

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права
УДК 534.4; 004.94

ПОРХУН
Максим Игоревич

**МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ И СИНТЕЗА ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ БАНКОВ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Вашкевич Максим Иосифович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры встраиваемых вычислительных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Крот Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией моделирования самоорганизующихся систем государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Давыдова Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Белорусский государственный университет

Защита состоится «8» октября 2026 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.04 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «4» сентября 2026 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат технических наук, доцент



Н. А. Петровский

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов модификации и синтеза звуковых сигналов для моделирования и улучшения слухового восприятия представляет собой актуальную научно-техническую проблему цифровой обработки сигналов. Ее решение требует построения моделей, описывающих функционирование слуховой системы и учитывающих основные механизмы восприятия звука. Сложность состоит в одновременном обеспечении высокой точности воспроизведения этих механизмов и вычислительной эффективности моделей. Вклад в развитие методов моделирования слуха внесли зарубежные ученые (Р. Лайон, Б. Мур, Р. Паттерсон и др.), а также российские и белорусские исследователи (Я. А. Альтман, И. А. Алдошина, Б. М. Лобанов, А. С. Рылов и А. А. Петровский).

Решение данной научно-технической проблемы важно для разработки слуховых аппаратов и иных средств улучшения слуха. Модели слухового восприятия применяются при проверке эффективности алгоритмов слуховых аппаратов без непосредственного привлечения слабослышащих людей. Помимо этого, они служат объективным инструментом сравнения и настройки алгоритмов обработки звука, позволяя количественно оценивать влияние обработки на воспринимаемое качество и разборчивость речи.

Созданию моделей потери слуха посвящено множество исследований. Однако, существует ряд проблем, ограничивающих их применимость. Во-первых, большинство методов опираются на упрощенные представления о слуховых патологиях. Во-вторых, существенным недостатком является отсутствие или ограниченность настройки алгоритмов обработки звука по аудиограмме конкретного человека. В-третьих, более точные модели слухового восприятия, работающие во временной области, имеют высокую вычислительную сложность. Эти ограничения являются барьером на пути к автоматизации процесса оценки эффективности методов обработки сигнала для улучшения слухового восприятия. Актуальной задачей также является разработка новых алгоритмов обработки сигнала для коррекции специфических нарушений слуха (например, при наличии «мертвых зон» в улитке уха), для которых традиционные алгоритмы усиления оказываются неэффективными.

Следовательно, разработка вычислительно эффективных методов моделирования слухового восприятия, а также методов повышения разборчивости речи является актуальной научной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в ходе

составной части научно-исследовательской работы «Речевые интерфейсы в системах мультимедиа» (ГБ 16-2008), а также «Методы и алгоритмы для прикладных технологий обработки мультимедиа данных» (ГБ 21-2008).

Тема диссертационной работы соответствует пункту 4 «Интеллектуальные информационные и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» перечня приоритетных направлений, определенных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.10.2025 № 555 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2026–2030 годы».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертации является повышение эффективности методов обработки сигнала для моделирования и улучшения слухового восприятия.

Поставленная цель предполагает решение ряда задач:

1. Разработать метод моделирования эффекта ухудшения частотной избирательности слуха путем модификации и синтеза звукового сигнала, настраиваемый по аудиограмме слушателя.

2. Разработать метод вычислительно эффективной реализации банка гамматон-фильтров для моделей слухового восприятия, работающих во временной области.

3. Разработать метод ускорения вычисления фазового преобразования, лежащего в основе неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров, применяемого при реализации моделей слухового восприятия, работающих во временной области.

4. Разработать метод улучшения слухового восприятия речи путем модификации и синтеза звукового сигнала, основанный на психоакустически обусловленном переносе его частотных компонент в область остаточного слуха.

Объектом исследования являются системы обработки речевой информации для моделирования и улучшения слухового восприятия. *Предметом исследования* выступают методы обработки звукового сигнала, позволяющие выполнять моделирование и психоакустически обусловленное улучшение слухового восприятия акустической информации, воспринимаемой тугоухим человеком.

Научная новизна

1. Доопределена зависимость коэффициента расширения *roex*-фильтров от частоты и уровня потери слуха: известное выражение для этого коэффициента (модель Нэдзимэ–Мура), справедливое лишь при потере слуха до 65 дБ, распространено на диапазон 65-90 дБ путем линейной интерполяции с последующим сглаживанием его частотной характеристики. В отличие от известных подходов, ограниченных потерей слуха до 65 дБ либо задающих расширение *roex*-фильтров только по степени тугоухости без учета частоты, это позволяет моделировать ухудшение частотной

избирательности для всех степеней тугоухости, включая IV, согласованно с порогами слышимости на каждой частоте.

2. Установлено, что построение фильтра-прототипа неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров (НКМБФ) на основе мультипликативной модели в виде произведения логистических сигмоидальных функций гарантирует монотонность его импульсной характеристики и, как следствие, монотонные спады амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) результирующего банка фильтров, аналогичные спадам гамматон-фильтров. В отличие от фильтров-прототипов, синтезируемых классическими методами и дающих пульсации АЧХ в полосе заграждения, предложенная модель не вносит таких пульсаций, что обеспечивает аппроксимацию характеристик банка гамматон-фильтров (БГФ) и его вычислительно эффективную реализацию – для банка из 100 каналов примерно в 8 раз эффективнее прямой реализации БГФ Паттерсона-Холдсворта в виде набора КИХ-фильтров.

3. Предложена новая структура сдвоенного фазового звена, полученная на основе представления фазового звена в пространстве состояний и вычисляющая выходы каскада из двух фазовых звеньев за один проход. Новизна состоит в том, что предложенная структура имеет тот же критический путь (число слоев графа вычислений), что и одиночное фазовое звено; это, в отличие от прямой реализации цепочки фазовых звеньев, вдвое сокращает глубину графа вычислений цепочки из N фазовых звеньев (с $3N$ до $3/2 \cdot N$ слоев, где N – число звеньев в цепочке) и за счет повышения степени параллелизма ускоряет вычисление фазового преобразования.

4. Предложен способ адаптивного выбора целевой полосы при переносе высокочастотных компонент (согласных звуков) речевого сигнала в область остаточного слуха. В отличие от метода Лю и соавторов (Й.-Т. Лю, Р. Чанг, Ю. Цао, И.-П. Чанг), согласующего ширины исходной и целевой полос в линейном масштабе частот при фиксированной целевой полосе, в предложенном способе эти ширины уравниваются в шкале барков, что позволяет сохранить психоакустический масштаб переносимых частотных компонент.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод модификации и синтеза звукового сигнала для моделирования эффекта ухудшения частотной избирательности слуха, основанный на частотном размытии амплитудного спектра сигнала банком расширенных *goex*-фильтров, степень расширения которых определяется по аудиограмме, отличающийся доопределением частотно-и уровне-зависимого коэффициента расширения *goex*-фильтров на диапазон потери слуха от 65 до 90 дБ, что – в отличие от известных методов, ограниченных потерей слуха до 65 дБ либо учитывающих лишь степень тугоухости без частотной зависимости, – обеспечивает моделирование ухудшения частотной избирательности для всех степеней тугоухости,

включая IV, с учетом уровня потери слуха на каждой частоте.

2. Метод аппроксимации частотных характеристик банка гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров (НКМБФ), отличающийся построением фильтра-прототипа на основе мультипликативной модели в виде произведения логистических сигмоидальных функций, что обеспечивает монотонные спады АЧХ результирующего банка фильтров, аналогичные спадам гамматон-фильтров, и снижает вычислительную сложность реализации 100-канального банка гамматон-фильтров (по числу операций умножения и сложения) примерно в 8 раз по сравнению с прямой реализацией в виде набора КИХ-фильтров.

3. Метод ускорения вычисления фазового преобразования, основанный на предложенной структуре сдвоенного фазового звена, отличающийся тем, что эта структура имеет тот же критический путь, что и одиночное звено, и вычисляет выходы каскада из двух звеньев за один проход, благодаря чему глубина графа вычислений цепочки сокращается вдвое, а вычисление фазового преобразования ускоряется в 1,81 раза.

4. Метод модификации и синтеза звукового сигнала для улучшения слухового восприятия речи, основанный на переносе неслышимых высокочастотных компонент в область остаточного слуха с коррекцией их уровней по кривым равной громкости, отличающийся адаптивным выбором ширины целевой полосы из условия равенства ширин исходной и целевой полос в психоакустической шкале барков – в отличие от известного метода с фиксированной целевой полосой и согласованием ширин в линейном масштабе частот, – что позволяет повысить разборчивость речи в среднем на 6 % по сравнению с необработанным сигналом в условиях моделируемой потери слуха.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка цели и задач исследования, а также обсуждение результатов исследований, полученных соискателем, выполнена научным руководителем М. И. Вашкевичем. В представленных публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты, полученные в ходе выполнения исследований, докладывались и обсуждались на 20, 21, 22, 24, 25 и 26-й международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, Россия, 2018–2020, 2022–2024); 54, 55, 56-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2018–2020).

Опубликованность результатов диссертации

По тематике диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, 9 статей в сборниках материалов научных конференций. Суммарный объем публикаций составляет 5,94 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, общую характеристику работы, пять глав, содержащих аналитический обзор литературы и результаты оригинальных исследований, заключение с рекомендациями по практическому использованию полученных результатов и библиографический список. Полный объем диссертации составляет 113 страниц. Диссертация содержит 83 рисунка на 21 странице и 16 таблиц на 5 страницах. Библиографический список включает 100 наименований и занимает 8 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена рассмотрению существующих методов анализа звуковых сигналов, основанных на моделировании слухового восприятия человека, описывающих как частотную избирательность слуха, так и некоторые другие феномены. Подобные модели используются во многих практических задачах, в том числе при моделировании и улучшении слухового восприятия.

Рассмотрено понятие слуховых (кохлеарных) фильтров, являющихся важной частью моделей слухового восприятия и позволяющих имитировать нелинейную декомпозицию звука ухом в соответствии с принципами психоакустики. На практике чаще всего используются слуховые фильтры: *roex*, гамматон и гаммачирп. Показано, что кохлеарный фильтр, как и модель слухового восприятия, может быть описан либо во временной, либо в частотной области.

Обработка звука в частотной области в модели слухового восприятия осуществляется согласно схеме, показанной на рисунке 1.

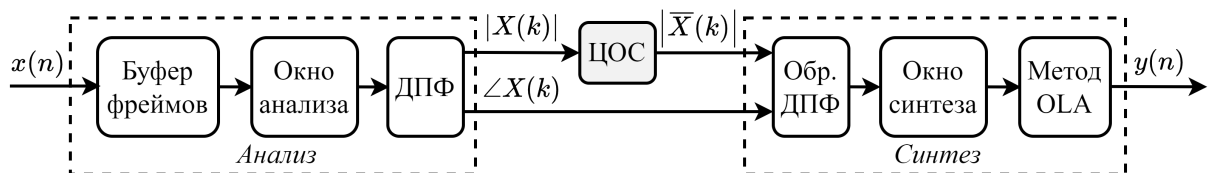


Рисунок 1 – Обработка звука в частотной области в модели слухового восприятия

Входной сигнал $x(n)$ разделяется на перекрывающиеся фреймы. Каждый фрейм умножается на оконную функцию анализа и затем переводится в частотную область при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В зависимости от задачи выполняется модификация амплитудного спектра $|X(k)|$, фазовые же составляющие $\angle X(k)$ остаются

без изменений. Далее амплитудные и фазовые составляющие объединяются и посредством обратного ДПФ переводятся во временную область. Синтез выходного сигнала $y(n)$ осуществляется путем умножения обработанных фреймов на окно синтеза с последующим суммированием с перекрытием.

Обработка звука во временной области в модели слухового восприятия осуществляется согласно схеме, показанной на рисунке 2.

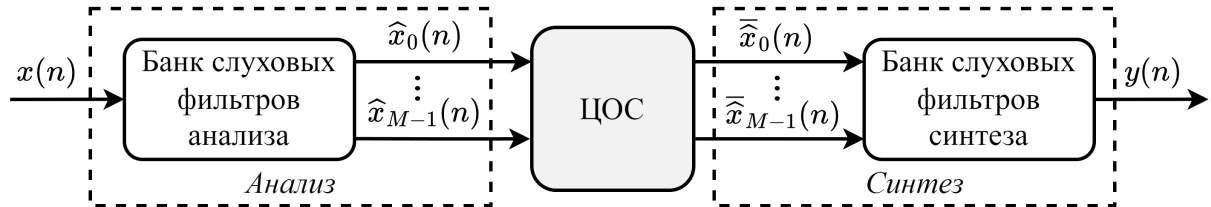


Рисунок 2 – Обработка звука во временной области в модели слухового восприятия

Входной сигнал $x(n)$ разделяется на M каналов при помощи банка фильтров анализа. Каждая субполоса обрабатывается индивидуально в зависимости от специфики применяемой модели. Выходной сигнал $y(n)$ синтезируется при помощи банка фильтров синтеза. В основе обоих банков фильтров могут быть слуховые фильтры, имеющие математическое описание во временной области.

Анализ методов моделирования эффекта потери слуха выявил их основные недостатки: ограниченность в возможности настройки по аудиограмме, лимитированный набор моделируемых аспектов потери слуха, а также высокая вычислительная сложность. Обзор методов коррекции слухового восприятия, основанных на концепции «понижения» частоты, показал схожие проблемы: ограниченные возможности настройки по аудиограмме, недостаточный учет некоторых принципов психоакустики при обработке спектра звукового сигнала.

Вторая глава посвящена разработке метода моделирования ухудшения частотной избирательности слуха на основе спектрального размытия (рисунок 3). Обработка сигнала осуществляется системой анализ-синтез на основе кратковременного преобразования Фурье. Амплитудный спектр ($|X(k)|$) обрабатывается «размывающей» функцией, параметры которой извлекаются из аудиограммы, а фазовый спектр ($\angle X(k)$) остается без изменений. Далее выполняется нормирование амплитудного спектра. Выход $Y(k)$ формируется путем объединения модифицированного амплитудного и исходного фазового спектров.

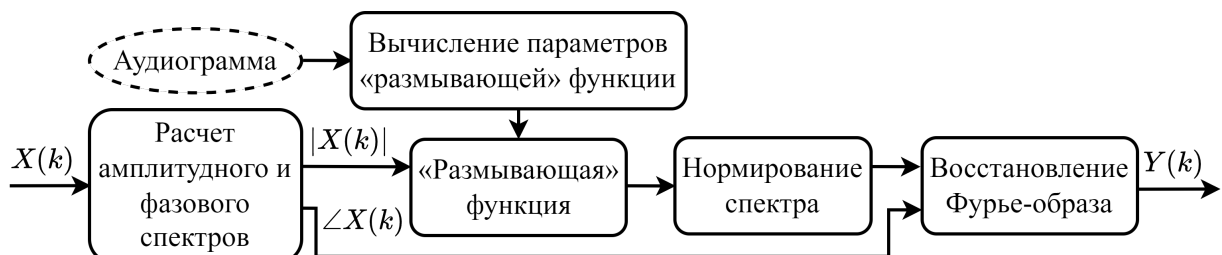


Рисунок 3 – Структура блока спектрального размытия

Предлагается использовать *roex*-фильтры, позволяющие сформировать «шаблоны» слуха нормально слышащего и тугоухого человека. АЧХ *roex*-фильтра с центральной частотой f_c описывается выражением:

$$A(f) = \left(1 + \frac{4(|f - f_c|)}{\text{ERB}(f_c)}\right) \exp\left(-\frac{4(|f - f_c|)}{\text{ERB}(f_c)}\right), \quad (1)$$

где f – частота; ERB – эквивалентная прямоугольная полоса пропускания:

$$\text{ERB}(f_c) = 24,7\alpha(0,00437f_c + 1), \quad (2)$$

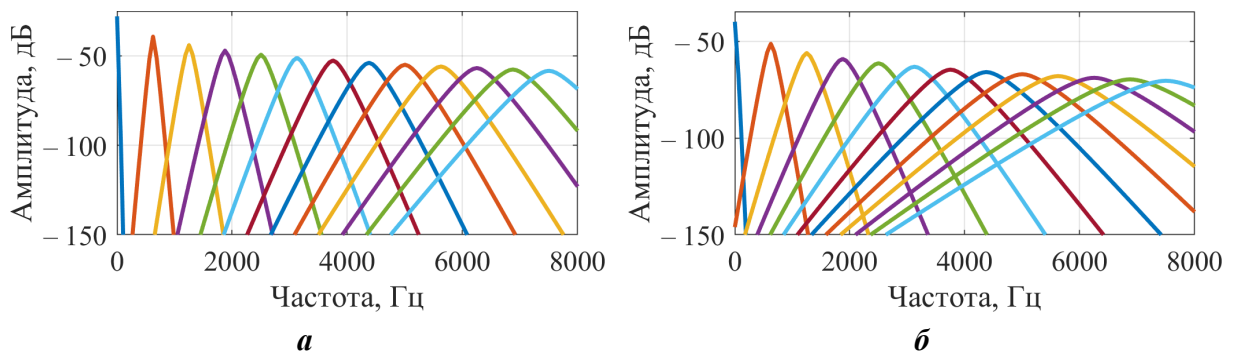
где α – параметр, задающий степень расширения полосы пропускания фильтра.

Коэффициенты α в выражении (2) выступают в качестве настроечных параметров слуховых фильтров тугоухого человека, их значения определяются из аудиограммы. Для нормально слышащего человека $\alpha = 1$. Слуховой образ, формирующийся у слабослышащего человека получается путем умножения амплитудного спектра фрейма на АЧХ гребенки *roex*-фильтров:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_N^{-1} \mathbf{A}_I \mathbf{x}, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_I$ – матрица, содержащая АЧХ *roex*-фильтров слабослышащего; $\mathbf{A}_N$ – матрица, содержащая АЧХ *roex*-фильтров нормально слышащего; $\mathbf{x} = [X(1), X(2), \dots, X(K)]^T$ – вектор спектра исходного фрейма; $\mathbf{y} = [Y(1), Y(2), \dots, Y(K)]^T$ – вектор спектра выходного фрейма.

На рисунке 4 приведены примеры АЧХ *roex*-фильтров, входящих в матрицы $\mathbf{A}_N$ и $\mathbf{A}_I$ для $\alpha = 2$ (показан каждый 10-й фильтр). Видно, что при увеличении параметра α АЧХ *roex*-фильтров расширяются.

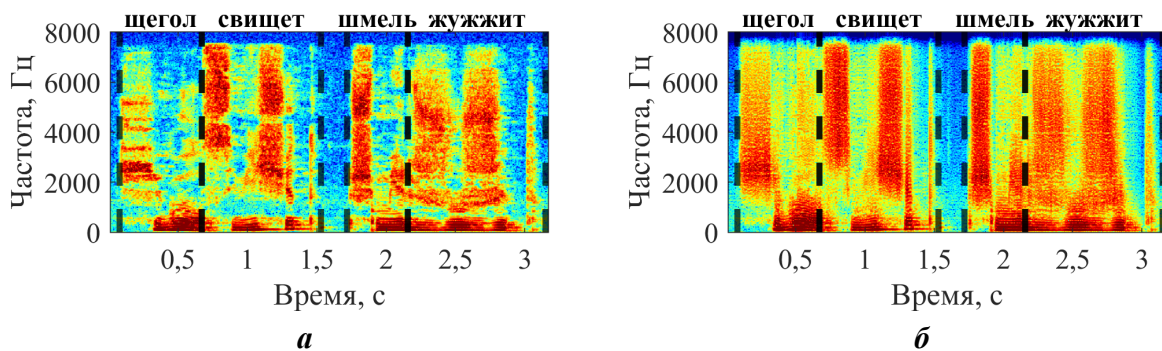


а – фильтры $\mathbf{A}_N$; б – фильтры $\mathbf{A}_I$
Рисунок 4 – Примеры АЧХ гребенки *roex*-фильтров

Определение параметра α выполняется в три этапа [1–А]. На первом этапе аудиограмма интерполируется на сетку центральных частот (f_c) *roex*-фильтров с последующим определением значений потери слуха (HL) в дБ на частотах f_c . На втором этапе вычисляются значения α согласно выражению (4). На третьем этапе происходит усреднение значений α , позволяющее сгладить перепады в функции $\alpha(f_c, \text{HL})$.

$$\alpha(f_c, HL) = \begin{cases} 1, & \text{если } HL \leq 22, \quad \forall f_c, \\ 10^{\frac{0,01348(HL-22)}{1-0,355 \lg(f_c/1000)}}, & \text{если } 22 < HL < 65, f_c \leq 1000, \\ 10^{0,01348(HL-22)}, & \text{если } 22 < HL < 65, f_c > 1000, \\ \frac{6HL}{25} + \alpha(f_c, 65) \cdot (3,6 - \frac{HL}{25}) - \frac{78}{5}, & \text{если } HL \geq 65, \forall f_c. \end{cases} \quad (4)$$

На рисунке 5 показаны спектрограммы исходного и обработанного сигналов при III степени потери слуха. Выходной сигнал демонстрирует частотно-зависимое «размытие» спектра с потерей выраженности высокочастотных компонент, коррелирующее со степенью тугоухости.



а – спектрограмма исходного сигнала; **б** – спектрограмма выходного сигнала

Рисунок 5 – Моделирование эффекта ухудшения частотной избирательности слуха

Проведено экспериментальное исследование с целью определения влияния степени потери слуха на разборчивость речи при наличии и отсутствии фонового шума. В процессе эксперимента 15 участников прослушивали и повторяли обработанные наборы записей тестовых слов, правильность которых фиксировалась. Полученные в результате данные о разборчивости речи представлены в виде диаграмм размаха на рисунке 6.

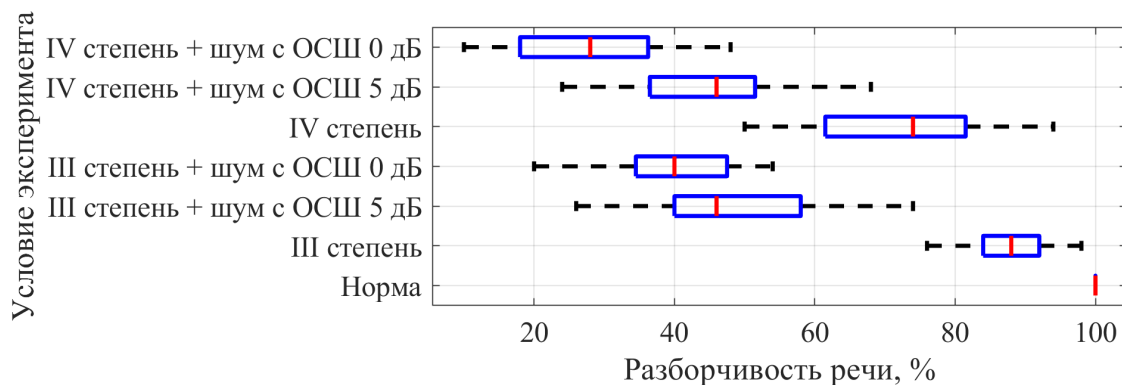


Рисунок 6 – Диаграммы размаха изменения разборчивости речи

Результаты эксперимента показывают, что при ухудшении частотной избирательности слуха снижается и разборчивость речи. При уровне шума 5 дБ и более разборчивость речи резко снижается.

Третья глава посвящена эффективной реализации банка гамматон-фильтров (БГФ) при помощи неравнополосного

косинусно-модулированного банка фильтров (НКМБФ). Для синтеза фильтра-прототипа НКМБФ предлагается использовать функцию логистического сигмоида, поскольку она является монотонной и не имеет переходов через нуль, что обеспечит монотонный спад частотных характеристик. Формирование половины импульсной характеристики фильтра-прототипа осуществляется на основе мультипликативной модели:

$$p(t) = S \prod_{r=1}^R \sigma(k_r t + b_r), \quad t \geq 0, \quad S > 0, \quad (5)$$

где S – масштабирующий коэффициент; k_r – коэффициент наклона; t – время; b_r – коэффициент смещения по временной оси.

Поскольку $p(t)$ непрерывна, то необходимо ее дискретизировать:

$$p(n) = p(n\Delta T), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad N = 2mM, \quad (6)$$

где $p(n)$ – половина импульсной характеристики фильтра-прототипа $\mathbf{h} = [p(0)p(1) \dots p(N/2 - 1)]^T$; N – порядок фильтра-прототипа; $m \in \mathbb{Z}^+$; M – количество каналов; ΔT – шаг дискретизации.

Выражения (5) и (6) определяют коэффициенты только одной половины импульсной характеристики. Такой подход обусловлен тем, что синтезируемый фильтр обладает линейной ФЧХ, которая определяет свойство симметрии его отсчетов во временной области.

Оптимизация фильтра-прототипа НКМБФ основана на минимизации квадратичной ошибки между АЧХ БГФ $|H_k^g(e^{j\omega})|$ и НКМБФ ($|H_k^c(e^{j\Theta(\omega)})|$) в каждом канале:

$$\text{RSS} = \sum_{\omega} \sum_{k=1}^{M-2} (|H_k^g(e^{j\omega})| - |H_k^c(e^{j\Theta(\omega)})|)^2. \quad (7)$$

При расчете ошибки предлагается не учитывать первый ($k = 0$) и последний ($k = M - 1$) каналы, поскольку у НКМБФ они соответствуют ФНЧ и ФВЧ, а у БГФ – полосовым фильтрам, что приводит к некорректной задаче аппроксимации. Минимизация (7) выполняется относительно параметров S , k_r , b_r функции (5). Схема метода расчета фильтра-прототипа показана на рисунке 7.

На начальном этапе происходит расчет АЧХ БГФ $|H_k^g(e^{j\omega})|$. Далее выполняется инициализация параметров модели S , k_r , b_r функции (5) и вычисление коэффициентов фильтра-прототипа $p(n)$ согласно выражению (6). Следующим шагом рассчитывается АЧХ НКМБФ $|H_k^c(e^{j\Theta(\omega)})|$ на основании текущих значений $p(n)$. Далее вычисляется значение функции ошибки RSS с последующей ее минимизацией методом градиентного спуска (средствами библиотеки PyTorch). Расчет градиента по параметру b_r не производится, поскольку его значение фиксируется на этапе инициализации. Минимизация RSS выполнялась в течение 150 итераций.

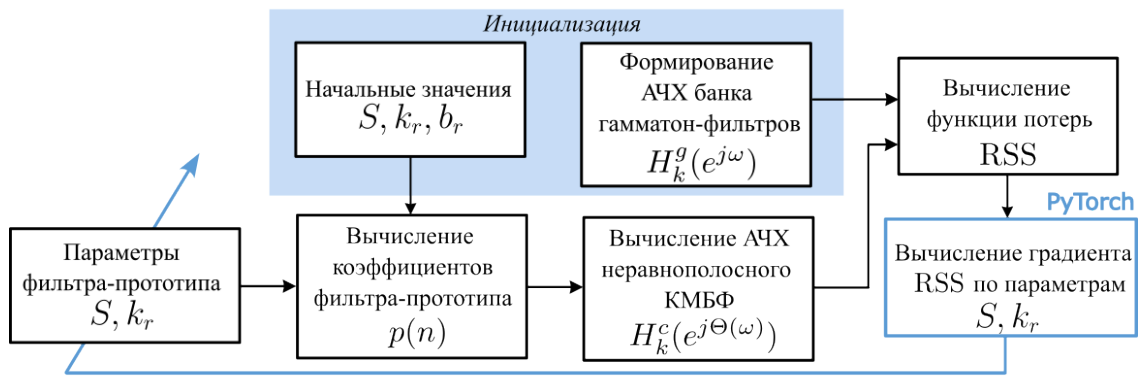


Рисунок 7 – Схема метода расчета фильтра-прототипа

В качестве примера синтезирован 20-канальный банк фильтров со следующими параметрами: порядок фильтра-прототипа $N = 2mM = 2 \cdot 5 \cdot 20 = 200$, частота дискретизации $f_s = 16$ кГц, количество сигмоид R изменялось от 2 до 14 с шагом 2. В результате проведения экспериментов получены значения функции ошибки RSS для разного количества сигмоид R . Определено, что рациональным количеством сигмоид для построения фильтра-прототипа является $R = 8$, при этом значение функции ошибки составляет $RSS = 6,093$. На рисунке 8 показаны сигмоиды, из которых формируется фильтр-прототип для $R = 8$.

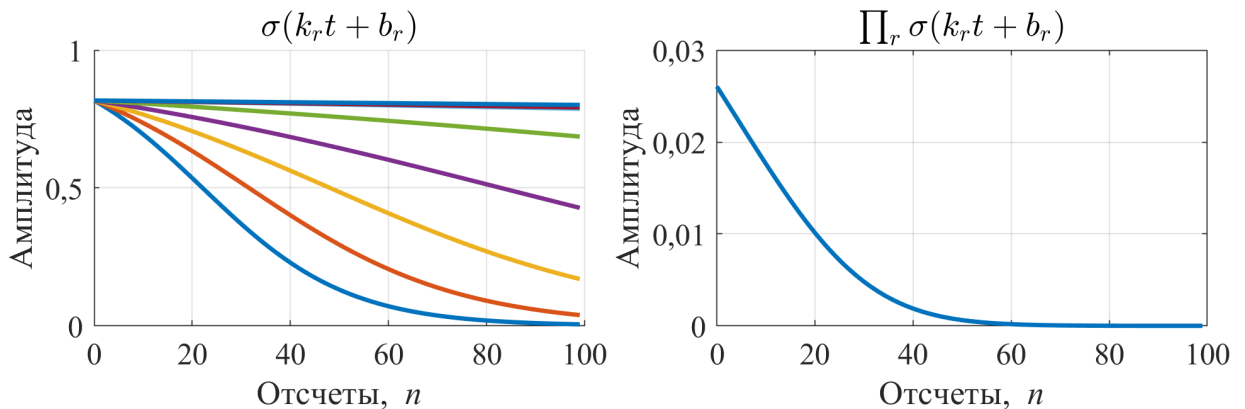


Рисунок 8 – Логистические сигмоиды и половина импульсной характеристики фильтра-прототипа при $R = 8$

Аппроксимация АЧХ БГФ, полученная с использованием предложенного метода для $R = 8$, представлена на рисунке 9. В результате оптимизации коэффициентов фильтра-прототипа АЧХ НКМБФ довольно близка к требуемой АЧХ БГФ ($RSS = 6,093$) и имеет монотонные спады частотных характеристик.

Для сравнения прямой реализации БГФ и НКМБФ были синтезированы 100-канальный БГФ (частота дискретизации 16 кГц) и 100-канальный НКМБФ ($N = 2mM = 2 \cdot 5 \cdot 100 = 1000$). Длина импульсных характеристик БГФ ограничена путем отбрасывания отсчетов с абсолютной амплитудой менее 10^{-7} , в результате чего их суммарная длина составила 41100 отсчетов. Для прямой реализации такого банка

фильтров необходимо 41,1 тыс. МАС-операций. При помощи расчетных выражений из работы [2–А] получены затраты на реализацию данного НКМБФ: 2209 операций умножения и 2901 операция сложения. Таким образом, реализация НКМБФ в $41100 / (2209 + 2901) \approx 8$ раз эффективнее, чем прямая реализация БГФ.

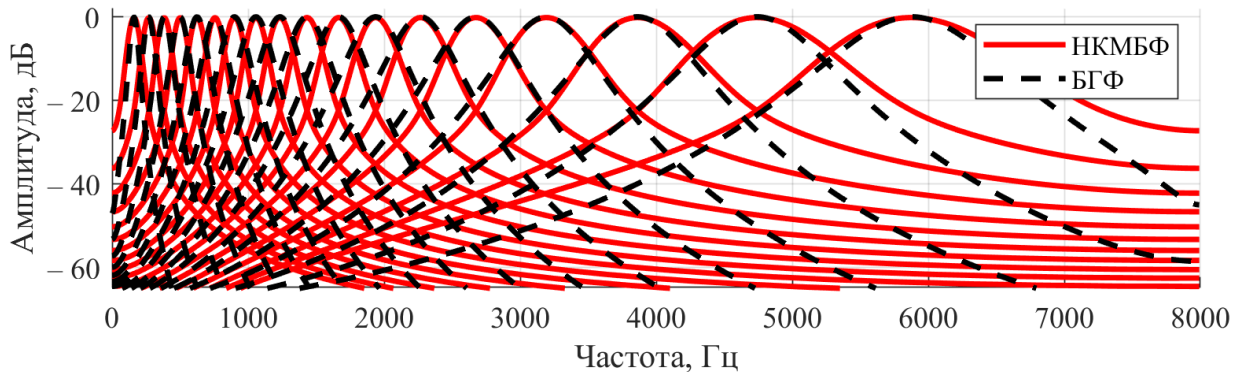


Рисунок 9 – АЧХ БГФ и оптимизированная предложенным методом АЧХ НКМБФ

Четвертая глава посвящена разработке метода ускорения вычисления фазового преобразования. В основе метода лежит структура сдвоенного фазового звена (СФЗ), позволяющая за один вычислительный проход получать выходы каскада, состоящего из двух фазовых звеньев (ФЗ).

Структура цепочки фазовых звеньев (ЦФЗ), реализованной в прямой форме, показана на рисунке 10.

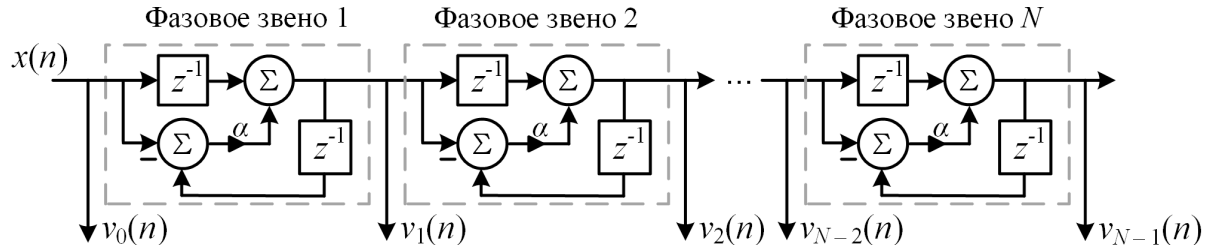


Рисунок 10 – Цепочка фазовых звеньев

Из рисунка 10 видно, что вычислительная сложность ФЗ равна двум сложениям и одному умножению. На рисунке 11, а представлен алгоритм расчета выхода одного ФЗ в ярусно-параллельной форме, который имеет три яруса. Число ярусов крайне важно, поскольку оно позволяет организовать параллельные вычисления. Это связано с тем, что на каждом ярусе выполняются расчеты, непосредственно связанные с результатами вычислений на предыдущем ярусе. Предлагается синтезировать структуру СФЗ, выполняющего в едином вычислительном процессе вычисление выходов каскада из двух фазовых звеньев. На рисунке 12 показан каскад из двух ФЗ, в котором каждое звено реализовано с использованием метода пространства состояний.

Ярусно-параллельная форма СФЗ приведена на рисунке 11, б, из которого видно, что расчет выхода СФЗ соответствует трехъярусному алгоритму. При этом с точки зрения вычислительных затрат реализация

СФЗ требует семь умножений и пять сложений. Если реализовывать каскад из двух ФЗ в прямой форме, то потребуется всего два умножения и четыре сложения. Однако в таком случае понадобится шесть ярусов алгоритма. Следовательно, реализация СФЗ имеет повышенную вычислительную сложность, но позволяет сократить время вычисления за счет распараллеливания. Таким образом, с точки зрения скорости расчета алгоритм СФЗ в два раза эффективнее, чем прямая реализация каскада из двух ФЗ.

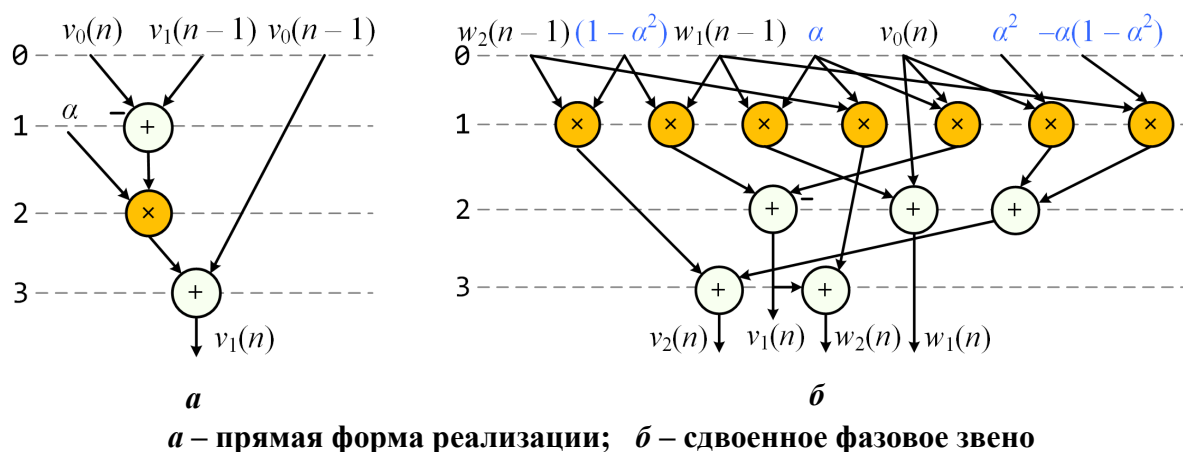


Рисунок 11 – Ярусно-параллельная форма алгоритма вычисления выхода ФЗ

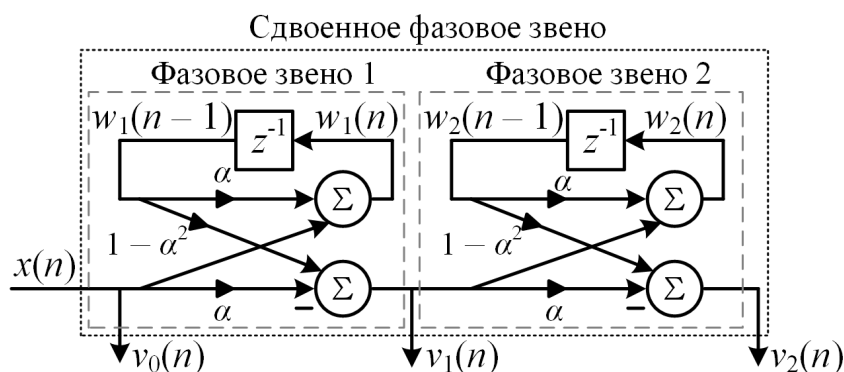


Рисунок 12 – Каскад из двух фазовых звеньев, реализованных с использованием техники пространства состояний

Для оценки эффективности алгоритма вычисления фазового преобразования при помощи СФЗ проведены вычислительные эксперименты. Программно реализованы прямая форма ФЗ и алгоритм СФЗ. Программная система обработки звука представляла собой цепочку из 2048 ФЗ. Анализ вычислительных затрат выполнялся при помощи профилировщика Visual Studio 2022. По результатам экспериментов временные затраты на прямую форму реализации ЦФЗ составили $6129,6 \pm 22$ единиц времени центрального процессора (ЦП), а на параллельную форму СФЗ – $3384,7 \pm 11$ единиц времени ЦП. Таким образом, процесс вычисления выходов ЦФЗ с использованием СФЗ по сравнению с прямой формой ускоряется в 1,81 раза.

Пятая глава посвящена методу модификации и синтеза звукового сигнала для улучшения слухового восприятия, основанному на психоакустически обусловленном переносе его частотных компонент (рисунок 13) из неслышимой области в область остаточного слуха с адаптивной шириной полосы. Входной сигнал $x(n)$ поступает на блок переноса частот, который выполняет перенос высокочастотной информации в низкочастотную область с последующим частотно-зависимым усилением при помощи фильтра-корректора, АЧХ которого настраивается по аудиограмме и формуле усиления NAL-R. Обработке подвергаются только фреймы, содержащие согласные звуки. Для компенсации эффекта «клиппинг» используется лимитер. Далее применяется ФНЧ с частотой среза, равной верхней границе целевой полосы, используемой при переносе частот. Это необходимо для сосредоточения энергии сигнала в области остаточного слуха. В результате синтезированный выходной сигнал $y(n)$ позволяет тугоухому человеку слышать ранее неразличимые звуки.

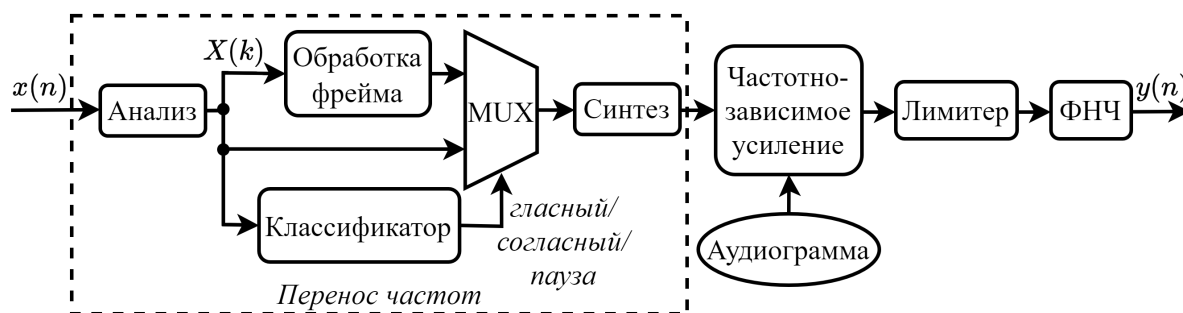


Рисунок 13 – Этапы обработки сигнала в методе улучшения слухового восприятия

Метод переноса частот (рисунок 14) использует две частотные полосы: исходную и целевую. Целевая полоса имеет адаптивную нижнюю границу f_T^L , располагающуюся не ниже 750 Гц, и верхнюю границу $f_T^U = 1750$ Гц. Ширина исходной полосы ΔW_S составляет 1 кГц, а ее центральная частота f_C выбирается равной центроиду спектра. Верхняя f_S^U и нижняя f_S^L границы исходной полосы определяются как $f_S^L = f_C - \Delta W_S/2$ и $f_S^U = f_C + \Delta W_S/2$. Нижняя граница целевой полосы f_T^L выбирается так, чтобы ширины исходной и целевой полос в шкале барков совпадали, что позволяет согласовать психоакустический «масштаб» переносимых компонент.

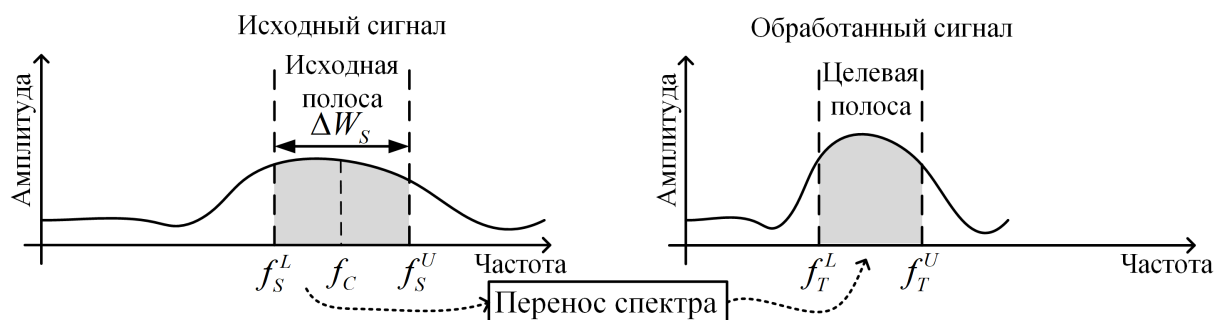


Рисунок 14 – Общая схема переноса частот

Вычисление нижней границы целевой полосы f_T^L заключается в выполнении следующих двух шагов:

1. Определение ширины исходной полосы в шкале барков: $\Delta B_S = B(f_S^U) - B(f_S^L)$, где функция $B(\cdot)$ выполняет переход от частоты в Гц к шкале барков.

2. Вычисление нижней границы целевой полосы: $f_T^L = B^{-1}(B(f_T^U) - \Delta B_T)$, где ΔB_T – ширина целевой полосы в барках ($\Delta B_T = \Delta B_S$).

Для сохранения исходной громкости переносимых компонент вычисляются корректирующие коэффициенты G при помощи кривых равной громкости (рисунок 15):

1. Вычислить средние уровни сигнала $L_T = \frac{1}{|T_{ind}|} \sum_{k \in T_{ind}} |X(k)|$ и $L_S = \frac{1}{|S_{ind}|} \sum_{k \in S_{ind}} |X(k)|$ для целевой и исходной полосы, где T_{ind} и S_{ind} – множества индексов частотных отсчетов в целевой и исходной полосе.

2. Вычислить центральные частоты $F_T = (f_T^U - f_T^L)/2$ и $F_S = (f_S^U - f_S^L)/2$ для целевой и исходной полос.

3. Определить уровень громкости (в фонах) для исходной полосы $p_S = \Psi_{F_S}(L_S)$, где $\Psi_F(L)$ – функция, переводящая уровень сигнала L на частоте F в громкость p .

4. Определить требуемый уровень сигнала $\bar{L}_T$ для целевой частоты F_T , который соответствует громкости p_S исходной полосы: $\bar{L}_T = \Psi_{F_T}^{-1}(p_S)$.

5. Вычислить разницу между требуемым и текущим уровнем сигнала в целевой полосе $\Delta L_T = \bar{L}_T - L_T$.

6. Вычислить весовой коэффициент целевой полосы $G = 10^{\Delta L_T/20}$.

Для компенсации уровня громкости сигнала частотные отсчеты целевой полосы умножаются на полученный весовой коэффициент G .

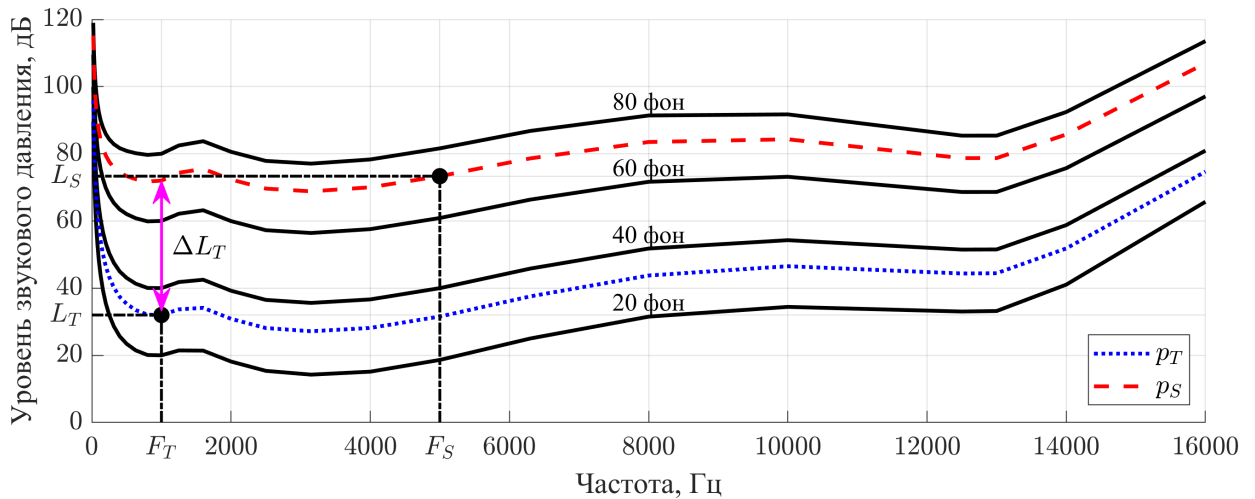
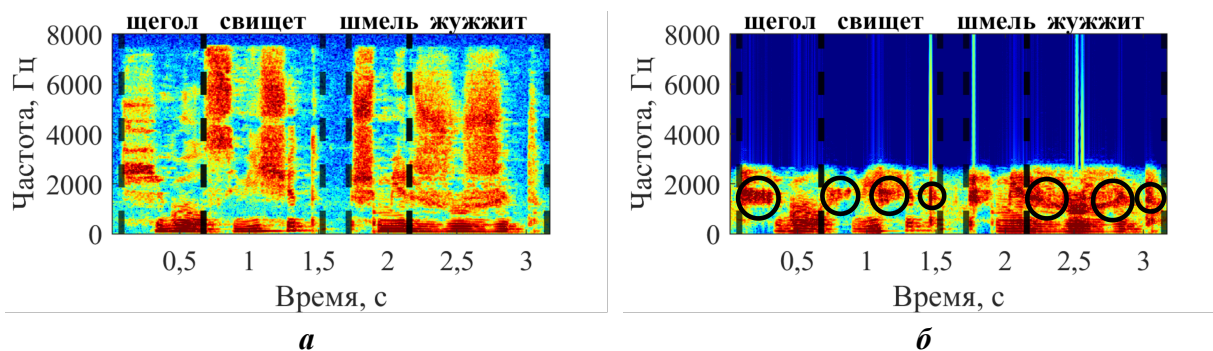


Рисунок 15 – Общая схема компенсации уровня громкости

Проведено моделирование метода переноса частот на тестовом речевом сигнале. Для настройки использовалась аудиограмма при II степени тугоухости. Спектрограммы исходного и обработанного сигналов показаны на рисунке 16. Выходной сигнал (рисунок 16, б) демонстрирует корректность работы всех этапов обработки звука в предложенном методе.



а – спектрограмма исходного сигнала; **б** – спектрограмма обработанного сигнала

Рисунок 16 – Результаты моделирования метода переноса частот

Проведено экспериментальное исследование эффективности метода посредством определения процента разборчивости речи при помощи артикуляционных таблиц слов. Процедура состояла в прослушивании 10 испытуемыми записанных слов с последующим повторением услышанной информации, корректность которой фиксировалась. Для имитации наличия тугоухости использовался метод моделирования потери слуха [6–А, 7–А, 12–А, 13–А]. Результаты эксперимента показали, что применение метода позволило повысить разборчивость речи в среднем на 6 %.

Невысокий прирост процента разборчивости речи объясняется отсутствием адаптационного периода у участников эксперимента. Наличие данного этапа необходимо для «перестройки» слуховой системы и привыкания к новым слуховым ощущениям.

Поскольку в эксперименте использовалась небольшая выборка участников, то была проведена статистическая проверка значимости результатов при помощи парного t -критерия. В результате уровень значимости составил $p = 0,03$, что свидетельствует о значимости полученных данных о разборчивости речи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Метод модификации и синтеза звукового сигнала для моделирования эффекта ухудшения частотной избирательности слуха [1–А], основанный на применении частотного размытия с использованием *roex*-фильтров. Для определения параметров «размывающей» функции используется аудиограмма слабослышащего человека. Предложенный подход обеспечивает автоматический расчет параметра расширения частотной характеристики слуховых фильтров для всех степеней тугоухости, включая IV.

2. Метод аппроксимации частотных характеристик гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров, фильтр-прототип которого основан на мультипликативной модели с использованием логистических сигмоидальных функций [2–А, 8–А, 9–А], обеспечивающий монотонные

спады АЧХ результирующего банка фильтров, аналогичные спадам гамматон-фильтров, и позволяющий реализовать банк гамматон-фильтров для 100 каналов примерно в 8 раз эффективнее прямой реализации в виде набора КИХ-фильтров.

3. Метод ускорения вычисления фазового преобразования, основанный на применении структуры сдвоенного фазового звена [3–А, 4–А, 10–А], позволяющий ускорить процесс вычисления выходов цепочки фазовых звеньев в 1,81 раза по сравнению с прямой формой реализации, что необходимо для увеличения эффективности вычисления выходов неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров.

4. Метод модификации и синтеза звукового сигнала для улучшения слухового восприятия [5–А, 11–А, 14–А], основанный на психоакустически обусловленном переносе его частотных компонент из неслышимой области в область остаточного слуха с адаптивной шириной полосы и последующим частотно-зависимым усилением, позволяющий повысить разборчивость речи в среднем на 6 % [6–А, 7–А, 12–А, 14–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные методы моделирования и переноса частот для улучшения слухового восприятия могут быть внедрены в клинично-диагностических центрах (Центр хорошего слуха, Республика Беларусь, РНПЦ оториноларингологии, Республика Беларусь) для настройки слуховых аппаратов у пациентов со сложными патологиями, а также на производствах слуховых аппаратов (ОАО «Исток-Аудио Интернэшнл», Россия) путем интеграции алгоритма сдвоенного фазового звена в устройства для обработки звука в реальном времени. Помимо того, результаты диссертационной работы могут быть использованы в образовательных целях в рамках изучения цифровой обработки сигналов.

Результаты диссертационного исследования использованы в ОАО «Исток-Аудио Интернэшнл» при разработке слуховых аппаратов, а также в учебном процессе кафедры электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» для специальности 1-40 02 02 «Электронные вычислительные средства» в рамках лекционного курса по дисциплине «Теория и применение цифровой обработки сигналов».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Порхун, М. И. Метод моделирования эффекта ухудшения частотного разрешения слуха у больных нейросенсорной тугоухостью / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 68–82.

2–А. Порхун, М. И. Эффективная реализация гамматон-фильтров на основе неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 5. – С. 1398–1422.

3–А. Porhun, M. I. Short-critical-path algorithm for allpass transform / M. I. Porhun, M. I. Vashkevich // Electronics Letters. – 2023. – Vol. 59, No. 20. – P. 1–3. – DOI: 10.1049/ell2.12986.

4–А. Порхун, М. И. Метод повышения скорости выполнения алгоритма фазового преобразования / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 5. – С. 71–79.

5–А. Порхун, М. И. Метод коррекции слуха на основе психоакустически обусловленного переноса частот в речевом сигнале / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 43–51.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6–А. Порхун, М. И. Моделирование эффекта потери слуха / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : труды XX междунар. конф., г. Москва, 28–30 марта 2018 г. / Рос. науч.-техн. общ. радиотех., электроники и связи им. А. С. Попова. – М., 2018. – С. 228–233.

7–А. Порхун, М. И. Моделирование нейросенсорной тугоухости на основе субполосной компрессии динамического диапазона / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. XXII Междунар. конф., г. Москва, 25–27 марта 2020 г. – М., 2020. – С. 149–153.

8–А. Порхун, М. И. Моделирование частотной характеристики банка гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. XXIV Междунар. конф., г. Москва, 30 марта – 1 апреля 2022 г. / Рос. науч.-техн. общ. радиотех., электроники и связи им. А. С. Попова. – М., 2022. – С. 53–57.

9–А. Порхун, М. И. Оптимизационный метод проектирования фильтра-прототипа для аппроксимации частотных характеристик гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. XXVI Междунар. конф., г. Москва, 27–29 марта 2024 г. / Рос. науч.-техн. общ. радиотех., электроники и связи им. А. С. Попова. – М., 2024. – С. 71–76.

10–А. Порхун, М. И. Ускоренный алгоритм вычисления цепочки фазовых звеньев для систем цифровой обработки сигналов на основе фазового преобразования / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. XXV Междунар. конф., г. Москва, 29–31 марта 2023 г. / Рос. науч.-техн. общ. радиотех., электроники и связи им. А. С. Попова. – М., 2023. – С. 73–77.

11–А. Порхун, М. И. Метод переноса частот в речевом сигнале для коррекции слуховых патологий / М. И. Порхун, М. И. Вашкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : докл. XXI Междунар. конф., г. Москва, 27–29 марта 2019 г. – М., 2019. – С. 112–116.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

12–А. Порхун, М. И. Система моделирования эффекта потери слуха по аудиограмме / М. И. Порхун // Компьютерные системы и сети : материалы 54-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Минск, 23–27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 2018. – С. 244–246.

13–А. Порхун, М. И. Использование информации о возрастных изменениях слуха при моделировании нейросенсорной тугоухости / М. И. Порхун // Компьютерные системы и сети : сб. тезисов докл. 56-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Минск, 21–24 апреля 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 2020. – С. 229–231.

14–А. Порхун, М. И. Метод компенсации уровня громкости при переносе частот в речевом сигнале / М. И. Порхун // Компьютерные системы и сети : 55-я юбилейная науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Минск, 22–26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Мн., 2019. – С. 278–280.



РЕЗЮМЕ

Порхун Максим Игоревич

Методы модификации и синтеза звуковых сигналов на основе банков цифровых фильтров для моделирования слухового восприятия и повышения разборчивости речи

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, перенос частот в речевом сигнале, слуховые фильтры, неравнополосные косинусно-модулированные банки фильтров (НКМБФ), модель слухового восприятия, моделирование потери слуха, улучшение слухового восприятия

Цель работы: повышение эффективности методов обработки сигнала для моделирования и улучшения слухового восприятия.

Методы исследования: в работе использовались методы цифровой обработки сигналов, математического моделирования, методы оптимизации, спектрального анализа, статистические методы анализа данных.

Полученные результаты и их новизна: разработан метод модификации и синтеза звукового сигнала для моделирования эффекта ухудшения частотной избирательности слуха, особенностью которого является извлечение параметров «размывающей» функции из аудиограммы для всех степеней тугоухости, включая четвертую; разработан метод аппроксимации частотных характеристик гамматон-фильтров при помощи неравнополосного косинусно-модулированного банка фильтров, особенностью метода является использование мультипликативной модели в виде произведения логистических сигмоидальных функций при построении фильтра-прототипа, обеспечивающей монотонные спады АЧХ результирующего банка фильтров; предложена новая структура сдвоенного фазового звена, позволяющая за один проход вычислять выходы каскада из двух фазовых звеньев, что повышает скорость выполнения алгоритма фазового преобразования; разработан метод модификации и синтеза звукового сигнала для улучшения слухового восприятия, особенностью метода является адаптивный выбор ширины целевой полосы переноса в психоакустической шкале барков, а также использование принципа равной громкости, позволяющего сохранить психоакустический масштаб переносимых компонент.

Степень использования: методы обработки звуковой информации использованы в ОАО «Исток-Аудио Интернэшнл» при разработке слуховых аппаратов, а также в учебном процессе кафедры электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» для специальности 1-40 02 02 «Электронные вычислительные средства».

Область применения: методы модификации и синтеза звуковых сигналов на основе банков цифровых фильтров могут быть использованы для создания и верификации методов обработки сигналов в слуховых аппаратах.

РЭЗІЮМЭ

Порхун Максім Ігаравіч

Метады мадыфікацыі і сінтэзу гукавых сігналаў на аснове банкаў лічбавых фільтраў для мадэлявання слыхавога ўспрымання і павышэння разборлівасці маўлення

Ключавыя словы: апрацоўка маўленчых сігналаў, перанос частот у маўленчым сігнале, слыхавыя фільтры, няроўнапалосныя косінусна-мадуляваныя банкі фільтраў (НКМБФ), мадэль слыхавога ўспрымання, мадэляванне страты слыху, паляпшэнне слыхавога ўспрымання

Мэта работы: павышэнне эфектыўнасці метадаў апрацоўкі сігналу для мадэлявання і паляпшэння слыхавога ўспрымання.

Метады даследавання: у рабоце выкарыстоўваліся метады лічбавай апрацоўкі сігналаў, матэматычнага мадэлявання, метады аптымізацыі, спектральнага аналізу, статыстычныя метады аналізу даных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны метады мадыфікацыі і сінтэзу гукавога сігналу для мадэлявання эфекту пагаршэння частотнай выбіральнасці слыху, асаблівасцю якога з'яўляецца вылучэнне параметраў «размывальнай» функцыі з аўдыяграмы для ўсіх ступеняў тугавухасці, у тым ліку чацвертай; распрацаваны метады апраксімацыі частотных характарыстык гаматон-фільтраў пры дапамозе НКМБФ, асаблівасцю метаду з'яўляецца выкарыстанне мультыплікатывнай мадэлі ў выглядзе здабытку лагістычных сігмаідалных функцый пры сінтэзу фільтра-прататыпа, якая забяспечвае манатонныя спады АЧХ выніковага банка фільтраў; прапанавана новая структура здвоянага фазавога звяна, якая дазваляе за адзін праход вылічаць выходы каскада з двух фазавых звенаў, што павышае хуткасць выканання алгарытму фазавога пераўтварэння; распрацаваны метады мадыфікацыі і сінтэзу гукавога сігналу для паляпшэння слыхавога ўспрымання, асаблівасцю метаду з'яўляецца адаптыўны выбар шырыні мэтавай паласы пераносу ў шкале баркаў, а таксама выкарыстанне прынцыпу роўнай гучнасці, які дазваляе захаваць псіхаакустычны маштаб кампанент, што пераносяцца.

Ступень выкарыстання: метады апрацоўкі гукавой інфармацыі выкарыстоўваюцца ў ААТ «Істок-Аўдыё Інтэрнэшнл» пры распрацоўцы слыхавых апаратаў, а таксама ў навучальным працэсе кафедры электронных вылічальных сродкаў установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» для спецыяльнасці 1-40 02 02 «Электронныя вылічальныя сродкі».

Галіна ужывання: распрацаваныя метады мадыфікацыі і сінтэзу гукавых сігналаў на аснове банкаў лічбавых фільтраў могуць быць выкарыстаны для стварэння і верыфікацыі метадаў апрацоўкі сігналаў у слыхавых апаратах.

SUMMARY

Porhun Maxim Igorevich

Methods of sound signal modification and synthesis based on digital filter banks for auditory perception modeling and speech intelligibility enhancement

Key words: speech signal processing, frequency transposition in speech signals, auditory filters, warped cosine-modulated filter banks (WCMFB), auditory perception model, hearing loss simulation, auditory perception enhancement

The aim of the work: improving the efficiency of signal processing methods for simulation and enhancement of auditory perception.

Research methods: the work used digital signal processing methods, mathematical modeling, optimization methods, spectral analysis, and statistical methods of data analysis.

Results and their novelty: a method for sound signal modification and synthesis has been developed to simulate the effect of reduced auditory frequency selectivity, featuring the extraction of «blurring» function parameters from an audiogram for all degrees of hearing loss, including the fourth; a method for approximating the frequency characteristics of gammatone filters using a WCMFB has been developed, featuring the use of a multiplicative model as a product of logistic sigmoid functions in the prototype filter design, which ensures monotonic roll-off of the filter bank magnitude responses; a new dual allpass filter structure is proposed, enabling single-pass computation of a two-stage cascade output, which speeds up the allpass transform algorithm; a method for sound signal modification and synthesis to improve auditory perception has been developed, featuring the adaptive selection of the target band width in the psychoacoustic Bark scale, as well as the application of the equal-loudness principle to preserve the psychoacoustic scale of the transposed components.

Usage: the sound signal processing methods were implemented at JSC «Istok-Audio International» for hearing aid development, as well as in the educational process of the Department of Embedded Computing Systems at the «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» for the specialty 1-40 02 02 «Electronic Computing Facilities».

Field of application: the developed methods for sound signal modification and synthesis based on digital filter banks can be used for the development and verification of signal processing methods in hearing aids.

Научное издание

Порхун Максим Игоревич

**МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ И СИНТЕЗА ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ БАНКОВ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики

Подписано в печать 27.08.2026.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,5.

Формат 60×84 1/16.
Отпечатано на ризографе.
Тираж 60 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,63.
Заказ 177.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск