

УДК 519.712.1

DOI: 10.30987/article_5bb5e6e52fcc09.90216038

Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков

ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается метод понижения погрешности представления информации в телекоммуникационных системах мониторинга путем фильтрации шумов и флуктуаций уровней отсчетов временных рядов. Для решения данной задачи используется метод вейвлет-обработки. В частности, уменьшение влияния флуктуаций временного ряда осуществляется путем вычисления аппроксимирующих коэффициентов n -го порядка, что соответствует выполнению многоуровневой статистической обработки значений отсчетов временных рядов и эквивалентно прохождению сигнала через

фильтр нижних частот. Кроме того, точность представления информации повышается за счет подавления компонент шумового процесса методом выполнения операции трешолдинга над детализируемыми коэффициентами до n -го уровня разложения. В этом случае предлагается реализовать алгоритм трешолдинга по критерию адаптивного штрафного порога.

Ключевые слова: временные ряды, вейвлет-преобразование, точность представления информации, пороговая обработка, подавление шума.

Yu.A. Kropotov, A.A. Belov, A.Yu. Proskuryakov

TIME SERIES PROCESSING USING WAVELET-TRANSFORMATIONS FOR ACCURACY INCREASE IN INFORMATION PRESENTATION

The purpose of this work is development of the method for error decrease in information presentation in telecommunication systems of monitoring by means of filtering noise and fluctuations of levels in time series counts. To solve this problem there is used a method of wavelet processing. In particular, the decrease of time series fluctuation impact is carried out by means of the computation of approximating coefficients of the n -th level which corresponds to the fulfillment of multi-level statistical processing the values of time series counts and equivalent to a signal passage through a filter of low frequencies.

There was developed and investigated a simulator and its statistical parameters of processing with a wavelet transformation of time series counts. It is shown that time series wavelet processing and the application of approximation coefficients of wavelet-decomposition increase the accuracy of data presentation. It is also ensured at the expense of noise component suppression through a method of thresholding upon detailing coefficients of decomposition.

Введение

Модель обработки сигналов в виде временных рядов, основанная на вейвлет-разложении, является эффективным мето-

In the paper there are shown investigations of the dependence of approximation coefficient correlation time upon a wavelet decomposition level. There was also investigated a depression dependence of noise components of time series count fluctuations of emission at the processing with the wavelet decomposition with obtaining approximation coefficients of different levels.

The fulfilled analysis of the results of different criteria application and approaches to smoothing on the basis of threshold processing the detail coefficients of wavelet decomposition has shown that at smoothing time series there will be an optimum choice of an adaptive penalty threshold level. The presented results of smoothing with an adaptive penalty threshold have shown that the signal-noise ratio increased for more than 2.53dB in comparison with the initial one.

Key words: time series, wavelet transformation, accuracy of information presentation, threshold processing, noise depression.

дом для создания алгоритмов многоуровневой статистической обработки в системах мониторинга.

Модель обработки временных рядов данных систем мониторинга

В случае вейвлет-разложения сигналов, представленных в виде временных рядов, аппроксимирующие и детализи-

рующие коэффициенты вычисляются по формулам [1]

$$C_{i,k} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n C_{i-1} \varphi_{i,k} (2^i t - k), \quad d_{i,k} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n C_{i-1} \psi_{i,k} (2^i t - k), \quad (1)$$

где i - уровень разложения; n - максимальный уровень разложения; $p = 2^{i/2}$ - коэффициент ортонормирования, обеспечивающий единичную норму скейлинг-функции; $\varphi_{i,k}(2^i t - k)$ - скейлинг-функция i -

го уровня вейвлет-разложения; $\psi_{i,k}(2^i t - k)$ - вейвлет-функция.

При $i=1$ C_0 и d_1 принимают следующий вид:

$$C_{0,k} = x(k) \frac{1}{p} \varphi_{1,k}(t - k) \approx x(k), \quad d_{1,k}(t) = \frac{1}{p} C_{0,k} \psi_{1,k}(2t - k) \approx \frac{1}{p} x(k) \psi_{1,k}(2t - k), \quad (2)$$

где $C_{0,k}$ - локальное среднее значение сигнала $x(k)$, взвешенное со скейлинг-функцией $\varphi_{1,k}$.

где $s(k)$ - отсчеты информационной функции; $y(k)$ - составляющая флуктуаций отсчетов.

Соответственно при декомпозиции сигнала $x(k)$ до n -го уровня и последующем восстановлении его в виде [1; 2]

Временной ряд $x(k)$ имеет вид

$$x(k) = s(k) + y(k),$$

$$s(k) = \sum_k C_{n,k} \varphi_{n,k} + \sum_k \sum_{i=1}^n d_{i,k} \psi_{i,k} = C_n + x(k) \psi_1(2t - k) + \sum_{i=2}^n C_{i-1} \varphi_i(2^i t - k), \quad s(k) = C_{n,k} + \sum_{i=1}^n d_i,$$

получают аппроксимирующие коэффициенты i -го уровня путем локальных усреднений аппроксимирующих коэффициентов уровня $i-1$ с i -й скейлинг-функцией на каждом уровне разложения в виде (1).

Таким образом, при помощи вычисления $C_{n,k}$ осуществляется многоуровневая статистическая обработка входных сигналов, чем существенно подавляется составляющая $y(k)$ флуктуаций отсчетов информационной входной функции $x(k)$.

Исследование статистической обработки временных рядов методом вейвлет-преобразования

В ходе исследования был проведен экспериментальный сбор данных о концентрациях испарений ксилола в цехах лакокрасочной обработки деталей с датчиковой аппаратуры с частотой измерений, равной одному отсчету в 30 мин. Таким образом, в течение месяца было осуществлено 1488 измерений концентраций по каждому из анализируемых веществ. Данные

временных рядов методом вейвлет-

с датчиков вместе с временем отбора записывались в файл и базу данных. После этого он преобразовывался в формат .mat, доступный для вейвлет-анализа в системе *Matlab*.

На рис. 1 приведен измеренный сигнал в виде экспериментального временно-го ряда данных о концентрациях ксилола (ПДК 50 мг/м³).

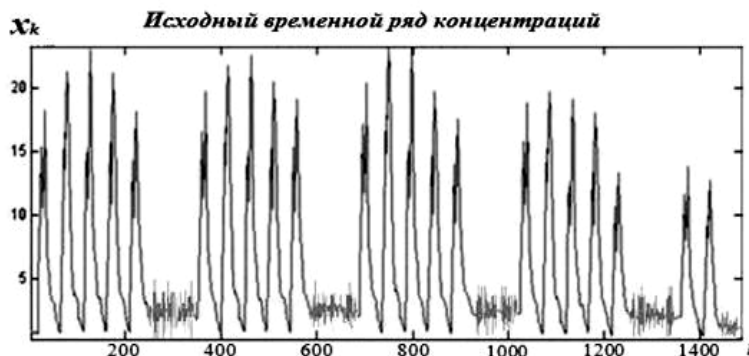


Рис. 1. Представление временного ряда загрязняющих выбросов $x(k)$ с периодом $T=30$ мин

На графике (рис. 1) отчетливо виден достаточно заметный уровень шумовых компонент, а также можно отметить периодические ежесуточную и еженедельную структуры.

После вейвлет-обработки представленного на рис. 1 временного ряда по формулам (1) и (2) были исследованы АКФ для аппроксимирующих коэффициентов $C_i(k)$ (для $i=1$ и $i=6$) по выражению

$$R_{a.k.}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{N-1-L} C_i(k)C_i(k+l),$$

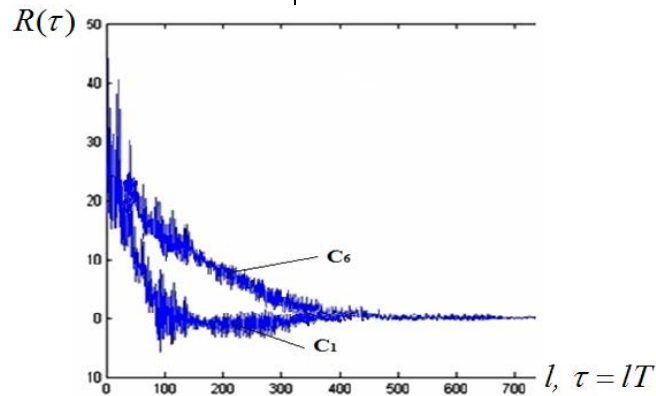


Рис. 2. Графики АКФ аппроксимирующих функций

Как видно из рис. 2, графики АКФ аппроксимирующих коэффициентов $C_i(k)$ показывают увеличение времени корреляции при увеличении уровня вейвлет-разложения [4].

В работе были проведены исследования зависимости времени корреляции аппроксимирующих коэффициентов от уровня вейвлет-разложения. Также была исследована зависимость ослабления шумовых составляющих флуктуаций отсчетов временного ряда выбросов при обра-

где $R(\tau)$ - АКФ последовательности $C_i(k)$; $0 \leq k \leq N-1$; lT - дискретное время сдвига,

$L \leq \frac{N}{2}$ - максимальный сдвиг исследования; N - конечная длина исследуемой последовательности [3].

Графики АКФ аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения C_1 и C_6 приведены на рис. 2.

ботке вейвлет-разложением с получением аппроксимирующих коэффициентов i -го уровня.

На рис. 3 показана зависимость ослабления $\beta(\tau)$ дисперсии компонент шума временного ряда от уровня вейвлет-обработки. $\beta(\tau) = \frac{\sigma_{ш,W}^2}{\sigma_{ш,ex}^2}$, где $\sigma_{ш,W}^2$ - дисперсия шумовых составляющих на выходе системы вейвлет-обработки (W -фильтра).

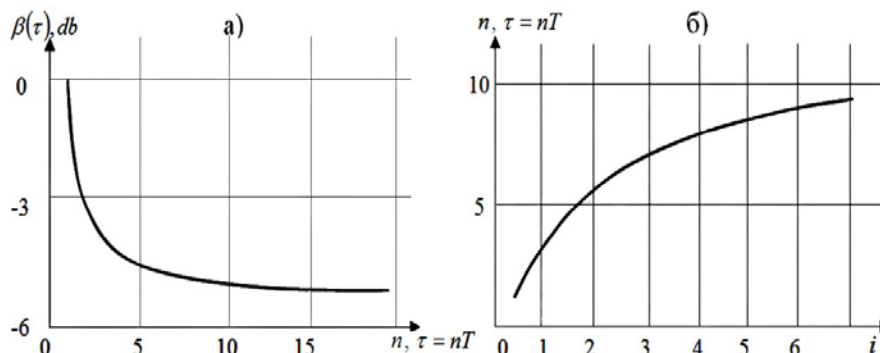


Рис. 3. Зависимость ослабления шума от выбора уровня вейвлет-разложения i в W -фильтре: а - зависимость ослабления дисперсии компонент шума от времени корреляции шумовых компонент; б - зависимость изменения времени корреляции от уровня разложения i аппроксимирующих коэффициентов

По графику зависимости ослабления дисперсии компонент шума (рис. 3а) видно, что наибольшее ослабление компонент шума $\beta = -(4 \div 5)dB$ может быть получено при увеличении времени корреляции C_i до значения $\tau = (5 \div 10)T$.

Согласно графику на рис. 3б, наибольшее увеличение времени корреляции шумовых компонент до $\tau = (6 \div 8)T$ можно получить при вейвлет-разложении аппрок-

симирующих коэффициентов от 3 до 6 уровня. При вычислении C_3 получено время корреляции $\tau = 6T$, при C_6 время корреляции $\tau = 8T$.

В этом случае после вейвлет-обработки до уровня n получен временной ряд представления данных с более высокой точностью в виде

$$s(k) = \frac{1}{p} \left[\sum_k u_{0,k} \psi_{1,k}(2t - kT) + \sum_k \sum_{i=2}^n C_{(i-1),k} \psi_{i,k}(2^i t - k) + \sum_k C_{n,k} \right].$$

Таким образом, была разработана и исследована математическая модель и её статистические параметры обработки вейвлет-преобразованием отсчетов временных рядов. Показано, что вейвлет-

обработка временного ряда и применение аппроксимирующих коэффициентов до n -го уровня вейвлет-разложения повышают точность представления данных.

Алгоритм подавления шумовых составляющих методом вычисления детализирующих коэффициентов с последующей операцией трешолдинга

Детализирующие коэффициенты при вейвлет-разложении временных рядов в системах мониторинга содержат шумовые и флуктуационные составляющие, единичные выбросы и другие компоненты помех. Кратковременные единичные выбросы и флуктуации ряда данных могут быть вызваны, например, наводкой на сигнал, передаваемый с датчиков, программно-аппаратными флуктуациями параметров системы мониторинга. Возникновение шумовых, помеховых составляющих во временных рядах данных может стать следствием характерных для датчикового оборудования погрешностей сбора, искажения полезного сигнала, которое имеет место при передаче по каналам и интерфейсам системы мониторинга.

Шумы, флуктуации временного ряда вносят погрешность в оценку его компонент, тем самым формируют ряд данных и, соответственно, восстановление с повышенными погрешностями.

Можно отметить, что использование в формуле восстановления аппроксимирующих коэффициентов n -го уровня, полученных путем локальных усреднений с i -й скейлинг-функцией на каждом уровне вейвлет-разложения $0 < i \leq n$, позволяет осуществить многоуровневую статистиче-

скую обработку входного временного ряда. Это существенно ослабляет компоненты шумовых флуктуаций. В то же время, как показывают исследования, дополнительное ослабление шумовых компонент можно получить пороговой обработкой детализирующих коэффициентов с помощью алгоритма сглаживания. Так как полученные при вейвлет-разложении временного ряда детализирующие коэффициенты содержат высокочастотные (уточняющие) данные разных уровней вейвлет-разложения, в них также сосредоточены шумовые и помеховые составляющие достаточно высокого уровня. В связи с этим пороговая обработка детализирующих коэффициентов является эффективным методом для дополнительного подавления шумовых и помеховых компонент. Алгоритм сглаживания детализирующих коэффициентов временного ряда данных, или алгоритм их пороговой обработки путем обнуления значений детализирующих коэффициентов, которые не превышают заданный пороговый уровень, позволяет получить увеличенное отношение сигнал/шум (ОСШ). Это означает, что повышается точность представления данных в восстановленном временном ряде системы мониторинга.

Алгоритм пороговой обработки детализирующих коэффициентов вейвлет-

разложения (алгоритм их сглаживания) представлен на рис. 4 [5; 6].

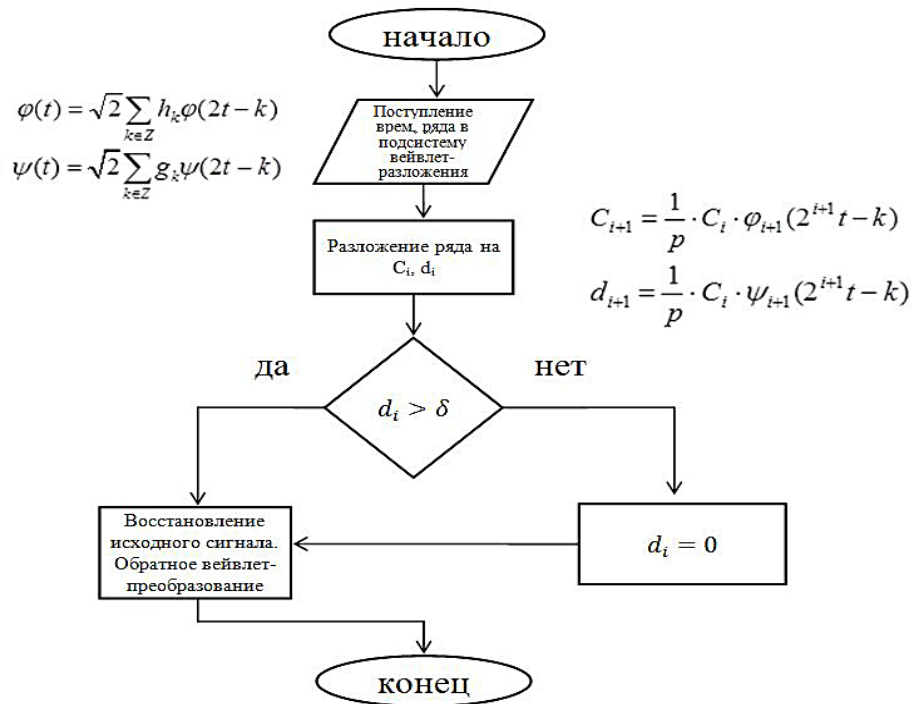


Рис. 4. Алгоритм сглаживания (пороговой обработки) детализирующих коэффициентов

Отношение сигнал/шум после вейвлет-обработки является критерием эффективности разработанного алгоритма сгла-

живания временных рядов. Отношение сигнал/шум на входе алгоритма сглаживания определяется выражением [9; 10]

$$ОСШ_{вх} (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_{с_вх}}{P_{ш_вх}}$$

где $P_{с_вх} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k^2$, $P_{ш_вх} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \sqrt{P_{с_вх}}$.

Выходное ОСШ обработанного и восстановленного временного ряда вычисляется по формулам

$$ОСШ_{вых} (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k^2}{P_{ш_вых}} = 10 \lg \frac{P_{с_вых}}{P_{ш_вых}}$$

где $P_{ш_вых} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (s_k - \bar{s}_k)^2$, $\bar{s}_k = \sqrt{P_{с_вых}}$.

В программном пакете Wavelet Toolbox для обработки сглаживанием детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения временных рядов может быть применен один из нескольких критериев по выбору оптимального порога ограничения детализирующих коэффициентов, несущих в себе шумовые составляющие [5; 7].

С использованием различных критериев по выбору пороговых уровней обра-

ботки детализирующих коэффициентов было проведено сглаживание тестового сигнала. В качестве него был применен экспериментальный временной ряд данных о концентрациях ксилола (1488 отсчетов), полученных с датчиков системы мониторинга выбросов на участке лакокрасочных покрытий предприятия радиотехнического профиля (сбор данных осуществлялся с периодичностью в 30 мин). В таблице представлены полученные расчетные дан-

ные результатов пороговой обработки при сглаживании временных рядов.

На рис. 5 проиллюстрированы результаты пороговой обработки по критерию адаптивного штрафного порога.

Таблица

Результаты сглаживания с применением различных критериев

Параметр	Исходный сигнал до фильтрации	Критерий Штейна	Эвристический критерий Штейна	Минимаксный критерий	Критерий адаптивного штрафного порога
Мощность $P_{вх.сигн.}$	5,608	5,608	5,608	5,608	5,608
Мощность $P_{вх.шума}$	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
$ОСШ_{вх.}$	26,084	-	-	-	-
Мощность $P_{вых.сигн.}$	-	5,546	5,580	5,521	5,605
Мощность $P_{вых.шума}$	-	0,153	0,187	0,128	0,119
$ОСШ_{вых.}$	26,084	36,248	29,839	43,133	46,747
$ОСШ_{вых.}, дБ$	14,16	15,59	14,48	16,48	16,69

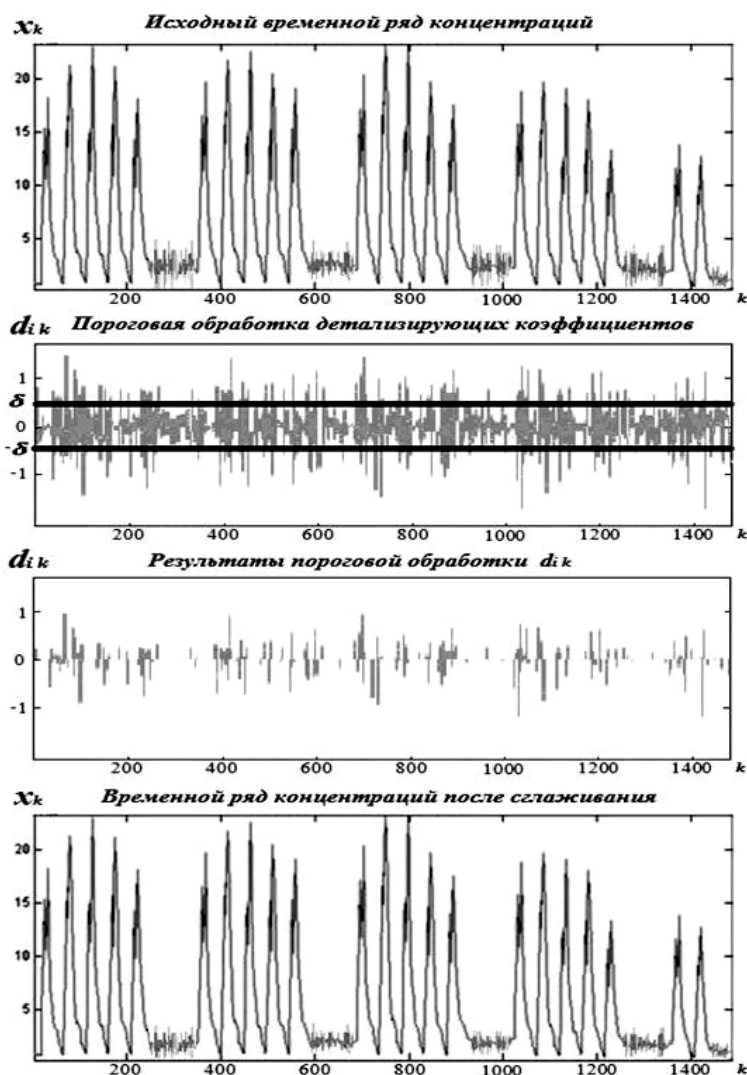


Рис. 5. Результаты сглаживания с адаптивным штрафным порогом

Проведенный анализ результатов применения различных критериев и подходов к сглаживанию на основе пороговой обработки детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения показал, что оптимальным при сглаживании временных рядов будет выбор адаптивного штрафного порогового уровня. При пороговой обработке по данному критерию максимально эффективно подавляются случайные шумовые и флуктуационные составляющие,

кратковременные выбросы и всплески сигнала [8]. Отношение сигнал/шум при использовании данного критерия пороговой обработки составило 16,7 дБ, что на 2,53 дБ выше по сравнению с его первоначальным значением [5].

Алгоритм вейвлет-обработки временного ряда $x(k)$ для получения $s(k)$ с пониженной погрешностью представления данных представлен на рис. 6.

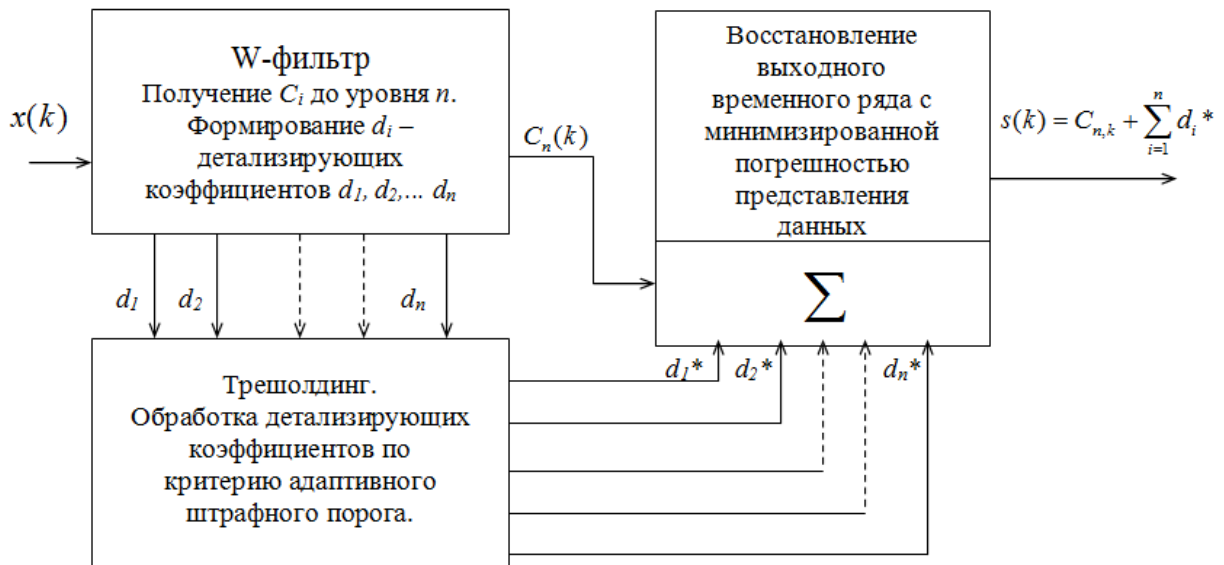


Рис. 6. Вейвлет-обработка временного ряда

Входные сигналы в виде временного ряда $x(k)$ подаются на W-фильтр обработки вейвлет-преобразованием. В W-фильтре формируются аппроксимирующие коэффициенты C_i и детализирующие коэффициенты d_i n -го уровня вейвлет-разложения. Детализирующие коэффициенты подаются на блок трешолдинга для их обработки по критерию адаптивного штрафного порога. После пороговой обработки алгоритмом

сглаживания полученные обработанные детализирующие коэффициенты $d_1^*, d_2^*, \dots, d_n^*$ поступают на сумматор - блок восстановления временного ряда. Также на сумматор подаются аппроксимирующие коэффициенты n -го уровня разложения ($C_n(k)$). На выходе сумматора получаем восстановленный временной ряд с пониженной погрешностью представления данных.

Заключение

В работе разработан и исследован метод понижения влияния компонент шумового процесса и флуктуаций отсчетов временного ряда на точность представления информации. Предложенный алгоритм обработки временного ряда реализован с применением вейвлет-преобразования путем вычисления аппроксимирующих ко-

эффициентов n -го уровня и детализирующих коэффициентов до n -го уровня с последующей обработкой трешолдингом по критерию адаптивного штрафного порога. Отношение сигнал/шум при использовании данной обработки увеличилось на более чем 2,53 дБ по сравнению с исходным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дремин, И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. - 2001. - Т. 17. - № 5. - С. 465-501.
 2. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразование: учеб. пособие / А.Н. Яковлев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 102 с.
 3. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. - М.: Мир, 1978. - 848 с.
 4. Кропотов, Ю.А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов / Ю.А. Кропотов // Вопросы радиоэлектроники. - 2010. - Т. 1. - № 1. - С. 57-60.
 5. Белов, А.А. Сглаживание временных рядов на основе вейвлет-преобразования в системах автоматизированного экологического мониторинга / А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2010. - № 1 (12). - С. 21-24.
 6. Белов, А.А. Вопросы обработки экспериментальных временных рядов в электронной системе автоматизированного контроля / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков // Вопросы радиоэлектроники. - 2010. - Т. 1. - № 1. - С. 95-101.
 7. Белов, А.А. Автоматизированный анализ и обработка временных рядов данных о загрязняющих выбросах в системе экологического контроля / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков // Информационные системы и технологии. - 2010. - № 6 (62). - С. 28-35.
 8. Белов, А.А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2008. - № 12. - С. 9-14.
 9. Быков, А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базе экспоненциальных функций системы / А.А. Быков, Ю.А. Кропотов // Проектирование и технология электронных средств. - 2007. - № 2. - С. 30-34.
 10. Кропотов, Ю.А. Алгоритм определения параметров экспоненциальной аппроксимации закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала / Ю.А. Кропотов // Радиотехника. - 2007. - № 6. - С. 44-47.
1. Dremin, I.M. Wavelets and their application / I.M. Dremin, O.V. Ivanov, V.A. Nechitailo // *Success of Physical Sciences*. - 2001. - Vol.17. - No.5. - pp. 465-501.
 2. Yakovlev, A.N. *Introduction into Wavelet Transformation: manual* / A.N. Yakovlev. - Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2003. - pp. 102.
 3. Rabiner, L. *Theory and Application of Signal Digital Processing* / L. Rabiner, B. Gold. - M.: Mir, 1978. - pp. 848.
 4. Kropotov, Yu.A. Algorithm for signal computation of rejection channel control of multi-channel system for acoustic signal transmission / Yu.A. Kropotov // *Problems of Radio Electronics*. - 2010. - Vol.1. - pp. 57-60.
 5. Belov, A.A. Time series smoothing based on wavelet transformation in systems of automated ecological monitoring / A.A. Belov, A.Yu. Proskuryakov // *Methods and Devices of Information Transfer and Processing*. - 2010. - No.1(12). - pp. 21-24.
 6. Belov, A.A. Problems of experimental time series in electronic system of automated control / A.A. Belov, Yu.A. Kropotov, A.Yu. Proskuryakov // *Problems of Radio Electronics*. - 2010. - Vol.1. - No.1. - pp. 95-101.
 7. Belov, A.A. Automated analysis and processing of data time series on pollution in ecological control system / A.A. Belov, Yu.A. Kropotov, A.Yu. Proskuryakov // *Information Systems and Technologies*. - 2010. - No.6(62). - pp. 28-35.
 8. Belov, A.A. Investigations of compression problems and search of mapping information through method of wavelet transformations in ecological geo-information system / A.A. Belov, Yu.A. Kropotov // *Bulletin of Computer and Information Technologies*. - 2008. - No.12. - pp. 9-14.
 9. Bykov, A.A. Law model of signal amplitude probability distribution in basis of system exponential functions / A.A. Bykov, Yu.A. Kropotov // *Design and Technology of Electronic Means*. - 2007. - No.2. - pp. 30-34.
 10. Kropotov, Yu.A. Algorithm for parameter definition of exponential approximation of law for voice signal amplitude probability distribution / Yu.A. Kropotov // *Radio Engineering*. - 2007. - No.6. - pp. 44-47.

Статья поступила в редакцию 9.06.18.

Рецензент: д.т.н., доцент, сотрудник Академии ФСО России

Лисичкин В.Г.

Статья принята к публикации 14.08.18.

Сведения об авторах:

Кропотов Юрий Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, тел. (49234) 77-2-72, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Белов Алексей Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского

государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Проскуряков Александр Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Kropotov Yury Anatolievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. “Electronics and Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stoletov State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Belov Alexey Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Electronics and Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stoletov

State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Proskuryakov Alexander Yurievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Electronics and Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stoletov State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.