УДК 621.391

А.В. Кобзев, М.В. Мурзин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОСРЕДСТВ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СКРЫТНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДВУХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ

Проводится сравнительный анализ способа реализации некогерентного накопления при обнаружении сигналов с неизвестными видами и параметрами модуляции основанный на вейвлет-разложении и с использованием «скользящего окна». Показано что оба способа обеспечивают одинаковое отношение сигнал/шум, но применение способа основанного на вейвлет-разложении позволяет значительно снизить вычислительные затраты.

Ключевые слова: *обнаружение сигналов, некогерентное накопление, вейвлет-разложение, вычислительные затраты.*

Введение

Задача обнаружения сигналов с энергетической скрытностью и неизвестной протяженностью решалась в нескольких работах. Среди них следует выделить ряд статей (например, [1, 2]) и диссертацию [3], выполненных под руководством профессора Я.Д. Ширмана. В этих работах показано, что преодоление скрытности на этапе обнаружения достигается путем некогерентного (последетекторного) накопления выборок сигнала. В условиях априорной неопределенности моментов появления сигнала и его протяженности авторы предлагают применять метод накопления, реализуемый за счет суммирования в «скользящих окнах» с различными размерностями. Если размерности соседних окон выбрать отличающимися в 2 раза, то потери в отношении сигнал/шум за счет несовпадения длительностей накопления и сигнала не превышают 1,5 дБ.

В работе [4] предложен иной способ реализации набора накопителей, который основан на использовании разложения сигналов на вейвлеты. Путем имитационного моделирования показана работоспособность такого способа некогерентного накопления.

Однако в указанной работе отсутствуют данные о характеристиках предложенного способа, к которым прежде всего относятся энергетические показатели (отношение сигнал/шум в результате накопления), вычислительные затраты на реализацию и отличительные особенности способа в сравнении с методом «скользящего окна» [1 – 3].

Целью настоящей статьи является проведение сравнительного анализа двух способов некогерентного накопления, один из которых изложен в работах [1 – 3], а другой – в статье авторов [4]. Сравнение осуществляется по энергетическому показателю (отношению сигнал/шум) и по вычислительным затратам.

Основной материал

Вначале отметим некоторые особенности вейвлет-разложения сигналов, используемые для реализации некогерентного накопления и приведем основные соотношения из работы [4], необходимые для дальнейшего анализа. Вейвлет-разложение осуществляет масштабирование анализируемых процессов, когда анализируемый процесс y(x) можно представить в виде суммы [5]:

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

где $a_m(x)$ – аппроксимирующее слагаемое, содержащее низкочастотные составляющие; $d_i(x)$ – детализирующие компоненты с высокочастотными составляющими. Переменная x может играть роль времени или частоты в зависимости от способа обработки (во временной или частотной области); m – масштаб разложения.

Для накопления используются аппроксимирующие слагаемые $a_m(x)$, полученные при различных масштабах m. Различие масштабов равноценно различию длительностей накопления. 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 [5]:

$$A_{mk} = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)\varphi_{mk}(x)dx; \; a_m(x) = \sum_k A_{mk}\tilde{\varphi}_{mk}(x), \qquad (2)$$

где функция $\varphi_{mk}(x)$ определяется типом используемого вейвлета. Она локализована на оси x и имеет вид:

$$\varphi_{mk}(x) = \varphi\left(x/2^m - k\right)\Big/\sqrt{2^m}, \qquad (3)$$

где k – параметр сдвига. Функция восстановления $\tilde{\varphi}_{mk}(x)$ является зеркальным отображением функции разложения $\varphi_{km}(x)$. Обе функции обладают свойством

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

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 (n_0 – среднее значение, обусловленное наличием шума). Оценим отношение сигнал/шум для каждого масштаба разложения m. Вначале рассмотрим особенности преобразования полезного сигнала. Сигнальную составляющую в коэффициентах A_{mk} можно представить в виде

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

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 максимума 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 $a_m(x)$. Оценим это отношение.

Строгий анализ в общем виде с использованием выражений (2) и (5) связан со значительными трудностями вследствие того, что большинство вейвлет-функций $\varphi_{km}(x)$ описываются громоздкими зависимостями. Некоторые из них вообще не имеют аналитического представления (например, функции Добеши) [5]. Для приближенной оценки будем исходить из того, что вследствие локализации на оси x и с учетом свойства (4) функции $\varphi_{mk}(x)$ всех типов вейвлетов имеют ярко выраженный главный лепесток [5], который можно характеризовать шириной Δ_m Представим скейлинг-функции $\varphi_{km}(x)$ в виде прямоугольников длительностью Δ_m и высотой $1/\Delta_m$, что делает условие (4) выполнимым. Этот случай соответствует строгому разложению с использованием функций Хаара. Точно также представим сигнал s(x) в виде прямоугольника шириной Δ_s и высотой S. Тогда при условии полного перекрытия подынтегральных прямоугольных функций максимальное значение коэффициента $A_{cm,max}$ в соответствии с (5) становится равным $A_{cm,max}=S$ при $\Delta_m \le \Delta_s$ и $A_{cm,max}= S\cdot\Delta_s/\Delta_m$ при $\Delta_m \ge \Delta_s$.

Рассмотрим характеристики шума при вейвлет-разложении. Дисперсия шумовой составляющей в коэффициентах разложения A_{mk} равна

$$\sigma_m^2 = \overline{n_m^2(x)} = \iint \varphi_{mk}(x_1)\varphi_{mk}(x_2)\overline{n(x_1)n(x_2)}dx_1dx_2. \quad (6)$$

Здесь черта сверху означает усреднение, а интегрирование осуществляется в бесконечных пределах. Полагаем что шумовой процесс n(x) является δ-коррелированным со спектральной плотностью мощности N_0. Тогда $\overline{n(x_1)n(x_2)} = N_0\delta(x_1 - x_2)$. В результате получим $\sigma_m^2=N_0/\Delta_m$.

Используя приведенные выше соотношения, выражение для отношения сигнал/шум после разложения на m уровней принимает вид $q_m=A^2_{cm,max}\Delta_m/N_0$. Отсюда получаем $q_m = S^2\Delta_m/N_0$ при $\Delta_m \le \Delta_s$ и $q_m=S^2\Delta^2_s/(N_0\Delta_m)$ при $\Delta_m \ge \Delta_s$. В случае согласованной обработки ($\Delta_m = \Delta_s$) имеем $q_0 = S^2\Delta_s/N_0$. Поскольку протяженность сигнала Δ_s может принимать произвольные значения из известного диапазона, а величина Δ_m является дискретной, то строгое согласование становится случайным событием. Оценим максимально возможные потери на рассогласование. Эти потери представим как отношение $\rho_m=q_0/q_m$. Пусть величина Δ_s находится между значениями Δ_j и $\Delta_{j+1}=2\Delta_j$. При этом имеем $\rho_j=\Delta_s/\Delta_j$, $\rho_{j+1}=2\Delta_j/\Delta_s$. Максимальные потери соответствуют условию $\rho_{max}=\rho_j=\rho_{j+1}$, когда величины рассогласования Δ_s-Δ_j, Δ_s-Δ_{j+1} в соседних накопителях одинаковы по модулю и имеют противоположные знаки. Нетрудно убедиться, что это равенство достигается при $\Delta_s/\Delta_j=\sqrt{2}$. Следовательно, максимальные потери равны $\rho_{max}=\sqrt{2}$ (1,5 дБ). Этот результат совпадает с выводами работ [1 – 3], где он получен для способа «скользящего окна» прямоугольной формы на основании строгого статистического анализа.

Оценим вычислительные затраты на вейвлет-разложение, определив для этого необходимое число операций умножения. Пусть на обработку поступает выборка y_k длиной $N=2^n$ (k=1..N). Разложение на коэффициенты $A_{k,m}$ равносильно пропусканию через фильтр нижних частот, у которого число ненулевых коэффициентов h_r равно R (r=0..R-1). Алгоритмы быстрого вейвлет-преобразования (БВП) основаны на использовании итерационных процедур [5], в которых коэффициенты разложения каждого последующего уровня определяются из коэффициентов предыдущего уровня по правилу

$$A_{j+1,k} = \sum_{r=0}^{R-1} h_r A_{j,2k+r}; \quad (j = 0..J\text{-}1). \qquad (7)$$

Здесь полагается $A_{0,k}=y_k$. Максимальный уровень разложения J определяется максимальной протяженностью накапливаемого сигнала $\Delta_{s,max}$ и находится из равенства $2^J = E\{\Delta_{s,max}/\delta x\}$, где $E\{\cdot\}$ – округление до целого, δx – шаг дискретизации процесса y(x). Заметим, что с увеличением уровня разложения J на один шаг число коэффициентов разложения уменьшается в 2 раза. Отсюда следует, что число операций умножения при прямом преобразовании равно

$$Q_0 = NR\sum_{j=1}^{J} 2^{-j} = NR\left(1 - 2^{-J}\right). \qquad (8)$$

Поскольку величина Q_0 слабо зависит от максимального уровня разложения J, то для приближенной оценки можно считать $Q_0 \approx NR$. При обратном преобразовании (восстановлении аппроксимирующих составляющих) также применяется итерационная процедура [5] и требуется столько же операций умножения. Поэтому общее число умножений будет равно $Q=2Q_0 \approx 2NR$.

Для сравнения с вычислительными затратами на быстрое преобразование Фурье (БПФ) отметим, что число умножений при БПФ равно $Q \approx N \cdot \log_2 N$. Большинство вейвлет-функций имеют R от нескольких единиц до двух десятков. Поэтому алгоритмы БВП и БПФ реализуются приблизительно при одинаковых вычислительных затратах. БВП при использовании функций Хаара относится к самому быстродействующему преобразованию, поскольку для них R=2 и $h_0=h_1$ [5]. При этом прямое и обратное преобразования состоят в основном из операций суммирования двух слагаемых на каждом шаге и поэтому число операций суммирования здесь равно 4N. Рассмотренные в работах [1 – 3] алгоритмы накопления с помощью набора «скользящих окон» прямоугольной формы также не содержат операций умножения. Однако число шагов суммирования равно N при числе слагаемых на каждом шаге более $\Delta_{s.max}$, т.е. число операций равно не менее $N \cdot \Delta_{s.max}$.

Отметим также возможность гибкого выбора типа вейвлета, наиболее близкого по своей форме к априорно известной форме сигнала s(x), что обеспечивает наибольшее отношение сигнал/шум. Учет формы сигнала в принципе возможен также и в способе «скользящих окон». Для этого следует применить весовое суммирование в пределах каждого окна с неравными нулю коэффициентами. Однако при этом необходимо произвести общее число умножений, равное

$$Q_1 = N\sum_{j=1}^{J} 2^{j} = N \cdot \left(2^{J+1} + 2\right), \qquad (9)$$

что значительно превышает величину Q. Причиной такого расхождения является то обстоятельство, что при вейвлет-разложении в соответствии с формулой (7) с увеличением масштаба (длительности накопления) происходит последовательное уменьшение объема выборки в 2 раза. В способе «скользящих окон», наоборот, с каждым увеличением длительности окна объем накапливаемой выборки увеличивается.

Выводы

Способ некогерентного накопления сигналов с неизвестной протяженностью, основанный на вейвлет-разложении [4], по своим энергетическим показателям (отношению сигнал/шум) эквивалентен способу «скользящего окна» [1 – 3]. Однако, по вычислительным затратам этот способ имеет значительные преимущества, которые особенно сильно проявляются при перекрытии большого диапазона ожидаемых протяженностей сигналов.

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. Ширман Я.Д. Пассивная радиолокация скрытных радиоизлучений / Я.Д. Ширман, В.М. Орленко, С.В.Селезнев // Системи озброєння і військова техніка. – 2005. – № 1 (1). – С. 97-104.

3. Селезнев С.В. Синтез и моделирование алгоритмов обнаружения скрытных радиосигналов с неизвестной структурой: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 / Селезнев Сергей Владимирович. – Х., 2005. – 162 с.

4. Кобзев А.В. Применение вейвлет-разложения для реализации некогерентного накопления при обнаружении сигналов с неизвестной протяженностью / А.В. Кобзев, М.В. Мурзин // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 4 (40). – С. 82-85.

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

Поступила в редколлегию 16.12.2014

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ РАДІОЗАСОБІВ З ЕНЕРГЕТИЧНОЮ СКРИТНІСТЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ДВОХ СПОСОБАХ ОБРОБКИ

А.В. Кобзєв, М.В. Мурзін

Проводиться порівняльний аналіз способу реалізації некогерентного накопичення при виявленні сигналів з невідомими видами і параметрами модуляції заснований на вейвлет-розкладанні і з використанням «ковзного вікна». Показано що обидва способи забезпечують однакове відношення сигнал/шум, але застосування способу заснованого на вейвлет-розкладанні дозволяє значно знизити обчислювальні витрати.

Ключові слова: *виявлення сигналів, некогерентне накопичення, вейвлет-розкладання, обчислювальні витрати.*

COMPARATIVE ANALYSIS INDICATORS OF SIGNAL DETECTION OF RADIO MEANS WITH THE ENERGY STEALTH RADIATION IN TWO WAYS OF PROCESSING

A.V. Kobzev, M.V. Murzin

A comparative analysis of the ways to implement the incoherent accumulation upon detection of signals with unknown parameters and types of modulation based on wavelet decomposition and using a "running window". It is shown that both methods provide the same signal/noise ratio, but the application of the method based on wavelet decomposition significantly reduces computational cost.

Keywords: *detection of signals, incoherent accumulation, wavelet decomposition, computational costs.*