

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 629.3.066
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-63-77>
EDN FGTHOC



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Устройство вызова экстренных оперативных служб для обеспечения голосовой связи водителя двухколесного транспортного средства и оператора системы «ЭРА-ГЛОНАСС»

В.В. Никитин¹, С.У. Увайсов², Д.В. Басов^{2, @}

¹ ООО «ФИКОМ-ИТ», Москва, 129128 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: d_basov@mail.ru

• Поступила: 29.01.2025 • Доработана: 24.06.2025 • Принята к опубликованию: 09.10.2025

Резюме

Цели. Целью исследования является повышение безопасности дорожного движения за счет разработки устройства вызова экстренных оперативных служб для водителей двухколесных транспортных средств, как наиболее уязвимых участников дорожного движения, и улучшения их технической оснащенности.

Методы. В ходе исследования проанализированы характеристики канала передачи акустического сигнала и процессов, сопровождающих его распространение. При исследовании параметров голосовой связи применялись методы шумоподавления, эхоподавления и эхокомпенсации, а также алгоритмы преобразования акустической информации, реализованные в аппаратно-программной части устройства.

Результаты. В ходе проектирования устройства учтены особенности управления двухколесным транспортным средством, влияние внешних воздействующих факторов и климатических условий. Предложена реализация интерфейса взаимодействия водителя двухколесного транспортного средства с оператором системы «ЭРА-ГЛОНАСС», учитывающая специфику его использования. Приведены структурные схемы эхокомпенсатора и детектора двойного речевого сигнала с использованием адаптивного фильтра. Описана процедура автоматической регулировки усиления акустического сигнала речевого диапазона. Рассмотрены алгоритмы, реализующие эти процессы, и возможность их адаптации к задачам устройства вызова экстренных оперативных служб. Показаны результаты практической реализации опытного образца устройства: конструкция, его интеграция в приборную панель двухколесного транспортного средства. Приведены структурная схема тестового стенда, программное обеспечение для качественного анализа акустического сигнала, оценена эффективность предложенного решения.

Выводы. Результаты исследования по конструированию устройства вызова экстренных оперативных служб показали, что применение алгоритмов аналоговой и цифровой обработки речевого сигнала, реализуемых в кодеке и модеме устройства, позволит обеспечить качественный уровень голосовой связи водителя с оператором экстренных оперативных служб.

Ключевые слова: двухколесное транспортное средство, акустический сигнал, дуплексная голосовая связь, алгоритм эхокомпенсации, алгоритм шумоподавления, нормализованный алгоритм наименьших квадратов, цифровой сигнальный процессор, алгоритм LMS, алгоритм NLMS

Для цитирования: Никитин В.В., Увайсов С.У., Басов Д.В. Устройство вызова экстренных оперативных служб для обеспечения голосовой связи водителя двухколесного транспортного средства и оператора системы «ЭРА-ГЛОНАСС». *Russian Technological Journal.* 2025;13(6):63–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-63-77>, <https://www.elibrary.ru/FGTHOC>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

A device for calling emergency operational services to provide voice communication between the driver of a two-wheeled vehicle and the operator of the ERA-GLONASS system

Vasily V. Nikitin¹, Saygid U. Uvaysov², Dmitry V. Basov^{2, @}

¹ FICOM-IT, Moscow, 129128 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: d_basov@mail.ru

• Submitted: 29.01.2025 • Revised: 24.06.2025 • Accepted: 09.10.2025

Abstract

Objectives. The aim of the study is to improve road safety by developing an emergency call device for drivers of two-wheeled vehicles, as the most vulnerable road users, and improving their technical equipment.

Methods. In the course of the study, the characteristics of the acoustic signal transmission channel and the processes accompanying its propagation were analyzed. When studying the parameters of voice communication, noise reduction, echo cancellation and echo compensation methods were used, as well as algorithms for converting acoustic information implemented in the hardware and software of the device.

Results. The results of practical implementation are presented: the design of a prototype device, its integration into the dashboard of a two-wheeled vehicle. During the design of the device, the control features of a two-wheeled vehicle, the influence of external factors and climatic conditions were taken into account. An implementation of the interface of interaction between the driver of a two-wheeled vehicle and the operator of the ERA-GLONASS system is proposed, taking into account the specifics of its use. Structural schemes of an echo compensator and a dual speech signal detector using an adaptive filter are presented. The algorithms implementing these processes and the possibility of their adaptation to the tasks of the emergency call device are considered. The procedure for automatically adjusting the amplification of the acoustic signal of the speech range is described, an analytical description of the technical problem and the applied methods of digital processing are given. A structural diagram of the test stand, software for qualitative analysis of the acoustic signal, visualization of the test results of the prototype are presented, and the effectiveness of the proposed solution is evaluated.

Conclusions. The results of a study on the design of an emergency call device have shown that the use of analog and digital speech signal processing algorithms implemented in the device's codec and modem will ensure a high-quality level of voice communication between the driver and the emergency services operator.

Keywords: two-wheeled vehicle, acoustic signal, duplex voice communication, echo cancellation algorithm, noise reduction algorithm, normalized least squares algorithm, digital signal processor, LMS algorithm, NLMS

For citation: Nikitin V.V., Uvaysov S.U., Basov D.V. A device for calling emergency operational services to provide voice communication between the driver of a two-wheeled vehicle and the operator of the ERA-GLONASS system. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):63–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-63-77>, <https://www.elibrary.ru/FGTHOC>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности дорожного движения всегда являлось актуальной и важной задачей, острая и сложность которой не снижается в современных условиях развития дорожной сети и инфраструктуры, характеризующейся увеличением многообразия и численности транспортных средств (ТС), ежедневно передвигающихся по автотрассам. Важным аспектом обеспечения безопасности дорожного движения является понимание характера произошедшего дорожно-транспортного происшествия (ДТП), информации о количестве пострадавших, полученных травмах для наиболее эффективного оказания помощи. Дорожно-транспортные происшествия с участием двухколесных ТС являются наиболее тяжелыми, т.к. водитель данного ТС не защищен кузовом, в отличие от водителя автомобиля. Поэтому кроме подтверждения самого факта аварии с помощью автоматических алгоритмов, ценную информацию могут дать свидетели ДТП, а также, при возможности, непосредственные участники. Для этого двухколесные ТС необходимо оснащать устройствами вызова экстренных оперативных служб (УВЭОС) с возможностью двухсторонней голосовой связи с оператором.

Особенности человеко-технической системы (водитель и двухколесное ТС) накладывают определенные ограничения на исполнение УВЭОС. При его разработке необходимо учитывать значительно меньшие массогабаритные параметры ТС по сравнению с автомобилем, наличие шлема на водителе, который заглушает речь, а в случае ДТП не всегда есть возможность его снять, всепогодное исполнение, расстояние от динамика и микрофона говорящего, которое может изменяться в достаточно широких пределах, а также высокий уровень шума дорожной обстановки.

Для качественного голосового соединения с оператором экстренных служб необходимо обеспечить высокопроизводительную аналого-цифровую

обработку речевой информации (ГОСТ 34788-2021¹), погасить шумы, убрать эхо, обеспечить корректный уровень автоматической регулировки усиления микрофона и динамика в зависимости от окружающих условий (ГОСТ 33468-2015²).

Известно, что цифровая обработка вносит задержку в распространение сигнала, поэтому необходимо соблюдать баланс между качеством обработки и временем прохождения сигнала [1].

Современные алгоритмы обработки речевого сигнала, как правило, реализуются на основе цифрового сигнального процессора, модема сотовой связи. Для улучшения качества обработки сигнала и снижения задержки целесообразно отдельные вычисления перенести на другие части схемы, например, на кодек и микроконтроллер.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ДВУХСТОРОННЕЙ ГОЛОСОВОЙ СВЯЗИ

В УВЭОС для связи с оператором экстренных служб на стороне абонента используется способ дуплексной громкой связи. Для четкого понимания

¹ ГОСТ 34788-2021. Межгосударственный стандарт. Автомобильные транспортные средства. Системы вызова экстренных оперативных служб. Качество громкоговорящей связи. Технические требования и методы испытаний. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 20 с. [GOST 34788-2021. Interstate Standard. Motor vehicles. Call emergency services systems. Speakerphone quality. Technical requirements and test methods. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. 20 p. (in Russ.).]

² ГОСТ 33468-2015. Межгосударственный стандарт. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний устройства/системы вызова экстренных оперативных служб на соответствие требованиям к качеству громкоговорящей связи в кабине транспортного средства. М.: Стандартинформ, 2016. 74 с. [GOST 33468-2015. Interstate Standard. Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. In-vehicle emergency call device/system. General technical requirements. Moscow: Standartinform; 2016. 74 p. (in Russ.).]

речевой информации терминальное оборудование должно обеспечивать следующие характеристики [2]:

- 1) достаточный уровень превышения сигнала динамика над общим уровнем шума,
- 2) достаточный уровень превышения сигнала микрофона над общим уровнем шума,
- 3) широкий динамический диапазон микрофона, обеспечивающий стабильную работу в шумной обстановке дороги общего пользования,
- 4) низкие собственные внутриканальные шумы,
- 5) автоматическую регулировку усиления,
- 6) шумоподавление,
- 7) эхокомпенсацию,
- 8) добавление комфортного шума в канал связи.

Пункты 1–4 обеспечиваются схемотехническим решением, которое включает динамик необходимой мощности, усилитель звуковой частоты, чувствительный микрофон с широким динамическим диапазоном и собственным трактом усиления, а также полосовой фильтр, который обеспечивает пропускание только полезного речевого диапазона сигнала (300–3400 Гц) и фильтры, подавляющие узкополосные помехи (гармоники от электрооборудования, GSM³).

Пункты 5–8 обеспечиваются алгоритмами цифровой обработки речевого сигнала. В зависимости от конструктивного исполнения УВЭОС цифровой сигнальный процессор может быть установлен отдельно или входить в состав модема сотовой связи.

Конструкция устройства реализуется в виде печатного узла, разработанного с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

Реализация автоматической регулировки усиления на основе цифровой обработки сигналов является технически сложной задачей, поэтому в большинстве случаев этот метод представляет собой перенос алгоритмов аналоговой схемотехники на цифровой сигнал. Тем не менее, современные системы обработки речевого сигнала используют преимущества цифровой обработки сигналов в системах автоматической регулировки усиления благодаря расчетам на основе аналитического сигнала. Любой отсчет цифрового аналитического сигнала $x(n)$ представляет собой комплексное число:

$$x(n) = \operatorname{Re}\{x(n)\} + i\operatorname{Im}\{x(n)\},$$

где n – номер отсчета.

³ Global system for mobile communications – стандарт мобильной связи второго поколения. [Global System for Mobile Communication (GSM) is the second-generation mobile communication standard.]

Нормализованная форма цифрового сигнала имеет вид:

$$x_{\text{норм}}[n] = \frac{x(n)}{|x(n)|}. \quad (1)$$

Если сигнал представляет собой смесь гармонического колебания и шума либо он является суммой гармонических колебаний, то нормализация приведет к искажению сигнала. Поэтому для выравнивания сигнала в формуле (1) в знаменателе указывают не модуль отсчета, а усредненное значение огибающей сигнала. Усреднение огибающей сигнала можно произвести с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой, применяя усреднение не к самому сигналу, а к его модулю. Тогда формула нормализации примет следующий вид:

$$x_{\text{норм}}(n) = \frac{x(n)}{x_{\text{ср}}(n)},$$

где $x_{\text{ср}}(n)$ – усредненное значение модуля сигнала, полученное с помощью скользящего среднего:

$$\dot{x}_{\text{ср}}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |\dot{x}(n-k)|,$$

где N – длина окна усреднения, k – индекс суммирования.

При использовании этого метода для речевого сигнала необходимо учесть следующие особенности. В речевом сигнале присутствуют паузы между отдельными слогами и фразами. Оцифрованный звуковой сигнал всегда имеет шумы, состоящие из внутриканальных шумов, обусловленных электрической схемой, внешних шумов и шумов квантования. Эти шумы будут усиливаться в паузах до номинального уровня выходного сигнала. Для борьбы с этим эффектом применяют два способа. Первый – блокирование автоматической регулировки усиления в паузах с помощью детектора речевого сигнала. Второй – добавление к усредненной огибающей постоянной составляющей, значения параметров которой выше максимальных абсолютных значений шума в паузах речевого сигнала. В этом случае формула усреднения примет следующий вид:

$$x_{\text{норм}}(n) = \frac{x(n)}{x_{\text{ср}}(n) + L}.$$

Константа L подбирается опытным путем во время настройки системы под конкретные шумовые сценарии.

ШУМОПОДАВЛЕНИЕ

Речевой сигнал, принимаемый оператором системы «ЭРА-ГЛОНАСС», зашумлен. Так как двухколесное ТС не имеет закрытой кабины, окружающий шум может иметь значительную интенсивность, и его наличие может сильно исказить результаты анализа и распознавания речи. Для удаления шума используют различные методы шумоподавления. В данном случае возможно применять методы, работающие в реальном времени и вносящие минимальную задержку в обрабатываемый сигнал. Значительным усложнением процедуры шумоподавления является изменение громкости и характера шума (спектральных составляющих) с течением времени. Наибольшее распространение получили методы шумоподавления, основанные на предположении, что речевой сигнал и шум взаимно некоррелированы [3].

Пусть речевой сигнал $x(n)$ искажается аддитивным шумом $v(n)$. Тогда зашумленный сигнал $y(n)$ можно представить следующим образом:

$$y(n) = x(n) + v(n).$$

Общая задача шумоподавления заключается в восстановлении сигнала $\hat{x}(n)$, максимально близкого к исходному $x(n)$, из наблюдаемого зашумленного сигнала $y(n)$. Для этого разработаны адаптивные алгоритмы, основанные на оценке шума и его подавлении.

В случае разбиения сигнала на окна длительностью от 10 до 30 мс можно утверждать, что речевой сигнал и шум становятся стационарными, поэтому методы шумоподавления реализуются исходя из этого утверждения [4, 5]. В цифровых сигнальных процессорах современных модемов для оценки шума наиболее широко применяются алгоритмы Кохена – Бердуга MCRA (minima controlled recursive averaging или рекурсивное усреднение с контролем минимумов), квантильного оценивания и различных вариантов на их основе [6, 7]. Непосредственно для шумоподавления используется одна из современных модификаций винеровской фильтрации.

ЭХОКОМПЕНСАЦИЯ

В телефонии различают два типа эха:

- акустическое, обусловленное отражением звуковых волн и акустической связью между громкоговорителем и микрофоном;
- электрическое, возникающее из-за проблем в согласовании линий (в настоящее время практически не встречается).

В случае с УВЭОС необходимо подавить акустическое эхо, возникающее у оператора связи и обусловленное акустической связью между микрофоном и динамиком блока интерфейса пользователя (БИП), а также отражением акустических волн от ближайших предметов.

Алгоритмы эхокомпенсации разделяются на алгоритмы во временной и частотной областях [8, 9]. Для низкочастотных сигналов, к которым относятся сигналы в телефонной линии, наиболее эффективными с точки зрения использования вычислительных ресурсов показали себя алгоритмы во временной области.

Адаптивный алгоритм эхокомпенсации включает следующие шаги [6]:

1. Моделирование эхо-тракта.

Формируется адаптивная модель, описывающая истинные характеристики акустического тракта θ . Модель представляет собой фильтр с вектором регулируемых коэффициентов $\hat{\theta}$.

2. Оценка эхо-сигнала.

На каждом шаге n вычисляется оценка эха $\hat{z}(n)$ путем свертки вектора x опорного сигнала с вектором $\hat{\theta}$ коэффициентов модели:

$$\hat{z}(n) = \hat{\theta}^T \cdot x,$$

где T – знак транспонирования, а размерность векторов определяется длиной цифрового фильтра.

3. Адаптация параметров модели.

Параметры модели $\hat{\theta}$ непрерывно корректируются на основе анализа сигнала ошибки $e(n)$, который отражает разницу между реальным эхо-сигналом $z(n)$ и его оценкой $\hat{z}(n)$. Процесс адаптации минимизирует эту ошибку, используя алгоритм подстройки коэффициентов.

4. Компенсация эхо-сигнала.

Окончательный выходной эхокомпенсированный сигнал формируется путем вычитания оценки эха $\hat{z}(n)$ из общего сигнала микрофона $m(n)$:

$$y(n) = m(n) - \hat{z}(n),$$

где $m(n) = \omega(n) + z(n)$, $\omega(n)$ – полезный сигнал ближнего абонента, $z(n)$ – реальный эхо-сигнал.

Схема работы эхокомпенсатора показана на рис. 1. Сигнал дальнего конца (far-end) соответствует голосу оператора, а сигнал ближнего конца (near-end) – голосу пользователя, передаваемому через систему громкой связи.

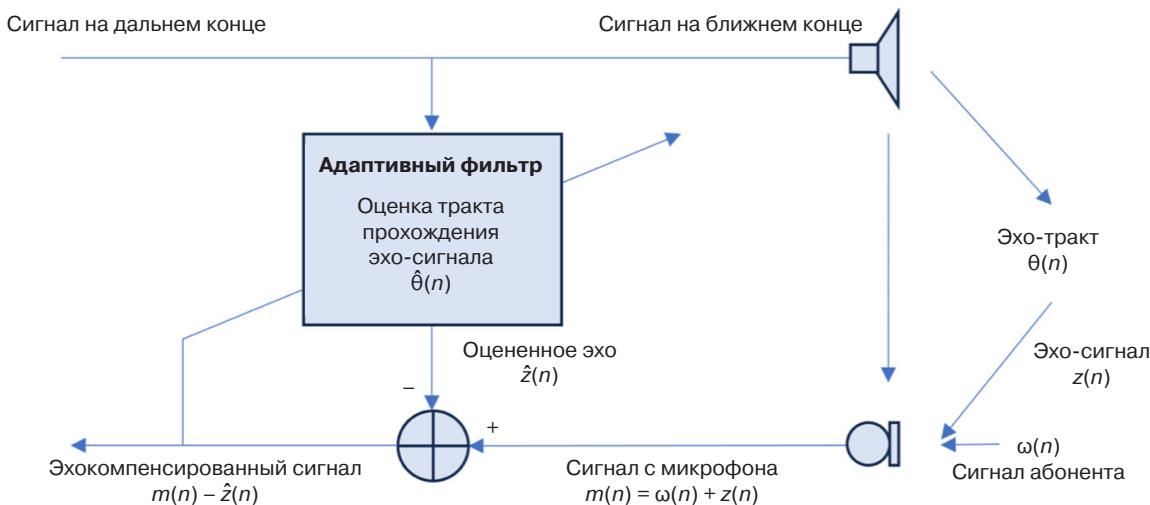


Рис. 1. Схема эхокомпенсатора с использованием адаптивного фильтра

АЛГОРИТМ НАИМЕНЬШИХ СРЕДНИХ КВАДРАТОВ

Алгоритм Уидроу – Хоффа [10], известный как алгоритм наименьших средних квадратов (least mean-squares, LMS), по сей день является одним из лучших алгоритмов адаптивной фильтрации. Он широко используется при реализации систем эхоподавления. Алгоритм корректирует коэффициенты $\hat{\theta}$ фильтра, чтобы уменьшить среднеквадратичную ошибку между желаемым (целевым) сигналом и выходным сигналом фильтра. Этот алгоритм получил широкое распространение, в т.ч. из-за его вычислительной простоты.

НОРМАЛИЗОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НАИМЕНЬШИХ СРЕДНИХ КВАДРАТОВ

Нормализованный алгоритм наименьших средних квадратов (normalized least mean squares, NLMS) [11] выводится из алгоритма LMS. Если мощность входного сигнала адаптивного фильтра изменяется со временем, то размер шага между двумя соседними коэффициентами фильтра также изменится и повлияет на скорость сходимости. Из-за низкого уровня сигнала скорость сходимости замедлится, при высоком уровне сигнала скорость сходимости увеличится и даст ошибку. Для решения этой проблемы необходимо сделать зависимым размер шага от уровня входного сигнала. Такой размер шага будет называться нормализованным.

ДЕТЕКТОР ДВОЙНОГО РАЗГОВОРА

При акустическом подавлении эха ключевой проблемой становится устранение эффекта двойного разговора (double-talk, dt) [12], который возникает, когда

одновременно активны речевые сигналы на дальнем конце и ближнем конце. В этом случае сигнал удаленного абонента искажается из-за наложения локальной речи. Для решения данной проблемы в систему интегрируют детектор двойного разговора, задача которого заключается в том, чтобы приостановить этап адаптации во время работы алгоритма фильтрации, когда на ближнем конце присутствует речевой сигнал, и, тем самым, избежать расхождения в адаптивном алгоритме.

Реализация детектора двойного разговора (double-talk detector, DTD) совместно с адаптивным фильтром представлена на рис. 2. В данной схеме DTD анализирует 3 ключевых параметра:

- 1) сигнал дальнего конца $x(n)$ – опорный сигнал эха;
- 2) сигнал ближнего конца $m(n)$ – смесь полезного сигнала и эха;
- 3) сигнал ошибки $e(n) = m(n) - \hat{z}(n)$, где $\hat{z}(n)$ – оценка эха, сформированная адаптивным фильтром.

Сигнал ошибки $e(n)$, по сути, представляет собой эхокомпенсированный сигнал, получаемый после вычитания смоделированного эха из входного сигнала микрофона. Этот сигнал возникает в двух основных случаях:

- когда адаптивный фильтр еще не достиг сходимости (в начальный период работы);
- при изменении акустических характеристик помещения (например, перемещении микрофона)

Детектор DTD оценивает уровень сигналов $x(n)$, $m(n)$ и $e(n)$, затем анализирует соотношение сигнал/эхо и принимает решение об обновлении коэффициентов фильтра, разрешает адаптацию при отсутствии двойного разговора или блокирует обновление при обнаружении одновременной речи [13].

Существует несколько алгоритмов DTD, но наиболее распространенные из них алгоритм Гейгеля

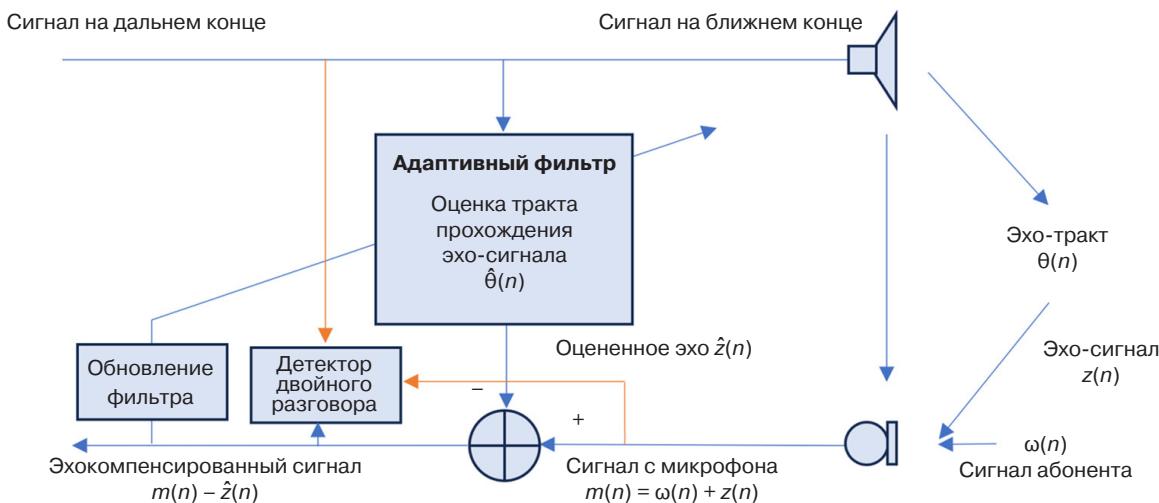


Рис. 2. Схема включения детектора двойного разговора совместно с адаптивным фильтром

и алгоритмы на основе вычисления взаимной корреляции (Benesty и нормализованной взаимной корреляции (normalized cross-correlation, NCC)) [14].

Суть алгоритма Гейгеля заключается в сравнении мощностей двух сигналов: принимаемого сигнала микрофона (содержащего возможное эхо и/или речь ближнего абонента) и опорного сигнала дальнего конца (передаваемого на громкоговоритель). Когда в микрофоне присутствует только эхо-сигнал (без речи ближнего абонента), его мощность оказывается пропорционально меньше мощности опорного сигнала из-за затухания в акустическом тракте. Если же к эху добавляется речь ближнего абонента, общая мощность сигнала микрофона существенно возрастает. Это различие позволяет алгоритму надежно детектировать факт двойного разговора.

В отличие от энергетического подхода Гейгеля, алгоритм Benesty использует нормированный коэффициент взаимной корреляции между сигналом дальнего конца (опорным сигналом эха) и сигналом микрофона (смесью эха и речи ближнего абонента). Высокое значение корреляции указывает на доминирование эха в сигнале микрофона, тогда как снижение корреляции свидетельствует о появлении речи ближнего абонента. Такой подход обеспечивает более точное детектирование по сравнению с простым сравнением мощностей.

Алгоритм нормализованной взаимной корреляции вычисляет статистику принятия решения, анализируя соотношение между сигналом микрофона и сигналом ошибки (разностью между фактическим и оцененным эхо-сигналом). В основе лежит оценка дисперсии сигнала ближнего абонента (полезного сигнала) и взаимной корреляции между сигналом ошибки и сигналом микрофона. Нормализация по мощности сигналов делает алгоритм устойчивым

к изменениям уровня сигналов, что особенно важно в условиях переменного акустического окружения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Для моделирования и тестирования алгоритмов был разработан опытный образец БИП. Внешний вид устройства представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид проектируемого устройства

Устройство располагается на руле двухколесного ТС в зоне доступности водителя. Оно содержит микрофон, динамик, кнопку «SOS» вызова экстренных оперативных служб, индикатор состояния устройства и крышку, предотвращающую случайное нажатие. Способ размещения устройства и составные части БИП показаны на рис. 4.



Рис. 4. Размещение УВЭОС на двухколесном ТС

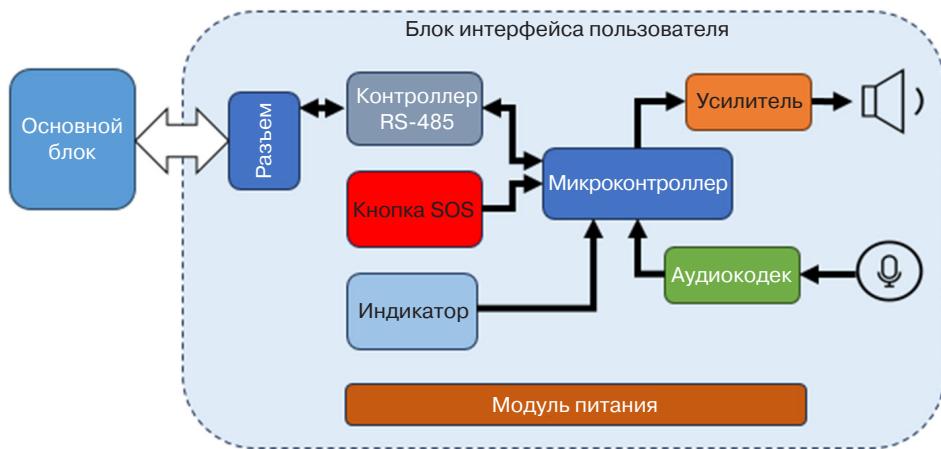


Рис. 5. Функциональная схема БИП

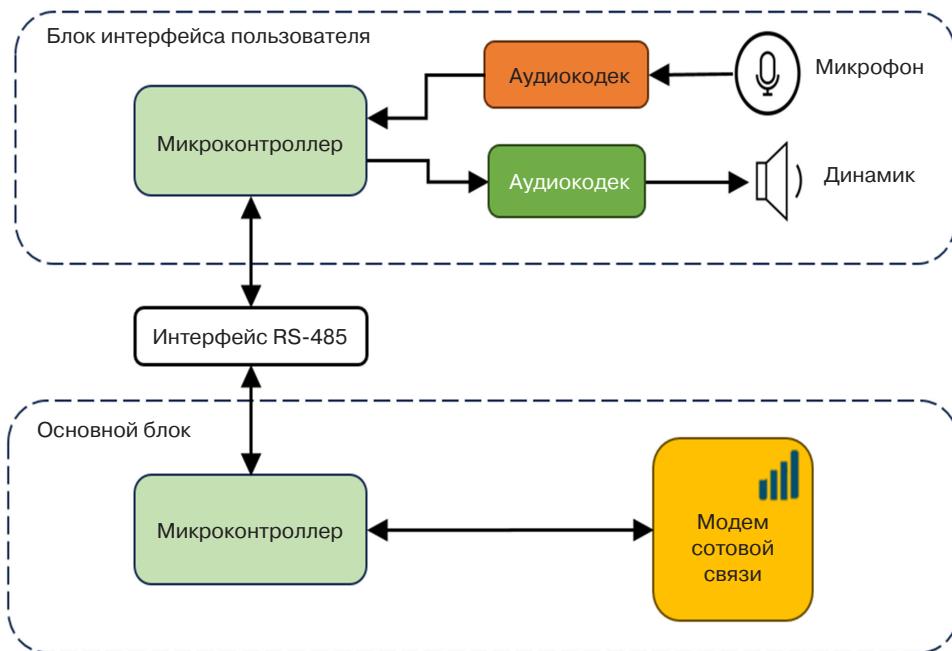


Рис. 6. Схема тракта прохождения акустического сигнала в БИП

Поскольку динамик и микрофон находятся в одном корпусе в непосредственной близости друг от друга, то эффект акустического эха будет выражен очень сильно [15]. Для его подавления предложено применить цифровой сигнальный процессор модема, а для вспомогательных вычислений – микроконтроллер основного блока. Функциональная схема БИП показана на рис. 5.

Тракт прохождения акустического речевого сигнала в БИП показан на рис. 6. В кодеке, расположеннем в БИП, осуществляется преобразование

аналогового сигнала микрофона/динамика в цифровой, здесь же реализуется обратная процедура (интерфейс I²S⁴). Далее по интерфейсу RS-485⁵ сигнал поступает в основной блок, главная задача которого – обеспечение помехоустойчивости. Затем в микроконтроллере основного блока сигнал передается на интерфейс I²S и подается в модем. Поскольку интерфейс I²S поддерживает передачу только на короткие расстояния, использование интерфейса RS-485 в данном случае весьма оправдано [16].

⁴ I²S (inter-integrated circuit sound) – стандарт интерфейса электрической последовательной шины для соединения цифровых аудиоустройств. [I²S (Inter-Integrated Circuit Sound) is a standardized electrical serial bus interface for connecting digital audio devices.]

⁵ Recommended standard 485 – стандарт физического уровня для асинхронного интерфейса. [Recommended Standard 485 is the physical layer standard for an asynchronous interface.]



Рис. 7. Структурная схема тестового стенда УВЭОС

Основной блок УВЭОС имеет в составе модем Telit LE910 (Telit Cinterion, Италия) и кодек NAU8810 (Nuvoton Technology Corporation, Тайвань). Модем реализован на базе чипсета Qualcomm и имеет встроенный цифровой сигнальный процессор этого же производителя. Настройка параметров цифрового процессора осуществляется посредством пользовательского интерфейса программного обеспечения (ПО) *Qualcomm QACT* (Qualcomm, США).

ТЕСТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА

Структурная схема тестового стенда для настройки и анализа качества голосовой связи представлена на рис. 7. Устройство вызова экстренных оперативных служб, установленное на двухколесном ТС, соединяется с радиокоммуникационным тестером посредством сотовой связи. Звуковой вход тестера подключается к компьютеру с установленным ПО *HEAD Analyzer ACQUA* (HEAD Acoustics GmbH, Германия), в составе которого имеется набор звуковых тестов для проверки качественных показателей речевого сигнала. Алгоритм работы ПО позволяет тестировать качество связи, как со стороны оператора, так и со стороны водителя ТС.

При тестировании на стороне оператора калиброванные звуковые сигналы передаются в радиокоммуникационный тестер, затем – на модем УВЭОС и по речевому тракту – в динамик БИП. Далее они принимаются искусственным слуховым аппаратом манекена и оцениваются с помощью ПО *HEAD Analyzer ACQUA*.

При тестировании на стороне водителя ТС калиброванные звуковые сигналы из искусственного речевого аппарата манекена через микрофон БИП

передаются по речевому тракту УВЭОС в модем, затем через радиокоммуникационный тестер – в ПО для соответствующего анализа.

Рабочее место управления шумовыми сценариями служит для имитации уличного окружающего шума в условиях заглушенной камеры, в которой проводятся испытания.

В результате настроек цифрового сигнального процессора и алгоритмов микроконтроллера удалось добиться показателей речевой связи оператора экстренных оперативных служб и водителя ТС, удовлетворяющих ГОСТ 33464-2015⁶. Методы этого стандарта ориентированы на испытания в салоне автомобиля, но их можно использовать и для двухколесных ТС. Тесты наиболее важных показателей приведены ниже.

ЗАТУХАНИЕ В КАНАЛЕ ПЕРЕДАЧИ В РЕЖИМЕ ДВУСТОРОННЕГО РАЗГОВОРА

При одновременном разговоре абонентов максимально допустимое затухание $A_{H,S,dB}$ вносимое УВЭОС в канал передачи S, нормируется ГОСТ 33464-2015 и проверяется методами, описанными в ГОСТ 33468-2015 п. 7.9.2. Затухание зависит от типа производительности (класса качества) УВЭОС для дуплексной связи и должно соответствовать значению, приведенному в таблице.

⁶ ГОСТ 33464-2015. Межгосударственный стандарт. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Устройство/система вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2017. 86 с. [GOST 33464-2015. Interstate standard. Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. In-vehicle emergency call device/system. General technical requirements. Moscow: Standartinform; 2017. 86 p. (in Russ.).]

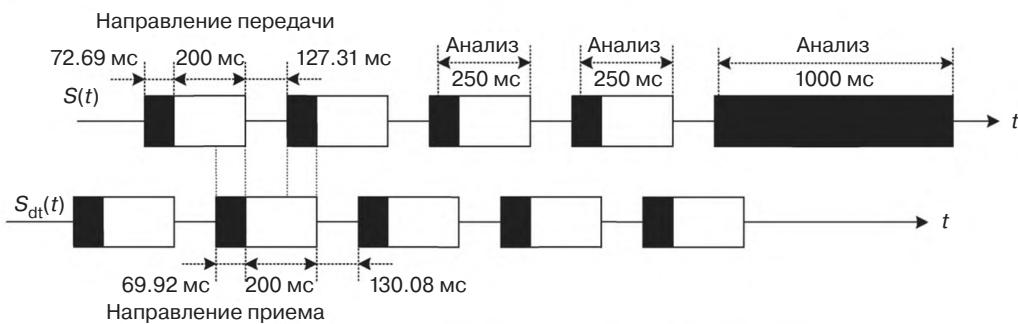


Рис. 8. Тестовые сигналы для определения диапазона затухания в направлении передачи во время одновременного разговора ($S(t)$ – сигнал в направлении передачи, $S_{dt}(t)$ – сигнал в направлении приема)

Таблица. Параметры типа производительности УВЭОС для дуплексной связи

Параметр	Класс качества				
	1	2a	2b	2c	3
	Полная дуплексная связь	Частичная дуплексная связь			Полудуплексная связь
$A_{H, S, dt}$, дБ	≤3	≤6	≤9	≤12	>12

Требования должны выполняться как при номинальных уровнях сигналов приема и передачи, так и при дисбалансе этих уровней. Необходимо проверить две комбинации уровней сигналов:

- номинальные уровни сигналов на прием и передачу;
- уровень сигнала на передачу выше на 6 дБ, уровень сигнала на прием ниже на 6 дБ.

При тестировании используются две последовательности некоррелированных CSS (composite source signal – составной сигнал) сигналов, которые подаются в канал передачи и приема одновременно с частичным перекрытием во времени для создания эффекта одновременного разговора.

Начальный участок каждого периода CSS-сигнала (вокализованный звук, показан на рис. 8 черным цветом), идущего в одном направлении, пересекается с конечным участком каждого периода CSS-сигнала (псевдошум, показан белым цветом), идущего в противоположном направлении. Анализ проводится в моменты активного сигнала в направлении передачи.

Перед началом тестирования эхокомпенсатор должен быть настроен на максимальное эхоподавление с помощью тренировочной последовательности в канале приема, состоящей из женских и мужских голосовых записей длительностью 10 с каждая.

Уровень сигнала в канале передачи оценивается во временной области с постоянной времени интегрирования 5 мс. Строится зависимость уровня сигнала

от времени. Ослабление сигнала в канале передачи оценивается между уровнем сигнала во время одновременного двухстороннего разговора и уровнем сигнала во время одностороннего разговора (в паузах сигнала приема) при условии полной активации канала передачи. Анализ проводится для всей тестовой последовательности, начиная со второго периода CSS-сигнала.

Результаты измерения приведены на рис. 9 и 10. Рисунок 9 представляет собой наложенные на одну временную шкалу записи ближнего абонента в тишине и в присутствии сигнала дальнего абонента (через динамик системы громкоговорящей связи). На рис. 10 уровень громкости имеет линейный масштаб, значения приведены в вольтах, потому что записаны после ввода измерительной системы. Это рисунок показывает отношение сигналов на рис. 9, т.к. сигнал ближнего абонента в присутствии дальнего абонента всегда будет тише сигнала ближнего абонента в тишине. Значения кривой имеют отрицательные знаки.

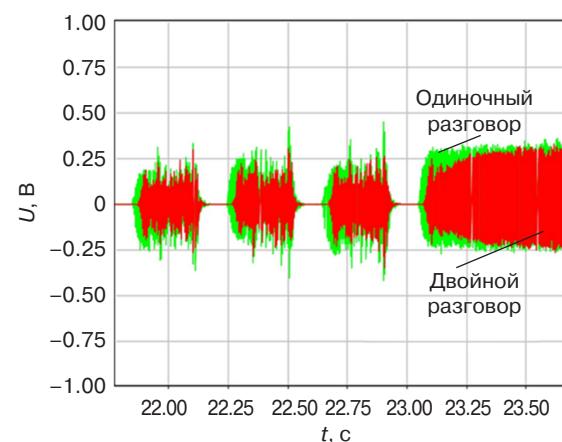


Рис. 9. Зависимость уровня сигнала от времени в направлении передачи для одностороннего разговора и двустороннего разговора в присутствии сигнала дальнего абонента, проинтегрированные с постоянной времени интегрирования 5 мс

В качестве финальной оценки высчитывается значение максимально допустимого затухания:

$$A_{H,S,dt} = \frac{5}{t_{end} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{end}} |L_{dB}(t)| dt,$$

где $L_{dB}(t)$ – мгновенное значение затухания в момент времени t (в дБ), $(t_{end} - t_{start})$ – длительность временного интервала, 5 мс – шаг дискретизации.

Затухание равно среднему значению площади под кривой, полученной в результате интегрирования сигнала с постоянной времени 5 мс, и рассчитывается как отношение суммарной площади по всем интервалам к количеству отсчетов интегрирования (рис. 10). При этом сама кривая уровня уже интегрирована с постоянной времени 5 мс, что уменьшает вероятность искажения результатов за счет случайных кратковременных выбросов.

Полученные результаты, проанализированные с помощью ПО *HEAD Analyzer ACQUA*, соответствуют классу 2а, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 33464-2015.

Аналогичные испытания были проведены для случая, когда «уровень сигнала на передачу выше на 6 дБ, уровень сигнала на прием ниже на 6 дБ», т.е. когда громкость звука ближнего абонента на 6 дБ больше, а громкость звука дальнего абонента (сигнал дальнего абонента воспроизводится через динамик устройства) на 6 дБ меньше. При номинальных уровнях громкости измеренные характеристики оставались в пределах допустимых значений.

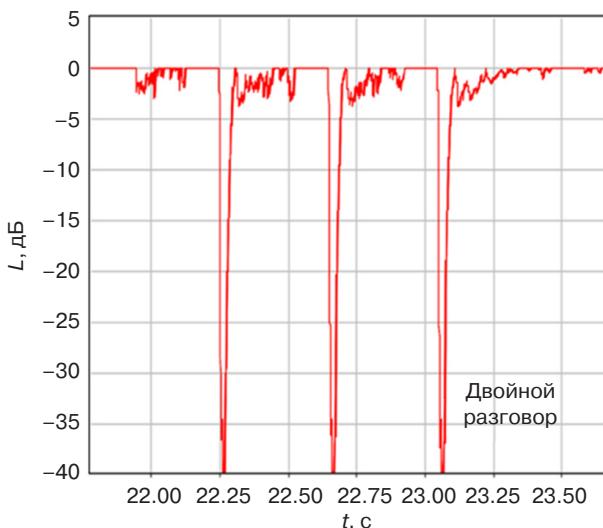


Рис. 10. Зависимости отношения сигнала в направлении передачи для ситуации двустороннего разговора к сигналу в направлении передачи для ситуации одностороннего разговора от времени, проинтегрированные с постоянной времени 5 мс

СТАБИЛЬНОСТЬ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭХО-СИГНАЛОВ ОТ ВРЕМЕНИ

При подаче в канал приема УВЭОС комбинированного тестового сигнала и тестового сигнала искусственного голоса номинального уровня ослабление эхо-сигналов в канале передачи УВЭОС в течение длительного времени измерения не должно снижаться более, чем на 6 дБ от своего максимального значения (согласно требованиям ГОСТ 33464-2015 и методу проверки, изложенному в ГОСТ 33468-2015, п. 7.7.3).

Первый тестовый сигнал представляет собой периодически повторяемый комбинированный сигнал CSS. Проверка проводится для двух средних уровней сигнала –5 дБм0 и –25 дБм0.

Второй тестовый сигнал представляет собой одну последовательность для мужского голоса и одну последовательность для женского голоса длительностью 10 с со средним уровнем –16 дБм0. Анализ проводится на протяжении всего сигнала.

Зависимость степени подавления эхо-сигналов от времени строится в виде графика. Постоянная времени интегрирования при оценке уровней исходного сигнала и эхо-сигнала составляет 35 мс, что позволяет сгладить случайные флюктуации и минимизировать влияние кратковременных помех на результаты измерений.

Для сигнала CSS график представляет собой кривую отношения уровня записанного сигнала в направлении передачи к уровню воспроизведенного сигнала в направлении приема. Важно отметить, что один из сигналов отношения должен быть смешен во времени из-за физической и программной задержек обработки и распространения акустических сигналов. К ним относятся задержки времени распространения звукового сигнала T_{SSND} (S – signal (сигнал), SND – sound (звук)), задержки, связанные с программной обработкой звукового сигнала S в речевом кодеке T_{SCOD} (индексы: S – signal (сигнал), COD – codec (кодек)), и задержки, связанные с программной обработкой сигнала при передаче по сети системы связи T_{SYS} (SYS – system (система)). Полная задержка распространения сигнала в канале передачи $T_{SSUM} = T_{SSND} + T_{SCOD} + T_{SYS}$ должна быть измерена как время распространения сигнала от точки измерения уровня звукового давления, расположенной на расстоянии 25 мм перед губами человека или излучающим кольцом устройства «искусственный рот» (mouth reference point, MRP) – акустический речевой сигнал до эталонной точки подключения и измерения электрических уровней сигналов в каналах приема и передачи симулятора системы мобильной связи (point of interface, POI) – электрический речевой сигнал после декодирования, как показано на рис. 11.

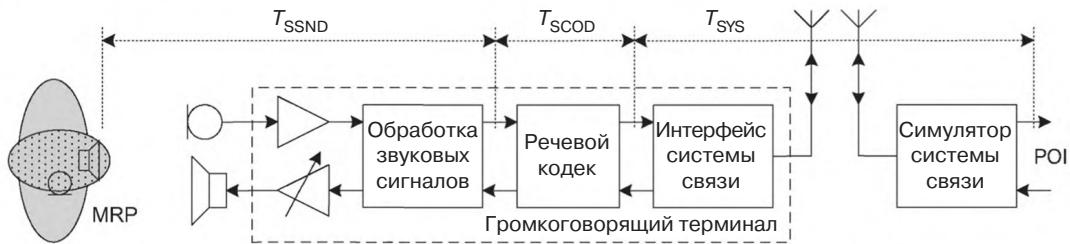


Рис. 11. Задержки обработки и распространения акустических сигналов

Для сигнала CSS зависимость степени подавления эхосигналов от времени представлена на рис. 12. Ввиду того, что к большому воспроизведимому сигналу дальнего абонента относится малый по уровню эхо-сигнал, общий уровень кривой очень малый. С точки зрения стабильности подавления эхосигналов от времени система считается стабильной, если разница между минимальным и максимальным значениями за время оценки не превысит 6 дБ. Стоит отметить, что оценка проводится только на восьми участках CSS-сигнала, исключая паузы, поэтому вид измерительной маски имеет зубчатый характер. По оценке ПО *HEAD Analyzer ACQUA* этот тест стабильности ослабления эхо-сигналов от времени пройден.

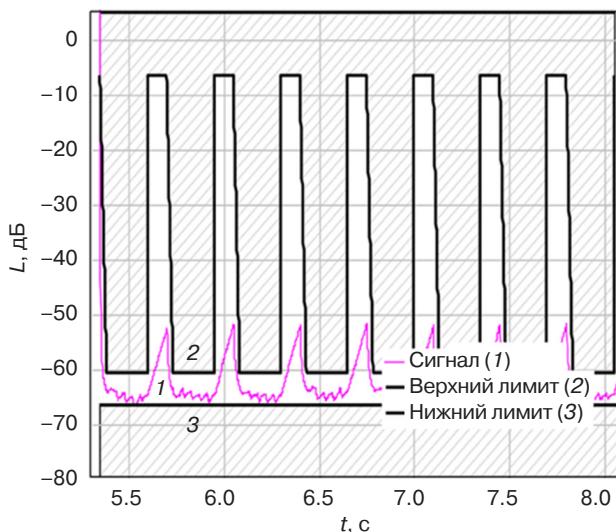


Рис. 12. Зависимость степени подавления эхосигналов CSS от времени с постоянной времени интегрирования 35 мс

Для сигнала искусственного голоса зависимость уровня эхосигналов от времени представлена на рис. 13. Сигнал искусственного голоса не сравнивается с воспроизводимым сигналом дальнего абонента, а оценивается стабильность сигнала передачи (эхо-сигнал – кривая 1) при воспроизведении сигналов искусственного голоса, мужского и женского (кривая 2), на стороне дальнего абонента. Система считается стабильной, если разница между

минимальным и максимальным значениями за время оценки не превышает 6 дБ.

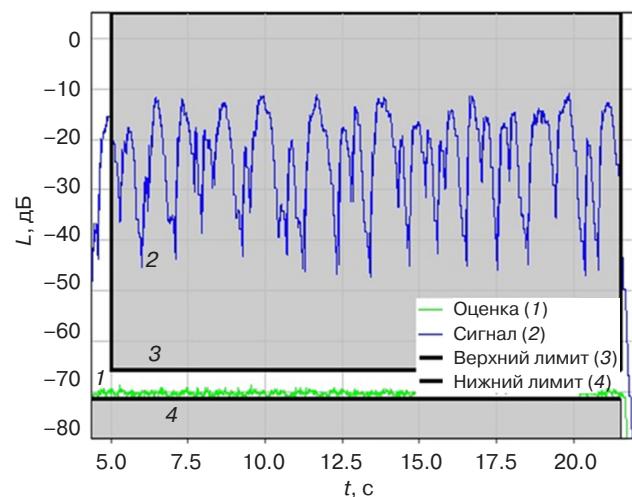


Рис. 13. Зависимость уровня эхосигналов искусственного голоса от времени с постоянной времени интегрирования 35 мс

РАБОТА КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ В АКУСТИЧЕСКИХ ШУМАХ

Для речевого сигнала ближнего абонента ТС в условиях фоновых акустических шумов отношение сигнал/шум на выходе канала передачи должно быть не ниже 6 дБ. Рекомендуемое значение отношения сигнал/шум – 12 дБ (требования ГОСТ 33464-2015, методика ГОСТ 33468-2015, п. 7.10.1).

Фоновые акустические шумы вокруг двухколесного ТС воспроизводились для обычной и наихудшей шумовых ситуаций.

При испытании в шумах с уровнем более 50 дБ(А) выходной уровень речевых сигналов должен быть повышен на 3 дБ для каждого 10 дБ прироста уровня шума, усредненного за длительное время. Это отражает эффект, когда человек в условиях окружающего шума повышает громкость своего голоса. Максимальное приращение составляет 8 дБ.

Входной акустический тестовый сигнал в виде искусственного голоса подавался через

искусственный рот манекена. Использовалась одна последовательность для мужского голоса и одна последовательность для женского голоса с паузами.

Анализируемый сигнал снимался с электрического выхода речевого кодека радиокоммуникационного тестера. Постоянная времени интегрирования при оценке уровней сигнала и шума составляла 35 мс. После расчета огибающей уровня сигнала и шума паузы оценивалось отношение сигнал/шум в канале передачи.

Результатом измерения является график огибающей уровня сигнала и шума паузы в канале передачи. Для активных участков речи проводится интегральная оценка:

$$S_s = \int_{t_{s_{\text{start}}}^{t_{s_{\text{end}}}}} L_{\text{dB}}(t) dt,$$

где $L_{\text{dB}}(t)$ – уровень сигнала в децибелах, $t_{s_{\text{start}}}$, $t_{s_{\text{end}}}$ – временные границы речевого сегмента.

Она равна площади под кривой на рис. 14, соответствующей всем активным участкам речи.

Это значение относится к значению оценки:

$$S_n = \int_{t_{n_{\text{start}}}^{t_{n_{\text{end}}}}} L_{\text{dB}}(t) dt,$$

где $t_{n_{\text{start}}}$, $t_{n_{\text{end}}}$ – временные границы шума речевой паузы. Значение оценки равно площади под кривой на рис. 14, соответствующей всем шумовым участкам. Обе оценки проводятся с учетом постоянной времени интегрирования 35 мс, чтобы исключить случайные изменения сигнала. Работа канала передачи в акустических шумах считается удовлетворительной, если отношение интегральных оценок превышает 6 дБ. На практике это значение соответствует слабо различимому на слух сигналу, особенно при работе в стандарте GSM с полосой акустических частот 300–3400 Гц, поэтому рекомендуется достигать уровней отношения сигнал/шум в 12 дБ. Также логично, что для наихудшей шумовой ситуации оценка будет меньше, ввиду большего уровня фонового шума, что накладывает дополнительные требования к используемой системе.

Канал передачи данных УВЭОС тестировался при различных шумовых сценариях, которые генерируются на основе записей шума окружающей среды. Для теста была взята запись уличного шума громкостью 68 дБ. После соответствующей настройки усиления микрофона, динамика и алгоритмов

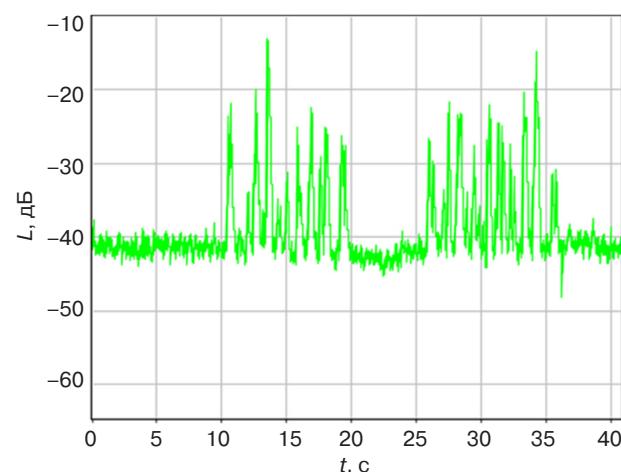


Рис. 14. Уровень огибающей сигнала и шума паузы в направлении передачи с постоянной времени интегрирования 35 мс

цифрового сигнального процессора получено соотношение сигнал/шум на уровне 11 дБ, что отвечает требованиям ГОСТ 33464-2015.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках реализуемого проекта разработан опытный образец УВЭОС, предназначенный для установки на двухколесном ТС и призванный обеспечить голосовую связь водителя с оператором системы «ЭРА-ГЛОНАСС» при возникновении нештатной ситуации или ДТП. При проектировании устройства была проанализирована специфика взаимодействия в системе «человек – двухколесное ТС», ее отличия от других динамических систем, обеспечивающих передвижение в рамках созданной дорожно-транспортной сети. Учтены системные факторы, особенности эксплуатации и ограничения, которые накладываются на разрабатываемое устройство, в т.ч. массогабаритные характеристики, установочные размеры, локализация на приборной панели.

При проектировании устройства особое внимание уделялось вопросам обработки акустического сигнала для обеспечения надежной и качественной голосовой связи. Поскольку в проектируемом устройстве динамик и микрофон размещены в непосредственной близости друг от друга, то вопросы устранения и компенсации акустических эффектов, сопровождающих голосовой сигнал в канале связи, стояли очень остро. Для решения этих задач были проанализированы алгоритмы шумоподавления, эхоподавления, эхокомпенсации с точки зрения возможности применения их для проектируемой системы. Дальнейшие испытания и тестирование показали, что применение алгоритмов аналоговой

и цифровой обработки речевого сигнала, реализуемых в кодеке и модеме проектируемой системы, позволит обеспечить качественный уровень голосовой связи водителя с оператором экстренных оперативных служб.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чучупал В.Я., Чичагов А.С., Маковкин К.А. *Цифровая фильтрация зашумленных речевых сигналов*. М.: ВЦ РАН; 1998. 52 с.
- Кропотов Ю., Парамонов А. *Методы проектирования алгоритмов обработки информации телекоммуникационных систем аудиообмена*. М.: Директ-Медиа; 2015. 228 с. ISBN 978-5-4475-4106-4
- Вишняков И.Э., Масягин М.М., Одинцов О.А., Слюсарь В.В. Методы и алгоритмы шумоочистки звука в реальном времени. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2021;26(2):184–196. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-2-184-196>
- Лялин С.Г. Метод шумоподавления в речевых сигналах с помощью нейронной сети. *Adv. Sci.* 2019;2:32–38. <https://doi.org/10.25730/VSU.0536.19.021>
- Тихонов В.И., Харисов В.Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. М.: Радио и связь; 1991. 608 с. ISBN 5-256-00789-0
- Азаров И.С., Вашкевич М.И., Лихачев Д.С., Петровский А.А. Алгоритм очистки речевого сигнала от сложных помех путем фильтрации в модуляционной области. *Цифровая обработка сигналов*. 2013;4:25–31. <https://elibrary.ru/rvwqdz>
- Железняк В.К., Раханов К.Я., Адамовский Е.Р. Оценка информационных показателей шума квантования аналого-цифрового преобразования речевого сигнала. *Доклады БГУИР*. 2023;21(2):32–40. <http://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-32-40>
- Nguyen H.N., Dowlatnia M., Sarfraz A. *Implementation of the LMS and NLMS algorithms for Acoustic Echo Cancellation in teleconference system using MATLAB*. Vaxjö: MSI Växjö University; 2009. 69 p. URL: https://www.academia.edu/94741525/Implementation_of_the_LMS_and_NLMS_algorithms_for_Acoustic_Echo_Cancellationin_teleconference_systemusing_MATLAB
- Carline M.J., Diana D.C. An Investigation on Adaptive Algorithms for Echo Cancellation of Acoustic Signals. In: *2nd Int. Conf. Sustain. Comput. Data Commun. Syst. ICSCDS 2023 – Proc.* 2023. P. 960–966. <https://doi.org/10.1109/ICSCDS56580.2023.10105081>
- Haykin S. *Adaptive Filter Theory*: 5th ed. New York: Pearson; 2014. 960 p.
- La Rosa A.B., Pereira P.T.L., Ücker P., Paim G., da Costa E.A.C., Bampi S., Almeida S. Exploring NLMS-Based Adaptive Filter Hardware Architectures for Eliminating Power Line Interference in EEG Signals. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2021;40(5):3305–3337. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01620-6>
- Zhang H., Tan K., Wang D.L. Deep learning for joint acoustic echo and noise cancellation with nonlinear distortions. In: *Proceedings of INTERSPEECH*. 2019. P. 4255–4259. <http://doi.org/10.21437/Interspeech.2019-2651>
- Zhang H., Wang D.L. Deep learning for acoustic echo cancellation in noisy and double-talk scenarios. In: *Proceedings of INTERSPEECH*. 2018. P. 3239–3243. <http://doi.org/10.21437/Interspeech.2018-1484>
- Hänsler E., Schmidt G. *Acoustic Echo and Noise Control: A Practical Approach*. Wiley-IEEE Press; 2005. 472 p. ISBN 978-0-471-67839-7
- Constantini G., Casali D. *New Advances in Audio Signal Processing*. MDPI Books; 2024. 206 p. ISBN 978-3-7258-1059-8.
- Демиденко А.В. *Микроконтроллеры для начинающих: Интерфейсы и управление*. ЛитРес; 2025. 100 с.

REFERENCES

- Chuchupal V.Ya., Chichagov A.S., Makovkin K.A. *Tsifrovaya fil'tratsiya zashumlennykh rechevykh signalov (Digital Filtering of Noisy Speech Signals)*. Moscow: Vychislitel'nyi tsentr RAN; 1998; 1998. 52 p. (in Russ.).
- Kropotov Y.U., Paramonov A. *Metody proektirovaniya algoritmov obrabotki informatsii telekommunikatsionnykh sistem audioobmena (Methods of Designing Algorithms for Information Processing of Telecommunication Audio Exchange Systems)*. Moscow: Direct-Media; 2015. 228 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4475-4106-4.
- Vishnyakov I.EH., Masygin M.M., Odintsov O.A., Slyusar V.V. Methods and algorithms for real time voice noise cleaning. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ehlektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2021;26(2):184–196 (in Russ.). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-2-184-196>
- Lyalin S.G. Noise reduction method in speech signals using neural network. *Adv. Sci.* 2019;2:32–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.25730/VSU.0536.19.021>
- Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroistv i sistem (Statistical Analysis and Synthesis of Radio Engineering Devices and Systems)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1991. 608 p. (in Russ.). ISBN 5-256-00789-0

6. Azarov I.S., Vashkevich M.I., Likhachev D.S., Petrovsky A.A. Reducting complex noises in speech using filtering in modulation domain. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2013;4:25–31 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rvwqdz>
7. Zheleznyak V.K., Rahanov K.J., Adamovskiy Y.R. Evaluation of Information Indicators of Quantization Noise Generated by Speech Signal Analogue-Digital Conversion. *Doklady BGUIR*. 2023;21(2):32–40 (in Russ.). <http://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-32-40>
8. Nguyen H.N., Dowlatnia M., Sarfraz A. *Implementation of the LMS and NLMS algorithms for Acoustic Echo Cancellation in teleconference system using MATLAB*. Vaxjoe: MSI Växjo University; 2009. 69 p. Available from URL: https://www.academia.edu/94741525/Implementation_of_the_LMS_and_NLMS_algorithms_for_Acoustic_Echo_Cancellationin_teleconference_systemusing_MATLAB
9. Carline M.J., Diana D.C. An Investigation on Adaptive Algorithms for Echo Cancellation of Acoustic Signals. In: *2nd Int. Conf. Sustain. Comput. Data Commun. Syst. ICSCDS 2023 – Proc.* 2023. P. 960–966. <https://doi.org/10.1109/ICSCDS56580.2023.10105081>
10. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*: 5th ed. New York: Pearson; 2014. 960 p.
11. La Rosa A.B., Pereira P.T.L., Ücker P., Paim G., da Costa E.A.C., Bampi S., Almeida S. Exploring NLMS-Based Adaptive Filter Hardware Architectures for Eliminating Power Line Interference in EEG Signals. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2021;40(5):3305–3337. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01620-6>
12. Zhang H., Tan K., Wang D.L. Deep learning for joint acoustic echo and noise cancellation with nonlinear distortions. In: *Proceedings of INTERSPEECH*. 2019. P. 4255–4259. <http://doi.org/10.21437/Interspeech.2019-2651>
13. Zhang H., Wang D.L. Deep learning for acoustic echo cancellation in noisy and double-talk scenarios. In: *Proceedings of INTERSPEECH*. 2018. P. 3239–3243. <http://doi.org/10.21437/Interspeech.2018-1484>
14. Hänsler E., Schmidt G. *Acoustic Echo and Noise Control: A Practical Approach*. Wiley-IEEE Press; 2005. 472 p. ISBN 978-0-471-67839-7
15. Constantini G., Casali D. *New Advances in Audio Signal Processing*. MDPI Books; 2024. 206 p. ISBN 978-3-7258-1059-8.
16. Demidenko A.V. *Mikrokontrolery dlya nachinayushchikh: Interfeisy i upravlenie* (*Microcontrollers for Beginners: Interfaces and Control*). LitRes; 2022. 100 p. (in Russ.).

Об авторах

Никитин Василий Валерьевич, генеральный директор ООО «ФИКОМ-ИТ» (129128, Россия, Москва, пр-т Мира, д. 188б, к. 4). E-mail: nvv@ficom-it.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4204-7302>

Увайсов Сайgid Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, SPIN-код РИНЦ 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Басов Дмитрий Владимирович, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: d_basov@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-3599-579X>

About the Authors

Vasily V. Nikitin, General Director, FIKOM-IT (188b/4, Mira pr., Moscow, 129128 Russia). E-mail: nvv@ficom-it.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4204-7302>

Saygid U. Uvaysov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, RSCI SPIN-code 3801-4816, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Dmitry V. Basov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: d_basov@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-3599-579X>