

*А.И. ЛЯЛЮК*, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

*Е.В. РОГОЖКИН*, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., НТУ “ХПИ”, Харьков

## **ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НР**

Розглядаються питання аналізу характеристик та особливостей сигналу некогерентного розсіяння. Представлена еволюція методів отримання параметрів іоносферної плазми. Наводяться варіанти аналого-цифрового перетворення при вимірюванні параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння.

Рассмотрены вопросы анализа характеристик и особенностей сигнала некогерентного рассеяния. Представлена эволюция методов получения параметров ионосферой плазмы. Приведены варианты аналого-цифрового преобразования при измерении параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния.

Questions of the analysis of characteristics and features of the incoherent scattering signal are considered. Forward for the evolution of methods to obtain the parameters of the ionospheric plasma. The options presented are analog-digital signal conversion in the measurement of parameters of the ionosphere by the incoherent scattering.

**Введение.** Метод некогерентного рассеяния (НР) основан на том, что при использовании частот выше критической распространяющаяся в плазме радиоволна рассеивается на пространственных неоднородностях. Вызываемых изменением коэффициента преломления, причиной чему является тепловое движения частиц. В метровом диапазоне радиоволн спектр сигнала рассеяния – соответственно и его автокорреляционная функция (АКФ) – определяются коллективными свойствами плазмы: кинетическими температурами электронов и ионов, кулоновским взаимодействием между ионами и электронами, ионным составом и воздействием внешних сил. При импульсном зондировании ионосферы, которое в настоящее время используется на всех действующих радиолокаторах НР, информативность сигнала рассеяния определяется также и характеристиками зондирующего сигнала. Использование аналого-цифрового преобразования при измерениях параметров ионосферы методом НР также имеет особенности, которые необходимо учитывать.

**Анализ литературы.** Спектр рассеяния привлекает наглядностью и простотой интерпретации процессов в ионосфере, особенно в периоды аномальных возмущений. В тоже время системы обработки сигналов большинства действующих радиолокаторов НР построены на использовании цифровых коррелометров [1, 2].

Сигнал НР имеет нормальный закон распределения и вследствие большого количества независимых рассеивающих элементов описывается многомерным случайным вектором с независимыми компонентами [1, 3]. Фаза принятого сигнала НР является случайной и равномерно распределена

в интервале  $[0; 2\pi]$ . Если интервал между его отсчётами больше интервала корреляции, то разность фаз равновероятна в том же интервале. Вследствие этого для уменьшения статистической погрешности при синхронном детектировании применяют два квадратурных канала, или используют обработку сигнала на промежуточной частоте с использованием соответствующих режимов аналого-цифрового преобразования [1 – 3].

Ионосфера представляет среду со сложным высотным строением. Это отражается и на характере сигнала НР. В качестве примера приводим табл. 1, в которой, как один из примеров, отражено высотное строение ионосферы для низкой солнечной активности [1].

Таблица 1  
Высотное строение ионосферы для минимума солнечной активности

Лето, полдень									
$h_s$ , км	$n_e$ , см <sup>-3</sup>	$D_0$ , км	$T_e$ , К	$T_i$ , К	$O^+$ , %	$H^+$ , %	$He^+$ , %	$O_2^+$ , %	$NO_2^+$ , %
1500	650	790	2420	3650		100			
1000	1580	520	2930	3200	50	45	5	0	0
700	23300	300	2030	2900	80	18	2	0	0
500	67800	110	1430	2700	96	4	0	0	0
300	342875	90	975	2600	99	0	0	0	1
200	351100	90	800	1470	23	0	0	21	56
Зима, полночь									
1500	5600	830	960	1600	0	95	5	0	0
1000	7400	500	890	1550	7	83	10	0	0
700	11100	220	890	1500	35	58	7	0	0
500	34400	80	890	1370	80	18	2	0	0
300	81146	100	750	1230	100	0	0	0	0
200	2700		650	800	78	0	0	4	18

**Цель статьи** – анализ особенностей аналого-цифрового преобразования при измерениях параметров ионосферы методом НР.

Ионный состав и отношение температур  $T_e/T_i$  существенно влияют на форму спектра и АКФ сигнала рассеяния. В работах [1, 2] даны оценки ширины спектра  $2\Delta f$  (на уровне – 10 дБ) и интервала корреляции  $\tau_{\text{корр}}$ .

$$2\Delta f \approx \frac{1.24}{\lambda_0} \sqrt{T_i/\bar{m}_i}, \text{ кГц}, \tau_{\text{корр}} \approx 4.5\lambda_0 \sqrt{\bar{m}_i/T_e}, \text{ мс}, \quad (1)$$

где  $\bar{m}_i$  – масса доминирующих ионов в единицах атомного веса;  $T_e$ ,  $T_i$  – кинетические температуры электронов и ионов в К;  $\lambda_0$  – рабочая длина волны, в метрах.

В третьей колонке таблицы в качестве оценки формы высотного распределения мощности сигнала НР приведен интервал высот  $D_0$ , на котором при вертикальном зондировании мощность регулярной составляющей меняется в  $e$  раз.

Формулы (1) для длины волны 2 м дают предельные значения, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2  
Предельные значения параметров сигнала рассеяния

Интервал корреляции, мкс		Ширина спектра, кГц	
Максимум для 200 км	Минимум для 1500 км	Максимум для 1500 км	Минимум для 200 км
1700	150	36 кГц	3 кГц

Если воспользоваться рекомендациями, которые ориентируются на интерполяционные формулы Ньютона [5, 6], и согласно которым для допустимой ошибки интерполяции менее 2 % необходимо иметь около двух десятков точек, то для измерений ниже максимума ионизации допустимым является шаг по задержке  $\tau \approx 70$  мкс, а в области выше максимума достаточным является шаг до 10 мкс.

Приведенные выше результаты рассчитаны для монохроматического зондирования. При зондировании импульсами с идеально прямоугольной формы огибающей длительностью  $T$  возникают естественные для некогерентного рассеяния ограничения:

$$R_{\text{изм}}(\tau) = f(x) = \begin{cases} R_{\text{нр}}(\tau)(1 - \tau/T), & \tau \leq T, \\ 0, & \tau > T. \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что длительность простого зондирующего импульса для получения достаточно полного объёма информации должна быть сопоставимой с интервалом корреляции или больше его.

В тех случаях, где использование простых импульсов вступает в противоречие с требуемым высотным разрешением, используют, например, режим зондирования сдвоенными импульсами малой длительности, следующих с переменным интервалом  $\tau$ , величина которого изменяется дискретно в пределах от 0 до интервала корреляции.

Помимо ограничений, которые накладываются на характеристики зондирующего сигнала, необходимо отметить то обстоятельство, что с увеличением высоты и расширением спектра рассеяния наблюдается существенное уменьшение отношения сигнал/шум.

Для неискажённых измерений локальных параметров ионосферной плазмы придерживаются того критерия, что полоса пропускания приёмного тракта должна быть шире спектра сигнала НР с учётом его свёртки со спектром зондирующего импульса. Вынужденный выбор полосы пропускания, удовлетворяющий используемому критерию для верхней границы исследуемого интервала, неоправданно увеличивает статистическую погрешность измерений на более низких ионосферных

высотных уровнях. В практике измерений выход из положения находят в использовании переключения аналоговых фильтров с разной полосой.

Однако такое переключение только улучшает соотношение сигнал/шум, но не решает аппаратных вопросов для получения соответствующего разрешения по частоте при измерениях спектров и выбору шага по задержке и количеству измеряемых ординат при определении АКФ сигнала рассеяния. Параллельное использование нескольких, оптимальных для каждого из высотных уровней устройств обработки сигнала или ПК с соответствующим программным обеспечением сталкивается с проблемой их совместного функционирования при заключительном анализе результатов наблюдений при определении высотного распределения ионосферных параметров.

Возникает естественное предложение – запись без потери информации в режиме *on-line* сигналов на выходе радиоприёмного устройства, и только затем их корреляционная или спектральная обработка.

Естественно, что в современных условиях такая запись сигнала уже возможна при его цифровом представлении, при чём с требуемой разрядностью. Важным является и то, чтобы записанная информация, во-первых, уже имеет минимально необходимые объёмы, и, во-вторых, соответствует имеющимся в вычислительной технике возможностям средств записи и хранения информации, ёмкость которых достигает десятков гигабайт.

В настоящее время существуют как минимум три технических решения, позволяющих представить сигнал НР в цифровой форме. Согласно [7], его парные отсчёты, представляемые каждый байтом, формируются на выходах квадратурных каналов после синхронного детектирования с фиксированным шагом дискретизации 30.55 мкс, что позволяет с таким же шагом определять АКФ сигнала рассеяния вдоль всей радиолокационной развёртке дальности.

Согласно другому решению [4], сигнал подвергается аналого-цифровому преобразованию непосредственно на промежуточной частоте 10 МГц с шагом, равным четверти её периода.

В работе [2] описан реализованный в коррелометре КМ-73 [6] и системе обработки сигналов СКИФ [6] принцип дискретизации, согласно которому частота  $f_q$ , с которой происходит аналого-цифровое преобразование и промежуточная частота  $f_{пч}$ , на которой производится обработка, связаны отношением целых чисел

$$f_q / f_{пч} = m/n. \quad (3)$$

При такой связи, которая достаточно просто реализуется в радиолокаторах, построенных по когерентной схеме, появляется возможность измерять весьма малые доплеровские сдвиги, которые в реальных условиях могут составлять величину порядка одной тысячной и меньше от ширины спектра рассеяния, и определять огибающую

автокорреляционной функции  $R_{\text{ПЧ}}(\tau)$ , которая на промежуточной частоте в отсутствие дрейфа плазмы описывается выражением:

$$R_{\text{ПЧ}}(\tau) = R_0(\tau) \cos[2\pi f_{\text{ПЧ}}(\tau)], \quad (4)$$

где  $R_0(\tau)$  функция, поведение которой определяется локальными параметрами ионосферной плазмы и формой зондирующего импульса.

**Выводы.** Рассмотренные варианты преобразования имеют характерные достоинства и недостатки. Так, использование квадратурных каналов при синхронном детектировании позволяет минимизировать количество операций при обработке и объёмы используемой аппаратуры, однако требует высокой идентичности каналов, в каждый из которых входят фильтры нижних частот, другие аналоговые элементы и АЦП.

В других технических решениях используется единственный АЦП, и происходит ориентация на использование цифровые коррелометры, которые с единым алгоритмом за время радиолокационной развёртки работают с достаточно большим количеством отсчетов. Достоинство такого подхода заключается в том, что объёмы итоговой информации слабо зависят от длительности сеанса измерений.

Общим недостатком рассмотренных технических решений является использование сигнальных процессоров с фиксированным алгоритмом работы. Это не позволяет модифицировать алгоритмы обработки в зависимости от условий измерений на выделенных высотных уровнях и от конкретной задачи ионосферных измерений. Например, в случае изменения шага по задержкам при измерениях АКФ сигнала НР, при наблюдении и интерпретация процессов в ионосфере при аномальных её возмущениях по результатам спектрального анализа [5] и др.

Из рассмотренного выше следует вывод, что устранение отмеченного недостатка может быть осуществлено при такой записи и хранении оцифрованных значений, последующее использование которых позволяло бы применять альтернативные варианты обработки. Вопрос состоит в организации такого процесса записи оцифрованных значений смеси сигнал+шум, который сохранял бы всю информацию о локальных характеристиках ионосферной плазмы при минимальных объёмах записей и минимальных количествах используемых аналоговых элементов.

Решение этой задачи открывает и возможность использования цифровой фильтрации [8, 9], что позволяет добиться наилучшего соотношения сигнал/шум на всех ионосферных уровнях.

**Список литературы:** 1. *Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 2. *Рогожкин Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния / Ионосферные исследования № 27. – М.: Сов. радио, 1979. – С. 46 – 59. 3. *Рогожкин Е.В.* О представлении сигнала некогерентного рассеяния многомерным случайным вектором // Ионосфера. Сборник

научных трудов. – 1992. – Вып. 2. **4.** *Folkestad K.* EISCAT: An updated description of technical characteristics and operational capabilities // *Radio Sci.* – 1983. – V. 18. – P. 867 – 879. **5.** *Грибанов Ю.И., Мальков В.Л.* Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с. **6.** *Рогожкин Е.В.* Сложные зондирующие сигналы для исследования структуры и динамики ионосферы методом некогерентного рассеяния // Диссерт. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук. – Х.: ИРЭ. – 1992. **7.** *Лысенко В.Н., Черняк Ю.В.* Методика корреляционной обработки сигналов, некогерентно рассеянных ионосферной плазмой // *Радиотехника.* – 2006. – № 146. – С. 178 – 186. **8.** *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с. **9.** *Глинченко А.С.* Цифровая обработка сигналов.– Красноярск: КГТУ, 2001. – 199 с.

*Поступила в редколлегию 29.06.2011*