УДК 621.391

А.В. Кобзев, М.В. Мурзин

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

# ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НЕКОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТЬЮ

*Предлагается новый способ реализации некогерентного накопления при обнаружении сигналов с неизвестными видами и параметрами модуляции основанный на вейвлет-разложении. В отличие от известных предлагаемый способ обеспечивает снижение вычислительных затрат. Приводятся результаты имитационного моделирования.*

***Ключевые слова:*** *обнаружение сигналов с неизвестными видами и параметрами модуляции, некогерентное накопление, вейвлет-разложение.*

## Введение

Задача обнаружения сигналов с неизвестными видами и параметрами модуляции возникает в пассивных системах контроля радиоэлектронной обстановки (системы радиомониторинга, радиоэлектронной разведки, пассивной радиолокации и др.), которые, как правило, оценивают радиоэлектронную обстановку в широком диапазоне частот. Вследствие многообразия видов и параметров модуляции принимаемых сигналов в рабочем диапазоне частот невозможно заранее предсказать вид сигнала, действующего на входе приемника в данный момент. По этой причине на этапе обнаружения невозможно использовать согласованную обработку, осуществляющую когерентное (додетектороное) накопление сигнала, и приходится ограничиваться только некогерентой (последетекторной) обработкой. При этом необходимая длительность некогерентного накопления является неопределенной величиной, поскольку протяженность обнаруживаемого сигнала может принимать произвольное значение из широкого диапазона этих величин. Известными могут быть только границы этого диапазона.

В работе [1] проведен анализ характеристик обнаружения широкополосных сигналов при обработке частотно-временной панорамы с учетом их накоплении в частотно-временной области. Рассматривается случай неизвестной протяженности сигналов по времени и частоте. Показано, что преодоление неопределенности протяженности обнаруживаемого сигнала при приемлемых энергетических потерях (не более 1,5 дБ) осуществляется путем использования многоканальных некогерентных накопителей, в которых длительность накопления в соседних каналах отличается в 2 раза. Число накопителей (каналов) определяется диапазоном протяженности ожидаемых сигналов по времени и частоте. Считается, что положение сигнала на частотно-временной панораме заранее неизвестно. Поэтому накопители реализуются в виде «скользящих окон» различных размеров.

В настоящей работе предлагается и оценивается работоспособность способа обнаружения сигналов с неизвестными видами и параметрами модуляции, основанного на применении вейвлет-разложения. Он имеет ряд схожих черт со способом «скользящих окон» [1] и обладает определенными преимуществами перед ним.

## Постановка задачи

Пусть необходимо реализовать некогерентное накопление сигнала s(x), наблюдаемого в присутствии стационарного шума n(x). Обработке подвергается процесс $y(x)=s(x)+n(x)+n_0$, который образован путем выделения огибающей принятого высокочастотного сигнала и поэтому является однополярным вещественным со средним значением $n_0$. Переменная x в зависимости от способа обработки (временной и частотной) может иметь смысл или времени или частоты. Относительно протяженности сигнала (длительности или ширины спектра) известен только диапазон, который находится в границах $\Delta_{s,min}$.. $\Delta_{s,max}$. Необходимо создать систему накопителей, перекрывающих указанный диапазон и обеспечивающих наименьшие энергетические потери.

## Решение задачи

Для решения задачи будем использовать вейвлет-разложение процесса y(x). Предпосылкой для применения вейвлет-разложения является его свойство масштабировать анализируемые процессы [2,3]. При диадном разложении масштаб разложения в соседних каналах отличается ровно в 2 раза. Именно такой вид разложения по аналогии с работой [1] целесообразно применять для реализации многоканальных накопителей с различными интервалами накопления. С точки зрения наглядности при пояснении принципов обработки будем в дальнейшем использовать представление процессов в непрерывной форме, хотя практическая реализация возможна только в цифровом виде.

Приведем некоторые сведения из теории вейвлет-анализа [2, 3], которые будут использованы для решения поставленной задачи. Известно, что при вейвлет-разложении на m уровней (масштабов) анализируемый процесс можно представить в виде суммы

$$y(x) = a_m(x) + \sum_{i=1}^{m} d_i(x), \qquad (1)$$

где $a_m(x)$ – аппроксимирующее слагаемое, содержащее низкочастотные составляющие, $d_i(x)$ – детализирующие компоненты с высокочастотными составляющими. В дальнейшем нас будет интересовать только аппроксимирующее слагаемое, которое и будет выполнять роль накопителя. Аппроксимация $a_m(x)$ образуется на основе вычисления коэффициентов разложения $A_{mk}$ и последующего восстановления составляющей $a_m(x)$ с помощью ортонормированных масштабирующих функций (скейлинг-функций) $\varphi_{km}(x)$ по правилам [3]

$$A_{mk} = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)\phi_{mk}(x)dx; \qquad a_m(x) = \sum_{k} A_{mk}\tilde{\phi}_{mk}(x), \qquad (2)$$

где функция $\varphi_{mk}(x)$ локализована на оси x, имеет вид

$$\phi_{mk}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^m}}\phi\left(\frac{x}{2^m} - k\right) \qquad (3)$$

и определяется типом используемого вейвлета. Здесь k – параметр сдвига. Функция восстановления $\tilde{\phi}_{mk}(x)$ является зеркальным отображением функции разложения $\varphi_{km}(x)$. Эти функции обладают следующими свойствами [4]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{mk}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}_{mk}(x) = 1. \qquad (4)$$

Рассмотрим особенности преобразования полезного сигнала. Сигнальную составляющую в коэффициентах $A_{mk}$ можно представить в виде

$$A_{c,mk} = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)\phi_{mk}(x)dx \qquad (5)$$

Интегрирование эквивалентно накоплению сигнала. Выражение (2) слева напоминает процедуру корреляционной обработки, в которой опорный сигнал $\varphi_{km}(x)$ выделяет из процесса y(x) наиболее близко похожую на нее составляющую. Поскольку обе подынтегральные функции ограничены по протяженности на оси x, то величина $A_{c,mk}$ будет иметь максимальное значение $A_{cm,max}$ при совпадении положений их максимумов, а также при одинаковости их протяженности. Первое условие не играет принципиальной роли, поскольку независимо от положения сигнала s(x) при его восстановлении происходит безошибочное восстановление положения его максимума. Второе условие имеет более важное значение. Здесь при рассогласовании протяженностей функций s(x) и $\varphi_{km}(x)$ величина коэффициента $A_{cm,max}$ непосредственно определяет отношение сигнал/шум после восстановления процесса $a_m(x)$.

Если использовать описание процесса разложения в частотной области, то вычисление коэффициентов аппроксимации $A_{mk}$ можно рассматривать как пропускание процесса y(x) через цепь последовательно соединенных фильтров с общей частотной характеристикой [3]

$$H_m(\omega) = \prod_{j=1}^{m} H_1\left(2^{j-1}\omega\right), \qquad (6)$$

где $H_1(\omega)$ – частотная характеристика фильтра на первом уровне разложения. Заметим, что полосы пропускания фильтров последовательно уменьшаются в два раза по мере прохождения сигнала через цепь фильтров. Поэтому результирующая полоса в основном определяется последним сомножителем. Это дает право считать $H_m(\omega) \approx H_1(2^{m-1}\omega)$. Следовательно, при прохождении шума через фильтры $H_m(\omega)$ его дисперсия уменьшается в 2 раза с увеличением уровня m,что является одной из причин улучшения отношения сигнал/шум.

При выборе типа и параметров функций $\varphi(x)$ целесообразно опираться на следующие правила. В ряде случаев может быть априори известна форма сигнала s(x). Тогда при выборе вида вейвлет-функций $\varphi(x)$ целесообразно стремиться к тому, чтобы форма этой функции и форма сигнала s(x) были близки друг к другу. Так, например, при обработке во временной области длинных импульсных сигналов (x - время) их форма близка к прямоугольной. Здесь целесообразно использовать функции Хаара, представляющие собой прямоугольные импульсы различной длительности в зависимости от уровня разложения m. При обработке спектров сигналов цифровой радиосвязи (x - частота) их форма спектров в среднем хорошо описывается плавными симметричными функциями. Например, при бинарной фазовой манипуляции усредненный спектр сигнала представляет собой главный лепесток функции sin(x)/x. В данном случае скейлинг-функции $\varphi(x)$ следует выбирать из класса дифференцируемых функций с плавным изменением. К ним, например, относятся некоторые разновидности вейвлетов типа Discrete Meyer («dmey»), Biortogonal («bior6.8»), Coiflets («coif5»), Symlets («sym8») и ряд других. В скобках указаны типы вейвлетов, обозначаемых в среде MatLab. Имитационное моделирование излагаемого способа обработки показало, что результат обработки слабо зависит от типа вейвлета. Максимальный уровень разложения $m_{max}$ при обработке цифровых данных определяется максимальной протяженностью сигнала $\Delta_{s,max}$ и выбирается из соотношения $m_{max} = E\{\log_2(\Delta_{s,max}/\delta x)\}$, где δx – интервал дискретизации, $E\{\cdot\}$-округление до целого в сторону увеличения. Отметим также, что величина $m_{max}$ ограничена объемом обрабатываемой выборки N ($m_{max} = N - 1$). В большинстве практических случаев выполняется неравенство $\Delta_{s,max} << N$.

При обнаружении сигналов порог сравнения формируется по отдельности для каждого уровня m. Для этого вначале оцениваются среднее значение $n_0$ и дисперсия $\sigma_0^2$ исходного шумового процесса n(x), например, способом, предложенным в работе [5]. Затем с учетом нормализации шума в фильтрах с характеристиками $H_m(\omega)$ устанавливаются пороги сравнения как для нормального закона со средним $n_0$ и дисперсия $\sigma_0^2/2^m$.

Сравнивая предлагаемый способ обработки с методом «скользящих окон» [1], отметим, что при вейвлет-преобразовании по мере увеличения уровня разложения m объем обрабатываемой выборки на каждом шаге уменьшается в 2 раза. Кроме того, при «скользящем окне» согласованный накопитель с длительностью сигнала, по сути, вычисляет автокорреляционную функцию сигнала, после чего необходимо выделять ее максимум. При способе вейвлет-обработки этот максимум в соответствии с (2) вычисляется сразу в виде коэффициента $A_{mk}$. Если отметить также наличие быстрых алгоритмов вейвлет-преобразований [2-4], то указанные особенности свидетельствую о возможности значительного сокращения вычислительных затрат при использовании предлагаемого способа обработки.

## Результаты имитационного моделирования

Для оценки работоспособности предлагаемого способа накопления проведено имитационное моделирование применительно к случаю спектральной обработки. Его результаты представлены на рис. 1.

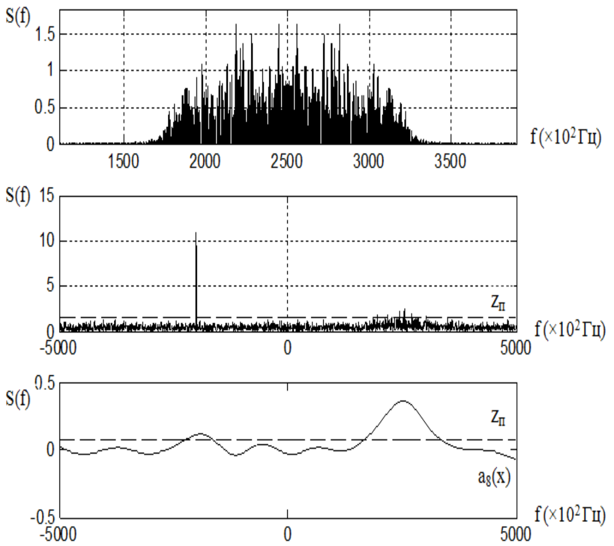


Рис. 1. Результаты имитационного моделирования

В модели на обнаружитель поступают спектры узкополосного (гармонического) и широкополосного сигналов. Широкополосный сигнал (ШПС) образован бинарной фазовой манипуляцией несущей на частоте 2500 случайной последовательностью «0» и «1». Его амплитудно-частотный спектр, состоящий из составляющих со случайной величиной, показан на верхнем рисунке. Оба сигнала имеют одинаковое отношение сигнал/шум на входе преобразователя Фурье, равное $\eta$=–9 дБ. На среднем рисунке приведен исходный спектр (сигналы+шум), содержащий N=$2^{12}$ выборок. Пунктирной линией обозначен порог обнаружения, соответствующий вероятности ложной тревоги $10^{-4}$. Здесь только отдельные выбросы спектра ШПС превышают порог $z_п$. Узкополосный сигнал обнаруживается уверенно. На нижнем рисунке показана аппроксимирующая составляющая $a_8(x)$ при использовании вейвлета типа Coiflets («coif5»). Отсюда видно, что ШПС представляет собой среднее значение спектра и он с запасом превышает порог обнаружения, а узкополосный, наоборот, ослаблен. По виду аппроксимирующего слагаемого $a_8(x)$ можно оценивать положение его максимума на оси x и ширину спектра $\Delta_s$.

## Выводы

Предлагаемый способ реализации некогерентного накопления при обнаружении сигналов с неизвестной протяженностью основан на применении современного математического аппарата вейвлет-разложений. Представленные результаты имитационного моделирования свидетельствуют о его работоспособности. Следует ожидать сокращение вычислительных затрат по сравнению со способом «скользящих окон».

## Список литературы

*1. Ширман Я.Д. Учет временных рассогласований при несанкционированном обнаружении излучений шумовых радиолокаторов / Я.Д. Ширман, В.М. Орленко, С.В.Селезнев // Системи обробки інформації. Х.: ХВУ, – 2002. – №6 (22). – С. 252 – 261.*

*2. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 446 с.*

*3. Воробьев В.И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: Военный университет связи, 1999. – 204 с.*

*4. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в МАТЛАБ / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.*

*5. Кобзев А.В. Способ стабилизации уровня ложных тревог при обнаружении сигналов на фоне нестационарного шума на основе применения вейвлет-разложения / А.В. Кобзев, М.В. Мурзин // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 2 (28). – С. 102–105.*

*Надійшла до редколегії 25.11.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-РОЗКЛАДАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ НЕКОГЕРЕНТНОГО НАКОПИЧЕННЯ ПРИ ВИЯВЛЕННІ СИГНАЛІВ З НЕВІДОМОЮ ПРОТЯЖНІСТЮ

А.В. Кобзєв, М.В. Мурзін

*Пропонується новий спосіб реалізації некогерентного накопичення при виявленні сигналів з невідомими видами і параметрами модуляції заснований на вейвлет-розкладанні. На відміну від відомих пропонуємий спосіб забезпечує зниження обчислювальних витрат. Наводяться результати імітаційного моделювання.*

***Ключові слова:*** *виявлення сигналів з невідомими видами і параметрами модуляції, некогерентне накопичення, вейвлет-розкладання.*

## APPLICATION OF WAVELET DECOMPOSITION FOR THE IMPLEMENTATION OF INCOHERENT ACCUMULATION AT DETECTION SIGNALS WITH UNKNOWN LENGTH

A.V. Kobzev, M.V. Murzin

*Offered a new way of implementing an incoherent accumulation at detection of signals with unknown parameters and types of modulation based on wavelet decomposition. Unlike known proposed method reduces computational cost. Presents the results of simulation modeling.*

***Keywords:*** *detection of signals with unknown parameters and types of modulation, incoherent accumulation, wavelet decomposition.*