

*А.В. БОГОМАЗ*, н.с., Институт ионосферы, Харьков

*Д.В. КОТОВ*, н.с., Институт ионосферы, Харьков

*М.Н. СЮСЮК*, вед. инж.-электроник, Институт ионосферы, Харьков

## **КОРРЕКЦИЯ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЗНАЧЕНИЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННЫХ СИГНАЛОВ**

В статье описаны способы коррекции высотных профилей автокорреляционных функций некогерентно рассеянных сигналов: перемещение данных с нижних высот, трапецидальное суммирование, аппроксимация гладкими функциями. Рассмотрены особенности реализации этих способов и результаты их применения.

У статті описано методи корекції висотних профілів некогерентно розсіяних сигналів: переміщення даних з нижніх висот, трапецієподібне сумування та апроксимація гладкими функціями. Представлено способи їх реалізації та основні результати використання.

Methods of correction of altitude profiles of autocorrelation functions of incoherent scatter signal are described in the article. The methods such as offset from lower altitudes, trapezoidal summation and approximation by means of smooth functions are considered. Realization of these methods and main results of using of them are presented.

**Введение.** Для моностатического радара некогерентного рассеяния (НР) мгновенное значение принятого сигнала  $S$  является функцией высоты:  $S = S(h)$ . Если луч радара направлен в зенит (как, например, у главной стометровой антенны радара НР Института ионосферы), то высота  $h$  связана со временем  $t$ , которое отсчитывается от момента излучения зондирующего импульса, простым соотношением:  $h = ct/2$ . Здесь  $c$  – скорость света.

Первичная обработка принятого сигнала (после переноса его спектра в область низких частот) заключается в его аналого-цифровом преобразовании (АЦП) и расчёте автокорреляционной функции (АКФ) в соответствии с алгоритмом:

$$R(i, t) = \sum_{n=1}^N S(t)S(t + \Delta\tau \cdot i). \quad (1)$$

Здесь  $i$  – номер задержки ( $i = 0 \dots 18$ ),  $\Delta\tau$  – время между отсчётами АЦП,  $N$  – число развёрток, соответствующее времени накопления АКФ (обычно 1 мин).

Алгоритм (1) используется для расчёта АКФ на требуемых высотных участках, т.е.:

$$R(i, h) = \sum_{n=1}^N S\left(\frac{2h}{c}\right) S\left(\frac{2h}{c} + \Delta\tau \cdot i\right).$$

Известно, что для каждой последующей задержки объём плазмы, участвующий в формировании соответствующей оценки АКФ, изменяется (рис. 1).

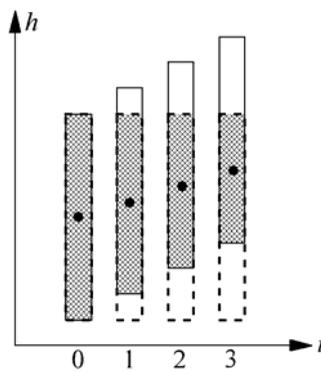


Рис. 1 – Уменьшение коррелирующего объёма плазмы и смещение его центра с ростом номера задержки АКФ при импульсном зондировании ионосферы

Этот эффект приводит к уменьшению значений оценок АКФ при увеличении задержки (что легко корректируется умножением каждой оценки АКФ на соответствующий коэффициент). Вторым, более серьёзным последствием отмеченного эффекта является пространственное смещение результирующего рассеивающего объёма.

**Целью** данной статьи является рассмотрение способов коррекции пространственного смещения, возникающего при импульсном режиме работы радара НР, и сравнительный анализ эффективности этих способов.

**Способы коррекции.** Первый способ коррекции заключается в выравнивании данных путём смещения их с нижних высот. Если данные записаны с шагом  $t_h$  (для системы обработки радара НР Института ионосферы  $t_h = 30,555$  мкс), равным интервалу  $\Delta\tau$ , то пространственное выравнивание можно описать формулой:

$$R^*(i, z) = R(i, z - i \bmod 2). \quad (2)$$

Здесь  $z$  – номер высотного участка,  $\bmod$  – операция получения остатка от деления.

Или, для абсолютных значений высоты:

$$R^*(i, h) = R\left(i, h - \frac{c\Delta\tau}{2}(i \bmod 2)\right).$$

Результаты коррекции данных, проведенной согласно (2), представлены на рис. 2. Здесь и далее на рисунках  $k$  – номер высотного объема, который соответствует длительности  $\Delta t$ .

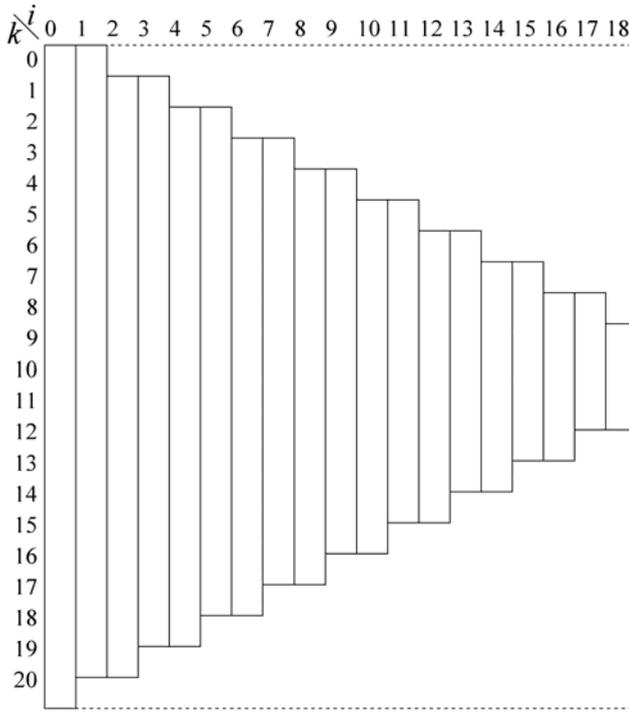


Рис. 2 – Коррекция, основанная на перемещении необходимых данных с нижних высот

Если данные записаны с шагом  $4t_h$  (вследствие того, то предыдущая система обработки радара НР имела недостаточную производительность для обработки всего массива получаемых данных), результаты коррекции выглядят сложнее (рис. 3):

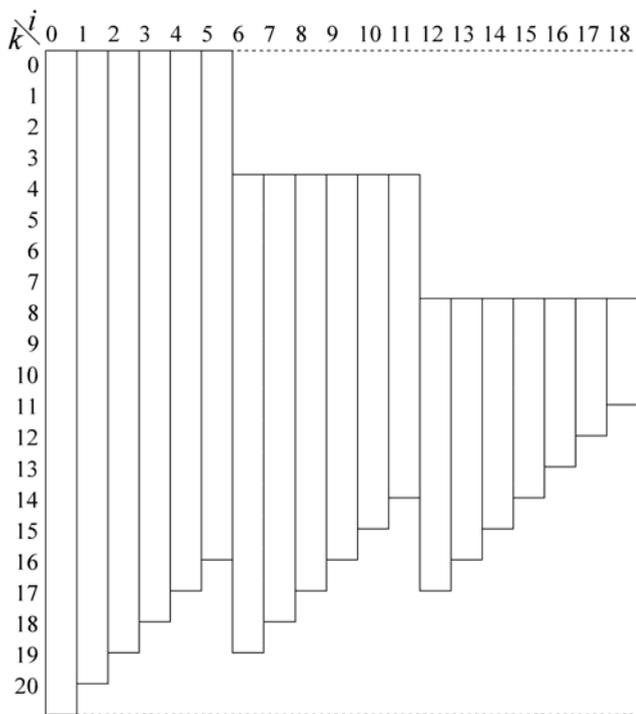


Рис. 3 – Коррекция в предыдущей версии системы обработки, основанная на перемещении необходимых данных с нижних высот

Рассмотренные варианты коррекции позволяют устранить пространственное смещение коррелирующего объема для каждой из задержек. Для учёта уменьшения коррелирующего объема используется формула:

$$R'(i) = \frac{R^*(i)}{1 - \frac{\Delta\tau}{T_i} i}.$$

Другой способ коррекции данных позволяет также существенно уменьшить статистический разброс значений АКФ, соответствующих большим задержкам (увеличение статистического разброса особенно заметно на высотах выше максимума ионизации, где отношение сигнал/шум обычно меньше единицы). Этот способ носит название “трапецеидального суммирования” [1].

Для новой системы обработки данных формула трапецидального суммирования имеет вид:

$$R^*(i, z) = \frac{1}{2p+i+1} \sum_{n=z-i-p}^{z+p} R(i, n). \quad (3)$$

Здесь  $p = 0, 1, 2$  – задаваемый параметр трапецидального суммирования.

Примеры результатов применения трапецидального суммирования для новой и предыдущей систем обработки показаны на рис. 4 и 5. Числа внутри рисунка показывают, сколько данных принимают участие в формировании областей.

$k \setminus i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4						5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5							6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6								7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7									8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
8										9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
9											10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	11	11	11	11	11	11	11
11												10	10	10	10	10	10	10	10
12													9	9	9	9	9	9	9
13														8	8	8	8	8	8
14															7	7	7	7	7
15																6	6	6	6
16																	5	5	5
17																		4	4
18																			3
19																			
20																			

Рис. 4 – Трапецидальное суммирование с параметром  $p = 0$  для новой системы обработки

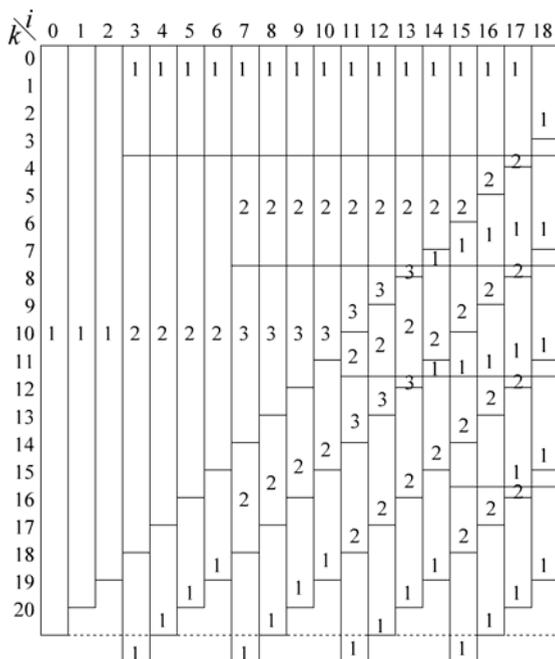


Рис. 5 – Трапецеидальное суммирование с параметром  $p = 0$  для предыдущей системы обработки

Из рис. 3 и 5 видно, что из-за нехватки данных коррекция в предыдущей версии системы обработки производится недостаточно точно.

Ещё один способ коррекции данных, полученных на радаре НР, заключается в аппроксимации высотных профилей аналитическими функциями. И так же, как и трапецеидальное суммирование, позволяет уменьшить разброс значений задержек АКФ.

Анализ высотных профилей задержек АКФ для различных сезонов и времени суток показал, что у профиля нулевой задержки АКФ (мощность НР сигнала) в большинстве случаев имеется один максимум. Профили других задержек могут иметь как максимумы, так и минимумы, а значения этих задержек быть как положительными, так и отрицательными (в отличие от мощности, которая принимает только положительные значения).

К выбору аналитической функции, которой будут аппроксимироваться высотные профили задержек АКФ, предъявляется ряд требований. Во-первых, аппроксимирующая аналитическая функция должна отслеживать связанные с изменением параметров ионосферы естественные высотные вариации значений АКФ. Во-вторых, аппроксимирующая функция должна уменьшать разброс значений АКФ и игнорировать случайные, нефизические выбросы на высотных зависимостях.

В качестве аппроксимирующей функции можно использовать дробно-рациональное выражение [2]:

$$R^*(i, h) = \sum_j a_j(i) h^{-j}, \quad (4)$$

где  $a_j(i)$  – коэффициенты полинома.

Кривая, заданная выражением (4), хорошо описывает высотные профили задержек АКФ выше максимума ионизации.

Также возможно применение разложения высотного профиля в ряд Фурье с последующим формированием из первых его членов скорректированного профиля [3].

В качестве аппроксимирующей аналитической функции можно использовать один или несколько полиномов:

$$R^*(i, h) = \sum_j a_j(i) h^j.$$

Коррекцию при использовании полиномов можно описать формулой:

$$R^*(i, h) = \sum_j a_j(i) \left( h - \frac{c\Delta\tau}{4} i \right)^j. \quad (5)$$

Результаты моделирования, выполненного с использованием модели системы обработки данных радара НР [4], показали, что если для аппроксимации профиля используется один или несколько полиномов, то для отслеживания всех естественных изменений значений задержек АКФ степень этих полиномов должна быть достаточно высокой – не менее седьмой. Кроме того, возникает задача стыковки полиномов и выбора высотных интервалов, на которых эти полиномы используются.

Авторами был предложен способ, свободный от отмеченных недостатков: для сглаживания профилей значений АКФ используется скользящая полиномиальная аппроксимация. Суть такой аппроксимации заключается в следующем.

Для всех точек высотного профиля с использованием точек ниже и выше по методу наименьших квадратов независимо друг от друга строятся полиномы. Степень полиномов должна быть невысокой (оптимальным является полином третьей степени). После нахождения коэффициентов  $a_j(i)$  по формуле (5) вычисляются значения задержек АКФ на всех высотах.

Метод даёт корректные результаты (рис. 6) и может быть улучшен путём задания ширины окна, в пределах которого рассчитывается полином, как некой оптимальной функции номера задержки АКФ  $i$  и высоты  $h$ .

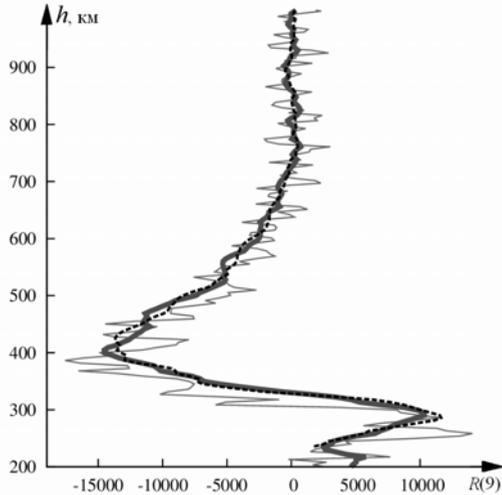


Рис. 6 – Высотные профили девятой задержки АКФ НР сигнала. Исходный профиль показан тонкой линией, скорректированный при помощи трапецеидального суммирования ( $p = 0$ ) – жирной линией, скорректированный с применением кусочно-полиномиальной функции со скользящим окном – прерывистой.

**Выводы.** В статье рассмотрены три способа высотной коррекции данных радара НР. Установлено, что простое перемещение данных с нижних высот не всегда даёт хорошие результаты. Это же относится и к трапецеидальному суммированию данных, полученных с помощью предыдущей системы обработки радара НР Института ионосферы.

Предложенный способ сглаживания данных с помощью скользящей полиномиальной аппроксимации даёт результаты, сходные с результатами трапецеидального суммирования для данных, полученных с помощью новой системы обработки, и заметно лучшие по сравнению с трапецеидальным суммированием для данных, полученных на предыдущей системе.

**Список литературы:** 1. *Holt J.M., Rhoda D.A., Tetenbaum D., van Eyken A.P.* Optimal analysis of incoherent scatter radar data // *Radio Science.* – 1992. – Vol. 27, No. 3. – P. 435 – 447. 2. *Gonzalez S.A., Sulzer M.P., Nicolls M.J., Kerr R.B.* Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo // *J. Geophys. Res.* – 2004. – Vol. 109, A07302, doi: 10.1029/2003JA010100. 3. *Сюсюк М.Н., Богомаз А.В.* Аппроксимация высотных профилей мощности некогерентно рассеянного сигнала рядами Фурье // *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій “РТ-2012”*: Матеріали 8-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, Севастополь 23 – 27 квітня 2012 р. / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 324. 4. *Богомаз А.В.* Модель системи обробки даних радара некогерентного розсіяння // (см. статтю в цьому збірнику).

*Поступила в редколлегию 20.09.2012*