

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ ПОМЕХ

К. В. Кондратьев, О. В. Непомнящий, В. Н. Сергеевич, В. Е. Кропачев

Сибирский федеральный университет

Поступила в редакцию 05.08.2015 г.

Аннотация. Рассмотрены проблемы, методы и способы компенсации реверберационных помех в трактах приемопередающей аппаратуры. Выделены причины возникновения реверберационных помех обратного сигнального тракта при петлевом коэффициенте усиления системы более единицы. Представлены методы и способы на базе которых функционируют существующие аппаратные и программные средства подавления реверберационных помех. Отмечены недостатки современных подавителей помех от ведущих мировых производителей. Кратко описан метод, позволяющий поднять уровень усиления сигнала в замкнутом пространстве без искажения сигнала и без возникновения возбуждения реверберационных помех. Описана логика работы цифрового рекурсивного фильтра подавления реверберационных помех. Предложен, разработанный авторами алгоритм адаптивной фильтрации сигнала с помощью цифрового фильтра, компенсирующего реверберационные помехи, основанный на предварительном вычислении сигнала коррекции.

Ключевые слова: алгоритм, адаптация, фильтр, реверберационные помехи, компенсация.

ADAPTIVE ALGORITHMS FOR PAYMENT REVERBERATION NOISE

K. V. Kondratyev, O. V. Nepomnuashy, V. N. Sergeevich, V. E. Kropachev

Abstract. The problems, methods and ways of compensation reverberation interference paths transceiver equipment. Highlighted the causes of the reverberation noise in the return signal path loop gain of greater than unity. The methods and techniques on the basis of which the functioning of existing hardware and software reverb noise suppression. Noted disadvantages of modern suppressors from leading manufacturers. Briefly describes a method to raise the level of signal amplification in a confined space without distortion and without the occurrence of excitation reverberation noise. We describe the logic of digital recursive filter suppress noise reverberation. Proposed, the authors developed an algorithm of adaptive signal filtering with a digital filter, compensating reverb noise based on the preliminary calculation of the correction signal.

Keywords: algorithm, adaptation, filter, reverb noise compensation.

ВВЕДЕНИЕ

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 усилительного 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 обратного сигнального тракта.

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 зависимо от исполнения, 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 изначальный 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 несущественны.

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 сигнального тракта отличается от аналогичной постановки в дуплексных системах связи, так как в этом случае сигнал имеет иную природу возникновения, нелинейный характер поведения и претерпевает множественное наложение эхо-сигналов обратного сигнального тракта. Это предполагает разработку иных алгоритмов расчёта параметров компенсирующего устройства.

Задачей компенсации эхо-сигнала 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].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель работы адаптивного цифрового фильтра, осуществляющего компенсацию эхо-сигнала, можно описать в виде классической задачи идентификации, где исходный произвольный полезный сигнал 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 от S_k к Y_k через фильтр. Тогда процесс адаптации фильтра сводится к нахождению значений коэффициентов фильтрации a_m в конкретный промежуток времени k , при условии

$$f(a_m(k)) = \|S'_k - Y_k\| \rightarrow \min_{a_m(k)}$$

В [7], [8] авторами был предложен метод позволяющий поднять уровень усиления сигнала в замкнутом пространстве без искажения сигнала и без возникновения возбуждения вследствие

реверберационных помех. Его суть заключается в следующем:

- 1) Производится корреляционный анализ входного сигнала, поступающего на сенсор-приемник, результатом анализа является определение переходной характеристики пространства распространения сигнала.
- 2) Определяются временные интервалы задержек эхо-сигналов обратного сигнального 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 сигнального тракта.
- 4) Производится введение добавочных коэффициентов фильтра, зависящих от мощности входящего сигнала на интервалах расчета взаимно-корреляционной функции.

Результаты экспериментов по осуществлению постфильтрации зашумленного сигнала [8] позволили сделать выводы о действенности метода и перейти к разработке алгоритма фильтрации в режиме реального времени.

Пусть имеется прошедший дискретизацию сигнал обратного сигнального тракта S_k , имеющий цифровое представление. Для преобразования входящего сигнала с целью исключить реверберационную помеху 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 компенсации реверберационных помех

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

где первая сумма произведений в правой части — модель прямого сигнального канала; вторая сумма произведений — модель обратного сигнального канала; параметры τ_n и τ_m определяют величину задержки; коэффициенты b_n и a_m — мощности прямых и обратных 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.

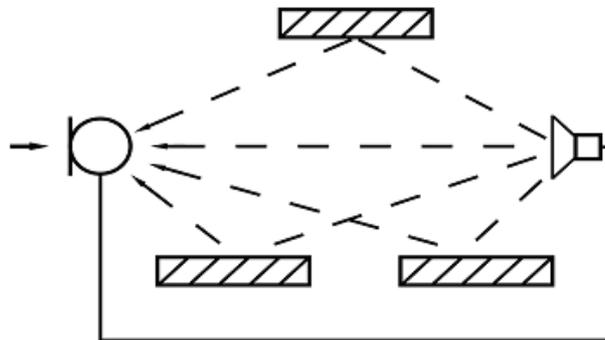


Рис. 1. Scheme re-entry into the receiver signal and multipath copies

Возьмем, например, систему, в которой, находится один приемник и один источник сигнала и 3 отражательные поверхности как показано на рисунке 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 среде распространения сигнала [4]. Мощность всех пришедших сигналов на приемник будет разной, так как они прошли не одинаковое расстояние и при отражении часть их энергии была потеряна.

Результатом решения задачи компенсации реверберационных помех, будет являться создание такого фильтра, который на выход будет подавать только сигнал прямого сигнального тракта, отфильтрованный от сигнала обратного тракта замкнутой системы [10]. Приведенный ниже алгоритм работает только в тех системах, в которых существует время, когда в тракте приемник-источник проходит только сигнал прямого тракта. Приблизительное время и количество отчетов, которые пройдут в тракте без помех легко рассчитать, зная расстояние от источника сигнала до сенсора и частоту дискретизации сигнала. Ниже приведен разработанный алгоритм расчета параметров ЦРФ в виде последовательности этапов:

1. Задается 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 соответствующая среде распространения, f — частота дискретизации. $T1$ определяет время, когда на приемнике регистрируется только сигнала прямого канала, без влияния обратной связи.

2. В начале каждого поступления сигнала из прямого тракта на вход приёмника в память сохраняется сигнал, поступающий на приемник на временном интервале от 0 до $T1$. Так же сохраняется последующий сигнал от $T1$ до $T2$ (временной интервал в отсчетах равен двукратному представлению длине вектора записанного на интервале от 0 до $T1$ [11]), который, будет являться суммой сигнала прямого и обратного каналов:

$$s(t) = \sum_{n=0}^N b_n s(k - \tau_n), k \in (1, T1/f),$$

$$u(t) = \sum_{n=0}^N b_n s(k - \tau_n) + \sum_{m=0}^N a_m y(k - \tau_m), k \in (T1/f, T2/f).$$

3. Вычисляется ВКФ $Corr(t)$ двух полученных сигналов согласно выражения:

$$Corr(t) = \int_0^{\frac{T2-T1}{f}} s(t)u(t + \tau)dt$$

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 [12], то в сигнале $u(t)$ содержится информация о том, как сигнал $s(t)$ прошел через замкнутое пространство. Пиками на графике ВКФ отмечены эхо-сигналы $s(t)$, поступившие на приемник с задержками τ_x и с мощностью k_x (рисунок 2). Размерность ВКФ определяется двукратным представлением количества отсчетов выборок. Для дальнейшего расчета выбирается положительная часть ВКФ по оси абсцисс и сигнал $s(t)$ сдвигается относительно зашумленного $u(t)$.

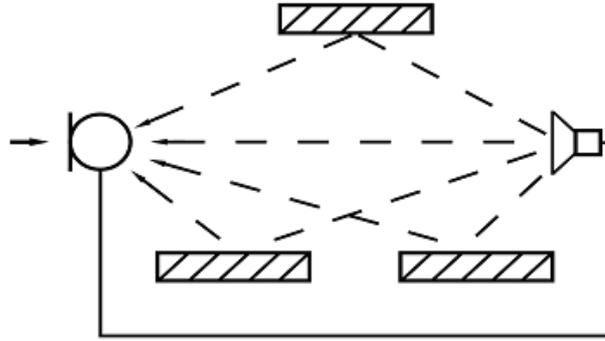


Рис. 2. The transition function return signal path

4. Вычисляется M максимумов ВКФ, которые показывают относительную мощность эхосигналов обратного тракта. Значения по оси абсцисс при этих максимумах принимаются равным τ_m , что соответствует временным задержкам эхосигналов:

$$a = \{a_{\tau_1}, 0, 0, \dots, 0, 0, a_{\tau_2}, 0, 0, \dots, 0, 0, a_{\tau_3}, 0, 0, \dots, 0, 0, a_{\tau_4}, 0, 0, \dots, 0, 0, a_{\tau_m}\}.$$

С целью исключения возможного дублирования коэффициентов при индексировании, сохраняется значение индекса в a_m и удаляется его значение на графике (рисунок 3).

$$[a_m, \tau_m] = \max(Corr),$$

$$Corr(x) = 0, x \in [Corr(x_1) = 0, a_m]$$

$$Corr(x) = 0, x \in (a_m, Corr(x_2) = 0]$$

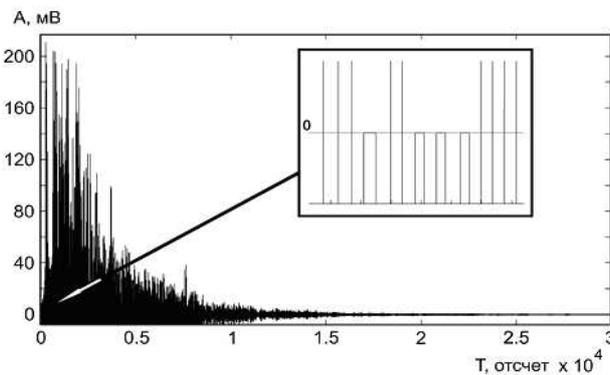


Рис. 3. Excluding taken into account peaks

5. Выполняется нормирование полученного массива 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:

$$a = \left\{ 1, 0, 0, \dots, 0, 0, \frac{a_{\tau_2}}{a_{\tau_1}}, 0, 0, \dots, 0, 0, \frac{a_{\tau_3}}{a_{\tau_1}}, 0, 0, \dots, 0, 0, \frac{a_{\tau_4}}{a_{\tau_1}}, 0, 0, \dots, 0, 0, \frac{a_{\tau_m}}{a_{\tau_1}} \right\}$$

6. Моделируется сигнал обратного канала с учетом найденных массивов a_m и τ_m :

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

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

$$y(t) = \sum_{n=0}^N b_n s(k - \tau_n) + \sum_{m=0}^M a_m y(k - \tau_m) - \sum_{m1=0}^{M1} a_{m1} y(k - \tau_{m1}).$$

Таким образом, переходная характеристика обратного тракта вычисляется в первые фазы приема сигнала сенсором-приемником, блок схема такого алгоритма приведена на рисунке 4.

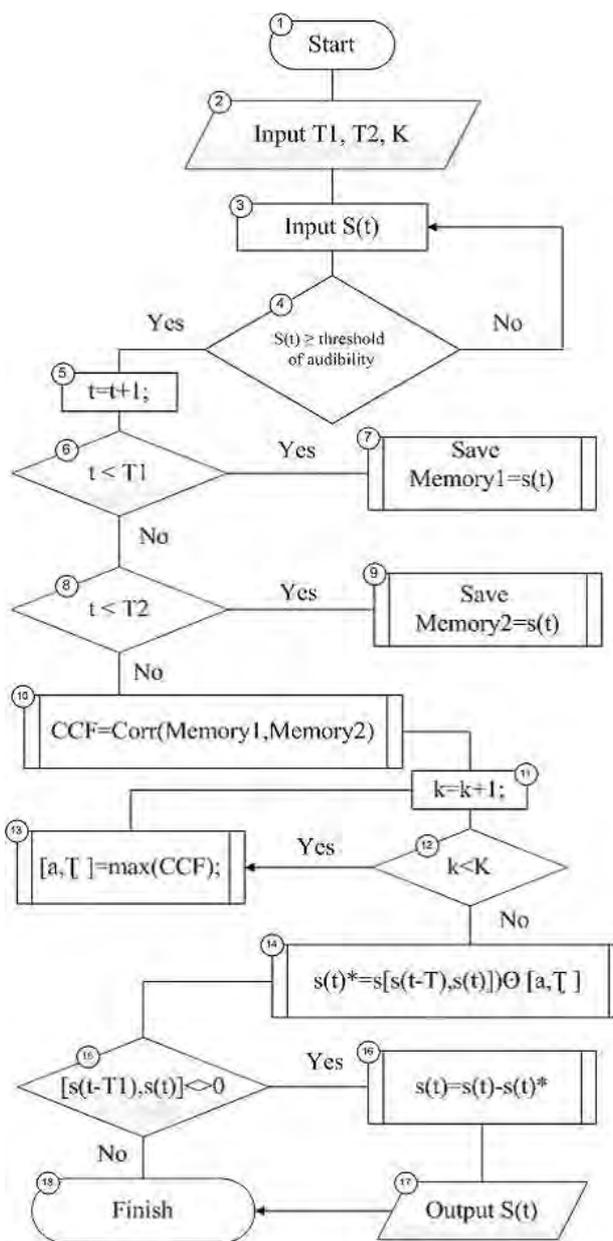


Рис. 4. Flowchart compensation reverberation noise in the audio range.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам предварительной апробации предлагаемого алгоритма компенсации реверберационных помех на имитационной модели системы усиления сигнала в замкнутом пространстве были получены следующие результаты:

— возможность вычисления сигнала коррекции обратного сигнального тракта подтверждается соответствием значений аргументов при пиках взаимно-корреляционной функции временным задержкам эхо-сигналов на протяжении экспериментальной сессии [13], [14];

— система усиления сигнала является не рекурсивной системой, так как имеет конечную импульсную характеристику из-за рассеивания звуковой энергии в пространстве. Однако при возникновении сигнала обратного сигнального тракта в прямом сигнальном канале каждое выходное значение усилительной системы формируется не только на основании значений входных отсчетов сигнала, но и на основе выходных значений полученных на предварительных интервалах расчета. Таким образом, разработанный метод использования рекурсивного фильтра применим при решении задачи компенсации реверберационных помех [15].

— при моделировании (при искусственном зашумлении сигнала, его эхо-откликами) с генерируемыми задержками и уровнем мощности удалось спрогнозировать помеху до ее появления, и выполнить компенсацию, исключив помеху из усилительного тракта. Отфильтрованный сигнал соответствовал исходному, не зашумленному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаврин, С. С. Электрическое эхо: загрязждать или компенсировать? / С. С. Шаврин // Вестник связи. — 2005. — № 1. — С. 30–33.
2. Баширов, С. Р. Применение микроконтроллеров в звуковой технике / С. Р. Баширов. — М.: Эксмо, 2008. — 254 с.
3. Шишкина, А. Ф. Об одном способе подавления шумов в переговорных устройствах / А. Ф. Шишкина, А. Н. Ликонцев, А. Л. Галиев // Авиакосмическое приборостроение. — 2015. — № 10. — С. 31–35.
4. Тараканов, А. Н. Комбинированный адаптивный алгоритм эхо-компенсации с пониженной вычислительной сложностью / А. Н. Тараканов, В. Л. Мосеев, С. В. Ульдинович // Цифровая обработка сигналов. — 2006. — № 3. — С. 26–30.
5. Кузнецов, Е. П. Цифровая обработка сигналов в задачах эхо-компенсации: тематический обзор (часть 2) / Е. П. Кузнецов, В. В. Витязев // Цифровая обработка сигналов. — 2006. — № 4. — С. 20–28.
6. Кузнецов, Е. П. Методы и алгоритмы адаптивной эхо-компенсации: сравнительный анализ эффективности применения / Е. П. Кузнецов // Цифровая обработка сигналов. — 2007. — № 4. — С. 26–34.
7. Метод подавления акустической обратной связи на основе цифрового фильтра предварительного вычисления сигнала коррекции / О. В. Непомнящий, К. В. Кондратьев, В. Н. Сергеевич и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2012. — № 3. — С. 19–22.
8. Подавление акустической обратной связи на основе взаимно-корреляционной функции / О. В. Непомнящий, К. В. Кондратьев, И. Н. Лебедев, В. Н. Сергеевич // Нелинейный мир. — 2013. — Т. 11, № 5. — С. 317–322.
9. Адаптивные фильтры / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта. — М.: Мир, 1988. — 392 с.
10. Адаптивные алгоритмы компенсации помех / Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов: Учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2014. — 87 с.

11. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — СПб.: Питер, 2003. — 608 с.
12. Никонов, В. И. Применение корреляционных кодов для систем синхронизации и связи [Текст] / В. И. Никонов, Г. С. Никонова // Техника радиосвязи. — 2008. — № 13. — С. 87–90.
13. Адаптивный алгоритм определения параметров рекурсивного цифрового фильтра для компенсации акустической обратной связи / К. В. Кондратьев, В. А. Углев, О. В. Непомнящий, В. Н. Сергеевич // Цифровая обработка сигналов. — 2013. — № 4. — С. 72–76.
14. Программа цифровой фильтрации сигнала акустической обратной связи / К. В. Кондратьев, О. В. Непомнящий, В. А. Хабаров, В. Н. Сергеевич // Свидетельство государственной регистрации № 2013614146 от 24.04.2013 г. — М.: ВНИИЦ, 2013.
15. Адаптивная компенсация помех обратного акустического тракта в процессе эксплуатации конференц-систем / К. В. Кондратьев, О. В. Непомнящий, А. Ф. Шишкина, В. Н. Сергеевич // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2014. — № 3. — С. 53–59.

REFERENCES

1. Shavrin S. S. Electrical echo: obstruct or compensate?. [Shavrin S. S. Elektricheskoye ekho: zagrazhdat' ili kompensirovat'?). *Vestnik svyazi — Journal of communication*, 2005, vol. 1. pp. 30–33.
2. Bashirov S. R. The use of microcontrollers in the sound engineering. [Bashirov S. R. *Primeneniye mikrokontrollerov v zvukovoy tekhnike*]. Moscow: Eksmo, 2008, 254 p.
3. Shishkina A. F., Lekomtsev A. N., Galiyev A. L. A method of suppressing noise in intercom. [Shishkina A. F., Lekomtsev A. N., Galiyev A. L. *Ob odnom sposobe podavleniya shumov v peregovornyykh ustroystvakh*]. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye — Aerospace instrument-making*, 2015, vol. 10, pp. 31–35.
4. Tarakanov A. N., Moseyev V. L., Ul'dinovich S. V. Combined echo cancellation adaptive algorithm with low computational complexity. [Tarakanov A. N., Moseyev V. L., Ul'dinovich S. V. *Kombinirovanny adaptivnyy algoritm ekhokompensatsii s ponizhennoy vychislitel'noy slozhnost'yu*]. *Tsifrovaya obrabotka signalov — Digital Signal Processing*, 2006, vol. 3, pp. 26–30.
5. Kuznetsov E. P., Vityazev V. V. Digital signal processing in problems echo cancellation: thematic review (Part 2). [Kuznetsov E. P., Vityazev V. V. *Tsifrovaya obrabotka signalov v zadachakh ekho-kompensatsii: tematicheskii obzor (chast' 2)*]. *Tsifrovaya obrabotka signalov — Digital Signal Processing*, 2006, vol. 4, pp. 20–28.
6. Kuznetsov E. P. Methods and algorithms for adaptive echo cancellation: a comparative analysis of the effectiveness. [Kuznetsov E. P. *Metody i algoritmy adaptivnoy ekho-kompensatsii: sravnitel'nyy analiz effektivnosti primeneniya*]. *Tsifrovaya obrabotka signalov — Digital Signal Processing*, 2007, vol. 4, pp. 26–34.
7. Nepomnyashchiy O. V., Kondrat'yev K. V., Sergeyevich V. N., Matyukha N. V., Dryzhak V. B. The method of suppressing acoustic feedback on the basis of a preliminary calculation of the digital filter correction signal. [Nepomnyashchiy O. V., Kondrat'yev K. V., Sergeyevich V. N., Matyukha N. V., Dryzhak V. B. *Metod podavleniya akusticheskoy obratnoy svyazi na osnove tsifrovogo fil'tra predvaritel'nogo vychisleniya signala korrektsii*]. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy — Information-measuring and control systems*, 2012, vol. 3, pp. 19–22.
8. Nepomnyashchiy O. V., Kondrat'yev K. V., Lebedev I. N., Sergeyevich V. N. Suppressing acoustic feedback on the basis of cross-correlation function. [Nepomnyashchiy O. V., Kondrat'yev K. V., Lebedev I. N., Sergeyevich V. N. *Podavleniye akusticheskoy obratnoy svyazi na osnove vzaimno-korrelyatsionnoy funktsii*]. *Nelineynyy mir — Non-linear world*, 2013, vol. 5, pp. 317–322.
9. Kouen K. F. N, Grand P. M. Adaptive filters. [Kouen K. F. N, Grand P. M. *Adaptivnyye*

fil'try]. Moscow: Mir, 1988, 392 p.

10. Ivlev D. N., Orlov I. Ya., Sorokina A. V., Firsov Ye. S. Adaptive interference cancellation algorithms. [Ivlev D. N., Orlov I. Ya., Sorokina A. V., Firsov Ye. S. Adaptivnyye algoritmy kompensatsii pomekh]. Nizhniy Novgorod: NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2014, 87 p.

11. Sergiyenko A. B. Digital signal processing. [Sergiyenko A. B. Tsifrovaya obrabotka signalov]. SPb.: Piter. 2003, 608 p.

12. Nikonov V. I., Nikolayeva G. S. Application of correlation codes for synchronization and communication systems. [Nikonov V. I., Nikolayeva G. S. Primeneniye korrelyatsionnykh kodov dlya sistem sinkhronizatsii i svyazi]. *Tekhnika radiosvyazi — The technique of radio communications*, 2008, vol. 13, pp. 87–90.

13. Kondrat'yev K. V., Uglev V. A., Nepomnyashchii O. V., Sergeevich V. N. An adaptive algorithm for determining the parameters of a recursive digital filter to compensate for acoustic feedback. [Kondrat'yev K. V., Uglev V. A., Nepomnyashchii O. V., Sergeevich V. N. Adaptivnyy algoritm opredeleniya parametrov rekursivnogo tsifrovogo fil'tra dlya kompensatsii akusticheskoy obratnoy svyazi]. *Tsifrovaya obrabotka signalov — Digital Signal Processing*, 2013, vol. 4, pp. 72–76.

14. Kondrat'yev K. V., Nepomnyashchii O. V., Khabarov V. A., Sergeevich V. N. Program digital signal filtering acoustic feedback. [Kondrat'yev K. V., Nepomnyashchii O. V., Khabarov V. A., Sergeevich V. N. Programma tsifrovoy fil'tratsii signala akusticheskoy obratnoy svyazi]. Svidetel'stvo gosudarstvennoy registratsii №2013614146 ot 24.04.2013 g. Moscow: VNTITS. 2013.

15. Kondrat'yev K. V., Nepomnyashchii O. V., Shishkina A. F., Sergeevich V. N. Adaptive interference compensation reverse acoustic path during operation conference systems. [Kondrat'yev K. V., Nepomnyashchii O. V., Shishkina A. F., Sergeevich V. N. Adaptivnaya kompensatsiya pomekh obratnogo akusticheskogo trakta v protsesse ekspluatatsii konferents-sistem]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika — Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2014, vol. 3, pp. 53–59.

Кондратьев Кирилл Валерьевич, Инженер-конструктор, Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «SAMY», Железногорск, Россия
E-mail: kkv@samy.ru
Тел.: (950)-404-25-33

Kondratiev Kirill Valerevich, Design Engineer, Limited Liability Company Research and Production Enterprise «SAMY», Zheleznogorsk, Russia
E-mail: kkv@samy.ru
Tel.: (950)-404-25-33

Непомнящий Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент, руководитель Научно-учебной лаборатории Микропроцессорных систем, Сибирский федеральный кафедра «Вычислительная техника» Институт космических и информационных технологий, Красноярск, Россия
E-mail: 2955005@gmail.com
Тел.: 2955005

Nepomnyashchii Oleg Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor, Head of Research and Training Laboratory Microprocessor Systems, Siberian Federal Department of «Computer Science» Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk city, Russia
E-mail: 2955005@gmail.com
Tel.: 2955005

*Сергеевич Владимир Николаевич, кандидат технических наук, директор, Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «САМУ», Железногорск, Россия
E-mail: svn@samy.ru
Тел.: (913)-550-84-11*

*Sergeevich Vladimir Nikolaevich, Ph.D., Director, Limited Liability Company Research and Production Enterprise «SAMY», Zheleznogorsk, Russia
E-mail: svn@samy.ru
Tel.: (913)-550-84-11*

*Кропачев Валерий Евгеньевич, Заведующий лабораторией ООО НПО «Технорос», Красноярск, Россия
E-mail: technoroskras@mail.ru
Тел.: (391) 258-11-67*

*Kropachev Valery Evgenevich, Head of laboratory NPO «Tehnoros», Krasnoyarsk, Russia
E-mail: technoroskras@mail.ru
Tel.: (391) 258-11-67*