

Д.П. БЕЛОЗЁРОВ, м.н.с., Институт ионосферы НАН и МОН Украины
Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук, проф., НТУ “ХПИ”

ФОРМИРОВАНИЕ ФМ-СИГНАЛОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАТОРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Розглядається можливість використання фазової маніпуляції (ФМ) несучої і сучасних обчислювальних засобів для формування сигналу з заданими кореляційними властивостями.

The capability use of a phase-shift keying of a carrier and modern computing means is considered for formation of a signal with given correlation properties.

Введение. К настоящему времени сеть радиолокаторов некогерентного рассеяния (НР) даёт существенную часть информации об ионосфере. В связи с этим обозначилась необходимость в увеличении достоверности экспериментальных данных. Она вытекает из практики применения метода НР при определении параметров ионосферы по автокорреляционной функции (АКФ) сигнала НР. АКФ измеряют и при весьма малых, и при больших соотношениях сигнал/шум. При отсутствии помех и возмущений в ионосфере её локальные параметры могут быть определены с использованием существующей теорией НР. Так как по своей природе сигнал НР носит случайный характер, то результат измерения АКФ является её оценкой, дисперсию которой, даже в отсутствие шума, стремятся уменьшить, например, увеличением длительности сеанса измерений. Уровень дисперсии определяет в конечном итоге статистическую погрешность при определении параметров ионосферы.

При импульсном зондировании дополнительные трудности при интерпретации результата измерений АКФ создаются и из-за неизвестной априори функции распределения интенсивности сигнала рассеяния в пределах импульсного объёма [1, 2]: при вертикальном зондировании эта функция определяется высотным распределением электронной концентрации. Если учёт этого фактора отсутствует, то возникает ошибка, которая носит квазисистематический характер.

Учёт этого фактора может быть решен корректировкой программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) при тестировании соответствующим имитирующим сигналом, форма АКФ которого, во-первых, учитывала бы произвольную функцию высотного распределения и, во-вторых, имела бы минимальную статистическую погрешность. В этом аспекте применение квазислучайных сигналов с заданной АКФ позволяет вообще исключить статистическую погрешность. При таком подходе к разработке эффективных алгоритмов учёта этой функции создаются условия, исключающие случайный характер решений.

Ещё одним аспектом применения тестирующих сигналов является следующее обстоятельство. Как уже отмечалось, теория НР может быть использована для невозмущённой ионосферы. Однако уровень современного состояния науки об ионосфере требует детального анализа зафиксированных аномальных явлений. Таким образом, возникает необходимость текущего контроля радиолокатора НР, для того чтобы исключить толкование наблюдаемого аномального результата как возможное проявление неисправностей аппаратуры.

Содержание используемого на радиолокаторах НР ПАО [3, 4], однозначно определяется алгоритмом корреляционной обработки, который в силу аппаратурных особенностей используемого коррелометра строится по-разному. Как показали результаты, полученные в представляемой работе, конкретные особенности корреляционной обработки определяют и выбор способа формирования имитирующего сигнала.

Действительно, в реальных условиях ионосферных измерений отсчёты сигнала НР на выделенном интервале радиолокационных задержек (интервале высот при вертикальном зондировании), равном длительности зондирующего импульса, могут быть представлены матрицей (1). В строках записаны отсчёты с выбранного интервала высот, количество строк m определяется длительностью сеанса измерений.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При корреляционной обработке каждой строки по алгоритму

$$R_{j-1} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-j} u_{i,k} u_{i,k+j} \quad (2)$$

суммируются все возможные произведения для каждой из задержек [1, 2]. При этом достигается наименьшая статистическая погрешность. Оценку дисперсии можно найти в [5]. Однако высотное разрешение в этом случае определяется двойной длительностью зондирующего импульса [1, 2].

Согласно другому алгоритму [3,4] используются только те произведения, в которые входит первый отсчёт u_{i1} :

$$R_{j-1} = \sum_{i=1}^m u_{i,1} u_{i,j}. \quad (3)$$

Высотное разрешение в этом случае в два раза лучше, но несколько увеличивается статистическая погрешность. К примеру, в алгоритме (2), произведения $u_{i1}u_{i2}$ и $u_{i,n-1}u_{i,n}$ практически независимы, так как временной интервал между ними примерно соответствует интервалу корреляции. Следовательно, этот алгоритм для малых значений задержек дает не менее, чем в двое уменьшение дисперсии получаемых оценок.

В работах [6 – 8] рассмотрены различные подходы к формированию имитирующего сигнала. Так в работах [6, 7] используются аналоговые методы формирования имитирующего сигнала. В работе [8] используется фазовая $(0, \pi)$ манипуляция импульсного сигнала, и закон кодирования находят для случая, когда реальная корреляционная обработка производится в соответствии с алгоритмом (2). В данной работе разрабатывается решение, которое ориентировано на вариант обработки (3).

Целью статьи является поиск законов кодирования по фазе элементов серии импульсных имитирующих сигналов, АКФ которых в сумме дают АКФ заданной формы. Длительность каждого из серии импульсов равна длительности зондирующего сигнала.

Кривая АКФ тестирующего сигнала задаётся автокорреляционной функцией флуктуаций электронной плотности, заданной в табличном или аналитическом виде, с учетом тех её изменений, которые привносит учёт произвольной функции высотного распределения концентрации электронов.

Можно выделить три этапа в формировании тестирующего сигнала. Для того чтобы имитировать тестирующий сигнал, необходимо сначала смоделировать ту АКФ (это первый и необходимый этап), для которой необходимо найти закон кодирования тестирующего сигнала, и способ поиска описан ниже выражением (5). Это второй этап. На завершающем этапе коррелометр в системе обработки радиолокатора (или его компьютерный аналог, используемый для анализа уровня погрешности) находит корреляционную функцию тестирующего сигнала.

Стоит отметить, что уже на первом этапе кривую АКФ заданной формы записанную в табличной форме можно использовать для тестирования программно-алгоритмического обеспечения, используемого для выделения ионосферной информации, в автономном режиме. Для тестирования системы обработки в целом (включая и радиоприёмный тракт) закон кодирования элементов тестирующего сигнала должен соответствовать требуемой точности воспроизведения итоговой АКФ.

Можно отметить, что, несмотря на трудности поиска сигнала при использовании алгоритма (2), фазовая манипуляция привлекательна тем, что позволяет вводить сдвиг несущей имитирующего сигнала относительно используемой рабочей частоты. Если сдвиг соответствует реальным

величинам доплеровского сдвига, то ФМ позволяет тестировать и программно-алгоритмическое обеспечение дрейфовых измерений.

Принцип построения имитатора заключается в следующем.

Имитирующий сигнал уже на выходе синхронного детектора представляется матрицей:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Каждая строка матрицы (4) соответствует кодированным по фазе (0,π) сигналам на рабочей частоте, и, следовательно, элементы матрицы могут принимать значения: 1 или -1 ($a_{ik} = \pm 1$). Количество элементов в строке n задаётся длительностью реально излучаемого радиоимпульса и тем шагом по задержке τ , которая используется в реальном процессоре корреляционной обработки сигналов НР. Количество строк m определяется необходимой точностью воспроизведения заданной АКФ.

Имитатор сигнала может быть реализован с использованием синтезатора частот, который формирует монохроматический сигнал на рабочей частоте. Сигнал с выхода синтезатора подают на блок формирования радиоимпульса с ФМ. Этот блок подключают либо непосредственно к входным цепям приёмного устройства, либо используют внешнюю контрольную антенну, что даёт возможность проводить текущий контроль непосредственно в ходе ионосферных измерений. Использование несущей, сдвинутой относительно рабочей частоты, как уже отмечалось, позволяет имитировать и дрейф плазмы.

Если исключать контроль входных цепей радиоприёмного устройства (как позывает практика измерений, эти цепи менее всего подвержены изменениям), то сигналы в соответствии с матрицей (4) можно подавать и на промежуточной частоте, и, при соответствующем преобразовании, непосредственно на вход коррелометра.

Значения элементов (1 или -1) матрицы (4) можно получить, используя системы уравнений (5)

$$\begin{cases} a_{1,1}a_{1,1} + a_{2,1}a_{2,1} + \dots + a_{i,1}a_{i,1} + \dots + a_{m,1}a_{m,1} = R_0 \\ a_{1,1}a_{1,3} + a_{2,1}a_{2,3} + \dots + a_{i,1}a_{i,3} + \dots + a_{m,1}a_{m,3} = R_2 \\ \dots \\ a_{1,1}a_{1,j} + a_{2,1}a_{2,j} + \dots + a_{i,1}a_{i,j} + \dots + a_{m,1}a_{m,j} = R_{j-1} \\ \dots \\ a_{1,1}a_{1,n} + a_{2,1}a_{2,n} + \dots + a_{i,1}a_{i,n} + \dots + a_{m,1}a_{m,n} = R_{n-1} \end{cases}. \quad (5)$$

Полагая, как принято при ФМ, что все элементы первого столбца матрицы (4) равны 1, получим систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{1,1} + a_{2,1} + \dots + a_{i,1} + \dots + a_{m,1} = R_0 \\ a_{1,2} + a_{2,2} + \dots + a_{i,2} + \dots + a_{m,2} = R_1 \\ \dots \\ a_{1,j} + a_{2,j} + \dots + a_{i,j} + \dots + a_{m,j} = R_{j-1} \\ \dots \\ a_{1,n} + a_{2,n} + \dots + a_{i,n} + \dots + a_{m,n} = R_{n-1} \end{array} \right. \quad (6)$$

Используя алгоритм, представленный на рис. 1, по заданным значениям R_j и количеству строк m , которое выбирается исходя из точности воспроизведения АКФ, находим в конечном итоге элементы матрицы (4).

Чтобы моделировать процесс для реальных условий необходимо задать АКФ имитируемого сигнала. Её можно найти, как уже отмечалось выше, используя аналитические выражения для теоретических спектров флуктуаций электронной плотности [10, 11], с последующим учетом тех методических преобразований, которые приобретает АКФ сигнала рассеяния при импульсном зондировании [1, 4].

Таким образом, что бы имитировать тестирующий сигнал необходимо сначала смоделировать ту АКФ (это первый и необходимый этап), для которого необходимо найти закон кодирования тестирующего сигнала, и способ поиска, описанного выражением (5). Это второй этап, и на этом этапе может быть сформирован массив для разных вариантов заданных на первом этапе. На завершающем этапе формируется с помощью фазового манипулятора тестирующий сигнал и коррелометр в системе обработки радиолокатора (или его компьютерный аналог, используемый для анализа уровня погрешности и отладки ПОА) получает АКФ тестирующего сигнала.

Результаты работы. Анализ возможностей имитатора в предположении, что полоса пропускания радиоприемного тракта достаточно широкая, проводился следующим образом.

Использовались теоретические спектры для однокомпонентной плазмы [10, 11]:

$$S(\omega)d\omega = \frac{r_e^2 N_e}{k\sqrt{\pi}} \frac{1}{\beta^2 R^2(\theta) + (\beta\Phi(\theta) + 1)^2} \sqrt{\frac{m_i}{2KT_i}} e^{-\theta^2}, \quad (7)$$

где r_e – радиус электрона, N_e – электронная концентрация, $\beta = T_e/T_i$ – отношение температур электронов и ионов, $R(\theta) = \sqrt{\pi}\theta e^{-\theta^2}$,

$$\Phi(\theta) = 1 - 2\theta e^{-\theta^2} \int_0^{\theta} e^{\rho^2} d\rho, \quad \theta = \frac{\omega}{k} \sqrt{\frac{m_i}{2KT_i}}$$
, m_i – масса ионов, k – волновое число, K – постоянная Больцмана.

Для учета реальной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) радиоприемного тракта она вводится в выражение (7) в качестве множителя.

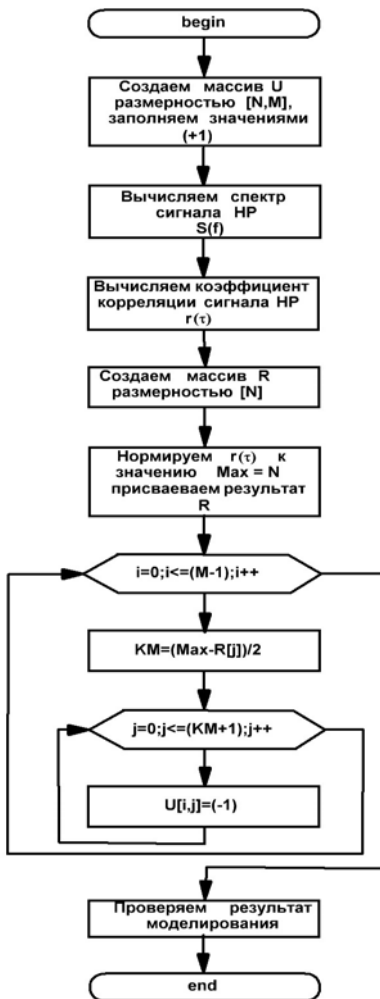


Рис. 1. Алгоритм поиска элементов матрицы (4)

Функция высотного распределения интенсивности сигнала рассеяния в пределах импульсного объёма, которая может существенно повлиять на форму АКФ сигнала рассеяния [1, 8] для простоты представлялась равномерной.

Использование соотношения Винера-Хинчина с точностью до коэффициента даёт

$$R(\tau) \propto \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega. \quad (8)$$

Найденная АКФ преобразовывалась с учетом произвольно заданной функции высотного распределения интенсивности сигнала НР с учетом результатов работы [1], адаптированных под алгоритм (3). Полученная при этом кривая

$$R_T(\tau) = R_T(j\Delta\tau) = R_{Tj}, j = 0, 1, 2, \dots, N - 1; \Delta\tau = T / N ,$$

где T – длительность импульса, использовалась в представленном алгоритме поиска закона кодирования элементов матрицы (4). Результат корреляционной обработки имитирующего сигнала по алгоритму (3) $R_M(\tau)$ сравнивался с исходной кривой $R_T(\tau)$ по критерию

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (R_{Tj} - R_{Mj})^2}. \quad (9)$$

Как показал компьютерный анализ, при $m = 1000$ и спектрах с различными отношениями температур среднеквадратическая погрешность, определяемая по (8), лежала в пределах 0.7 – 0.8 % от значений $R_T(0)$.

При частоте повторения зондирующих импульсов 25 Гц значение $m = 1000$ соответствует времени наблюдения 40 с.

Стоит отметить, что подобные результаты можно получить, если элементы кода могут принимать значения $-1, 0, 1$. Такое кодирование это легко реализуется: для получения элемента кода со значением 0 достаточно блокировать выход фазового манипулятора. Алгоритм поиска элементов матрицы (4) при этом значительно упрощается.

Выводы. Результаты компьютерного моделирования показали возможность применения имитирующих ФМ-сигналов $(0, \pi)$ для сквозного контроля аппаратуры радиоприемного тракта радиолокатора НР совместно

с системой обработки сигналов, а также и для отладки и тестирования используемого программно-алгоритмического обеспечения в автономном режиме.

Достоинством описанного метода является возможность оперативного программного изменения имитирующего сигнала для всех реально существующих высотных распределений интенсивности сигнала НР вплоть до формирования высотного распределения АКФ на всём рабочем интервале развёртки по дальности (высоте), если согласовать разбиение на высотные интервалы в соответствии с заложенным в программно-алгоритмическом обеспечении реальным разбиением на высотные интервалы.

Список литературы: 1. *Рогожкин Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала НР / *Е.В. Рогожкин* // *Ионосферные исследования*. М.: Сов. радио, 1979, № 27. – С. 46 – 59. 2. *Рогожкин Е.В.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР / *Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, В.Н. Лисенко*. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 3. *Holt J.M.* Optimal analysis of incoherent scatter radar data / *J.M. Holt, D.A. Rhoda, D. Tetenbaum, A.P. van Eyken* – *Radio Science*. – 1992. – Vol. 27, №3. – P. 435 – 447. 4. *Лисенко В.Н.* Методика корреляционной обработки сигналов, некогерентно рассеянных ионосферной плазмой / *В.Н. Лисенко, Ю.В. Черняк* // *Радиотехника*. – 2006. – № 146. – С. 178 – 186. 5. *Лившиц Н.А.* Вероятностный анализ систем автоматического управления / *Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев* – М.: Сов. радио, 1963. – 896 с. 6. *Лисенко В.Н.* Синтез модели НР сигнала / *В.Н. Лисенко* // *Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом НР*. – 1987. – № 248, Вып. 5. – С. 21 – 24. 7. *Скляр И.Б.* Устройство формирования контрольного сигнала радара некогерентного рассеяния / *И.Б. Скляр* // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов*. – 1999. – Вып. 31. – С. 117 – 119. 8. *Белозёров Д.П.* Имитация случайных сигналов с использованием фазовой манипуляции / *Д.П. Белозёров, Е.В. Рогожкин* // *Вестник НТУ “ХПИ”. Сборн. научн. тр. Тематический выпуск: Автоматика и приборостроение*. – 2006. – № 31. – С. 3 – 10. 9. Особенности решения прямой задачи рассеяния при расчете параметров ионосферной плазмы / *В.А. Пуляев, Е.И. Сокол, А.В. Богомаз, Д.П. Белозёров* // *Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника»*. – 2010. – № 160. – С. 280 – 285. 10. *Dougherty I.R.* A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma / *I.R. Dougherty, D.T. Farley* // *Proc. Roy. Soc. A259*. – 1960. – P. 79 – 99. 11. *Лиюкумович В.И.* К вопросу о спектре и мощности рассеянного ионосферой сигнала / *В.И. Лиокумович, Е.В. Рогожкин* // *Вестник ХПИ. Сер. "Радиотехника"*. – 1967. – № 22, Вып. 1. – С. 12 – 14.

Поступила в редколлегию 01.06.2010