

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Афанасьева М.С., Сальников И.И.

Пензенский государственный технологический университет, Пенза,

e-mail: alexey314@yandex.ru

В статье рассмотрено вейвлет-преобразование как разложение исходного случайного сигнала в ортогональном базисе коротких волнообразных функций. Отмечаются свойства вейвлет-преобразования и особенности его применения в обнаружении нарушителей,двигающихся в охраняемой зоне радиолучевых технических средствах охраны. При этом, при перемещении нарушителя в поперечном направлении охраняемой зоны принимаемый сигнал представляет собой биения с квадратичным изменением фазы. Подобные сигналы являются сложными, при корреляционной обработке которых наблюдается сжатие по времени и увеличение отношения сигнал/шум. Представлены результаты моделирования вейвлет-преобразования в программной среде MathCAD для аддитивной смеси сигнала и шума. После вейвлет-преобразования наблюдается существенное увеличение отношения сигнал/шум, что позволяет уменьшить вероятность ошибок или при сохранении характеристик обнаружения существенно увеличить дальность действия технических средствах охраны.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, отношение сигнал-шум, масштаб вейвлета, вейвлет Френеля

APPLICATION OF WAVELET-TRANSFORMATION IN INFORMATION PROCESS ENGINEERINGS

Aphanaseva M.S., Salnikov I.I.

Penza State Technological University, Penza, e-mail: alexey314@yandex.ru

The wavelet transform is considered as the expansion of the original random signal in the orthogonal basis of short wave-like functions. The properties of the wavelet transform and features of its application in detecting violators moving in the protected zone of radio-beam technical means of protection are noted. In this case, when the intruder is moved in the transverse direction of the protected area, the received signal is a beat with a quadratic phase change. Such signals are complex, with the correlation processing of which there is a compression in time and an increase in the signal-to-noise ratio. The results of the wavelet transform modeling in the MathCAD software environment for an additive mixture of signal and noise are presented. After the wavelet transformation, a significant increase in the signal-to-noise ratio is observed, which makes it possible to reduce the probability of errors or, if the detection characteristics remain, to significantly increase the range of the technical means of protection.

Keywords: wavelet-transformation, signal-to-noise ration, scale wavelet-that, wavelet of the Fresnel

Вейвлет-преобразование (ВП) представляет собой разложение исходного сигнала на сумму взвешенных функций, образующих полный ортогональный базис в некотором конечномерном пространстве [1]. Для традиционного спектрального анализа используется преобразование Фурье – как разложение исходного сигнала по синусоидам разной частоты. Для вейвлет-преобразования вместо синусоид берутся ограниченные по аргументу функции (вейвлеты), а также их сжатые и растянутые копии. Масштаб является параметром ВП.

Дословно «вейвлет» означает «маленькая волна» (от англ. «*wavelet*»). В отечественной литературе были попытки внедрить термин «всплеск», но это не увенчалось успехом. В настоящее время ВП широко применяется в задачах распознавания образов при обработке и синтезе различных сигналов, например, речевых, радиолокационных, а также при обработке двумерных сигналов, для упаковки больших объемов информации, сжатия изображений и во многих других информационных технологиях.

Чтобы некоторая функция могла называться вейвлетом, она должна удовлетворять следующим требованиям: должна быть финитна как во временной, так и в частотной области; сдвиги и растяжения данной функции должны составлять полный ортогональный базис; функция должна быстро убывать при $t \rightarrow \infty$; её среднее значение должно быть равно нулю. ВП описывается интегралом свертки между исходным сигналом $S(t)$ и вейвлетом $y(t)$ для разных значений параметра a , который является масштабом вейвлета:

$$\Psi_{a,\tau}\{S(t)\} = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{\tau-t}{a}\right) S(t) dt, \quad (1)$$

где τ – переменная сдвига.

На практике реальные сигналы, несущие полезную информацию, наблюдаются на фоне различного рода шумов и помех. Существует класс задач, когда имеется априорная информация только о форме принимаемого сигнала. При этом неизвестными являются следующие характеристики: факт

наличия сигнала в анализируемой выборке; масштабный параметр и амплитуда сигнала.

Примером предметной области, где существуют подобные задачи, могут служить технические средства охраны (ТСО), использующие различные физические принципы – радиолокационные, сейсмические, телевизионные и т.п. Традиционно в этих ТСО используется пороговое обнаружение с подстраиваемым порогом. Подобный подход прост в реализации, но характеризуется высоким уровнем ошибок: ложных тревог или пропусков сигнала нарушителя.

Если использовать предварительную обработку в виде ВП исходного сигнала, то это позволит существенно улучшить отношение сигнал/шум. Если затем проанализировать результат ВП, то можно не только обнаружить полезный сигнал с низким уровнем ложных тревог, но и классифицировать его по заданным параметрам (рис. 1).

В статье [2] приведены основные характеристики разработанной модели сигналообразования на выходе радиоприемника РЛТСО, основой которой является косинусоидальная функция с квадратичным фазовым аргументом в виде $\cos(\alpha^2 x^2 \varphi_0)$, зависящим от координаты движения нарушителя x в охраняемой зоне. С учетом колоколообразной огибающей, которая определяется диаграммой направленности антенны радиопередатчика, и пространственно-временного преобразования $x = V_H t$, модель принимаемого сигнала будет описываться функцией:

$$S(t) = S_0 \exp\left(-\frac{V_H^2 t^2}{c^2}\right) \cos(\varphi_0 \alpha^2 V_H^2 t^2), \quad (2)$$

где c [м] – коэффициент масштаба огибающей; V_H [м/с] – скорость перемещения нарушителя; α [1/м] – параметр, имею-

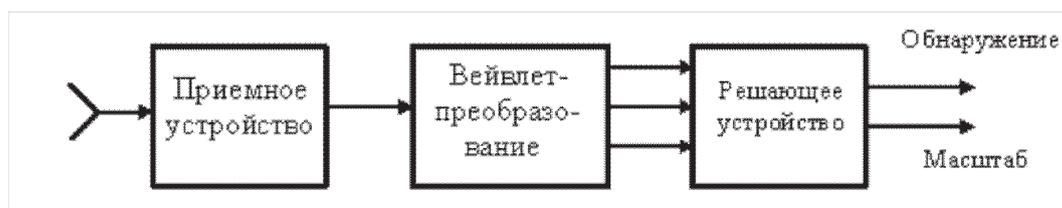


Рис. 1. Структурная схема использования ВП

На рисунке 2 представлены реальные временные диаграммы сигнала с выхода радиоприемника радиолокационного ТСО (РЛТСО) при проходе нарушителя. При движении нарушителя в зоне охраны РЛТСО возникают биения при сложении прямой ЭМ-волны и отраженной от нарушителя, причем в центре зоны охраны частота биений уменьшается.

щий смысл скорости изменения аргумента или пространственной частоты; φ_0 [рад] – начальная фаза гармонической функции.

На рис. 3,а показан вид функции (2) с квадратичным изменением фазового аргумента $\varphi(t) = \varphi_0 \alpha^2 V_H^2 t^2$ и вид огибающей сигнала на выходе приемника в РЛТСО при использовании двухполупериодного детектирования – (б). Имея модель сигнала

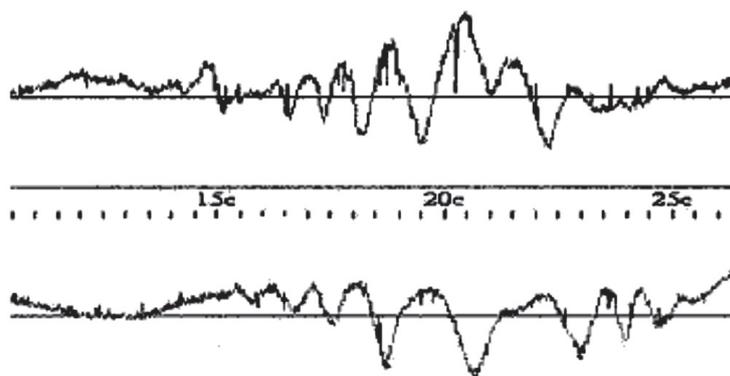


Рис. 2. Изменение амплитуды ЭМ-волны при движении нарушителя

лообразования в РЛТСО можно перейти от порогового обнаружения факта наличия пересечения охраняемой зоны к более тонкому анализу принимаемого сигнала с использованием методов классификации и распознавания образов.

Для реализации ВП в качестве вейвлета необходимо выбрать функцию вида (2). Вейвлет вида (2) называют вейвлетом Френеля. Графически вейвлет Френеля имеет вид, изображенный на рис. 3,а. На стадии анализа общих свойств ВП представляется несущественным учет двухполупериодного детектирования, которое приводит к асимметрии вейвлета Френеля (рис. 3,б), и которое можно учесть в дальнейшем.

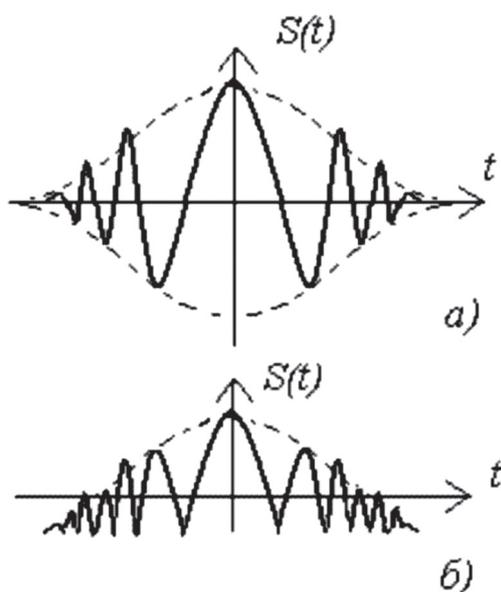


Рис. 3

Рассмотрим как изменяется отношение сигнал/шум после ВП. Будем считать, что сигнал $S(t)$ и шум $S_{\text{ш}}(t)$ – это электрическое напряжение. Если в выражение (1) для ВП подставить значение относительного сдвига $\tau = 0$, значение коэффициента масштаба $a = 1$, что означает совпадение масштаба исходного сигнала и вейвлета, а также учесть совпадение формы вейвлета и исходного сигнала с точностью до постоянного множителя q : $\psi(t) = qS(t)$, то получим выражение для ВП:

$$\Psi_{1,0}\{S(t)\} = \frac{q}{r_E T_C} \int_{\frac{-T_C}{2}}^{\frac{T_C}{2}} S^2(t) dt = \frac{qE_C}{r_E T_C} [\text{В}], \quad (3)$$

где E_C – энергия сигнала длительностью T_C , выделяемая на резисторе 1 Ом, $r_E = 1$, [1/Ом] – коэффициент, учитывающий размерность при определении энергии сигнала, $q = 1$, [1/В] – коэффициент пропорциональности, учитывающий, что отклик ВП имеет размерность – В.

Таким образом, максимум ВП пропорционален энергии сигнала. Форма отклика после ВП изменяется. В книге [4] поясняется, что при вычислении интеграла свертки типа (1) в случае равенства исходного сигнала ядру интеграла свертки для относительного сдвига $\tau = 0$ все спектральные составляющие исходного сигнала складываются в фазе, в результате чего отклик достигает своего максимума, определяемого энергией сигнала. Устройство, которое вычисляет интеграл свертки с ядром, равным исходному сигналу, называется оптимальным по критерию максимума отношения сигнал/шум фильтром или согласованным фильтром. Кроме того, в виду симметрии вейвлета, когда $\psi(t) = \psi(-t)$, ВП для $a = 1$ соответствует автокорреляционной функции.

Принятие решения о наличии на выходе радиоприемного устройства сигнала о проходе нарушителя через охраняемую зону выполняется на фоне шумов и помех (рис. 2). Основным допущением о характере шума является равномерность спектральной плотности мощности шума в пределах полосы пропускания радиоприемника, то есть $F_{\text{ш}}(\omega) = F_{\text{ш},0}$, что соответствует модели «белого шума».

Выразим отношение сигнал/шум до ВП через принятые характеристики сигнала и шума. Для сигнала используем максимальное значение $S_{\text{max}}(t=0)$, а для шума – эффективное (среднеквадратическое) значение напряжения на интервале T_C ,

$$S_{\text{эфф,ш}} = \sqrt{\lim_{T_C \rightarrow \infty} \frac{1}{T_C} \int_{-T_C/2}^{T_C/2} S_{\text{ш}}^2(t) dt}, \quad (4)$$

которое следует выразить через $F_{\text{ш},0}$. Для этого воспользуемся теоремой Парсеваля и заменим усреднение реализаций шума по времени усреднением по частоте преобразований Фурье $\Phi_{\text{ш}}(j\omega)$ от реализаций шума.

$$S_{\text{эфф,ш}} = \sqrt{\lim_{\Delta\omega_c \rightarrow \infty} \frac{\Delta f_c}{2\pi\Delta f_c} \int_{-\Delta\omega_c/2}^{\Delta\omega_c/2} \frac{1}{T_c} |\Phi_{\text{ш}}(j\omega)|^2 d\omega} = \sqrt{\frac{F_{\text{ш,0}}}{T_c}} \text{ [В]}, \quad (5)$$

где $\Delta f_c = 1/T_c$ – ширина полосы спектра сигнала.

После различного рода преобразований получено выражение для отношения сигнал/шум после ВП:

$$N_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Psi_{1,0}\{S(t)\}}{S_{\text{эфф,ВЫХ}}} = \sqrt{\frac{E_c}{F_{\text{ш,0}}}}, \quad (6)$$

то есть отношение сигнал/шум после ВП определяется энергией сигнала. Далее определим изменение отношения сигнал/шум после ВП:

$$n = \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}} = \sqrt{\frac{E_c}{T_c}} \frac{1}{S_{\text{max}}(t=0)}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что изменение отношения сигнал/шум после ВП не зависит

от мощности шума, а зависит от энергии сигнала. С другой стороны, чем меньше амплитуда исходного сигнала по отношению к его энергии, тем эффект от применения ВП больше.

В теории сигналов существует понятие простых и сложных сигналов, которое вполне применимо для ВП. Простыми сигналами называются сигналы, для которых $\Delta f_c T_c \approx 1$, а для сложных $-\Delta f_c T_c \gg 1$. Сложные сигналы имеют внутреннюю модуляцию и после оптимальной по критерию максимума отношения сигнал/шум обработки наблюдается сжатие сигнала в $m = \Delta f_c T_c$ раз и возрастание амплитуды в \sqrt{m} раз [4]. Подобным вейвлетом является вейвлет Френеля (2), так как он имеет внутреннюю квадратичную фазовую модуляцию.

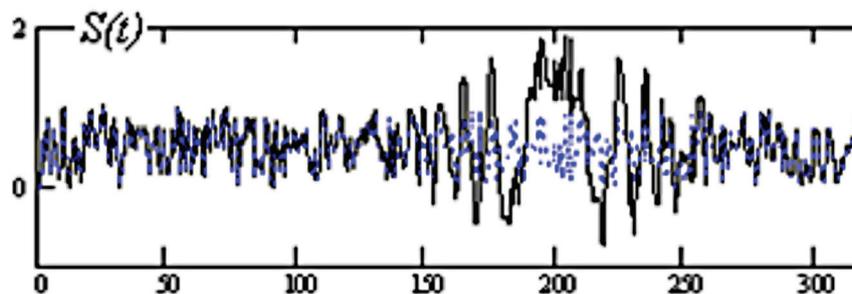


Рис. 4

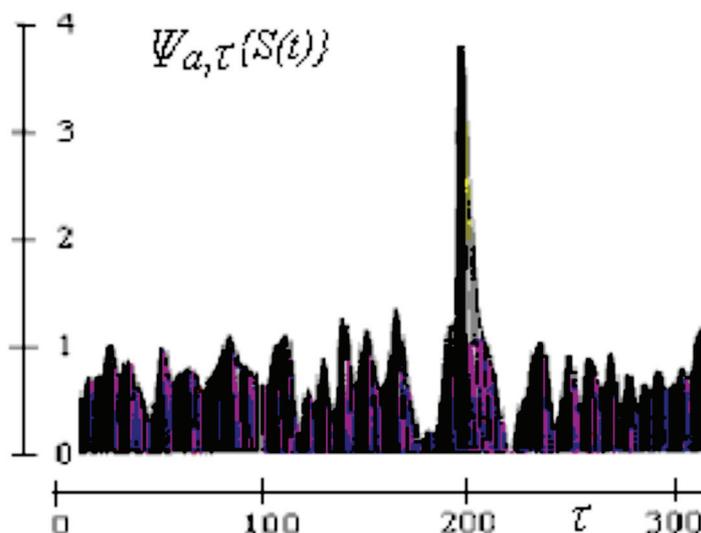


Рис. 5

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования ВП в программной среде *MathCAD* для аддитивной смеси сигнала и шума. При исходном отношении сигнал/шум = 1 после ВП наблюдается существенное улучшение этого параметра [3]. Таким образом, предварительное вейвлет-преобразование в двухпозиционных РЛТСО приводит к увеличению отношения сигнал/шум, что позволяет уменьшить вероятность ошибок или при сохранении характери-

стик обнаружения существенно увеличить дальность действия РЛТСО.

Список литературы

1. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999. – 204 с.
2. Сальников И.И. Лучевая модель сигналообразования в двухпозиционных РЛТСО // Современные технологии безопасности. – №3. – 2003. – С. 18–20.
3. Сальников И.И., Логунова С.Н. Вейвлет-преобразование в радиолучевых технических средствах охраны // Проблемы объектовой охраны: Сборник научных трудов. Вып. 3. – Пенза, ПГУ, 2002. – С.20–22
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1988. – 665 с.