

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396

*Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук
Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук*

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Введение

При исследовании ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) [1] задача состоит в определении таких характеристик рассеянного сигнала, как спектр и (или) его автокорреляционная функция (АКФ). Эти характеристики затем используются в расчетах параметров околоземного космического пространства [2]. На интервале высот 100 – 1000 км такими параметрами являются концентрация электронов, температуры ионной и электронной компонент ионосферной плазмы, ее ионный состав и скорость движения. Длительность зондирующего радиоимпульса соответствует протяженности рассеивающего объема ионосферной плазмы в направлении зондирования. Действующие радары НР используют антенны с эффективной поверхностью в тысячи квадратных метров, мощные (до 10 мегаватт в импульсе) передатчики и приемники с параметрами, близкими к предельно возможному. Из этого следует, что дальнейшее повышение точности, а значит, и надежности экспериментальных данных возможно совершенствованием вариантов статистической обработки.

Цель работы – уменьшение погрешностей измерения ординат АКФ без ухудшения разрешения по высоте и времени.

Анализ состояния вопроса

Для расчета АКФ случайных сигналов, как правило, используют многоканальные цифровые коррелометры [3 – 5]. В каждом из n каналов (под номерами $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$) рассчитываются мгновенные значения ординат АКФ $R(k\Delta\tau)$, где $\Delta\tau$ – шаг по задержке, который, как и n , выбирается с учетом характерных особенностей АКФ НР сигнала, зависящих от исследуемой среды.

Такой расчет осуществляется последовательно от участка к участку радиолокационной развертки, имеющих центры на высотах (дальностях) $h = ct/2$ (где t – временная задержка сигнала на радиолокационной развертке относительно момента излучения зондирующего радиоимпульса, c – скорость света). Количество ординат АКФ n зависит от шага $\Delta\tau$ и длительности зондирующего радиоимпульса T , которая сопоставима с интервалом корреляции НР сигнала.

К примеру, устройство обработки радара Института ионосферы (г. Харьков, Украина) рассчитывает до $n = 20$ ординат АКФ. Радар работает в метровом диапазоне радиоволн (рабочая частота $f_0 = 158$ МГц), при этом шаг $\Delta\tau = 30$ мкс принят с учетом характеристик НР сигнала, типичных для высот F-области ионосферы. С учетом соотношения $T \geq n\Delta\tau$ длительность зондирующего радиоимпульса выбрана равной 660 мкс. Она определяет высотное разрешение, равное $\Delta H \approx 100$ км.

Для сравнения, радар НР обсерватории Хайстек (США) использует частоту $f_0 = 440$ МГц, и, значит, есть возможность применять более короткий (почти втрое – $440/158$) радиоимпульс, длительность которого при том же количестве необходимых ординат АКФ соответствует высотному разрешению $\Delta H \approx 36$ км.

Один из возможных вариантов цифровой корреляционной обработки заключается в следующем [2]. Используется устройство с параллельно работающими корреляционными каналами. В оперативной памяти накапливают результаты перемножений для каждой из n ординат АКФ в течение m циклов излучения для каждого участка на высотах $h = ct/2$ согласно выражению

$$R(\tau, h) = R^{(j)}(k\Delta\tau, h) = \sum_j U^{(j)}(t) \cdot U^{(j)}(t - k\Delta\tau);$$

$$k = 0, 1, \dots, (n-1);$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$
(1)

Здесь $U(t)$ и $U(t - k\Delta\tau)$ – отсчеты сигнала от рассеивающего объема, а m периодов радиолокационных разверток составляют длительность сеанса измерений.

Погрешность и ошибки измерений несколько уменьшают за счет вторичной обработки. Для этого осуществляется анализ информации, исключение помех и усреднение полученных ординат АКФ по времени и/или высотным участкам.

Недостатком этого метода является то, что повышение статистической точности достигается за счет ухудшения высотного разрешения при выбранном временном разрешении или наоборот – временного разрешения (при дополнительном усреднении ординат АКФ по времени). Это особенно нежелательно при исследовании быстропротекающих процессов в тонких ионосферных слоях (E, F1) и в нижней части слоя F2 [1]. Важным является получение информации об ионосфере в реальном времени, прежде всего с целью оперативного анализа процессов в ионосфере при воздействии на нее природных и техногенных факторов, таких как солнечный терминатор, солнечное затмение, геомагнитная буря, запуски ракет, мощные взрывы и др.

Постановка и решение задачи

В основу предлагаемого способа обработки [6] поставлена задача уменьшения статистической погрешности.

Известно, что для стационарного процесса $R(k\Delta\tau) = R(-k\Delta\tau)$. Что же касается НР сигнала, его отсчеты $U(t - k\Delta\tau)$ и $U(t)$ относятся к рассеивающим объемам плазмы с отличающимися высотами. Перемножение отсчетов дает оценку АКФ для общих элементов рассеивающего объема. В существующей аппаратуре только *первый отсчет* каждой выборки $U(t)$ перемножается на все остальные. Добавление каналов с возможностью перемножения отсчетов $U(t)$ и $U(t + k\Delta\tau)$ позволяет, в силу свойств ионосферной плазмы, получать по каждой выборке дополнительную информацию о двух смежных высотных участках.

Дискретная модель продвижения импульса длительностью $T = n\Delta\tau$ в ионосфере на фоне условного профиля мощности НР сигнала приведена на рис. 1. Принятые в моменты времени $(t \pm k\Delta\tau)$ отсчеты сигнала U привязаны каждый к конкретному высотному положению импульса. Эти положения вдоль направления зондирования для наглядности дополнительно разделены еще и на элементы h_i , связанные с периодом следования импульсов опроса АЦП. Период следования соответствует выбранному шагу задержки $\Delta\tau$. Количество (n) элементов на интервале ΔH определяет количество ординат АКФ, которые можно получить. В данном случае для наглядности выбрано $n = 4$.

Видно, что каждый из отсчетов $U(t \pm k\Delta\tau)$ принятого сигнала является суперпозицией сигналов от элементов рассеивающего объема протяженностью ΔH .

Для примера рассмотрим момент, когда положение зондирующего импульса совпадает с высотами от h_4 до h_7 (штриховое окрашивание).

Для выделенного на рисунке момента t коррелометр может согласно формуле (1) вычислить значения ординат АКФ НР сигнала, связанных с элементами участка ΔH , которые обозначены на рисунке как $h_4 \dots h_7$. Это объясняется тем, что, согласно свойствам плазмы, корреляция имеет место между высотными элементами, общими для перемножаемых отсчетов, как было сказано выше. В данном примере они соответствуют отсчетам от $U(t - 3\Delta\tau)$ до $U(t)$. При этом результаты перемножения сигналов $U(t - 3\Delta\tau)$, $U(t - 2\Delta\tau)$, $U(t - \Delta\tau)$ в виде составляющих от нижних (более светлых на рис. 1) элементов ($h_1 \dots h_3$) с сигналом $U(t)$ дают лишь некоррелированный шум.

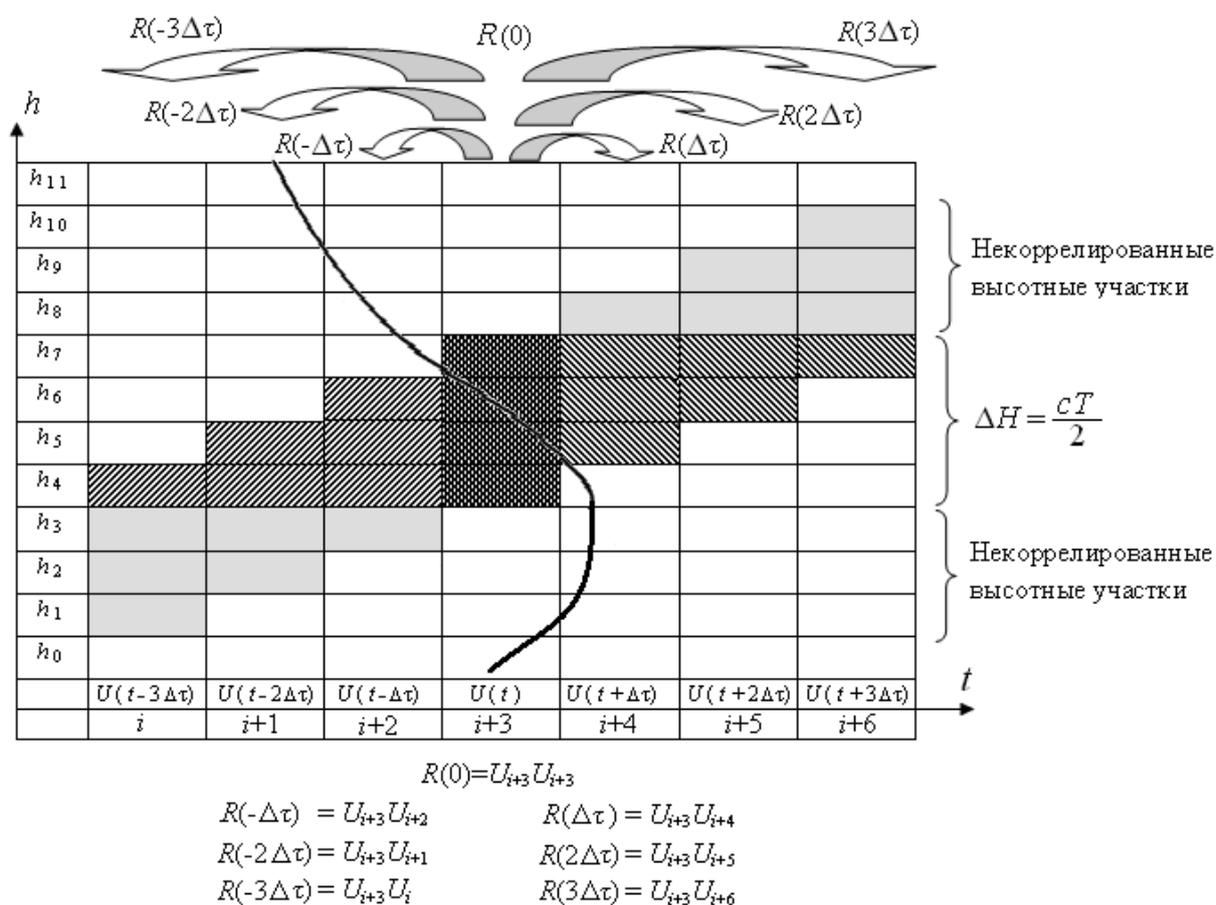


Рис. 1. Процедура определения основных и дополнительных значений ординат АКФ. Линией условно показан высотный профиль мощности НР сигнала, в нижней строке указаны номера текущего отсчета сигнала

Предложение сводится к тому, чтобы одновременно использовать еще и другие результаты перемножения. Их можно получить, если дополнительно перемножить отсчет $U(t)$ с отсчетами от $U(t + \Delta\tau)$ до $U(t + 3\Delta\tau)$. При этом, как следует из рисунка, будет получена АКФ и от смежного участка (высотные элементы $h_5 \dots h_7$) на фоне своего некоррелированного шума от высотных элементов ($h_8 \dots h_{10}$).

Процедуру обработки и цифровой коррелометр, который может выполнять такие действия, благодаря введению дополнительных корреляционных каналов и схем суммирования результатов перемножения, предлагается реализовать в виде, представленном на рис. 2.

Соответствующий этому коррелометру способ определения высотного распределения автокорреляционных функций НР сигнала заключается в следующем.

Проводится зондирование ионосферы радиоимпульсом с прямоугольной огибающей и длительностью $T = n\Delta\tau$. Принятый антенной, преобразованный, отфильтрованный и усиленный радиоприемным устройством сигнал подается на вход АЦП, управляемого тактовым сигналом U_T . С выхода АЦП сигнал поступает на входы перемножителей в основных корреляционных каналах как непосредственно, так и через элементы задержек, соответствующих аргументу $k\Delta\tau$ АКФ. На выходах всех n основных параллельных каналов одновременно присутствуют значения ординат АКФ, вычисленных согласно выражению

$$R_1(k\Delta\tau, h) = U(t) \cdot U(t - k\Delta\tau), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n - 1, \quad (2)$$

где $U(t)$ и $U(t - k\Delta\tau)$ – прямой и задержанный сигналы от АЦП.

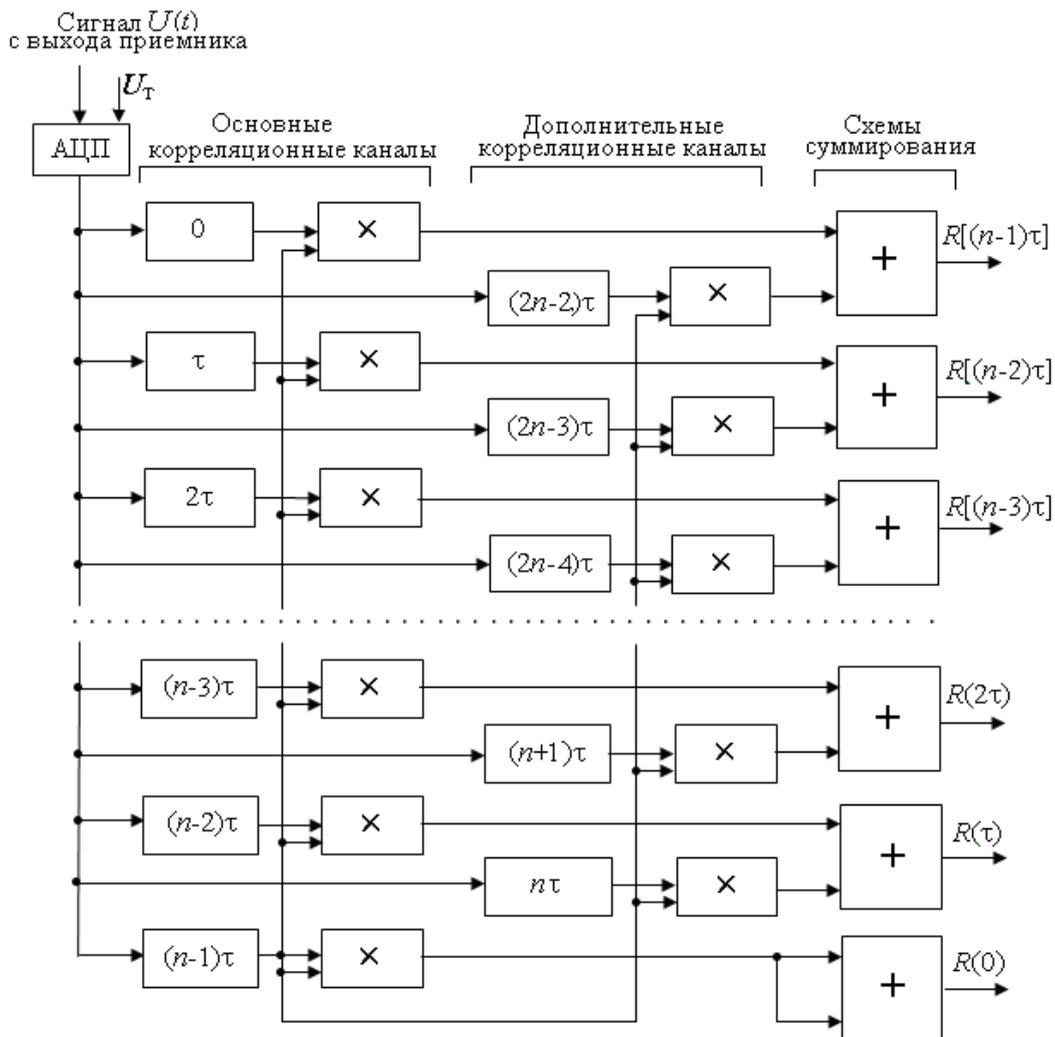


Рис. 2. Цифровой коррелометр с дополнительными корреляционными каналами

Используя $n - 1$ дополнительных каналов, рассчитывают значения ординат АКФ согласно выражению

$$R_2(k\Delta\tau, h) = U(t) \cdot U(t + k\Delta\tau). \quad (3)$$

На входы перемножителей этих каналов поступает сигнал с задержкой $(n - 1)\Delta\tau$, а на вторые входы – сигналы с конкретными задержками для каждого канала (см. рис. 2). Значения одноименных ординат АКФ складываются в сумматорах для получения окончательного результата:

$$R(k\Delta\tau, h) = R_1(k\Delta\tau, h) + R_2(k\Delta\tau, h). \quad (4)$$

Эти вычисления осуществляются для ряда высотных участков и множества периодов посылок с накоплением результатов определения АКФ с одноименными аргументами.

При такой обработке достигается уменьшение статистической погрешности определения АКФ: отношение среднеквадратических погрешностей оценки ординат АКФ существующего ($\sigma_{k \text{ old}}$) и предлагаемого ($\sigma_{k \text{ new}}$) способов составляет

$$\frac{\sigma_{k \text{ old.}}}{\sigma_{k \text{ new.}}} = \begin{cases} \frac{1}{1 - \frac{k}{n}}, & k = 0, \dots, n/2; \\ \sqrt{2}, & k = n/2 + 1, \dots, n - 1. \end{cases}$$

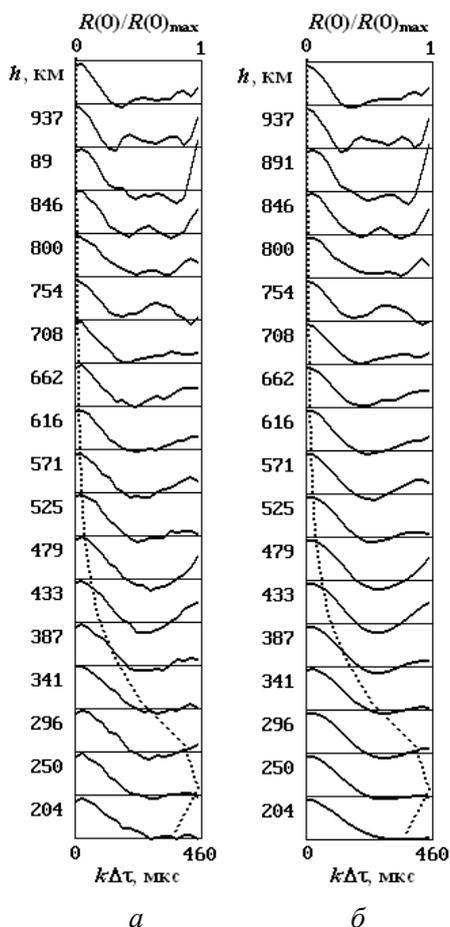


Рис. 3. Результаты сравнительных вычислений высотных распределений АКФ НР сигнала с помощью существующего (а) и нового (б) способов обработки

Выводы

Предлагаемый способ корреляционной обработки шумоподобного сигнала и структура многоканального коррелометра, используемого для расчета высотного распределения ординат АКФ НР сигнала, дают возможность уменьшить статистическую погрешность определения АКФ без ухудшения разрешающей способности по высоте и времени. Также уменьшается погрешность, связанная со смещением центров коррелируемых элементов выборок НР сигнала при отличных от нуля аргументах АКФ.

Список литературы:

1. Пуляев В.О. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн : монография / В.О. Пуляев, Д.А. Дзюбанов, И.Ф. Домнин. Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. 240 с.
2. Пуляев В.О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В.О. Пуляев, С.В. Рогожкін, О.В. Богомаз. Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. 272 с.
3. Рогожкін Е.В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР : монография / Е.В. Рогожкін, В.А. Пуляев, В.Н. Лысенко. Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. 256 с.
4. Жовинский В.Н. Корреляционные устройства / В.Н. Жовинский, В.Ф. Арховский. Москва : Энергия, 1974. 248 с.
5. Farley D.T. Incoherent scatter correlation function measurements // Radio Science. 1969, Vol. 4, No. 10. P. 935-953.
6. Пуляев В.О., Рогожкін С.В., Ємельянов Л.Я. Спосіб обчислення автокореляційної функції сигналу некогерентного розсіяння за допомогою багатоканального пристрою // Патент України на корисну модель № 120837 від 27.11.2017 р., Бюл. № 22.

Институт ионосферы
НАН Украины и МОН Украины

Поступила в редколлегию 05.01.2018