

Е.В. РОГОЖКИН, докт. физ.-мат. наук, профессор НТУ «ХПИ»
Д.П. БЕЛОЗЁРОВ, м. н. с., Институт ионосферы (г. Харьков)

АНАЛИЗ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НР В РЕЖИМЕ СДВОЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ

У статті аналізуються особливості вимірювань параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння та розглядається можливість урахування перетворень, яким піддаються висотні профілі вимірюваних АКФ сигналу некогерентного розсіяння.

The features of measurements of parameters ionosphere incoherent scatter are analyzed in the article. The capability of account of high-altitude profiles autocorrelation functions transformations measuring during incoherent scatter.

Введение. В [1] показано, что, опираясь на разработанную модель измерительных преобразований для радиолокатора некогерентного рассеяния (НР) [2, 3], можно осуществлять текущий контроль хода ионосферных измерений. Такой контроль возможен вследствие того, что существующая теория НР [4] позволяет решать прямую задачу: находить, например, автокорреляционную функцию (АКФ) сигнала НР, которую затем известными способами приводят к результату на выходе системы обработки. Особенность решения обратной задачи на импульсных радарх НР проявляется в том, что она включает в себя многократное решение прямой задачи до тех пор, пока подобранный вектор ионосферных параметров не будет удовлетворять выбранному критерию [1, 5]. В тоже время возможность детального решения прямой задачи позволяет исследовать природу методических ошибок и находить пути их устранения за счет модификации алгоритмов обработки и самих зондирующих сигналов.

Целью данной работы является исследование характера ошибок измерений, которые могут возникать при зондировании сдвоенными импульсами, интервал между которыми циклически меняется.

Анализ. Как следует из [2, 3], для заданных зондирующего сигнала длительностью T_u и импульсной характеристики радиоприемной системы соответственно $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_m)$, $-1 \leq a_i \leq 1$ и $\mathbf{G} = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_m)$ мгновенное значение сигнала на выходе радиоприемной системы выражается суммой элементов матрицы \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A} \times \mathbf{U} \times \mathbf{G}.$$

Матрица $\mathbf{U}(n \times m) = (u_{ik})$ с дискретностью по высоте $ct_q/2$ и шагом по времени t_q описывает рассеивающие свойства столба ионосферы в интервале высот $c(T_u + mt_q)/2$. Достаточно малый шаг по времени соответствует дис-

кренности t_q аналого-цифрового преобразования. Элементы матрицы – это мгновенные значения коэффициента отражения от элементарных объемов v_i . Коэффициент отражения является случайной функцией времени (индекс k) и определяется АКФ флуктуаций плотности электронов R_{ik} с дисперсией, пропорциональной их концентрации.

Обратимся к используемой в практике измерений методом НР последовательности двоянных импульсов как к режиму, в котором наиболее проста интерпретация результатов измерений, и который позволяет сочетать приемлемое высотное разрешение с интервалом задержек, требуемым для адекватного измерения АКФ сигнала НР.

Этот режим можно описать с самых общих позиций [2, 3]: зондирующий сигнал – $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ в общем случае $-1 \leq a_i \leq 1$, импульсная функция радиоприёмной системы – $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_m)$, функция стробирования $C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_m)$: при фазовой манипуляции элементы матрицы могут принимать значения $0, \pm 1$.

Рассмотрим сначала случай, когда излучаются два столь коротких импульса длительностью t_q , что отклик радиоприёмной системы соответствует импульсной характеристике.

Отсчет z_j на выходе радиоприёмной системы представляет собой сумму элементов матрицы Z_j , и пусть z_0 соответствует положению первого элемента a_1 зонда на высоте h_0 , а второй отсчет z_k соответствует моменту времени, когда на этой высоте будет k -й элемент зонда, т.е.

$$Z_0 = c_1 \begin{pmatrix} a_1 g_1 u_{0,0} & a_1 g_2 u_{-1,-} & a_1 g_{m-1} u_{2-m,2-m} & a_1 g_m u_{1-m,1-m} \\ a_k g_1 u_{1-k,0} & a_k g_2 u_{-k,-} & a_k g_{m-1} u_{3-k-m,2-m} & a_k g_m u_{2-k-m,1-m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Z_k = c_k \begin{pmatrix} a_k g_k u_{k-1,k-1} & a_k g_2 u_{k-2,k-2} \dots & a_1 g_{m-1} u_{k-m+1,k-m+1} & a_1 g_m u_{k-m,k-m} \\ a_k g_1 u_{0,k-1} & a_k g_2 u_{-1,k-2} & a_k g_{m-1} u_{2-m,k-m+1} & a_k g_m u_{1-m,k-m} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Когда $k \geq m+1$, в матрицах (1) и (2) строки не имеют элементов с одинаковыми высотными индексами; в противном случае они появляются, и поэтому рассмотрим эти случаи отдельно.

Случай 1. $k \geq m+1$: задержка второго импульса больше времени релаксации радиоприёмной системы

$$M[z_0 z_k] = c_1 c_k a_1 a_k \left[g_1^2 R_{0,k} + g_2^2 R_{0,k-} + g_m^2 R_{1-m,k-1} \right], \quad (3)$$

так как для любых l и p , в силу отсутствия корреляции между сигналами рассеяния на разных элементах рассеивающего объема $M[u_{lp} u_{jl}] = 0$, если $i \neq j$.

Пусть АКФ флуктуаций электронной плотности по высоте неизменна. Тогда для АКФ сигнала НР получим

$$R_{0,k-} = c_1 c_k a_1 a_k R_{0,k-1} \sum_{i=1}^m g_i^2 \quad k \geq (m+1) \quad (4)$$

Для измерения мощности $R_{0,0}$ пропускают один из импульсов, например, второй ($a_k = 0$), тогда

$$R_{0,0} = c_1^2 a_1^2 R_{0,0} \sum_{i=1}^m g_i^2 \quad (5)$$

Таким образом, если импульсы идентичны $a_l = a_k$ и $c_l = c_k$, то коэффициент корреляции сигнала НР совпадает с коэффициентом корреляции флуктуаций электронной плотности.

Случай 2. $k < (m+1)$: задержка второго импульса меньше времени релаксации радиоприемной системы

При этом в отсчетах z_0 и z_k появляются элементы, высотные индексы которых совпадают. В экстремальном случае $k = 2$, соответствующему минимальной задержке второго импульса выражения (1) и (2) примут вид:

$$\begin{aligned} z_0 = c_1 & \left(\begin{array}{l} a_1 g_1 u_{00} + a_2 g_2 u_{1-1} + a_3 g_3 u_{2-2} \dots + a_{2m-2} g_{2m-2} u_{m-2-m} + a_{2m-1} g_{2m-1} u_{2-m-2-m} + a_{2m} g_{2m} u_{1-m-1-m} \\ a_2 g_2 u_{10} + a_3 g_3 u_{2-1} + a_4 g_4 u_{3-2} \dots + a_{2m-1} g_{2m-1} u_{2-m-3-m} + a_{2m} g_{2m} u_{1-m-2-m} + a_{2m+1} g_{2m+1} u_{-m-1-m} \end{array} \right) \\ z_1 = c_2 & \left(\begin{array}{l} a_1 g_1 u_{11} + a_2 g_2 u_{00} + a_3 g_3 u_{-1-1} \dots + a_{2m-2} g_{2m-2} u_{m-1-m} + a_{2m-1} g_{2m-1} u_{3-m-3-m} + a_{2m} g_{2m} u_{2-m-2-m} \\ a_2 g_2 u_{11} + a_3 g_3 u_{00} + a_4 g_4 u_{-1-1} \dots + a_{2m-1} g_{2m-1} u_{3-m-4-m} + a_{2m} g_{2m} u_{2-m-3-m} + a_{2m+1} g_{2m+1} u_{-1-m-2-m} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда можно получить:

$$M[z_0 z_1] = c_1 c_k a_1 a_k \left[\left\{ \sum_{i=0}^{l-m} g_{l-i}^2 R_{i,k-l} \right\} + \sum_{i=0}^{l-m} g_{l-i} g_{2k-l-i} R_{i-k+1, l-k} \right] +$$

$$c_1 c_k a_1^2 \sum_{i=0}^{k-m} g_{l-i} g_{k-i} R_{i,0} + c_1 c_k a_k^2 \sum_{i=0}^{k-m} g_{l-i} g_{k-i} R_{1-k+i,0}$$

$i=0, -1, -2, \dots$

В полученном выражении все члены, кроме выделенного фигурными скобками, составляют фон, искажающий результат измерений. Этот фон зависит как от G , так и высотного распределения параметров ионосферы. Чем больше задержка, тем меньше относительный вклад второго члена в квадратных скобках, и при $k \geq (m+1)/2$ выражение (7) приобретает вид

$$M [z_0 z_k] = \left\{ c_1 c_k a_l a_k \sum_{i=0}^{l-m} g_{l-i}^2 R_{i,k-l} \right\} + c_1 c_k a_l^2 \sum_{i=0}^{k-m} g_{l-i} g_{k-i} R_{i,0} + \\ + c_1 c_k a_k^2 \sum_{i=0}^{k-m} g_{l-i} g_{k-i} R_{l-k+i,0} \quad (8) \\ i = 0, -1, -2,$$

Предполагая сначала отсутствие изменений значений АКФ под знаками сумм во втором и третьем слагаемых выражения (8), получим

$$R_{0,k-} \sim c_1 c_k \left\{ a_l a_k R_{0,(k-1)} + r_{w,(k-1)} [a_l^2 + a_k^2] R_{0,0} \right\} \sum_{i=1}^m g_i^2 \quad (9)$$

Здесь $r_{w,(k-1)}$ - коэффициент корреляции шума на выходе радиоприемной системы, который при "белом" шуме на входе связан с импульсной характеристикой выражением:

$$r_{w,(k-1)} = \left(\sum_{i=1}^{m-k+1} g_i g_{i+k-} \right) / \left(\sum_{i=1}^{m-k+1} g_i^2 \right) \quad (10)$$

Выражение (9) позволяет учесть при необходимости ошибку, возникающую, если $\tau_k < (m+1)t_q$. Для учета в общем случае достаточно иметь высотный ход мощности сигнала НР, и в наибольшей мере ошибка проявляется на тех интервалах высот, где после достижения максимума мощность сигнала НР начинает падать.

При коротких сдвоенных импульсах реальной длительности, когда каждый из них описывается как $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$, поступим следующим образом.

Пусть последовательность матриц-столбцов описывает структуру сигнала НР [2, 3] на входе радиоприемной системы с той же импульсной характеристикой $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_m)$:

$$S_0 = \begin{pmatrix} a_1 u_{0,0} \\ a_2 u_{-1,0} \\ a_3 u_{-2,0} \\ \dots \\ a_n u_{1-n,0} \end{pmatrix}, S_1 = \begin{pmatrix} a_1 u_{1,1} \\ a_2 u_{0,1} \\ a_3 u_{-1,1} \\ \dots \\ a_n u_{2-n,1} \end{pmatrix}, \dots, S_n = \begin{pmatrix} a_1 u_{i,i} \\ a_2 u_{i-1,i} \\ a_3 u_{i-2,i} \\ \dots \\ a_n u_{i+1-n,i} \end{pmatrix}, \dots$$

Тогда на выходе структура составляющих сигнала [2, 3]

$$Z_i = g_1 S_i + g_2 S_{i-1} + \dots + g_{m-1} S_{i-m+2} + g_m S_{i-m+1}.$$

Если бы в рассеянном сигнале содержался только один элемент, то, имея выборку из l отсчетов (как правило, $l = n$) и, используя (10), можно получить

$$R_{0,k-1} \sim \begin{cases} (l-k) \sum_{i=1}^{m-1} r_{ui}(i) R|i-k|R_a|i|, \\ 0, k \geq l \end{cases} \quad (11)$$

Для рассматриваемого случая, когда $R_{0,k} = R_{i,k} = R(k)$,

$$\langle S_i S_{i+k} \rangle \sim \begin{cases} R(k) \sum_{i=1}^{n-1} a_i a_{i+k} = R(k) R_a(k), \\ 0, k \geq n \end{cases} \quad (12)$$

где $R_a(k) = \sum_{i=1}^{n-1} a_i a_{i+k}$ — АКФ зондирующего импульса. Следовательно,

что при зондировании прямоугольными импульсами реальной длительности в выражение (11) вместо $R|i-k|$ надо подставлять произведение $R_i|i-k| \Rightarrow R|i-k| \cdot R_a|i-k|$. Рассмотрим два случая.

Измерение мощности сигнала НР (излучается один импульс из n элементов)

$$\langle S_i^2 \rangle = \begin{cases} l \sum_{i=-(m-1)}^{m-1} r_0(i) R|i|R_a|i|, & m \leq n, \\ l \sum_{i=-(n-1)}^{n-1} r_0(i) R|i|R_a|i|, & m \geq n. \end{cases} \quad (13)$$

Измерение значений АКФ сигнала НР при ($k > m + n$) излучаются два импульса.

$$\langle S_i S_{i+k} \rangle = \begin{cases} l \sum_{i=1-m}^{m-1} r_{us}(i) R |i-k| R_a |i|, & m \leq n \\ l \sum_{i=1-n}^{n-1} r_{us}(i) R |i-k| R_a |i|, & m \geq n \end{cases} \quad (14)$$

Выражения (13, 14), как и следовало ожидать, совпадают с выражениями (4) и (5), если ($k > m + n$). Если ($k \leq m + n$), то измеренный коэффициент корреляции сигнала НР зависит от параметров используемых зондирующих импульсов и импульсной характеристики радиоприемной системы, что вносит элемент неоднозначности при интерпретации результатов измерений.

Вывод. Полученные результаты носят достаточно общий характер, и дальнейшее развитие темы состоит в том, чтобы, используя модель измерительных преобразований и существующие модели ионосферы, разработать алгоритм коррекции выявленных методических ошибок.

Есть и другой путь, который предполагает кодирование зондирующих импульсов по фазе [6] и последующее декодирование на промежуточной частоте или после синхронного детектирования [7]. Так, если изменять фазу несущей одного из спаренных импульсов каждый период повторения $a_{11} = a_{k1}$, $a_{12} = -a_{k2}$, и отслеживать изменение фазы соответствующим изменением $c_{11} = c_{k1}$, $c_{12} = -c_{k2}$, то выражения (7) и (8) существенно упростятся.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В., Белозёров Д.П.* Анализ возможности контроля результатов ионосферных измерений при НР // Вестник НТУ "ХПИ". 2002, № 9, т. 5, С. 61 - 64. 2. *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. 3. *Рогожкин Е.В., Мазманишвили А.С.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР. 1. Структурные особенности. 2. Методы анализа // Вестник ХГПУ, 1999, Вып. 31, С. 54 - 68. 4. *Рогожкин Е.В., Мазманишвили А.С.* Анализ зондирующих сигналов для исследования ионосферы методом НР // Электромагнитные явления. Харьков, Т. 1, № 4, 1998, С. 545 - 551. 5. *Пуляев В.А.* Статистическое оценивание параметров ионосферы в методе НР радиоволн // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002, Вып. 129, С. 98 - 102. 6. *Рогожкин Е.В.* Кодирование элементов сигналов составного сигнала // Вестник ХПИ. 1988, № 259, С. 19 - 26. 7. *Рогожкин Е.В., Белозёров Д.П., Еременин А.Н.* Информационные возможности цифровой обработки радиосигналов с известной несущей частотой // Вестник НТУ "ХПИ". 2003, № 7, т. 4, С. 81 - 88.

Поступила в редколлегию 18.04.04