

Бычков Денис Федорович

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ
ЭХОКОМПЕНСАТОРОВ В ТЕЛЕФОННЫХ СЕТЯХ**

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир, 2011

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника и радиосистемы» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Никитин Олег Рафаилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ланцов Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Тараканов Алексей Николаевич

Ведущая организация

Защита диссертации состоится «8» ноября 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301.

Тел./факс: (4922) 479960

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Автореферат разослан «5» октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.Г. Самойлов

ВВЕДЕНИЕ

Качество передачи речевой информации является одним из конкурентных показателей операторов связи. Важным направлением развития телекоммуникационных систем на современном этапе является модернизация, повышение эффективности функционирования и улучшения качества передаваемой информации в существующих системах связи, которые получили широкое распространение на предыдущих этапах развития телекоммуникационных систем. Применение современной теории и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) позволяет повысить эффективность и качество предоставляемых услуг операторами связи.

Большой вклад в развитие теории и алгоритмов ЦОС, которые нашли широкое применение в системах связи, принадлежит как отечественным ученым (Котельников В.А., Цыпкин Я.З., Шахгильдян В.В., Шинаков Ю.С., Пестряков Л.В., Гольденберг Л.М., Ланнэ А.А., Карташев В.Г., Витязев В.В. и др.), так и зарубежным авторам (Гоулд Б., Рейдер Ч., Кайзер Д, Оппенгейм А., Рабинер Л., Шафер Р., Актоньо А., Хэмминг Р. и др.).

Исторически сложилось так, что в целях экономии абонентское оборудование к телефонным станциям подключается по двухпроводным линиям, а магистральные линии являются четырехпроводными. Для стыковки четырехпроводных и двухпроводных линий используются дифференциальные системы, которые не обеспечивают идеальной развязки, вследствие этого сигнал, принимаемый от источника, возвращается к нему в виде эхосигнала.

Эхосигнал может исказить речь или сделать ее неразборчивой. Отрицательный эффект проявляется сильнее с увеличением длительности задержки эхосигнала в эхотракте. Таким образом, возникает задача устранения эхосигнала в телекоммуникационных системах связи.

Наиболее эффективным методом устранения эхосигнала на современном этапе является эхокомпенсация, предполагающая использование теории адаптивной обработки сигналов. Серьезный вклад в развитие адаптивной обработки сигналов внесли такие ученые, как: Хайкин С., Винер Н., Калман Р., Уидроу Б., Коуэн К., Грант П., Цыпкин Я.З., Репин В.Г., Тартаковский Г.Г., Фомин В.Н., Шахгильдян В.В., Чураков Е.П., Коршунов Ю.М., Стриз С., Тараканов А.Н. и др. В рамках теории адаптивной обработки сигналов задача эхокомпенсации формулируется как задача прямого моделирования (идентификации) динамической системы.

Несмотря на то, что идея адаптивной эхокомпенсации была предложена в середине 60-х годов прошлого века, она продолжает развиваться и в настоящее время, о чем свидетельствует большое число публикаций, посвященных данной проблематике в отечественных и зарубежных изданиях.

При создании эхокомпенсаторов делается предположение о том, что телефонный канал обладает линейными характеристиками, однако в последнее время активно ведутся исследования влияния нелинейных составляющих эхотракта и их влияния на качество передаваемой речи.

Эффективность функционирования адаптивного фильтра (АФ) зависит от алгоритма, лежащего в его основе. Алгоритм адаптивной фильтрации на основании информации о величине ошибки на выходе АФ, сигнале дальнего абонента

подстраивает коэффициенты АФ таким образом, чтобы минимизировать остаточную ошибку. Оценка эхосигнала получается путем свертки коэффициентов фильтра и сигнала дальнего абонента.

Основными характеристиками работы алгоритмов являются: скорость сходимости, уровень остаточного эхосигнала и вычислительная сложность алгоритма (количество арифметических операций сложения и умножения за одну итерацию). Ограничение характеристик алгоритмов на практике часто приводит к невозможности работы алгоритма в реальном времени или значительному увеличению стоимости конечного устройства.

Развитие IP-телефонии и спутниковой связи привело к увеличению длительности импульсной характеристики эхотракта. Для компенсации эхосигнала с большой задержкой необходимо увеличение количества коэффициентов АФ, и, следовательно, увеличение вычислительной сложности. Несмотря на постоянное увеличение производительности сигнальных процессоров актуальной является задача уменьшения вычислительной сложности существующих алгоритмов адаптивной фильтрации без потерь в качестве.

Методы уменьшения вычислительной сложности алгоритмов адаптивной фильтрации обладают рядом недостатков:

- снижение показателей работы алгоритма;
- отсутствие математических моделей поведения алгоритмов;
- уменьшение диапазонов параметров, гарантирующих схождение алгоритмов;
- отсутствие учета особенностей работы в различных режимах.

Данные недостатки приводят к снижению возможностей применения методов уменьшения вычислительной сложности в задачах эхокомпенсации.

Поэтому актуальной является задача теоретического исследования алгоритмов с применением методов уменьшения вычислительной сложности, а также получение математической модели поведения алгоритмов.

Создание новых алгоритмов с применением методов уменьшения вычислительной сложности, которые в процессе работы будут учитывать особенности различных режимов работы алгоритмов, позволит снизить стоимость конечного устройства, повысить эффективность существующих устройств за счет выделения свободных ресурсов для других задач, повышения производительности или снижения энергопотребления, что позволит повысить конкурентоспособность изделий.

Целью работы является улучшение характеристик алгоритмов адаптивной фильтрации, используемых в эхокомпенсаторах, путем автоматического изменения постоянных параметров алгоритма в зависимости от уровня подавления эхосигнала.

Для достижения указанной цели в диссертационном исследовании предполагается решение следующих **задач**:

1. анализ существующих методов уменьшения вычислительной сложности алгоритмов адаптивной фильтрации, используемых в эхокомпенсации;
2. получение математической модели поведения в условиях стационарного и нестационарного эхотракта существующего алгоритма ММхх аффинных проекций (АП) и анализ его сходимости;

3. разработка критерия динамического уменьшения вычислительной сложности алгоритма адаптивной фильтрации с переменным шагом адаптации (ПША);

4. проведение исследования по сравнению характеристик предложенных алгоритмов адаптивной фильтрации, используемых в эхокомпенсации, с классическими.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались современные методы цифровой адаптивной обработки сигналов, методы компьютерного моделирования, математического анализа и статистики, матричного исчисления. Моделирование и тестирование предлагаемых алгоритмов проводилось с использованием программных пакетов MATLAB и LabView.

Научная новизна работы

1. Получены аналитические выражения, описывающие поведение алгоритма адаптивной фильтрации ММах АП, используемых в эхокомпенсации, в переходном и установившемся режимах работы.

2. Найдено аналитическое выражение, позволяющее оценить потенциальное эхоподавление при условии нестационарного эхотракта.

3. Произведен анализ сходимости алгоритма адаптивной фильтрации ММах АП.

4. Разработан алгоритм адаптивной фильтрации с переменной вычислительной сложностью и ПША.

Практическая ценность работы

1. Предложенный алгоритм переменного ММах АП с ПША (ПММах АП с ПША) при одинаковой скорости сходимости в переходном режиме обеспечивает в установившемся режиме по сравнению с алгоритмами АП и ММах АП снижение вычислительной сложности более чем на 35% и 15% и снижение остаточной ошибки более чем на 2,5 дБ и 3 дБ соответственно.

2. Показано, что алгоритм ПММах нормализованный метод наименьших квадратов с ПША (ПММах НМНК с ПША) при одинаковой скорости сходимости в переходном режиме обеспечивает в установившемся режиме по сравнению с алгоритмами НМНК и ММах НМНК снижение вычислительной сложности более чем на 40% и 20% и снижение остаточной ошибки более чем на 3 дБ и 3,5 дБ соответственно.

3. Найден диапазон шага адаптации, гарантирующий сходимость алгоритма ММах АП.

Предметом исследования настоящей диссертационной работы являются методы и алгоритмы адаптивной фильтрации, применяющиеся при решении задач эхокомпенсации.

На защиту выносятся:

1. Аналитические выражения, описывающие поведение среднего квадрата ошибки (MSE) на выходе АФ, работающего по алгоритму ММах АП в переходном и установившемся режимах.

2. Результаты теоретического анализа влияния нестационарного эхотракта на степень эхоподавления алгоритма ММах АП.

3. Результаты анализа сходимости алгоритма ММах АП.

4. Алгоритмы с переменной вычислительной сложностью и ПША.
5. Результаты анализа влияния постоянных параметров на выходные характеристики предложенных адаптивных алгоритмов.
6. Результаты тестирования эхокомпенсатора на основе предложенных адаптивных алгоритмов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 108 наименований. Общий объем диссертационной работы вместе с приложениями составляет 145 страниц. Работа содержит 52 рисунка и 14 таблиц.

Апробация результатов работы и публикации

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ. Из них 3 статьи в журналах центральной печати из перечня ВАК, 1 патент на полезную модель. Основные результаты диссертационной работы были представлены на: I Международной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации» (г. Тольятти, 2011); 66-й Всероссийской конференции с международным участием "Научная сессия, посвященная Дню радио" (г. Москва, 2011); V Всероссийской конференции аспирантов и молодых ученых с международным участием «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление» (г. Ковров, 2010); I всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства передачи и приёма сигналов и визуализации информации» (г. Таганрог, 2011); Международной конференции «Современные телекоммуникационные системы и компьютерные сети» (г. Санкт-Петербург, 2011).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первом разделе приведен обзор основных алгоритмов адаптивной фильтрации, применяемых в эхокомпенсаторах. Структурная схема эхокомпенсатора приведена на рисунке 1.

На схеме введены следующие обозначения: $x(n)$ – входной сигнал, $y(n)$ – эхосигнал, $\hat{y}(n)$ – оценка эхосигнала АФ, $h(n)$ – импульсная характеристика эхотракта, $\hat{h}(n)$ – весовые коэффициенты АФ, $v(n)$ – аддитивный шум, $d(n)$ – аддитивная смесь эхосигнала и шума, $e(n)$ – ошибка на выходе эхокомпенсатора (остаточное эхо), ДВР - детектор встречного разговора.

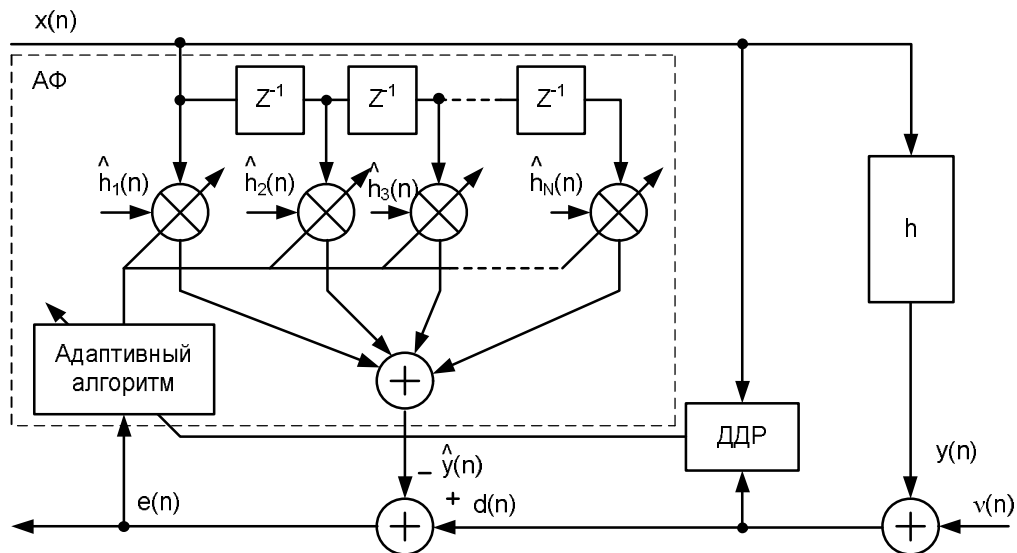


Рисунок 1. Структурная схема эхокомпенсатора.

Проведен сравнительный анализ существующих методик снижения вычислительной сложности алгоритмов адаптивной фильтрации применительно к алгоритму АП. Результаты проведенного анализа позволяют выделить следующие недостатки методик снижения вычислительной сложности:

- уменьшение скорости сходимости по сравнению с алгоритмом АП;
- зависимость от постоянных параметров алгоритма выходных характеристик АФ;
- неопределенность выбора шага адаптации в условиях нестационарного эхотракта;
- уменьшение диапазона шага адаптации, гарантирующего сходимость алгоритма.

Результаты анализа показали, что наиболее предпочтительным методом уменьшения вычислительной сложности является ММах, который среди методов, основанных на сортировке входного сигнала, обеспечивает наименьшую вычислительную сложность, а по сравнению с блочными методами – меньшую остаточную ошибку.

Коэффициенты фильтра по алгоритму ММах АП рассчитываются по следующему соотношению:

$$\hat{h}(n+1) = \hat{h}(n) + \mu I_M X^T(n) (\varepsilon I + X(n) X^T(n))^{-1} e(n), \quad (1)$$

где μ – шаг адаптации, $(\dots)^T$ – операция транспонирования, ε – коэффициент регуляции, I – единичная матрица, $X(n)$ – матрица входного сигнала, I_M – диагональная матрица с главной диагональю из M единичных коэффициентов и $N-M$ нулевых коэффициентов.

Проведено исследование зависимости выходных характеристик алгоритма ММах АП от выбора постоянных параметров алгоритма. Показано, что в зависимости от выбора шага адаптации μ , размера матрицы K входного сигнала и параметра M , который отвечает за вычислительную сложность, уровень остаточной ошибки величины расстройки может изменяться более чем на 10 дБ, а скорость сходимости более чем в 4 раза.

Второй раздел посвящен теоретическому исследованию существующего алгоритма ММaх АП. Исследования построены на методе энергосбережения, который был предложен для анализа алгоритмов АФ.

Рассмотрено поведение среднего квадрата ошибки (MSE) на выходе АФ в установившемся режиме при условии стационарного эхотракта. Исходя из условия статистической независимости входного сигнала $x(n)$ и шума $v(n)$, были получены аналитические выражения:

1) для малого значения шага адаптации μ :

$$\text{MSE} = E |e^2(n)| = \sigma_v^2 + \frac{\mu \sigma_v^2}{2 - \mu} \quad (2)$$

2) для большого значения шаг адаптации μ :

$$\text{MSE} = \sigma_v^2 + \frac{\mu \sigma_v^2}{2 - \mu} \frac{\text{Tr} R}{\beta_M} E \left[\frac{K \| \tilde{x}(n) \|_2^2}{\| x(n) \|_2^4} \right] \quad (3)$$

где $\sigma_v^2 = E |v^2(n)|$ - мощность шума, $\text{Tr} R$ - след автокорреляционной матрицы входного сигнала, K - размер матрицы входного сигнала, $E(\dots)$ - математическое ожидание, β_M - константа, показывающая, во сколько след автокорреляционной матрицы уменьшается вследствие частичного обновления, и лежащая в диапазоне $0 < \beta_M < 1$, $\| x(n) \|_2^2 = \| x^T(n)x(n) \|_2, \dots$ - Евклидова норма.

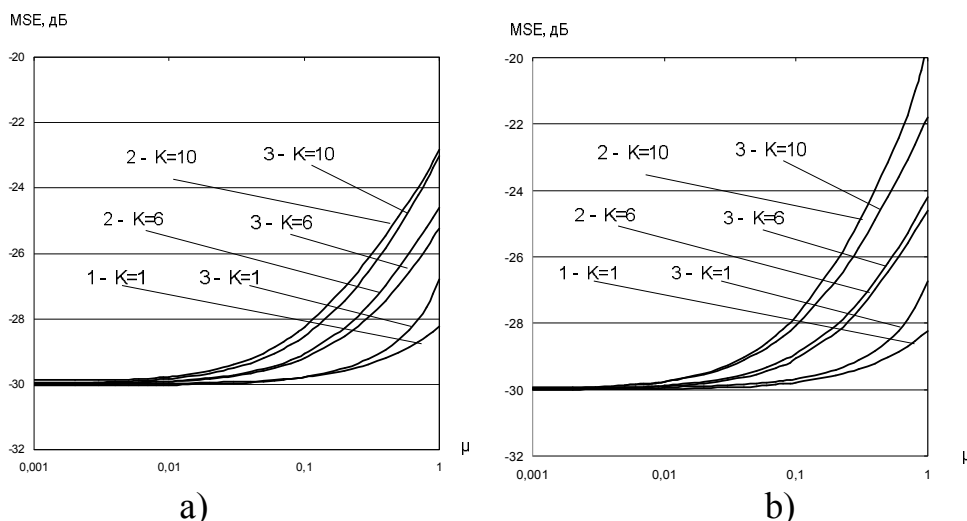


Рисунок 2. Зависимость MSE в дБ остаточной ошибки алгоритма ММaх АП от шага адаптации μ в условиях стационарного эхотракта для входного сигнала в виде: а) стационарного белого гауссова шума, б) авторегрессионной модели. Значение MSE: 1. рассчитано по выражению (1); 2. рассчитано по выражению (2); 3. получено в результате моделирования.

Рассмотрев аналитические выражения (2) и (3), можно заключить, что для алгоритма ММaх АП в установившемся режиме при условии стационарного эхотракта:

- 1) нижняя граница остаточной ошибки $e(n)$ определяется мощностью шума;
- 2) для получения минимального MSE в установившемся режиме необходимо выбрать минимальное значение шага адаптации μ ;

3) при малом значении шага адаптации μ выбор размера матрицы K входного сигнала, а также применение методики частичного обновления не оказывают влияния на MSE;

4) при большом значении шага адаптации μ увеличение размера матрицы K входного сигнала, уменьшение вычислительной сложности приводят к увеличению MSE.

Результаты моделирования (рисунок 2) показали хорошую аппроксимацию полученными аналитическими выражениями (2) и (3) поведения MSE в установившемся режиме в условии стационарного эхотракта.

Проведен сравнительный анализ MSE в установившемся режиме для алгоритмов НМНК, АП и ММхх АП. Анализ показал, что при малом значении шага адаптации μ в установившемся режиме снижение вычислительной сложности не влияет на остаточную ошибку. Показано, что увеличение шага адаптации μ и размера матрицы K входного сигнала приводит к увеличению влияния зависимости MSE от уменьшения вычислительной сложности.

Выполнен анализ влияния на функционирование АФ, работающего по алгоритму ММхх АП нестационарности импульсной характеристики эхотракта. Импульсная характеристика эхотракта описывается выражением:

$$h(n) = h(n-1) + q(n), \quad (3)$$

где $q(n)$ – случайный процесс с гауссовым законом распределения и временем корреляции меньше периода дискретизации.

Получено выражение MSE алгоритма ММхх АП в установившемся режиме при условии нестационарного эхотракта:

1) для малого значения шага адаптации μ :

$$MSE = \sigma_v^2 + \frac{1}{2-\mu} \left(\mu \sigma_v^2 + \frac{\text{Tr}(Q)\text{Tr}(R)}{\mu K \beta_M} \right) \quad (4)$$

2) для большого значения шага адаптации μ :

$$MSE = \sigma_v^2 + \frac{1}{2-\mu} \frac{\text{Tr}R}{\beta_M} \left(E \left[\frac{K \| \tilde{x}(n) \|_2^2}{\| x(n) \|_2^4} \right] \mu \sigma_v^2 + \frac{\text{Tr}(Q)}{\mu} \right) \quad (5)$$

где $\text{Tr}(Q)$ – след автокорреляционной матрицы случайной составляющей $q(n)$ импульсной характеристики эхотракта.

Анализ выражений (4) и (5) показал, что в установившемся режиме в условии нестационарного эхотракта:

- зависимость MSE от шага адаптации μ имеет экстремум;
- для малого значения шага адаптации μ увеличение размера K матрицы входного сигнала приводит к уменьшению остаточной ошибки, а для большого значения шага адаптации μ – к увеличению остаточной ошибки;
- применение методики уменьшения вычислительной сложности приводит к увеличению остаточной ошибки по сравнению с алгоритмом АП.

Результаты моделирования (рисунок 3) показали, что с увеличением размера матрицы K между аналитическими выражениями (4) и (5) увеличивается разница, которая превышает 5 дБ, это связано с тем, что для упрощения расчетов было введено разграничение на два диапазона шага адаптации μ .

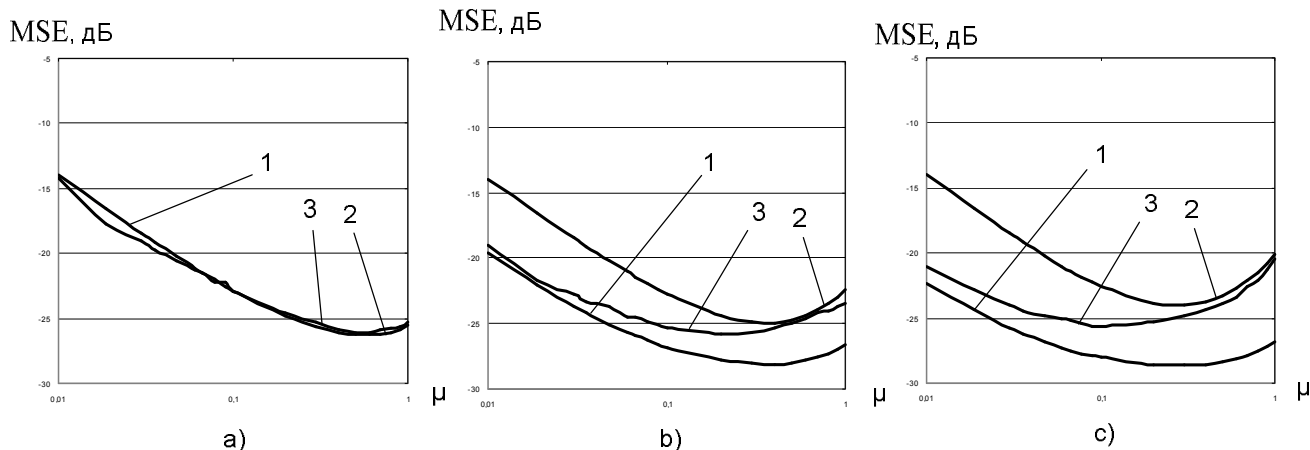


Рисунок 3. Зависимость MSE в дБ алгоритма MMax АП от шага адаптации в условиях нестационарного экотракта для входного сигнала в виде белого гауссова шума для различных значений размера матрицы K входного сигнала: а) $K=1$, б) $K=5$, с) $K=10$. Значение MSE: 1. рассчитано по выражению (4); 2. рассчитано по выражению (5); 3. получено в результате моделирования.

Анализ переходного режима работы алгоритма MMax АП показал, что уменьшение шага адаптации μ , размера матрицы K входного сигнала, применение методики частичного обновления, увеличение времени корреляции входного сигнала $x(n)$ и уровня шума приводят к уменьшению скорости сходимости.

Исследование устойчивости алгоритма MMax АП показало, что для схождения алгоритма MMax АП необходимо выбрать шаг адаптации из диапазона $0 < \mu < 2\beta_M$.

Сравнительный анализ режимов работы алгоритма MMax АП показал, что:

- переходный режим алгоритма характеризуется скоростью сходимости, максимальное значение которой достигается при максимальных значениях шага адаптации μ , размера матрицы K входного сигнала и без применения метода уменьшения вычислительной сложности, то есть $M=N$;
- установившийся режим работы алгоритма характеризуется остаточной ошибкой, минимальное значение которой достигается при минимальных значениях шага адаптации μ и размера матрицы K входного сигнала, применение методики уменьшения вычислительной сложности при малом значении шага адаптации не влияет на остаточную ошибку.

Таким образом, разработчик на этапе проектирования при выборе значения постоянных параметров решает компромисс между скоростью сходимости, остаточной ошибкой и вычислительной сложностью.

В третьем разделе предлагается новая процедура снижения вычислительной сложности существующих алгоритмов адаптации, основанная на комбинированном применении динамического изменения вычислительной сложности и ПША. В основе новой процедуры лежит принцип определения режима работы алгоритма.

Предложен критерий динамического уменьшения вычислительной сложности, основанный на полученном выражении (2), согласно которому уменьшение параметра M в установившемся режиме при малом значении шага адаптации μ не

оказывает влияния на остаточную ошибку. Выражение для оценки параметра M основано на определении степени эхоподавления и имеет вид:

$$M(n) = M - \text{fix}(\mu_M 10 \lg \left(\frac{\sigma_d^2(n)}{\varepsilon_M + \sigma_e^2(n)} \right)), \quad (6)$$

где μ_M – шаг сходимости, который управляет изменением параметра M , ε_M – малая константа ($\varepsilon_M > 0$); $\text{fix}(\dots)$ – параметр округления; параметры $\sigma_e^2(n)$ и $\sigma_d^2(n)$ рассчитываются по следующим соотношениям: $\sigma_d^2(n) = \lambda \sigma_d^2(n-1) + (1-\lambda)d^2(n)$, $\sigma_e^2(n) = \lambda \sigma_e^2(n-1) + (1-\lambda)e^2(n)$, где $\lambda = 1 - \frac{1}{HN}$, N – константа ($N > 0$).

Анализ показал, что для корректной работы метода динамического изменения вычислительной сложности необходим ПША. Получено выражение ПША $\mu(n)$ для алгоритма ММaх АП:

$$\mu(n) = \beta_M \left(1 - \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_v^2(n)}{\varepsilon_\mu + \hat{\sigma}_e^2(n)}} \right), \quad (7)$$

где ε_μ – малая константа ($\varepsilon_\mu > 0$); $\sigma_v^2(n)$ рассчитываются по следующим соотношениям: $\sigma_v^2(n) = \lambda \sigma_v^2(n-1) + (1-\lambda)v^2(n)$.

Выражение (7) по сравнению с ПША для алгоритма АП уменьшается в β_M раз, что обеспечивает выполнение требования по сходимости алгоритма ММaх АП.

К алгоритму ММaх АП применены полученные критерии динамического уменьшения вычислительной сложности и ПША. Структурная схема эхокомпенсатора, работающего по алгоритму ПММaх АП с ПША, приведена на рисунке 4. В отличие от схемы, изображенной на рисунке 1.4, эхокомпенсатор содержит блок сортировки, блок расчета параметра M , блок расчета ПША и вместо ДДР используется детектор тишины и двойного разговора.

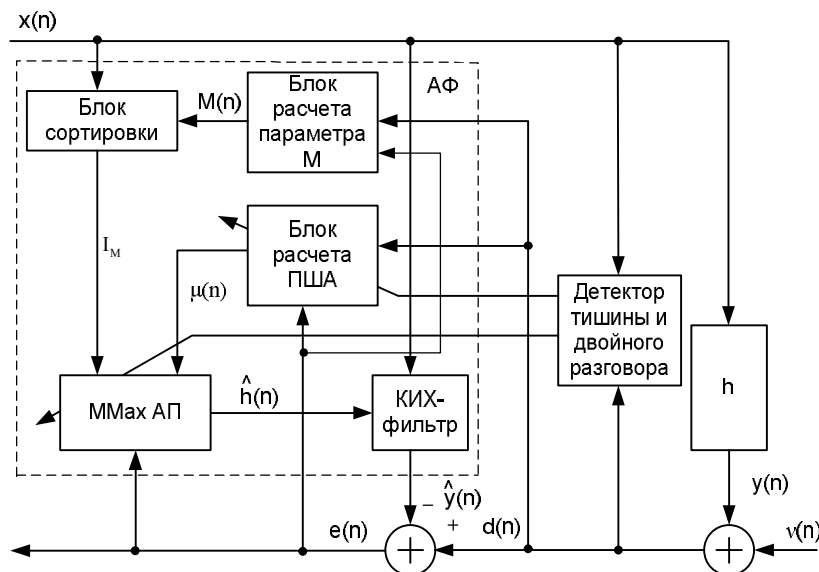


Рисунок 4. Структурная схема эхокомпенсатора.

Блок-схема работы алгоритма ПММaх АП с ПША приведена на рисунке 5.

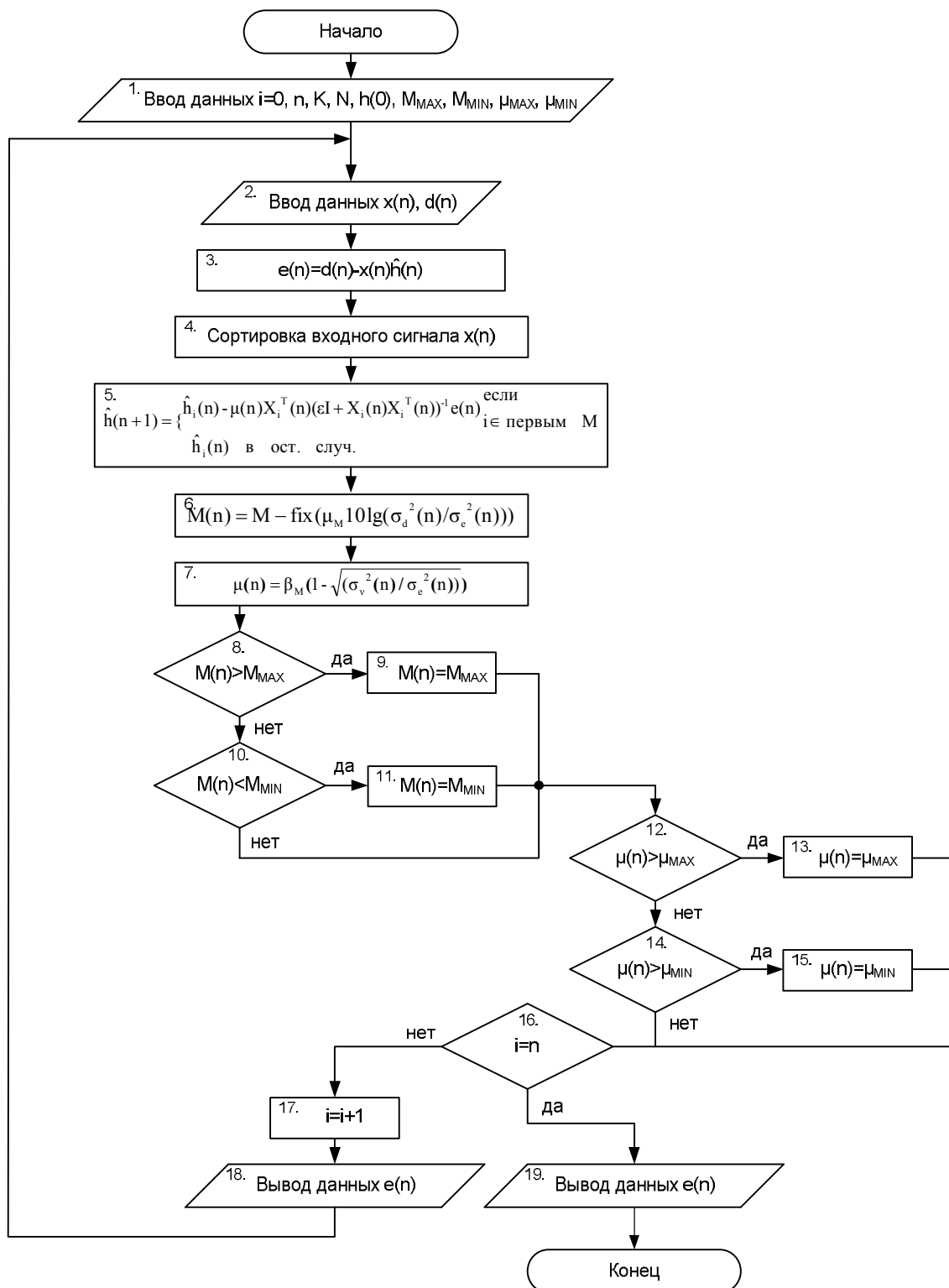


Рисунок 5. Блок-схема работы алгоритма ПММах АП с ПША.

Новый алгоритм ПММах АП с ПША работает следующим образом:

1. Во время инициализации задаем константы алгоритма:

- K – размер матрицы,
- N – длина фильтра,
- $\hat{h}(0)$ – начальное значение коэффициентов фильтра,
- M_{MAX} и M_{MIN} – диапазон изменения вычислительной сложности алгоритма (M_{MAX} выбирается из условия получения скорости сходимости в

переходном режиме, M_{\min} – из условия получения вычислительной сложности в установившемся режиме),

- μ_{\max} и μ_{\min} – диапазон изменения шага адаптации (выбираются из условия обеспечения сходимости алгоритма адаптации);

- n – количество итераций.

2. Ввод данных $x(n)$, $d(n)$.

3. Основываясь на значениях коэффициентов фильтра $\hat{h}(n)$, полученных на предыдущей итерации, рассчитывается значение ошибки $e(n)$.

4. Производит сортировку отсчетов входного сигнала $X(n)$ и определяет M максимальных из N .

5. Рассчитывает по выражению (1) M новых значений коэффициентов фильтров $\hat{h}(n+1)$ из N возможных.

6 – 7. Далее алгоритм определяет новые значения параметра M (6) и шага адаптации μ (7), которые будут использоваться на следующей итерации.

8 – 15. В конце цикла рассчитанные значения параметра M и шага адаптации μ проходят проверку на принадлежность к выбранному диапазону, который задается на этапе инициализации.

16. Проверка номера итерации.

17. Переход на следующую итерацию.

18, 19. Вывод значения остаточной ошибки.

Новый алгоритм ПММах АП с ПША повышает скорость сходимости в переходном процессе, уменьшает остаточную ошибку и вычислительную сложность в установившемся режиме. Данный эффект достигается за счет учета режима работы алгоритма:

- в переходном режиме автоматическое (адаптивное) выставление максимальных значений шага адаптации μ и параметра M позволяет добиться максимальной скорости сходимости;

- в установившемся режиме автоматическое (адаптивное) выставление минимальных значений шага адаптации μ и параметра M позволяет добиться минимальной остаточной ошибки и вычислительной сложности.

В таблице 1 приведены результаты анализа сравнения вычислительной сложности алгоритмов АП, ММах АП и ПММах АП с ПШС.

Таблица 1 – Вычислительная сложность алгоритмов адаптации

Алгоритм	Количество арифметических операций за одну итерацию:		
	умножения	сложения	сравнения
АП	$K(2N+1)+2K^2+K^3$	$K(2N-1)-1+3K^2+K^3$	
ММах АП	$K+K(M+N)+2K^2+K^3+10$	$K(M+N)-1+3K^2+K^3$	$2(\log_2 N)+2$
ПММах АП с ПШС (переходный режим)	$K+K(M_{\max}+N)+2K^2+K^3+23$	$K(M_{\max}+N)-1+3K^2+K^3+10$	$2(\log_2 N)+6$
ПММах АП с ПШС (установившийся режим)	$K+K(M_{\min}+N)+2K^2+K^3+23$	$K(M_{\min}+N)-1+3K^2+K^3+10$	$2(\log_2 N)+6$

Сравнение результатов работы нового алгоритма ПММах АП с ПША с алгоритмами ММах АП и АП приведено на рисунке 6.

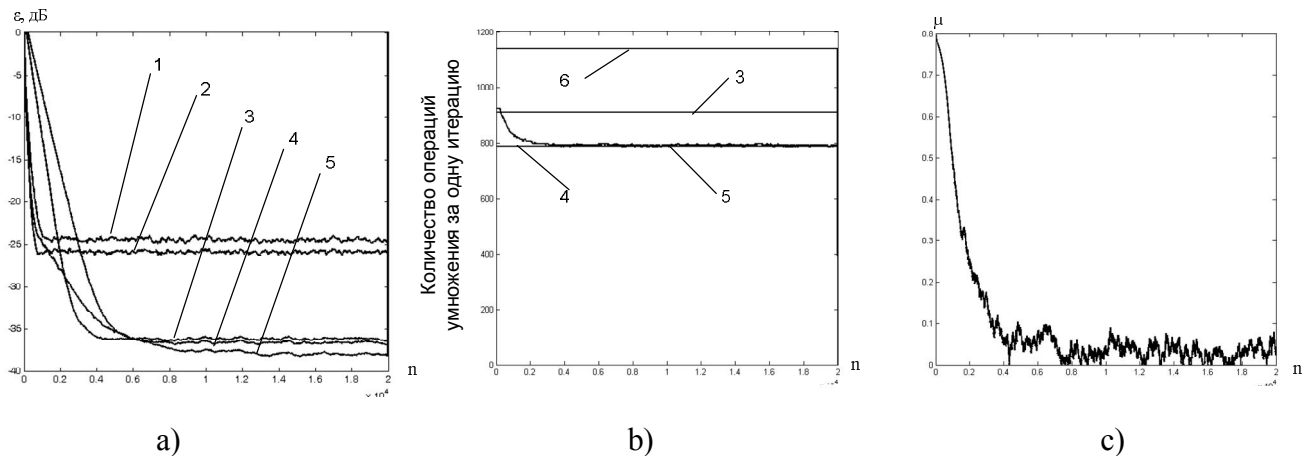


Рисунок 6. Зависимость величины расстройки АФ и количества операций умножения за одну итерацию (b) от номера итерации (a) для алгоритмов: 1. MMax AP $\mu=0.5$ M=24, 2. MMax AP $\mu=0.5$ M=48, 3. MMax AP $\mu=0.05$ M=48, 4. MMax AP $\mu=0.05$ M=24, 5. PMMax AP с ПША, 6. АП. Зависимость шага адаптации (c) от номера итерации алгоритма PMMax AP с ПША.

Из рисунка 6 видно, что новый алгоритм PMMax AP с ПША при одинаковой скорости сходимости в переходном режиме в установившемся режиме более чем на 10 дБ снижает уровень расстройки, имеет вычислительную сложность на 15 % и 30 % меньше по сравнению с алгоритмами MMax AP и АП соответственно.

Разработанная процедура применима также к алгоритму MMax НМНК, т.к. алгоритм НМНК является частным случаем алгоритма АП при $K=1$. Новый алгоритм PMMax НМНК с ПША функционирует согласно выражениям для обычного алгоритма MMax НМНК, но на каждом шаге адаптации происходит расчет новых значений параметра M (6) и шага адаптации μ (7).

Результаты моделирования показали, что новый алгоритм PMMax НМНК с ПША при одинаковой скорости сходимости в переходном режиме, в установившемся режиме более чем на 10 дБ снижает уровень расстройки, и имеет вычислительную сложность на 20 % и 40 % меньше по сравнению с алгоритмами MMax НМНК и НМНК соответственно.

Проведено исследование влияния постоянных параметров алгоритма на выходные характеристики алгоритма PMMax AP с ПША. Результаты анализа показали, что модернизация алгоритма MMax AP привела к появлению новых постоянных параметров, влияющих на производительность АФ. Исследования показали, что влияние постоянных параметров алгоритма PMMax AP с ПША на выходные характеристики значительно меньше, чем у алгоритма MMax AP.

В четвертом разделе исследуется работа новых алгоритмов PMMax AP с ПША и PMMax НМНК с ПША.

Проведено исследование новых алгоритмов в основных тестах рекомендации Международного союза электросвязи подразделение телекоммуникаций (МСЭ-Т) G.165. Тест № 1 определяет максимальный уровень подавления эхосигнала эхокомпенсатором. Результаты теста приведены в таблицах 2 для алгоритмов семейства АП.

Таблица 2 – Результаты теста №1 G.165 для алгоритмов группы АП

Алгоритм	Значение постоянных параметров алгоритма			Уровень остаточной ошибки, дБм0	Кол-во арифметических операций за одну итерацию в установившемся режиме:	
	μ	M	K		умножение	сложение
Требования МСЭ-Т G.165				-36,00		
АП	0,1		5	-75,20	2790	3254
МMax АП	0,1	64	5	-75,00	1840	2299
МMax АП	0,1	128	5	-75,15	2160	2619
ПМMax АП с ПША		$M_{MAX}=128$, $M_{MIN}=64$	5	-76,90	1853	2309

Все алгоритмы удовлетворяют результатам теста №1 МСЭ-Т G.165, однако алгоритм ПМMax АП с ПША при одинаковом уровне вычислительной сложности в установившемся режиме с алгоритмом МMax АП уменьшает уровень остаточной ошибки более чем на 1 дБ.

В тесте №2 определяется скорость сходимости алгоритма. Согласно требованиям теста совместное подавление эхосигнала эхотрактом и эхокомпенсатором должно составить не менее 27 дБ за 500 мс. Из результатов теста, приведенных в таблице 3, видно, что при обеспечении требований по скорости сходимости в переходном режиме алгоритм ПМMax АП с ПША в установившемся режиме обеспечивает снижение вычислительной сложности более чем на 35% и 15% и снижение остаточной ошибки более чем на 2,5 дБ и 3 дБ по сравнению с алгоритмами АП и МMax АП соответственно.

Таблица 3 – Результаты теста №2 для группы алгоритмов АП

Алгоритм	Значение постоянных параметров алгоритма			Количество арифметических операций умножения (в скобках – сложения) за одну итерацию		Остаточная ошибка, дБм0
				в переходном режиме	в установившемся режиме	
	μ	M	N			
АП	0,3		1024	21690 (21769)		-74,40
МMax АП	0,38	256	1024	14000 (14099)		-73,90
МMax АП	0,43	512	1024	16560 (16659)		-73,10
ПМMax АП с ПША			1024	16513 (16669)	14013 (14109)	-76,90

Проведен сравнительный анализ работы нового алгоритма ПМMax АП с ПША с АП и МMax АП при обработке нестационарного входного сигнала (речевого сигнала), результаты сравнения приведены на рисунках 7 и 8. Результаты исследования показали, что в зависимости от выбора постоянных параметров (шага адаптации μ , размера матрицы K и параметра M) алгоритмы АП и МMax АП могут уступать или превосходить новый алгоритм ПМMax АП с ПША по степени эхоподавления при обработке нестационарного сигнала (рисунок 8).

Результаты аналогичного анализа для алгоритмов группы НМНК показали, что новый алгоритм ПМMax НМНК с ПША обеспечивает большее подавление эхосигнала по сравнению с алгоритмами НМНК и МMax НМНК при любом значении шага адаптации μ и параметра M. Данный факт объясняется тем, что

увеличение размера K матрицы входного сигнала приводит к увеличению влияния уменьшения вычислительной сложности на алгоритм.

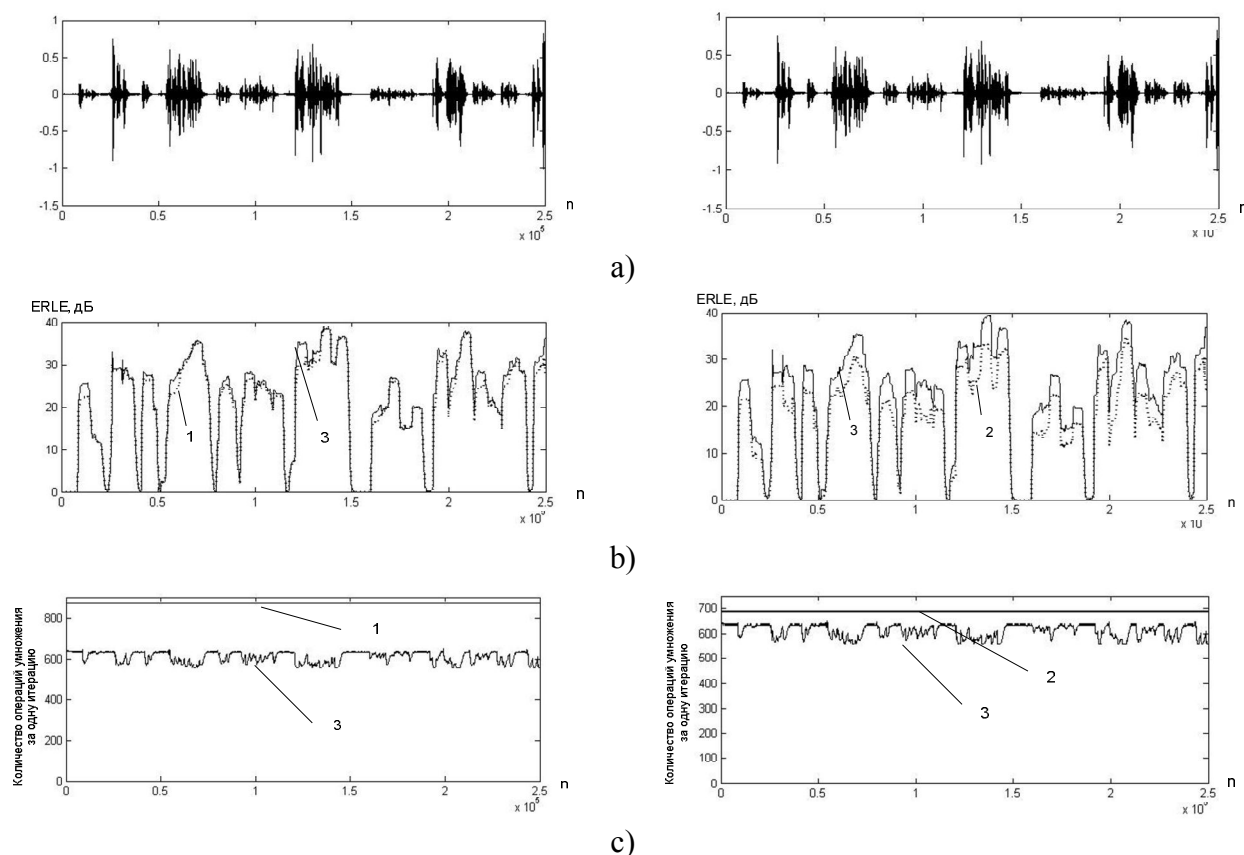


Рисунок 7. а) осциллограмма речевого сигнала; б) зависимости величин ERLE в дБ от номера итерации для алгоритмов АП (1), МMax АП (2) и ПМMax АП с ПША (3); в) количество операций умножения за одну итерацию от номера итерации.

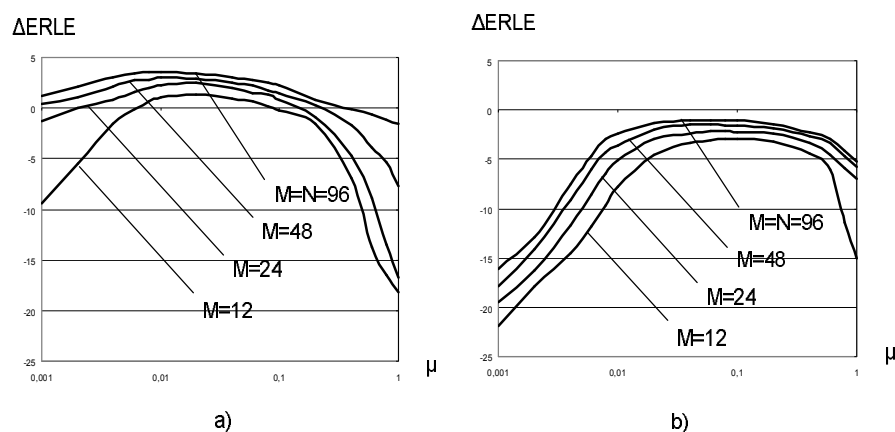


Рисунок 8. Зависимости разности эхоподавления $\Delta ERLE = E(ERLE_{АП} - ERLE_{ПМMax АП с ПША})$ алгоритмов МMax АП и ПМMax АП с ПША в зависимости от размера матрицы K входного сигнала, шага адаптации μ и параметра M : а) $K=10$, б) $K=2$.

Проведено исследование работы новых алгоритмов в условиях нестационарной импульсной характеристики эхотракта. Результаты исследования, приведенные на рисунке 9, показали, что применение новых алгоритмов позволяет добиться минимально возможной остаточной ошибки в отличие от алгоритмов АП и НМК, у которых эхоподавление будет зависеть от выбора постоянных параметров. Новые

алгоритмы автоматически определяют оптимальное значение шага адаптации и вычислительной сложности.

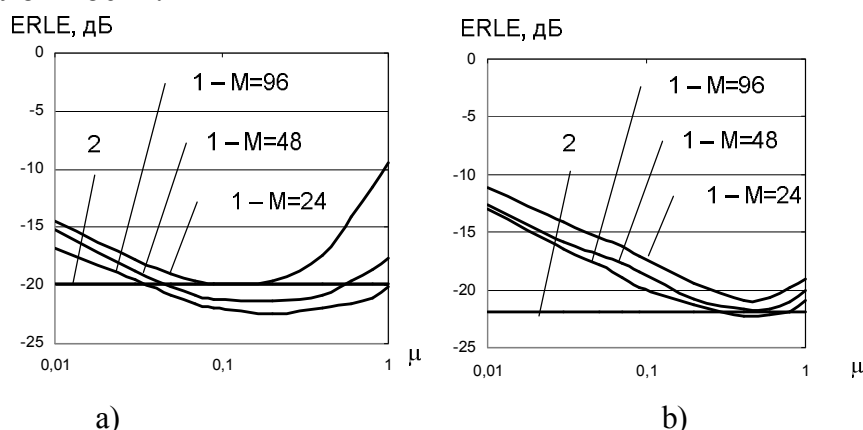


Рисунок 9. Зависимость величины эхоподавления ERLE от шага адаптации для алгоритмов ММх АП (1) и ПММх АП с ПША (2) для различных значений размера матрицы K входного сигнала: а) $K=1$, б) $K=10$.

Таким образом, сочетание переменной вычислительной сложности с ПША позволило получить алгоритмы адаптации, которые при благоприятных условиях (алгоритм обеспечивает определенное значение эхоподавления) автоматически снижают вычислительную сложность, а ПША позволяет выставить в зависимости от режима работы алгоритма оптимальное значение шага адаптации, которое обеспечивает максимальное или близкое к максимальному эхоподавление в данных условиях.

Для подтверждения адекватности компьютерной модели проведено экспериментальное моделирование работы предложенного алгоритма ПММх НМНК с ПША при реализации на цифровом сигнальном процессоре (ЦСП). Моделирование работы эхокомпенсатора на основе нового алгоритма проведено на базе отладочной платы SPEEDY-33 Hyperception компании National Instruments.

В результате экспериментального моделирования получены графики зависимости величины расстройки от номера итерации для алгоритма ПММх НМНК с ПША (рисунок 10). В качестве входного сигнала принят рекомендованный МСЭ-Т G.165 тестовый сигнал с уровнем -10дБ0м. Основные параметры алгоритма ПММх НМНК с ПША: $N=64$, $M_{MAX}=48$, $M_{MIN}=12$, $\mu_{MAX}=0.6$.

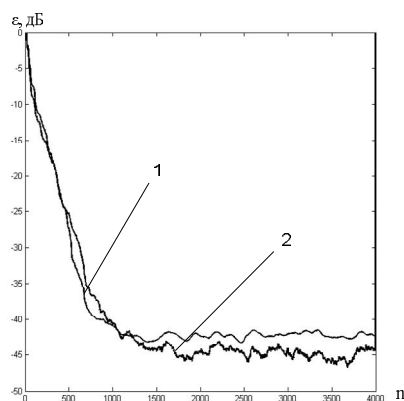


Рисунок 10. Зависимости величины расстройки от номера итерации для алгоритма ПММх НМНК с ПША полученные: 1. компьютерное моделирование, 2. экспериментальные данные.

Характеристики экспериментальной и компьютерной модели представлены на рисунке 10. Максимальная относительная погрешность компьютерной модели относительно проведенного эксперимента на реальной аппаратуре составляет 10 %, что подтверждает сделанный вывод об адекватности компьютерной модели и возможности ее использования для оценки поведения предложенного алгоритма адаптивной фильтрации ПММах НМНК с ПША.

В заключение

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Проведен анализ известных методов уменьшения вычислительной сложности, применимых к алгоритму адаптивной фильтрации АП в задачах эхокомпенсации.
2. Получены аналитические выражения, описывающие поведение алгоритма ММах АП в переходном и установившемся режимах.
3. Получено аналитическое выражение, описывающее поведение алгоритма ММах АП в условии нестационарного эхотракта.
4. Найден диапазон шага адаптации $0 < \mu < 2\beta_M$, гарантирующий сходжение алгоритма ММах АП.
5. Разработан критерий динамического снижения вычислительной сложности алгоритмов адаптивной фильтрации. В основе критерия лежит метод ММах, однако в отличие от классического критерия, новый алгоритм ПММах на каждом шаге итерации определяет новое значение параметра М, основываясь на степени эхоподавления.
6. Проведен синтез алгоритма ММах АП с ПША.
7. Предложены два новых алгоритма адаптивной фильтрации ПММах АП с ПША и ПММах НМНК с ПША с целью снижения вычислительной сложности без потерь в производительности. Новые алгоритмы работают в двух режимах: переходном и установившемся. В переходном режиме за счет увеличения параметра М и шага адаптации μ добиваемся максимальной скорости сходимости. В установившемся режиме снижение этих параметров приводит к уменьшению вычислительной сложности и остаточной ошибки.
8. Исследования показали, что предложенная модернизация алгоритмов позволила снизить влияние постоянных параметров на выходные характеристики алгоритма.
9. Алгоритм ПММах АП с ПША при одинаковой скорости сходимости в переходном режиме в установившемся режиме обеспечивает снижение вычислительной сложности более чем на 35% и 15% и снижение остаточной ошибки более чем на 2,5 дБ и 3 дБ по сравнению с алгоритмами АП и ММах АП соответственно.
10. Сравнительный анализ работы алгоритмов адаптивной фильтрации на тестах G.165 при обработке речевого сигнала и при работе с нестационарным эхотрактом показал, что новые алгоритмы обеспечивают минимально возможное эхоподавление или близкое к нему, данный эффект достигается за счет выставления оптимальных параметров алгоритма (шага адаптации и параметра М).
11. Проведенное экспериментальное исследование подтвердило адекватность компьютерной модели предложенного алгоритма адаптивной фильтрации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бычков, Д.Ф. К вопросу проектирования алгоритмов эхокомпенсаторов/Д.Ф. Бычков, О.Р. Никитин//Проектирование и технология электронных средств – 2009 - №4 С. 66-69. – ISSN 2071-9809
2. Бычков, Д.Ф. Оптимальное значение шага адаптации для алгоритма адаптивной фильтрации в условиях нестационарного эхотракта/Д.Ф. Бычков, О.Р. Никитин//Естественные и технические науки – 2011г. - №2 С.355 – 357 – ISSN 1684-2626
3. Бычков, Д.Ф., Никитин, О.Р. Эхокомпенсатор. Положительное решение от 26.09.11 на заявку на патент полезной модели № 2011131339.
4. Бычков, Д.Ф. Анализ среднеквадратичной ошибки в установившемся режиме алгоритма ММхх аффинных проекций/Д.Ф. Бычков//Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2011. - №12. – С.62 – 68. – ISSN 2220-2609
5. Бычков, Д.Ф. Алгоритм адаптивной фильтрации с динамическим изменением вычислительной сложности и с переменным шагом сходимости./Д.Ф. Бычков//Радиотехнические и телекоммуникационные системы – 2011. - №3. – С.60 – 62. - ISSN 2221-2574
6. Бычков, Д.Ф. Анализ среднеквадратичной ошибки в установившемся режиме алгоритма ММхх аффинных проекций для случая не стационарного эхотракта/Д.Ф. Бычков//Казанская наука. – 2010. - №10. – С.31 – 34. – ISSN 2078-9955
7. Бычков Д.Ф. Метод динамического уменьшения вычислительной сложности для алгоритмов семейства аффинных проекций /Д.Ф. Бычков/ Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации: Сб. статей I межд. науч.-тех. конф. – Тольяти: Изд-во ПВГСУ, 2011. – С.93 – 97
8. Бычков Д.Ф. Сравнительный анализ среднеквадратичной ошибки на выходе адаптивного фильтра в установившемся режиме/Д.Ф. Бычков/Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации: Сб. статей I межд. науч.-тех. конф. – Тольяти: Изд-во ПВГСУ, 2011. – С.97 – 102
9. Бычков, Д.Ф. Анализ сходимости алгоритма ММхх аффинных проекций / Д.Ф. Бычков//Современные телекоммуникационные системы и компьютерные сети: перспективы развития: Под ред. к.т.н., д.э.н., проф. А.В.Бабкина, д.т.н., проф. В.А. Кежаева: Труды межд. конф. СПб.:СПбГАСАСУ, 2011. – С. 10 – 14.
10. Бычков Д.Ф. Анализ алгоритма адаптивной фильтрации с переменной вычислительной сложностью/Д.Ф. Бычков, О.Р. Никитин//Научная сессия, посвященная дню радио: Матер. 66 всер. конф. – Москва: РНТОРЭС, 2011. – С.342 – 345
11. Бычков, Д.Ф. О результатах исследования нового алгоритма адаптивной фильтрации на речевом сигнале/Д.Ф. Бычков//Радиоэлектронные средства передачи и приёма сигналов и визуализации информации 2011: Матер. I всер. конф. – Таганрог: РНТОРЭС, 2011. – С.82 – 85
12. Бычков, Д.Ф. Анализ методов подавления электрического эхо-сигнала в телекоммуникационных системах/Д.Ф. Бычков//Вооружение, технология, безопасность, управление: Матер. V науч.-техн. конф. аспирантов и молодых ученых. Ч.3 – Ковров: ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2010. – С.12 – 23
13. Бычков, Д.Ф. Исследование влияния выбора постоянных параметров алгоритма ММхх АП на выходные характеристики алгоритма/Д.Ф. Бычков, О.Р.

Никитин//Сб. матер. VI Межд. науч.-практ. конф. в 2-х частях «Наука и современность – 2010» Часть 2 – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010. – С.86-91.

14. Бычков, Д.Ф. Динамическое изменение вычислительной сложности на примере алгоритма ММах аффинных проекций/Д.Ф. Бычков., О.Р. Никитин// Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010: Сб. научн. трудов по матер. межд. научн.-практ. конф.. Том 7. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 52 – 57.

15. Бычков Д.Ф. Комбинированный алгоритм ММах аффинных проекций с пониженной вычислительной сложностью/Д.Ф. Бычков., О.Р. Никитин//Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010:Сб. научн. трудов по материалам межд. научн.-практ. конф. Том 7. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 42 – 46.

16. Бычков, Д.Ф. Алгоритм нормализованного метода наименьших квадратов с динамическим изменением вычислительной сложности и с переменным шагом сходимости/Д.Ф. Бычков //Сб. матер. III межд. науч.-практ. конф. в 2-х частях «Перспективы развития информационных технологий» Часть 1 – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С.182-188.

Подписано в печать 29.10.11
Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, Горького, 87.