УДК 621.391

А.В. Кобзев, М.В. Мурзин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ УРОВНЯ ЛОЖНЫХ ТРЕВОГ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ШУМА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ

Предлагается новый способ стабилизации вероятности ложной тревоги, основанный на вейвлет-разложении обрабатываемой смеси сигналов и нестационарного шума. В отличие от известных предлагаемый способ может применяться при обнаружении сигналов с неизвестной протяженностью во времени или по частоте. Приводятся результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: *стабилизация вероятности ложной тревоги, обнаружение сигналов, нестационарный шум, вейвлет-разложение.*

Введение

Решение задачи обнаружения сигналов в присутствии нестационарного шума связано с формированием переменного порога сравнения на интервале наблюдения, который обеспечивает постоянство вероятности ложных тревог. Множество известных вариантов решения такой задачи основано на использовании «скользящего окна», в котором осуществляется оценивание параметра шума, связанного с его дисперсией на текущем интервале окна, и формирование на этой основе следящего порога сравнения для принятия решения о наличии сигнала. Описание большого числа алгоритмов цифровой обработки сигналов в условиях нестационарного шума и литературные источники по этому вопросу можно найти в обзорной статье [1] и справочнике [2].

Схему, раскрывающую принцип формирования порога обнаружения на основе использования «скользящего окна», приведено на рис. 1.

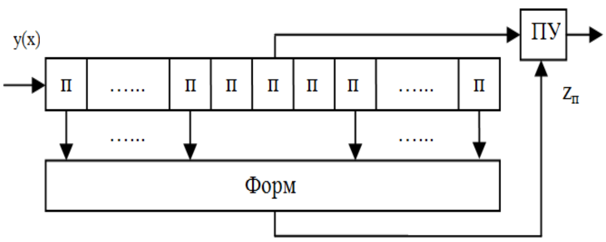

Рис. 1. Принцип формирования порога обнаружения на основе скользящего окна

Здесь обозначены: П – ячейки памяти, Форм – формирователь порога сравнения, ПУ – пороговое устройство сравнения. Полезный сигнал, появляющийся в центральных ячейках памяти, сравнивается в ПУ с порогом $z_п$. Число центральных ячеек должно соответствовать числу выборок, приходящихся на длительность сигнала. Порог сравнения $z_п$ вырабатывается путем совместной обработки выборок из группы ячеек памяти длиной L=20..40 [1]. Алгоритмы формирования порога из содержимого ячеек памяти весьма разнообразны [1,2] и могут включать в себя такие процедуры, как суммирование, логические операции, анализ порядковых статистик и т. д.. Каждый из алгоритмов обеспечивает стабилизацию ложных тревог применительно к вполне определенной модели нестационарного шума. Однако, общим свойством этих алгоритмов является влияние сильных сигналов в «скользящем окне» на формирование порога сравнения, что может приводить к увеличению порога и, как следствие, пропуску слабых сигналов. Некоторые авторы [1-3] предлагают способы ослабления указанного влияния сильных сигналов, среди которых заслуживают внимания способы, основанные на применении порядковых статистик. Следует также отметить, что способ стабилизация ложной тревоги на основе «скользящего окна» предполагает обработку только во временной области при обнаружении импульсных сигналов с известной длительностью. Такое условие, например, выполняется в средствах активной радиолокации.

В данной работе предлагается способ стабилизации уровня ложных тревог при обнаружении сигналов с неизвестной длительностью в присутствии нестационарного шума. Этот способ может быть применен при обработке как во временной, так и в частотной области и основан на применении вейвлет-разложения после детектирования принятой смеси для формирования порога $z_п$.

Основной материал

Пусть на входе ПУ действует реализация однополярного вещественного процесса вида

$$y(x) = \sum_j s_j(x) + n(x), \qquad (1)$$

где $s_j(x)$ –полезные составляющие, ограниченные по длительности на оси x; n(x) – шумовая составляющая. Переменная x может представлять собой текущее время t или частоту f в зависимости от способа обработки сигналов (во временной или частотной области). Если на входе приемника в его полосе пропускания действует нестационарный шум с дисперсией $\sigma^2(x)$, медленно меняющейся на интервале наблюдения, то после фильтрации и детектирования составляющую, обусловленную шумом, можно представить в виде суммы $n(x)=c(x)+\gamma(x)$. Здесь c(x) представляет собой функцию (среднее значение), совпадающую по форме с функцией $\sigma(x)$ при линейном или с функцией $\sigma^2(x)$ при квадратичном детектировании. Слагаемое $\gamma(x)$ относится к быстро флюктуирующему процессу. Примечательным является то обстоятельство, что среднее значение c(x) и дисперсия $\sigma_\gamma^2(x)$ процесса $\gamma(x)$ связаны функциональной зависимостью как между собой, так и с дисперсией $\sigma^2(x)$. Эта связь определяется видом плотности вероятности процесса n(x). Так, в частности, при релеевском процессе n(x) такая связь задается равенством [6]

$$c(x) = \sqrt{\pi / 2}\, \sigma(x)$$

и для заданной вероятности ложной тревоги

$$F=\exp[-z^2_п(x)/2\sigma^2(x)]$$

величина порога должна быть равна

$$z_П(x) = \sigma(x)\sqrt{-2\ \ln(F)} = 2\, c(x)\sqrt{-\ln(F)/\pi}\,. \qquad (2)$$

Отсюда следует, что для стабилизации вероятности F достаточно оценить среднее значение c(x) и сформировать порог в соответствии с формулой (2).

Относительно свойств полезных сигналов и нестационарного шума введем следующие ограничения. Протяженность участков, где шум можно считать стационарным, значительно превышает максимальную длительность сигнала и нестационарность шума проявляется как плавное изменение его дисперсии (без резких скачков). Такие условия чаще всего выполняются при обработке в спектральной области при воздействии непреднамеренных помех в виде шумовых импульсов на входе приемника. Они могут иметь место также и при временной обработке.

Из теории вейвлет-анализа известно, что при кратномасштабном представлении сигналов на основе ортогонального вейвлет-разложения однополярную функцию можно представить в виде суммы аппроксимирующей составляющей и нескольких детализирующих слагаемых [3,4]. Поэтому при разложении процесса y(x) на m уровней справедливо представление вида

$$y(x) = a_m(x) + \sum_i^m d_i(x), \qquad (3)$$

где $a_m(x)$ – аппроксимация, содержащая низкочастотные составляющие, d_i – детализирующие слагаемые, состоящие из высокочастотных. Здесь и далее ради наглядности изложения принципов обработки используем непрерывное представление процессов, хотя практически рассматриваемые алгоритмы могут быть реализованы только в цифровой форме. При правильно выбранном уровне разложения m аппроксимирующее слагаемое может представлять собой достаточно точную оценку процесса среднего $a_m(x) = \hat{c}(x)$.

Отметим особенности рассматриваемого способа оценивания функции c(x).

При выборе типа вейвлет-функций и уровня разложения m будем исходить из следующих условий и свойств вейвлет-разложения. Предполагаем, что нам хотя бы приближенно известны максимальные скорости изменения среднего значения n(x) или верхние граничные значения спектра этой функции $f_в$. Такие данные могут быть получены путем анализа природы и свойств нестационарного шума в заданном диапазоне частот. 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 [4]

$$A_{mk} = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)\phi_{mk}(x)dx;$$
$$a_m(x) = \sum_k A_{mk}\phi_{mk}(x), \qquad (4)$$

где функция $\varphi_{mk}(x)$ имеет вид

$$\phi_{mk}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^m}}\phi\left(\frac{x}{2^m} - k\right). \qquad (5)$$

Эта функция определяется типом вейвлета. Она всегда локализована на оси x и имеет единичное значение при ее интегрировании в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ [3, 4].

Функцию $\varphi_{00}(x) = \varphi(x)$ называют масштабирующей [3, 4]. При выборе функции $\varphi(x)$ и уровня разложения m следует стремиться к тому, чтобы ее масштабная версия $\varphi_{m0}(x)$ как можно больше соответствовала характеру изменения функции среднего c(x). Для условия плавности изменения c(x) целесообразно использовать функции $\varphi(x)$ также с плавным изменением. К таким функциям относятся, например, масштабирующие вейвлеты типа Daubechies («db10»), Coiflets («cojf5»), Symlets («sym8»), Discrete Meyer («dmey»), Biortogonal («bior6.8») и др. В скобках указаны типы вейвлетов, обозначаемых в среде MatLab. Нецелесообразно применять такие вейвлеты, как «haar», у которых функции $\varphi_{m0}(x)$ представляют собой прямоугольные импульсы. Если обработке подлежит выборка объемом $N=2^r$, то максимально возможный уровень разложения равен $m_{max}=r-1$ [4]. Именно такой уровень разложения следует использовать при наблюдении в условиях стационарного шума, когда n(x)=const, $\sigma_\gamma^2(x)$=const. При нестационарном характере шума уровень разложения m устанавливается, исходя из соотношения $m \le \Delta f_c/f_в$, где Δf_c – ширина спектра процесса y(x).

Рассматриваемый способ формирования порога обнаружения имеет ту же особенность, что и способ «скользящего окна». При наличии в принятой смеси сильных полезных сигналов в их окрестности происходит увеличение порога обнаружения $z_п(x)$, что может приводить к пропуску слабых сигналов. Этот недостаток устраняется следующим образом. Перед вейвлет-разложением процесс y(x) подвергается ограничению, в результате чего формируется процесс $y_0(x)$ по правилу $y_0(x) = y(x)$ при $x \le X_0$ и $y_0(x) = 0$ при $x > X_0$. Порог ограничения X_0 необходимо устанавливать таким, чтобы он был не ниже максимального значения шума, т.е. должно быть $X_0 \ge max[n(x)]$. Однако уровень X_0 не должен быть слишком большим, иначе коэффициенты A_{mk} будут реагировать на воздействие сильных ограниченных сигналов.

Поскольку параметр max[n(x)] неизвестен, то целесообразно использовать адаптивный способ формирования порога X_0 на основе порядковых статистик по аналогии с правилами формирования порога обнаружения [1, 2] в способе «скользящего окна». Для этого вначале цифровая выборка $y_{0,i}$ (j=1..N) процесса $y_0(x)$ ранжируется по возрастанию величин, т. е. формируется новая выборка $y_0^{(j)}$. Затем в качестве порога ограничения выбирается величина, пропорциональная К-й порядковой статистике $X_0=\mu y_0^{(K)}$, Порядок статистики К по аналогии с работами [1,2] выбирается равным К=N/2..3N/4. При этом с высокой вероятностью величина $y^{(K)}$ принадлежит шумовому процессу n(x). Моделирование алгоритма показало, что коэффициент μ целесообразно выбирать равным μ=3..4. Установлено также, что уровень ограничения X_0 слабо влияет на точность оценивания процесса c(x), если он не превышает величину (10..20)·max[n(x)].

В среде MatLab проведено имитационное моделирование предлагаемого алгоритма стабилизации уровня ложных тревог при обработке в частотной области (x=f) применительно к особенностям обработки сигналов в средствах радиомониторинга и радиоэлектронной разведки.

Нестационарный шум в модели создавался путем суммирования белого и ограниченного по полосе гауссовых шумов. Полезные сигналы представляли собой узкополосные колебания с различными несущими частотами.

На рис. 2 показан результат обработки процесса y(f) (сплошная линия), содержащим 5 полезных сигналов, и порог $z_п(f)$ (штрихпунктирная линия), сформированный на основе вейвлет-разложения, а также уровень ограничения X_0 (пунктирная линия). Из пяти полезных сигналов только один слабый (четвертый слева). Масштаб по вертикали выбран таким, чтобы подчеркнуть шумовую составляющую и пороговый уровень.

Представленный результат получен при следующих исходных данных: длина выборки N=1024 (r=10), вероятность ложной тревоги $F=10^{-4}$, тип вейвлета «dmey», уровень разложения m=r-3=7, параметры уровня ограничения X_0 - К=3N/4, μ=4.

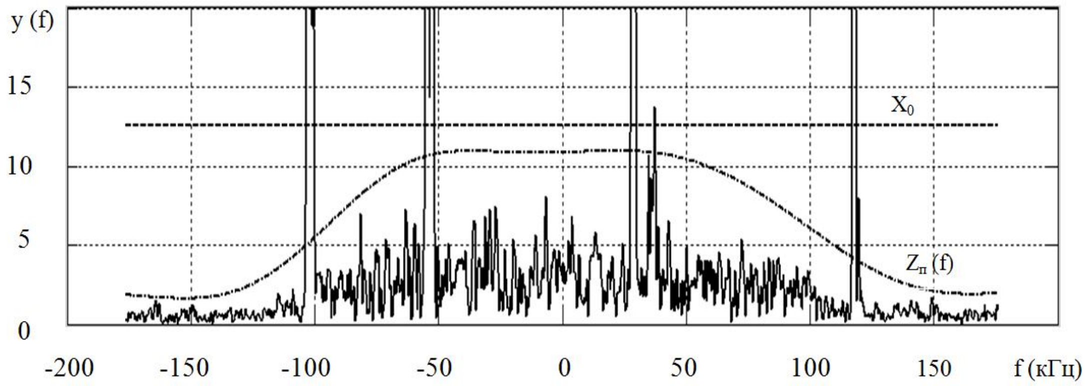

Рис. 2. Результаты имитационного моделирования

Из рис. 2 видно, что порог обнаружения $z_п(f)$ достаточно точно соответствует характеру изменения уровня шума.

Слабый сигнал (четвертый слева) превышает порог (обнаруживается), несмотря на наличие четырех сильных сигналов.

Результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности предложенного способа стабилизации уровня ложных тревог.

Выводы

Предложенный способ стабилизации вероятности ложных тревог в условиях воздействия нестационарного шума обладает адаптивными свойствами.

Рассмотренный способ обеспечивает формирование изменяемого на интервале наблюдения порога обнаружения при неизвестном характере изменения дисперсии шума.

Кроме того, простым способом исключается влияние сильных сигналов на формирование порога обнаружения.

Список литературы

1. *Бакулев П.А. Обработка сигналов с постоянным уровнем ложных тревог (обзор) / П.А. Бакулев, Ю.А. Басистов, В.Г. Тугуши // Радиотехника. – 1989. – № 4. – С. 4-15.*
2. *Skolnik M.I. Radar Handbook / M.I. Skolnik.- New York, 2008. – 1352 p.*
3. *Андреев Ф.М. Адаптивный обнаружитель групповых сигналов / Ф.М. Андреев, Р.Э. Пащенко, Н.В. Таранченко // Извстия Вузов – Радиоэлектроника. – 2004. – № 1. – С. 20-28.*
4. *Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 446 с.*
5. *Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Уч. пособие / А.Н. Яковлев. – Н-ск: НГТУ, 2003. – 104 с.*
6. *Водзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Водзинский. – СПб.: Наука, 2001, с.295*

Поступила в редколлегию 2.06.2014

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

СПОСІБ СТАБІЛІЗАЦІЇ РІВНЯ ХИБНИХ ТРИВОГ ПРИ ВИЯВЛЕННІ СИГНАЛІВ НА ФОНІ НЕСТАЦІОНАРНОГО ШУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ-РОЗКЛАДАННЯ

А.В. Кобзєв, М.В.Мурзін

Пропонується новий спосіб стабілізації ймовірності хибної тривоги, що ґрунтується на вейвлет-розкладанні суміші сигналів та нестаціонарного шуму, що обробляється. На відміну від відомих пропонуємий спосіб може використовуватися при виявленні сигналів з невідомою протяжністю в часі та по частоті. Наведено результати імітаційного моделювання.

Ключові слова: *стабілізація ймовірності хибної тривоги, виявлення сигналів, нестаціонарний шум, вейвлет-розкладання.*

A METHOD FOR STABILIZING THE LEVEL OF FALSE ALARMS UPON DETECTION SIGNALS AGAINST UNSTEADY NOISE THROUGH THE USE OF WAVELET DECOMPOSITION

A.V. Kobzev, M.V.Murzin

Offered new method of stabilization false alarm probability, based on the wavelet decomposition of the treated mixture of signals and unsteady noise. Unlike the known method proposed can be used for detecting the signals with an unknown length of time or frequency. Presents the results of simulation.

Keywords: *stabilization false alarm probability, signal detection, unsteady noise, wavelet decomposition.*