

На правах рукописи

ЯСИН Алаулдин Салах Ясин

**ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2016

Работа выполнена на кафедре радиофизики и нелинейной динамики физического факультета ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Павлов Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»
Курушина Светлана Евгеньевна

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теории управления и динамики машин ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского»
Осипов Григорий Владимирович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск)

Защита состоится «___» июня 2016 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.243.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, корпус III, ауд.34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и на сайте <http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-01/kandidatskaya-dissertaciya-yasina-alauldina-salaha>

Автореферат разослан «___» апреля 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Цифровая фильтрация зашумленных сигналов и изображений важна при решении широкого круга научно-технических задач. Такие задачи возникают, в частности, в технике связи для улучшения качества приема передаваемых сообщений. Традиционно, для очистки информационных сообщений от помех применяются подходы, использующие преобразование Фурье. Но, несмотря на то, что этот математический аппарат является важным и полезным инструментом практических исследований, он имеет ряд ограничений. Так, фильтры на основе преобразования Фурье не позволяют эффективно устранять изолированные особенности сигналов. В связи с тем, что это преобразование использует бесконечно осциллирующие гармонические функции, сведения об изолированных особенностях сигнала содвигаются во всех коэффициентах преобразования, и соответствующие помехи сложно отфильтровать. Кроме того, классический аппарат преобразования Фурье был разработан для стационарных случайных процессов, чьи характеристики неизменны во времени. Если же свойства процесса претерпевают изменения, это может привести к различным проблемам в интерпретации полученных результатов, неоднозначностям и т.п. По этим причинам, начиная с 1980-х годов активно развиваются методы фильтрации сигналов и изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования (ДВП).

Применение одномерного дискретного вейвлет-преобразования (1D-ДВП) в настоящее время является стандартным методом фильтрации сигналов, который широко применяется во многих областях науки и техники¹. Это преобразование используется в рамках алгоритмов многомасштабного анализа, предусматривающих быстрое (пирамидальное) разложение сигнала с использованием квадратурных зеркальных фильтров: высокочастотного и низкочастотного. Применение НЧ-фильтра позволяет проводить аппроксимацию (сглаживание) сигнала, а использование взаимосвязанного с ним ВЧ-фильтра обеспечивает возможность изучать отклонения от данной аппроксимации. Особенность многомасштабного анализа состоит в том, что аппроксимация и последующее изучение детализации сигнала проводятся на разных уровнях разрешения, для чего рассматриваются последовательные аппроксимирующие пространства, являющиеся отмасштабированными и инвариантными относительно смещений на целые числа разновидностями одного центрального функционального пространства². После разложения сигнала в базисе вейвлет-функций проводится корректировка коэффициентов разложения, относящихся к малым масштабам, где в наибольшей степени сказывается влияние шума. Соответствующая корректировка может осуществляться на разных уровнях разрешения, и последующее

¹ D.L. Donoho, I.M. Johnstone, *Biometrika*. 81: 425-455 (1994); D.L. Donoho, *IEEE Transactions on Information Theory*. 41: 613-627 (1995); S.G. Chang et al., *IEEE Trans. Image Proc.* 9: 1532-1546 (2000); M. Jansen. *Noise reduction by wavelet thresholding*. – New York: Springer-Verlag, 2001; S. Barber, G. P. Nason, *Journal of the Royal Statistical Society B*. 66: 927-939 (2004); I. M. Johnstone, B. W. Silverman, *Annals of Statistics* 33: 1700-1752 (2005); H. Zhang et al., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14: 3-14 (2007).

² И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло, *Успехи физических наук*. 171: 465–501 (2001).

восстановление сигнала в ходе обратного ДВП позволяет провести его очистку от фонового шума. Традиционно применяется обнуление части коэффициентов вейвлет-преобразования, однако этот вариант может приводить к искажениям восстановленного сигнала или изображения. По этой причине в литературе обсуждаются различные способы коррекции вейвлет-коэффициентов, включая способы «жесткого» и «мягкого» задания пороговой функции.

Метод фильтрации на основе ДВП имеет ряд недостатков, и многочисленные исследования были направлены на совершенствование приемов цифровой фильтрации. К числу основных недостатков метода ДВП относятся осцилляции вейвлет-коэффициентов в окрестности сингулярностей, усложняющие обработку сигналов, отсутствие инвариантности относительно сдвига, приводящее к непредсказуемым изменениям паттернов вейвлет-коэффициентов при смещении сингулярностей, появление артефактов в реконструированном сигнале после коррекции вейвлет-коэффициентов. Дополнительно, в двумерном варианте реализации ДВП возникает проблема потери селективности по направлению, усложняющая анализ структур двумерных изображений³. Кроме того, подходы, основанные на ДВП, не позволяют получать информацию о фазовых соотношениях.

В целях устранения этих недостатков в работах⁴ был предложен метод дуального комплексного вейвлет-преобразования (*dual-tree complex wavelet transform*, ДКВП). Главная идея данного подхода состоит в том, чтобы дополнить вещественные скейлинг-функции и вейвлеты мнимыми частями, полученными с помощью преобразования Гильберта, что приводит к комплексным (аналитическим) НЧ- и ВЧ-фильтрам. Этот подход обладает приближенной инвариантностью относительно сдвига и оперирует с вейвлетами, построенными на основе вещественных функций. Проведенные исследования подтвердили, что этот метод сохраняет все преимущества ДВП (например, возможность быстрой реализации алгоритма), но дополнительно позволяет оперировать с амплитудами и фазами вейвлет-коэффициентов, расширяя возможности анализа экспериментальных данных. Для перехода к аналитическим базисным функциям применяют специальные приемы построения базисов⁵.

Отметим, что и ДВП, и ДКВП оперируют с ортонормированными базисами, и, следовательно, разложение по вейвлетам с применением этих подходов не является избыточным (в этом случае говорят о «критической выборке», любое уменьшение которой приводит к необратимым потерям информации). Поэтому ошибочное удаление части коэффициентов приведет к искажениям восстановленного сигнала. Этого можно избежать, если отказаться от критической выборки и рассматривать избыточные разложения сигналов в базисе вейвлет-функций. В случае дискретных вейвлетов применительно к неортонормированным (избыточным) базисам используют терминологию *фреймов*. При ис-

³ I.W. Selesnick, R.G. Baraniuk, N.G. Kingsbury, IEEE Signal Processing Magazine. 22(6): 123-151 (2005).

⁴ N.G. Kingsbury, Philos. Trans. R. Soc. London A. 357: 2543-2560 (1999); N.G. Kingsbury, Appl. Comput. Harmon. Anal. 10: 234-253 (2001); I.W. Selesnick, IEEE Signal Processing Lett. 8: 170-173 (2001); I.W. Selesnick, IEEE Trans. Signal Processing. 52: 1304-1314 (2004).

⁵ I.W. Selesnick, IEEE Trans. Signal Processing. 50: 1144-1152 (2002).

пользовании фреймов вычисляется большее число коэффициентов разложения и увеличивается время счета, но это увеличение может быть не принципиальным. Взамен же приобретается возможность сохранения необходимой информации о сигнале в случае удаления части «нужных» вейвлет-коэффициентов или в случае, когда прямое разложение проводится с недостаточно высокой точностью. Эти обстоятельства являются причиной применения фреймов в приложениях, связанных с передачей и кодированием информации⁶.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию комбинированных алгоритмов очистки информационных сообщений от шумов и случайных искажений, применяющих, например, фреймы и дуальное комплексное вейвлет-преобразование. В последние годы были предложены перспективные разработки, такие как комплексное вейвлет-преобразование двойной плотности (КВПДП)⁷. Алгоритмически, эти методы представляют собой качественно новый уровень в задачах цифровой фильтрации сигналов и изображений.

Отметим, что, несмотря на развитие приемов цифровой фильтрации, использующих вейвлет-преобразование, при их практическом применении сохраняется много открытых вопросов, и выбор конкретного способа фильтрации остается нетривиальной задачей, во многом зависящей от анализируемого сигнала и целей, которые нужно достичь в ходе цифровой обработки экспериментальных данных. В связи с этим сохраняет свою актуальность сравнительный анализ различных приемов фильтрации для выбора подхода, позволяющего минимизировать искажения, которые вносятся при восстановлении сигнала или изображения по вейвлет-коэффициентам.

В частности, недостаточно изучен вопрос о зависимости оптимального вейвлет-базиса от изменения масштаба изображения. Несмотря на то, что во многих работах проводилось сопоставление мягкого и жесткого вариантов задания пороговой функции, выбор порогового значения при вейвлет-фильтрации является неоднозначной задачей. Возможности методов дуального комплексного вейвлет-преобразования и комплексного вейвлет-преобразования двойной плотности подробно изучались на примере изображений, однако ограничения этих подходов для очистки от помех аудио-сигналов изучены недостаточно детально. Модернизация и совершенствование приемов цифровой фильтрации важны для развития телекоммуникационных систем, применяющих вейвлеты для очистки аудио-сигналов от присутствующего фонового шума и случайных искажений. Проведение более детальных исследований, направленных на решение проблемы вейвлет-фильтрации зашумленных сигналов и изображений, определяет актуальность диссертационной работы.

Цель диссертационной работы состоит в выявлении возможностей и ограничений методов фильтрации зашумленных сигналов и изображений, осно-

⁶ R.R. Coifman, D.L. Donoho, in "Wavelets and Statistics". – New York: Springer-Verlag, 1995; V.K. Goyal, M. Vetterli, N.T. Thao, IEEE Trans. Inform. Theory. 44: 16-31 (1998); M. Lang et al., IEEE Signal Processing Lett. 3: 10-12 (1996).

⁷ I.W. Selesnick, IEEE Trans. on Signal Processing. 52: 1304-1314 (2004); I.W. Selesnick, in "Wavelets in Signal and Image Analysis: From Theory to Practice". – Kluwer, 2001; D. Bhonsle, S. Dewangan, Int. J. Scientific and Research Publications. 2(7): 1-5 (2012).

ванных на вейвлет-преобразовании, и развитии подходов, направленных на повышение качества очистки информационных сообщений от помех.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучить влияние выбора базиса и способа коррекции вейвлет-коэффициентов на качество цифровой фильтрации зашумленных сигналов и изображений, проводимой на основе дискретного вейвлет-преобразования.
2. Изучить возможности повышения качества вейвлет-фильтрации зашумленных сигналов и изображений с применением дуального комплексного вейвлет-преобразования.
3. Изучить возможности вейвлет-фильтрации аудио-сигналов с использованием избыточных вейвлет-преобразований (фреймов). Проанализировать влияние числа уровней при разложении сигнала на качество фильтрации помех.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен способ коррекции коэффициентов вейвлет-преобразования, состоящий в сглаживании пороговой функции и устранении ее разрывов, который позволяет снизить искажения при восстановлении сигнала по вейвлет-коэффициентам.
2. Показано, что метод фильтрации зашумленных аудио-сигналов на основе дуального комплексного вейвлет-преобразования обеспечивает уменьшение оптимального значения порогового уровня по сравнению с алгоритмами вейвлет-фильтрации, применяющими вейвлеты Добеши, что приводит к снижению риска случайных искажений восстановленного сигнала.
3. Установлены различия числа уровней разложения аудио-сигналов для фильтров, применяющих вещественные и комплексные вейвлет-базисы, при котором обеспечивается наилучшее качество очистки информационных сообщений от помех.

Теоретическая и практическая значимость результатов:

1. Предложенный способ сглаживания пороговой функции, введенной в пространстве вейвлет-коэффициентов, позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку фильтрации зашумленных сигналов и изображений.
2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для цифровой фильтрации аудио-сигналов, которое может применяться для повышения качества приема информационных сообщений в телекоммуникационных системах.
3. Результаты диссертации могут применяться в учебном процессе при подготовке студентов радиофизических специальностей. В настоящее время результаты используются в лабораторной работе «Вейвлет-фильтрация зашумленных сигналов» спецпрактикума для студентов магистратуры физического факультета Саратовского государственного университета.

Достоверность научных выводов работы основывается на использовании апробированных методов анализа структуры сигналов, устойчивости применяемых алгоритмов к изменениям параметров счета, непротиворечивости результатов и выводов диссертационной работы известным теоретическим представлениям.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Устранение разрывов и сглаживание пороговой функции, применяемой для коррекции вейвлет-коэффициентов, приводит к уменьшению среднеквадратичной ошибки фильтрации и снижению риска случайных искажений восстановленного сигнала.
2. В случае оптимального выбора порогового значения применение дуального комплексного вейвлет-преобразования для цифровой фильтрации зашумленных аудио-сигналов обеспечивает снижение среднеквадратичной ошибки восстановления сигнала по вейвлет-коэффициентам по сравнению с фильтрами, применяющими дискретное вейвлет-преобразование с базисами вейвлетов Добеши.
3. Фильтрация зашумленных аудио-сигналов, передающих речевые сообщения, с применением комплексного вейвлет-преобразования двойной плотности позволяет использовать меньшее количество уровней разложения сигнала в базисе вейвлет-функций по сравнению с фильтрами на основе вейвлетов Добеши, для достижения максимального значения средней оценки разборчивости речи.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертации были представлены на международных научных конференциях: «Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics XIII» (Сан-Хосе, США, 2016), «Saratov Fall Meeting» (Саратов, СГУ, 2015), Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов, СГУ, 2015), 5-й научно-практической конференции “Presenting Academic Achievements to the World” (Саратов, СГУ, 2014). Результаты диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета и Потсдамского института исследований влияния климата (Германия).

По теме диссертации опубликовано 6 работ: 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и международные системы цитирования (Web of Science, Scopus), и 2 статьи в сборниках трудов конференций. Результаты работы использовались при выполнении гранта Российского научного фонда № 14-12-00324.

Личный вклад автора. Результаты исследований, представленные в диссертации, были получены лично автором. Автором проводились численные исследования на основе методов вейвлет-фильтрации. Объяснения полученных результатов и подготовка научных статей были проведены совместно с соавторами и научным руководителем.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает введение, три главы, в которых обсуждается основное содержание работы, заключение и спи-

сок цитированной литературы, содержащий 119 источников, изложена на 121 странице, содержит 42 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи выполненного исследования, обсуждаются научная новизна и научно-практическое значение результатов диссертации, представлены положения и результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации обсуждаются особенности фильтрация сигналов и изображений на основе одномерного дискретного вейвлет-преобразования. Проиллюстрируем основную идею этого подхода на примере временного ряда $x(i) = x(i\Delta t)$. Данный временной ряд поступает на вход квадратурных зеркальных фильтров с характеристиками $g(i)$ и $h(i)$, после прохождения которых осуществляется прореживание выходных сигналов, в результате чего выбираются только четные или только нечетные отсчеты, что соответствует схеме субполосного кодирования⁸. Это прореживание можно провести по той причине, что рассматриваемая фильтрация приводит к уменьшению в два раза частотного диапазона сигнала. Прореженные сигналы вновь поступают на вход фильтров, и данная процедура продолжается до тех пор, пока длина выборки не станет меньше области задания вейвлета. В качестве базисных функций обычно применяют функции семейства Добеши⁹. Соответствующие вейвлеты D^n вычисляются на основе простых алгоритмов и удовлетворяют требованиям локальности, регулярности и знакопеременности. При $n > 4$ они задаются в виде таблиц коэффициентов фильтров. Несмотря на то, что в результате прореживания каждый из временных рядов будет характеризоваться диапазоном частот вдвое меньше, чем у сигнала до фильтрации, наличие двух последовательностей (на выходе каждого фильтра) позволяет однозначно восстановить исходный сигнал при обратном преобразовании.

Коэффициенты разложения по вейвлетам отражают амплитудные характеристики анализируемых процессов на разных уровнях разрешения. Для фильтрации помех небольшие по абсолютной величине вейвлет-коэффициенты на малых масштабах (наиболее подверженные влиянию флуктуаций) отбрасывают перед проведением обратного преобразования (метод пороговой фильтрации). При этом качество фильтрации существенно зависит от выбора варианта задания пороговой функции, на которую умножаются соответствующие коэффициенты перед обратным преобразованием (мягкий или жесткий), порогового значения, определяющего относительное число корректируемых коэффициентов, и от вейвлет-базиса. Подходящий выбор способствует получению более высокого качества очистки сигнала или изображения от помех. В жестком варианте (рис. 1а) функция задается в виде

⁸ M. Vetterli, J. Kovacevic. Wavelets and subband coding. – NJ: Prentice Hall, 1995.

⁹ I. Daubechies. Ten lectures on wavelets. – Philadelphia: S.I.A.M., 1992.

$$v(u) = \begin{cases} u, & |u| \geq C, \\ 0, & |u| < C. \end{cases} \quad (1)$$

При использовании такой пороговой функции остаются неизменными большие по модулю (наиболее значимые) вейвлет-коэффициенты, и обнуляются малые. Для мягкого варианта (рис. 1б) пороговая функция выбирается следующим образом

$$v(u) = \begin{cases} u - C, & u \geq C, \\ u + C, & u \leq -C, \\ 0, & |u| \leq C. \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что в последнем случае уменьшение абсолютных значений всех вейвлет-коэффициентов, включая большие по модулю, приводит к изменению амплитуды восстановленного сигнала.

Применительно к анализу изображений процедура разложения по вейвлетам предусматривает переход к двумерной реализации дискретного вейвлет-преобразования (2D-ДВП). Такой подход, в частности, используется в компьютерной графике в рамках формата JPEG2000. При практической реализации данного формата рассматривается расширение 1D-ДВП, при котором по отдельности анализируются строки и столбцы двумерного изображения. Анализ изображения проводится по горизонталям, вертикалям и диагоналям с одинаковым разрешением, и соответствующие фильтры формируются на основе произведений характеристик НЧ- и ВЧ-фильтров для одномерного случая. На каждом шаге разложения по вейвлетам исходное изображение преобразуется в 4 изображения меньшего размера (1/4 часть исходного).

Для сравнения качества вейвлет-фильтрации, проводимой с применением разных подходов, целесообразно ввести количественные критерии. Применительно к сигналам, обычно рассматривают среднеквадратичную ошибку

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - y(i)]^2. \quad (3)$$

Если один из сигналов является информационным (не содержащим помех), а второй – сигналом, полученным после фильтрации (и частично содержащим флуктуации в случае неидеального фильтра), то полученная величина позволяет судить о качестве очистки информационного сигнала от помех. Эта формула обобщается на двумерный случай при анализе изображений. Дополнительно рассматривают еще одну характеристику – отношение сигнал/шум.

На примере тестового сигнала (трасса сейсмограммы первичного полевого материала, полученного методом отраженных волн) рассматривалась задача фильтрации помехи (поверхностной волны) с применением алгоритмов на ос-

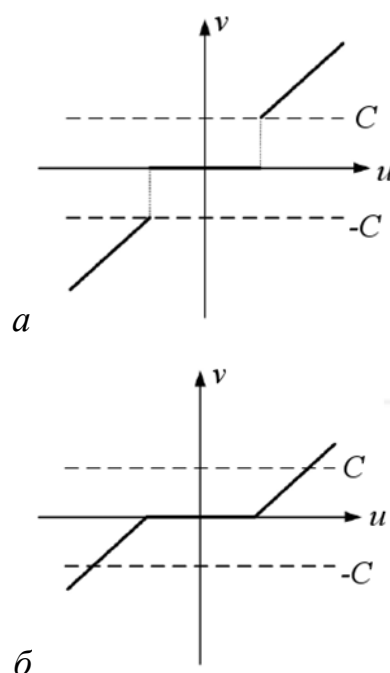


Рисунок 1 – Жесткий (а) и мягкий (б) варианты задания пороговой функции при вейвлет-фильтрации.

нове ДВП. При этом было показано, что для уменьшения искажений отфильтрованного сигнала может использоваться прием, основанный на сглаживании пороговой функции в пространстве вейвлет-коэффициентов, проводимой, например, следующим образом

$$v(u) = \begin{cases} u, & |u| \geq C, \\ C - \sqrt{C^2 - u^2}, & 0 < u < C, \\ \sqrt{C^2 - u^2} - C, & -C < u < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Применение пороговой функции (4) позволяет уменьшить искажения восстановленного сигнала, возникающие для пороговой функции (1). Эти выводы были сделаны для разных примеров зашумленных данных. Во всех примерах сглаживание пороговой функции улучшало качество реконструкции сигнала. Среднеквадратичная ошибка фильтрации при использовании функции (4) была существенно меньше, чем для жесткого варианта (1), и примерно на 0.5%–1% меньше, чем для мягкого варианта (2) при высоком уровне помех. Таким образом, подтверждено преимущество сглаживания пороговой функции для уменьшения ошибки. Однако, поскольку вариант (2) является стандартным вариантом, обеспечивающим сопоставимую точность и некоторое преимущество с

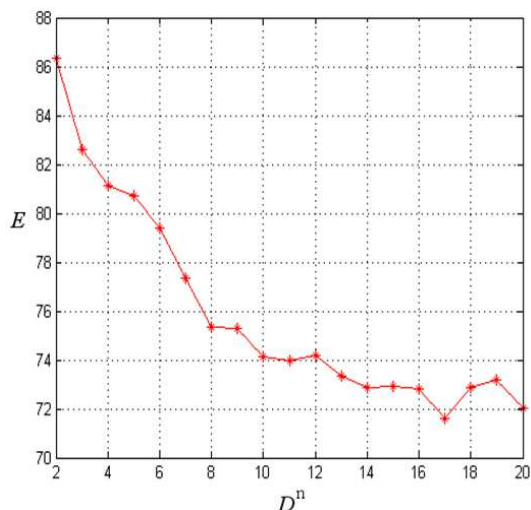


Рисунок 2 – Пример зависимости среднеквадратичной ошибки фильтрации от выбора базисной функции семейства вейвлетов Добеши при жестком варианте задания пороговой функции.

точка зрения скорости вычислений, мы в основном использовали его в задачах фильтрации сигналов в канале связи. На рисунке 2 приведен характерный пример зависимостей среднеквадратичной ошибки фильтрации от выбора базисной функции семейства вейвлетов Добеши. В данном случае наименьшая ошибка достигается при выборе базиса D^{17} (относительная ошибка фильтрации составляет 2.8%). Важно отметить, что настройки вейвлет-фильтров зависят от уровня помех, и данное обстоятельство необходимо учитывать при автоматизации процесса пороговой фильтрации. В диссертации апробирован способ выбора оптимального порогового уровня C , состоящий в построении зависимости среднеквадратичной ошибки от C для тестового примера (зашумленных гармонических колебаний) и определении оптимума данной зависимости при разных значениях дисперсии шума. Для экспериментальных данных, подвергаемых фильтрации, в этом случае определяется величина дисперсии шума, и для полученного значения выбирается оптимальный пороговый уровень C , соответствующий тестовому сигналу. Как показали проведенные исследования, такой подход обеспечивает сравнительно высокое качество фильтрации.

Далее было проведено сопоставление разных приемов фильтрации зашумленных изображений на основе 2D-ДВП. При этом было подтверждено, что зависимость от выбора вейвлет-базиса является неоднозначной, и оптимальный базис меняется при изменении размера изображения. Тем не менее, общей рекомендацией при фильтрации зашумленных изображений является выбор вейвлетов со сравнительно большой областью задания (например, $D^8 - D^{20}$). Также было подтверждено преимущество мягкого варианта задания пороговой функции, который обеспечивает уменьшение не только ошибки фильтрации, но и оптимального порогового уровня (рис. 3). Последнее снижает риск внесения искажений восстановленного сигнала.

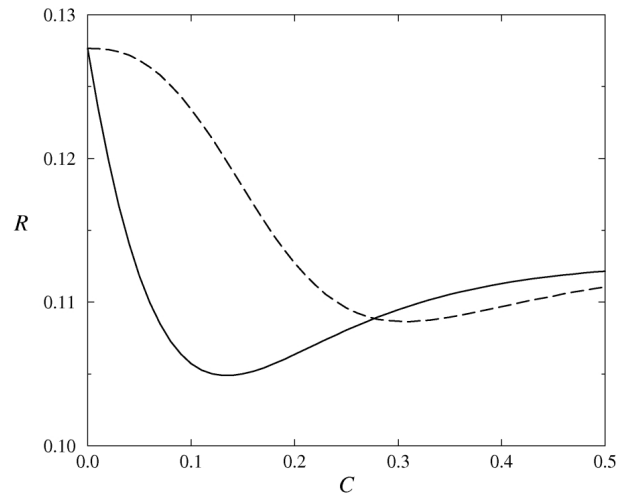


Рисунок 3 – Пример зависимости $R = \sqrt{E}$ от величины порогового уровня C для двух вариантов задания пороговой функции. Сплошная линия – мягкий вариант, пунктир – жесткий. В качестве изображения выбрана фотография здания СГУ.

Во **второй главе** диссертации решается задача фильтрации зашумленных сигналов и изображений на основе дуального комплексного вейвлет-преобразования. В соответствии с методом ДКВП, вводятся в рассмотрение комплексные вейвлеты $\psi^c(t) = \psi^r(t) + j\psi^i(t)$, и на основе функций $\psi^r(t)$ и $\psi^i(t)$ формируются два ортонормированных базиса. Вейвлет-преобразование независимо вычисляется с использованием каждого базиса, в результате чего получаются комплексные вейвлет-коэффициенты. Алгоритмически метод ДКВП сводится к двум независимым пирамидальным разложениям сигнала, и аналогичная процедура проводится для обратного преобразования (синтеза сигнала по его вейвлет-коэффициентам после проведения их коррекции). Общая схема разложения для одномерного варианта ДКВП, применяемого при фильтрации сигналов, приведена на рисунке 4. Выше прямой линии приведено разложение для действительной части ДКВП, а ниже прямой линии – для мнимой части ДКВП. Символами h_0 и g_0 обозначены НЧ-фильтры, а h_1 , g_1 – ВЧ-фильтры. В отличие от стандартного ДВП, накладывается дополнительное требование – скейлинг-функции и вейвлеты

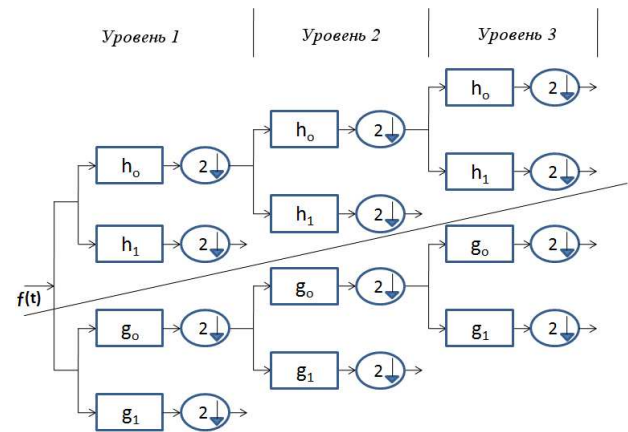


Рисунок 4 – Общая схема прямого преобразования в рамках алгоритма одномерного ДКВП.

должны быть аналитическими функциями, и для выполнения этого требования применяют специальные алгоритмы построения зеркальных фильтров.

Двумерный вариант ДКВП предусматривает расширение описанной процедуры. В частности, если обозначить $(h_x + jg_x)$ – фильтр, применяемый для первой размерности (x), а $(h_y + jg_y)$ – фильтр, применяемый для второй размерности (y), то фильтры, используемые в двумерном случае, могут быть получены следующим образом

$$(h_x + jg_x)(h_y + jg_y) = (h_x h_y - g_x g_y) + j(h_x g_y - g_x h_y). \quad (5)$$

Структура соответствующего алгоритма предусматривает 4 пирамидальных разложений сигнала, аналогичных рисунку 4, которые применяются на этапе анализа, и такое же их количество используется на этапе синтеза. Анализ тестовых примеров (зашумленных гармонических колебаний) позволил убедиться в том, что метод ДКВП позволяет повысить качество фильтрации по сравнению с ДВП. После сопоставления методов вейвлет-фильтрации для тестовых примеров было рассмотрено их применение к экспериментальным данным. С этой целью рассматривались различные аудио-сигналы, преимущественно, голосовые сообщения, к которым аддитивно подмешивался белый шум разной интенсивности. Пример фрагмента голосового сообщения и результаты вейвлет-фильтрации приведены на рисунке 5.

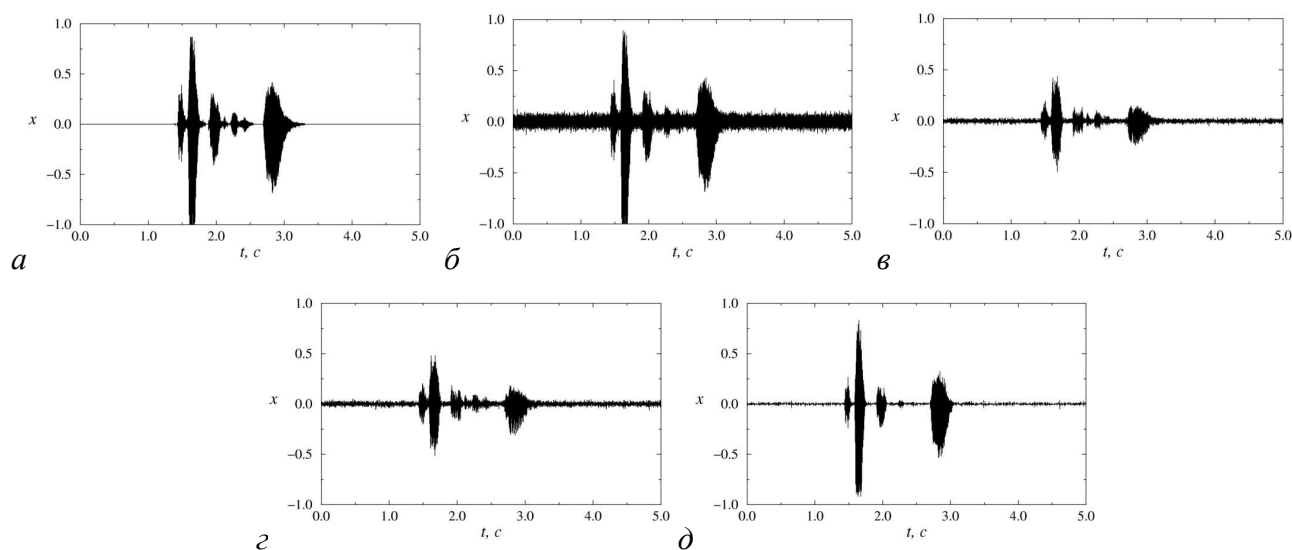


Рисунок 5 – Результаты вейвлет-фильтрации фрагмента голосового сообщения «Привет, как дела?» По оси абсцисс приведено время в секундах, по оси ординат – значения анализируемого сигнала (в произвольных единицах измерения): (а) исходный сигнал, (б) сигнал с добавлением аддитивного белого шума, (в) сигнал после фильтрации на основе 1D-ДВП с жестким заданием пороговой функции, (г) сигнал после фильтрации на основе 1D-ДВП с мягким заданием пороговой функции, (д) сигнал после фильтрации методом ДКВП.

Задание больших значений порогового уровня для более эффективного подавления шума приводит к искажениям информационного сообщения. По этой причине важной задачей является выбор оптимальных параметров проводимой фильтрации. Визуальный анализ сигналов (в), (г), (д) на рисунке 5

свидетельствует о том, что метод ДКВП обеспечивает минимальные искажения. Результаты количественного сопоставления среднеквадратичной ошибки фильтрации представлены на рисунке 6. На этом рисунке приведены результаты расчета минимальной ошибки, которая достигалась при проведении вейвлет-фильтрации на основе ДВП (вариант мягкого задания пороговой функции, базисы вейвлетов Добеши от D^3 до D^{20}), а также результаты расчета минимальной ошибки фильтрации при использовании метода ДКВП. Отметим, что оптимальное значение порогового уровня для этих методов отличается. Для ДКВП оптимальный пороговый уровень равен 0.020, тогда как для ДВП эта величина примерно вдвое больше ($C=0.039$).

При выборе оптимальных значений C метод ДКВП приводит к уменьшению среднеквадратичной ошибки фильтрации. Аналогичные результаты были получены и для других примеров аудио-сигналов. Таким образом, метод ДКВП имеет преимущества по сравнению со стандартным вариантом вейвлет-фильтрации, применяющим 1D-ДВП. В то же время следует отметить, что если выбрать большой уровень C (близкий к оптимальному для 1D-ДВП или превышающий его), то ситуация меняется, и теперь уже 1D-ДВП обеспечивает преимущество с точки зрения минимизации ошибки фильтрации. Вышесказанное означает, что к проблеме задания порогового значения необходимо относиться как к наиболее важному этапу настройки алгоритма очистки сигнала от помех. Целесообразно плавно увеличивать пороговый уровень, отслеживая изменения, происходящие с анализируемым зашумленным сигналом (в частности, визуальный анализ может быть проведен при фильтрации изображений). Если дальнейшее увеличение порогового уровня ухудшает качество очистки сигнала от помех, то нужно поменять значение C в обратном направлении. Данные выводы справедливы и в случае, когда уровень шума превосходит уровень сигнала.

Далее рассмотренный подход был применен для фильтрации зашумленных изображений. Чтобы проводить количественную оценку ошибки фильтрации, по аналогии с исследованиями, проводившимися в 1-й главе диссертационной работы, осуществлялось подмешивание шума в выбранное изображение и последующая оценка качества фильтрации, проводимой на основе разных подходов. На рисунке 7 приведены результаты фильтрации фрагмента зашумленной фотографии с применением алгоритма 2D-ДВП (осуществлялся выбор наилучшего качества фильтрации при варьировании базисной вейвлет-функции – вейвлетов Добеши $D^2 - D^{20}$), а также с применением метода 2D-ДКВП.

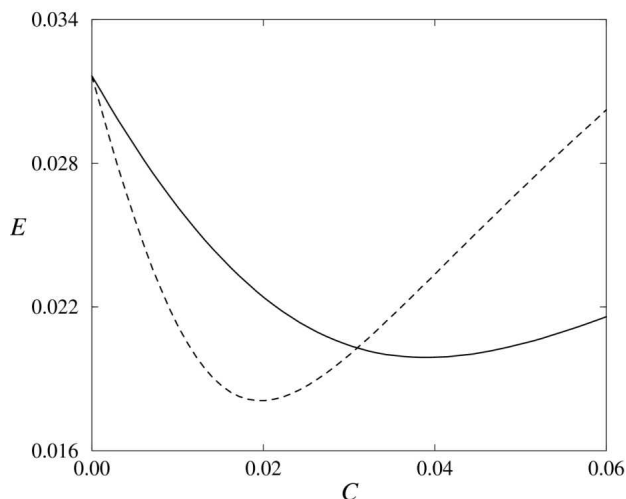


Рисунок 6 – Зависимости среднеквадратичной ошибки восстановления аудио-сигнала на основе 1D-ДВП (сплошная линия, минимальная относительная ошибка 3.1%) и 1D-ДКВП (пунктир, минимальная относительная ошибка 2.3%). Расчеты приведены для вейвлета Добеши D^8 .

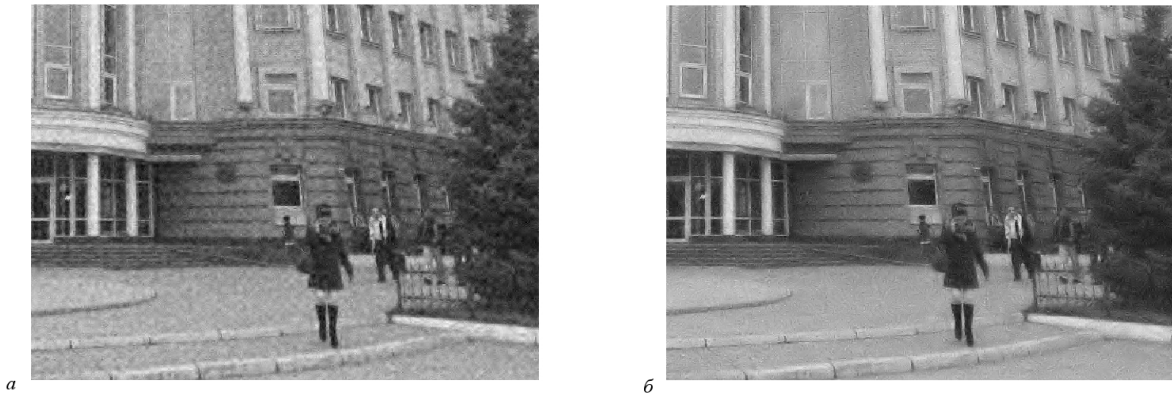


Рисунок 7 – Результаты фильтрации зашумленного изображения на основе метода: (а) 2D-ДВП, (б) 2D-ДКВП

В данном случае даже визуальный анализ позволяет сделать вывод о более высоком качестве фильтрации на основе метода 2D-ДКВП (для наглядности приведен пример для сравнительно большой интенсивности добавленных помех). Расчеты ошибки фильтрации также подтверждают преимущество алгоритма, применяющего 2D-ДКВП.

В третьей главе диссертации решается задача фильтрации зашумленных речевых сообщений на основе фреймов. В предыдущих главах рассмотрение методов вейвлет-фильтрации проводилось для ортонормированных базисов. При этом, однако, сам базис может варьироваться, и при его формировании могут применяться функции с разным числом нулевых моментов и с разной степенью гладкости. Это позволяет подстраивать выбор анализатора в зависимости от целей проводимого исследования. Отказ от требования ортонормированности базиса обеспечивает дополнительную свободу при решении ряда практических задач. Избыточность вейвлет-преобразования при использовании фреймов позволяет сделать методы вейвлет-фильтрации менее зависимыми от случайных искажений «нужных» вейвлет-коэффициентов, характеризующих важные детали информационного сигнала.

В диссертации рассматривается один из примеров избыточных вейвлет-преобразований – дискретное вейвлет-преобразование двойной плотности (ДВПДП). Идеология построения вейвлет-функций в рамках данного подхода имеет аналогию с построением базисов Добеши стандартного 1D-ДВП, применяющего одну скейлинг-функцию $\varphi(t)$ и одну вейвлет-функцию $\psi(t)$. Требования к их определению также состоят в том, что они должны быть локализованными, регулярными и знакопеременными, вычисляться на основе достаточно простых алгоритмов и обеспечивать взаимосвязь введенных функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ с их смещенными и перемасштабированными модификациями.

Однако при построении вейвлетов в рамках метода ДВПДП решается задача обеспечения максимальной гладкости функций при сохранении малой длины их области задания. В отличие от ДКВП, этот метод используют принципиально другой принцип формирования базисов, то есть идеологически это два разных метода вейвлет-фильтрации. ДВПДП можно рассматривать как компромиссный вариант между ДВП и непрерывным вейвлет-преобразованием.

С одной стороны, оно использует меньше коэффициентов разложения по сравнению со случаем непрерывного вейвлет-преобразования и допускает возможность реализации быстрых алгоритмов, что очень важно для задач обработки экспериментальных данных в режиме реального времени. С другой стороны, оно оперирует с количеством коэффициентов разложения, которое примерно вдвое больше, чем для избыточного ДВП. В основе ДВПДП лежит идея разложения сигнала с применением одной базисной функции и двух вейвлет-функций или, иными словами, одного НЧ-фильтра и двух ВЧ-фильтров, для которых записываются те же условия, что и для вейвлетов Добеши:

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \sqrt{2} \sum_n h_0(n) \varphi(2t - n), \\ \psi_1(t) &= \sqrt{2} \sum_n h_1(n) \psi_1(2t - n), \quad \psi_2(t) = \sqrt{2} \sum_n h_2(n) \psi_2(2t - n).\end{aligned}\tag{6}$$

При этом ВЧ-фильтры могут быть выбраны из условия $h_2(n) = h_1(n - 1)$, что можно интерпретировать как разложение сигнала, при котором на новом уровне разрешения осуществляется прореживание только аппроксимирующих коэффициентов (коэффициентов разложения по скейлинг-функциям), тогда как детализирующие коэффициенты (коэффициенты разложения по вейвлет-функциям) сохраняются в полном объеме.

В последние годы значительное внимание уделяется разработке комбинированных алгоритмов, применяющих, с одной стороны, ДВПДП, а с другой стороны, использующих идеологию дополнения вещественных вейвлетов и скейлинг-функций мнимыми частями, сопряженными по Гильберту. Это позволяет создавать более мощные инструменты цифровой обработки сигналов, обеспечивающие возможность устранения таких проблем, как отсутствие инвариантности относительно сдвига, артефакты вейвлет-преобразования и т.д. К числу таких инструментов относится комплексное вейвлет-преобразование двойной плотности (КВПДП), возможности и ограничения которого изучались в диссертационной работе. КВПДП может быть реализовано как в одномерном, так и в двумерном варианте. Этот подход комбинирует основные свойства ДКВП и ДВПДП и основан на применении двух различных скейлинг-функций и четырех различных вейвлет-функций, при котором два вейвлета предусматривают смещение друг относительно друга на $1/2$, и еще два вейвлета формируют пары, обладающие свойством приближенного сопряжения по Гильберту.

В третьей главе диссертации метод КВПДП применялся для фильтрации аудио-сигналов, содержащих речевые сообщения. Для данного примера сигналов использовалась еще одна количественная характеристика качества фильтрации – средняя оценка разборчивости речи (MOS)¹⁰. В соответствии с общепринятыми стандартами международного союза электросвязи для оценки MOS используется критерий PESQ (*perceptual evaluation of speech quality*, ITU-T Recommendation P.862 (2001)).

¹⁰ P. C. Loizou. *Speech enhancement. Theory and Practice* (2-nd ed.). – Boca Raton: CRC Press, 2013; A.W. Rix, A. Bourret, M.P. Hollier, *BT Technology Journal*. 17(1): 24-34 (1999).

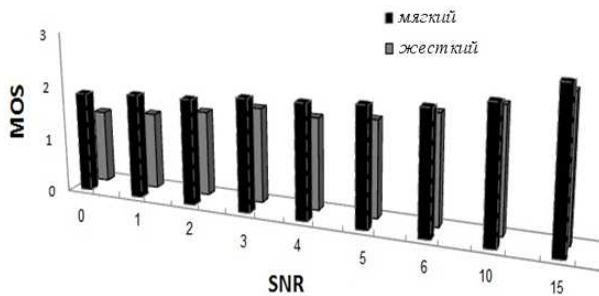


Рисунок 8 – Расчеты MOS при фильтрации на основе 1D-ДВП и разных отношениях сигнал/шум (в дБ).

Проводилось сопоставление стандартного подхода, применяющего 1D-ДВП и базисы вейвлетов Добеши, с методом КВПДП. Вначале аудио-сигнал, содержащий зашумленное речевое сообщение, фильтровался на основе 1D-ДВП. Как и в ранее рассмотренных примерах, использование мягкого варианта задания пороговой функции приводило к снижению ошибки реконструкции сигнала в ходе обратного вейвлет-

преобразования, а также к более высокому значению MOS. Выводы о преимуществе мягкого варианта пороговой фильтрации подтверждаются на основе расчетов MOS при любых рассмотренных отношениях сигнал/шум (рисунок 8).

На следующем этапе варианты пороговой фильтрации сравнивались на разных уровнях разрешения, и проводилась оценка MOS при осуществлении коррекции вейвлет-коэффициентов на первых L уровнях. В соответствии с полученными результатами, с увеличением уровня разрешения снижается среднеквадратичная ошибка вейвлет-фильтрации. Этот результат во многом является ожидаемым, так как учет большего числа уровней позволяет в лучшей степени устранить низкоамплитудные коэффициенты разложения, которые, согласно общепринятой практике, преимущественно ассоциируют с помехами. При этом мягкий вариант пороговой фильтрации на всех уровнях разрешения превосходит жесткий вариант.

Зависимость MOS от уровня разрешения является менее однозначной. Мягкий вариант определения пороговой функции обеспечивает более стабильные результаты, при котором вычисляемая величина MOS демонстрирует небольшие флуктуации относительно среднего уровня, достигая максимум для второго уровня разрешения (в рассмотренном примере голосового сообщения «Привет, как дела?», рис. 8). В аналогичных примерах максимум MOS достигался на 2-3 уровнях разрешения (как для мягкого, так и для жесткого вариантов задания пороговой функции). Таким образом, при применении 1D-ДВП необходимо учитывать не менее 3-х уровней разрешения (это число зависит от многих факторов, в частности, от SNR).

После детального анализа результатов, полученных с применением метода 1D-ДВП, был применен подход на основе 1D-КВПДП. При использовании этого подхода оптимальное значение порогового уровня составило $C=0.0661$, которое обеспечивает величину ошибки $R=0.0376$ и $MOS=2.511$. В случае 1D-ДВП соответствующие значения составили $C=0.114$, $R=0.0456$ и $MOS=1.899$ (мягкий вариант задания пороговой функции) и $C=0.234$, $R=0.047$ и $MOS=1.461$ (жесткий вариант задания пороговой функции). Таким образом, как и в ранее рассмотренных примерах, задание жесткого варианта пороговой функции метода 1D-ДВП не только ухудшает качество вейвлет-фильтрации, приводя к увеличению среднеквадратичной ошибки и уменьшению MOS, но и сопровождается максимальным риском пороговой фильтрации, то есть максимальной

величиной порога C . Это означает увеличение вероятности внесения случайных искажений при восстановлении сигнала. На рисунке 9 приведены зависимости MOS от уровня разрешения для метода 1D-КВПДП. Отметим, что в рамках метода 1D-КВПДП во всех рассмотренных примерах аудио-сигналов, содержащих голосовые сообщения, максимум MOS достигался при меньшем уровне разрешения, чем для 1D-ДВП. Это позволяет сделать вывод о том, что применение 1D-КВПДП обеспечивает возможность ограничиться меньшим числом уровней разрешения чем 1D-ДВП для достижения максимально возможного качества вейвлет-фильтрации.

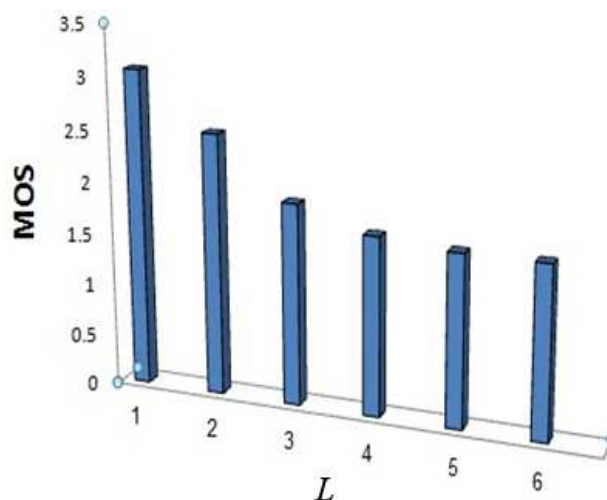


Рисунок 9 – Расчеты MOS при фильтрации на основе 1D-КВПДП на разных уровнях разрешения (разной детализации при разложении сигнала).

В **заключении** диссертации суммируются основные результаты и выводы работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для повышения качества вейвлет-фильтрации и уменьшения вероятности внесения случайных искажений при реконструкции сигнала целесообразно использовать непрерывные и гладкие пороговые функции на этапе коррекции коэффициентов вейвлет-преобразования.
2. Фильтрация зашумленных сигналов и изображений на основе дуального комплексного вейвлет-преобразования обеспечивает снижение среднеквадратичной ошибки восстановления сигнала по вейвлет-коэффициентам по сравнению с фильтрами на основе дискретного вейвлет-преобразования, использующего базисы вейвлетов Добеши.
3. При фильтрации аудио-сигналов, содержащих речевые сообщения, комплексное вейвлет-преобразование двойной плотности позволяет ограничиться меньшим числом уровней разложения сигнала в базисе вейвлет-функций по сравнению с фильтрами на основе вейвлетов Добеши, чтобы достичь максимальное значение средней оценки разборчивости речи.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.С. Ясин, А.Н. Павлов. Цифровая фильтрация аудио-сигналов на основе дуального вейвлет-преобразования // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 14. – С. 33–38.

2. **А.С. Ясин**, О.Н. Павлова, А.Н. Павлов. Вейвлет-фильтрация зашумленных изображений // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 2. – С. 50–56.
3. **А.С. Ясин**, А.Н. Павлов, А.Е. Храмов. Цифровая вейвлет-фильтрация зашумленных данных: влияние порогового уровня и выбора вейвлета // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 149–155.
4. **A.S. Yaseen**, A.N. Pavlov, A.E. Hramov. Speech signal denoising with wavelet-transforms and the mean opinion score characterizing the filtering quality // Proc. SPIE. – 2016. – Vol. 9707. – P. 970719.
5. **А.С. Ясин**, О.Н. Павлова, А.Н. Павлов. Фильтрация зашумленных изображений на основе дуального вейвлет-преобразования // Материалы Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине». – 2015. – Саратов: Изд-во Саратовский источник. – С. 144–146.
6. **A.S. Yaseen**, A.N. Pavlov. Wavelet-based denoising of images // Материалы 5-й научно-практической конференции «Presenting Academic Achievements to the World». – Саратов: Изд-во СГУ, 2014. – С. 198–203.

ЯСИН Алаулдин Салах Ясин

**ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати _____ 2016. Формат 60x48 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Усл. печ. л. ____
Тираж 100 экз. Заказ № _____
