

На правах рукописи



Холкина Наталья Евгеньевна

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

Специальность 2.2.15 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир - 2022

Работа выполнена на кафедре «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный руководитель:

Проскураков Александр Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника», Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Официальные оппоненты:

Майстренко Василий Андреевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Средства связи и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Пальгуев Дмитрий Анатольевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Защита диссертации состоится 14 декабря 2022 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.281.01 в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 14 октября 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01 Самойлову А.Г. Тел. (4922) 534-238, e-mail: ags@vlsu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.281.01,
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Настоящая работа посвящена исследованию, обработке и методам моделирования акустических сигналов в оперативно-командных телекоммуникационных системах обмена информацией и аудиообмена. Обмен информацией является важным средством обеспечения оперативного управления сложными объектами и обеспечивает их надежное функционирование, что предъявляет повышенные требования к достоверности передачи информации и к характеристикам эффективности телекоммуникационных систем. Необходимость исследования и решения ряда проблем технологической связи обусловлена явлениями эха и реверберации, а также шумами и помехами природного и техногенного происхождения.

В работе приведены результаты исследования и обработки акустических сигналов, а также рассмотрены методы их моделирования в объектовых телекоммуникационных системах громкоговорящей связи. Передача речевой информации является основным и важнейшим средством обеспечения оперативного управления сложными объектами, а её качество обеспечивает надежное функционирование вышеуказанных систем. Это обуславливает предъявление повышенных требований к обеспечению качества передачи информации и к характеристикам эффективности телекоммуникационных систем.

На текущий момент подобные системы активно исследуются и развиваются в теоретическом и в прикладном аспектах, происходит совершенствование алгоритмов обработки речевой информации. Исследуются такие важные для технологической связи характеристики как разборчивость, устойчивость и надежность связи. Исследуются характеристики узнаваемости абонентов; вопросы борьбы с акустическим эхом, шумами и помехами; вопросы анализа вероятностных характеристик стандартизированных слогов; вопросы анализа процессов в системах с коммутируемыми фильтрами.

Методам повышения качества передачи речевой информации в системах телекоммуникаций, посвящены работы Фурдужева В.В., Сапожкова М.А., Скучика Е., Фланагана Дж., Покровского П.Б., Кропотова Ю.А., Cohen I., Hansler E.

Однако, известные алгоритмы обработки сигналов, существующие методы увеличения эффективности телекоммуникационных систем обмена речевой информацией требуют проведения более тщательных исследований, разработки новых методов, требуют совершенствования и уточнения моделей информационных сигналов, разработки новых алгоритмов анализа и обработки речевых сигналов.

Объект исследования – речевые сигналы и акустические помехи, передаваемые по каналам телекоммуникационных систем.

Предмет исследования – методы, модели и алгоритмы анализа речевых сигналов, повышающие эффективность передачи аудиоинформации в телекоммуникационных системах.

Цель диссертационной работы – разработка методики и алгоритмов повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем передачи речевой информации.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Создание методики оценивания функции плотности вероятностей и спектральных характеристик отдельных сегментов речевого сигнала, наблюдаемых, в том числе, на фоне помех, в целях повышения эффективности адаптивного подавления акустических помех.

2. Разработка модели гистограммной оценки плотности вероятностей.

3. Разработка алгоритма выделения основного канала акустической обратной связи, потребность в котором присуща многим акустическим системам, в целях подавления эха и реверберации.

4. Разработка адаптивного алгоритма подавления эха и реверберации, совмещенного с алгоритмом выделения сигнала в основном канале акустической обратной связи, и с алгоритмом подавления акустических помех.

5. Определение области режекции в низкочастотной части спектра для повышения эффективности подавления акустических помех.

6. Разработка алгоритма компенсации и программного обеспечения адаптивного управления областями режекции для подавления сосредоточенных акустических помех.

7. Разработка адаптивного алгоритма подавления аддитивных акустических помех.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

1. Разработана методика оценивания слоговой разборчивости в системах телекоммуникаций, отличающаяся применением сеточной функции, обеспечивающая практическое оценивание слоговой разборчивости по отношению сигнал/помеха.

2. Разработана модель гистограммной оценки плотности вероятностей, отличающаяся аппроксимацией речевых сигналов по системе экспоненциальных функций и аппроксимацией акустических шумов по системе гауссовых функций, позволяющая получить погрешность оценивания не более 5%.

3. Разработан алгоритм формирования сигнала управления автоматическим выключением пораженных сосредоточенными помехами каналов, отличающийся

применением адаптивной пороговой обработки, что позволяет получить отношение сигнал/помеха более 20 дБ и обеспечить слоговую разборчивость более 93%.

4. Разработан алгоритм подавления эхосигналов и сосредоточенных акустических помех, позволяющий подавить аддитивные и сосредоточенные акустические помехи на 30 дБ для обеспечения помехоустойчивости телекоммуникационных систем.

Методы исследования базируются на методах параметрической оптимизации, локальной аппроксимации и интерполяции, методах теории вероятностей и математической статистики, цифровой обработки сигналов, спектральном анализе.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Практическая значимость результатов работы заключается в создании новых алгоритмов подавления аддитивных и сосредоточенных акустических помех, составивших основу комплекса программ по исследованию параметров и спектральных характеристик акустических сигналов, а также оценки эффективности предложенных алгоритмов.

Применение разработанных алгоритмов позволяет повысить эффективность и помехоустойчивость информационных коммуникаций в объектовых телекоммуникационных системах за счет комплексного решения следующих задач: подавления сосредоточенных помех, эхо компенсации и подавления аддитивных помех, а также достижения плановых показателей слоговой разборчивости речи не менее 93%.

Результаты диссертационной работы:

Внедрены в программное обеспечение оперативно-командных телекоммуникационных систем громкоговорящей связи, трансляции и оповещения в ходе выполнения ОКР «Модернизация комплекса оперативно-командной громкоговорящей и телефонной связи «КТС-01ЦС»», выполняемой АО «Муромский радиозавод».

Используются в учебном процессе в Муромском институте (филиале) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 09.03.01, 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника». Применение результатов исследований в учебном процессе и в производстве подтверждено актами внедрения.

Соответствие паспорту специальности. Содержание работы соответствует паспорту специальности ВАК 2.2.15 в части пунктов 2,8,14:

2. Исследование процессов генерации, представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио- и мультимедиа информации;

разработка рекомендаций по совершенствованию и созданию новых соответствующих алгоритмов и процедур.

8. Исследование и разработка новых сигналов, модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов, обеспечивающих высокую надежность обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех.

14. Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценивания слоговой разборчивости в системах информационных коммуникаций, которая позволяет осуществить практическое оценивание слоговой разборчивости по отношению сигнал/помеха в телекоммуникационных системах и громкоговорящей связи.

2. Модель гистограммной оценки плотности вероятностей, позволяет получить погрешность оценивания не более 5%.

3. Алгоритм формирования сигнала управления автоматическим выключением пораженных сосредоточенными помехами каналов, который позволяет получить отношение сигнал/помеха более 20 дБ и обеспечить слоговую разборчивость более 93%.

4. Адаптивный многоканальный алгоритм подавления эхосигналов и сосредоточенных акустических помех, который обеспечивает помехоустойчивость телекоммуникационных систем.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 23-ей Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2021), опубликованы в материалах и сборниках тезисов докладов на все-российских и международных конференциях: IV Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), XV Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (Москва, 2019), X-XII Все-российских научных Зворыкинских чтениях «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» (Муром, 2018-2022); научно-технических семинарах кафедры «Электроники и вычислительной техники» Муромского института в 2017-2022.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 2 статьи проиндексированы в наукометрической базе SCOPUS, 8 статей в центральных изданиях, 6 докладов на научных конференциях; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все результаты, изложенные в работе, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Постановка цели и задач, обсуждение планов исследований и полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем

Структура и объем работы. Диссертационная состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 127 наименований и приложений. Работа включает 157 страниц машинописного текста, содержит 48 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение диссертации обосновывает актуальность поставленной темы научного исследования. В нем определяется объект и предмет для анализа и исследования. Представлены ведущие ученые, которые внесли существенный вклад в развитие методов повышения качества передачи речевой информации в системах связи. Формулируется цель работы, а также задачи, решение которых необходимо для её достижения. Показана научная новизна проводимых исследований и основные возможности для практического применения разработанных моделей, методов и алгоритмов. Сформулированы основные положения, которые выносятся на защиту. Приведены сведения о проведенной апробации работы и публикациях, представляющих важнейшие результаты проведенных исследований.

Первая глава демонстрирует современное состояние вопроса исследования акустических сигналов с целью повышения помехоустойчивости информационно-коммуникационных систем, функционирующих в помеховой обстановке.

Рассмотрено как формируется акустическая обратная связь в телекоммуникационных системах с распределенным запаздыванием (рисунок 1). Представленная на рисунке 1 модель, содержит следующие элементы: 1 – микрофон, 2 – устройство излучения информационного сигнала.

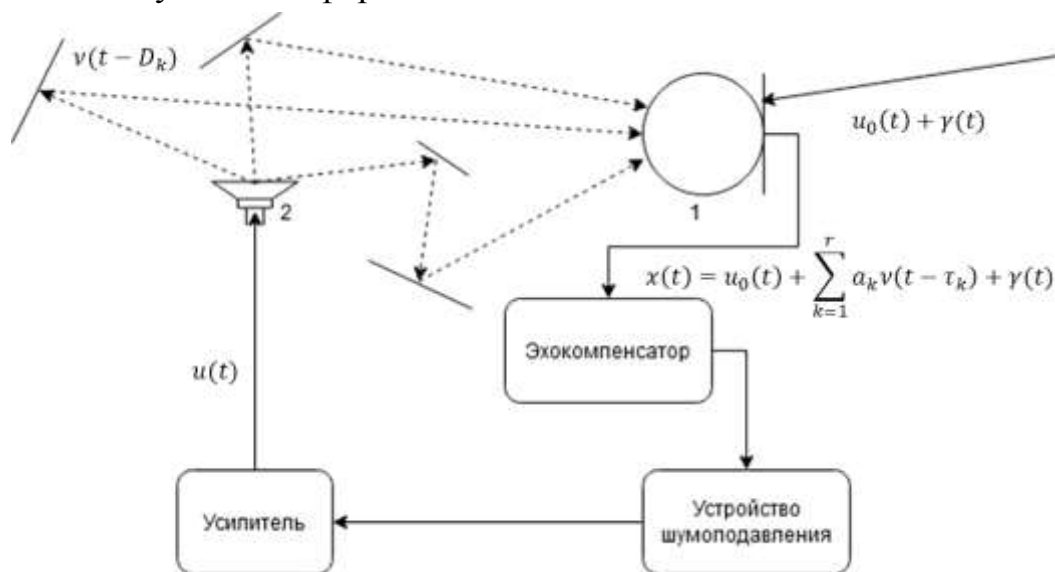


Рисунок 1 – Модель формирования акустической обратной связи в телекоммуникационных системах с распределенным запаздыванием

Приведены общие характеристики сигналов информационно-коммуникационных систем, рассмотрены параметры акустических сигналов, а также вопросы анализа случайных информационных сигналов.

Показано, что основные проблемы обработки сигналов информационно-коммуникационных систем связи заключаются в задачах выделения информационных сигналов из разного рода шумов, помех и эха, в обеспечении устойчивости систем с акустической обратной связью и создании адекватных моделей каналов распространения. Подобные проблемы возникают в задачах пространственной селекции источников сигналов, оценивания характеристик и диагностики состояния устройств и каналов передачи информации. Представлены непараметрические оценки расстояний между распределениями, а также исследована задача аппроксимации функции плотности вероятностей сигналов.

Сформулированы основные задачи исследований.

Во второй главе проводились исследования по восприятию составляющих формант речевых сигналов. Они были определены для каждой из частотных полос, с учетом ранее заданных среднегеометрических частот.

Для того, чтобы определить разборчивость формант речи, необходимо вычислить значения весовых коэффициентов, которые представляют вероятность включения формантных составляющих в соответствующие частотные полосы. Вычисленные значения весовых коэффициентов позволяют получить параметры разборчивости формант, которые зависят от отношения сигнал/шум (ОСШ). Проведенный анализ параметров разборчивости формант подтверждает существенную взаимосвязь слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум. Зависимость слоговой разборчивости от ОСШ приведена на рисунке 2.

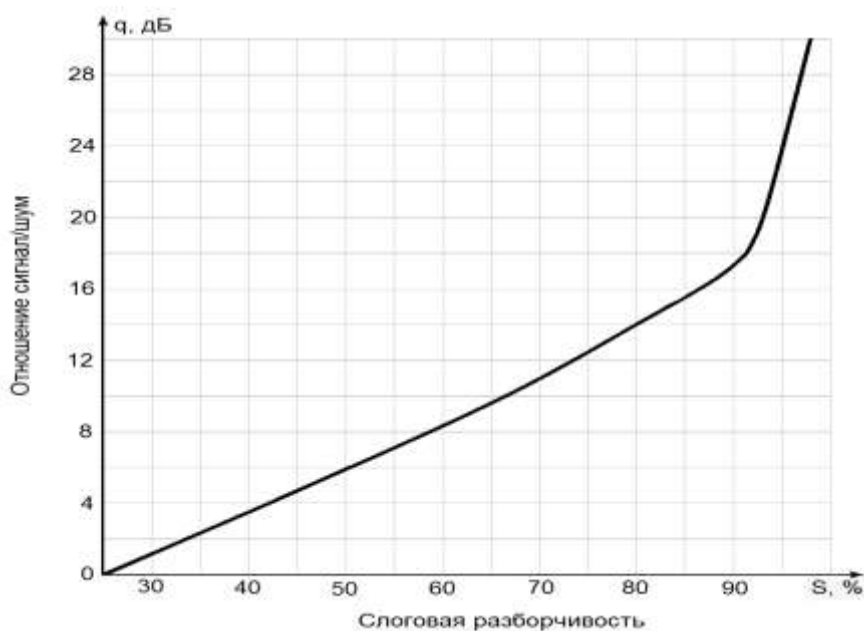


Рисунок 2 – Зависимость слоговой разборчивости от ОСШ

По приведенной на рисунке 2 зависимости можно сделать вывод о том, что слоговая разборчивость уровнем не менее 93% (стандартная величина, обеспечивающая достоверное и полное восприятие полученных речевых сообщений) требует минимально возможного значения параметра уровня ОСШ более 20 дБ.

Вышеуказанное исследование привело к появлению требования вычисления дисперсии случайных процессов речевых сигналов и сигналов акустических помех. Для этого необходима информация о функциях распределения плотности вероятностей акустических речевых сигналов систем связи, а также акустических шумовых и сосредоточенных помех. Это обусловило проведение исследований и разработку методов оценки их плотности вероятностей.

Во второй главе проводится аппроксимация плотности вероятностей сигналов и помех на основе обобщенных многочленов по системам базисных функциональных зависимостей.

Рассматриваемая плотность вероятностей случайной величины может быть выражена в виде обобщенного многочлена

$$P(x, a, \theta) = \sum_{k=1}^m a_k \varphi_k(x, \theta) = a^T \varphi(x, \theta),$$

по системе независимых функций $\varphi_k(x, \theta)$, что эквивалентно проецированию пространства F функций плотности $f(x) \in F$ в пространство P многочленов $P(x, a, \theta) \in P$, при ограничении $P(x, a, \theta) \geq 0$. В общем случае этот многочлен зависит от неизвестных параметров – компонентов векторов a и θ .

Задача при этом заключается в нахождении таких значений параметров a и θ , при которых многочлен $P(x, a, \theta)$ может быть принят в качестве оценки плотности вероятностей:

$$\hat{f}(x) = P(x, \hat{a}, \hat{\theta}).$$

Функция распределения и плотность вероятностей случайной величины, как известно, связаны соотношением

$$F(x) = \int_c^d I(x-v) f(v) dv.$$

Тогда, если заменить неизвестную плотность многочленом $P(x, a, \theta)$, а функцию распределения – эмпирической функцией $F_n^*(x)$, то вычисляемые значения представляют собой решение задачи минимизации:

$$\{\hat{a}, \hat{\theta}\} = \arg \min_{a, \theta} \rho^2(\tilde{F}(x, a, \theta), F_n^*(x)) + \alpha_j Q(P(x, a, \theta)),$$

с ограничениями $P(x, \hat{a}, \hat{\theta}) \geq 0$ и $\int_c^d P(x, \hat{a}, \hat{\theta}) dx = 1$.

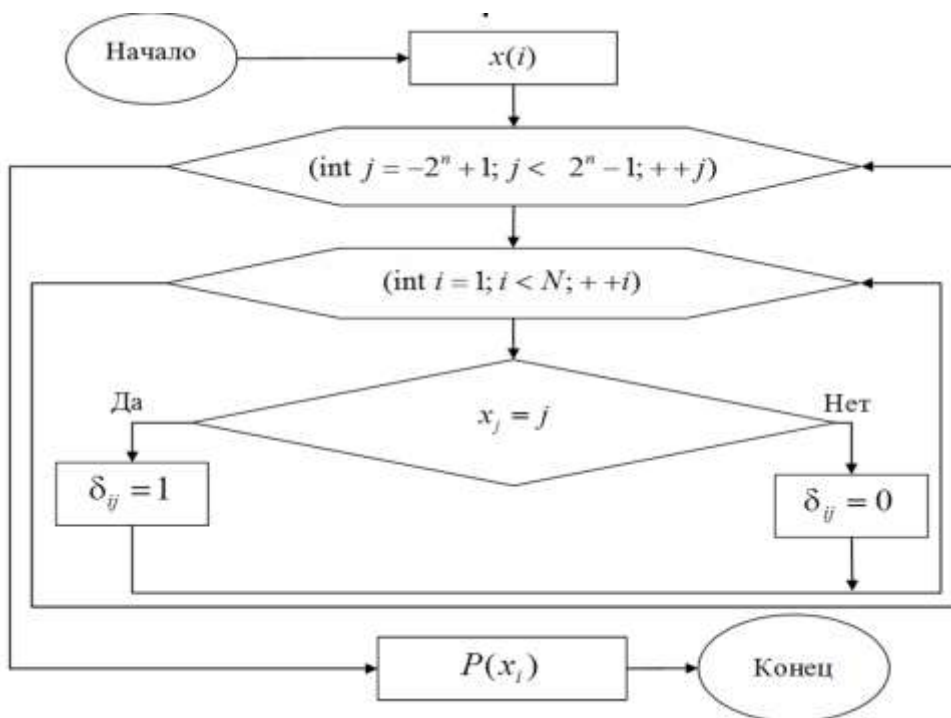
Для того, чтобы на практике провести формирование эффективных алгоритмов минимизации вышеуказанных функционалов, требуется исследовать вопросы выбора и обоснования базисных функциональных зависимостей, а также выбора порядка аппроксимирующих многочленов с учетом эмпирических данных.

В третьей главе рассмотрены вопросы исследования характеристик акустических речевых сигналов. Приведены распределения плотностей вероятностей речевых сигналов и помеховых составляющих, а также методы моментов и подстановки при анализе данных.

Проведено исследование и разработка алгоритма формирования гистограмм распределений на фиксированном временном промежутке.

$$P(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=-(2^n-1)}^{2^n-1} \sum_{i=1}^N \delta_{i,j},$$

где $P(x_i)$ – оценка вероятности выборки x_i , x_i – i -тая выборка, $x_i \in [-(2^n - 1), 2^n - 1]$, N – число выборок, j – номер интервала гистограммы для анализа числа попаданий в него x_i - тых выборок, $j \in [-(2^n - 1), 2^n - 1]$, n – количество разрядов двоичного числа, представляющего выборку x_i и представляющего номер интервала гистограммы, $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера.



Как видно из блок-схемы алгоритма, представленного на рисунке 3, можно получить гистограммную оценку закона распределения речевого сигнала по оцифрованным отчетам

Рисунок 3 – Блок схема алгоритма построения гистограммы по оцифрованным отсчетам

Приведенная на рисунке 4 гистограмма соответствует периодам речевой активности.

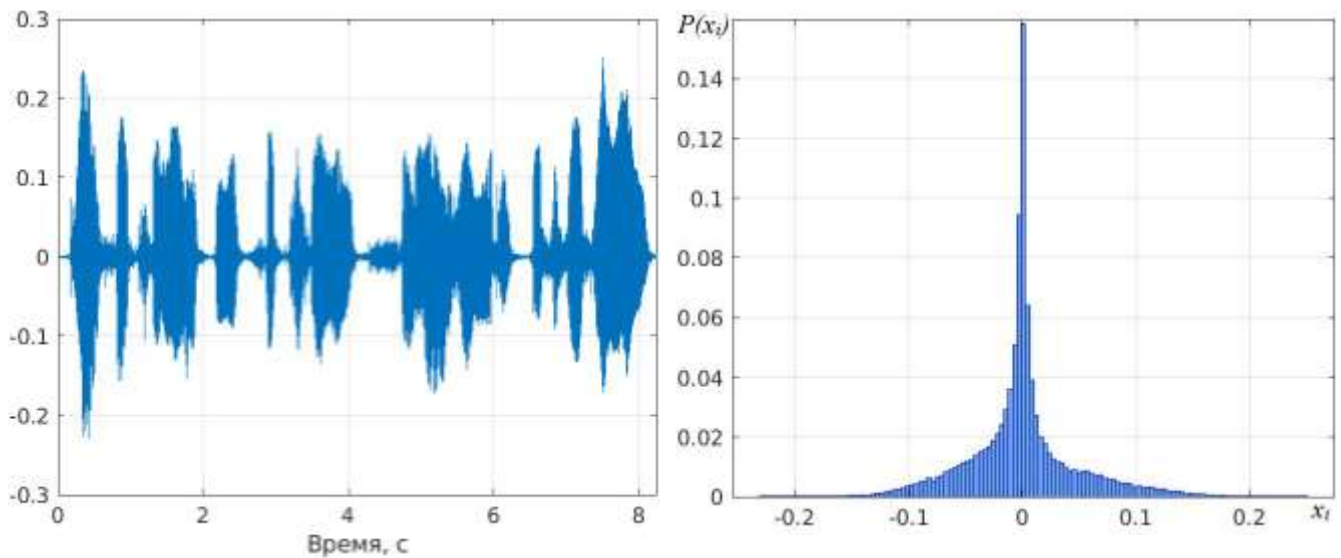


Рисунок 4 – (а) Речевой сигнал; (б) Гистограмма вероятностей $P(x_i)$ дискретных отсчетов.

Полученные результаты демонстрируют то, что если объем исследуемых выборок речевых сигналов $N \geq 0,5 \cdot 10^5$, и период их дискретизации $T_D = 91 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, то возможно получение гистограммной оценки плотности вероятности с погрешностью менее 1%. При увеличении объема выборки до миллиона дискретов погрешность будет составлять менее 0,3%. Для получения погрешности 5% достаточно исследовать сигнал на интервале 0,3 с. В том случае, если продолжительность анализируемого отрезка сигнала будет составлять 10^{-2} с или $3 \cdot 10^{-1} \text{ с}$, погрешность гистограммной оценки будет составлять 19% и 8 % соответственно.

Аппроксимация результатов, может производиться с использованием нескольких математических моделей. При этом можно применять тригонометрические и алгебраические полиномы, а так же полиномы, полученные в базисе гауссовых функций и экспоненциальных функциональных зависимостей:

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M A_k x^{M-k},$$

$$\rho(x) = \sum_{k=0}^M (A_k \cos(k\alpha x) + B_k \sin(k\alpha x)),$$

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{(x)^2}{B_k}},$$

$$\rho(x) = \sum_{k=1}^M A_k e^{-\frac{|x|}{B_k}}.$$

где A_k, B_k коэффициенты разложения.

Решение задач аппроксимации обеспечивается путем вычисления коэффициентов полинома. При использовании систем гауссовых и экспоненциальных функций решение задачи минимизации невязки будет попадать в класс нелинейных регрессионных задач, при условии, что B_k, C_k не будут определены ранее.

Анализ найденной функции плотности вероятностей показал, что она одномодальная и симметричная, и исследуемую функцию можно представить как математическое ожидание для рассматриваемого случайного процесса. Полученный многочлен для оценивания распределения функции плотности вероятностей $P(x_i)$, может обладать погрешностью ниже 5%. Для этого он может быть описан выражением:

$$P(x_i) = \sum_{k=1}^3 A_k e^{-\frac{|x_i|}{B_k}},$$

в котором параметры A_k, B_k были получены методом последовательных итераций.

Исследования гистограмм для оценки функций распределения акустических шумовых помех продемонстрировали, что и для акустических помех достижение погрешности аппроксимации ниже 5% обеспечивается применением полинома 3-го порядка по системе гауссовых функций.

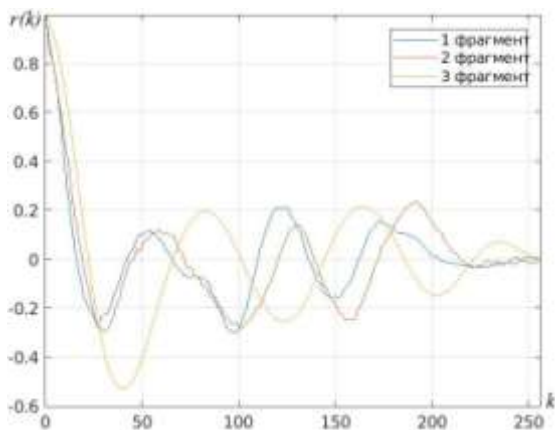
$$P_{ак.н.}(x_i) = \sum_{k=1}^3 A_k e^{-\frac{x_i^2}{B_k}}.$$

Для построения алгоритмов выделения полезных сигналов и подавления акустических помех были получены и проанализированы АКФ и спектральные характеристики акустических сигналов и помеховых составляющих. АКФ речевых сигналов определяется с учетом выражения

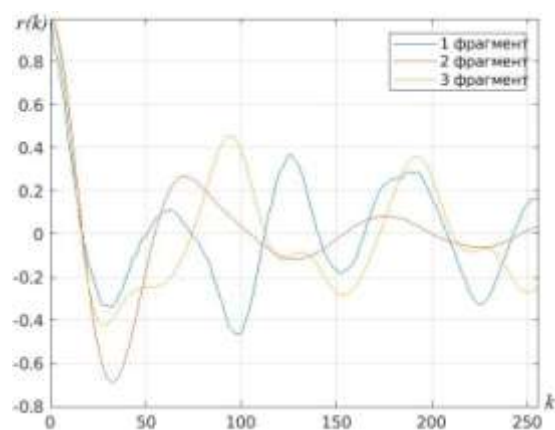
$$R(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U(nT)U(nT + kT), \quad 0 \leq k \leq K, \quad K < N,$$

где U – рассматриваемый сигнал, k – текущая задержка, T - период дискретизации, n - номер выборки.

Чтобы оценить форму и ширину спектра речевого сигнала необходимо применить усреднение и нормирование. В результате, удалось получить данные о характере речевого сигнала (рисунок 5).



а. К=256 отсчетов



б. К=512 отсчетов

Рисунок 5 – Графики усредненной АКФ для различных фрагментов речевого сигнала

На рисунке 5 изображены АКФ речевых сигналов для 512 и для 256 отсчетов, где k -номер отсчета, а $r(k)$ – нормированное значение АКФ.

Полученные результаты показывают концентрацию речевого сигнала в границах от 1-2 кГц и выше, в пределах 0,4-0,9 миллисекунд со временем корреляции 20-36 периодов дискретизации.

Информацию о форме энергетического спектра речевых сигналов получаем с помощью дискретного преобразования Фурье от АКФ речевых сигналов по формуле

$$G(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(kT)e^{-j\omega kT},$$

где $R(kT)$ – автокорреляционная функция речевого сигнала.

Разработанный алгоритм вычисления функции спектральной плотности реализации акустических сигналов на конечных интервалах, был использован для спектрального анализа речевых сигналов, акустических шумов и помех.

Исследованы спектральные характеристики различных реализаций акустических речевых сигналов и шумовых помех. Получено, что спектральная плотность мощности снижается со скоростью 20 дБ/октава, начиная с частот около 550 Гц. Максимальное значение плотности мощности речевых сигналов сосредоточена на интервале 250-900 Гц. Составляющие спектра речевого сигнала на частотах, превышающих 3400 Гц, снижены более чем на 30 дБ. Шумовые помеховые составляющие, как правило, сосредоточены в низкочастотной части спектра на частотах 100-500 Гц.

Таким образом, для повышения отношения сигнал/шум на выходе устройства системы связи возможно применение подхода линейной фильтрации сигналов. В результате изменится область режекции частотных составляющих сигнала от 0 Гц до 300 Гц.

В четвертой главе исследуются и разрабатываются алгоритмы повышения помехозащищенности аудиообмена в телекоммуникационных системах.

С применением разработанных математических моделей функций $P(x_i)$ для акустических речевых сигналов, шумов и помех возможно нахождение количественных значений \bar{x}_i (математическое ожидание) и σ^2 (дисперсия) по следующим выражениям:

$$\bar{x} = \sum_{i=-2^{n-1}}^{i=2^{n-1}-1} x_i \cdot P(x_i), \quad \sigma^2 = \sum_{i=-(2^n-1)}^{i=2^n-1} x_i^2 \cdot P(x_i),$$

где x_i – полученные в ходе эксперимента дискретные отсчеты акустических речевых сигналов, с соответствующим нормированием в виде $|x_{max}|=1$ В.

Для вычисления относительных интенсивностей акустических речевых сигналов относительно $I_0=10^{-12}$ Вт/м² (нулевой уровень сигнала), может быть применено выражение:

$$\frac{I}{I_0} (\text{дБ}) = 10 \cdot \lg \frac{k\sigma^2}{SI_0} \cdot 10^{12},$$

где k – коэффициент направленности, $S=4\pi R^2$ – площадь сферы.

Отношение мощности сигнала к мощности акустической помехи, шума машинного отделения, ветра и моря ограничено пределами от 10,4 до 17,8 дБ. Это понижает слоговую разборчивость русской речи до 64% (рисунок 2), что мешает воспринимать речевую информацию в указанных условиях.

Для упрощения алгоритма нахождения долговременных параметров эхосигналов в разработанном алгоритме адаптивной компенсации применяется метод корреляционно-экстремального оценивания. Данный подход в свою очередь обеспечивает уменьшение числа отводов фильтра и повышение скорости его настройки.

Структурная схема абонентского устройства обмена информацией с компенсационным каналом эха, представлена на рисунке 8.

Поступающий на вход сигнал $x(t)$ представляет собой смесь множественных отражений $u(t)$, акустического шума $\gamma(t)$ и речевого сигнала $u_0(t)$.

$$x(t) = u_0(t) + \sum_{k=1}^r a_k u(t - D_k) + \gamma(t).$$

На рисунке 6 блок нахождения долговременных параметров эха позволяет определить величины D_k и a_k . Это становится возможным с применением подхода корреляционного оценивания. На основе вычисленных D_k и a_k далее

определяется опорный сигнал, поступающий на вход адаптивного фильтра, имеющего порядок L .

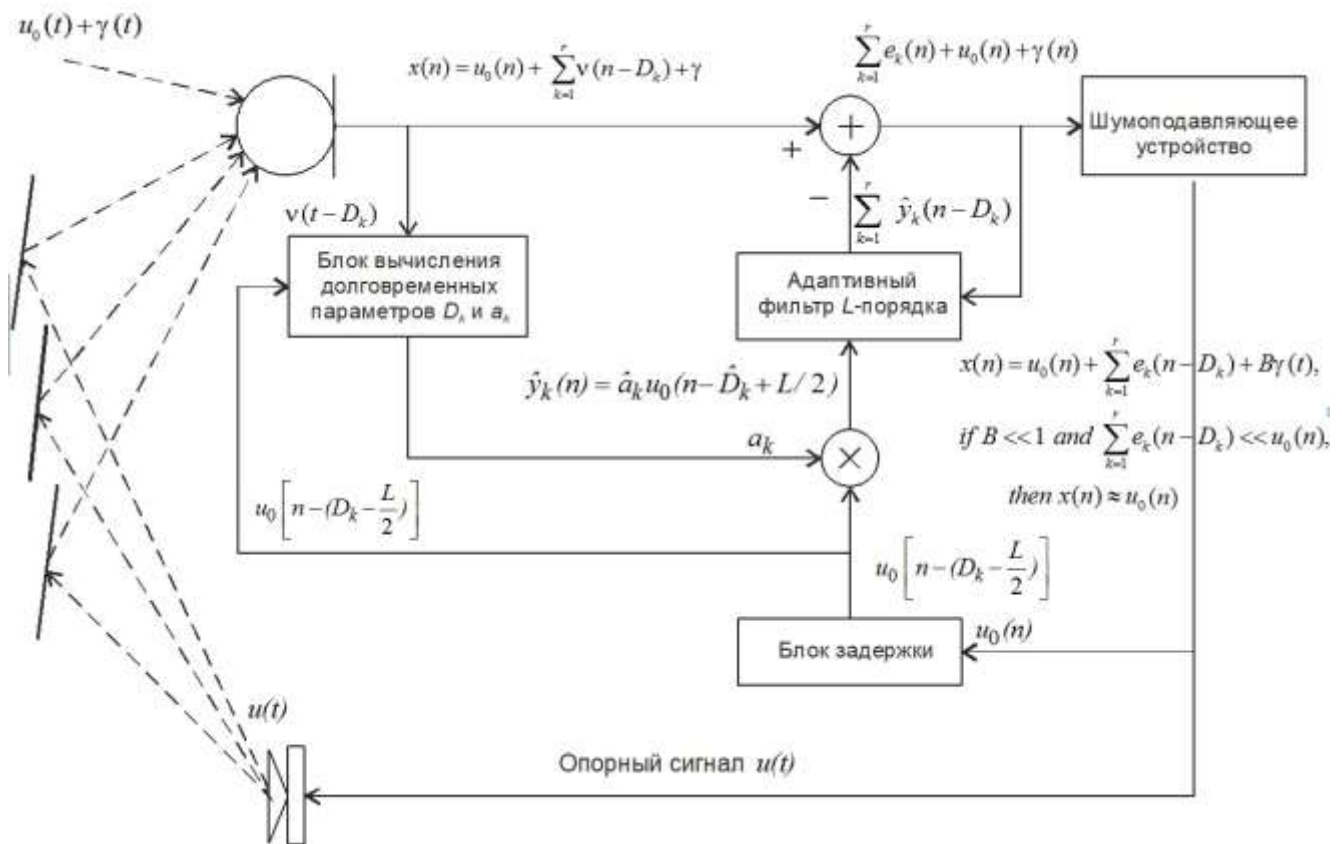


Рисунок 6 – Структура абонентского устройства системы связи

В состав структурной схемы, представленной на рисунке 6, помимо блоков формирования долговременных параметров эха и опорного сигнала включено устройство для подавления шума. Оно позволяет реализовать подход к адаптивному понижению уровня акустических шумов (полосы режекции при этом распределены по формантным составляющим). Также в состав структуры абонентского устройства системы связи включены адаптивный фильтр эхокомпенсации и суммирующее устройство. Опорный сигнал в этом случае представлен в виде формулы

$$\hat{y}_k(n) = \sum_{k=1}^r \hat{a}_k u_0(n - \hat{D}_k).$$

Опорный сигнал и эхо на выходе сумматора можно описать следующим выражением

$$u_{\text{вых}}(n) = \sum_{k=1}^r e_k(n) + u_0(n) + \gamma(n),$$

где $\sum_{k=1}^r e_k(n) = \sum_{k=1}^r v(n - D_k) - \sum_{k=1}^r \hat{y}_k(n - \hat{D}_k)$.

На рисунке 6, в котором отражена структура обмена информацией, выходной сигнал имеет вид

$$x(n) = u_0(n) + \sum_{k=1}^r e_k(n - D_k) + B\gamma(t),$$

при условии

$$\sum_{k=1}^r e_k(n - D_k) \ll u_0(n),$$

где B меньше единицы, т.е. $B \ll 1$, поэтому сигнал на выходе имеет вид

$$x(n) \approx u_0(n).$$

В работе исследовалась программными средствами оценка степени компенсации эхосигналов с помощью эхокомпенсатора. Результаты исследований приведены на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что среднее время настройки эхокомпенсатора находится в пределах от 0,2 до 0,4 секунд. Таким образом, время настройки нового эхокомпенсатора в 3-4 раза меньше по сравнению с известными. Уровень компенсации компонент эха повышен на 1.9-4.1 дБ по сравнению с существующими аналогами.

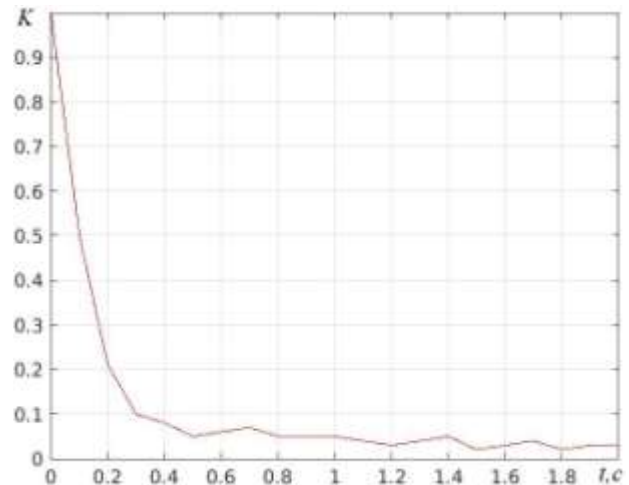


Рисунок 7 – Динамика настройки эхокомпенсатора

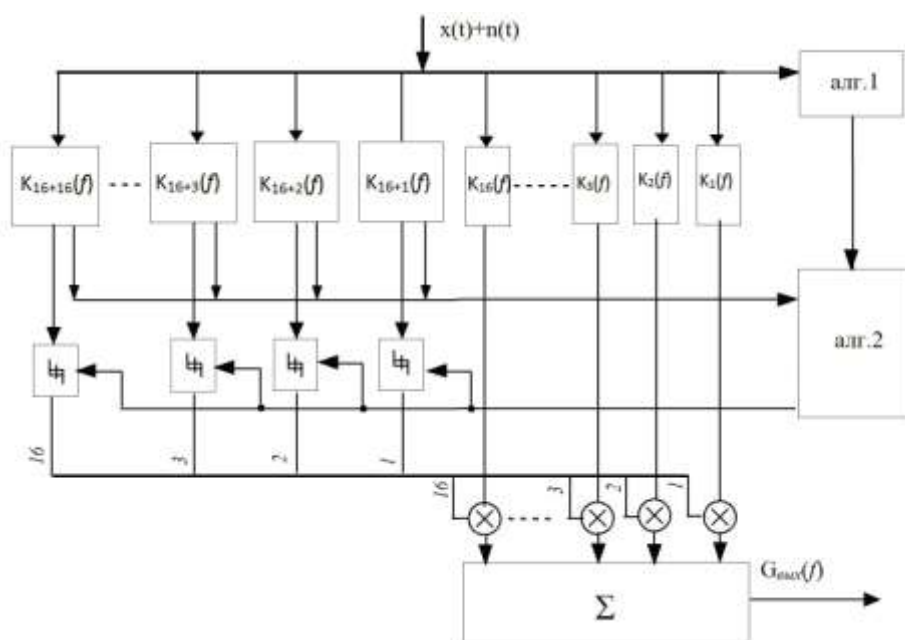


Рисунок 8 – Схема подавления помех адаптивно коммутируемой системой узкополосных фильтров.

Глава 4 содержит исследование устройства подавления сосредоточенных помех, реализующего адаптивный многоканальный алгоритм передачи речи с управлением области режекции (рисунок 8).

Была использована многоканальная гребенка фильтров с адаптивным управлением в канале передачи речи. Исходя из задачи, анализа речевого сигнала и акустических помех можно ограничиться диапазоном 300...3500, что позволит создать гребенку из 16 фильтров с полосой пропускания 200 Гц.

Таким образом, если в полосе пропускания регистрируются составляющие выше порога, с помощью приведенной структуры становится возможным подавление помех через управление затухания в фильтрах.

Алгоритм вычисления порогового уровня (алг.1) представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Алгоритм вычисления порогового уровня.

Алгоритм формирования управляющего сигнала (алг.2) для каждого канала представлен на рисунке 10.

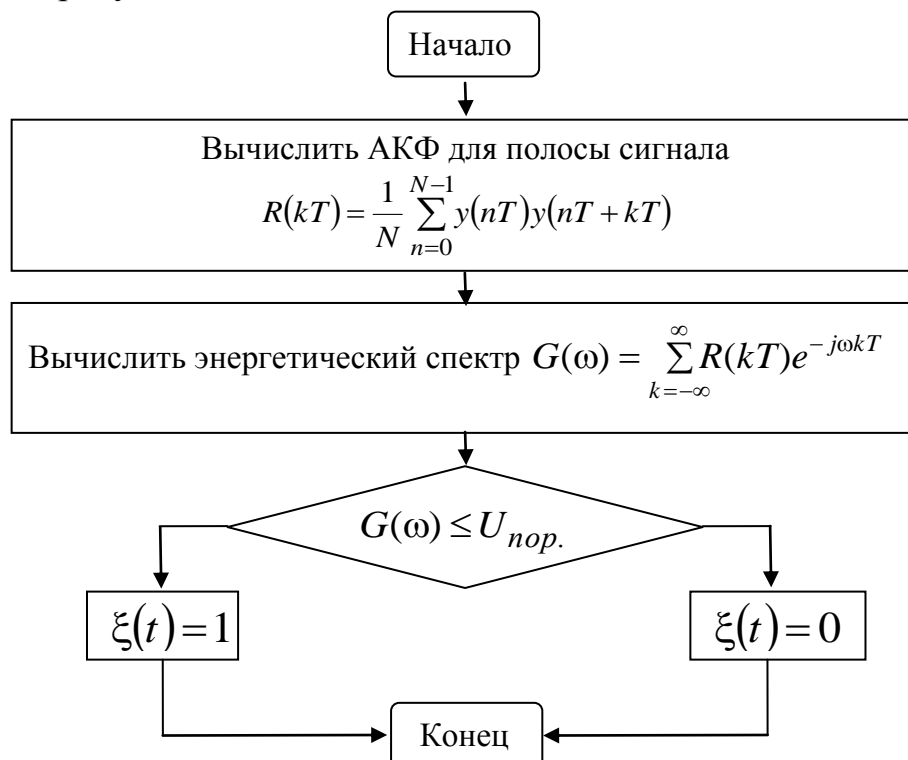


Рисунок 10 – Алгоритм формирования управляющего сигнала для канала

Рассматривая диаграммы распределения мощностей, имеющих место на выходных линиях применяемых единичных фильтров (рисунок 11), при условии поступления на устройство акустических речевых сигналов и аддитивных помех, сосредоточенных в полосе частот около $f = 1000$ Гц, можно прийти к заключению, что при наихудших условиях, воздействующие на систему связи сосредоточенные шумовые помехи имеют мощность, которая выше мощности составляющих спектра речевого сигнала более, чем на 12 дБ.

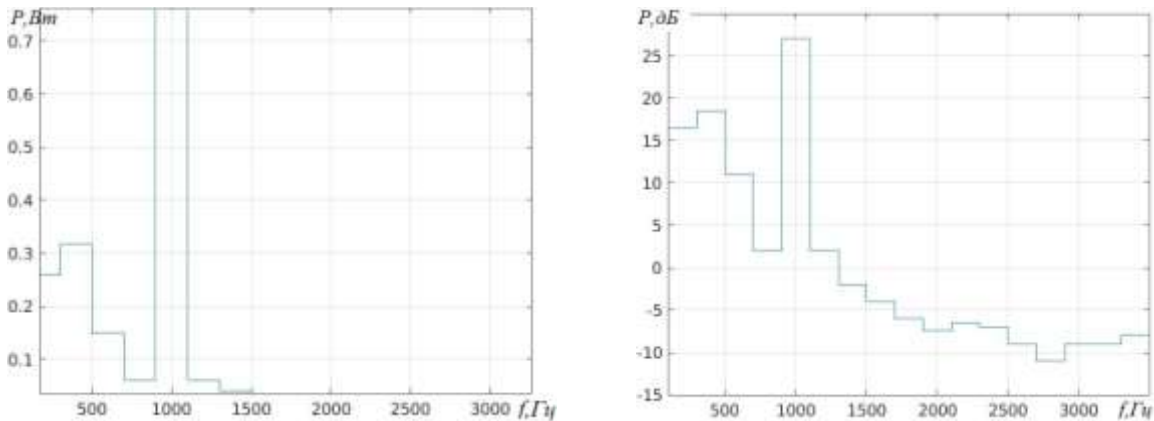


Рисунок 11 – Зависимость мощности выходного сигнала от частоты

Результаты проведенного исследования зависимости эффективности передачи речевых сообщений от наличия сосредоточенных помех показывают что, если в канале нет средств подавления вышеуказанных сосредоточенных акустических помех, то данный канал передачи речевой информации полностью «забит» помехой, в связи с чем происходит снижение ОСШ и понижение разборчивости слогов речи абонентов. Это обуславливает необходимость проведения процедур шумоподавления и разработки соответствующих алгоритмов и структур программного обеспечения.

Структура алгоритма расчета отношения сигнал-помеха на выходной линии узкополосного канала приведена на рисунке 12.

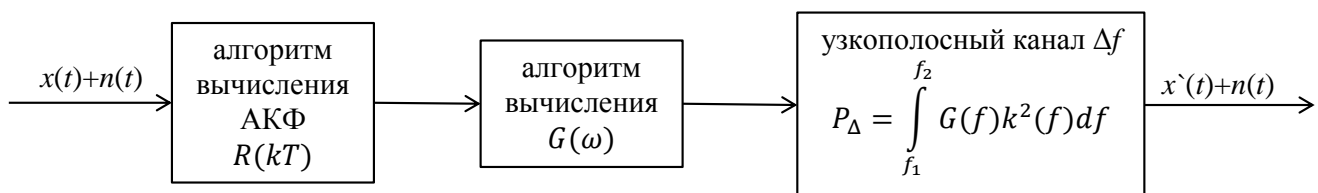


Рисунок 12 – Структура модуля нахождения ОСШ на выходах узкополосных каналов передачи

Если принять, что параметр $G(f) = \text{const}$ на частотах $(F_n \div F_g)$, тогда

$$G(f) = \frac{\sigma^2}{\Delta F}, \quad P_{\Delta} = \Delta f \cdot G(f) = \frac{\Delta f \sigma^2}{\Delta F}.$$

В таком случае на выходе узкополосного канала отношение $\frac{P_c}{P_n}$ уменьшается в $\frac{\Delta f}{\Delta F}$ раз к входному отношению $\frac{P_c}{P_n}$, то есть

$$\frac{P_c}{P_n}_{\text{вых.узк.кан.}} = \frac{\Delta f}{\Delta F} \cdot \frac{2\sigma^2}{n^2(t)}.$$

На системы телекоммуникаций аудиообмена могут воздействовать сосредоточенные помехи. Это в свою очередь приводит к резкому снижению ОСШ (до -6 дБ). Такое заметное понижение ОСШ делает достоверную и полную передачу информации практически невозможной. Для решения вышеуказанной проблемы возможно применение многоканальной гребенки фильтров в тракте передачи данных. В фильтрах будут автоматически отключаться каналы с обнаруженной сосредоточенной составляющей помехи. При адаптивном формировании областей режекции достигается подавление помех с сосредоточенным спектром до уровня -30 дБ и более.

Проведенные исследования позволили разработать алгоритмы и реализующее их программное обеспечение, которые обеспечивают подавление помеховых составляющих сигналов на 3÷15 дБ больше по отношению к существующим системам и аналогичным алгоритмам, формируя результирующее отношение сигнал/помеха на уровне более 20 дБ, что обеспечивает необходимую для полного восприятия речевой информации слоговую разборчивость не менее 93%.

Для апробации разработанных алгоритмов было разработано программное приложение, одна из форм которого приведена на рисунке 13

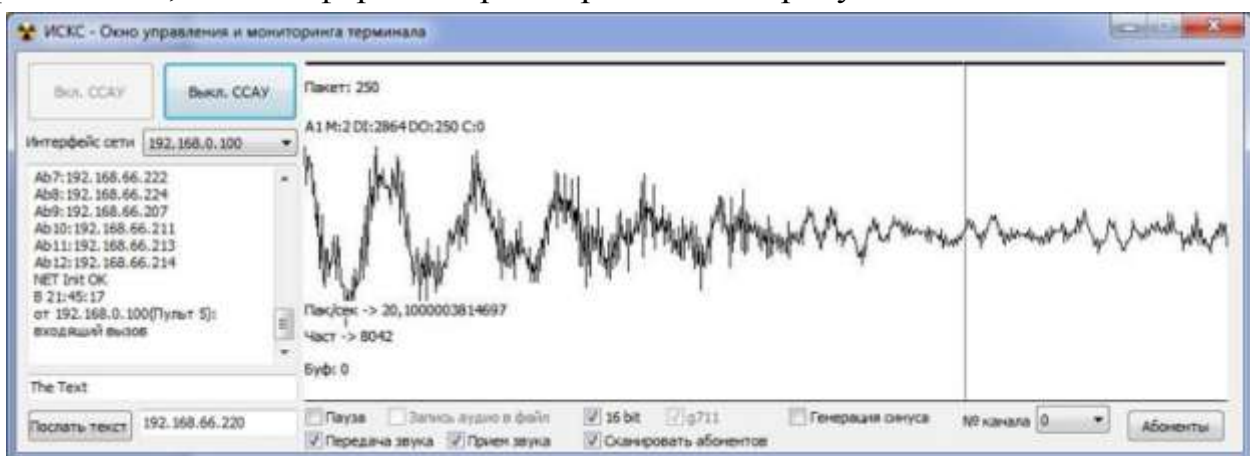


Рисунок 13 – Интерфейс модуля программного обеспечения.

На рисунке 13 приведен пример вывода визуализации речевой информации, полученной по локальной сети. После распаковки принятого пакета речевая информация проходит обработку в модуле шумоподавления и эхокомпенсации, после чего поступает на звуковыводящее устройство.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика получения функции спектральной плотности мощности сигналов на конечных интервалах в телекоммуникационных системах, который позволил разработать алгоритм линейной фильтрации сигналов и может быть использован в исследованиях спектральных характеристик акустических сигналов и помех.

2. Получено, что спектральная плотность мощности речевых сигналов начинает уменьшаться со скоростью 20 дБ/октава, со значения частоты 300 – 500 Гц, при этом максимум плотности мощности приходится на диапазон частот 300..900 Гц. На частотах выше 3400 Гц спектральные составляющие понижаются более чем на 30 дБ.

Полученная информация позволила определить область режекции в низкочастотной части спектра линейной фильтрации, что существенно повысило эффективность подавления акустических помех до 12 дБ.

3. Для борьбы с сосредоточенными помехами применяется как частотная селекция гребенкой фильтров, так и одновременно амплитудная селекция. Для этого разработан адаптивный алгоритм подавления помех находящихся в n-ом канале.

4. Результаты корреляционно-экстремальной оценки параметров эхосигналов, позволили создать новый корреляционный алгоритм вычисления долговременных параметров эха – затухания и задержки, применение которого позволяет сократить число отводов в адаптивном фильтре, что приводит к уменьшению времени настройки эхокомпенсатора и к увеличению подавления эхосигналов на 1.9-4.1 дБ больше, по сравнению с известными алгоритмами.

5. Разработана структурная схема реализации алгоритма компенсации и программное обеспечение адаптивного управления областями режекции, которые позволили эффективно подавлять сосредоточенные акустические помехи, что повышает помехоустойчивость информационных телекоммуникаций. Степень подавления помех определяется уровнем задержания выключенного фильтра в канале и находится в пределах более 12 дБ.

В результате проведенных исследований, получена модель, методы и алгоритмы повышения эффективности обработки акустических речевых сигналов под воздействием интенсивных помех и эхосигналов.

Путем создания устройств подавления внешних акустических помех и адаптивных эхокомпенсаторов, удалось получить отношение сигнал/помеха более 20 дБ и добиться слоговой разборчивости более 93%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК

1. Холкина Н.Е., Расширенное микширование аудиопотоков для многопроцессорных устройств в телекоммуникациях /Н.Е. Холкина, А.А. Колпаков, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №3. С. 227-238.

2. Холкина Н.Е. Моделирование сигналов в телекоммуникациях аудиообмена в условиях акустических помех / Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 1-13. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/01-Kropotov.pdf>

3. Холкина Н.Е. Моделирование сигналов в телекоммуникациях аудиообмена в условиях акустических помех / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков, Н.Е. Холкина // Информационные системы и технологии. 2019 №5 (115). С. 92-102.

Научные публикации, индексируемые в международной базе Scopus

4. Kholkina N.E. Identification and estimation of acoustic signals parameters in telecommunication systems of audio exchange /N.E. Kholkina, Y.A. Kropotov, A.Y. Proskuryakov, D.V. Beilekchi // The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1096 (2019) 012192, doi:10.1088/1742-6596/1096/1/012192 (ИТНТ-2018)

5. Kholkina, N.E., Proskuryakov, A.Y., Belov, A.A. Development of an Algorithm for Suppression of Concentrated Acoustic Noise in Telecommunication Systems /N.E. Kholkina, A.Y. Proskuryakov, A.A. Belov, 2021 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA 2021, DOI 10.1109/DSPA51283.2021.9535906

Публикации в других изданиях

6. Холкина Н.Е. Функции регрессии и метод наименьших квадратов в задачах параметрического моделирования в системах обмена информацией акустическими сигналами /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 1 (62). С. 35-40.

7. Холкина Н.Е. Идентификация и оценивание параметров акустических сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 2 (63). С. 34-41.

8. Холкина Н.Е., Моделирование сигналов и акустических помех в телекоммуникациях аудиообмена /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 9 (70). С. 39-46.

9. Холкина Н.Е., Функционально-дифференциальные и дифференциально-разностные модели систем с акустической обратной связью /Н.Е. Холкина, В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 4 (77). С. 60 - 67.

10. Холкина Н.Е., Эффективность передачи информации систем оповещения и телекоммуникаций аудиообмена в условиях помех // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020 № 5 (90). С. 45-55.

11. Холкина Н.Е. Идентификация и оценивание параметров акустических сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена/Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков, Д.В. Бейлекчи Сборник трудов. IV международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» ИТНТ-2018, 2018. С. 1815-1821.

12. Холкина Н.Е. Модель помехи с медленно изменяющимися параметрами в системах обмена акустическими сигналами /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков //Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции. /Под редакцией С.У. Увайсова - Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2016.-с.280-283. ISSN 2500-1248.

13. Памяти Юрия Анатольевича Кропотова: задачи анализа и моделирования систем с запаздывающей обратной связью /В.А. Ермолаев, А.Ю. Проскуряков, А.А. Белов, А.А. Колпаков, Д.В. Бейлекчи, Н.Е. Холкина, М.В. Жидоморова //Системы управления, связи и безопасности. 2021. No1. С.243-254. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10110.

14. Холкина Н.Е. Оценивание нестационарных сигналов в системах телекоммуникационного аудиообмена /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тезисов докладов Издательско-полиграфический центр МИ ВлГУ. 9.02.2018. – Муром: Издательско-полиграфический центр Ми ВлГУ, 2018

15. Холкина Н.Е. Оценивание характеристик стационарных акустических сигналов в телекоммуникационных системах /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов// Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тезисов докладов Издательско-полиграфический центр МИ ВлГУ. 8.02.2019. – Муром: Издательско-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019.

16. Исследование зависимости слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов //Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссий-

ские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 7 февр. 2020г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020.– 423с. С.195-196

17. Методы получения функции распределения плотности вероятностей речевых сигналов и акустических помех /Н.Е. Холкина, Ю.А. Кропотов //Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 7 февр. 2020г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020.– 423с. С.197-198

18. Аппроксимация гистограммы плотности вероятностей акустического речевого сигнала / Холкина Н.Е. // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XIII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 5 февр. 2021г. – Муром: Изд. - полиграфический центр МИ ВлГУ, 2021. – 271 с.: ил. – [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). С.185

19. Вопросы повышения качества передачи речевой информации в системах телекоммуникаций / Холкина Н.Е. // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XIV Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской научной конференции. Муром, 4 февр. 2022 г.– Муром: МИ ВлГУ, 2022.– ил.– [Электронный ресурс] С.265.

Свидетельства о государственной регистрации

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613972. Программное обеспечение телекоммуникационной системы громкоговорящей связи и оповещения с шумоподавлением и эхо-компенсацией. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 17.03.2021 г. Правообладатели: Холкина Н.Е., Колпаков А.А., Бейлекчи Д.В., Белов А.А., Проскуряков А.Ю.

Подписано в печать 11.10.2022 г.

Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,0 . Тираж 100 экз.

Типография

Владимирского государственного университета

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

600000, г. Владимир, ул. Горького, 87