
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 004.93; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-3-26-34

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

✉ Шульга Татьяна Эриковна;

Хмель Антон Васильевич.

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
г. Саратов, Россия

✉ taiss@yandex.ru

Аннотация. Описывается эксперимент по выделению полезного сигнала из коррелированного (сигнал + шум) с помощью метода адаптивной фильтрации, производится его оценка и возможность применения для предварительной обработки сигнала в акустических методах определения утечек в системе трубопроводов. Полученные результаты показали, что метод адаптивной фильтрации может быть использован в акустических методах определения утечек в системах трубопроводов.

Ключевые слова: адаптивная фильтрация, сигнал, шум, утечка, трубопровод

Для цитирования: Шульга Т.Э., Хмель А.В. Особенности использования адаптивной фильтрации для предварительной обработки сигнала // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 3. С. 26–34. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-3-26-34.

Scientific article

FEATURES OF USING ADAPTIVE FILTERING FOR SIGNAL PREPROCESSING

✉ Shulga Tatiana E.;

Khmel Anton V.

Saratov state technical university named after Yu.A. Gagarin, Saratov, Russia

✉ taiss@yandex.ru

Abstract. The work conducts an experiment to isolate a useful signal from a correlated one (signal + noise) using the adaptive filtering method, evaluates its effectiveness, and the possibility of its use for signal preprocessing in acoustic methods for determining leaks in a pipeline system. The results obtained showed that the adaptive filtration method can be used in acoustic methods for detecting leaks in pipeline systems.

Keywords: adaptive filtering, signal, noise, leakage, pipeline

For citation: Shulga T.E., Khmel A.V. Features of using adaptive filtering for signal preprocessing // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 3. P. 26–34. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-3-26-34.

Введение

В настоящее время углубление экологического кризиса на планете, когда столкновения природы с цивилизацией и ее законами все чаще заканчиваются не в пользу первой, когда из-за техногенной деятельности человека появляются новые проблемы

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

(глобальное потепление, уменьшение толщины озонового слоя, загрязнение водных ресурсов планеты, почв, вырубка тропических лесов и т.п.), вопрос минимизации негативного влияния на окружающую среду и научно обоснованных путей ее решения стоит как никогда остро [1]. Одной из многих причин ухудшения экологической ситуации являются отказы и аварии на различного рода трубопроводах [2].

В данном контексте решение проблемы безопасности и надежности эксплуатации трубопроводных систем является одним из приоритетных направлений для любого государства [3]. Задача заключается в обеспечении своевременного обнаружения аварийных ситуаций на ранних этапах и, как следствие, долговременной механической устойчивости, надежности и безопасности эксплуатации трубопроводных сетей.

Системы обнаружения утечек в трубопроводах с использованием акустических методов показали возможность применения данных методов в обнаружении небольших утечек и экономическую выгоду от использования этих методов. Однако основной проблемой при использовании этих систем является снижение точности результатов из-за внешних шумов.

Высокая зависимость традиционных методов фильтрации от априорного знания статистики сигнала и шума делает их неэффективными при работе с сигналами, статистика которых не может быть точно определена заранее. Методы адаптивной фильтрации предлагают лучшую альтернативу, поскольку априорное знание статистики менее критично, возможна обработка в реальном времени, а вычисления для этого подхода обходятся дешевле. Для оценки эффективности подавления внешних акустических шумов с помощью метода адаптивной фильтрации и возможности его применения для предварительной обработки сигнала в системах трубопроводов с помощью метода адаптивной был проведен эксперимент.

Акустические методы обнаружения утечек

На сегодняшний день разработан широкий спектр методов и инструментов, которые позволяют обнаружить даже незначительные утечки в системе трубопроводов. По причине экономической целесообразности, простоты применения и экологичности, наибольшее распространение получили акустические методы, которые находят свое применение в системах обнаружения утечек в различных трубопроводных системах [4]. В тоже время необходимо отметить, что для обозначенных методов, помимо достоинств, характерным является ряд недостатков, из числа которых можно выделить искажение точности полученных результатов при наличии посторонних шумов. Данные системы практически не применимы в городских условиях, а также в условиях повышенного внешнего шума (наличия поблизости автомагистралей, подстанций, неблагоприятных погодных условий и т.п.) [5].

Принимая во внимание тот факт, что чаще всего внешние шумы не носят постоянный характер [6, 7], использование обычных цифровых фильтров не дает возможности с необходимой степенью точности очистить полученный сигнал. Это объясняется тем, что в них используются постоянные параметры алгоритмов преобразования данных. Однако решить эту проблему могут методы адаптивной фильтрации, при применении которых система подстраивается под параметры входного сигнала [8].

Таким образом, с учетом вышеизложенного, перспективы использования адаптивных фильтров, которые обладают возможностями саморегулировки для обнаружения повреждений в трубопроводах, представляют на сегодняшний день важную научно-практическую задачу, которая и обуславливает выбор темы данной статьи.

Метод адаптивной фильтрации

Вопросы, связанные с описанием общих задач, которые могут быть решены с помощью адаптивных фильтров рассматриваются Григорьевым Л.Н., Джиганом В.И., Копловичем Е.А., Богдановым И.П., Barroso V., Ozeki K., Umeda K., Tanaka M., Kaneda Y., Makino S.

Над усовершенствованием алгоритмов адаптивного фильтра трудятся Гончаров А.А., Хребтов А.Ю., Ануфриев И.С., Смирнов А.Р., Rontogiannis A.A., Theodoridis S., Proudler I.K., McWhirter J.G., Shepherd T.J.

Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, ряд вопросов в данной предметной области остается открытым. Так, отдельного внимания заслуживают проблемы адаптивной фильтрации распределенных функциональных каналов для обработки сигналов на нелинейном графике. Также недостаточно проработанной является параллельная реализация итеративных и рекурсивных алгоритмов в процессе применения адаптивной фильтрации.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей использования адаптивной фильтрации для предварительной обработки сигнала и возможности его использования в акустических методах обнаружения утечек в системе трубопроводов.

Адаптивный фильтр – это фильтр с непостоянными коэффициентами, который подстраивает свои параметры для сходимости к решению заданной функции стоимости, используя входные данные из окружающей среды. Основная задача этих фильтров – оценка неизвестной сущности входного сигнала. Они используются для изменения формы определенных входных сигналов таким образом, чтобы на выходе фильтра получался результат, близкий к эталонному сигналу.

Процесс адаптивной фильтрации состоит из двух этапов.

1. Процесс фильтрации, в ходе которого в ответ на заданный входной сигнал формируется выходной сигнал с использованием обновленных коэффициентов фильтра, что впоследствии помогает настроить параметры фильтра в процессе адаптации.

2. Процесс адаптации – настройка параметров фильтра в зависимости от изменяющейся во времени среды. На этом этапе параметры фильтра (коэффициенты) обновляются таким образом, чтобы функция стоимости сходилась к решению путем нахождения наилучшего соответствия между желаемым сигналом и выходом фильтра.

Основные области применения адаптивных фильтров – шумоподавление, подавление акустического эха, усиление биомедицинских сигналов, эквализация каналов связи, активное управление шумами, идентификация систем, кодирование речи, многоканальное шумоподавление и адаптивные системы управления. В общем случае они работают для адаптации к изменяющимся условиям, в которых находится сигнал, а также к неизвестным или изменяющимся во времени шумам. Например, при эхоподавлении динамическая математическая модель канала, создающего эхо, формируется путем непрерывного мониторинга принимаемого сигнала. Эта модель используется для создания оценки пути эха, которая затем вычитается из сигнала для устранения эффекта эха из желаемого сигнала.

Различные виды алгоритмов адаптивных фильтров включают в себя:

- алгоритм наименьшего среднего квадрата (LMS);
- алгоритм переменного наименьшего среднего квадрата (VLMS);
- нормализованный алгоритм наименьшего квадрата (NLMS);
- рекурсивный алгоритм наименьших квадратов (RLS);
- алгоритм аффинной проекции (APA);
- алгоритм Калмана.

Среди этих алгоритмов LMS, VLMS, NLMS, RLS обычно считаются традиционными методами адаптивной фильтрации. Каждый из алгоритмов предполагает наличие трех ключевых шагов:

1. Вычисление выходного сигнала цифрового фильтра с набором коэффициентов фильтра.
2. Генерация предполагаемой ошибки путем сравнения выходного сигнала фильтра и полезного сигнала.
3. Корректировка коэффициентов фильтра на основе предполагаемой ошибки.

Таким образом, можно отметить, что адаптивные фильтры представляют собой самообучающиеся системы, которые принимают на вход минимум два сигнала и изменяют свои внутренние параметры в зависимости от внешнего воздействия по выбранному алгоритму, так как шум в сигнале не полностью соответствует его эталонному варианту [9]. Качество фильтрации напрямую зависит от качества входных сигналов [10, 11]. Как свидетельствует практика, фильтры данного типа хорошо подходят для систем шумоподавления звукового сигнала [12]. Система активного шумоподавления представлена на рис. 1.

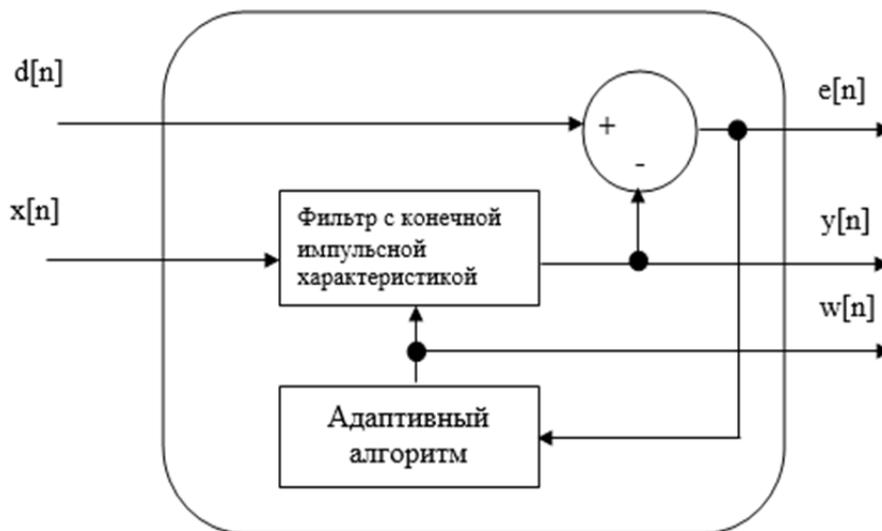


Рис. 1. Система активного шумоподавления
($d[n]$ – коррелированный сигнал, $x[n]$ – шум внешней среды, $e[n]$ – приближение чистого сигнала, $y[n]$ – приближение шума, $w[n]$ – вектор коэффициентов)

Эксперимент по определению возможности применения метода адаптивной фильтрации для подавления внешних акустических шумов

В рамках проводимого исследования был реализован эксперимент, целью которого являлось определение того, возможно ли использование метода адаптивной фильтрации внешних акустических шумов в условиях повышенного внешнего шума. В ходе эксперимента использовался эталонный источник шума движения жидкости в трубопроводе. Также было сделано 15 тестовых записей внешнего шума в городе. При этом в первом динамике (1) воспроизводился эталонный шум жидкости в трубопроводе, во втором динамике (2) воспроизводилась одна из записей внешнего шума в городской среде. Коррелированный сигнал записывался на внешний микрофон (3) (рис. 2) [13, 14].



Рис. 2. Система записи коррелированного шума

Отображение разницы эталонного сигнала к коррелированному представлено на рис. 3.

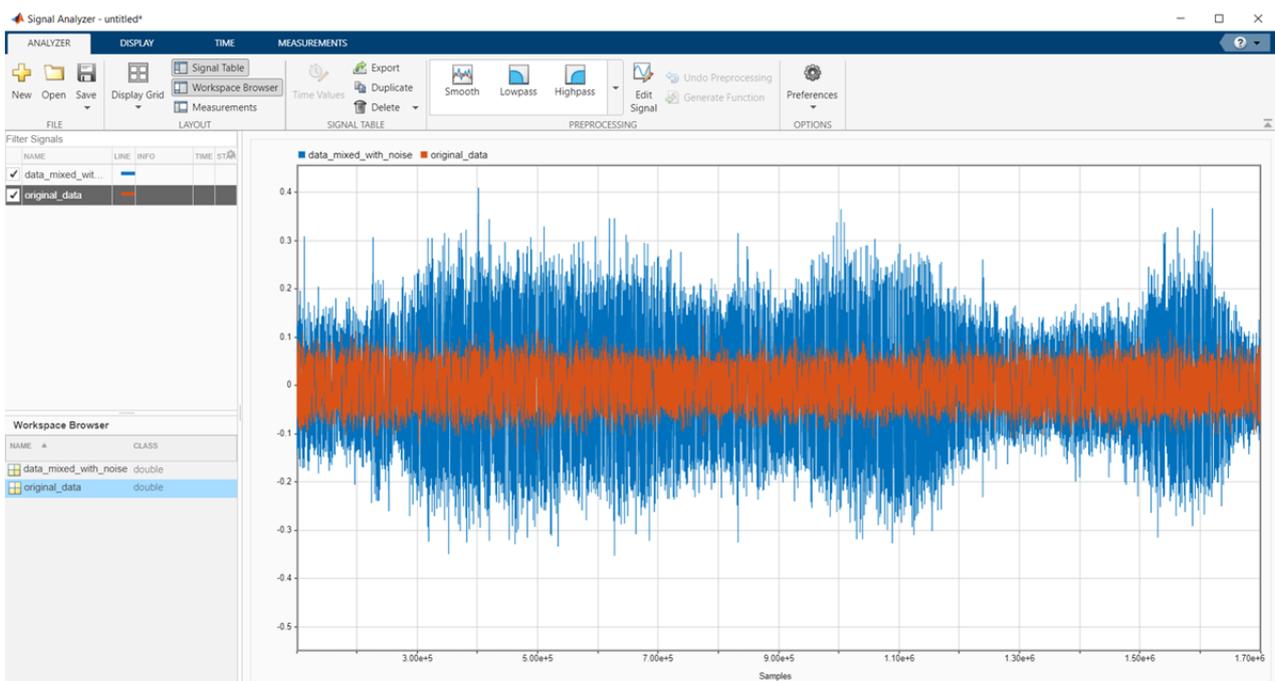


Рис. 3. Отображение сигналов: коррелированного (синий) и эталонного (коричневый) во временной области

На следующем этапе эксперимента использовалось программное обеспечение MATLAB для очистки коррелированного сигнала от внешнего шума, используя метод адаптивной фильтрации (рис. 4) [15].

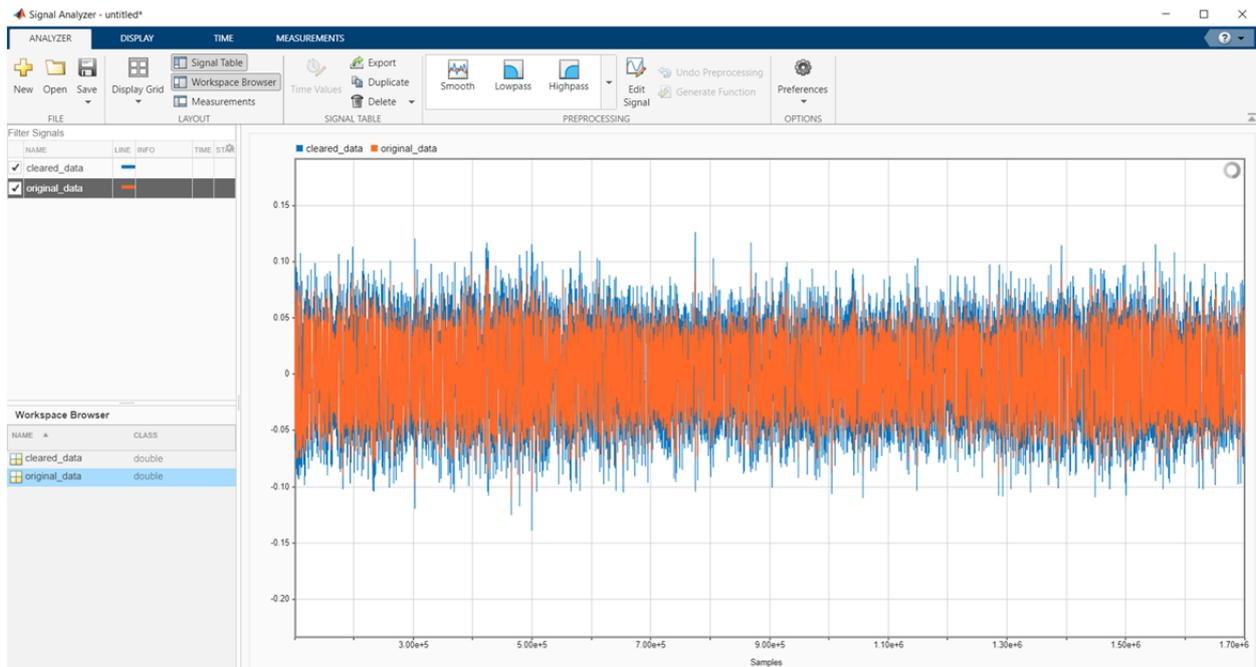


Рис. 4. Отображение сигналов: очищенного (синий) и эталонного (коричневый) во временной области

Для проверки эффективности метода адаптивной фильтрации было подготовлено 15 образцов различного акустического шума городской среды, после чего каждый образец был смешан с эталонным сигналом для возможности оценки степени очистки различных коррелированных сигналов. После каждой обработки сигнала было проведено сравнение эталонного образца и полученного результата (табл.).

Таблица

Результат сравнения спектров

№ эксперимента	Результат сравнения спектров очищенного сигнала к эталонному значению (%)
1	0,82
2	0,88
3	0,79
4	0,86
5	0,90
6	0,92
7	0,83
8	0,76
9	0,89
10	0,82
11	0,93
12	0,84
13	0,67
14	0,91
15	0,79

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. В сравнении с результатами исследования анализа методов адаптивной фильтрации слабых сигналов на фоне мощных помех [16], полученный средний результат

84 % является хорошим показателем. Адаптивные фильтры имеют коэффициенты, которые могут изменяться во времени. Они используются в тех случаях, когда реакция фильтра, обеспечивающая решение конкретной задачи, не известна заранее, или когда ожидается, что характер рабочей среды будет меняться с течением времени. Типичной целью системы является максимальное подавление нежелательных шумов при сохранении целевого сигнала в максимально возможной степени.

Заключение

Рассмотренный в статье метод адаптивной фильтрации внешних акустических шумов может найти свое применение в системе обнаружения утечек в системах трубопроводов. В ходе проведенного эксперимента установлено, что использование этого метода дает возможность удалить посторонние акустические шумы в среднем на 84 %. Это значение является близким показателем к эталонному сигналу и свидетельствует о широких перспективах использования в системах обнаружения утечек, основанных на акустических методах, в городских условиях, а также в местах с наличием повышенных внешних акустических шумов.

Список источников

1. Алехин М.Ю., Янченко А.Ю., Крымский В.В. О прогнозировании экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2012. № 2. С. 84–88. EDN PGEXBP.
2. Скрыпникова О.И., Щетка В.Ф. Сравнительный анализ методов оценки рисков аварий на объектах транспортировки нефтепродуктов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 4. С. 20–33. EDN MQNDXP.
3. Таранчук Е.А., Григорян А.Н. Теоретические и практические аспекты инновационного развития в Российской Федерации // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 2. С. 96–100. EDN WAZPCF.
4. Акимова Н.В. Дистанционное обнаружение течей в трубопроводах // Гео-Сибирь. 2009. Т. 2. С. 137–142. EDN PFSFIX.
5. Белый В.Л. Комбинированная система улучшения разборчивости аудио сигнала в агрессивной шумовой среде // Компьютерные системы и сети: материалы 50-й Науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск: Белорусский гос. ун-т информ. и радиоэлектрон., 2015. С. 190–192.
6. NOIZEUS: A noisy speech corpus for evaluation of speech enhancement algorithms. URL: <http://ecs.utdallas.edu/loizou/speech/noizeus/> (дата обращения: 17.10.2023).
7. Каламбет Ю.А., Козьмин Ю.П., Самохин А.С. Фильтрация шумов. Сравнительный анализ методов // Аналитика. 2017. № 5 (36). С. 88–101. DOI: 10.22184/2227-572X.2017.36.5.88.101. EDN ZIVVAJ.
8. Абитов Р.Н., Селюгин А.С., Низамова А.Х. Проблемы надежности работы водопроводных сетей населенных пунктов // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 5. С. 9–14. EDN WWSZZS.
9. Haykin S. Adaptive Filter Theory. Pearson Education India, 2002.
10. Regalia P. Adaptive IIR filtering in signal processing and control. Routledge, 2018. DOI: 10.1201/9781315136653.
11. Коробков А.А., Осипова О.С. Оценка качества фильтрации в зависимости от характеристик входного сигнала адаптивного фильтра // Новые технологии, материалы и оборудование авиакосмической отрасли: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2016. С. 548–552. EDN WMXKOH.
12. Andrew Ng. CS294A Lecture Notes. Sparse autoencoder. Stanford. URL: <http://web.stanford.edu/class/cs294a/sparseAutoencoder.pdf> (дата обращения: 23.10.2023).
13. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006.

14. Paulo S.R. *Adaptive Filtering*. Springer Nature Switzerland AG, 2020.

15. Сергиенко А.Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB // Экспонента Про. Математика в приложениях. 2003. № 1. С. 18–28. EDN TAXZCF.

16. Будылдина Н.В., Трухин М.П. Анализ методов адаптивной фильтрации слабых сигналов на фоне мощных помех // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сб. науч. трудов по материалам I Междунар. конф. / под общ. ред. А.Г. Тягунова. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. С. 153–154. EDN XWSMXL.

References

1. Alekhin M.Yu., Yanchenko A.Yu., Krymskij V.V. O prognozirovanii ekonomicheskogo ushcherba ot chrezvychajnyh situacij // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2012. № 2. S. 84–88. EDN PGEXBP.

2. Skrypnikova O.I., SHCHetka V.F. Sravnitel'nyj analiz metodov ocenki riskov avarij na ob"ektah transportirovki nefteproduktov // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2022. № 4. S. 20–33. EDN MQNDXP.

3. Taranchuk E.A., Grigoryan A.N. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty innovacionnogo razvitiya v Rossijskoj federacii // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2016. № 2. S. 96–100. EDN WAZPCF.

4. Akimova N.V. Distancionnoe obnaruzhenie techej v truboprovodah // Geo-Sibir'. 2009. T. 2. S. 137–142. EDN PFSFIX.

5. Belyj V.L. Kombinirovannaya sistema uluchsheniya razborchivosti audio signala v agressivnoj shumovoj srede // Komp'yuternye sistemy i seti: materialy 50-j Nauch. konf. aspirantov, magistrantov i studentov, Minsk: Belorusskij gos. un-t inform. i radioelektron., 2015. S. 190–192.

6. NOIZEUS: A noisy speech corpus for evaluation of speech enhancement algorithms. URL: <http://ecs.utdallas.edu/loizou/speech/noizeus/> (data obrashcheniya: 17.10.2023).

7. Kalambet Yu.A., Koz'min Yu.P., Samohin A.C. Fil'traciya шумов. Sravnitel'nyj analiz metodov // Analitika. 2017. № 5 (36). S. 88–101. DOI 10.22184/2227-572X.2017.36.5.88.101. EDN ZIVVAJ.

8. Abitov R.N., Selyugin A.S., Nizamova A.H. Problemy nadezhnosti raboty vodoprovodnyh setej naselennyh punktov // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2022. № 5. S. 9–14. EDN WWSZZS.

9. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. Pearson Education India, 2002.

10. Regalia P. *Adaptive IIR filtering in signal processing and control*. Routledge, 2018. DOI: 10.1201/9781315136653.

11. Korobkov A.A., Osipova O.S. Ocenka kachestva fil'tracii v zavisimosti ot harakteristik vhodnogo signala adaptivnogo fil'tra // Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie aviakosmicheskoy otrasli: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. 2016. С. 548–552. EDN WMXKOX.

12. Andrew Ng. CS294A Lecture Notes. Sparse autoencoder. Stanford. URL: <http://web.stanford.edu/class/cs294a/sparseAutoencoder.pdf> (data obrashcheniya: 23.10.2023).

13. Sergienko A.B. *Cifrovaya obrabotka signalov: uchebnik dlya vuzov*. 2-e izd. SPb.: Piter, 2006.

14. Paulo S.R. *Adaptive Filtering*. Springer Nature Switzerland AG, 2020.

15. Sergienko A.B. *Algoritmy adaptivnoj fil'tracii: osobennosti realizacii v MATLAB* // Ekspionenta Pro. Matematika v prilozheniyah. 2003. № 1. S. 18–28. EDN TAXZCF.

16. Budyl'dina N.V., Truhin M.P. Analiz metodov adaptivnoj fil'tracii slabyyh signalov na fone moshchnyyh pomekh // Komp'yuternyj analiz izobrazhenij: Intellektual'nye resheniya v promyshlennyh setyah (CAI-2016): sb. nauch. trudov po materialam I Mezhdunar. konf. / pod obshch. red. A.G. Tyagunova. Ekaterinburg: Izd-vo UMC UPI, 2016. S. 153–154. EDN XWSMXL.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 13.08.2024; одобрена после рецензирования: 27.08.2024;
принята к публикации: 29.08.2024

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 13.08.2024; approved after review: 27.08.2024;
accepted for publication: 29.08.2024

Сведения об авторах:

Шульга Татьяна Эриковна, профессор кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: taiss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5521-5960>, SPIN-код: 5869-4811

Хмель Антон Васильевич, ассистент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: a.khmel81@mail.ru, SPIN-код: 8855-9440

Information about the authors:

Shulga Tatiana E., professor of the department of Information and communication systems and software engineering Saratov state technical university named after Yu.A. Gagarin (410054, Saratov, Politechnicheskaya str., 77), doctor of physical and mathematical sciences, professor, e-mail: e-mail: taiss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5521-5960>, SPIN: 5869-4811

Khmel Anton V., assistant of the department of Information and communication systems and software engineering Saratov state technical university named after Yu.A. Gagarin (410054, Saratov, Politechnicheskaya str., 77), e-mail: a.khmel81@mail.ru, SPIN: 8855-9440