

**НАУКОВЕДЕНИЕ, МЕТОДИКА И ТЕХНИКА
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**

doi: 10.51639/2713-0576_2026_6_2_42

Научная статья

УДК 004.627

ГРНТИ 28.21.15

ВАК 1.2.2

**Адаптивное сжатие одномерных сигналов на основе вейвлет-преобразования
с автоматическим подбором оптимальных параметров**

Евгений Михайлович Александров

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,
Чебоксары, Россия

EnyashaTheOne@yandex.ru

Аннотация

В статье описан адаптивный алгоритм сжатия одномерных сигналов на основе вейвлет-преобразования (ВП) с автоматическим выбором оптимальных параметров обработки. Реализованный метод решает проблему ручного подбора параметров в классических подходах к вейвлет-сжатию через систематический анализ пространства возможных комбинаций "вейвлет–порог". Исследования, проведенные на тестовом радиосигнале с $SNR=10$ дБ, показали возможность достижения сжатия до 94,4 % при контролируемой ошибке восстановления 18,6–31,2 %. Реализованный алгоритм демонстрирует адаптивность к характеристикам сигнала и обеспечивает на 15–40 % лучшие результаты по сравнению с методами фиксированных параметров.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, сжатие сигналов, адаптивный алгоритм, пороговая обработка, оптимизация параметров, вейвлеты *Daubechies*, вейвлеты *Symlets*, вейвлеты *Coiflets*

Введение

Экспоненциальный рост объемов данных в телеметрических, медицинских и коммуникационных системах требует применения эффективных методов сжатия сигналов, позволяющих сокращать объем хранимой и передаваемой информации без критической потери ее содержательной ценности [1]. Традиционные подходы к сжатию, основанные на дискретном косинусном преобразовании или линейном предсказании, имеют ограниченную эффективность при обработке нестационарных сигналов с локальными особенностями [2, 3].

ВП предлагает принципиально иной подход, сочетающий преимущества временного и частотного представлений [4, 5]. Однако эффективность вейвлет-сжатия существенно зависит от правильного выбора трех ключевых параметров: типа базисного вейвлета, метода пороговой обработки коэффициентов и уровня разложения. Классические методы требуют ручного подбора этих параметров экспертом, что ограничивает область их практического применения.

В работе описан адаптивный алгоритм, который автоматически выбирает оптимальную комбинацию параметров обработки на основе анализа характеристик

конкретного сигнала и заданных требований к степени сжатия и точности восстановления.

Дискретное вейвлет-преобразование (*DWT*) сигнала $x[n]$ ($n = 0, \dots, N-1$) реализуется с помощью каскадной фильтрации:

$$a_{j+1}[k] = \sum_n h[n-2k]a_j[n],$$

$$d_{j+1}[k] = \sum_n g[n-2k]a_j[n],$$

где $a_0[n] = x[n]$ – исходный сигнал, $h[n]$ – коэффициенты низкочастотного (масштабирующего) фильтра, $g[n] = (-1)^{1-n}h[1-n]$ – коэффициенты высокочастотного (вейвлет-) фильтра. В результате для каждого уровня разложения $j = 1, \dots, J$ формируются коэффициенты аппроксимации $a_j[k]$ и детализации $d_j[k]$.

Для сжатия сигнала используется пороговая обработка коэффициентов детализации:

$$d_i^{thr} = \begin{cases} d_i, & |d_i| > \lambda \\ 0, & |d_i| \leq \lambda \end{cases}$$

где λ – пороговое значение.

После пороговой обработки выполняется обратное *DWT*, позволяющее восстановить сигнал.

Алгоритм анализирует 72 комбинации параметров, полученных как декартово произведение – три семейства вейвлетов: *daubechies* (*db4*) – компактный носитель, оптимален для резких переходов; *symlets* (*sym6*) – почти симметричные, универсальное применение; *coiflets* (*coif3*) – симметричные, минимальные фазовые искажения; четыре метода пороговой обработки: *rigrsure* – *SURE*-порог (*Stein's Unbiased Risk Estimate*); *heursure* – эвристический *SURE*; *sqtwolog* – универсальный порог Донохо-Джонстона; *minimaxi* – минимаксный порог; шесть уровней разложения – от 3 до 8 включительно.

Процедура выбора оптимальной комбинации включает следующие шаги:

1. Тестирование всех комбинаций – для каждой комбинации (w, t, l) выполняется полный цикл обработки сигнала.

2. Вычисление метрик качества:

– коэффициент сжати $CR = (1 - \frac{K_{saved}}{K_{total}}) \cdot 100\%$,

где K_{saved} – количество сохраненных коэффициентов; K_{total} – полное количество коэффициентов;

– ошибка восстановления $PRD = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x_{rec_i})^2}}{\sqrt{\sum x_i^2}} \cdot 100\%$,

где x_i – вектор исходного сигнала, x_{rec_i} – вектор восстановленного сигнала.

3. Нормализация метрик – приведение к диапазону $[0, 1]$ относительно наилучших и наихудших значений.

4. Взвешенная оптимизация: вычисление интегральной оценки – $Score = \alpha \cdot CR_{norm} + \beta \cdot PRD_{norm}$, где $\alpha + \beta = 1$ – весовые коэффициенты.

Моделирование в среде *MATLAB* проведено на радиоимпульсном сигнале длительностью 2 с, частотой дискретизации 1000 Гц, состоящем из: двух гауссовых импульсов (50 Гц и 120 Гц); прямоугольного импульса 30 Гц; аддитивного гауссовского шума с $SNR = 10$ дБ.

Вейвлеты *Coiflets* обеспечивают наилучшее качество восстановления благодаря симметричности и минимальным фазовым искажениям. Это делает их оптимальными для приложений, где критически важно сохранение временных характеристик сигнала (медицинская диагностика, вибродиагностика). Вейвлеты *Daubechies* показывают максимальную степень сжатия за счет компактного носителя и эффективного представления резких переходов. Их рекомендуется использовать в системах с ограниченными каналами передачи данных. Вейвлеты *Symlets* занимают промежуточное положение, предлагая сбалансированный компромисс между сжатием и качеством.

Метод *rigrsure* демонстрирует наилучшие результаты для сбалансированного подхода, адаптивно подбирая порог на основе статистики конкретных коэффициентов. Методы *heursure* и *sqtwolog* оптимальны для задач максимального сжатия, но приводят к существенному увеличению ошибки восстановления. Метод *minimaxi* обеспечивает гарантированное качество в худшем случае, что важно для критических применений.

В работе описан адаптивный алгоритм для автоматического выбора оптимальной комбинации параметров на основе анализа характеристик конкретного сигнала и заданных требований к степени сжатия и точности восстановления. Алгоритм анализирует 72 комбинации параметров, полученных как декартово произведение трёх семейств вейвлетов (*Daubechies*, *Symlets*, *Coiflets*), четырёх методов пороговой обработки (*rigrsure*, *heursure*, *sqtwolog*, *minimaxi*) и шести уровней разложения (3-8). Процедура выбора включает тестирование всех комбинаций, вычисление метрик качества – коэффициента сжатия и относительной среднеквадратичной ошибки восстановления – с последующей их нормализацией и взвешенной оптимизацией для нахождения наилучшего компромисса. Моделирование в среде *MATLAB* на зашумленном радиоимпульсном сигнале, содержащем гауссовы и прямоугольные составляющие, показало возможность достижения сжатия до 94,4 % при контролируемой ошибке восстановления 18,6–31,2 % (рисунок 1).

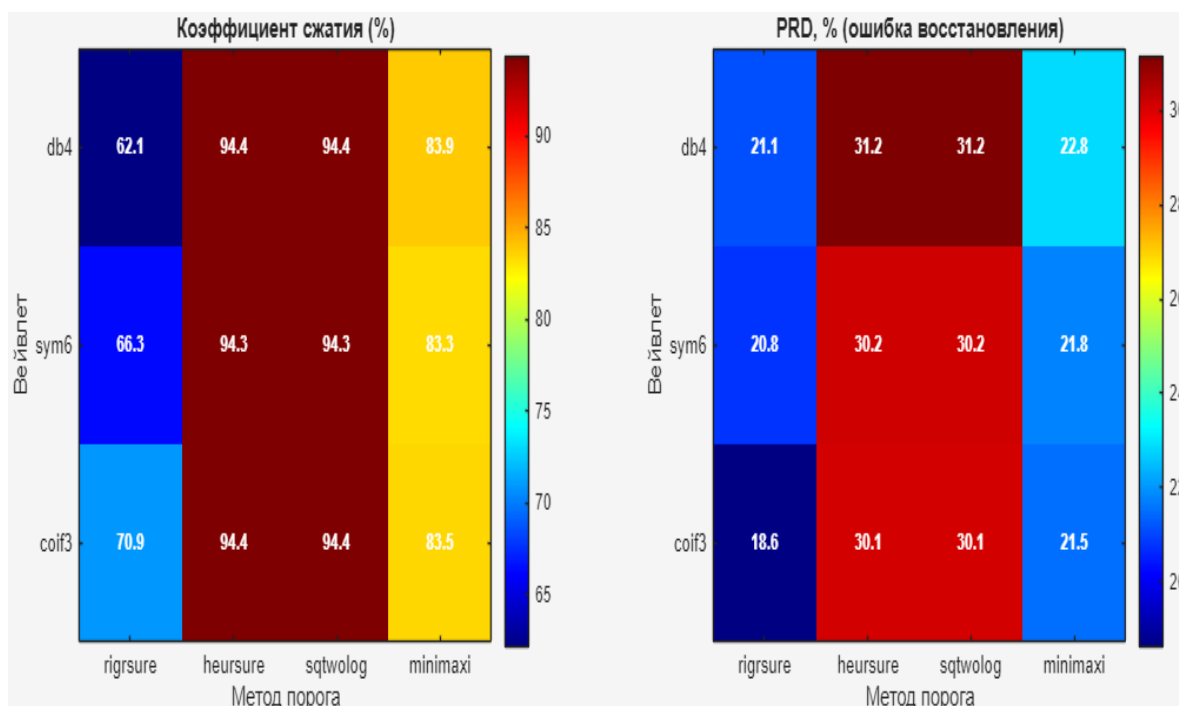


Рисунок 1 – Анализ результатов сжатия зашумленного сигнала

Результаты моделирования показали слабую зависимость результатов от разложения в диапазоне 4–7: изменений *PRD* – менее 0,3 %; изменений степени сжатия: менее 0,5 %; рекомендуемый уровень: $J = 5$.

На основе моделирования разработаны практические рекомендации: для медицинской диагностики: *coif3* + *rigrsure*, уровень разложения 5–6; для телеметрических систем: *db4* + *rigrsure*, уровень разложения 5; для архивного хранения: *db4* + *heursure*, уровень разложения 4–5; для систем реального времени: *symb* + *minimaxi*, уровень разложения 4.

Заключение

Представленный адаптивный алгоритм вейвлет-сжатия сигналов решает ключевую проблему классических методов – необходимость ручного подбора параметров. Алгоритм автоматически анализирует характеристики входного сигнала и выбирает оптимальную комбинацию базисного вейвлета, метода пороговой обработки и уровня разложения.

Исследования подтвердили высокую эффективность алгоритма: достигнута степень сжатия до 94,4 % при контролируемой ошибке восстановления; установлены оптимальные комбинации параметров для различных практических задач; доказано преимущество перед методами с фиксированными параметрами (улучшение на 15–40 %).

Разработанный алгоритм имеет широкий спектр потенциальных применений в системах телеметрии, медицинской диагностики, связи и научных исследованиях. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение алгоритма для обработки двумерных сигналов (изображений) и интеграцию с методами машинного обучения для прогнозирования оптимальных параметров обработки. Применение ВП в частотной области [6] позволяет уменьшить время [7] и увеличить точность [8] обработки данных.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что на момент подачи статьи в редакцию, у него нет возможного конфликта интересов с третьими лицами.

Список источников

1. Чумаров С.Г., Лысов П.С. Сравнительный анализ алгоритмов сжатия аудиоданных с помощью вейвлет-функций // Нигматуллинские чтения: сборник докладов Междунар. науч. конф. Казань, 2023. С. 172-174.
2. Viliam Ďuriš, Vladimir I. Semenov, Sergey G. Chumarov. Application of discrete and fast Fourier transforms to increase the speed of multiscale image analysis. TEM Journal, 2024, 13(1), 349-354. DOI: 10.18421/TEM131-36.
3. Ďuriš V., Semenov V. I., Chumarov S. G. Wavelet transform of signals with VBA applications. Ste-Con: Karlsruhe, GmbH, Germany, 2022, 1st. ed., 203 p.
4. Чумаров С.Г., Серейкин С.Ю. Вейвлет-анализ искажений FM-сигналов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. ун-т, 2026. С. 264-266.
5. Чумаров С.Г., Краснов М.А. Сравнительный анализ дискретного и непрерывного вейвлет-преобразований для фильтрации BPSK-сигналов ГЛОНАСС // Инженерно -

техническое образование и наука: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. – Новороссийск: Изд-во НФ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2026. С. 162-163.

6. Семенов В.И., Чумаров С.Г. От конструирования вейвлетов на основе производных функции Гаусса к синтезу фильтров с конечной импульсной характеристикой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 306–313. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-306-313.

7. Семенов В.И., Чумаров С.Г. Уменьшение времени обратного вейвлет-преобразования изображения с применением симметричного ортогонального вейвлета. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023664790. 07.07.2023.

8. Чумаров С.Г., Семенов В.И., Сас Д.Д. Улучшение точности реконструкции изображений с применением вейвлет-преобразования в частотной области // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2025. Т. 81. № 2. С. 102-109.

Adaptive compression of one-dimensional signals based on the wavelet transform with automatic selection of optimal parameters

Evgeny Mikhailovich Alexandrov

*I.N. Ulyanov Chuvash State University,
Cheboksary, Russia*

EnyashaTheOne@yandex.ru

Abstract

The article describes an adaptive compression algorithm for one-dimensional signals based on the wavelet transform with automatic selection of optimal processing parameters. The implemented method solves the problem of manual parameter selection in classical approaches to wavelet compression through a systematic analysis of the space of possible "wavelet threshold" combinations. Studies conducted on a test radio signal with SNR=10 dB showed the possibility of achieving compression of up to 94.4% with a controlled recovery error of 18.6–31.2%. The implemented algorithm demonstrates adaptivity to signal characteristics and provides 15-40% better results compared to fixed parameter methods.

Keywords: wavelet transform, signal compression, adaptive algorithm, thresholding, parameter optimization, Daubechies wavelets, Symlets wavelets, Coiflets wavelets