УДК 681.3

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Геннадий Максименко

Департамент специальных телекоммуникационных систем и технической защиты информации СБ Украины

Аннотация: **В данной статье рассматривается один из возможных алгоритмов обнаружения шумоподобных сигналов с периодической структурой на основе инвариантного и нелинейного преобразования порядковых статистик.**

Summary: **In given clause one of possible algorithms of detection noise similar signals with periodic structure is considered on the basis of invariant and nonlinear transformation serial statistics.**
Ключевые слова: **Сигналы, обнаружение, преобразование.**

В перечне мер сокрытия факта излучения сигналов некоторыми РЭС особое место занимает использование для передачи шумоподобных сигналов (ШПС). В этом случае решается не только задача сокрытия факта работы устройства передачи информации, но и вопросы связанные с шифрованием передаваемой информации (закон формирования сигнала остается неизвестным, даже если удалось установить факт работы РЭС).

В условиях априорной неопределенности, когда неизвестна частота несущей, ширина занимаемой полосы частот, выходная мощность РЭС и форма (закон формирования псевдослучайной последовательности) обнаруживаемого сигнала, почти единственным признаком наличия сигнала является энергия реализации процесса на выходе панорамного приемника (анализатора спектра). Такой метод обнаружения, соответственно, называется энергетическим методом.

Энергетический метод обнаружения ШПС достаточно прост в реализации, но при этом имеет ряд существенных недостатков [1].

Другие методы обнаружения, такие как использование набора взаимокорреляционных устройств или многоканального радиометра, не дают существенного выигрыша перед обычным широкополосным радиометром (панорамным приемником) при обнаружении ШПС, хотя их аппаратная реализация значительно сложнее [1].

Более перспективными являются методы обнаружения, основанные на алгоритмах спектральной обработки входных реализаций сигнала. В частности, для обнаружения шумоподобных сигналов можно использовать некоторые особенности их спектральных характеристик.

Во-первых, амплитудно-частотные и энергетические спектры шумоподобных сигналов, сформированных на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП), мало отличаются для сигналов с различными базами и при использовании разных кодов [2].

Во-вторых, как указано в [3-4], характерной особенностью (признаком) подмножества ШПС, формируемых на основе ПСП, является наличие регулярных выбросов в спектре сигнала. Выбросы – это участки энергетического спектра, на которых частотные составляющие имеют, в среднем, более высокую интенсивность по отношению к спектральным составляющим соседних участков.

Уровень выбросов, их количество, средние значения и дисперсия существенным образом зависят от режима излучения сложного сигнала: апериодический, периодический с чередованием основной и негативной ПСП, а также со сменой ПСП через интервалы, соответствующие длительности информационного символа $T_c = N \cdot \tau_0$, где τ_0 – длительность элементарного импульса псевдослучайной последовательности.

Как указано в [5], для передачи информации в системах связи наиболее характерен апериодический режим. Соответственно, в [3] и [4] оговорено, что при чередовании основной и негативной ПСП, а также в режиме смены структуры ПСП через интервалы времени T_c общие закономерности характеристик выбросов спектральной плотности мощности (СПМ) аналогичны апериодическому режиму излучения сложного сигнала. Поэтому, в дальнейшем, будут рассматриваться спектр ШПС в апериодическом режиме излучения, в котором наиболее сильно проявляются уровни выбросов СПМ.

I Распределение порядковых статистик выборочных значений сигнала и шума на входе обнаружителя

Пусть на входе приемника-обнаружителя присутствует шум, имеющий распределение Гаусса. Входной массив S_k сформирован из выборочных значений в частотной области. Проанализируем свойства выборочного массива S_k при отсутствии сигнала. При наличии на входе обнаружителя только «белого» шума, массив S_k будет статистически неоднороден.

В соответствии с [7], случайный гауссовый процесс характеризуется наличием выбросов. Из свойства симметрии нормального распределения [7] $\left[F\left(\frac{X_0}{\sigma}\right)=1-F\left(-\frac{X_0}{\sigma}\right)\right]$, где X_0 – некоторый заданный уровень, следует, что средняя длительность интервалов между выбросами на уровне $\frac{X_0}{\sigma}$ равна средней длительности выбросов на уровне $-\frac{X_0}{\sigma}$. Применительно к дискретному гауссовому белому шуму это означает, что количество независимых случайных дискретных величин над некоторым уровнем X_0 равно количеству независимых случайных величин, находящихся ниже уровня X_0.

Положим $X_0=0$ и осуществим центрирование чисто шумового выборочного массива S_k по n отсчетам. Для этого определим среднее выборочное массива $\overline{X}$ и выполним операцию центрирования по каждому элементу от 1 до n: $\overset{o}{X} = X_i - \overline{X}$.

Полученная последовательность (новый массив) $\overset{o}{S}_k$ соответствует новой реализации с нулевым средним значением. При этом, в силу симметричности гауссового распределения, количество дискретных отсчетов над уровнем 0 будет в пределе (при $n\to\infty$) равно количеству независимых дискретных случайных отсчетов, находящихся ниже уровня нуля.

Перегруппируем элементы массива (выборки) $\overset{o}{S}_k$ $X=(X_1, \ldots, X_n)$ в новый массив М, расставляя их в возрастающем порядке так, что $X^{(k)} \le X^{(j)}$, если $k<j$. Тогда получим упорядоченную выборку (вариационный ряд):

$$X^{(1)} < X^{(2)} < \ldots < X^{(R)} < \ldots < X^{(n)},$$

Обозначим через M^- левую часть выборочного массива М, а через M^+ правую (положительную) часть. Тогда, учитывая, что массив является однородным и в силу симметричности гауссовского распределения, модуль среднего значения левой и правой частей, при $n \to \infty$, будут равны:

$$|m_л| - m_п = 0\ , \tag{1}$$

где

$$m_л = \frac{2}{n}\cdot\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} X_i,\quad m_п = \frac{2}{n}\cdot\sum_{i=\frac{n}{2}}^{n} X_i\ . \tag{2}$$

Проанализируем свойства выборочного массива M при наличии смеси шумоподобного сигнала и шума. Появление сигнала приведет к стохастическому возрастанию выборки по сравнению с чисто шумовой. Присутствие спектральных отсчетов сигнала, в особенности его выбросов, среди отсчетов шума нарушает однородность выборки. Это связано с тем, что выбросы в спектре ШПС носят экстремальный характер и имеют остроконечный вид. При этом аддитивная смесь ШПС и гауссовой помехи, согласно [7], в частотной области будет распределена по закону, близкому к закону Релея:

$$\omega(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2 + a_0}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{x \cdot a_0}{\sigma^2}\right), \qquad (3)$$

где $I_0(\,)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

В случае присутствия на входе обнаружителя шумоподобного сигнала, с выбросами в частотной области, выборочное среднее массива S_k возрастает, и соответственно, после центрирования выражение (3) приближается к релеевскому распределению [7]:

$$W_1(x) \approx \frac{X}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{X^2}{2\sigma^2}}. \qquad (4)$$

Релеевское распределение является асимметричным. Соответственно, средняя длительность выброса в частотной области для сигнально-шумового массива над некоторым уровнем X_0, согласно [7], будет больше средней длительности интервалов между выбросами, а амплитудные значения частотных составляющих больше. Это приведет к тому, что если после центрирования массива S_k проранжировать вновь полученную последовательность $\overset{o}{S}_k$ в порядке возрастания ее элементов, то модуль среднего значения левой (отрицательной) M^- и правой (положительной) M^+ частей массива M будут различаться на некоторую величину Δ:

$$|m_л| - m_п = \Delta. \qquad (5)$$

Для более четкого различия ситуаций - $\Theta = 1$ - сигнал есть и $\Theta = 0$ - сигнала нет, дополним имеющийся массив выборочных значений еще одним опорным массивом, совпадающим по своим свойствам со свойствами исходного массива. Это можно сделать, разделив массив S_k на две равные части по $\frac{n}{2}$ отсчетов в каждом (см. рисунок 1, а). Первая половина будет представлять собой массив $X\left[\frac{n}{2}\right]$, а другая $Y\left[\frac{n}{2}\right]$. Осуществим, по отдельности, центрирование массивов выборочных значений X и Y и получим, соответственно, $\overset{o}{X}$ и $\overset{o}{Y}$ (рисунок 1, б, в).

Для обеспечения более четкой сепарабельности шумовых и сигнальных отсчетов введем некоторое дополнительное нелинейное преобразование φ, состоящее в том, что каждый элемент массива $\overset{o}{X}$ умножается на соответствующий ему элемент массива $\overset{o}{Y}$: $z = \varphi(x, y)$. В результате получим новую последовательность

$Z\left[\frac{n}{2}\right]$ (см. рисунок 1, г), каждый элемент Z_i которой есть результат перемножения двух центрированных случайных величин $\overset{o}{x}_i$ и $\overset{o}{y}_i$, распределенных по нормальному закону: $z_i = \overset{o}{x}_i \cdot \overset{o}{y}_i$.

Упорядочим случайную последовательность Z в порядке возрастания ее элементов. Массив Z в случае чисто шумовой исходной выборки S_k будет однородным. Тогда приближенно можно полагать, что модуль среднего значения левой (отрицательной) и правой (положительной) частей, будут равны: $|m_л| - m_п \approx 0$.

Появление в шуме, представляющем собой широкополосный гауссовый случайный процесс, ШПС с периодической структурой вызовет изменение среднего значения выборки S_k в сторону его увеличения. Центрирование выборочных значений приведет к тому, что основная часть шумовых отсчетов будет сосредоточена в области отрицательных значений выборочных отсчетов массивов $\overset{o}{X}$ и $\overset{o}{Y}$. В положительной области останутся отсчеты сигнальных выбросов и меньшая часть шумовых отсчетов, точнее их некоторые максимальные значения (рисунок 1, в). В результате нелинейного преобразования (поэлементного перемножения $\overset{\circ}{X}\left[n/2\right]$ и $\overset{\circ}{Y}\left[n/2\right]$, которое усилит различия шумовых (отрицательных) и сигнальных (положительных) выборочных значений) в массиве Z элементы выборок также будут распределены по закону, близкому к экспоненциальному [8]:

$$F_i\left(\frac{x}{\Theta}\right) = 1 - exp\left\{-\frac{x}{2\sigma_i\left(1+\Theta g_i^2\right)}\right\}, \tag{6}$$

где σ_i^2 - дисперсия гауссовой помехи;

g_i^2 - мощность сигнала.

В правой (положительной) части массива Z, учитывая, что там сосредоточены, в основном, сигнальные выборочные значения и, следовательно, $\Theta = 1$, функция распределения выборочных отсчетов принимает вид:

$$F^+(x) = 1 - \exp\left\{-\frac{x}{2\sigma_i^2\left(1+g_i^2\right)}\right\}. \tag{7}$$

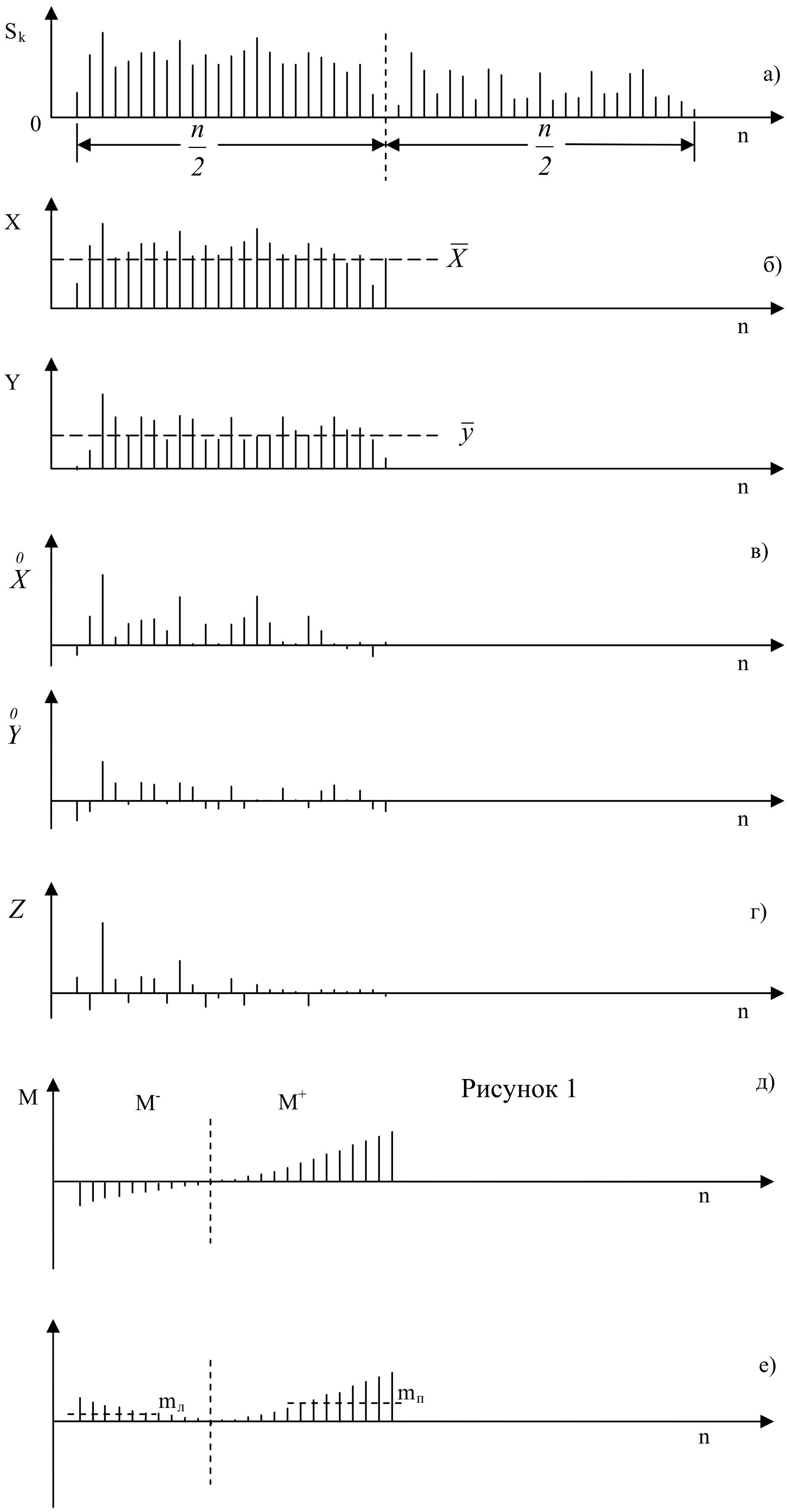
В левой (отрицательной) части массива Z сосредоточены, в основном, шумовые выборки и, соответственно, функция распределения (учитывая, что $\Theta = 0$) будет равна:

$$F^-(x) = 1 - \exp\left\{-\frac{x}{2\sigma_i^2}\right\}. \tag{8}$$

Из сравнения формул (6) и (7) следует, что средние значения модуля отрицательных и положительных выборочных значений будут различаться (рисунок 1, е):

$$m_п - |m_л| > \Delta \quad . \tag{9}$$

Мера различия положительных и отрицательных значений массива Δ может служить признаком наличия сигнала в шуме. При этом, если разность матожиданий модуля отрицательной и положительной подобластей массива Z превышает указанный пороговый уровень Δ, то сигнал можно считать обнаруженным.



S_k
0
$\frac{n}{2}$
$\frac{n}{2}$
n
а)
X
$\overline{X}$
б)
Y
$\overline{y}$
в)
$\overset{0}{X}$
$\overset{0}{Y}$
Z
г)
д)
M
M^-
M^+
е)
$m_л$
$m_п$

Рисунок 1

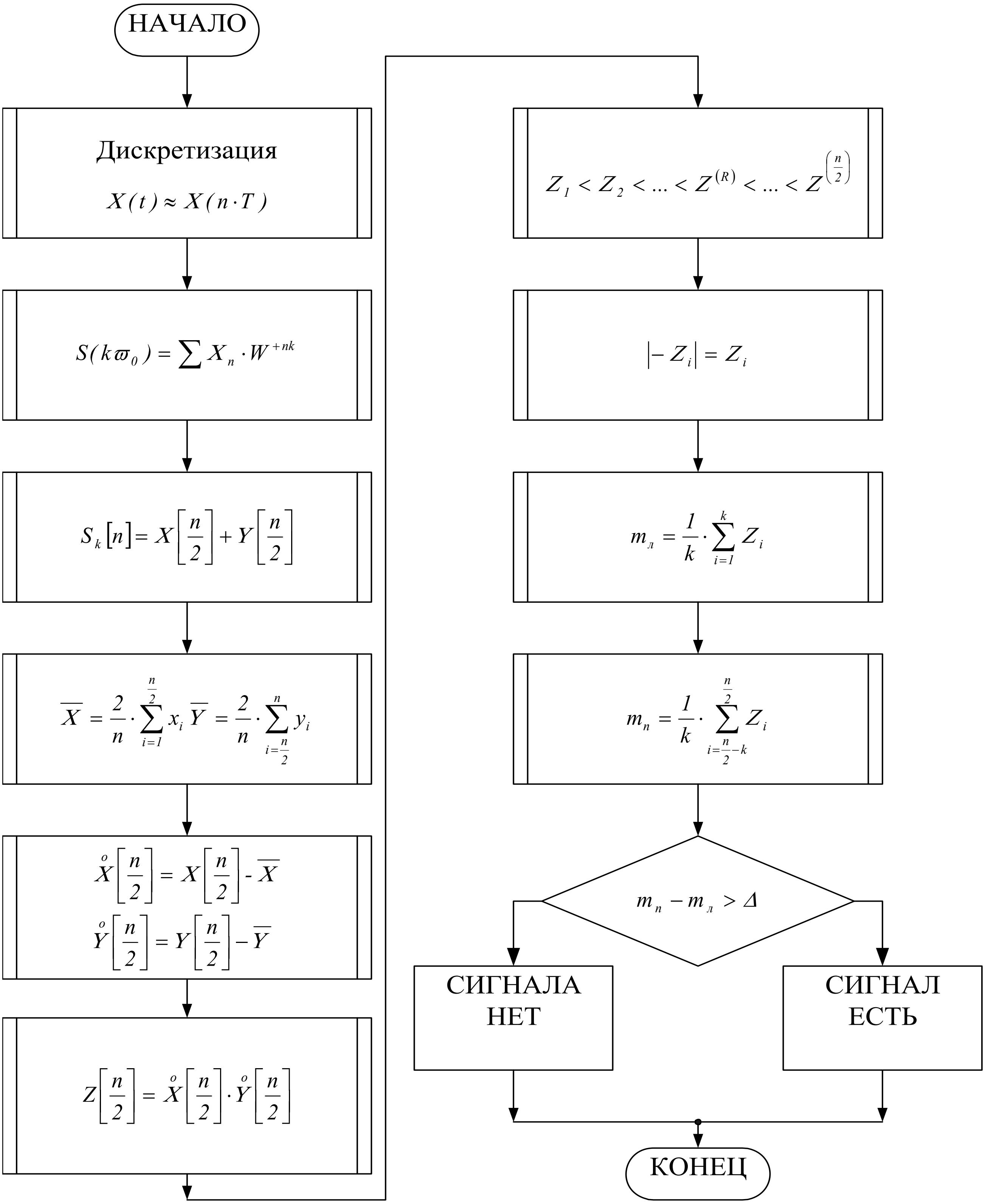


Рисунок 2 – Алгоритм обнаружения ШПС по спектру реализации.

II Алгоритм обнаружения ШПС

Исходя из рассуждений, приведенных в разделе I, можно построить последовательную процедуру обнаружения сигналов по критерию отношения правдоподобия, состоящую в следующем (рисунок 2):

1. Выполнение дискретизации входной реализации процесса в заданной полосе частот.
2. Выполнение БПФ над входной реализацией.
3. Разделение массива частотных выборок $S_k[n]$ на два массива X и Y по $\frac{n}{2}$ отсчетов в каждом.
4. Вычисление среднего выборочного массивов X и Y.
5. Центрирование случайных выборочных значений массивов X и Y.
6. Выполнение нелинейного преобразования (поэлементного умножения) над выборочными массивами $\overset{o}{X}\left[\frac{n}{2}\right]$ и $\overset{o}{Y}\left[\frac{n}{2}\right]$. Формирование массива $Z\left[\frac{n}{2}\right]$.
7. Упорядочение массива $Z\left[\frac{n}{2}\right]$ в порядке возрастания элементов: $z_1 < z_2 < z_3 < \ldots < z^{(R)} < \ldots < z^{\left(\frac{n}{2}\right)}$.

Получаем новый массив $M\left[\frac{n}{2}\right]$, представляющий собой вариационный ряд.

8. Преобразование подобласти отрицательных значений M^- упорядоченного массива M в положительные.
9. Вычисление средних значений k элементов подобласти слева M^- и подобласти справа M^+.
10. Определение разности средних значений и сравнение ее с порогом Δ.

III Выводы

1. В данной статье представлен синтез алгоритма обнаружения ШПС с периодической структурой, основанного на инвариантном и нелинейном преобразовании порядковых статистик спектральных отсчетов аддитивной смеси сигнала и шума.
2. Введение нелинейного преобразования над спектральными отсчетами позволило обеспечить компактность и сепарабельность сигнальных отсчетов по отношению к шумовым (т.е. максимизировать расстояние между ними). Мерой различия является разность средних значений сигнальных и шумовых порядковых статистик.
3. Предлагаемый алгоритм позволяет решать задачу классификации ШПС по отношению к аддитивному гауссовому шуму, сокращая время, затрачиваемое на обнаружение источника радиоизлучения.

Литература: 1. Максименко Г.О., Богданов О.М. Методи виявлення шумоподібних сигналів// Праці КВІУЗ. – 1999.-вип.2 – с.41-49. 2. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации// Под ред. Проф. В.Б.Пестрякова.-М.: Сов. Радио, 1973.-424с., ил. 3. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Энергетические спектры шумоподобных сигналов различных типов// Радиотехника и электроника. –1990.-т.35-№3, с.556-566. 4. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Характеристики энергетических спектров шумоподобных сигналов// Электросвязь, 1988, №5. 5. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. –М.: Радио и связь, 1985. –384с. 6. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Закономерности в характеристиках энергетических спектров совокупности шумоподобных сигналов// Радиотехника и электроника. –1990.-т.36-№4, с.781-786. 7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. –М.: Сов. Радио, 1974.-552с. 8. Устройства ранговой обработки информации/ В.Ю. Лапий, А.Я.Калюжный, Л.Г.Красный –К.: Техніка, 1986.-120с.