УДК 621.396.967

к.т.н., доц. **Долгушин В.П.** (ВИКНУ)
к.т.н. **Лоза В.Н.** (ВИКНУ)
Борзак А.Н. (ВИКНУ)
Жиров Б.Г. (ВИКНУ)

РАСПОЗНАВАНИЕ КЛАССА ЦЕЛЕЙ МЕТОДОМ ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ВЕЙВЛЕТ-ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛА

Рассматриваются вопросы использования математического аппарата альтернативного спектрального анализа на основе теории вейвлетов для реализации алгоритма распознавания – разрешения групповых сосредоточенных целей по анализу результатов вейвлет-декомпозиции эхосигнала. Предложен алгоритм построения системы распознавания, использующий в качестве статистики распознавания норму вектора коэффициентов вейвлет-разложения сигнала нижнего уровня.

Ключевые слова: радиолокационная станция, вейвлет-преобразование, групповая сосредоточенная цель.

Введение. Одним из перспективных направлений развития технической базы и повышения эффективности систем обработки радиолокационных сигналов является построение процессоров реального времени для подсистем первичных преобразований на основе привлечения к разработкам новых алгоритмов математической прикладной теории, обеспечивающих внедрение, так называемой, вейвлет-технологии.

Теория вейвлетов, разработки по которой появились в конце восьмидесятых годов, является мощной альтернативой анализу Фурье и даёт более гибкую технику обработки сигналов. Одно из основных преимуществ вейвлет-анализа заключается в том, что он позволяет заметить хорошо локализованные изменения сигнала, тогда как в коэффициентах Фурье отражается только поведение сигнала за всё время его существования.

Теория вейвлетов является прерогативой математики, поэтому публикации, как зарубежных, так и отечественных авторов, в основном посвящены изложению вопросов математической теории, несколько отдалённой от инженерных приложений.

Главное достоинство вейвлет-анализа заключается в расширении инструментальной базы обработки сигналов. Так, во многих приложениях факт наличия локальных скачков в сигнальной функции является более важным информационным признаком, чем их величина и другие характеристики формы гладкой структуры сигнала.

Вопросы обработки информации, особенно сигналов радиолокационных систем, с помощью спектральных преобразований в базисе вейвлетов совершенно не освящены в отечественной литературе.

Проблема разрешения имеет физический характер и не может быть преодолена классическим методом, однако существует возможность анализа при помощи альтернативного подхода, одним из которых является кратномасштабный анализ на основе вейвлет-базиса.

Распознавание класса целей (тип цели определяется методами идентификации) из двух заданных: "одиночная цель – групповая сосредоточенная" решает задачу сверхразрешения, так называемой, парной цели. Такая процедура разрешения может быть определена, как "распознавание – разрешение" в отличии от используемого в теории радиолокации термина "обнаружение – разрешение", поскольку для обнаружения и распознавания в данном случае используются различные подсистемы обработки сигналов.

Постановка задачи. В статье решается задача разработки и алгоритмического обоснования нового алгоритма распознавания – разрешения сигнала групповой сосредоточенной парной цели на основе использования метрики вектора вейвлет-декомпозиции принятого и преобразованного в цифровой вид сигнала.

Метод "сверхразрешения" основан на процедуре распознавания тонкой структуры сигнала сложной цели, характерным признаком которого, как показано в [5], является наличие скачков сигнальной огибающей в области перекрытия сигналов одиночных целей за счёт интерференции, обусловленной случайным изменением фазы.

В задаче распознавания используется разновидность эхосигнала в виде дискретной цифровой биквантованной пачки. На основании принятых решений, формализуем запись сигнала:

- эхосигнал одиночной цели

$$s_0 = \left\{x_k = 1, k = 1, \dots, M, M = 2^j, j \in Z\right\}, \tag{1}$$

- эхосигнал принятого сигнала:

$$s = [s_1\ s_2];\ s_1 = \left\{x_k, k = 1, \dots, M - M^*\right\};\ s_2 = \left\{y_{kn}, k = M - M^*, \dots M\right\}, \tag{2}$$

где y_{kn} – дискретные случайные числа 0, 1;

n – число нулевых позиций;

M, M^* – число импульсов пачки и области перекрытия пачек;

Z – множество целых чисел, форма двоичной записи чисел рекомендуется для выполнения вычислительных операций.

Параметр разрешения характеризуется относительной угловой координатой:

$$\Delta = \Delta\beta / \beta_{0,5P}, \tag{3}$$

где $\Delta\beta$ – угловое смещение между составляющими целями в парной цели;

$\beta_{0,5P}$ – ширина диаграммы направленности по 0,5 мощности.

При классическом разрешении по Релею для прямоугольной пачки Δ = 0. Методы "сверхразрешения" по данным публикаций обеспечивают разрешение при Δ = 0 … 0,8 - 0,95 (последнее значение приводится только в отдельных работах, в большинстве – до 0,5 … 0,7).

Статья организована следующим образом. В пункте 3 приводятся краткие сведения из теории дискретного вейвлет-преобразования, необходимые для обоснования последующих решений, а также позволяющие дать физическую интерпретацию положений пакетной вейвлет-фильтрации с позиций радиотехнической теории систем. В пункте 4 предлагается алгоритмическое решение процедуры распознавания – разрешения. В пункте 5 рассматривается алгоритмическая реализация предложенного метода.

Особенность анализа заключается в том, что при практических вычислениях ортогональные базисные вейвлеты не имеют аналитического выражения и задаются в виде итерационных алгоритмов, позволяющих реализовать вычисления коэффициентов функциональных уравнений. При этом большинство вычислительных процедур выполняется с помощью систем компьютерной математики: MATLAB, Mathcad, Mathematica.

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВВП) методом частотной фильтрации.

Для реализации ДВВП используются только ортогональные нормированные базисные вейвлет-функции. Анализ особенностей преобразования и интерпретация вычислительных операций базируется на сравнении с положениями кратномасштабного непрерывного вейвлет-преобразования. С этой целью ниже представлен краткий экскурс в положения многоуровневого прямого вейвлет-преобразования.

В ортонормированных вейвлетах используются две функции: масштабирующая $\varphi(t)$ и материнский вейвлет $\psi(t)$. Для каждого уровня разложения *j* имеется система функций:

$$\varphi_{j,n}(x) = \sqrt{2^j}\,\varphi(2^j x - n); \qquad \psi_{j,n} = \sqrt{2^j}\,\psi(2^j x - n). \tag{4}$$

Система функций (4) при $n \in Z$ является ортонормированным базисом пространства $V_j \subset L^2(R)$, последовательность которых представляет вложенные подпространства, такие, что $\bigcup V_j = L^2(R)$.

Число j характеризует уровень разрешения: чем ниже уровень, тем более мелкие носители имеет функция $\varphi_{j,n}(x)$ и коэффициент разложения, определяемый свёрткой $(f(x), \varphi_{j,n})$ более детально отражает свойства сигнальной функции.

Операторы проектирования P_j дают приближения элементов функции $f(x) \in L^2(R)$ всё более точные с возрастанием уровня j:

$$P_j(f) = \sum_{n \in Z} (f, \varphi_{j,n})\, \varphi_{j,n}(x). \tag{5}$$

С учётом ортогонального дополнения к подпространству V_j разложение сигнальной функции определяется выражением:

$$P_j(f) = \sum_{n \in Z} a_{j-1,k}\, \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{n \in Z} d_{j-1,k}\, \psi_{j-1,k}(x), \tag{6}$$

где $a_{j-1,k}$ – коэффициенты аппроксимации (j-1)-го уровня разрешения;

$d_{j-1,k}$ – детализирующие коэффициенты того же уровня.

Полученные векторы коэффициентов принято обозначать символами:

$$cA_j = \{a_{j-1,k}\} \text{ и } cD_j = \{d_{j-1,k}\}. \tag{7}$$

При повторении процедуры разложения по уровню j до $j = N$ получаем конечное представление в виде серии коэффициентов:

$$P_j(f_0) = cA_0 \to \{cA_1, cD_1\} \to \{cA_2, cD_2 cD_1\} \to \ldots \to \{cA_N, cD_N, \ldots, cD_1\}. \tag{8}$$

Нахождение серии коэффициентов (8) определяется, как вейвлет-разложение (декомпозиция) исходного сигнала.

ДВВП не может быть записано в аналитической форме или представлено в виде решения каких-либо дифференциальных уравнений. Оно характеризуется набором числовых коэффициентов в некоторых функциональных уравнениях, содержащих изменение масштаба и сдвиг аргументов. При практических вычислениях форма вейвлета не записывается, а используются только величины коэффициентов функциональных уравнений и программные возможности систем компьютерной математики.

По сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием, вычисляющим корреляцию между вейвлетом и сигналом при изменении масштаба окна анализа и сдвига во времени, в дискретном случае для анализа сигнала на разных масштабах используются фильтры с различными частотами среза.

Разрешение сигнала, являющееся мерой количества детальной информации в сигнале, изменяется за счёт фильтрации сигнала, а масштаб изменяется за счёт децимации, которая обеспечивается снижением частоты дискретизации и удалением некоторых (избыточных) отсчётов сигнала.

Коэффициенты ДВВП получаются из коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования путём дискретизации последних на диадичной сетке ($a = 2^j$, $t = k^* 2^j$, $j \in Z$).

Принцип организации вычислительных операций ДВВП заданной сигнальной функции $f(x)$ представляется последовательностью коэффициентов разложения, полученных в ходе кратномасштабного анализа:

$$f(x) = \sum_n c_n \varphi_n.$$

Согласно концепции кратномасштабного анализа (см. (6)) функция $f(x)$ декомпозируется на две функции и представляется выражением:

$$f(x) = \sum_n c_{1,n} \varphi_{1,n}(x) + \sum_n d_{1,n} \psi(x), \tag{9}$$

то есть получены две новые последовательности $c_{1,n}$ и $d_{1,n}$.

При значении последовательности масштабирующих коэффициентов $c_{1,n}$ процесс вычисления детализирующих коэффициентов продолжается до $d_{m,n}$, m, $n \in$ Z.

Процедура (9) определена, но в ней для вычисления используются непрерывные функции вейвлетов. Преобразуя операцию свёртки:

$$c_{1,k} = \left\langle \varphi_{1,k}(x), \sum{}_n c_n \varphi_n(x) \right\rangle = 2^{1/2} \sum{}_n c_n h_{n+2k} , \qquad (10)$$

оказывается возможным получить процедуру итеративного вычисления коэффициентов $c_{j,k}$ и $d_{j,k}$ без использования непрерывных функций.

Полностью дискретный процесс декомпозиции представляется по аналогии с (10) в виде:

$$\begin{aligned} c_{j,k} &= 2^{1/2} \sum{}_n c_{j-1,n} h_{n+2k} ; \\ d_{j,k} &= 2^{1/2} \sum{}_n c_{j-1,n} g_{n+2k} , \end{aligned} \qquad (11)$$

где h_i, g_i – совокупности чисел.

Полученная запись процедуры ДВВП позволяет дать физическую трактовку определению понятия "вейвлет-фильтр". Понятие "фильтр" имеет несколько отличающиеся определения в различных источниках. В дискретных системах "фильтром" считается система обработки дискретного сигнала, обладающая свойствами линейности и стационарности. Вейвлет-фильтры относятся к классу адаптивных с переменными параметрами, то есть не обладают свойством стационарности.

Понятие вейвлет-фильтра определяется как последовательности h_n и g_n [3].

Основным элементом системы (банка) фильтровой обработки является пара фильтров: *Lo_D* – низкочастотный (НЧ) фильтр и *Hi_D* – высокочастотный фильтр.

Приведенное определение фильтра дано в одном из источников по прикладной математике применения вейвлетов [2]. Целевое приложение работы требует трактовки определения с позиций теории радиотехнических систем, в соответствии с положениями которой последовательности h и g следует трактовать, как дискретные импульсные характеристики фильтров $h(n)$ и $g(n)$.

Эти характеристики взаимно связаны: ВЧ фильтр получается из НЧ фильтра путём "переворота" вектора его коэффициентов и изменения знака у нечётных коэффициентов. Аналитически это записывается в виде:

$$g[L-1-n] = (-1)^n h[n], \qquad (12)$$

где L – длина фильтра (число отсчётов).

В теории радиотехнических систем такие фильтры называют квадратурно-зеркальными.

Вид импульсных характеристик фильтров с вейвлетом Добеши 8-го порядка рассчитан в соответствии с функцией компьютерной системы математики [5]:

$$[\mathrm{L_0\_D, Hi\_D}] = \mathrm{wfilters\ ('db8')}$$

и приведён на рис. 1.

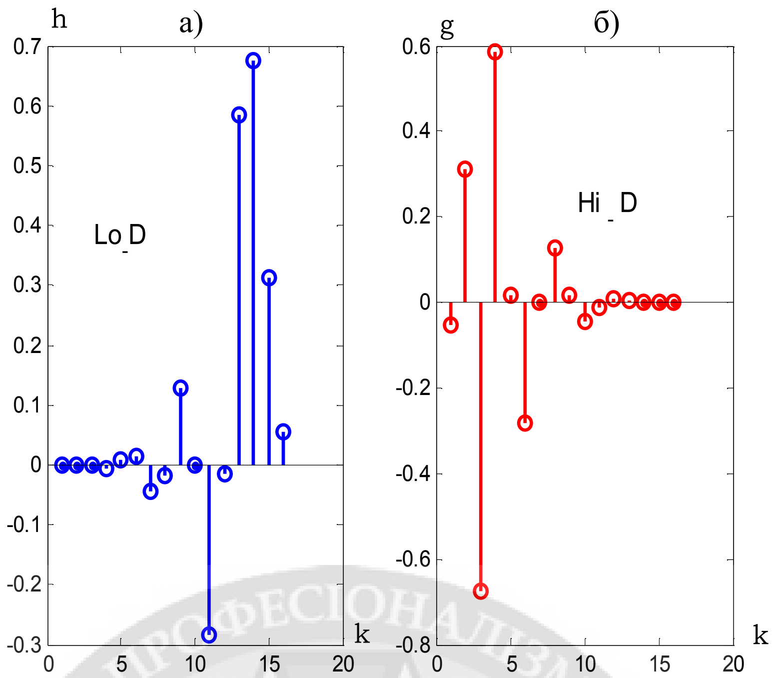

Рис. 1. Вид импульсных характеристик фильтров (а – низкочастотного, б – высокочастотного) с вейвлетом Добеши восьмого порядка

Дискретный вейвлет-анализ позволяет реализовать быстрое дискретное вейвлет-преобразование по пирамидальному алгоритму Маллата.

Алгоритм распознавания класса цели на основе метрики результатов вейвлет-анализа.

Рассматривается задача разработки и теоретического обоснования нового алгоритма распознавания типа сигнала с использованием процедуры решения, основанной на пороговой оценке коэффициентов декомпозиции только принятого сигнала без сравнения с образцом.

Возможность такого алгоритма базируется на избыточности прямого вейвлет-преобразования, которая может быть устранена без потери информации о локальных возмущениях в сигнале за счёт, во-первых, удаления с веэйвлет-плоскости коэффициентов с малой информацией о структуре сигнала, во-вторых, применением статистических подходов с вычислением распределений и моментов.

<u>Визуализация векторов вейвлет – спектра.</u>

Условиями данного и последующих анализов приняты следующие: размерность пачки $M = 64$, число нулевых провалов в пачке парной цели минимальное ($n = 3$), тип базисного вейвлета – db8 (Добеши 8-го порядка), максимальный уровень разложения $N = 4$ (на единицу меньше двоичного показателя сигнала $M = 2^5$). Вычислительные операции выполнены путём использования программных функций систем компьютерной математики [5]:

$$[C,L] = \text{wavedec}(s,N,\text{'db8'});\ d = \text{detcoef}\,(C,L,[1,2,\ldots]), \tag{13}$$

где C, d – полный вектор коэффициентов и вектор детализирующих коэффициентов заданного уровня 1, 2, … .

Векторы детализирующих коэффициентов декомпозиции сигнала парной цели показаны на рис. 2.

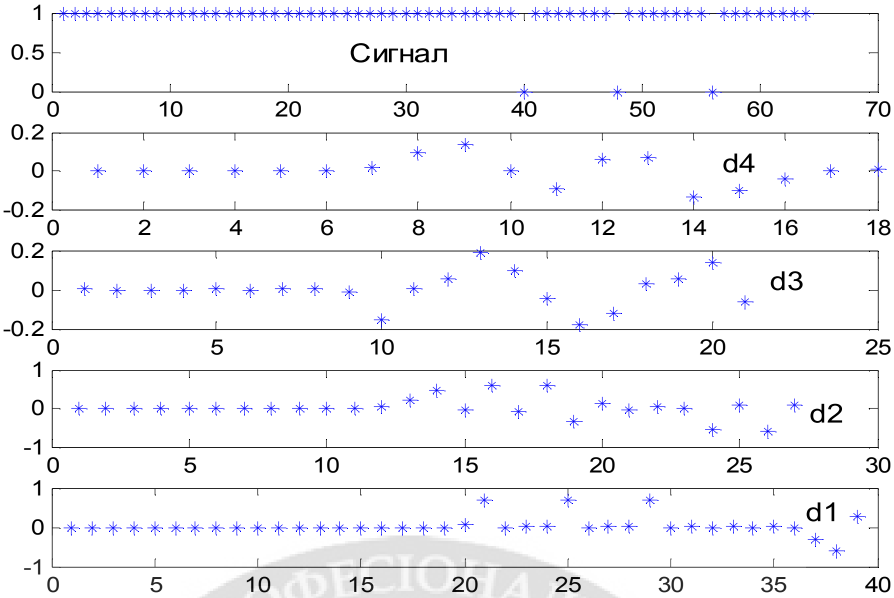

Рис. 2. Векторы детализирующих коэффициентов декомпозиции сигнала парной цели

Векторы коэффициентов обозначены: $d_4 \dots d_1$. Наглядность картины рис. 2 приводит к очевидному выводу об использовании только коэффициентов 1-го уровня разложения. С целью большей чёткости для выбранного уровня представлен на рис. 3 фрагмент вектора d1, соответствующий области флюктуаций d(32:64).

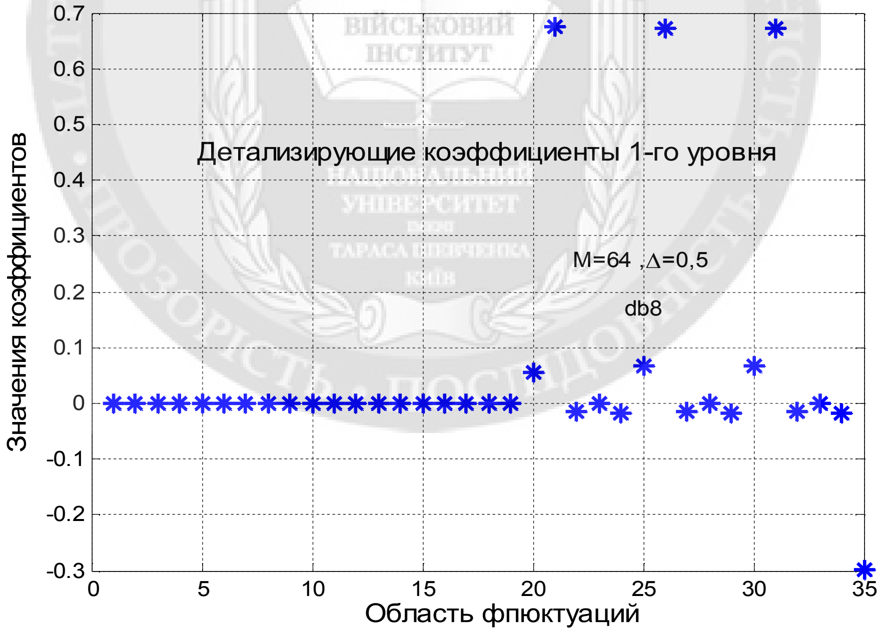

Рис. 3. Фрагмент вектора d1, соответствующий области флюктуаций d(32:64)

Область пачки без нулевых отсчётов имеет коэффициенты разложения очень близкие к нулю, незначительное "возмущение" вектора возникает на позиции нулей. При этом сами провалы в пачке выражены явно (для пачки без провалов все коэффициенты равны нулю с точностью до $6 \cdot 10^{-8}$).

На основании проведенного анализа делаем вывод о возможности использования для решения задачи распознавания только вектора коэффициентов декомпозиции 1-го уровня.

Физическая картина полученного результата объясняется тем, что базисный вейвлет 1-го уровня является наиболее высокочастотным и сжатым, и при свёртке на каждом шаге с сигналом получается отличным от нуля только позициях, на которых в сигнале за счёт скачка значений (переход 1 – 0) имеются ВЧ составляющие.

Анализ статистических характеристик вектора d1.

Вектор детализирующих коэффициентов d1 представляет собой дискретную случайную величину, для характеристики которой используются числовые параметры: среднее значение, среднеквадратическое отклонение (*std*), максимальное значение, норма (*norm*), а также – эмпирическое распределение (гистограмма).

На рис. 4 представлены результаты расчёта указанных числовых характеристик для вейвлета Добеши 4, 8 и 10 порядков и единичной пачки ($M = 64$) с 3-мя нулевыми позициями. На левом рис. 4 показаны значения *std* и максимального значения. Из анализа следует, что максимумы, соответствующие нулевым провалам имеют значения 0,64 .. 0,68 при среднеквадратическом (СКВ) разбросе, не превышающем 0,3. На правом рис. 4 показаны значения квадрата нормы вектора d1, а нижняя кривая соответствует тому же показателю для случая $n = 1$ (один провал). Это тот случай, когда за счёт влияния шума на входе квантизатора возникает провал, который может привести к неправильному распознаванию пачки одиночной цели. Вероятность такого случая крайне низкая, но принципиально он должен быть учтён, как фактор влияния шумов.

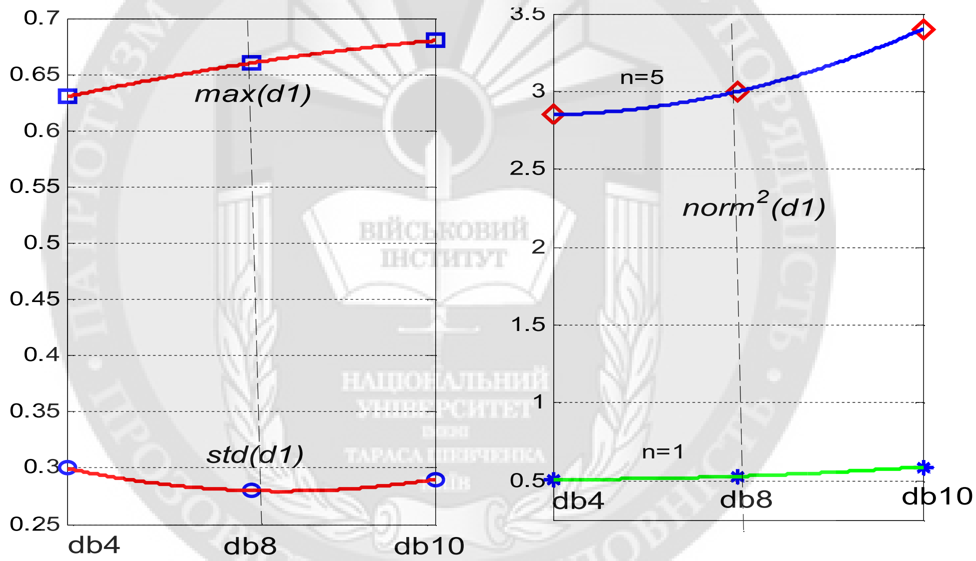

Рис. 4. Статистика вектора коэффициентов d1

Сравнение представленных на правом графике кривых позволяет утверждать, что квадрат нормы коэффициентов декомпозиции 1-го уровня является эффективным показателем распознавания пачки парной цели, поскольку возможности обнаружения такого сигнала эквивалентны накоплению трёх и более единичных отсчётов пачки (в стандартном обнаружителе с логикой "2 из 3" накапливается 2 импульса).

По результатам вычислений вектора декомпозиции 1-го уровня произведён расчёт и построение эмпирических характеристик распределения в виде гистограммы (рис. 5) для следующих вариантов сигнала: левый рисунок – пачка одиночной цели с одним случайным нулевым отсчётом, обусловленным влиянием шума; правый рисунок – пачка парной цели с тремя нулевыми отсчётами.

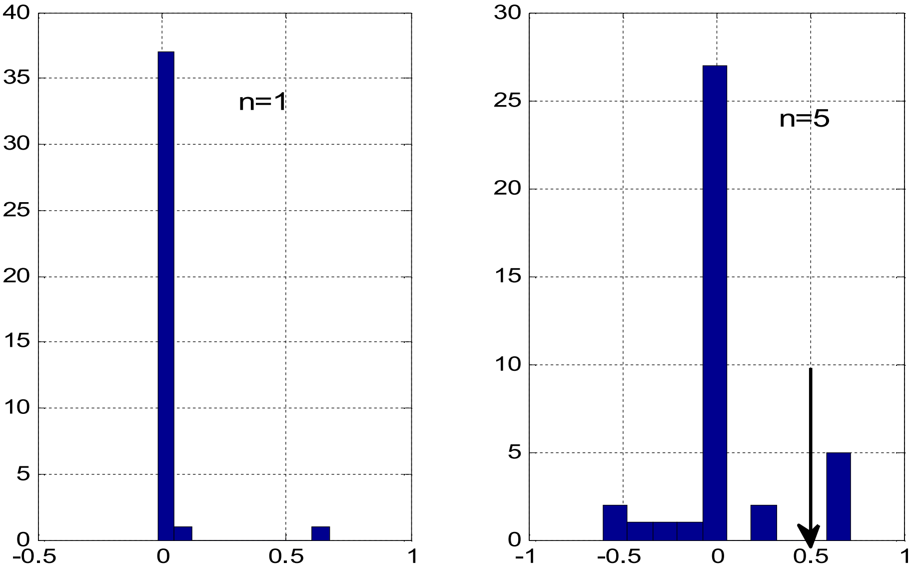

Рис. 5. Гистограмма распределения d1

Для пачки без провалов (график не приводится) случайные значения вектора d1 распределены в узком интервале ≤ ± 0,01, при наличии одного провала появляется малая вероятность в области максимального значения (≈ 0,6), для пачки парной цели с тремя нулями значение гистограммы в области max(d1) существенно больше.

<u>Оценка эффективности распознавания вида сигнальной пачки.</u>

Процедура распознавания типа пачки (разрешение парной цели) после вычисления вектора детализирующих коэффициентов 1-го уровня ($\mathrm{d1} = \{\mathrm{d1}_k\}_{k=1,L}$, L – длина вектора сигнала) эквивалентна процедуре обнаружения дискретной бинарной пачки. Принципиальное отличие состоит в определении полезного сигнала (w) и помехового фона (η).

Сигнал на входе пороговой схемы представляется в виде:

$$Y = w + \eta = norm^2(\mathrm{d1}) + \eta \approx \sum_{k=1,n} \mathrm{d1}^2_{d1k} + \eta, \qquad (14)$$

где сумма определена в пределах n, так как на остальном интервале вектора значения d1 практически нулевые.

Вектор w является случайным, его фактор случайности обусловлен, как флюктуациями отсчётов $\mathrm{d1}_k$, так и ограниченностью выборки. Кроме того, расчёты показали, что значения нормы вектора изменяются (незначительно) при изменении порядка следования нулевых провалов. При оценке эффективности используется сигнальная составляющая вектора $w = \langle w \rangle$ (<.> знак математического ожидания).

Величина помехового фона определяется СКВ значением:

$$\sigma_\eta = std(\mathrm{d1}). \qquad (15)$$

Значение σ_η изменяется при изменении числа нулевых позиций в пачке, в расчётах принимается средняя величина, квадрат которой равен 0,09.

На рис. 6 показана зависимость квадрата нормы d1 от числа нулевых позиций в пачке, на рис. 7 – отношение по мощности сигнал/фон в дБ от относительного смещения целей в составе парной цели.

Если необходимо обеспечить увеличение разрешающей способности по сравнению с релеевским пределом в 2 раза (Δ = 0,5), то отношение сигнал/фон соответствует 17,5 дБ.

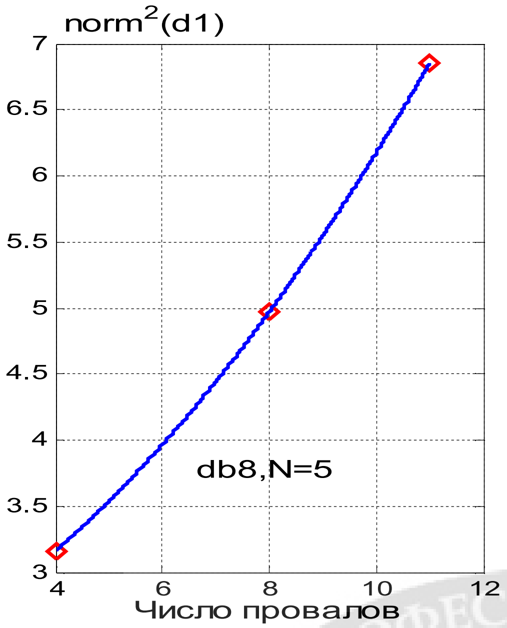

Рис. 6. Зависимость квадрата нормы d1 от числа нулевых позиций в пачке

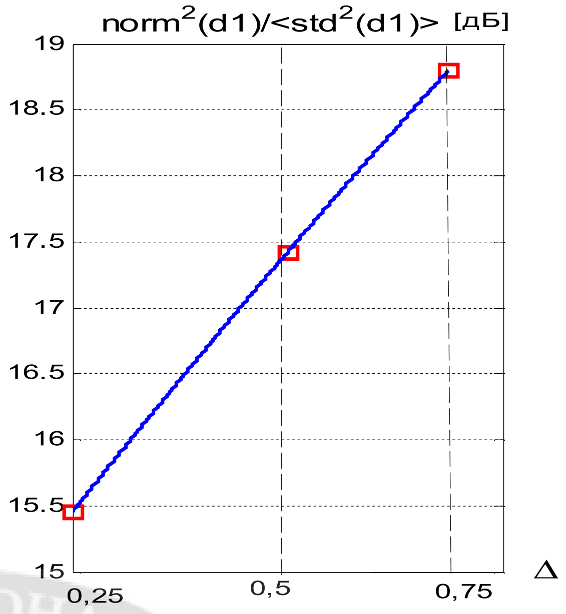

Рис. 7. Отношение по мощности сигнал/фон в дБ от относительного смещения целей в составе парной цели

Структурная алгоритмическая схема системы распознавания.

Структурная схема алгоритма обработки в системе распознавания представлена на рис. 8.

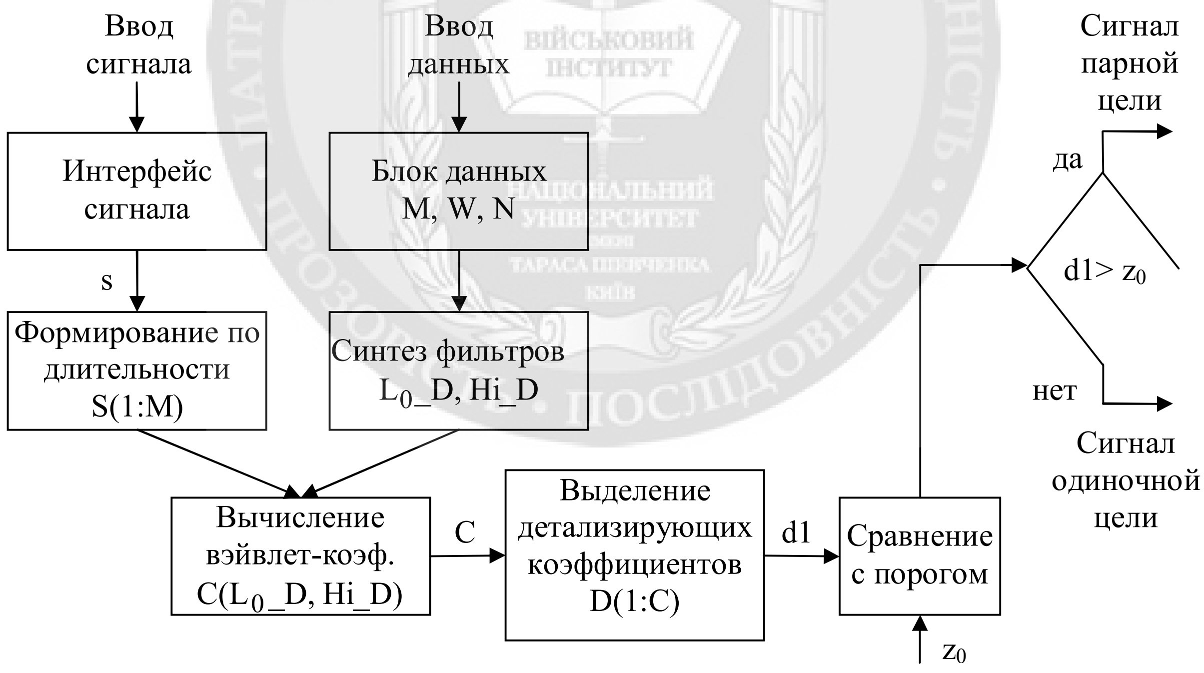

Рис. 8. Структурная схема алгоритма обработки в системе распознавания

Синтез блока фильтров осуществляется программной функцией [5]:

$$[L_0\_D, Hi\_D] = \text{wfilters}\ ('\text{db8}')\,. \qquad (16)$$

Векторно-матричные операторы C и D1 – определяются в соответствии с выражениями (14) и (15). Размерность сигнала определена в пределах размера стандартной пачки (*M*), так как при этом область флюктуаций находится внутри пачки первой цели.

Выводы. Обработка сигналов с помощью вейвлет-технологии в силу присущих вейвлет-анализу преимуществ по сравнению с Фурье-преобразованием является мощным инструментальным средством решения широкого класса задач, в частности, пространственно-временного разрешения класса целей (одиночная – групповая сосредоточенная).

Показано, что на основе использования результатов статистической обработки вектора вейвлет-коэффициентов низкого уровня разложения может быть построен достаточно простой алгоритм распознавания типа сигналов заданного класса целей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ширман Я.Д., Горшков С.А. и др. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника, 1996 г., №11, с.363.
2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005.
3. Чуи К. Справочник по вероятностным расчётам. – М.: Воениздат, 1970 – 468с.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты: От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002.
5. Долгушин В.П., Ленков Е.С., Лоза В.Н., Кольцов Р.Ю. Статистический анализ спектрально-временных параметров эхо-пачки сосредоточенной парной цели // Сборник научных трудов Военного института Киевского национального университета имени Тараса Шевченка 35 - 44 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Лєнков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н., доц. Долгушин В.П., к.т.н. Лоза В.М., Борзак О.М., Жиров Б.Г.

РОЗПІЗНАВАННЯ КЛАСУ ЦІЛЕЙ МЕТОДОМ ОЦІНКИ СТАТИСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕКТОРА ВЕЙВЛЕТ-ДЕКОМПОЗИЦІЇ СИГНАЛУ

Розглядаються питання використання математичного апарату альтернативного спектрального аналізу на основі теорії вейвлетів для реалізації алгоритму розпізнавання – розрізнення групових зосереджених цілей з аналізу результатів вейвлет-декомпозиції ехосигналу. Запропоновано алгоритм побудови системи розпізнавання, що використовує в якості статистики розпізнавання норму вектора коефіцієнтів вейвлет-розкладання сигналу нижнього рівня.

Ключові слова: радіолокаційна станція , вейвлет-перетворення, групова зосереджена ціль.

V. Dolhushyn, V. Loza, A. Borzak, B. Zhyrov

RECOGNITION OF CLASS METHOD EVALUATION PURPOSES OF STATISTICAL PARAMETERS VECTOR SIGNAL WAVELET DECOMPOSITION

It concerns the use of the mathematical apparatus of alternative spectral analysis based on the theory of wavelets to implement the recognition algorithm - authorization group focused objectives to analyze the results of wavelet decomposition echo. An algorithm for constructing recognition system that uses statistical pattern recognition as a norm of the vector of coefficients of wavelet decomposition of low-level signal.

Keywords: radiolocation station, wavelet transform, the concentrated pair target.