 9, т. 5, С. 61 - 64.

Поступила в редколлегию 18.04.04