

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБОБЩЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАДИОФИЗИКИ В МЕТОДЕ НЕКОГЕРЕНТОГО РАССЕЙЯНИЯ

Введение

Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн широко используется для исследования структуры и динамики ионосферы Земли [1]. Исходными данными, используемыми для расчета параметров ионосферной плазмы, чаще всего являются измеренные автокорреляционные функции (АКФ) некогерентно рассеянного сигнала, а сам расчет параметров плазмы сводится к решению обратной задачи радиофизики [2]. Очевидно, что в таком случае для получения несмещенных оценок параметров ионосферной плазмы принципиально необходимым является полный учет систематических искажений измеряемых АКФ НР сигнала. Такие искажения связаны, прежде всего, с тем, что при НР коррелированными являются лишь сигналы, рассеянные одной и той же пространственной областью плазмы [1]. Влияние этой особенности процесса НР значительно искажает измеряемую АКФ в случае использовании моностатических радаров (большинство радаров НР, в т.ч. и радар НР Института ионосферы, расположенный вблизи г. Харькова, являются моностатическими системами) [3]. Дополнительные искажения АКФ вызываются прохождением НР сигнала через узкополосный тракт радиоприемного устройства радара, а также неравномерностью распределения параметров плазмы вдоль импульсного объема [4].

Наиболее общей и корректной моделью измерительных преобразований АКФ НР сигнала является ее двумерная функция неопределенности (ДФН) [2, 5], которая позволяет учесть влияние всех выше упомянутых искажающих факторов. В работах [2, 5] представлены формулы для расчета ДФН, однако эти ДФН могут быть использованы лишь в случае, когда обратная задача радиофизики решается непосредственно для измеренной АКФ НР сигнала. На практике же чаще всего используется дополнительное высотное усреднение измеренных АКФ (с целью уменьшения статистической погрешности АКФ и, как результат, погрешностей оценок параметров ионосферной плазмы); при этом необходимо использовать соответствующие ДФН, учитывающие такое суммирование. Методика расчета такой обобщенной ДФН не описана в литературе.

Цель статьи – представить методику расчета обобщенной ДФН АКФ НР сигнала, т.е. функции, учитывающей возможность дополнительного высотного суммирования результатов измерений.

Алгоритм расчета ДНФ

Для расчета ДНФ в наиболее простом случае (без дополнительного высотного усреднения АКФ) может быть использована следующая формула [2, 5]:

$$A_{t-t'}(\tau, r) = \int_{-\infty}^{\infty} A_t(v, r) \overline{A_{t'}(v - \tau, r)} dv, \quad (1)$$

где $A_t(\tau, r) = g(t - \tau)P(\tau - 2r/c)$; g – импульсная характеристика приемного устройства радара; P – огибающая зондирующего импульса; $t = 2h/c$; h – высота, для которой моделируется АКФ; τ – время задержки; r – расстояние до области рассеяния; c – скорость света.

На рис. 1 представлена ДФН для мощности НР сигнала ($\tau = 0$) для основного режима работы радара НР Института ионосферы – с использованием «длинного» (длительностью около 650 мкс) зондирующего импульса [6]. При расчете была использована импульсная характеристика фильтра нижних частот приемного тракта радара (полоса пропускания около

9,5 кГц), а также огибающая зондирующего радиоимпульса [7]. Можно видеть, что в итоговое значение мощности вносят вклад также и значения мощности и АКФ, соответствующие другим высотам и задержкам.

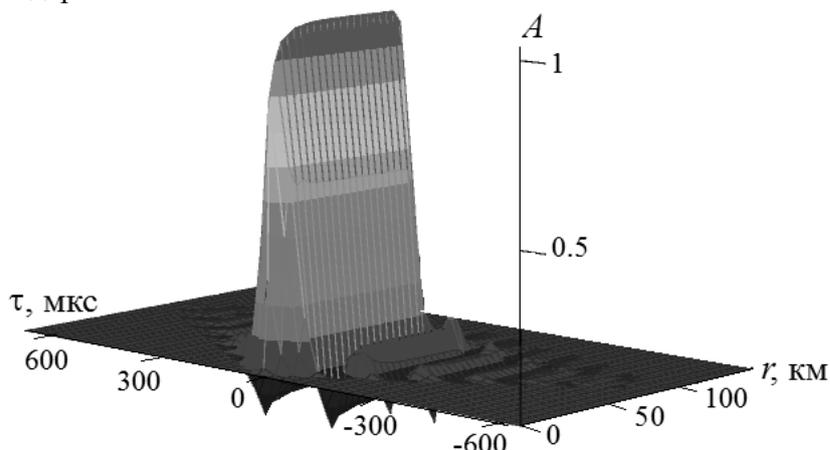


Рис. 1. Вид ДФН для режима работы радара с использованием «длинного» зондирующего импульса (длительность импульса $T_{\text{и}} \approx 650$ мкс)

Следствием упомянутых особенностей зондирования ионосферы с помощью моностатической радарной системы является уменьшение значений оценок АКФ при увеличении задержки и пространственное смещение результирующего рассеивающего объема (см. рис. 2) [8].

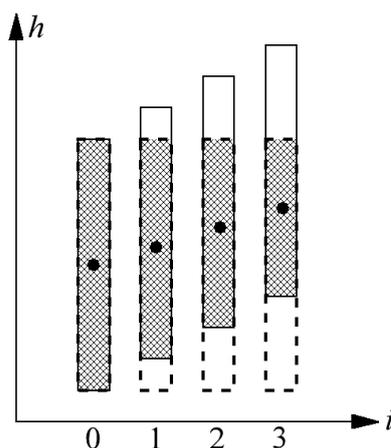


Рис. 2. Уменьшение коррелирующего объема плазмы и смещение его центра с ростом номера задержки АКФ i при импульсном зондировании ионосферы. $\tau = i \cdot \Delta\tau$ ($\Delta\tau$ – время между отсчетами аналого-цифрового преобразования)

Если данные записаны с шагом t_h (для системы обработки радара ИР Института ионосферы $t_h = 30,555$ мкс), равным интервалу $\Delta\tau$, то их пространственную коррекцию (которая называется трапецидальным суммированием [2]) можно описать выражением

$$R^*(i, z) = \frac{1}{2p + i + 1} \sum_{n=z-i-p}^{z+p} R(i, n). \quad (2)$$

Здесь $p = 0, 1, 2$ – задаваемый параметр трапецидального суммирования, $i = 0, 1, 2, \dots$ – номер задержки АКФ, z – номер высотного участка, к которому относятся данные.

Получим ДФН для общего случая (при произвольном значении параметра трапецидального суммирования). Сделаем это в несколько этапов.

1. Расчет ДФН для случая $p = 0$. Можно показать, что в этом случае ДФН может быть рассчитана с помощью следующей формулы, учитывающей особенность трапецидального суммирования измеренных АКФ, описываемого выражением (2):

$$A_{sum1}(l, h, \tau) = \begin{cases} A(l, h, \tau), h = 0 \\ \sum_{i=0}^h (l, i, \tau), l > h > 0 \\ \sum_{i=0}^l A(l, h-i, \tau), h \geq l \end{cases}$$

Здесь $A(l, h, \tau)$ – первичная ДФН, полученная по формуле (1); l – номер задержки АКФ $t - t'$, для которой рассчитывается ДФН ($l = 0, 1, 2, \dots$); h – номер высотного участка от переднего фронта импульса вниз ($h = 0, 1, 2, \dots$); τ – текущее значение задержки (не участвует в расчетах).

Высотно-временную структуру полученной ДФН можно записать в виде матрицы (рис. 3, а).

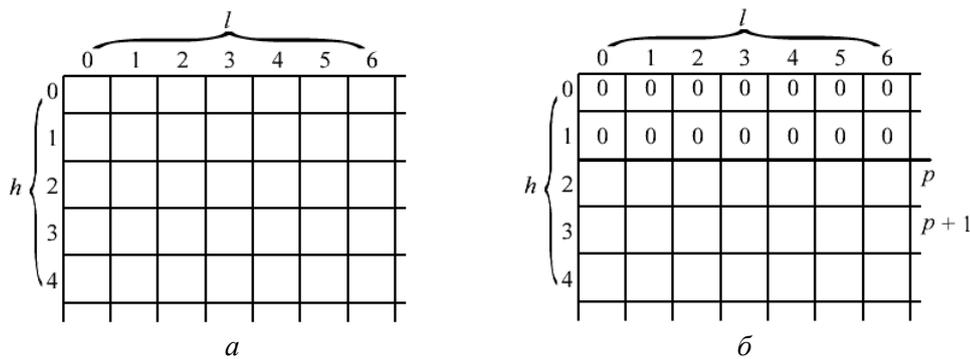


Рис. 3. Вид матрицы $A_{sum1}(l, h, \tau)$ (а) и матрицы $A'_{sum1}(l, h, \tau)$ (б)

2. Расчет ДФН для случая $p > 0$. Сдвигаем элементы матрицы A_{sum1} вниз на величину параметра трапецеидального суммирования p (рис. 3, б). После этого элементы матрицы в области высот $h \in [0, p)$ заполняем нулями:

$$A'_{sum1}(l, h, \tau) = \begin{cases} A_{sum1}(l, h-p, \tau), h \geq p \\ 0, p > h \geq 0 \end{cases}$$

Добавляем значения ДФН, соответствующие дополнительным данным, которые берутся согласно выражению (2) на верхних дополнительных высотах. Это суммирование может быть описано следующей формулой:

$$A_{sum2}(l, h, \tau) = \begin{cases} A(l, h, \tau), h = 0 \\ \sum_{i=0}^h A(l, i, \tau), p > h > 0 \\ A'_{sum1}(l, h, \tau) + \sum_{i=0}^{p-1} (l, h-i, \tau), h \geq p \end{cases}$$

Добавляем значения ДФН, соответствующие дополнительным данным, которые берутся согласно выражению (2) на нижних дополнительных высотах. Это суммирование может быть описано следующей формулой:

$$A_{sum3}(l, h, \tau) = \begin{cases} A_{sum2}(l, h, \tau), p+l+1 > h \geq 0 \\ A_{sum2}(l, h, \tau) + \sum_{i=0}^{h-(p+l+1)} A_{sum2}(l, i, \tau), 2p+l-1 \geq h \geq p+l+1 \\ A_{sum2}(l, i, \tau) + \sum_{i=0}^{p-1} A(l, h-i, \tau), h \geq 2p+l-1 \end{cases} \quad (3)$$

Формула (3) и представляет собой искомую обобщенную формулу для расчета ДФН. На рис. 4 показаны ДФН, рассчитанные для разных задержек АКФ.

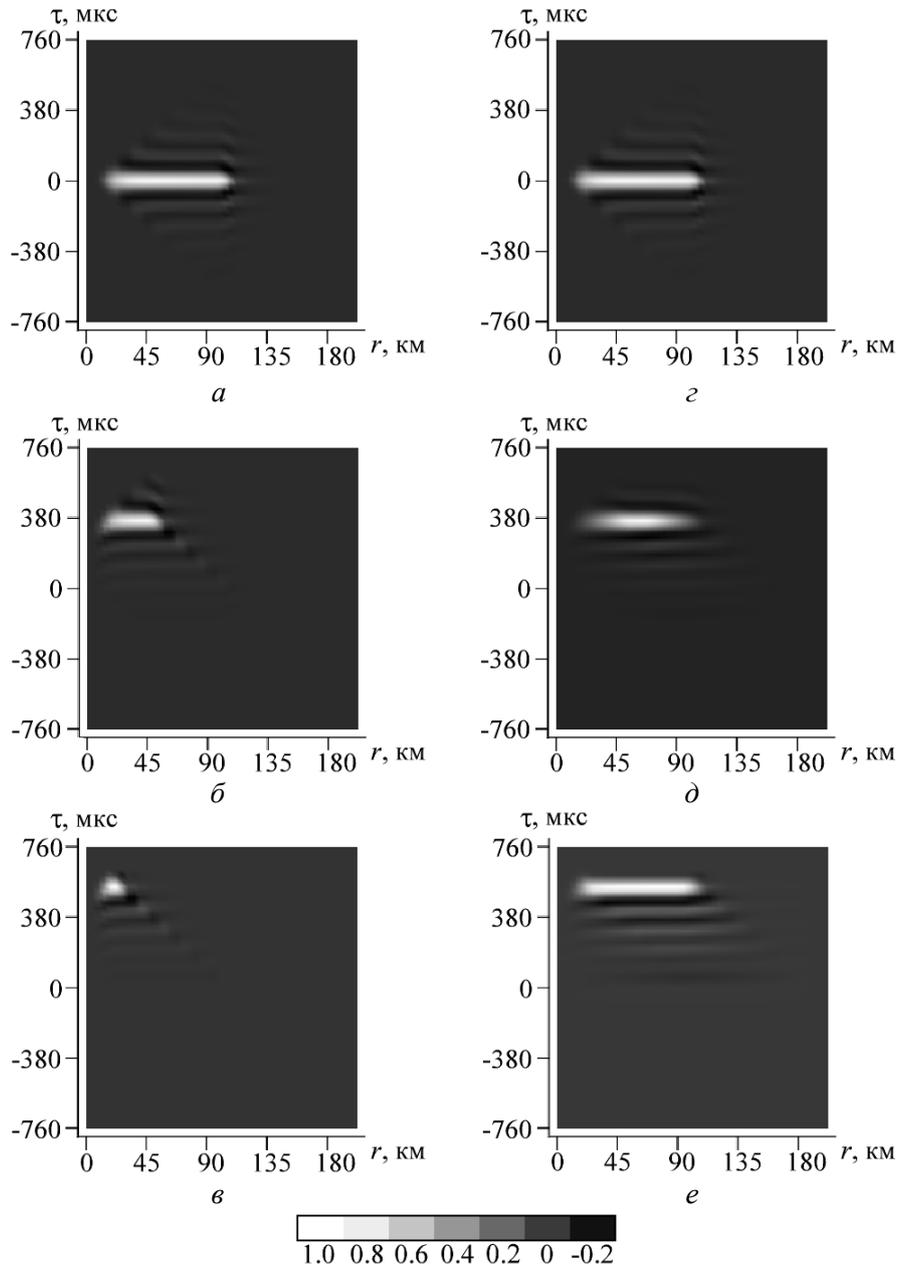


Рис. 4. ДФН АКФ НР сигнала для задержек $i = 0, t - t' = 0$ мкс (a, z); $i = 12, t - t' \approx 366$ мкс ($б, д$); $i = 18, t - t' \approx 549$ мкс ($в, е$).

На левой панели ($a, б, в$) показаны ДФН без усреднения, на правой ($z, д, е$) – с усреднением ($p = 0$)

Видно, что ДФН, рассчитанные для случая дополнительного высотного суммирования ($p = 0$) с помощью представленного алгоритма, отображают ожидаемый эффект ухудшения высотного разрешения, причем высотное разрешение выравнивается для всех задержек АКФ.

Для других значений параметра трапецеидального суммирования ($p > 0$) ДФН будут подобны показанным на правой панели рис. 4. Отличие будет заключаться в расширении ДФН вдоль оси высот, что соответствует дальнейшему ухудшению высотной разрешающей способности.

Выводы

Впервые представлен алгоритм расчета обобщенной ДФН АКФ НР сигнала, которая позволяет корректно анализировать экспериментальные данные в случае дополнительного трапецеидального высотного суммирования результатов измерений АКФ.

Использование обобщенной ДФН позволяет устранить смещения оценок параметров ионосферной плазмы, которые возникали ранее вследствие неучета эффектов дополнительного высотного усреднения измеренных АКФ НР сигнала. Это означает, что задача снижения величины статистических погрешностей результатов решения обратной задачи радиофизики при использовании обобщенной ДФН может быть решена без внесения дополнительных методических погрешностей в оценки искомых параметров плазмы.

Рассчитанные согласно предложенной методике обобщенные ДФН используются при анализе экспериментальных данных радара НР Института ионосферы.

Список литературы: 1. *Эванс, Дж. В.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / *Дж. В. Эванс* // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175. 2. *Holt, J.M.* Optimal analysis of incoherent scatter radar data / *J. M. Holt, D. A. Rhoda* // Radio Science. – 1992. – Vol. 27, Iss. 3. – P. 435–447. 3. *Domnin, I. F.* Kharkiv incoherent scatter facility / *I. F. Domnin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov, S. V. Chernyaev, A. F. Kononenko, D. V. Kotov, O. V. Bogomaz, D. A. Iskra* // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Radiophysics and Ionosphere. – 2014. – № 47 (1089). – P. 28–42. 4. *Пуляев, В. А.* Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния / *В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин*. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 240 с. 5. *Hysell, D. L.* Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca / *D. L. Hysell, F. S. Rodrigues, J. L. Chau, J. D. Huba* // Ann. Geophys. – 2008. – № 26. – P. 59–75. 6. *Сюсюк, М. Н.* Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния / *М. Н. Сюсюк, Д. В. Котов, А. В. Богомаз* // Вестник НТУ «ХПИ». Радиофизика и ионосфера. – Харьков, 2011. – № 44 – С. 81–84. 7. *Котов, Д. В.* О влиянии огибающей излучаемого радиоимпульса на оценки плазменных температур, определяемых с помощью метода некогерентного рассеяния / *Д. В. Котов, А. В. Богомаз, А. И. Лялюк, Д. А. Искра* // Вестник НТУ «ХПИ». Автоматика и приборостроение. – Харьков, 2014. – № 67 – С. 29–32. 8. *Богомаз, А. В.* Коррекция высотных профилей значений автокорреляционных функций некогерентно рассеянных сигналов / *А. В. Богомаз, Д. В. Котов, М. Н. Сюсюк* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2012. – № 57 (963). – С. 35–42.

Институт ионосферы НАН и МОН Украины

Поступила в редколлегию 06.07.2015