

ВЫБОР ФОРМЫ СИГНАЛА (ДЕЛЬТА-ФУНКЦИИ) И ЕЁ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОСТУПАЮЩИХ СИГНАЛОВ В СООТВЕТСТВИИ С ПОСТАВЛЕННОЙ ЦЕЛЬЮ.

Абдулазизов Бахром Тошмирза огли¹
Байматов Пазильжон Джамолдинович¹
Иноятлов Шукурилло Тургунбоевич¹
Шарибаев Носир Юсупжанович²
Жарин Анатолий Лаврентьевич³

¹Наманганский государственный университет

²Наманганский государственный технический университет

³Белорусский национальный технический университет

Абстрактный

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) представляет собой один из самых результативных инструментов анализа нестационарных сигналов в масштабах времени. Вибрационные, акустические, вольт-амперные, медицинские (ЭКГ/ЭЭГ) и иные сенсорные данные, получаемые в реальных системах, нередко включают шум, кратковременные события (импульсы, скачки, разрывы) и плавно эволюционирующие тренды. По этой причине грамотный подбор типа вейвлета и его характеристик при обработке подобных сигналов существенно определяет точность и надежность итогов. В статье детально анализируется оптимальное применение ДВП с учетом характера входных сигналов, включая подходы к настройке параметров — выбор вейвлета, глубину разложения, пороговую фильтрацию и обработку границ для импульсоподобных событий (дельта-импульсов). Кроме того, вводится унифицированный алгоритм подбора на основе метрик сжатия энергии, симметрии, нулевых моментов и фазовых искажений для задач диагностики и детекции. Итоговые методические указания охватывают подавление шума, разделение импульсных компонент и достоверное выделение признаков посредством ДВП.

Ключевые слова: дискретное вейвлет-преобразование, выбор вейвлетов, импульс (дельта), шумоподавление, пороговое значение, уровень разложения, извлечение признаков, сжатие, диагностика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналы, принимаемые в промышленных и научно-практических системах, часто имеют сложную структуру и нестабильный спектральный состав. Это связано с тем, что в реальных процессах одновременно действуют такие факторы, как изменения нагрузки, механические удары, переключение режимов работы, обрывы контактов или электромагнитные помехи. В таких условиях оценки сигнала только по среднему частотному составу часто недостаточно. Потому что в задаче диагностики или обнаружения событий первостепенное значение имеет вопрос «что произошло в какое время». Дискретное вейвлет-преобразование удовлетворяет этой потребности, поскольку анализирует сигнал в локальных сегментах во времени на разных масштабах. В результате более четко видны короткие импульсы и резкие изменения (события,

близкие к дельта-ритму). При этом ДВТ является вычислительно быстрым и хорошо работает на цифровых устройствах.[2]

Эффективность вейвлет-методов во многом зависит от правильного выбора волновой функции и её параметров. Если вейвлет не соответствует природе сигнала, то в результате преобразования полезные компоненты могут быть подавлены вместе с шумом. Например, если для обнаружения импульсных событий выбран вейвлет с очень «гладким» и длинным основанием, энергия импульса будет распределена в несколько раз, и обнаружение станет затруднительным. Напротив, если для гладких биологических сигналов (ЭКГ) используется вейвлет с очень коротким основанием, существует вероятность увеличения ошибки реконструкции или искажения формы. Поэтому «оптимальный выбор» означает поиск наиболее оптимального вейвлета среди вейвлетов в соответствии с критериями, подходящими для данной цели. Этот процесс должен проводиться на основе экспериментальных тестов, метрик и теоретических свойств. Полученный выбор может значительно уменьшить шум, сжать сигнал или повысить точность классификации.[5]

Основная цель данной статьи — описание систематического метода выбора параметров ДТТ в зависимости от цели обработки принимаемых сигналов. В данном случае особое внимание уделяется вопросу выбора вейвлетов для событий, близких к дельта-импульсам. Поскольку импульсы часто являются первым признаком неисправности, их раннее обнаружение улучшает стратегию технического обслуживания. В статье объясняются критерии выбора вейвлетов, такие как локализация, симметрия, нулевые моменты, ортогональность и энергетическая компактизация. Также подробно рассматривается влияние уровня разложения, типа порога и обработки границ на результат. Представлен общий алгоритм в виде практических шагов. В заключение приводятся типичные ошибки и рекомендации по их устранению.

2. Основы дискретного вейвлет-преобразования (ДВП)

Дискретное вейвлет-преобразование основано на идее многомасштабного анализа сигнала, то есть сигнал делится на крупные (низкочастотные) и малые (высокочастотные) структуры. В цифровой форме этот процесс осуществляется с помощью фильтров. Сигнал сначала пропускается через фильтр нижних частот, и получается «приближенная» часть. Затем «детальная» часть отделяется с помощью фильтра верхних частот. После каждого этапа количество отсчетов уменьшается вдвое, что увеличивает скорость вычислений. Таким образом, анализ продолжается на уровнях 1, 2 и выше. В результате изменения сигнала в разных частотных диапазонах отражаются в отдельных коэффициентах. Это свойство очень удобно для обнаружения импульсных, скачкообразных и модулированных процессов.[4]

Математическое выражение ДТТ задается фильтрованными и редуцированными последовательностями. Основная идея заключается в том, что низкочастотная часть сигнала повторно анализируется на последующих этапах, в то время как детальная часть сохраняется. Такой подход называется «многоуровневый анализ». Выбранные коэффициенты фильтра системы определяют тип вейвлета. Следовательно, выбор вейвлета по существу эквивалентен выбору банка фильтров. На практике длина и симметрия фильтра существенно влияют на качество реконструкции. Реконструкция ДТТ также выполняется с использованием подходящих синтезирующих фильтров, и теоретически может быть выполнено условие

идеальной реконструкции. Поэтому выбор вейвлета должен быть подходящим не только для анализа, но и для реконструкции сигнала.[9]

Понятие дельты (импульса) представляет собой очень кратковременное событие большой амплитуды в сигнале. В дискретной форме дельта обычно характеризуется значением 1 в одной точке и значением 0 в других. Такие импульсы могут проявляться как удар в вибрационном сигнале, обрыв контакта в электрическом сигнале или «щелчок» в аудиосигнале. В ДТТ импульсы часто сильно проявляются в высокочастотных коэффициентах детализации. Поэтому работа с деталями и их проверка с помощью пороговых или статистических критериев является эффективным подходом к обнаружению импульсов. Однако разброс импульса зависит от длины поддержки вейвлета, и неправильный выбор может привести к «разбросу» импульса. Поэтому для событий, близких к дельте, часто предпочтительны вейвлеты с коротким основанием. Кроме того, форма импульса может не быть идеальной дельтой, а может быть разбросана из-за динамики системы.[14]

Уровень разложения сильно влияет на результат шумоподавления, поскольку определяет, какие частотные диапазоны обрабатываются. Если выбрать слишком низкий уровень, могут остаться низкочастотные шумы или артефакты тренда. Если выбрать слишком высокий уровень, полезные медленные компоненты сигнала также могут быть искажены из-за чрезмерного сглаживания. Поэтому обычно выбирается диапазон, но это зависит от длины сигнала и частоты дискретизации. Если «сохранение импульса» является специфическим требованием при шумоподавлении, порог не должен быть слишком низким, а поддержка вейвлета не должна быть слишком большой. В противном случае импульс может исчезнуть как диагностический признак. Кроме того, методы, инвариантные относительно сдвига (например, недецимированные), могут быть более стабильными при определении местоположения импульса, но при этом возрастает вычислительная сложность. В практических системах оптимальный вариант часто выбирается на основе компромисса между точностью и скоростью. JJJ3 – 7

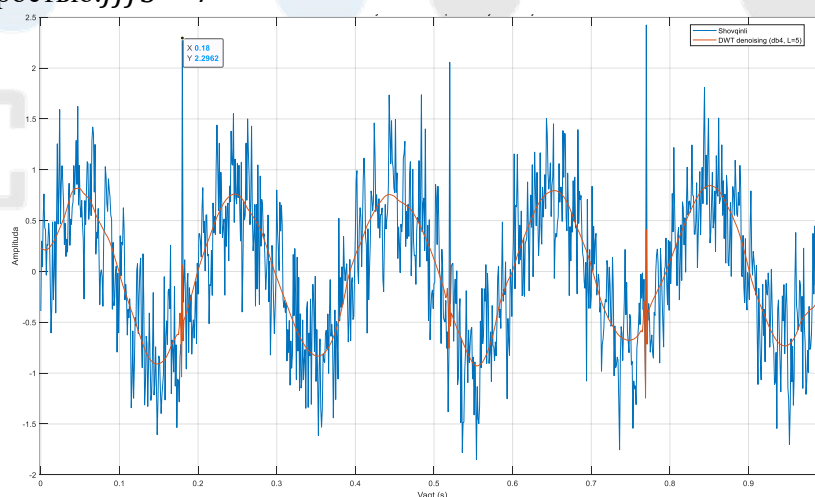


Рисунок 1. Шумоподавление с помощью дискретного вейвлет-преобразования (db4, L=5)
Жесткое предельное значение:

$$\hat{d} = d \cdot \mathbf{1}(|d| \geq T)$$

Мягкое пороговое значение:

VOLUME-6, ISSUE-2

$$\hat{d} = \text{sign}(d)\max(|d| - T, 0)$$

Общее (универсальное) предельное значение:

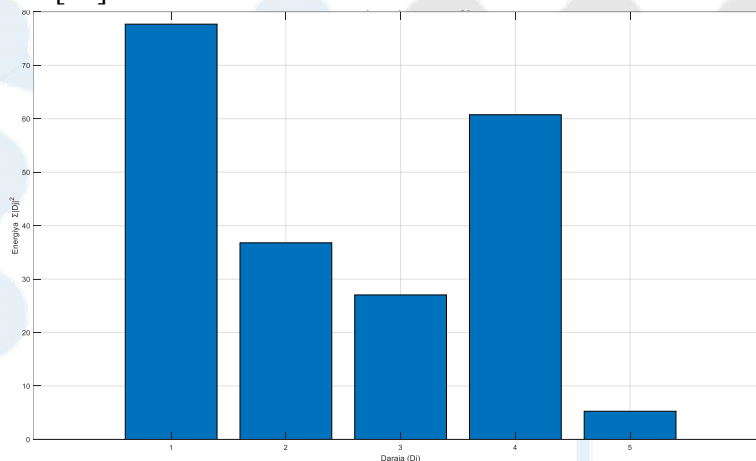
$$T = \sigma\sqrt{2\ln N}$$

Надежная оценка дисперсии шума:

$$\sigma \approx \frac{\text{median}(|d_1|)}{0.6745}$$

3. Научные критерии выбора вейвлетов

Первым важным критерием выбора вейвлета является локализация во времени, то есть способность четко указывать место возникновения события. Локализация в основном определяется длиной поддержки вейвлета. Если поддержка короткая, импульс или резкий скачок выглядят «сжатыми» в детальных коэффициентах и их легче обнаружить. Если поддержка длинная, та же энергия распределяется по большему количеству коэффициентов, а пиковые значения уменьшаются. В практической диагностике именно разделение пиков имеет очень важное значение. Поэтому для импульсных сигналов часто используются вейвлеты, такие как Haar (db1), db2–db6 или sym2–sym6. Наряду с локализацией может также повышаться чувствительность к шуму, поэтому необходимо соблюдать баланс со следующими критериями. Таким образом, выбор локализации всегда является компромиссом в зависимости от цели.[12]



Код изображения 2: Детализация энергии по уровням.

Второй критерий — гладкость и количество моментов, равных нулю. Если моментов, равных нулю, много, вейвлет-полином не сможет детально воспроизвести тренды, и медленно изменяющиеся части сигнала останутся в приближении. Это полезно для шумоподавления и извлечения признаков, поскольку тренд не будет смешиваться с шумом. Однако увеличение количества моментов, равных нулю, также увеличивает длину фильтра, что повышает риск распространения импульсов. Поэтому выбор вейвлета с очень большими моментами для импульсных событий не всегда выгоден. Для гладких сигналов (например, общего контура ЭКГ) больше подходят db8–db12 или койфлеты. Для смешанных сигналов (тренд + импульс) могут быть эффективны вейвлеты со средними моментами. В результате количество моментов выбирается в зависимости от уровня тренда сигнала и требований к обнаружению.[15]

Третий критерий — это вопрос симметрии и фазовых искажений, поскольку сохранение реальной формы сигнала имеет решающее значение во многих задачах. В ортогональных

вейвлетах Даубеши из-за неполной симметрии иногда наблюдаются фазовые сдвиги или «искажение» формы. Симлеты, и особенно биортогональные вейвлеты, почти симметричны и лучше сохраняют форму при реконструкции. Это очень важно в медицинских сигналах или при оценке чувствительных диагностических признаков (например, краев переходных процессов). Кроме того, биортогональные вейвлеты также широко используются в задачах сжатия и сохранения качества изображения. Ортогональность необходима для сохранения энергии и математического удобства коэффициентов. Таким образом, при выборе также существует определенный баланс между «симметрией и ортогональностью». На практике семейства `bior/rbio` и `sym` часто служат универсальными решениями.

4. Оптимальный выбор в зависимости от назначения: практическое руководство

4.1. Снижение уровня шума

Основная цель шумоподавления — уменьшение амплитуды шума при сохранении полезных компонентов сигнала. Поскольку шум часто сильнее в высокочастотном диапазоне, работа с детальными коэффициентами дает эффективные результаты. ДТТ дает преимущество «многомасштабного» разделения шума от сигнала, поскольку шум выглядит по-разному на разных уровнях. Здесь выбор вейвлета больше зависит от критериев гладкости и симметрии. На практике хорошие результаты часто дают `sym4–sym8`, `db6–db10` или `coif2–coif5`. Если требуется максимальное сохранение формы сигнала, предпочтительнее использовать семейства `bior` и `rbio`.

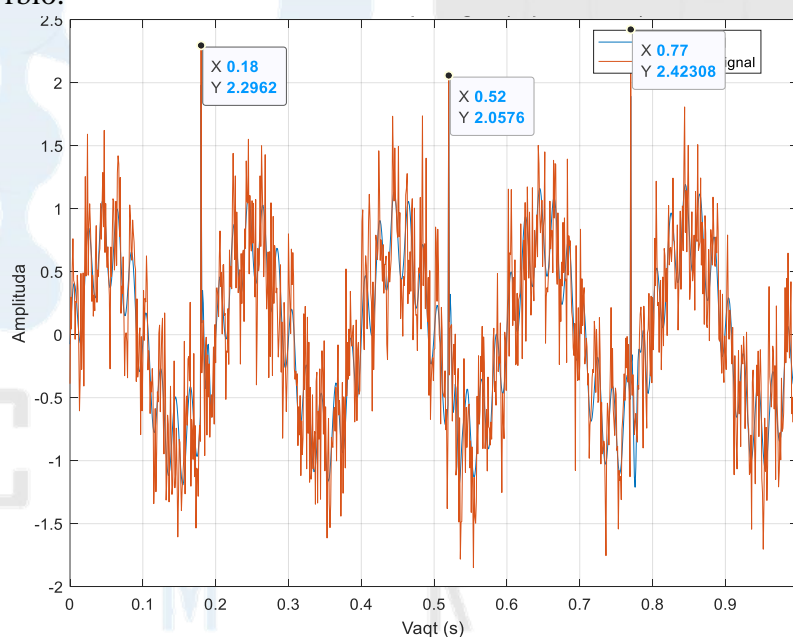


Рисунок 3. Чистый и зашумленный сигнал (с импульсами)

При шумоподавлении, даже если длина фильтра немного больше, пороговое значение необходимо выбирать тщательно, чтобы не «потерять» импульсы. Поэтому выбор вейвлета рассматривается вместе с политикой порогового значения. Выбор порогового значения — один из важнейших этапов шумоподавления, поскольку именно на этом этапе подавляется шум. Жесткий порог резко снижает коэффициенты шума до нуля, но иногда может вызывать «скачки» артефактов. Мягкий порог дает плавный результат, но может также уменьшить

полезную амплитуду импульса. Универсальный порог работает просто и быстро, но может быть не самым оптимальным для всех типов сигналов.[9]

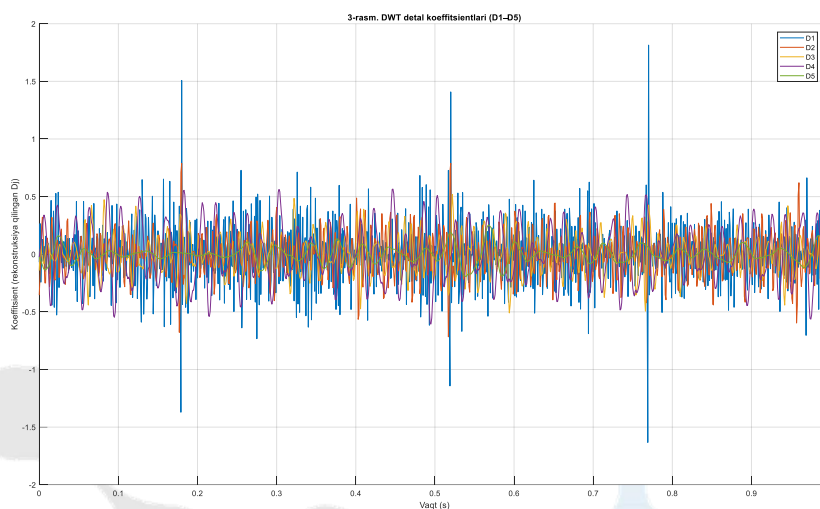


Рисунок 4. Детальные коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования (D1–D5)

Для оценки дисперсии шума σ часто используется надежная оценка на основе медианы. Пороговое значение, зависящее от уровня, обычно дает лучшие результаты. Кроме того, важна также обработка границ: симметричное заполнение уменьшает искажения на краях. Оценка результата с помощью таких метрик, как SNR или MSE, помогает уточнить параметры шумоподавления.[11]

4.2. Сжатие

Цель сжатия — представить сигнал с минимальным количеством информации и минимизировать ошибку при реконструкции. В этом случае очень удобен DTT, поскольку в большинстве сигналов энергия сосредоточена в небольшом количестве коэффициентов. Выбор вейвлета зависит от свойства сжатия энергии, то есть наибольшие коэффициенты должны давать основное содержание сигнала. Для гладких сигналов высокоимпульсные вейвлеты, такие как db8-db12, могут эффективно концентрировать энергию. Когда важны сохранение формы и симметрии, биортогональные вейвлеты также дают очень хорошие результаты. При сжатии можно работать совместно с такими этапами, как пороговая обработка, квантование и энтропийное кодирование коэффициентов. Однако в рамках данной статьи основное внимание будет уделено стратегии выбора вейвлетов и обрезки коэффициентов. В результате правильный выбор повысит степень сжатия и сохранит качество реконструкции.

При сжатии уровень разложения определяет, насколько глубоко разделяются низкочастотные компоненты сигнала. В большинстве случаев энергия концентрируется на малых масштабах, поэтому важно выбрать достаточное значение. На следующем этапе можно сохранить наибольший коэффициент или выбрать набор коэффициентов, обеспечивающих определенную долю энергии. Если доля энергии велика, сжатие будет эффективным, а ошибка останется небольшой. Однако слишком агрессивное сжатие может привести к потере мелких деталей сигнала, что негативно скажется на диагностических задачах. Поэтому следует заранее определить, является ли целью сжатия «архивирование» или «анализ». В изображениях или акустических сигналах психоакустические/психовизуальные свойства

также могут играть роль, но в общем случае сжатия сигналов основным остается энергетический критерий. На практике тестируется несколько вейвлетов, и выбирается тот, который дает наименьшую ошибку. $JJK\eta$

Стратегия отсечения коэффициентов от значений, близких к нулю, также важна в процессе сжатия. Если выбор вейвлета неверен, полезная энергия будет рассеяна по многим коэффициентам, и отсечение сильно исказит сигнал. Поэтому соответствие вейвлета сигналу напрямую определяет качество сжатия. Поскольку биортогональные вейвлеты обладают хорошей симметрией, артефакты при восстановлении некоторых сигналов наблюдаются реже. Хотя вейвлеты Даубеши обладают сильным энергетическим сжатием, фазовые искажения могут быть проблемой для некоторых сигналов. Также рекомендуется оценивать восстановленный сигнал после сжатия по MSE, SNR или корреляции. Наряду с энергетическим критерием, при необходимости проверяется также сохранение спектральных характеристик. В конечном итоге, «наилучшим» сжатием считается то, которое обеспечивает максимальный коэффициент сжатия с минимальной ошибкой. [10]

Индикатор энергетического уплотнения:

$$\eta = \frac{\sum_{i \in \Omega} |c_i|^2}{\sum_i |c_i|^2}$$

4.3. Извлечение признаков и классификация

В задаче извлечения признаков коэффициенты ДТТ обеспечивают «сигнатуры» сигнала на разных масштабах. В диагностике, например, отказ подшипника, неравномерная нагрузка или резонансные явления в вибрациях двигателя приводят к различным распределениям энергии на разных уровнях. Поэтому на практике обычно извлекают статистические признаки, такие как энергия, среднеквадратичное значение, эксцесс, из детальных коэффициентов. В этой задаче при выборе вейвлета важна «разделимость», то есть разница между различными классами должна быть четко видна в коэффициентах. Для импульсных неисправностей часто хорошо разделяют вейвлеты db2-db6 или sym4-sym6. Для плавных биологических сигналов более подходящими могут быть семейства coif или sym. При выборе преобладает способность к разделению классов над сохранением формы сигнала. Поэтому выбор вейвлета часто подтверждается результатами классификации. [14]

Для классификации признаки можно разложить на уровни и собрать в виде отдельных векторов на каждом уровне. Например, энергия на каждом уровне может значительно изменяться при изменении диагностического состояния. Кроме того, энтропийные признаки представляют уровень неупорядоченности сигнала и полезны при сбоях с шумом. Существует также проблема переобучения при отборе признаков, поскольку слишком много признаков усложняет модель. Поэтому методы PCA или другие методы отбора позволяют извлечь наиболее информативные признаки. Отбор вейвлетов может усилить или ослабить эту информативность. Например, симметричные вейвлеты в некоторых случаях повышают стабильность признаков. Уровень разложения также важен для определения диапазона, в котором видны различия между классами. В конечном итоге, «оптимальный вейвлет» — это вейвлет, обеспечивающий наивысшую точность (точность/F1). $d_j E_j$

В практическом процессе отбора, вейвлет $\times J$ Комбинации тестируются с помощью перекрестной проверки. В каждой комбинации извлекаются признаки и обучается

классификатор (например, SVM, случайный лес или нейронная сеть). Затем на основе результатов проверки выбирается наилучшая комбинация. Этот подход представляет собой «целеориентированный» выбор, который подтверждает теоретические критерии практическими показателями. Однако вейвлет, оптимальный только в одном наборе данных, может ухудшиться в другом, поэтому проверяется его обобщающая способность. Кроме того, изменения уровня шума, местоположения датчика или нагрузки могут повлиять на результат. Поэтому процесс выбора должен охватывать сигналы из разных режимов. В результате получается стабильный и надежный набор параметров вейвлета.

Уровень энергии:

$$E_j = \sum_k |d_j[k]|^2$$

Энтропия Шеннона:

$$H_j = - \sum_k p_k \ln p_k$$

Вероятность энергии:

$$p_k = \frac{|d_j[k]|^2}{\sum_k |d_j[k]|^2}$$

4.4. Обнаружение дельта- (импульсных) событий

Обнаружение импульсных событий вблизи дельта-ритма является одной из важнейших задач во многих технических системах. Импульсы часто являются признаком неисправности, такой как механический удар, стук в шестерне, трещина в подшипнике, «дребезжание» электрических контактов или поломка датчика. ДТТ помогает отделить импульс от шума, отображая его одновременно на нескольких масштабах. Основное внимание здесь уделяется коэффициентам детализации, поскольку высокочастотное содержание импульса сильно выражено. При выборе вейвлета наилучшие результаты часто дают вейвлеты с коротким основанием и сильной локализацией. Вейвлеты Хаара (db1) подходят для очень резких импульсов, тогда как db2–db4 могут быть предпочтительнее в случаях, когда импульс слегка размыт. Sym4–sym6 в некоторых случаях хорошо сохраняют форму импульса и уменьшают фазовые искажения. Таким образом, при обнаружении импульсов выбор вейвлета должен соответствовать «форме события». Обработка краев также важна, поскольку если импульс находится в начале или конце сигнала, при неправильном выборе заполнения будут создаваться артефакты. Кроме того, инвариантное к сдвигу преобразование сводит проблему чувствительности к определению местоположения импульса. Наконец, критерии обнаружения оптимизируются на основе компромисса между точностью и полнотой.

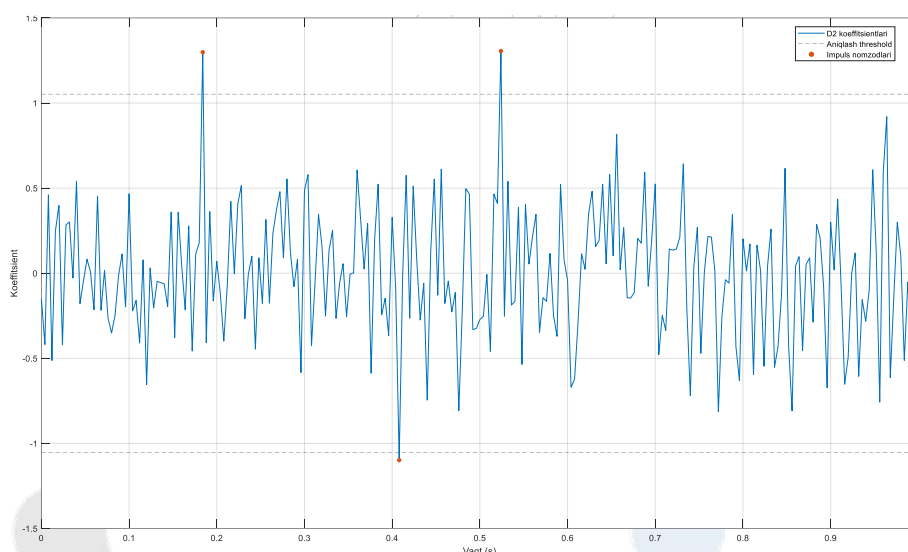


Рисунок 5: Обнаружение импульсов на уровне D2 ($|D2| >$ пороговое значение)

Называть импульс «дельта» — это идеализация, и в реальных системах форма импульса формируется в результате переходного процесса. Например, после механического удара система начинает резонировать, и импульс образует «хвост». Поэтому иногда полезно выбирать вейвлет, подобный согласованной фильтрации: если форма вейвлета близка к форме события, коэффициенты максимизируются. На практике это делается путем тестирования нескольких вейвлетов и сравнения качества их обнаружения с метриками. Часто на импульсных сигналах тестируются вейвлеты, такие как db2, db4, sym4, haar и bior3.5. Уровень разложения JJJ выбирается в зависимости от длительности импульса и частоты дискретизации, поскольку это определяет диапазон, в котором «появляется» импульс. В результате, наряду с разделением импульса, можно также оценить его местоположение и силу. Такой подход служит основой для систем раннего предупреждения в технической диагностике.

5. Общий алгоритм для оптимального выбора

Для практического применения оптимального выбора необходимо сначала четко определить цель работы с сигналом. Ведь задачи шумоподавления, сжатия, обнаружения импульсов или классификации предъявляют разные требования к одним и тем же параметрам. Затем оценивается характер сигнала: он может быть импульсным, сглаженным, трендовым или смешанным. На этом этапе делается предварительный вывод с использованием простой статистики, спектральных наблюдений или временных графиков. После этого составляется список кандидатов в вейвлеты, и каждый из них выбирается в соответствии с его пригодностью для данной цели. Выбор основан не на принципе «один вейвлет для всех», а на принципе адаптации к задаче и типу сигнала. На следующем этапе определяется диапазон параметров, например, уровни JJJ, типы порогов и методы определения границ. Затем выбирается метрика, поскольку измерение оптимальности невозможно без критерия. Одним из наиболее надежных методов работы с кандидатами является поиск по сетке или кросс-вейвлетный подход. В этом случае результаты рассчитываются систематически для каждого типа вейвлета и комбинации параметров. Для каждой комбинации оцениваются отношение сигнал/шум (SNR) или среднеквадратичная ошибка (MSE) при шумоподавлении, ошибка реконструкции и коэффициент сжатия при сжатии, а также показатели F1 или ROC при обнаружении.

Результаты сравниваются в таблице, и выбирается наилучшая комбинация. Однако полагаться на один результат теста может быть некорректно, поэтому необходима проверка на нескольких образцах сигнала. Эта проверка должна охватывать различные режимы, различные уровни шума и различные расположения датчиков. Только тогда выбранные параметры вейвлета будут обобщаемыми и стабильными. Наконец, учитывается также вычислительная сложность реализации в практической системе.

После завершения выбора также целесообразно проверить физический смысл результата. Например, в диагностике вибраций обнаруженные импульсы должны действительно соответствовать механическому событию. В противном случае алгоритм может воспринять шум как «неисправность». Также полезно сравнить с биортогональными вейвлетами, если форма и фаза восстановленного сигнала имеют важное значение. Если параметры слишком чувствительны, то есть небольшое изменение резко меняет результат, это указывает на проблему стабильности. В этом случае можно рассмотреть вариант адаптивного порогового значения или преобразования, инвариантного относительно сдвига. Еще один важный момент заключается в том, что в системах реального времени вычислительные ресурсы ограничены, поэтому вейвлеты с очень длинными фильтрами не всегда подходят. Таким образом, оптимальный выбор всегда требует баланса между точностью, стабильностью и скоростью вычислений. В результате получается окончательная конфигурация, отвечающая требованиям системы.

6. Обсуждение. Одна из самых распространенных ошибок на практике — выбор уровня разложения по принципу «чем больше, тем лучше». На самом деле, слишком большой выбор JJJ может привести к чрезмерному сглаживанию полезных низкочастотных компонентов или усилению артефактов на границах. Вторая ошибка — выбор неправильного порога, например, предположение, что универсальный порог оптимален во всех случаях. Универсальный порог также может подавлять полезные компоненты в некоторых сигналах. Третья проблема — игнорирование метода заполнения, поскольку артефакты, образующиеся в граничных областях, будут вызывать ложные сигналы при обнаружении импульсов. Четвертая ошибка — постоянное использование типа вейвлета без проверки, поскольку при изменении типа сигнала оптимальный вейвлет также меняется. Пятая ошибка — оценка результата без метрик, то есть выводы только на глаз. Наиболее правильный подход — использование теоретических критериев вместе с практическими метриками. В качестве рекомендаций, прежде всего, необходимо четко определить целевой сигнал и выбрать метрику оценки. Критерии, такие как SNR и MSE при шумоподавлении, F1 и частота ложных срабатываний при обнаружении импульсов, а также ошибка реконструкции при сжатии, должны постоянно контролироваться. Вторая рекомендация — протестировать несколько семейств вейвлетов и систематически сравнить их. Третья — сделать пороговое значение адаптивным для каждого уровня, поскольку шум может проявляться по-разному на разных уровнях. Четвертая — выбрать симметричное пороговое значение и отдельно проверить, находится ли импульс на краю. Пятая — ограничить длину фильтра, чтобы уменьшить вычислительную сложность для систем реального времени. Шестая — проверить стабильность параметров, то есть убедиться, что результат не ухудшается при разных выборках и условиях. Эти рекомендации значительно повышают вероятность оптимального использования ДТТ. Еще один важный аспект обсуждения — вопрос правильного различения импульса и шума. Некоторые типы шума могут также

проявляться в виде импульсоподобных «пиков», что затрудняет обнаружение. В этом случае помогают многомасштабная валидация и дополнительная статистическая фильтрация. Кроме того, когда импульсы периодические, например, в случае отказа подшипника, интервал между импульсами также становится диагностическим признаком. Можно извлечь последовательность импульсов из коэффициентов DTT, а затем добавить анализ временных интервалов. Такой подход позволяет не только определить «присутствует/отсутствует», но и классифицировать тип неисправности. Однако в такой сложной системе выбор вейвлета становится более ответственным, поскольку неправильный выбор также нарушает последующие этапы анализа. Поэтому правильно рассматривать выбор вейвлета как «основной этап фильтрации» диагностической цепочки. В результате преимущества DTT проявляются в полной мере.

7. Заключение

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) предоставляет мощные теоретические и практические возможности для целенаправленной обработки принимаемых сигналов. Его главное преимущество — способность обнаруживать локальные явления во времени в нестационарных сигналах на разных масштабах. Однако реальная эффективность ДВП напрямую зависит от правильного выбора типа вейвлета и параметров. Для событий, близких к импульсу (дельта-волнам), наилучшие результаты часто дают вейвлеты с короткими базисами и сильной локализацией. При шумоподавлении и сжатии более важны критерии гладкости, сжатия энергии и симметрии. При извлечении признаков и классификации оптимальный выбор должен быть подтвержден метриками. Поэтому процесс выбора вейвлета должен основываться на систематическом подходе, сочетающем метод проб и ошибок и теоретический анализ. В результате использование ДВП значительно повышает качество сигнала, надежность обнаружения и точность диагностики.

Представленные в статье методологические подходы предполагают формирование списка вейвлетов, подходящих для типа сигнала, и их оптимизацию вместе с параметрами. Этот подход считается более стабильным и эффективным в практических системах, чем «случайный выбор». Также было отмечено, что такие параметры, как пороговая обработка и обработка границ, не менее важны, чем выбор вейвлетов. При обнаружении импульсов очень важно сбалансировать ложные сигналы и ошибки пропуска, для чего эффективны адаптивный порог и многомасштабная проверка. В компрессии основными критериями являются доля энергии и ошибка реконструкции, а решающую роль играет степень накопления энергии вейвлетом. В классификации лучшим вейвлетом является тот, который обеспечивает наивысшую F1-меру или точность. В заключение было показано, что оптимальный выбор всегда является компромиссом между точностью, стабильностью и скоростью вычислений. На этой основе были сформулированы практические рекомендации для надежной реализации DTT в различных областях.

Список использованной литературы.

1. Стефан Маллат(1999). Вейвлет-анализ обработки сигналов. Academic Press.
2. Ингрид Добеши(1992). Десять лекций по вейвлетам. Общество промышленной и прикладной математики (SIAM).
3. Дэвид Л. Донохо, & Иэн М. Джонстон. (1994). Идеальная пространственная адаптация путем вейвлет-сжатия. *Biometrika*, 81(3), 425–455.

4. Дэвид Л. Донохо. (1995). Шумоподавление с помощью мягкого порогового значения. Труды IEEE по теории информации, 41(3), 613–627.
5. Младен Виктор Векерхаузер(1994). Адаптированный вейвлет-анализ: от теории к программному обеспечению. А. К. Петерс.
6. Гилберт Стрэнги Труонг Нгуен. (1996). Вейвлеты и фильтровые банки. Издательство Уэлсли-Кембридж.
7. Мартин Веттерлии Елена Ковачевич. (1995). Вейвлеты и кодирование поддиапазонов. Прентис Холл.
8. Шарипбаев, Н. Ю., Турсунов, А. А., и Джураев, С. С. (2021). Интеллектуальные устройства для определения концентрации пылевых частиц. Текущий научный журнал педагогики, 2(12), 166–170. <https://doi.org/10.37547/pedagogics-crjp-02-12-33>
9. Шарипбаев, Н. И., Джураев, Ш. С., Турсунов, А. А., и Кодиров, Д. Т. (2023). Роль Secube в реализации планов обеспечения непрерывности бизнеса (BCM) в различных отраслях. Американский журнал прикладной науки и техники, 3(12), 37–39. <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume03Issue12-08>
10. Шарипбаев, Н. Ю., Джураев, Ш. С., Турсунов, А. А., и Парпиев, Д. Х. (2023). Преимущества использования Secube в государственном управлении для обеспечения информационной безопасности. Американский журнал социальных наук и образовательных инноваций, 5(12), 77–79. <https://doi.org/10.37547/tajssei/Volume05Issue12-10>
11. Шарипбаев, Н. Ю., и Джураев, С. С. (2023). Химические инновации в производстве компостируемых целлофановых материалов. Американский журнал социальных наук и гуманитарных исследований, 3(12), 288–290.
12. Шарипбаев, Н. Ю., и Джураев, Ш. С. (2023). От отходов к ресурсам: компостирование и переработка биоразлагаемого целлофана. Американский журнал социальных наук и гуманитарных исследований, 3(12), 285–287.
13. Джураев, Ш. С., и Мадалиев, Х. Б. (2023). Метод распределения транспортного потока на основе 14 дифференциальных уравнений. Научный журнал исследований намерений, 2(10), 1–10.
14. Шарипбаев, Н., Турсунов, А., и Джураев, Ш. (2022). Математическое моделирование законов распределения пылевых частиц в воздухе, образующихся на производственных предприятиях. Журнал физики: Серия конференций, 2373(7), 072043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/7/072043>