

На правах рукописи



Назаровский Александр Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И
ОБРАБОТКИ СИТУАЦИИ ВСТРЕЧНОГО РАЗГОВОРА ДЛЯ
ЭХОКОМПЕНСАТОРОВ В ТЕЛЕФОННЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05 12 13
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир – 2007

Работа выполнена на кафедре динамики электронных систем
Ярославского государственного университета им П Г Демидова

| | |
|-----------------------|--|
| Научный руководитель | доктор технических наук, профессор Брюханов Юрий Александрович |
| Официальные оппоненты | доктор технических наук, профессор Кошелев Виталий Иванович кандидат технических наук, доцент Архипов Евгений Анатольевич |
| Ведущая организация | ОАО «Ярославский радиозавод» |

Защита диссертации состоится 30 мая 2007 г в «14» часов на заседании диссертационного совета Д 212 025 04 при Владимирском государственном университете, по адресу 600000, г Владимир, ул Горького, 87, корпус 1, ауд 211

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ
Автореферат разослан «28» апреля 2007 г

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А Г Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

В течение последних десятилетий телекоммуникационные услуги стали неотъемлемой частью жизни человека. Качество передачи речевой информации и повышение его уровня являются предметом неустанной борьбы операторов связи. Оно определяется степенью негативного воздействия разнообразных помех и характеризуется как физической интенсивностью этих факторов, так и тем, насколько они субъективно мешают нормальному разговору абонентов. Одной из серьезных проблем является наличие паразитных экосигналов в телефонных сетях общего назначения.

По историческим и экономическим причинам абонентские линии телефонной сети являются двухпроводными. Такое соединение приемлемо для небольших расстояний, когда ослабление сигнала невелико. Однако для передачи сигнала на значительные расстояния необходимо разделение передающей и принимающей частей цепи, что приводит к необходимости использования четырехпроводных линий. Для стыковки четырехпроводных и двухпроводных цепей применяют дифференциальные системы, работа которых не идеальна, в результате чего сигнал, передаваемый по исходящей части четырехпроводной цепи, возвращается к своему источнику в виде экосигнала.

Для уменьшения влияния эффекта экосигнала на разговор абонентов в современных системах связи применяют эхокомпенсаторы. Исторически первой работой в этом направлении являлась статья М. Сондхи из компании Bell Labs, в которой заложены базовые идеи эхокомпенсации. Работа эхокомпенсатора основывается на формировании оценки экосигнала и вычитании ее из просочившегося экосигнала. Экономически применение эхокомпенсаторов оправдано тем, что стоимость такого устройства, способного обрабатывать одновременно несколько каналов, в сотни и тысячи раз меньше стоимости организации полноценных дуплексных каналов связи к каждому отдельному абоненту. Построение эхокомпенсаторов ведется с применением теории адаптивной обработки сигналов.

Работы А. Н. Колмогорова и Н. Винера послужили толчком к развитию адаптивной обработки, как одной из важнейших отраслей цифровой обработки сигналов. Большой вклад в развитие данного направления внесли как отечественные ученые: Р. Л. Стратонович, Я. З. Цыпкин, В. Г. Репин, Г. Г. Тартаковский, В. Н. Фомин, В. В. Шахильдян, Ю. А. Брюханов, В. И. Кошелев, С. Н. Кириллов, В. В. Витязев и др., так и зарубежные: Р. Калман, Р. Бьюси, Б. Уидроу, К. Коуэн, П. Грант, С. Хайкин, Ф. Густафссон и др.

Одной из важных характеристик эхокомпенсатора является его поведение в режиме встречного (двойного) разговора (ВР), что особо отмечается в рекомендациях Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) G 165 и G 168. Сигнал ближнего абонента (БА) выступает для адаптивного алгоритма в роли некоррелированной помехи, вызывая расхождение весовых коэффициентов адаптивного фильтра (АФ), что приводит к существенному ухудшению подавления экосигнала. Согласно статистике периоды ухудшения качества, вызванные эф-

фектом встречного разговора, составляют от 10% до 25% от общего времени ведения разговора

Для определения наличия ситуации встречного разговора используются детекторы встречного разговора (ДВР) В работах ведущих телекоммуникационных компаний мира предлагаются различные алгоритмы детекторов встречного разговора, однако все они обладают определенными недостатками и не всегда корректно и вовремя определяют наличие ситуации ВР. Некорректное определение ситуации встречного разговора вызывает расхождение весовых коэффициентов адаптивного фильтра от оптимальных (в среднеквадратичном смысле) значений и, как следствие, уменьшается уровень подавления экосигнала

Актуальной представляется задача разработки алгоритмов, улучшающих характеристики эхокомпенсатора в режиме встречного разговора, и в то же время обладающих низкими потребностями в вычислительном плане, что важно при их практической реализации

Предметом исследования являются алгоритмы определения и обработки ситуации встречного разговора, а также поведение и характеристики эхокомпенсаторов в режиме встречного разговора

Цель диссертационной работы состоит в уменьшении влияния ситуации встречного разговора на уровень подавления экосигнала эхокомпенсатором в составе телефонной сети

Для достижения указанной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

- 1 Разработать алгоритм детектора встречного разговора на основе суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра Исследовать его поведение в режиме встречного разговора Выполнить сравнение характеристик существующих и предложенного алгоритмов определения ситуации встречного разговора
- 2 Модифицировать адаптивную структуру эхокомпенсатора с двумя фильтрами за счет введения в нее двунаправленного копирования весовых коэффициентов и разработанного ДВР Сравнить ее с ранее известными способами обработки ситуации встречного разговора
- 3 Провести тестирование работы модифицированного эхокомпенсатора на базе цифрового сигнального процессора в режиме реального времени
- 4 Выполнить проверку работы модифицированного эхокомпенсатора на тестах рекомендации G 165 Международного Союза Электросвязи

Методы исследования основаны на положениях теории сигналов и цепей дискретного времени, теории адаптивных систем, статистической теории обнаружения сигналов, основным математическим аппаратом является линейная алгебра, теория вероятностей и математическая статистика

Научная новизна работы:

- 1 Разработан алгоритм определения ситуации встречного разговора на основе суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра
- 2 Предложена модифицированная адаптивная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами и двунаправленным копированием весовых коэффициентов, использующая разработанный алгоритм ДВР
- 3 Предложена процедура понижения вычислительных затрат для разработанного алгоритма ДВР при его функционировании совместно с адаптивным алгоритмом по нормализованному методу наименьших средних квадратов (НМНК)

Практическая ценность работы:

- 1 Предложенные модификации улучшают характеристики эхокомпенсатора в режиме встречного разговора При использовании предлагаемых алгоритмов изменение уровня подавления эхосигнала в ситуации встречного разговора составляет менее 2 дБ, в то время как для ранее известных алгоритмов данная величина может достигать 15 дБ и более
- 2 Предложенные алгоритмы позволяют улучшить качество связи в ситуациях встречного разговора При использовании оценок согласно E-модели стандарта МСЭ-T G 107 рейтинг качества связи в системах, использующих разработанные алгоритмы, в ситуации встречного разговора повышается приблизительно на 20 единиц
- 3 Разработанные алгоритмы проще в реализации, чем аналогичные существующие, и могут выполняться на сигнальных процессорах с невысокой вычислительной мощностью, либо применяться в составе многоканального эхокомпенсатора

Реализация результатов:

- 1 Результаты научной работы автора использованы в разработках ООО «НЕТИС-Телеком» (г Ярославль)
- 2 Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре динамики электронных систем физического факультета Ярославского государственного университета имени ПГ Демидова (специальности 200900 Сети связи и системы коммутации, 013800 Радиофизика и электроника)
- 3 Результаты внедрены в научно-исследовательские работы при выполнении исследований в рамках грантов РФФИ № 02-02-17500 «Нелинейная динамика цифровых электронных систем» (2002-2004 гг.), № 06-02-17195 «Нелинейные явления в динамических системах дискретного времени» (2006-2008 гг.) и № 06-08-00782 «Развитие теории цифровой обработки сигналов и изображений в технических системах» (2006-2008 гг.)

На защиту выносятся:

- 1 Алгоритм определения ситуации встречного разговора на основе суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра
- 2 Модифицированная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами и двунаправленным копированием весовых коэффициентов, использующая разработанный алгоритм ДВР
- 3 Процедура понижения вычислительных затрат предлагаемого алгоритма ДВР

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы обсуждались и получили положительную оценку на шестой, седьмой и восьмой международных конференциях и выставках «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2004, 2005, 2006, г Москва, 2004-2006), на LVIII и LXI международных научных сессиях, посвященных Дню Радио (г Москва, 2003, 2006), на второй международной конференции IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (г Москва, 2004), на международной научно-технической школе-семинаре IWOPE-2005 (г Ярославль, 2005), а также на ряде международных, всероссийских и региональных конференций студентов, аспирантов и молодых ученых

Работа «Моделирование работы робастного алгоритма эхокомпенсации на цифровом сигнальном процессоре ADSP-21160» была отмечена дипломом как лучшая на секции «Разработка и реализация систем ЦОС» на 6-й международной научно-технической конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2004)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 научных работы, включая 2 статьи, в том числе 1 статью в рецензируемом издании, входящем в Перечень ВАК периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и 21 публикацию в трудах и материалах конференций

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, трех приложений и списка литературы, включающего 108 наименований, в том числе 23 работы автора. Объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, в том числе 100 страниц основного текста, 12 страниц списка литературы, 41 рисунок, 4 таблицы и 18 страниц приложений

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе предложен и рассмотрен алгоритм детектора встречного разговора, основанный на вычислении суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра, а также произведено его сравнение с существующими ДВР

Схема эхокомпенсатора с детектором ВР, используемая в дальнейшем, представлена на рис 1, где введены следующие обозначения $x(n)$ - сигнал дальнего абонента, $v(n)$ - сигнал ближнего абонента, $d(n)$ - эхосигнал, $y(n)$ - сумма эхосигнала и сигнала ближнего абонента, $\hat{y}(n)$ - оценка эхосигнала, получаемая с выхода адаптивного фильтра, $e(n)$ - ошибка оценки эхосигнала (остаточное эхо), $c(n)$ - управляющий сигнал для адаптивного алгоритма, $\xi(n)$ - решающая функция, согласно которой вырабатывается управляющий сигнал, $h(n)$ - фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) длины N , моделирующий эхотракт, $\hat{h}_i(n)$ - весовые коэффициенты адаптивного фильтра длины L

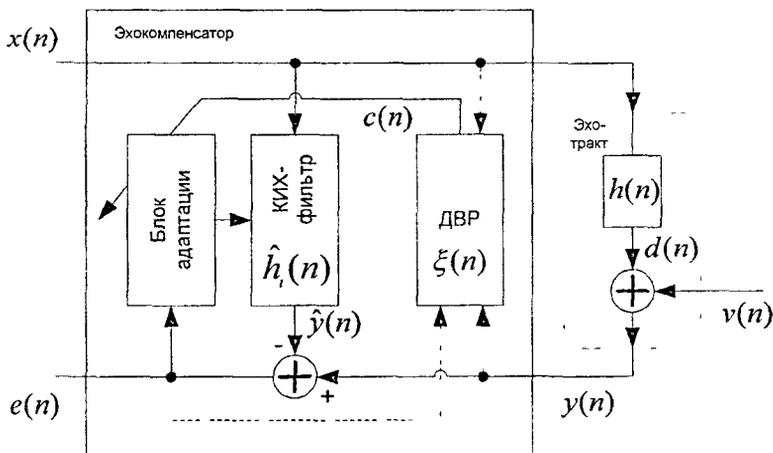


Рис 1 Схема адаптивного эхокомпенсатора

Положим, что подстройка коэффициентов АФ производится согласно нормализованному методу наименьших средних квадратов

$$\hat{h}_k(n) = \hat{h}_k(n-1) + \mu(n) x(n-k) e(n), k = 0,1 L-1, \quad (1)$$

величина шага адаптации, соответственно, задается выражением

$$\mu(n) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + \mathbf{x}^T(n) \mathbf{x}(n)}, \alpha_1 \in (0,2), \beta_1 \geq 0, \quad (2)$$

где, α_1, β_1 - константы, \mathbf{x} - вектор отсчетов сигнала дальнего абонента длины L

Для количественной оценки детекторов встречного разговора необходимо применять аппарат статистической теории обнаружения сигналов. Эхосигнал исследуется как случайный процесс с неизвестными характеристиками. Затем относительно неизвестных характеристик выдвигаются взаимно несовместимые гипотезы. Таким образом, задача определения ситуации встречного разговора сводится к принятию гипотез о наличии или отсутствии неизвестного сигнала ближнего абонента $v(n)$ на основе доступных наблюдению реализаций сигнала дальнего абонента $x(n)$ и смешанного с эхосигналом сигнала ближнего абонента $y(n) = d(n) + v(n)$.

В общем виде процесс определения и обработки ситуации встречного разговора происходит следующим образом. Пользуясь известными сигналами и параметрами эхокомпенсатора, например, сигналом дальнего абонента $x(n)$ и сигналом $y(n)$, состоящим из смеси эхосигнала и сигнала ближнего абонента, формируется решающая функция $\xi(n)$ и в определенные моменты времени сравнивается с пороговым значением Θ . Традиционно используемые для определения ситуации ВР сигналы показаны на рис. 1 пунктирными линиями.

После сравнения принимается одна из двух гипотез (H_0 или H_1), относительно того, присутствует сигнал ближнего абонента в смеси с эхосигналом (т.е. наличествует ситуация ВР) или нет. Например,

$$H_0, \xi(n) > \Theta - \text{решение об отсутствии ситуации ВР}, \quad (3)$$

$$H_1, \xi(n) < \Theta - \text{решение о наличии ситуации ВР} \quad (4)$$

В случае, если детектор принял решение о наличии ситуации встречного разговора, стандартным способом обработки является запрещение перестройки весовых коэффициентов адаптивного фильтра до тех пор, пока детектор не определит, что ситуация встречного разговора завершилась.

Предлагается алгоритм ДВР, в основу которого положены следующие положения. Для эхотрактов в проводной телефонии общая длительность импульсной характеристики обычно существенно превосходит длительность так называемой активной части импульсной характеристики, т.е. части, которая вносит наибольший вклад в энергию эхосигнала. Поэтому АФ, подстроившийся под эхотракт, на каждом шаге будет иметь большое количество коэффициентов почти равных нулю, а сумма квадратов коэффициентов АФ будет практически постоянной.

Кроме того, поскольку сигнал от ближнего абонента является некоррелированной помехой для алгоритма адаптации, коэффициенты АФ при наличии сигнала от ближнего абонента уже за несколько шагов значительно расходятся от оптимальных значений. Для рассмотрения нового алгоритма далее в эхокомпенсаторе предполагается использование для перестройки весовых коэффициентов АФ алгоритма НМНК (1), (2). В дальнейшем моделировании используется длина АФ $L = 128$, что соответствует максимальной длине импульсной характеристики эхотракта равной 16 мс. Эхотракт моделируется КИХ-фильтром длиной 128 коэффициентов и задается согласно рекомендации G 168. Сигналы ближнего и дальнего абонентов являются речевыми сигналами, дискретизиро-

ванными с частотой 8 кГц Они задаются в соответствии с рекомендацией G 165

В качестве решающей функции для определения ситуации ВР предлагается использовать сумму квадратов весовых коэффициентов АФ

$$\xi(n) = \sum_{i=0}^{L-1} \hat{h}_i^2(n) \quad (5)$$

Здесь L - длина АФ, $\hat{h}_i(n)$ - значение i -го весового коэффициента АФ, n - номер обрабатываемого отсчета

Согласно критерию Неймана-Пирсона «оптимальный» ДВР должен минимизировать вероятность определения ситуации ВР при минимальной заданной вероятности ложной тревоги Выбор критерия Неймана-Пирсона обоснован тем, что, во-первых, мы не обладаем знанием об априорных вероятностях гипотез, а во-вторых, не имеется данных о матрице потерь К сожалению, поскольку нам также неизвестны функции правдоподобия сигналов ближнего и дальнего абонентов, то для данной задачи не представляется возможным синтезировать оптимальный алгоритм Однако возможно сравнение детекторов на его основе, таким образом, что алгоритм, обеспечивший среди прочих при одинаковых условиях наибольшую вероятность определения ситуации встречного разговора при фиксированной вероятности ложной тревоги, принимается за лучший

Общим подходом к сравнению различных алгоритмов в теории обнаружения является характеристика обнаружения – это зависимость вероятности обнаружения D от отношения сигнал/помеха при выбранной постоянной вероятности ложной тревоги α В контексте определения ситуации ВР – отношение сигнал/помеха имеет смысл отношения мощностей сигнала ближнего абонента к сигналу дальнего абонента Константа α имеет смысл максимально приемлемой вероятности ложной тревоги

Сравнение детекторов ВР производится аналогичным образом, однако накладываются и дополнительные требования Оценка производится на измерении вероятности правильного определения ситуации ВР $D = 1 - \beta$ при фиксированной вероятности ложной тревоги α В задаче электрической эхокомпенсации приемлемы сравнительно большие вероятности ложной тревоги, т.к. адаптивный алгоритм при ложной тревоге просто приостанавливает свою работу на период T_{hold} , называемый защитным интервалом Следовательно, даже при вероятности ложной тревоги $\alpha = 0.1$ алгоритм будет сходиться со скоростью, составляющей 90% от идеальной, которая наблюдается без ложных тревог Величина расхождения коэффициентов АФ, и, следовательно, уменьшения уровня эхоподавления во время ВР зависит главным образом от прошедшего необнаруженного среднего по времени значения сигнала от БА

Произведено сравнение четырех различных детекторов встречного разговора ДВР Гейгеля, ДВР по методу взаимной корреляции (ВК), ДВР по методу нормализованной взаимной корреляции (НВК) и ДВР по предлагаемому алгоритму При стремящейся к нулю амплитуде сигнала БА, вероятность правильного определения ситуации ВР для всех детекторов приближается к единице

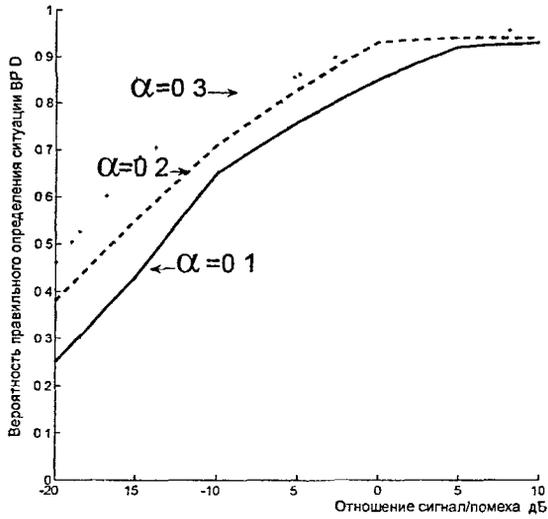


Рис 2 Приемная характеристика разработанного ДВР при трех фиксированных вероятностях ложной тревоги

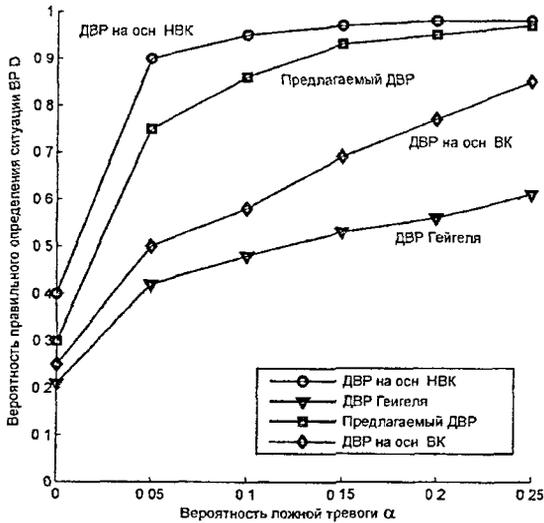


Рис 3 Сравнение четырех ДВР при равных мощностях сигналов ближнего и дальнего абонентов

Как показали эксперименты, детектор НВК при длине окна выборки $M = 500$ показывает лучшие результаты Предлагаемый ДВР, основанный на вычислении суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра, обладает чуть менее хорошими характеристиками ДВР Гейгеля и ДВР ВК в тестах показали сравнительно плохие результаты

На рис 2 представлена полученная в ходе экспериментов приемная характеристика, т е зависимость вероятности правильного определения ВР D от отношения сигнал/помеха для разработанного ДВР при трех фиксированных вероятностях ложной тревоги На рис 3 показано сравнение вероятностей правильного определения ситуации ВР в зависимости от вероятности ложной тревоги, для четырех различных ДВР при равных мощностях сигналов ближнего и дальнего абонентов (отношении сигнал/помеха = 0 дБ)

Обычный способ обработки ситуации встречного разговора реализуется следующим образом при срабатывании ДВР адаптивный алгоритм должен приостановить подстройку коэффициентов, чтобы оценка эхотракта далее не изменялась К сожалению, даже небольшая (2-10 отсчетов) задержка в срабатывании ДВР приводит к значительному (15 и более дБ) ухудшению уровня эхоподавления Поэтому, даже если ДВР характеризуется высокой вероятностью правильного определения, этого недостаточно для корректной работы эхокомпенсатора и сохранения уровня эхоподавления в ситуации ВР

К тому же, поскольку предлагаемый ДВР основан на вычислении суммы квадратов весовых коэффициентов АФ на каждом отсчете, очевидно, что приостановка процесса адаптации недопустима

Более того, во время и после ситуации ВР характеристики предлагаемого детектора ухудшаются вследствие того, что весовые коэффициенты АФ во время ВР расходятся от оптимальных в среднеквадратичном смысле значений Таким образом, для уверенной обработки ситуации ВР при помощи предлагаемого детектора необходима модификация структуры эхокомпенсатора

Второй раздел посвящен разработке и анализу функционирования модифицированной структуры эхокомпенсатора с двумя фильтрами

Японскими учеными была предложена адаптивная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами, позволяющая бороться с ухудшением уровня эхоподавления при встречном разговоре (рис 4) Для задачи идентификации эхотракта применяется адаптивный фильтр заднего плана (ФЗП) A Подавление эхосигнала осуществляется КИХ-фильтром переднего плана (ФПП) B Во время работы системы производится сравнение уровня подавления эхосигнала обоими фильтрами В случае, когда фильтр A обеспечивает более высокий уровень подавления эхосигнала, чем фильтр B , коэффициенты из фильтра A копируются в фильтр B Таким образом, в случае встречного разговора эффект расстройки адаптивного фильтра A не производит влияния на уровень подавления эхосигнала

Однако поскольку фильтр заднего плана A производит адаптацию все время, в течение встречного разговора коэффициенты фильтра расходятся Расхождение коэффициентов фильтра A от характеристики идентифицируемого эхотракта при встречном разговоре приводит к двум негативным эффектам во-

первых, уменьшается скорость отслеживания изменений эхотракта, а во-вторых, после ситуации встречного разговора возможно ошибочное копирование коэффициентов из фильтра A в фильтр B

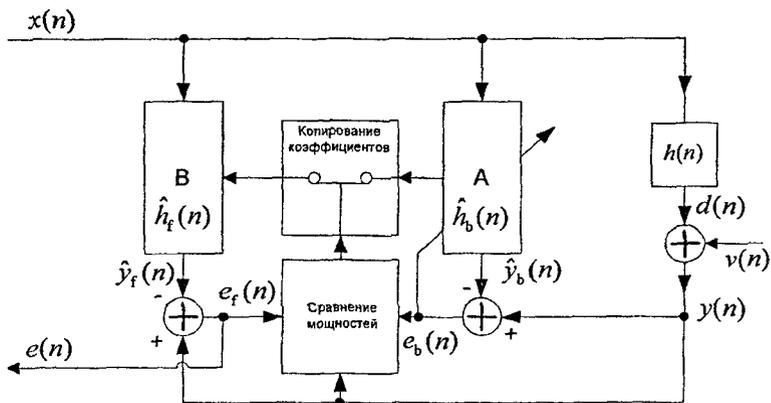


Рис 4 Адаптивная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами

Чтобы нейтрализовать указанные недостатки двухфильтровой схемы и соединить ее с разработанным ДВР предлагается модификация структуры эхокомпенсатора (рис 5) Фильтр A используется для формирования оценки эхотракта и для определения ситуации встречного разговора, а фильтр B служит для подавления ЭК является то, что в процессе работы осуществляется не только копирование значений весовых коэффициентов из фильтра A в фильтр B , но также и обратное их копирование из B в A Применение модифицированной схемы с двумя фильтрами и разработанным ДВР позволяет корректно определять момент начала и окончания ситуации ВР, сохранять уровень подавления эхосигнала во время ВР, а также задавать единое пороговое значение для решающей функции ξ в ДВР

Рассмотрим два режима работы системы, полагая, что длины фильтров A и B одинаковы В обычном режиме (когда говорит только один абонент) адаптивный фильтр A на основании вычисленной ошибки $\hat{e}(n)$ производит подстройку своих коэффициентов Через заданное число отсчетов τ вычисляется значение функции ξ и сравнивается с заданным пороговым значением Θ Если величина ξ не превысила пороговое значение ($\xi < \Theta$), принимается, что в течение заданного промежутка τ встречного разговора не обнаружено, и коэффициенты из фильтра A однократно копируются в фильтр B В противном случае декларируется режим ВР

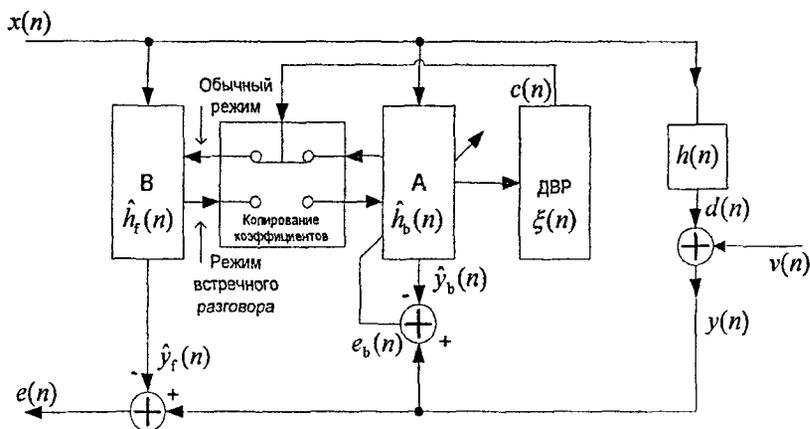


Рис 5 Модифицированная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами и предлагаемым ДВР

В режиме ВР, напротив, в начале каждого интервала τ коэффициенты однократно копируются из фильтра B в фильтр A . Через заданное число отсчетов τ опять вычисляется значение функции ξ . Если оно превышает пороговое значение ($\xi > \Theta$), то ситуация ВР считается продолженной на следующий интервал времени, коэффициенты снова копируются из B в A и данный шаг повторяется. В противном случае режим ВР отменяется, и система начинает работать в обычном режиме. Перед переходом в обычный режим целесообразно также сделать задержку на защитный интервал времени T_{hold} . Адекватным значением для речевых сигналов является $T_{hold} = 75 \text{ мс}$.

Пороговое значение Θ определяется следующим образом. При активном сигнале дальнего абонента (мощность сигнала дальнего абонента $P_{x(n)}$ выше определенного фиксированного значения P_x) и фиксированном достигнутом уровне подавления эхосигнала (мощность сигнала ошибки $P_{e(n)}$ меньше определенного фиксированного значения P_e) вычисляется сумма квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра A по формуле (5), и полученное значение увеличивается в фиксированное число Δ раз.

Величина Δ выбирается согласно тесту За рекомендации G 165, чтобы система не переходила в режим встречного разговора при малых уровнях сигнала ближнего абонента. Временной параметр τ не должен быть слишком малым, в противном случае коэффициенты фильтра A не успеют разойтись на достаточные для обнаружения встречного разговора значения. Однако задание больших интервалов τ тоже не рекомендуется вследствие ухудшения характеристик эхокомпенсатора, т.к. во-первых, подавление эхосигнала становится скачкообразным, что заметно на слух, а во-вторых, ухудшается скорость отсле-

живания изменений эхотракта. Эксперименты показали, что приемлемым диапазоном τ является 50-100 отсчетов.

Моделирование работы модифицированной структуры с двумя фильтрами проводилось с использованием сигналов дальнего и ближнего абонентов, заданных согласно рекомендации G.165. Примеры сигналов ДА и БА показаны на рис. 6 и рис. 7 соответственно. Сигналы являются отрезками речевых сигналов, дискретизированных с частотой 8 кГц.

Для проведения экспериментов была разработана программная модель на высокоуровневом языке С. При ее реализации применен компилятор LCC-Win32. Разрядность представления всех операндов при моделировании равна 64 бит с плавающей точкой – тип данных Double согласно стандарту IEEE754. Исходные сигналы дальнего и ближнего абонентов загружаются из файлов на жестком диске. Результаты после обработки также записываются в файлы.

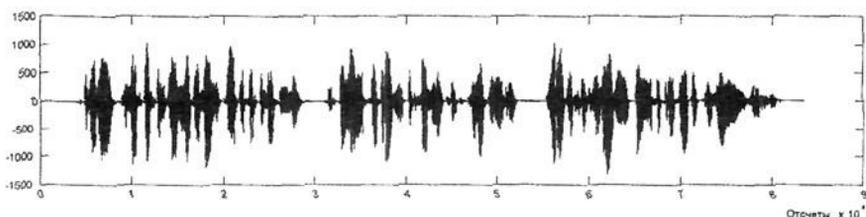


Рис. 6. Сигнал дальнего абонента

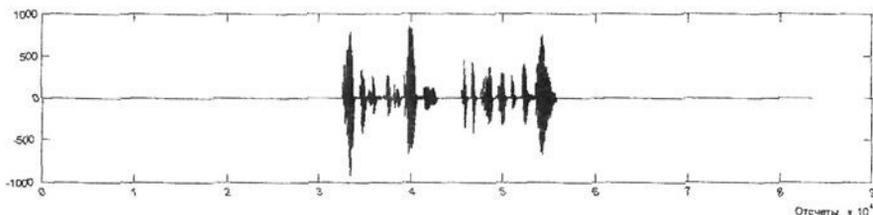


Рис. 7. Сигнал ближнего абонента

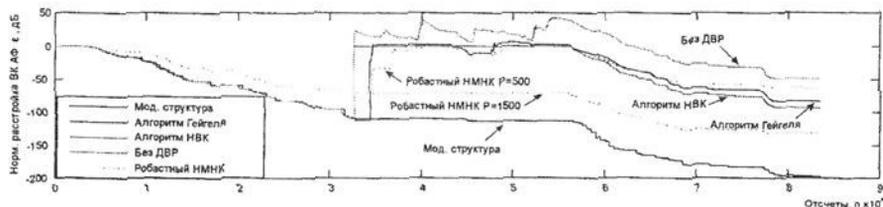


Рис. 8. Сравнение нормированной расстройки весовых коэффициентов АФ для различных моделей эхокомпенсатора

Параметры моделирования $\tau = 100$ отсчетов, $\alpha_1 = 1$, $\beta_1 = 0.01$, $\Delta = 1$, $T_{hold} = 600$ отсчетов В фильтре A применяется адаптивный алгоритм НМНК. Полагаясь, что шум в канале отсутствует

Произведено измерение расстройки весовых коэффициентов фильтров заднего и переднего планов относительно эхотракта по формуле

$$\varepsilon(n) = 20 * \log_{10} \left(\frac{\|h - \hat{h}(n)\|}{\|h\|} \right) \quad (6)$$

Также в качестве характеристики свойств модифицированного эхокомпенсатора используется величина подавления эхосигнала $ERLE$, задаваемая выражением (7), где $E[\]$ - математическое ожидание при усреднении по времени

$$ERLE(n) = 10 * \log_{10} \left(\frac{E[y(n)^2]}{E[e(n)^2]} \right) \quad (7)$$

На рис. 8 представлены графики нормированной расстройки для предлагаемой структуры эхокомпенсатора и трех других ранее применявшихся способов. Поскольку при использовании ДВР НВК и ДВР Гейгеля не предусматривается возможная задержка в определении ситуации ВР, эхокомпенсаторы с данными детекторами показывают неудовлетворительные результаты. Эхокомпенсатор с применением робастного алгоритма НМНК несмотря на корректную обработку ситуации ВР при соответствующих параметрах, обладает вычислительными затратами в десятки раз превосходящими потребности предлагаемого алгоритма.

Видно, что в отличие от эхокомпенсаторов, использующих ДВР НВК, Гейгеля и робастного НМНК при недостаточной длине буфера ошибок в ситуации ВР, новая структура полностью предотвращает расхождение весовых коэффициентов.

Как показало моделирование, уменьшение скачка расстройки коэффициентов АФ при встречном разговоре составило 50 дБ по сравнению с эхокомпенсатором, использующим робастный НМНК при длине буфера $P = 1500$ и порядка 120 дБ по сравнению с эхокомпенсаторами, в которых применен ДВР Гейгеля, ДВР НВК и связка робастного алгоритма НМНК вместе с ДВР Гейгеля при длине буфера $P = 500$.

Третий раздел посвящен вопросам практической реализации разработанного ДВР и модифицированной структуры эхокомпенсатора, а также проверке его в основных тестах рекомендации G 165 и отраслевого стандарта ОСТ 45 97-97.

Моделирование работы модифицированного эхокомпенсатора проводилось на базе отладочной платы ADSP-21160 EZ-KIT Lite. В связи с тем, что указанный цифровой сигнальный процессор (ЦСП) содержит весьма большой объем внутрикристалльной памяти (4 Мбит), а также для простоты реализации алгоритма, все отсчеты сигналов при работе хранились в цифровом виде в памяти сигнального процессора. Результаты работы также записывались в массив в памяти процессора и затем при помощи отладчика пересылались на компьютер.

Соответствующие программы написаны на языке С с использованием оптимизирующего компилятора из пакета VisualDSP++

Дифференциальная система моделировалась фильтром с конечной импульсной характеристикой 127-го порядка. В качестве сигналов ближнего и дальнего абонентов использовались отрезки тестового сигнала, задаваемого в соответствии с рекомендацией МСЭ-T G 165, при этом ситуация встречного разговора длилась с 2000 по 2200 отсчеты. Все отсчеты представлены 16-битными целыми числами. Внутренняя разрядность – 32 бит. Выходные результаты имеют 32-битную точность. Параметры моделирования $\tau = 100$ отсчетов, $\alpha_i = 1$, $\beta_i = 0,01$, $\Delta = 1$, $T_{hold} = 600$ отсчетов. В фильтре A применен адаптивный алгоритм НМНК. Шум в канале связи представлен как аддитивный белый гауссов шум с уровнем -35 дБ. Длина буфера ошибок в робастном алгоритме $P = 500$.

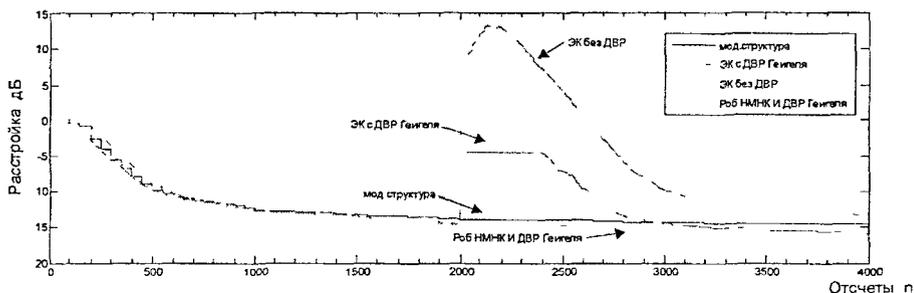


Рис 9 Нормированная расстройка весовых коэффициентов АФ для различных моделей эхокомпенсаторов

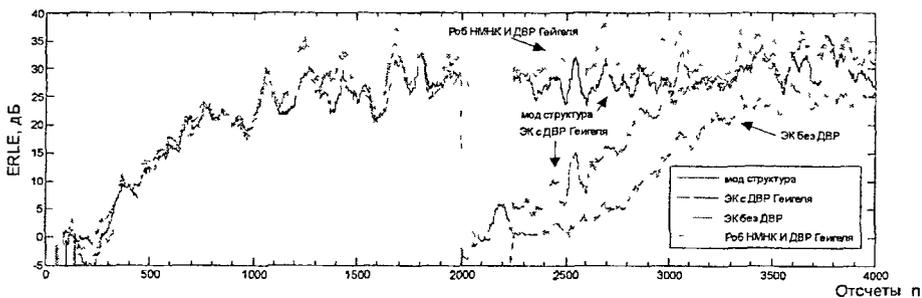


Рис 10 ERLE для четырех различных моделей эхокомпенсаторов

На рис 9 и рис 10 приведены соответственно расстройка (6) и ERLE (7) для четырех различных моделей эхокомпенсаторов. Применение модифицированного эхокомпенсатора в ситуации встречного разговора позволило увеличить уровень эхоподавления на 16 дБ по сравнению с традиционно применяе-

мым эхокомпенсатором с ДВР Гейгеля. Следует отметить, что изменение точности коэффициентов до 32 бит не оказывает негативного влияния на способность модифицированного эхокомпенсатора успешно обрабатывать ситуацию встречного разговора без ухудшения уровня подавления эхосигнала.

Также проверены характеристики модифицированного эхокомпенсатора в основных тестах рекомендации G 165. Как показали эксперименты, модифицированный эхокомпенсатор удовлетворяет требованиям рекомендации G 165 и в частности, группе тестов под №3, относящимся к поведению эхокомпенсатора в режиме встречного разговора. Соответственно, модифицированный эхокомпенсатор будет удовлетворять также и требованиям отраслевого стандарта ОСТ 45 97-97 поскольку данный стандарт базируется на тестах рекомендации G 165.

Применение модифицированного эхокомпенсатора позволяет снизить изменение уровня подавления эхосигнала в ситуации встречного разговора до менее чем 2 дБ, в то время как для существующих решений данная величина может достигать 15 дБ и более.

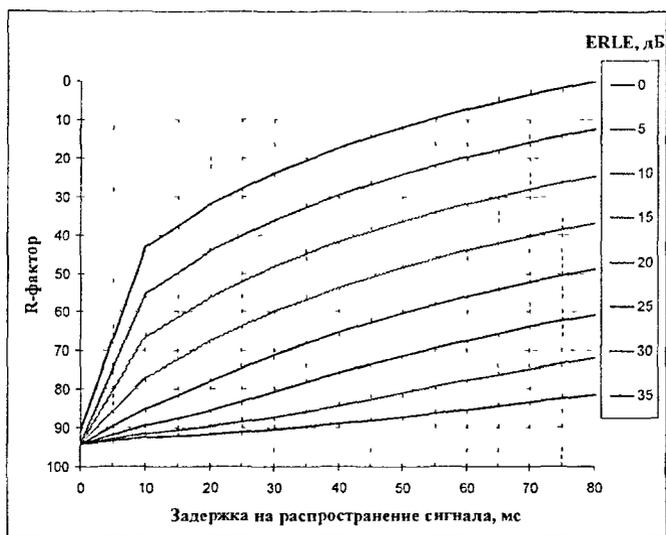


Рис 11 Зависимость R-фактора от ERLE при различных значениях задержки сигнала в сети связи

Полученные в рамках E-модели, заданной в рекомендации МСЭ-T G 107, зависимости (рис 11) показывают, что в ситуации ВР при использовании существующих ЭК рейтинговая оценка качества связи (R-фактор) может в зависимости от задержки в сети связи снизиться на 20 и более пунктов. Таким образом, при использовании модифицированного эхокомпенсатора наблюдается соответствующий выигрыш на 20 и более единиц в качестве связи во время ситуаций ВР.

При использовании в эхокомпенсаторе адаптивного алгоритма НМНК возможно вычисление значения решающей функции для нового ДВР итеративно на основании предыдущего значения. Поскольку

$$\hat{h}_i(n+1) = \hat{h}_i(n) + \mu e(n)x(n-i), \quad (8)$$

то значение суммы квадратов коэффициентов АФ можно разбить на три части следующим образом

$$\begin{aligned} \xi(n+1) &= \sum_{i=0}^{L-1} \hat{h}_i^2(n+1) = \sum_{i=0}^{L-1} [\hat{h}_i(n) + \mu e(n)x(n-i)]^2 = \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} \hat{h}_i^2(n) + 2\mu e(n) \sum_{i=0}^{L-1} \hat{h}_i(n)x(n-i) + (\mu e(n))^2 \sum_{i=0}^{L-1} x^2(n-i) \end{aligned} \quad (9)$$

Следовательно, получаем итеративное выражение для решающей функции

$$\xi(n+1) = \xi(n) + 2\mu e(n)\hat{y}(n) + (\mu e(n))^2 \|X(n)\|^2, \quad (10)$$

где норма сигнала от дальнего абонента

$$\|X(n)\|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} x^2(n-i) \quad (11)$$

может также быть вычислена итеративно

$$\begin{aligned} \|X(n+1)\|^2 &= \sum_{i=0}^{N-1} x^2(n+1-i) = \\ &= \|X(n)\|^2 - x^2(n-N+1) + x^2(n+1) \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10), получаем итоговое выражение в виде

$$\begin{aligned} \xi(n+1) &= \xi(n) + 2\mu e(n)\hat{y}(n) + \\ &+ (\mu e(n))^2 [\|X(n-1)\|^2 - x^2(n-N) + x^2(n)] \end{aligned} \quad (13)$$

Видно, что для подсчета последующего значения решающей функции при использовании НМНК требуется всего 4 операции сложения и 6 операций умножения, вместо L операций сложения и L операций умножения, что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма. Кроме того, вычислительная сложность при итеративной реализации не зависит от длины адаптивного фильтра, что позволяет с одинаковой скоростью производить определение ситуации ВР при экотрактах потенциально любой длины.

Для алгоритма реализующего ДВР НВК необходимо порядка $2M$ операций умножения, где M - длина выборки сигналов для алгоритма (типичное значение $M = 500$). Следовательно, предлагаемый ДВР является менее требовательным к вычислительным ресурсам ЦСП. Модифицированная структура эхокомпенсатора также превосходит эхокомпенсатор с применением связки робастного НМНК и ДВР Гейгеля в плане затрат вычислительных ресурсов, порядка 30 раз и по затратам памяти приблизительно в 3 раза (при длине буфера ошибок $P = 500$).

Проверена возможность работы предлагаемых алгоритмов эхокомпенсации в режиме реального времени Затраты процессорного времени для программы, моделирующей модифицированный эхокомпенсатор, составили максимум 1184 такта (11,8 мкс) на отсчет в режиме нормального функционирования, при длине фильтров, равной 128 отсчетам Это позволяет организовать одновременную обработку 10 каналов на одном процессоре

Достижимый за счет разработанной процедуры выигрыш в процессорном времени позволяет обрабатывать более длинные эхотракты, организовывать обработку дополнительных каналов или снижать конечную стоимость готового эхокомпенсатора, реализовав его на менее производительных и, следовательно, более дешевых сигнальных процессорах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие результаты

- 1 Разработан алгоритм определения ситуации встречного разговора, основанный на вычислении суммы квадратов весовых коэффициентов адаптивного фильтра Исследованы характеристики разработанного алгоритма и проведено его сравнение с существующими алгоритмами ДВР
- 2 Предложена процедура понижения вычислительных затрат для разработанного алгоритма ДВР при его функционировании совместно с адаптивным алгоритмом по нормализованному методу наименьших средних квадратов Для предлагаемого итеративного варианта вычисления решающей функции ДВР необходимо всего 6 операций умножения независимо от длины адаптивного фильтра
- 3 Предложена модифицированная адаптивная структура эхокомпенсатора с двумя фильтрами и двунаправленным копированием весовых коэффициентов, использующая разработанный алгоритм ДВР
- 4 Сравнение модифицированного эхокомпенсатора с существующими вариантами эхокомпенсаторов показало уменьшение скачка расстройки коэффициентов АФ при встречном разговоре на 50 дБ по сравнению с эхокомпенсатором, использующим робастный алгоритм НМНК при длине буфера $P = 1500$ и на 120 дБ по сравнению с эхокомпенсаторами, в которых применен ДВР Гейгеля, ДВР НВК и связка робастного алгоритма НМНК вместе с ДВР Гейгеля, при длине буфера $P = 500$ Данные получены при разрядности операндов алгоритмов 64 бит
- 5 Получены параметры модифицированного эхокомпенсатора, при которых он удовлетворяет основным требованиям отраслевого стандарта ОСТ 45 97-97 и рекомендации Международного Союза Электросвязи G 165
- 6 При использовании предлагаемых алгоритмов изменение уровня подавления эхосигнала в ситуации встречного разговора составляет менее 2 дБ, в то время как для ранее известных алгоритмов данная величина может достигать

15-30 дБ Результаты получены при разрядности операндов алгоритмов 32 бит

- 7 Полученные в рамках E-модели, заданной в рекомендации МСЭ-Т G 107, зависимости показывают, что в ситуации ВР при использовании модифицированного эхокомпенсатора наблюдается выигрыш на 20 и более единиц в качестве связи по сравнению с существующими решениями
- 8 На базе сигнального процессора ADSP-21160 произведено моделирование и проверена возможность работы предлагаемых алгоритмов эхокомпенсации в режиме реального времени Затраты процессорного времени для программы, моделирующей модифицированный эхокомпенсатор, составили максимум 1184 такта (11,8 мкс) на отсчет в режиме нормального функционирования, при длине фильтров, равной 128 отсчетам, что позволяет организовать одновременную обработку 10 каналов на одном процессоре
- 9 Разработанные алгоритмы проще в реализации, чем аналогичные существующие, и могут выполняться на сигнальных процессорах с невысокой вычислительной мощностью, либо применяться в составе многоканального эхокомпенсатора
- 10 Предлагаемые модификации могут применяться для улучшения характеристик эхокомпенсатора в ситуации встречного разговора, при решении задач электрической эхокомпенсации как в сетях ТфОП, так и в сетях IP- и беспроводной телефонии

В **Приложении 1** содержится описание робастного алгоритма НМНК с использованием функции Хьюбера, а также рассматривается способ оптимизации данного алгоритма с целью понижения вычислительной нагрузки

В **Приложении 2** приведен листинг программы, моделирующей работу модифицированного эхокомпенсатора

Приложение 3 содержит акты внедрения результатов диссертационной работы

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

- 1 Назаровский А Е, Тараканов А Н Обработка ситуации встречного разговора с помощью модифицированной структуры с двумя фильтрами // Электро-связь 2006 № 10 С 28-31
- 2 Тараканов А Н, Мосеев А Л, Назаровский А Е Понижение чувствительности адаптивного алгоритма в задаче эхо-компенсации // Тр LVIII науч сессии, посвященной Дню Радио Москва, 2003 Т 1, С 90-92
- 3 Tarakanov A N, Nazarovsky A E, Moseev A L Improvement of NLMS adaptive algorithm performance in double talk mode // 2nd IEEE international conference on circuits and systems for communications Moscow, 2004 P 37 1-37 4
- 4 Назаровский А Е, Тараканов А Н., Мосеев А Л Моделирование работы робастного алгоритма эхокомпенсации на цифровом сигнальном процессоре

ADSP-21160 // Докл 6-ой междуна конф «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2004) Москва, 2004 Т 1, С 286-289 (рус , англ)

5. Тараканов А Н, Назаровский А Е Повышение устойчивости эхокомпенсатора, использующего рекурсивный метод наименьших квадратов, к возможным искажениям эхосигнала // Докл 6-ой междуна конф «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2004) Москва, 2004 Т 1, С 167-170 (рус , англ)

6 Мосеев А Л, Тараканов А Н, Назаровский А Е Реализация алгоритмов эхокомпенсации на цифровом сигнальном процессоре TMS320F243 // Матер всерос научно-тех сем «Синхронизация, формирование и обработка сигналов» Ярославль, 2003 С 94-96

7 Назаровский А Е Увеличение скорости вычисления медианы в робастном алгоритме эхокомпенсации // Сб науч труд молодых ученых, аспирантов и студентов «Актуальные проблемы физики» Выпуск 5 ЯрГУ Ярославль, 2005 С 232-239

8 Тараканов А Н, Мосеев А Л, Назаровский А Е Применение цифровых адаптивных фильтров для подавления эха в каналах передачи информации // Сб матер III областной научно-практ конф студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярославский край Наше общество в третьем тысячелетии», Ярославль, 2002 С 15-16

9 Мосеев А Л, Назаровский А Е Применение алгоритма псевдолинейной регрессии для улучшения характеристик адаптивных цифровых БИХ-фильтров // Сб матер V областной научно-практ конф студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярославский край Наше общество в третьем тысячелетии» Ярославль, 2004 С 86-87

10 Назаровский А Е, Чариков А О, Шарапов И Н Аппаратная реализация цифровых фильтров // Матер V областной научно-практ конф студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярославский край Наше общество в третьем тысячелетии» Ярославль, 2004 С 87-88

11 Тараканов А Н, Назаровский А Е Увеличение робастных свойств рекурсивного метода наименьших квадратов в задаче эхокомпенсации // Матер всерос науч конф , посвященной 200-летию Ярославского государственного университета им П Г Демидова Ярославль, 2003 С 103-107

12 Назаровский А Е, Тараканов А Н Улучшение производительности робастного алгоритма эхокомпенсации на ЦСП ADSP-21160 // Тр 7-й междуна конф и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2005) Москва, 2005 С 441-444 (рус , англ)

13 Назаровский А Е Метод повышения производительности робастного алгоритма эхокомпенсации НМНК // Матер VI областной научно-практ конф студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярославский край Наше общество в третьем тысячелетии» Ярославль, 2005 С 67

14 Назаровский А Е, Тараканов А Н Алгоритм обнаружения и обработки ситуации двойного разговора в проводной телефонии // Матер VI обл научно-практической конф студентов, аспирантов и молодых ученых вузов «Ярослав-

ский край Наше общество в третьем тысячелетии» Ярославль, 2006 С 105-106

15 Назаровский А Е , Шарапов И Н Модификация процедуры вычисления медианы в робастном алгоритме НМНК // Тр междун научно-практ конф «Информационные средства и технологии» Москва, 2005 Т 1, С 135-138

16 Назаровский А Е , Тараканов А Н Увеличение производительности робастного алгоритма эхокомпенсации // Матер 6-й всерос научно-тех конф «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» Чебоксары, 2005 С 180-183

17 Nazarovsky A , Moseev A A new method for double talk detection in line echo cancellation // Proc of 1 international workshop on optimization problems in engineering (IWOPE-2005) Yaroslavl, Russia, 2005 V 1, P 56-63

18 Назаровский А Е , Тараканов А Н. Новый алгоритм для детектирования и обработки ситуации двойного разговора // Докл 8-й междун конф и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2006), Москва, 2006 Т. 1, С 243-246

19 Назаровский А Е , Брюханов Ю А Новый алгоритм обработки ситуации двойного разговора для задачи эхокомпенсации // Тез докл XII-ой междун научно-тех конф студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2006 Т 1, С 175-176

20 Мосеев А Л , Ульдинович С В , Назаровский А Е , Тараканов А Н Разработка адаптивного алгоритма эхокомпенсации с целью понижения его вычислительной сложности // Тез докл XII-ой междун научно-тех конф студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2006 Т 1, С 19-21

21 Назаровский А Е , Тараканов А Н Модификация структуры с двумя фильтрами для обнаружения и обработки ситуации встречного разговора // Тр междун научно-тех конф «Информационные средства и технологии» Москва, 2006 Т 3, С 49-52

22 Назаровский А Е , Тараканов А Н Алгоритм обнаружения и обработки ситуации двойного разговора в проводной телефонии // Сб докл юбилейной научно-тех конф «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях» Москва, 2006 Ч 1 С 277-283

23 Назаровский А Е , Тараканов А Н Алгоритм для обнаружения и обработки ситуации двойного разговора на основе адаптивной структуры с двумя фильтрами // Тр LXI науч сессии, посвященной Дню Радио Москва, 2006 С 94-96

Подписано в печать 26 04 07
Формат 60×84 1/16 Усл печ л 1,5 Тираж 100 экз

Отпечатано на ризографе
Ярославский государственный университет
150000 Ярославль, ул Советская, 14