

На правах рукописи

Душин Сергей Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИНЦИПА КОМПЕНСАЦИОННОГО
ПОДАВЛЕНИЯ ЭХОСИГНАЛОВ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: **Шаврин Сергей Сергеевич,**
доктор технических наук, доцент, и.о. декана факультета «Сети и системы связи» МТУСИ.

Официальные оппоненты: **Абрамов Сергей Степанович,**
доктор технических наук, профессор, декан факультета Мобильной радиосвязи и мультимедиа ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ).

Самойлов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института информационных технологий и радиоэлектроники ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН» (ФГБУН «ИПУ РАН»).

Защита состоится «07» декабря 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д.8а, аудитория А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ <http://www.srd-mtuci.ru/index.php/ru/council>

Автореферат разослан «___» _____ 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная техника компенсации эхосигналов, помимо своего традиционного применения – подавления электрического эхосигнала в телефонных каналах связи, успешно применяется для подавления: акустических эхосигналов в телефонии и системах конференц-связи; отраженных сигналов в кабельных системах передачи данных; эхосигналов в ретрансляторах радиосигналов. Однако, несмотря на успешный опыт применения в различных телекоммуникационных технологиях, современные устройства компенсации эхосигналов обладают рядом недостатков и далеко не всегда могут обеспечить требуемые качественные показатели, а их эффективность зависит от характеристик эхотрактов и статистических характеристик активных (обучающих) сигналов. Это обстоятельство, в совокупности с обусловленной экономическими причинами потребностью снижения вычислительных затрат на реализацию функции эхокомпенсации, во многом определяет продолжающийся процесс развития алгоритмов и методов адаптивной эхокомпенсации.

На данный момент одной из наиболее актуальных задач теории адаптивной фильтрации является задача эффективной адаптации эхокомпенсационных механизмов в условиях непрерывно действующих аддитивных шумов и встречных сигналов. Эта задача актуальна для целого ряда приложений, некоторые из них представлены далее. Во-первых, это уплотнение спутниковых каналов связи (технологии Carrier-in-Carrier, «корреляционное уплотнение»), в котором требуется подавить эхосигнал на фоне встречного сигнала. Во-вторых, это компенсация акустических эхосигналов в системах конференц-связи и системах громкой связи, которые зачастую работают в условиях наличия аддитивных шумов значительного уровня (например, в шумных помещениях или вблизи дорог). В-третьих, это оценка стационарности эхотракта и параметрических воздействий на него, являющаяся составной частью более крупной задачи интегральной оценки качества эхозащищенных каналов связи.

Анализ существующих решений, применяемых в этих приложениях эхокомпенсации, показывает, что они обладают существенными недостатками. Так, например, применяемый в технологии «корреляционного уплотнения» корреляционный алгоритм обладает достаточной для данного применения помехоустойчивостью, но при этом показывает довольно медленную сходимость, что сказывается на функциональных характеристиках оборудования «корреляционного уплотнения».

Данная ситуация позволяет говорить, что существует потребность в разработке помехоустойчивых алгоритмов, обладающих при этом быстрой и стабильной сходимостью. Анализируя возможные пути удовлетворения этой потребности, можно отметить, что корреляционный принцип, реализуемый, в частности, корреляционным алгоритмом, обеспечивает ключевое в данной задаче свойство -

высокую помехоустойчивость. Поэтому разумным подходом к задаче разработки таких алгоритмов является развитие идеи корреляционного принципа.

Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на решение научной задачи, заключающейся в разработке и исследовании помехоустойчивых, стабильных и быстрых алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации устройств компенсации экосигналов, является актуальной в рамках обозначенных выше прикладных задач.

Степень разработанности темы. Задача адаптивной настройки механизмов компенсации экосигналов является одной из основных прикладных задач теории адаптивной фильтрации, которая с середины 20-го века переживает этап интенсивного развития и имплементации во многих сферах науки и техники. Значимый вклад в развитие адаптивной фильтрации и техники компенсации экосигналов внесли отечественные и зарубежные ученые: А.Д.Снегов, В.Н. Фомин, М.К. Цыбулин, В.И. Джиган, С.С. Абрамов, В.В. Шахгильдян, В.В. Витязев, Е.П. Кузнецов, Р.Л. Стратанович, А.Б. Сергиенко, М.М.Sondhi, M. Rupp, A. Sayed, D.G. Messerschmitt, R.E. Kalman, B. Widrow, J. Benesty, B. Hassibi, R. Plackett, S. Haykin и др. Ключевой вклад в развитие математических основ адаптивной фильтрации (теории оптимального оценивания) внесли выдающиеся математики 20-го столетия: Н. Винер, Э. Хопф, А.А. Колмогоров.

Исследуемый в рамках настоящей работы корреляционный принцип адаптивной настройки эхокомпенсационных механизмов был сформулирован и реализован в виде алгоритма адаптации С.С. Шавриным и Ш. Вайксельбаумом в 1991 году, разработанный ими алгоритм получил название «корреляционный алгоритм». На сегодня в открытых источниках можно найти не более двух десятков отдельных публикаций, посвященных этому алгоритму, а специализированная литература, посвященная адаптивной фильтрации, и вовсе не содержит информации о нём. Необходимо также отметить, что доступные в печати публикации не содержат информации о теоретических основах и ряде важных функциональных характеристиках этого алгоритма.

Из этого следует, что на настоящий момент корреляционный принцип адаптации и реализующие его алгоритмы изучены недостаточно.

Цель и основные задачи работы. Целью настоящей работы является разработка новых алгоритмов реализации корреляционного принципа подавления экосигналов, обладающих высокими функциональными характеристиками, то есть быстрой и стабильной сходимостью и высокой помехоустойчивостью, включая способность адаптивной настройки на фоне сигнала встречного направления.

Основными задачами исследования являются:

1. Анализ теоретических основ корреляционного принципа адаптивной настройки эхокомпенсационных механизмов. Вывод системы математических выражений, описывающих процесс адаптации алгоритмов построенных на этом принципе, из общих положений теории оптимального винеровского оценивания (уравнения Винера-Хопфа);
2. Исследование функциональных характеристик алгоритмов адаптации, реализующих корреляционный принцип адаптации;
3. Анализ механизмов воздействия основной группы факторов, оказывающих негативное влияние на функциональные характеристики алгоритмов, реализующих корреляционный принцип;
4. Разработка методов, позволяющих улучшить функциональные характеристики алгоритмов, построенных на корреляционном принципе адаптации;
5. Исследование эффективности разработанных методов и оценка возможных областей их применения.

Методы исследования. Исследования, проведенные в настоящей работе, основаны на методах математической статистики, линейной алгебры, теории случайных процессов, теории оптимального оценивания, цифровой адаптивной фильтрации, а также методах математического и компьютерного моделирования. В исследованиях использовалось программное обеспечение, разработанное автором работы.

Научная новизна

1. Проведены исследования математических основ алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации. В рамках этих исследований осуществлен вывод системы математических выражений, описывающих процесс адаптации корреляционного алгоритма на основе общих положений теории оптимального винеровского оценивания, а также определены основные факторы, оказывающие негативное влияние на его скорость сходимости и помехоустойчивость.
2. Предложен и исследован оригинальный алгоритм адаптации устройств компенсации эхосигналов, получивший в работе название «минимальная корреляция виртуальных сигналов» (МКВС). Алгоритм обладает высокой скоростью сходимости и помехоустойчивостью. По скорости сходимости предложенный алгоритм превосходит нормализованный метод наименьших средних квадратов (НМНСК) и корреляционный алгоритм, тогда как его помехоустойчивость остается на уровне корреляционного алгоритма.

3. Предложен способ снижения вычислительной сложности МКВС, основанный на быстром алгоритме вычисления произведения матрицы Тёплица на вектор.

4. Разработан и исследован вспомогательный метод снижения влияния пауз в активном сигнале на динамику адаптации корреляционного алгоритма и МКВС. Исследование предложенного метода в приложении к МКВС показали его высокую эффективность; в случае его применения эхокомпенсатор нечувствителен к паузам в активном сигнале даже при максимально возможных скоростях адаптации.

5. Предложен и исследован метод повышения помехоустойчивости корреляционного алгоритма и МКВС. Исследование метода в приложении к МКВС показали, что его применение обеспечивает повышение вносимого затухания на величину порядка 12 дБ в условиях наличия встречного сигнала при контролируемом снижении скорости адаптации.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в строгом логико-математическом обосновании алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации (корреляционного алгоритма и алгоритма МКВС). Теоретическую значимость также представляет исследование возможности разработки вычислительно эффективного алгоритма МКВС.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке и доведении до возможности реализации на современной микроэлектронной элементной базе алгоритма МКВС, который может применяться в широком спектре практических задач техники компенсации эхосигналов, требующих одновременно высокой скорости сходимости и высокой помехоустойчивости алгоритма адаптации;

- в разработке и доведении до возможности реализации на современной микроэлектронной элементной базе алгоритма, основанного на предложенном принципе снижения влияния пауз в активном сигнале на адаптацию устройств компенсации эхосигналов. Алгоритм может быть использован для повышения функциональных характеристик корреляционных алгоритмов;

- в разработке и доведении до возможности реализации на современной микроэлектронной элементной базе алгоритма, основанного на предложенном принципе повышения помехоустойчивости алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации;

- в применении результатов диссертационного исследования для подавления эхосигналов в оборудовании Flex-CON-NG компании АО «ГК Натекс». Реализация

результатов работы подтверждена соответствующим актом, который представлен в приложении к диссертационной работе;

- в разработке наглядных и удобных для восприятия диаграмм, которые применены в учебном процессе МТУСИ на кафедре МТС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Корреляционный алгоритм, реализующий корреляционный принцип адаптации, связан с уравнением Винера-Хопфа следующими преобразованиями последнего: аппроксимация автокорреляционной матрицы активного сигнала автокорреляционной матрицей белого шума и переход от нерекурсивного способа определения импульсной характеристики исследуемой системы к рекурсивной процедуре, осуществленной без учета наличия памяти алгоритма об остаточном эхосигнале.

2. Наличие памяти об остаточном эхосигнале и автокорреляционные связи в активном сигнале являются основными факторами, оказывающими влияние на скорость и стабильность сходимости корреляционного алгоритма.

Влияние памяти алгоритма проявляется в изменении на каждой итерации адаптации импульсной характеристики системы «исполнительный элемент (ИЭ) - эхотракт», которая является объектом адаптации. Эти изменения являются результатом работы самого алгоритма и обусловлены его рекуррентной природой.

Причиной влияния автокорреляционных связей в активном сигнале является, собственно, их игнорирование алгоритмом адаптации, предполагающим аппроксимацию автокорреляционной матрицы активного сигнала автокорреляционной матрицей белого шума эквивалентной мощности.

3. Негативное влияние памяти корреляционного алгоритма на динамику адаптации можно исключить, создав для процедуры адаптации виртуальный остаточный эхосигнал, который имел бы место быть в случае отсутствия настройки исполнительного элемента на интервале оценки функции взаимной корреляции (ВКФ). Использование этого сигнала для адаптации позволяет обеспечить максимальную статичность системы, анализируемой алгоритмом адаптации.

Теоретическая обоснованность необходимости формирования виртуального остаточного эхосигнала позволяет выделить алгоритм, использующий его для адаптации, как отдельный алгоритм, получивший в работе название «минимальная корреляция виртуальных сигналов» (МКВС).

4. Исследование функциональных характеристик алгоритма МКВС показало, что скорость его сходимости многократно превышает скорость сходимости корреляционного алгоритма. При этом он сохраняет помехоустойчивость,

свойственную корреляционному алгоритму. Сравнение скорости сходимости алгоритмов МКВС и НМНСК показали, что МКВС сходится значительно быстрее в равных условиях.

5. Вычислительная сложность алгоритма МКВС определяется $2 * N * M + N + 1$ операциями умножения и $2 * N * M + 3 * N$ операциями сложения (вычитания) на итерацию. При этом результаты проведенных теоретических исследований, направленных на поиск возможности снижения вычислительной сложности, показывают, что на базе МКВС можно построить алгоритм, вычислительная сложность которого будет определяться $N * \log_2 N + 3 * N$ операциями умножения на итерацию.

6. Предложенные вспомогательные методы снижения влияния пауз в активном сигнале и повышения помехоустойчивости могут быть применены совместно с корреляционным алгоритмом или алгоритмом МКВС. Методы учитывают особенности процесса адаптации этих алгоритмов и показывают высокую эффективность.

Достоверность. Достоверность результатов, полученных в ходе выполнения диссертации, подтверждается корректным использованием математического аппарата и разработанного программного обеспечения.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на: IX Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» INTERMATIC-2010; 19-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA-2017); 72-ой Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2017)».

Личный вклад. Все результаты, сформулированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена та их часть, которая получена автором лично.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 199 страницах, имеет 61 рисунок и 28 таблиц. Список литературы содержит 131 наименование.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ. Из них 7 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 3 – публикации тезисов докладов в материалах международных и всероссийских научных конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные научные результаты, приведены сведения об апробации работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ основных источников эхосигналов, рассмотрены основные методы борьбы с паразитными эхосигналами, а также представлен обзор области применения и актуальных задач техники компенсации эхосигналов в современных телекоммуникациях.

Проблема паразитных эхосигналов широко распространена в современных телекоммуникациях. Основными источниками электрических эхосигналов в телефонных каналах связи и в кабельных системах передачи данных являются дифференциальные системы и их электронные аналоги, обеспечивающие сопряжение двух- и четырехпроводных участков канала связи, а также отражения сигналов от неоднородностей кабеля в его двухпроводной части. Для современных систем передачи данных, использующих сразу несколько медных пар внутри одного кабеля, например Ethernet версии 1000BASE-T, характерна также проблема переходных помех на ближний конец, которые в этом случае могут быть рассмотрены как электрические эхосигналы и подавлены средствами эхокомпенсации. Причиной возникновения акустических эхосигналов в телефонии и системах конференц-связи являются отражения звуковой волны от близлежащих объектов.

Среди методов борьбы с эффектом эха можно выделить три основных: согласующий метод, эхограждение и эхокомпенсация. На сегодня можно говорить, что наиболее эффективным методом является эхокомпенсация, которая может применяться как автономный метод борьбы, так и комбинироваться с другими методами. Идея компенсации эхосигналов заключается в формировании копии эхосигнала и последующего вычитания этой копии из сигнала обратного направления передачи. Основным достоинством данного подхода является возможность одновременного достижения высокого вносимого затухания и обеспечения работы канала в полнодуплексном режиме.

Помимо борьбы с эхосигналами, возникающими в перечисленных выше случаях, техника компенсации эхосигналов в последние десятилетия активно применяется в задачах подавления эхосигналов в ретрансляторах радиосигналов, корреляционного уплотнения каналов связи и интегральной оценки качества эхозащищенных каналов.

Во второй главе приведен обзор известных алгоритмов адаптивной фильтрации, применяющихся в задачах эхокомпенсации, и проведено исследование математических основ корреляционного алгоритма.

Задача адаптации устройств компенсации эхосигналов является частной задачей адаптивной фильтрации и сводится к оцениванию импульсной характеристики (отклика) неизвестной системы (эхотракта). В общем случае исследуемая система является нелинейной, но для большинства случаев предположение о её линейности вполне допустимо. Базовым математическим уравнением в задачах такого класса является уравнение Винера-Хопфа (1), описывающее связь между импульсной характеристикой линейной системы, входным (активным) сигналом и выходным сигналом (эхосигналом). Таким образом, данное уравнение позволяет получить оптимальную оценку отклика неизвестной линейной системы:

$$H_{\text{опт}N} = R_N^{-1} * P_N, \quad (1)$$

где: R_N – автокорреляционная матрица активного сигнала, P_N – вектор взаимной корреляции активного сигнала и эхосигнала, N – длительность отклика исследуемой системы в отсчетах.

Адаптивный фильтр, реализующий прямое вычисление уравнения Винера-Хопфа, носит название фильтр Винера. На практике в задачах компенсации эхосигналов данный фильтр применяется крайне редко, поскольку является вычислительно сложным из-за необходимости обращения автокорреляционной матрицы. Поэтому в прикладных задачах, как правило, используются более эффективные с вычислительной точки зрения рекурсивные алгоритмы.

Рекурсивные алгоритмы адаптивной фильтрации характеризуются большим разнообразием. Общепринятая классификация подразумевает разделение этих алгоритмов на два основных класса: рекурсивные методы наименьших квадратов (РНК) и рекурсивные методы наименьших средних квадратов (МНСК).

На сегодня класс алгоритмов РНК включает в себя десятки алгоритмов, характерной алгоритмической особенностью которых является рекурсивное вычисление автокорреляционной матрицы активного сигнала. Среди них можно выделить: взвешенный РНК на основе МЛ (лемма об обращении матриц), РНК на основе QR-разложения, быстрый алгоритм Калмана, быстрый трансверсальный фильтр и др.

Класс алгоритмов МНСК также характеризуется значительным разнообразием, и объединяет множество относительно вычислительно и алгоритмически простых градиентных алгоритмов. Наиболее важными для практики представителями этого

класса являются: нормализованный метод наименьших средних квадратов (НМНСК), пропорционально нормализованный МНСК, блочный МНСК.

Помимо обозначенных выше классов существуют алгоритмы, занимающие промежуточное по отношению к ним положение. Примерами таких алгоритмов являются широко используемый быстрый алгоритм аффинных проекций и корреляционный алгоритм, исследование которого является предметом настоящей работы.

Задаваясь вопросом математических основ корреляционного алгоритма, можно отметить, что цель адаптации корреляционного алгоритма, заключающаяся в минимизации вектора взаимной корреляции остаточного активного сигнала и остаточного эхосигнала, обеспечивается оптимальной Винеровской оценкой. Поэтому математические выражения, описывающие процедуру адаптации согласно корреляционному алгоритму, можно получить из уравнения Винера-Хопфа. Для этого необходимо аппроксимировать автокорреляционную матрицу активного сигнала автокорреляционной матрицей белого шума и перейти от нерекурсивного способа определения импульсной характеристики исследуемой системы к рекурсивной процедуре, осуществив эту операцию без учета наличия памяти алгоритма об остаточном эхосигнале. Математическое представление этих преобразований будут представлены в обзоре главы 4. На данном же этапе важно отметить, что, выполняя эти преобразования, можно получить математическое выражение, описывающее процедуру адаптации согласно корреляционному алгоритму:

$$H_{N,i+1} = H_{N,i} + \mu * (R_{\delta u_{N,i}} + \delta E)^{-1} * P_{XZ_{N,i}}, \quad (2)$$

где: $P_{XZ_{N,i}} = \sum_{l=0}^{M-1} X_{N,i-l} * z_{i-l}$ – вектор взаимной корреляции активного сигнала и остаточного эхосигнала, δ – малая величина, E – единичная матрица, $R_{\delta u_{N,i}}$ – автокорреляционная матрица белого шума эквивалентной мощности, N – количество коэффициентов фильтра, μ – параметр адаптации.

Третья глава посвящена исследованию функциональных характеристик корреляционного алгоритма.

Вводная часть главы содержит анализ механизмов воздействия основной группы мешающих факторов на процесс адаптации согласно корреляционному алгоритму. К наиболее интересным результатам следует отнести формальное описание ошибок приращеня отводов трансверсального фильтра, обусловленных автокорреляционными связями в активном сигнале, памятью алгоритма об остаточном эхосигнале и аддитивными шумами в экотракте.

Основное содержание главы посвящено исследованию функциональных характеристик корреляционного алгоритма. Для возможности сравнительного анализа также проводятся исследования для алгоритма НМНСК. Наиболее важные результаты исследования представлены ниже:

- корреляционный алгоритм обладает высокой помехоустойчивостью, и по этому показателю превосходит алгоритм НМНСК. Помехоустойчивость корреляционного алгоритма зависит от: количества отсчетов, участвующих в оценке ВКФ; параметра адаптации и статистических характеристик аддитивной помехи;

- в подавляющем большинстве случаев корреляционный алгоритм значительно уступает в скорости сходимости алгоритму НМНСК. При этом оба исследуемых алгоритма на речевом сигнале сходятся значительно медленнее, чем на белом шуме. Это объясняется наличием автокорреляционных связей в речевом сигнале;

- на стабильность сходимости и максимальную скорость адаптации большое влияние оказывает количество коэффициентов трансверсального фильтра. Эта зависимость характерна для обоих исследуемых алгоритмов, и связана с наличием автокорреляционных связей в активном сигнале;

- для корреляционного алгоритма наблюдается практически линейная зависимость максимально возможной скорости адаптации от количества отсчетов оценки ВКФ;

- наличие пауз в активном сигнале приводит к значительному снижению вносимого эхокомпенсатором затухания после окончания её действия. Для корреляционного алгоритма степень влияния пауз повышается по мере роста скорости адаптации и памяти алгоритма об остаточном эхосигнале. Отдельно следует подчеркнуть важную роль в механизме влияния пауз аддитивных шумов в трактах прямого и обратного направления передачи;

- применение детектора активного сигнала в целом решает проблему влияния пауз, но в случае большой скорости адаптации эхокомпенсатора применение детектора может оказаться недостаточно эффективным.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации, и методов повышения их эффективности.

Анализируя механизм влияния памяти корреляционного алгоритма на стабильность его сходимости, можно заметить, что возникающая ошибка оценки импульсной характеристики исследуемой системы «исполнительный элемент - эхотракт» обусловлена нестационарностью данной системы, которая вызывается изменениями на каждом шаге адаптации импульсной характеристики исполнительного элемента. Математически эта ошибка может быть описана как

результат аппроксимации реальным остаточным эхосигналом некоторого виртуального остаточного эхосигнала z'_i , который может быть получен при воздействии активного сигнала x_i на конкретный экземпляр исследуемой системы, полученный на очередном этапе адаптации. Аналитическое выражение этой ошибки для отдельно взятого коэффициента фильтра имеет вид:

$$\delta h_{\text{рек},i}(\varepsilon) = \frac{\sum_{l=0}^{M-1} x_{i-\varepsilon-l} * (z_i - z'_i)}{(\sum_{l=0}^{M-1} x_{i-\varepsilon-l}^2 + B) * \rho}, \quad (3)$$

где: M – количество отсчетов оценки ВКФ и дисперсии активного сигнала, z'_i – реализация виртуального остаточного эхосигнала на интервале времени $[i - M; i]$, ρ – параметр адаптации ($\rho = 1/\mu$), ε – номер отвода фильтра, B – малая величина для предотвращения деления на ноль.

Можно заметить, что нет никаких принципиальных ограничений на формирование виртуального остаточного эхосигнала в реальном времени. Далее этот сигнал можно использовать для вычисления приращения коэффициентов фильтра в формуле корреляционного алгоритма. Применение данного сигнала в целях адаптации обеспечит максимальную статичность исследуемой алгоритмом адаптации системы «исполнительный элемент - эхотракт».

Используемый данный подход алгоритм может быть выделен как отдельный алгоритм, реализующий корреляционный принцип адаптации. В настоящей работе такой алгоритм получил название «минимальная корреляция виртуальных сигналов», сокращенно МКВС. Это название, с одной стороны, хорошо отражает основную цель адаптации алгоритма – минимизацию выраженного в явном виде вектора взаимной корреляции активного сигнала и остаточного эхосигнала. С другой стороны, оно подчеркивает его основную алгоритмическую особенность – использование «виртуального остаточного эхосигнала» для оценки ВКФ.

Процедура настройки коэффициентов исполнительного элемента в случае МКВС описывается выражением:

$$h_{i+1}(\varepsilon) = h_i(\varepsilon) + \frac{\sum_{l=0}^{M-1} x_{i-\varepsilon-l} * z_{i-l}'}{(\sum_{l=0}^{M-1} x_{i-\varepsilon-l}^2 + B) * \rho}. \quad (4)$$

Естественно, что сигнал z'_i является служебным и не должен использоваться для формирования сигнала в тракте обратного направления передачи. Сигнал обратного направления передачи формируется обычным способом, без использования любых служебных сигналов.

Структурная схема системы рекурсивной оценки импульсной характеристики эхотракта при применении МКВС представлена на рисунке 1:

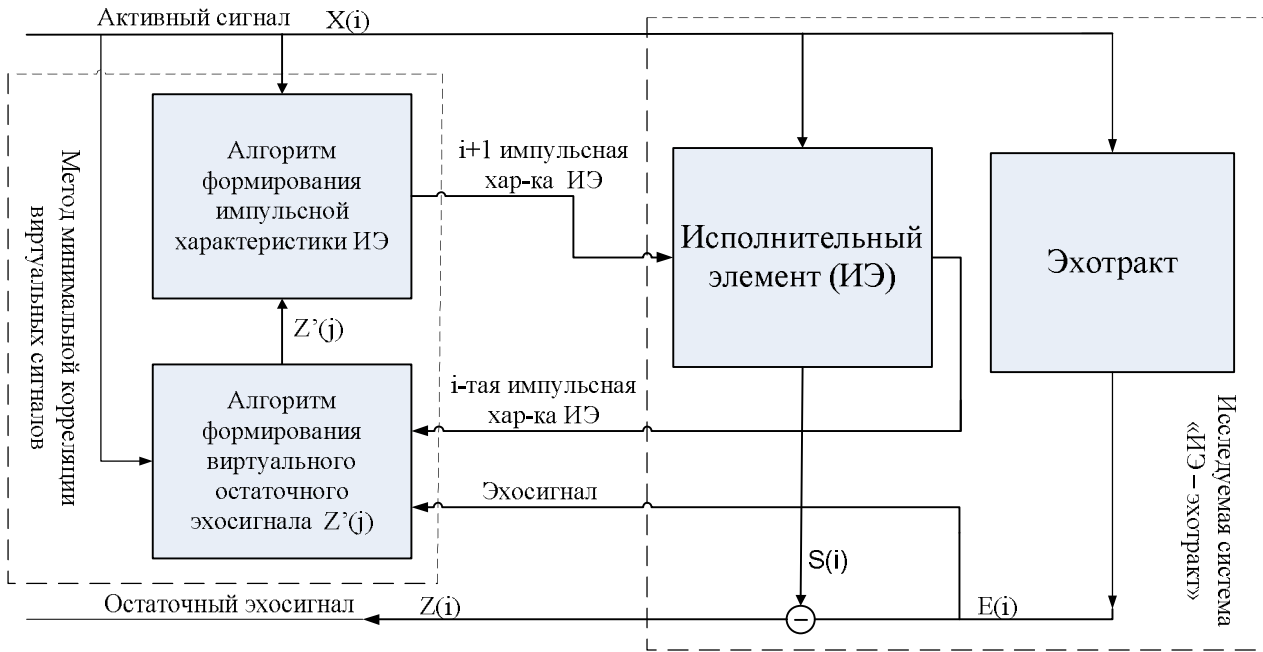


Рисунок 1 – Структурная схема системы рекурсивной оценки эхотракта при применении алгоритма МКВС

Алгоритм функционирования блока формирования сигнала z'_i представлен на рисунке 2. Как видно, для формирования виртуального остаточного эхосигнала предварительно необходимо сформировать виртуальный сигнал с выхода трансверсального фильтра s'_i , который также имел бы место быть, если бы алгоритм адаптации не осуществлял настройку коэффициентов фильтра.

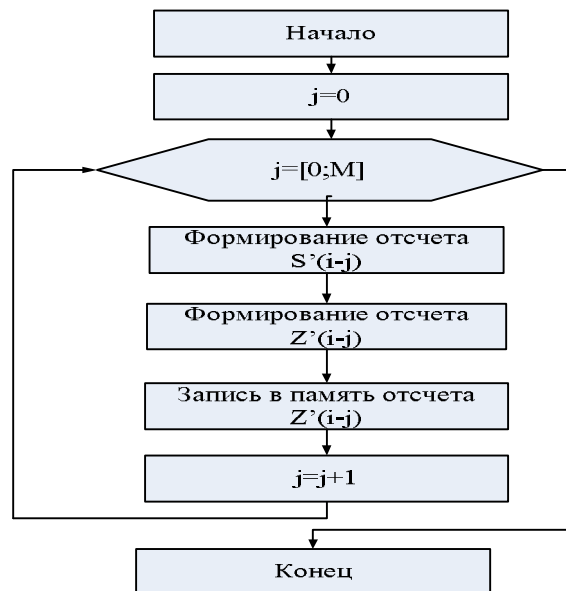


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма формирования виртуального остаточного эхосигнала

Представленное выше описание алгоритма МКВС нацелено, прежде всего, на отображение сути процесса адаптации. Для более строго математического представления необходимо определить связь алгоритма с уравнением Винера-Хопфа. Для этого запишем уравнение Винера-Хопфа для произвольного момента дискретного времени с учетом ненулевой импульсной характеристики исполнительного элемента (исследуемая система согласно рисунку 1):

$$H_{N,i+1} = H_{N,i} + R_{N,i}^{-1} * P_{XZ'_{N,i}}. \quad (5)$$

Согласно общей для алгоритмов, реализующих корреляционный принцип, аппроксимации автокорреляционной матрицы активного сигнала необходимо заменить в выражении (5) матрицу $R_{N,i}$ на диагональную матрицу вида:

$$R_N \approx R_{\text{бш}N,i} = E \left\{ \begin{array}{cccc} x_i^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_{i-1}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & x_{i-\varepsilon}^2 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & x_{i-N}^2 \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Учитывая (6), а также добавляя параметр адаптации и регуляризацию, выражение (5) можно записать как:

$$H_{N,i+1} = H_{N,i} + \mu * (R_{\text{бш}N,i} + \delta E)^{-1} * P_{XZ'_{N,i}}. \quad (7)$$

Рассмотрим более подробно вектор $P_{XZ'}$. Согласно определению сигнала $z'_{j,i}$ этот сигнал может быть представлен как разница эхосигнала и виртуальной копии сигнала с выхода исполнительного элемента ($s'_i = H^T_{N,i} * X_{N,i}$), то есть можно записать:

$$z'_i = e_i - H^T_{N,i} * X_{N,i}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в выражение для вектора $P_{XZ'_{N,i}}$, имеем:

$$P_{XZ'_{N,i}} = E\{X_{N,i} * [e_i - H^T_{N,i} * X_{N,i}]\}. \quad (9)$$

Для более удобного представления вектора $P_{XZ'_{N,i}}$ раскроем скобки в выражении (9):

$$P_{XZ'_{N,i}} = E\{X_{N,i} * e_i - X_{N,i} * (H^T_{N,i} * X_{N,i})\}. \quad (10)$$

Переходя к оценке вектора взаимной корреляции по конечной выборке сигналов, можно записать итоговые выражения для алгоритма МКВС в следующем векторно-матричном виде:

$$H_{N,i+1} = H_{N,i} + \mu * (R_{\text{бш}N,i} + \delta E)^{-1} * P_{XZ'_{N,i}}; \quad (11)$$

$$P_{XZ'_{N,i}} = \sum_{l=0}^{M-1} [X_{N,i-l} * e_{i-l} - X_{N,i-l} * (H^T_{N,i} * X_{N,i-l})]. \quad (12)$$

где: $X_{N,i}$ - вектор значений активного сигнала, $P_{XZ'_{N,i}}$ - вектор взаимной корреляции, Z' - виртуальный остаточный эхосигнал, δ -малая величина, E - единичная

матрица, $R_{бш_{N,i}}$ - автокорреляционная матрица белого шума эквивалентной мощности, e_i - эхосигнал, μ - параметр адаптации, M - количество отсчетов оценки ВКФ, N - количество коэффициентов фильтра.

Вычислительная сложность алгоритма МКВС определяется $2 * N * M + N + 1$ операциями умножения и $2 * N * M + 3 * N$ операциями сложения (вычитания) на одну итерацию. При этом исследования возможности снижения вычислительной сложности МКВС показали, что существуют способы построения алгоритма, являющегося для стационарных сигналов математическим эквивалентом МКВС, вычислительная сложность которого будет определяться $N * \text{Log}_2 N + 3 * N$ операциями умножения на итерацию.

Для исключения негативного влияния пауз в активном сигнале предложено перейти от параллельной работы детектора активного сигнала и алгоритма адаптации к их последовательной во времени работе. То есть сначала детектор анализирует активный сигнал, а уже затем, в случае наличия приемлемого для адаптации сигнала, производится настройка ИЭ. Эту идею иллюстрирует рисунок 3:

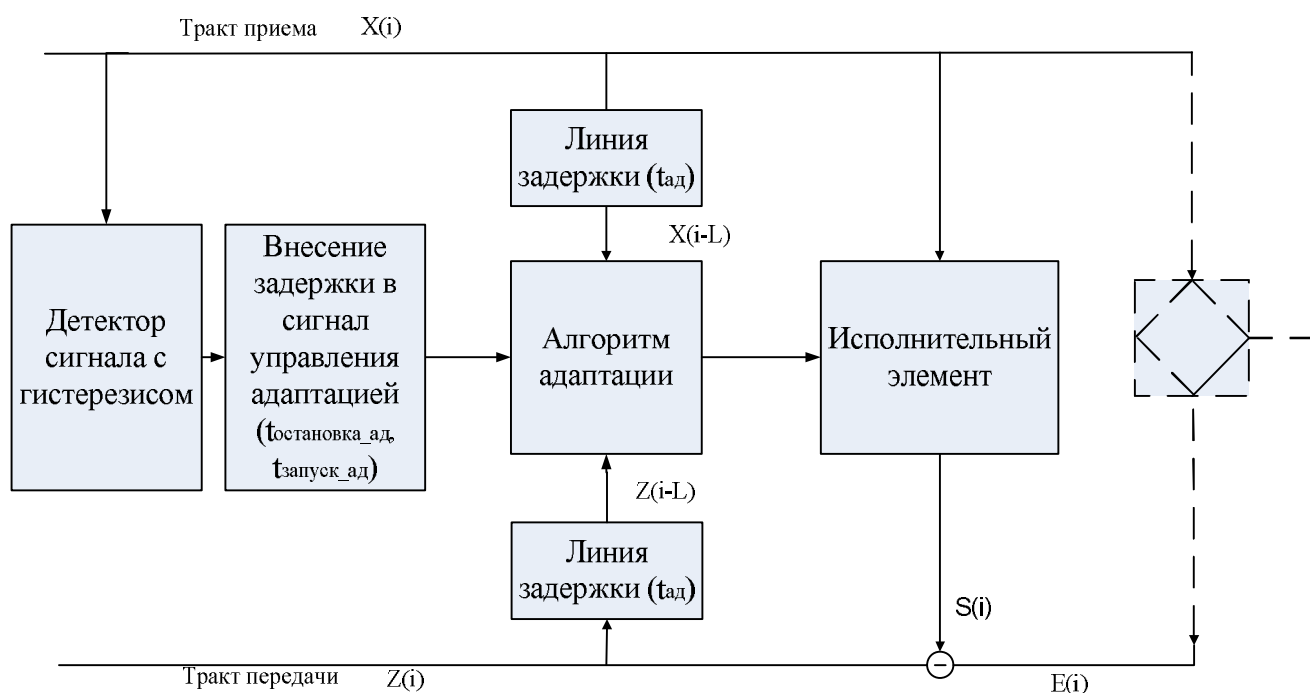


Рисунок 3 – Структурная схема корреляционного эхокомпенсатора с применением метода снижения влияния пауз

Очевидно, что время, на которое задерживается сигнал для алгоритма адаптации, должно быть не меньше времени детектирования паузы. При этом рационально использовать неодинаковую задержку для остановки процесса

адаптации при детектировании паузы и запуска процесса адаптации после действия паузы. Так, остановка адаптации должна происходить сразу после детектирования паузы, без дополнительных задержек, тогда как при детектировании активного сигнала после паузы управляющий сигнал должен быть задержан на некоторое время. Это время должно быть достаточным для накопления приемлемых статистических данных об активном сигнале и остаточном эхосигнале.

Описанный способ позволяет реализовать адаптацию эхокомпенсатора только на активных участках обучающего сигнала. Таким образом, динамика адаптации при применении этого метода во многом схожа с динамикой адаптации на сигнале с искусственно удаленными паузами. Безусловным минусом данного метода является то, что адаптация происходит с некоторой задержкой.

Для увеличения помехоустойчивости алгоритмов, реализующих корреляционный принцип адаптации, предложен метод, основанный на управлении параметрами алгоритма адаптации в зависимости от критерия настроенности эхокомпенсатора. Потенциальная эффективность данного метода обусловлена достаточно сильной зависимостью уровня подавления эха от значения параметра адаптации и количество отсчетов оценки ВКФ.

Для надежного функционирования метода необходим достаточно точный и устойчивый к аддитивным шумам критерий настроенности эхокомпенсатора, который позволит с уверенностью судить о текущем состоянии процесса адаптации. Исследования, направленные на поиск такого критерия, показали, что наибольшей помехоустойчивостью обладает критерий, который основывается на оценке приращения компоненты сигнала с выхода исполнительного элемента, обусловленной работой алгоритма адаптации, а именно:

$$K = \frac{\sum_{j=0}^L [\sum_{\varepsilon=0}^N \Delta h_i(\varepsilon) * x_{i-\varepsilon+1} * p]^2}{L}, \quad (12)$$

где L – количество отсчетов, по которым усредняется критерий.

Этот критерий был взят за основу для дальнейшей разработки метода. Так как для работы метода важна динамика K , а не его абсолютное значение, разумно наблюдать величину, отображающую динамику критерия K , например:

$$Cr = \frac{\sum_{j=i-G}^i K(j)}{\sum_{j=i-G}^i K(j-G)}, \quad (13)$$

где G – количество значений критерия K , участвующих в усреднении.

Алгоритм управления параметрами алгоритма адаптации, построенный на наблюдении за поведением критерия Cr , представлен на рисунке 4.

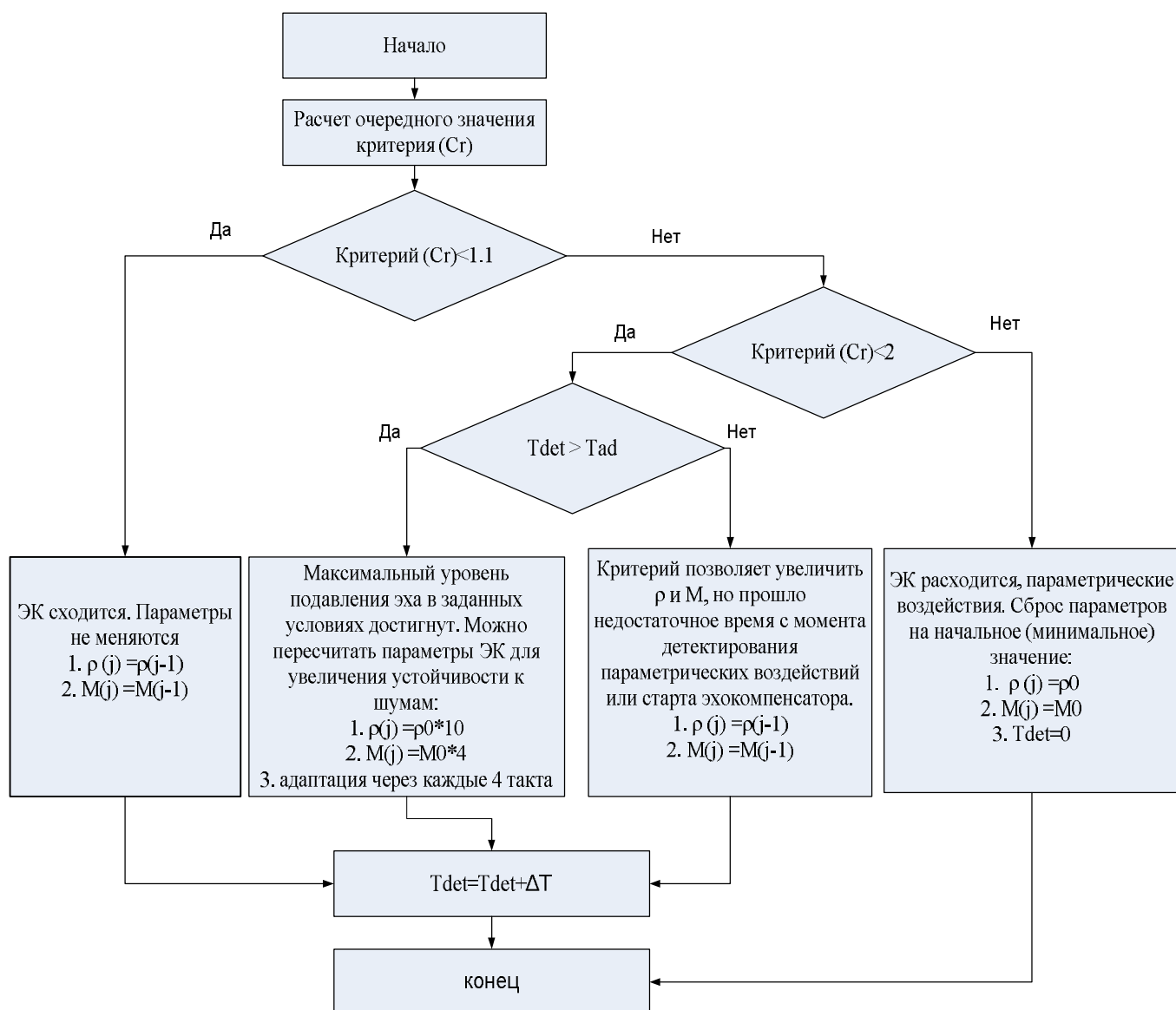


Рисунок 4 – Алгоритм работы блока управления параметрами корреляционного алгоритма

Пятая глава посвящена исследованию эффективности разработанных в предыдущей главе алгоритмов и методов.

Исследование скорости сходимости алгоритма МКВС выявило зависимости вносимого затухания (показателя ERLE) от номера итерации адаптации, которые изображены на рисунках 5 и 6. В качестве активного сигнала на рисунке 5 используется речевой сигнал, а на рисунке 6 – модулированный сигнал (QAM16). Для сравнения на рисунке 5 приведены зависимости для НМНСК и корреляционного алгоритма, полученные в аналогичных условиях. На рисунке 6 для сравнения представлена зависимость для НМНСК.

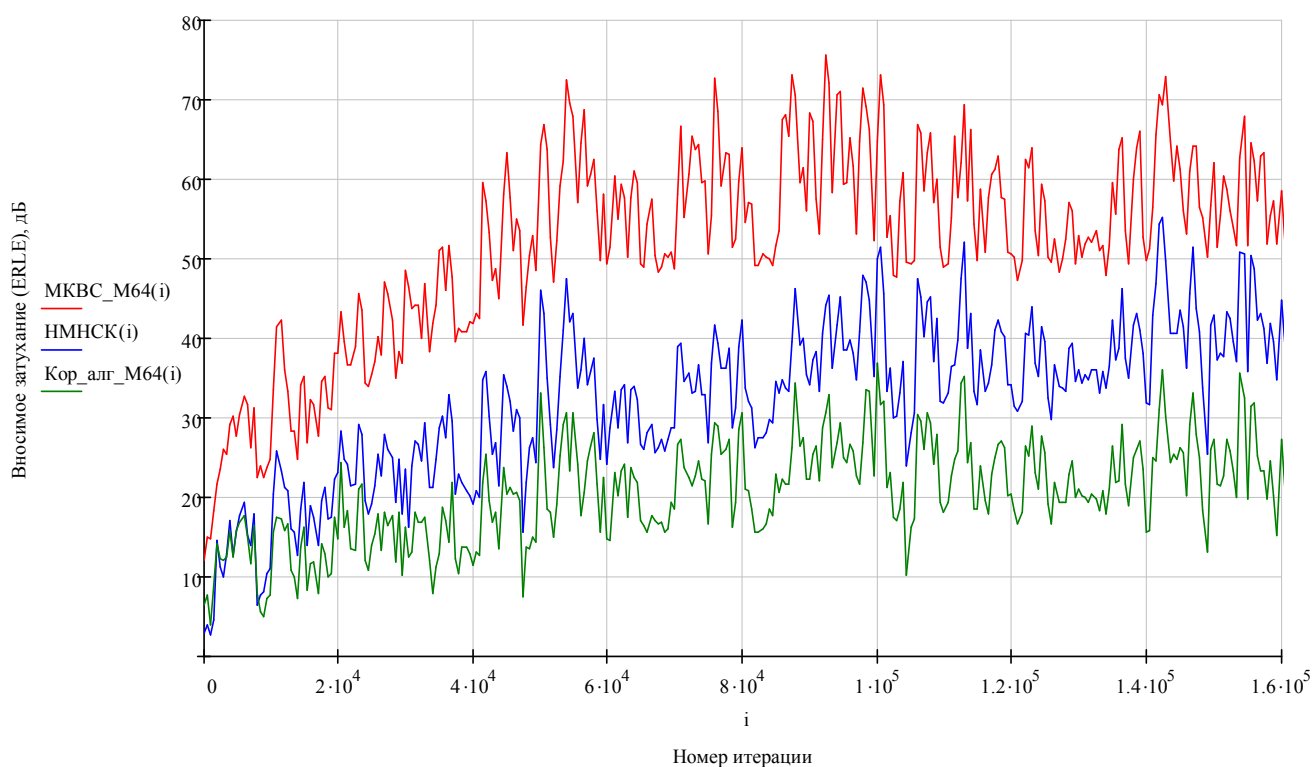


Рисунок 5 – Зависимость вносимого затухания от номера итерации для корреляционного алгоритма, HMNSK и MKBC при адаптации на речевом сигнале

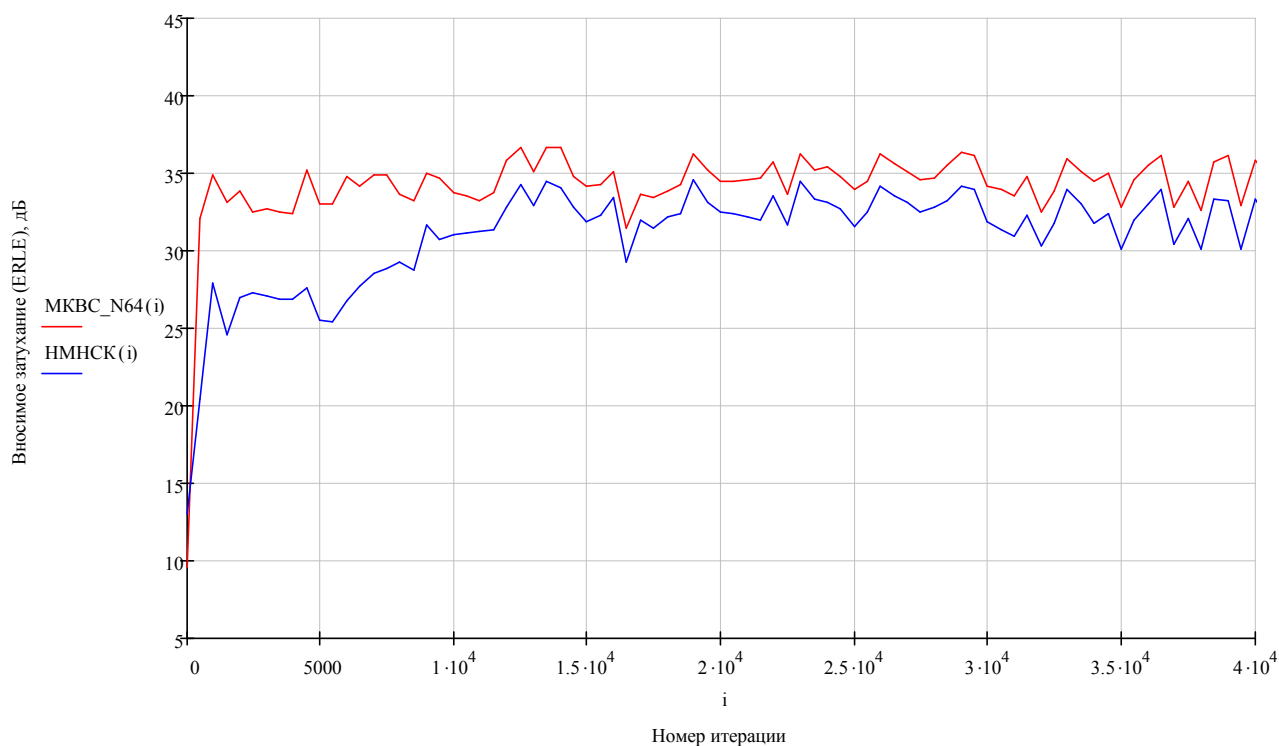


Рисунок 6 – Зависимость вносимого затухания от номера итерации для HMNSK и MKBC при адаптации на сигнале QAM16

Из представленных выше графиков видно, что алгоритм МКВС обладает высокой скоростью сходимости, превосходя по этому показателю корреляционный алгоритм и НМНСК. При этом для алгоритма МКВС не прослеживается характерная для корреляционного алгоритма зависимость скорости и стабильности сходимости от количества отсчетов оценки ВКФ, что продемонстрировано на рисунках 7 и 8. На рисунке 7 показана зависимость для МКВС, на рисунке 8 – для корреляционного алгоритма. Представление результатов исследования на отдельных графиках обусловлено соображениями репрезентативности данных.

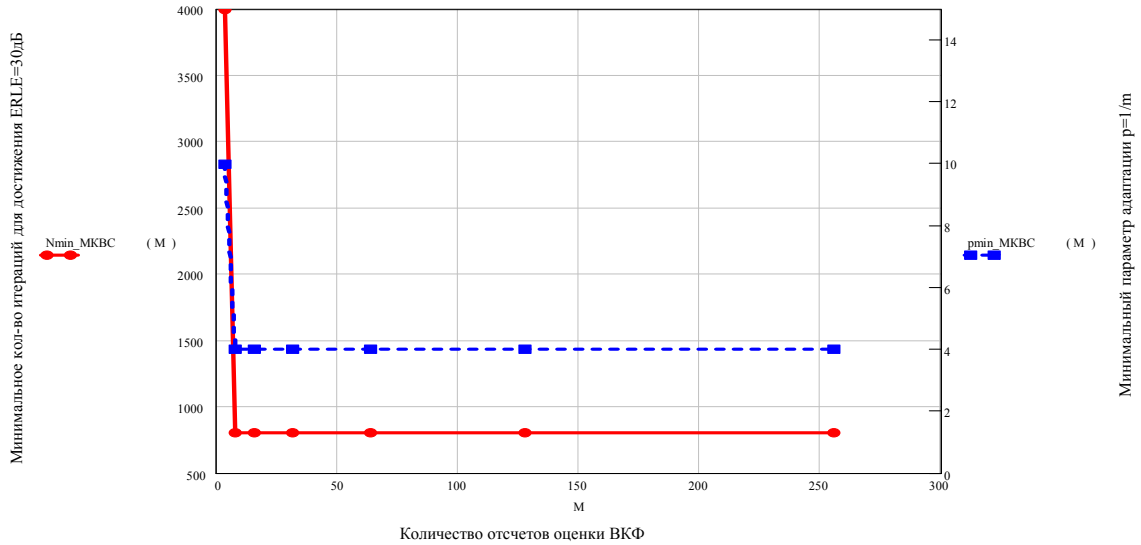


Рисунок 7 – Минимальное количество итераций для достижения $ERLE=30$ дБ и минимальный параметр адаптации в зависимости от количества отсчетов оценки ВКФ для МКВС

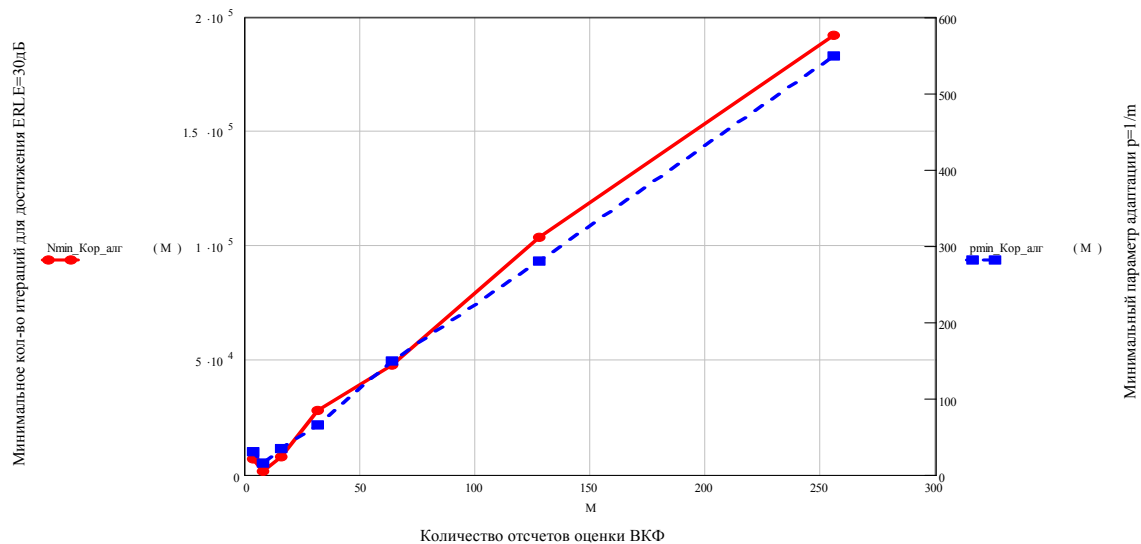


Рисунок 8 – Минимальное количество итераций для достижения $ERLE=30$ дБ и минимальный параметр адаптации в зависимости от количества отсчетов оценки ВКФ для корреляционного алгоритма

Исследование помехоустойчивости алгоритма МКВС показало, что она эквивалента помехоустойчивости корреляционного алгоритма, и имеет аналогичные зависимости. Типовые зависимости уровня аддитивного шума (встречного сигнала) относительно уровня остаточного эхосигнала для МКВС и корреляционного алгоритма от количества отсчетов оценки ВКФ представлены на рисунке 9:

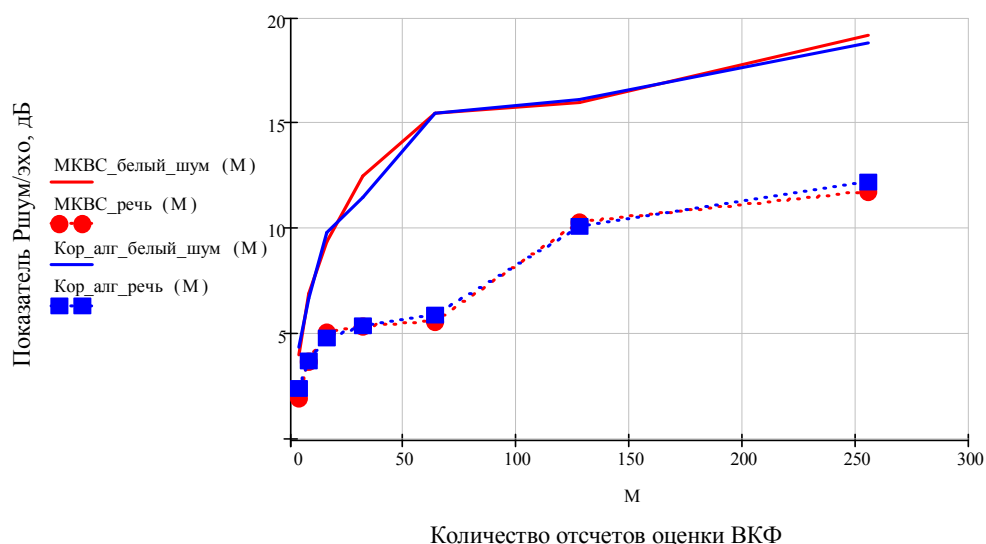


Рисунок 9 – Показатель $p_{шум/эхо}$ для корреляционного алгоритма и МКВС в зависимости от количества отсчетов оценки ВКФ для двух типов аддитивной помехи: белый шум и речевой сигнал

Исследование метода снижения влияния пауз в активном сигнале показало, что он позволяет практически полностью исключить их негативное влияние. Полученные зависимости вносимого затухания, обеспечиваемого эхокомпенсатором, сразу после действия паузы от параметра адаптации приведены на рисунке 10:

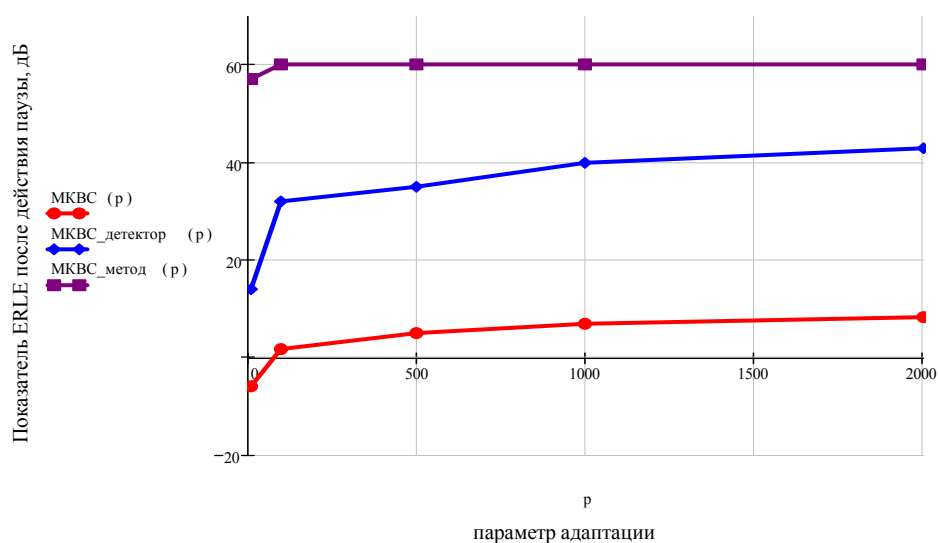


Рисунок 10 – Зависимость ERLE после действия паузы от параметра адаптации

Применение детектора активного сигнала, оценивающего уровень активного сигнала на интервале 2 мс (частота дискретизации 8 кГц), в классической схеме включения значительно повышает устойчивость эхокомпенсатора к негативному воздействию пауз, однако полностью проблему их влияния не устраняет. Из графика видно, что при малом параметре адаптации и, соответственно, высокой скорости адаптации применение детектора активного сигнала в классической схеме включения обеспечивает подавление эхосигнала сразу после действия паузы всего порядка 14 дБ. В то же время, применение разработанного метода снижения влияния пауз приводит к тому, что эхокомпенсатор остается практически нечувствителен к паузам даже при максимально возможной скорости адаптации, обеспечивая максимальное в заданных условиях вносимое затухание (60дБ).

Исследование метода повышения устойчивости к аддитивным шумам показало зависимость уровня подавления эха от начального параметра адаптации, которая изображена на рисунке 11. Для наглядности приведены также результаты для алгоритма МКВС с параметром адаптации, который выбран равным начальному параметру адаптации для модернизированного алгоритма.

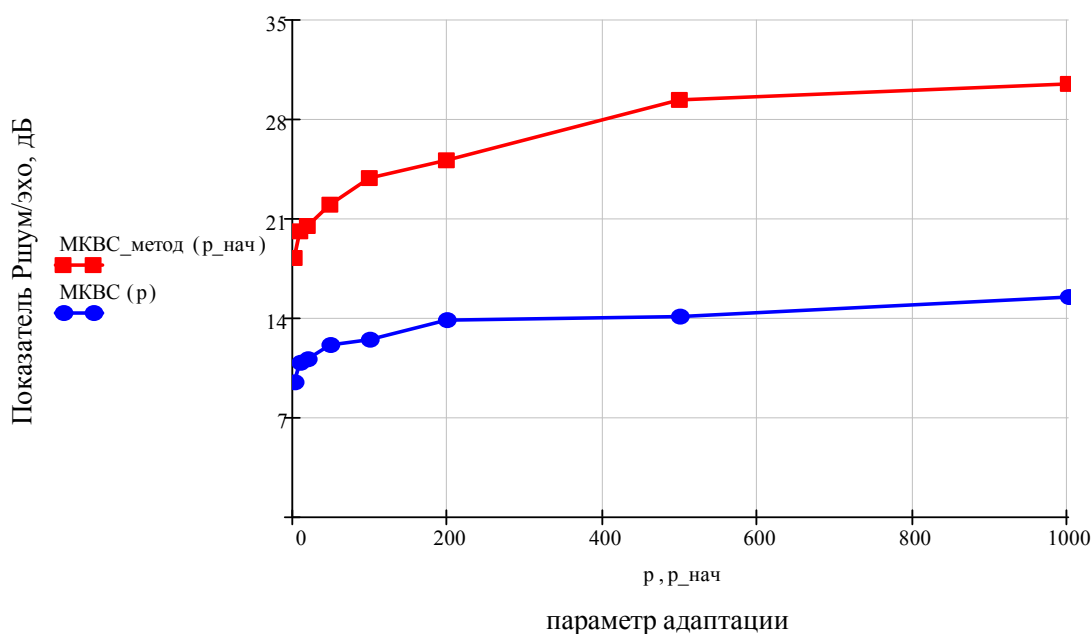


Рисунок 11 – Зависимость показателя $p_{\text{шум/эхо}}$ от параметра адаптации (начального параметра адаптации) для МКВС и МКВС с применением метода повышения помехоустойчивости

Как видно из рисунка, применение метода позволяет значительно повысить устойчивость корреляционного алгоритма к аддитивным шумам. Для выбранных параметров алгоритма вносимое затухание повысилось в среднем на 12 дБ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведено теоретическое исследование корреляционного принципа адаптации. В рамках этого исследования осуществлен вывод системы математических выражений, описывающих процессы адаптации корреляционного алгоритма и алгоритма МКВС, и установлена их математическая связь с основными положениями винеровского оптимального оценивания.

2. Проведены практические исследования корреляционного алгоритма, которые выявили эмпирические зависимости его функциональных характеристик от параметров алгоритма, статистических характеристик активного сигнала, статистических свойств аддитивных помех, формы импульсной характеристики эхотракта, нелинейных искажений эхосигнала и т.п.

3. Разработан новый алгоритм адаптации устройств компенсации эхосигналов, получивший в работе название «минимальная корреляция виртуальных сигналов» (МКВС). Алгоритм обладает высокой скоростью сходимости, стабильностью и помехоустойчивостью.

4. Предложен способ снижения вычислительной сложности МКВС, основывающийся на быстром алгоритме умножения матрицы Тёплица на вектор. Предложенный способ позволяет построить на базе МКВС алгоритм, вычислительная сложность которого определяется $N * \log_2 N + 3 * N$ операциями умножения на итерацию. При этом вычислительная сложность оригинального алгоритма МКВС определяется $2 * N * M + N + 1$ операциями умножения и $2 * N * M + 3 * N$ операциями сложения (вычитания) на итерацию.

5. Разработан вспомогательный метод снижения влияния пауз в активном сигнале на динамику адаптации корреляционных алгоритмов. Совместные испытания МКВС и данного метода показали высокую эффективность последнего. Итоговый алгоритм остается нечувствителен к паузам в активном сигнале даже при максимальных скоростях адаптации.

6. Разработан вспомогательный метод повышения помехоустойчивости алгоритмов, реализующих корреляционный принцип. Совместное исследование предложенного метода и МКВС показали значительное повышение помехоустойчивости при контролируемом итоговом снижении скорости адаптации. С выбранными в рамках исследования параметрами вносимое затухание повысилось на 12 дБ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Душин, С.В. Повышение помехоустойчивости взаимокорреляционного алгоритма подавления эхосигнала / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Вестник связи. – 2013. – №11. – С. 45-48.
2. Душин, С.В. Устранение негативного влияния пауз на работу устройств компенсации эха / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Вестник связи. – 2013. – №4. – С. 32-35.
3. Душин, С.В. Исследование возможности снижения влияния автокорреляционных связей в активном сигнале на динамику адаптации взаимокорреляционного алгоритма / С.В. Душин // Проектирование и технология электронных средств. – 2013. – № 2. – С. 9-12.
4. Душин, С.В. Сходимость корреляционного алгоритма адаптации / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Вестник связи. – 2013. – №1. – С.24-26.
5. Душин, С.В. Исследование причин снижения эффективности базовых алгоритмов компенсации эха / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Вестник связи. – 2012. – №7. – С. 18-21.
6. Душин, С.В. Анализ возможностей современных эхокомпенсационных механизмов / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Вестник связи. – 2011. – №12. – С. 41-46.
7. Душин, С.В. Влияние параметрических изменений эхотракта на работу взаимокорреляционного эхокомпенсатора / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Т-Comm – 2011. – №8. – С. 47-49.

Публикации в материалах международных конференций

8. Душин, С.В. Теоретические основы корреляционного алгоритма адаптации / С.В. Душин // Материалы 72-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» посвященная Дню радио – Москва, 2017. – С. 297-301.
9. Душин, С.В. Новый рекурсивный алгоритм адаптивной настройки механизмов компенсации эхосигналов: минимальная корреляция виртуальных сигналов / С.В. Душин // Материалы 19-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2017)» (ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 29-31 марта 2017 г.) – Москва, 2017. – Том 1. – С. 126-131.
10. Душин, С.В. Стабильность взаимокорреляционного эхокомпенсатора / С.В. Душин, С.С. Шаврин // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» INTERMATIC – Москва, 2010. – Ч.3 – С. 155-158.