

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕКУРСИВНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Кондратьев К.В., заведующий лабораторией «Микропроцессорные системы» Центра прикладных исследований (ЦПИ) филиала Сибирского федерального университета (СФУ) г. Железногорска, e-mail: kondratyev-37@mail.ru;

Углеv В.А., к.т.н., заведующий лабораторией «Робототехника и искусственный интеллект» ЦПИ филиала СФУ г. Железногорска, e-mail: uglev-v@yandex.ru;

Непомнящий О.В., к.т.н., доцент, заведующий лабораторией кафедры «Вычислительная техника» ИКИТ СФУ, e-mail: olegN_68@mail.ru;

Сергеевич В.Н., к.т.н., директор ООО НПП «САМИ», e-mail: svn@samy.ru

Ключевые слова: аудиосигнал, звуковое давление, адаптивный фильтр, рекурсивный, алгоритм, компенсация помех, корреляционная функция.

Введение

Разработка гибких человеко-машинных интерфейсов предполагает эффективную обработку различных типов сигналов. Важнейшим направлением регистрации информации о человеке, вслед за визуальным каналом, является акустический способ передачи информации. Но любой сигнал, распространяющийся в пространстве с преградами, неизбежно сталкивается с проблемами зашумления. Особенно остро данная проблема стоит в тех прикладных задачах, где требуется реализовать адаптивную подстройку акустического оборудования под специфику динамически изменяющихся условий его функционирования. Для диапазона частот, воспринимаемых человеческим ухом, это различные акустические устройства, звуковоспроизводящая и звукоусиливающая техника. К конкретным примерам данной группы устройств можно отнести слуховые аппараты, шлемофоны, тактические шлемы, а так же более сложные, такие как системы громкоговорящей связи. Для частот ультразвукового диапазона, это системы технического зрения (например, системы неразрушающего контроля и дефектоскопии, устройства эхо-локации). Поэтому рассмотрим возможность реализации адаптивного цифрового фильтра, изменяющего свои параметры по алгоритму, направленному на компенсацию шумовых эффектов акустического тракта.

Акустическая обратная связь и методы её подавления

Подавление шумов (помех) является одной из основных целей фильтрации информации. Особое внимание уделяется фильтрации помех, возникающих в системах с положительной обратной связью, так как при значении коэффициента обратной связи ≥ 1 и неблагоприятном соотношении фаз, выходной сигнал быстро возрастает (среднеквадратичное значение сигнала на определенном интервале стремится к бесконечности). Существующие средства, предназначенные для борьбы с акустической обратной связью, не независимо от исполнения,

Рассмотрен вопрос адаптивной фильтрации аудиосигнала с помощью цифрового фильтра, компенсирующего обратную акустическую связь. Приведён алгоритм учёта условий фильтрации, зависящий от динамически изменяющейся среды и рассмотрены условия его применения в развитых системах человеко-машинного взаимодействия.

делятся на две группы: средства подавления помехи и средства компенсации [1]. Большинство методов подавления, на которых базируются современные супрессоры, избирательно выделяют проблемные полосы частот и предотвращают их дальнейшее усиление или вовсе удаляют их из спектра. Очевидно, что алгоритмы реализующие принципы эквалайзерного подавления, по природе своей, вносят негативные изменения в акустический сигнал [2]. Среди разработчиков подобных систем идет конкуренция по минимизации интервалов задержки, более четкой идентификации проблемных частот и выбору оценочного критерия возникновения акустической обратной связи [3]. Особый интерес вызывают методы компенсации помехи, так как такой подход предполагает, что спектральная целостность сигнала остается неизменной, в крайнем случае, вносимые изменения во время фильтрации незначительны.

Адаптивная компенсация эхо-сигнала в цифровых коммуникационных технологиях исследована достаточно хорошо и существует множество решений, направленных на оптимизацию процесса фильтрации (например, [4] или обзор методов в [5]). Но постановка задачи эхо-компенсации для акустического тракта отличается от аналогичной постановки в дуплексных системах связи, так как акустический сигнал имеет иную природу возникновения, нелинейный характер поведения и претерпевает множественное наложение эхо-сигналов обратного акустического тракта. Это предполагает разработку иных алгоритмов расчёта параметров компенсирующего устройства.

Задачей компенсации эхо-сигнала в акустике посвящены исследования и патенты как отечественных учёных Алдошиной И.А., Дедовец С.А., Дыранова Ю.В., Крылова В.В., Стеклова И.В. и других, так и зарубежных – Elvin D. Stepp, Victor Clarke, Yong Shi, Jing Sun и других. Подробный обзор данной проблематики представлен Кузнецовым Е.П. в работе [6].

Математическая модель работы адаптивного цифрового фильтра, осуществляющего компенсацию эхо-сигнала, можно описать в виде классической задачи идентификации, где исходный произвольный полезный сигнал \dot{S}_k должен быть выделен из зашумлённого сигнала S_k , пришедшего на устройство регистрации. При этом выходной сигнал Y_k должен быть получен в результате перехода $S_k \xrightarrow{\text{фильтр}} Y_k$. Тогда процесс адаптации фильтра сводится к нахождению значений коэффициентов фильтрации a_m в конкретный промежуток времени k , при условии

$$f(a_m(k)) = \left\| \dot{S}_k - Y_k \right\|_{a_m(k)} \rightarrow \min.$$

В [7, 8] авторами был предложен метод позволяющий поднять уровень звукового давления в озвучиваемом замкнутом пространстве без искажения сигнала и без возникновения возбуждения вследствие акустической обратной связи. Его суть заключается в следующем:

1) Производится корреляционный анализ входного сигнала, поступающего на микрофон, результатом анализа является определение переходной характеристики озвучиваемого пространства.

2) Определяются временные интервалы задержек эхо-сигналов обратного акустического тракта, повторно пришедших в сенсор, посредством выделения пиковых значений взаимно-корреляционной функции последовательно идущих интервалов входящего сигнала.

3) Осуществляется поиск весовых коэффициентов фильтра, путем нормализации значений пиков к значению эхо-сигнала, поступившего на сенсор напрямую, для определения мощности сигнала обратного акустического тракта.

4) Производится введение добавочных коэффициентов фильтра, зависящих от мощности входящего сигнала на интервалах расчета взаимно-корреляционной функции.

Результаты экспериментов по осуществлению пост-фильтрации зашумленного сигнала [8] позволили сделать выводы о действенности метода и перейти к разработке алгоритма фильтрации в режиме реального времени. В настоящей статье представлен алгоритм определения весовых коэффициентов фильтрации сигнала для систем громкоговорящей связи в замкнутом пространстве с учётом эффекта акустической обратной связи.

Пусть имеется прошедший дискретизацию сигнал обратного акустического тракта S_k , имеющий цифровое представление. Для преобразования входящего сигнала с целью исключить помеху, возникающую в результате обратной связи, будем использовать классический цифровой рекурсивный фильтр (ЦРФ) [9]. ЦРФ определяется как фильтр, выходное значение каждого отсчета которого y_k формируется не только манипуляциями с текущими входными значениями S_k , но и со значениями выходных отсчетов, вычисленных в предыдущих циклах расчетов y_{k-m} .

Логика работы ЦРФ описывается полным разностным уравнением (1) и по природе своего построения

подходит под решение задачи подавления обратной связи в акустике.

$$y(k) = \sum_{n=0}^N b_n s(k - \tau_n) - \sum_{m=0}^M a_m y(k - \tau_m), \quad (1)$$

где первая сумма произведений в правой части – модель прямого акустического канала; вторая сумма произведений – модель обратного акустического канала; параметры τ_n и τ_m определяют величину задержки; коэффициенты b_n и a_m – мощности прямых и обратных акустических сигналов на входе приемника; $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N$, а $m = 1, 2, 3, \dots, M$; N и M – определяют число источников переотражений в прямом и обратном каналах.

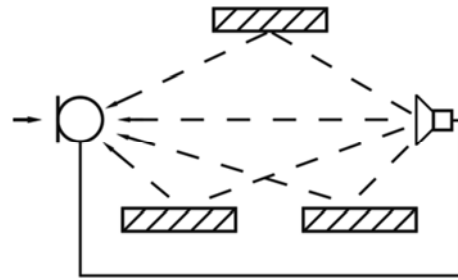


Рис. 1. Схема повторного попадания в приемник сигнала и его переотраженных копий

Возьмем, например, систему, в озвучиваемом пространстве которой, находится один приемник и один источник сигнала и 3 отражательные поверхности, как показано на рис. 1. Если в сенсор-приемник подать простой случайный сигнал, то через какое-то время он повторно придет из источника, а еще через какое-то время придут его копии, отраженные от поверхностей физических тел, находящихся в озвучиваемом пространстве [4]. Мощность всех пришедших сигналов на приемник будет разной, так как они прошли неодинаковое расстояние, и при отражении часть их энергии была потеряна на рис. 2.

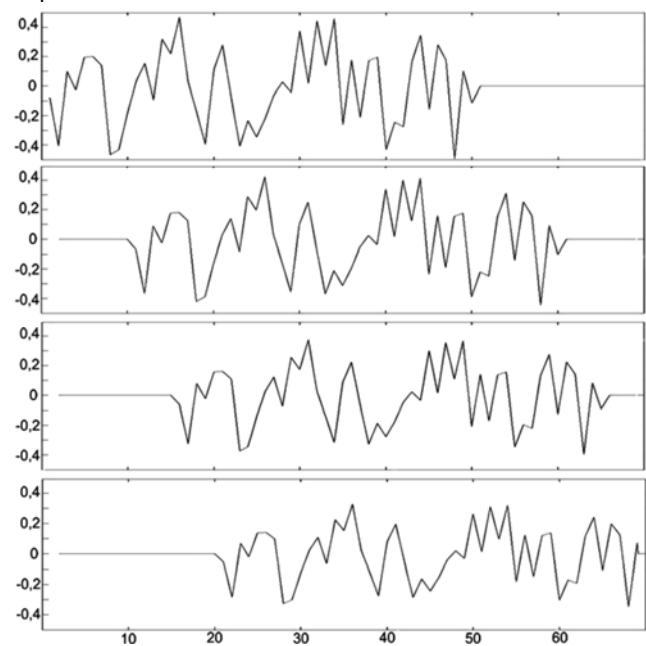


Рис. 2. Составляющие помехи обратной связи (сверху вниз): сигнал, пришедший напрямую и три задержанные копии

Алгоритм подавления акустической обратной связи

Результатом решения задачи подавления обратной акустической связи будет являться создание такого фильтра, который на выход будет подавать только сигнал прямого акустического тракта, отфильтрованный от сигнала обратного акустического тракта. Приведенный ниже алгоритм работает только в тех системах, в которых существует время, когда в тракте приемник-источник проходит только сигнал прямого акустического тракта. Приблизительное время и количество отсчетов, которые пройдут в тракте без помех, легко рассчитать, зная расстояние от источника сигнала до сенсора и частоту дискретизации сигнала. Приведем алгоритм расчета параметров ЦРФ в виде последовательности этапов.

1. В вычислителе задаем количество отсчетов для записи эталонного сигнала от 0 до $T1$ из расчета

$$T1 = \left(\frac{l}{s}\right) * f,$$

где l – расстояние от сенсора-приемника до ближайшего источника сигнала в метрах, s – скорость звука, для воздушной среды с нормальной комнатной температурой (344 м/с), f – частота дискретизации, $T1$ – время, когда на приемнике регистрируется только сигнала прямого канала, без влияния обратной связи.

2. В начале каждого поступления сигнала из прямого акустического тракта на вход приёмника сохраняем сигнал, поступающий на приемник на временном интервале от 0 до $T1$. Сохраняем также последующий сигнал аналогичной длительности от $T1$ до $T2$, который является суммой сигнала прямого и обратного акустических каналов.

3. Вычисляем взаимно-корреляционную функцию (ВКФ) $Corr(t)$ двух полученных сигналов по формуле

$$Corr(t) = \int_0^{T1} s(t)u(t + \tau)dt,$$

где $s(t)$ – записанный сигнал на интервале от 0 до $T1$; $u(t)$ – сигнал, записанный на интервале от $T1$ до $T2$. Так как ВКФ определяет степень сходства сравниваемых сигналов, то в сигнале $u(t)$ содержится информация о том, как сигнал $s(t)$ прошел через акустический тракт. Пиками на графике ВКФ фиксируется то, как эхо-сигналы $s(t)$ приходили на приемник (с какими задержками и с какой мощностью). Размерность ВКФ определяется двукратным представлением количества отсчетов выборок.

4. Вычисляем M максимумов ВКФ, которые показывают относительную мощность эхо-сигналов обратного акустического тракта. Значения по оси абсцисс при этих максимумах принимаем равным τ_m , что соответствует временным задержкам эхо-сигналов.

5. Нормируем полученный массив a_m к интервалу от 1 до 0, исходя из того, что первый максимум равен единице, а все последующие (угасающие) располагаются на означенном интервале ниже.

6. Моделируем акустический сигнал обратного канала с учетом найденных массивов a_m и τ_m

$$x(t) = \sum_{m=0}^M a_m y(k - \tau_m).$$

7. Вычитаем акустический сигнал обратного канала из общего сигнала, поступающего на сенсор-приемник. Вычитание производится из того сигнала, который поступил на приемник после $T2$.

Таким образом, переходная характеристика обратного тракта вычисляется в первые мгновения приема сигнала сенсором-приемником. Из значений, определяющих взаимную корреляцию двух функций, находим массивы значений, определяющих мощности эхо-сигналов и их задержки для моделирования сигнала обратной связи по входящему сигналу. Таким образом, каждый раз в начале разговора происходит адаптация под конкретную переходную характеристику тракта обратного сигнала.

По истечению первых мгновений затяжной речи, в которой отсутствуют необходимые для подстройки паузы, громкость человеческой речи изменяется, соответственно фильтр должен подстраиваться под изменения мощности входного сигнала. В начале каждого сеанса функционирования микрофонных блоков производится калибровка, суть которой заключается в следующем. В систему озвучивания подается сигнал с нарастающей амплитудой. Пройдя акустический тракт, сигнал воспринимается микрофонами. В микрофонных блоках происходит корреляционный анализ двух сигналов, эталонного и сигнала записанного микрофоном. Сигналы соответственно разбиваются на интервалы, уровень мощности интервалов разный. Для каждой пары интервалов сигналов находится переходная характеристика обратного тракта, моделируется сигнал обратного акустического тракта, осуществляется фильтрация интервала сигнала, записанного микрофоном. Введем некоторый коэффициент k , которым будем регулировать значения весовых коэффициентов. Как показали лабораторные опыты, существует зависимость значения весовых коэффициентов фильтра от мощности входного сигнала. На k поэлементно умножаем массив весовых коэффициентов, далее (методом градиентного спуска) находим такой k для каждой пары интервалов с разной мощностью, при котором эффективность фильтра максимальна (мощность помехи в сигнале после фильтрации – минимальна). Эффективность определяем, сравнивая для каждого k отфильтрованный интервал сигнала с соответствующим интервалом сигнала эталонного. После калибровки в памяти каждого микрофонного блока сохраняется таблица добавочных коэффициентов для массива весовых коэффициентов обратного акустического тракта. При изменении мощности поступающего на сенсор сигнала после формирования массива весовых коэффициентов в начале поступления сигнал прямого акустического тракта выбирается соответствующий коэффициент, на который умножается каждый a_m .

Зная временные рамки, когда на входе сенсора отсутствует сигнал обратного акустического тракта, можно ориентировочно предположить, когда этот сигнал начнет поступать. Сигнал обратного акустического тракта ($T1$, $T2$) порожден сигналом прямого акустического тракта (0, $T1$). Реализация цифровой фильтрации может осуществляться по-разному, но, как правило, это мощ-

ные вычислители в программном или аппаратном представлении с различными встроенными модулями памяти. Имея в памяти интервал сигнала только из прямого акустического тракта, и сохраненную выборку, в которой к входящему сигналу добавился сигнал обратного акустического тракта, можно найти массив весовых коэффициентов обратной акустического тракта, вычислив взаимно-корреляционную функцию двух сохраненных интервалов. Результат вычисления взаимно-корреляционной функции сигналов на означенных интервалах представлен на рис. 3.

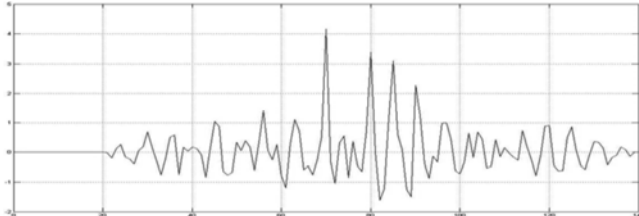


Рис. 3. Взаимно корреляционная функция, сигнала принятого микрофоном на $(0, T1)$ с сигналом принятым микрофоном на $(T1, T2)$

Так как ВКФ отражает схожесть двух сигналов, то она вычисляется пошаговым сдвигом выборки относительно друг друга, сначала в одну, потом в другую сторону. Анализировать следует ту половину корреляционной функции, которая образовалась в результате сдвига выборки сигнала, принятого микрофоном на $(0, T1)$ по интервалу сигнала, принятого микрофоном на $(T1, T2)$.

Из анализа пиков ВКФ на рис. 3 в диапазоне $[70; 100]$ видно, что первый пик отображает, как входящий в сенсор-приемник сигнал повторно пришел на приемник из источника, а спустя какое-то время пришли его отраженные от поверхностей копии. Значения пиков по оси абсцисс отображают количество отсчетов, через которое сигнал, пройдя озвучиваемую среду, повторно принимается сенсором.

Существенным преимуществом данного алгоритма является то, что коэффициенты a_m ЦРФ, вычисляются в первые мгновения подачи сигнала на сенсор приемник, что позволяет отфильтровать все последующие входящие отсчеты. Это очень важно в тех системах, характеристики озвучиваемого пространства которых периодически изменяются.

Результаты моделирования

Предложенный алгоритм был апробирован на смонтированной акустической системе громкоговорящей связи. В состав экспериментальной установки вошли приемник сигнала (пульт делегата) и подсистема озвучивания,

которая в свою очередь имеет в своем составе 6 основных и 8 дополнительных излучателей различного диапазона (рис. 4). На входные каналы установки был подан сигнал с заранее известными параметрами, который пройдя через систему усиления и излучатели, был записан при помощи одного приемника конференц-системы.

В результате использования экспериментальной установки были получены звуковые файлы, которые послужили исходным материалом для обработки по выше изложенному алгоритму. Значения добавочных коэффициентов и процент фильтрации сигнала представлены в таблице.



Рис. 4. Расположение микрофонных блоков, источники сигнала расположены на колоннах за шторами

Следует отметить, что после обработки сигнала рассматриваемым алгоритмом, акустическая обратная связь была практически полностью подавлена (в отдельных случаях, процент компенсации сигнала обратного акустического тракта достиг почти 93%), при этом качество выходного сигнала существенно возросло. Кроме того, из результатов эксперимента видно, что прослеживается четко выраженная зависимость добавочного коэффициента, рассчитанного ЦРФ, от номинальной мощности фильтруемого сигнала (коэффициент корреляции равен 0,975504), что позволяет сделать фильтр адаптивным под уровень мощности входящего сигнала, а достаточное количество пауз в речи оратора позволяет адаптироваться под переходную характеристику акустического тракта.

Перспективы приложения адаптивных ЦРФ

Применение адаптивных свойств ЦРФ можно реализовать в широком круге акустических приборов и систем человеко-машинного взаимодействия. Так, можно выделить задачу организации персонального акустического пространства человека. Предположим, что имеется помещение с несколькими источниками полезного сигнала и присутствием эффекта их переотражения.

Таблица. Результаты моделирования

№ интервала	Мощность фильтруемого сигнала на интервале	k	Итоговый процент фильтрации		
			$M = 10$	$M = 20$	$M = 30$
1	0,0722	0,05	66,66%	82,75%	85,82%
2	0,2927	0,20	57,77%	79,91%	92,89%
3	0,1619	0,14	75,54%	79,87%	85,99%
4	0,0931	0,06	39,65%	57,49%	72,48%
5	0,0854	0,05	42,58%	57,97%	68,93%
6	0,1093	0,09	46,78%	63,15%	70,55%
7	0,0625	0,05	34,78%	47,17%	59,74%



Если при этом общение между людьми должно носить адресный характер в естественно-языковой форме, то и устройства регистрации, и устройства воспроизведения должны максимально эффективно фиксировать голос каждого говорящего, а воспроизводить только определённого получателю (одному или многим). В этой ситуации необходимо иметь как адаптивные механизмы подавления обратной акустической связи, порожденные от собственного полезного сигнала, так и развитые средства фильтрации первичного и переотраженного нецелевого сигнала. Типовым примером организации таких условий работы являются операторские комнаты без существенной звукоизоляции между находящимися неподалеку людьми (call-центры, центры управления полётами, ситуационные центры и пр., регламентируемые ГОСТом серии «Система «человек-машина»») [10].

Другим направлением приложения адаптивных акустических фильтров может стать автоматизация жилых зданий и помещений нового поколения. Опираясь на концепцию Smart Home [11, 12], адаптивная подстройка условий жизни человека должна осуществляться комплексно, т.е. затрагивая ведущие органы восприятия. Тогда сопряжение новых акустических ЦРФ с системами обеспечения безопасности и обмена информацией «умного» дома будут крайне полезны. Без существенных изменений в принципах ситуационного управления всей системой жизнеобеспечения помещений не обойтись, включая реализацию специализированных интеллектуальных функций внутри каждого прибора [13]. Это – и качественно новый уровень индивидуализации акустической среды, и более высокие требования к аппаратуре [14], функционирующей в динамически изменяющихся условиях. Например, регистрация полезного акустического сигнала от движущегося источника с динамическим изменением зоны регистрации отдельных микрофонов (AMI системы по [15]): адаптируются не только параметры a_m ЦРФ, но и диаграммы направленности, осуществляя своеобразное слежение.

Заключение

Современные вычислительные платформы на базе ПЛИС или DSP-процессоров позволяют реализовать требуемую скорость обработки цифрового акустического сигнала, приближая функционирование рекурсивных цифровых фильтров к работе в реальном времени [16]. Адаптивная подстройка работы таких фильтров и их приложение к специальным задачам обуславливают развитие технологий «умной» фильтрации в смежных областях. Во-первых, это микроэлектроника, где важны тенденции повышения быстродействия, миниатюризации и энергоэффективности. Это, в свою очередь, делает рациональной реализацию фильтров в виде систем на кристалле. Во-вторых, это приборостроение, где тенденции интеграции различных человеко-машинных интерфейсов очень важны при повышении эффективности производственной и домашней автоматизации. Следовательно, работы по объединению «умных» фильтров будут играть существенную роль в комплексном «очувствлении» искусственных объектов (включая робототехнические). А значит, области приложения теории систем цифровой обработки сигнала в акустике будут востребованы.

Литература

1. Шаврин С.С. Электрическое эхо: заграждать или компенсировать? // Вестник связи. – 2005. – № 1. – С. 30-33.
2. Баширов С.Р. Применение микроконтроллеров в звуковой технике. – М.: Эксмо, 2008. – 254 с.
3. Галиев А.Л., Шишкина А.Ф., Устройство ослабления акустической обратной связи с компандированием огибающей речевого сигнала // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 6. – С. 48-50.
4. Тараканов А.Н., Мосеев В.Л., Ульдинович С.В. Комбинированный адаптивный алгоритм эхо-компенсации с пониженной вычислительной сложностью // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – №3. – С. 26-30.
5. Кузнецов Е.П., Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов в задачах эхо-компенсации: тематический обзор (часть 2) // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – №4. – С. 20-28.
6. Кузнецов Е.П. Методы и алгоритмы адаптивной эхо-компенсации: сравнительный анализ эффективности применения // Цифровая обработка сигналов. – 2007. – №4. – С. 26-34.
7. Непомнящий О.В., Кондратьев К.В., Сергеевич В.Н., Матюха Н.В., Дрыжак В.Б. Метод подавления акустической обратной связи на основе цифрового фильтра предварительного вычисления сигнала коррекции // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 3. – С. 19-22.
8. Непомнящий О.В., Кондратьев К.В., Лебедев И.Н., Сергеевич В.Н. Подавление акустической обратной связи на основе взаимно-корреляционной функции // Нелинейный мир. – 2013. – Том 11. – №5. – С. 317-322.
9. Адаптивные фильтры. /Под ред. К. Ф. Н. Коузана и П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
10. ГОСТ 26387-84 Система «человек-машина». Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 7 с.
11. Харке В. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилом помещении – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
12. Углев В.А. Smart Home: текущее состояние в РФ и перспективные направления исследований // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Железногорск: СФУ, 2012. – С. 88-91.
13. Углев В.А. Автоматизация на базе концепции «Умный дом»: проблемы интеллектуализации // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Железногорск: СФУ, 2012. – С. 40-44.
14. Наслимов А.И. Принципы организации адаптивного акустического человеко-машинного интерфейса // Радиоэлектронное приборостроение как основа высокотехнологического обновления всех отраслей производства: Материалы XVII международной конференции, Т 2. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 90-91.
15. Uglev V.A., Naslimov A.I., Kondratyev K.V. Adaptive control of registration area by the acoustic signal in AMI systems // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. – p. 143-146.
16. Кондратьев К.В., Сергеевич В.Н. Выбор DSP-процессора для вычисления сигнала, способствующего возникновению акустической обратной связи // Робототехника как образовательная технология: материалы II международной научно-практической конференции. – Красноярск: СФУ, 2010. – С. 99-101.