

Научная статья

УДК 621.391; DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-31-41

## ДЕМОДУЛЯТОР СИГНАЛОВ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ С АДАПТИВНЫМ ПОРОГОМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Прошин Федор Александрович;

Казакевич Елена Владимировна;

Алексеев Артем Игоревич;

Маслова Анна Андреевна;

Гришанов Илья Сергеевич.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, Россия.

Погорелов Андрей Анатольевич.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,  
Санкт-Петербург, Россия.

✉ Дворников Сергей Викторович.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru)

*Аннотация.* Цель данной работы заключается в разработке метода адаптивной подстройки порогового значения принятия решения, который позволит с минимальными ошибками выполнять демодуляцию сигнальных посылок в виде длинных последовательностей амплитудно-манипулированных нулей (единиц), передаваемых в каналах с замираниями. Для достижения поставленной цели произведён анализ существующих устройств-прототипов, условия их применимости, выявлены слабые стороны и свойства, на основании чего разработана структурная схема устройства. Для обоснования преимуществ предложенного демодулятора произведена его экспериментальная проверка. Результаты эксперимента показывают, что разработанное устройство обладает более высокими, по сравнению с рассмотренными демодуляторами сигналов, показателями помехоустойчивости, обеспечивая при определённых параметрах практически безошибочную демодуляцию сигналов амплитудной манипуляции, которые включают длинные последовательности нулей и единиц при наличии замираний в канале. Разработанное устройство может существенно повысить помехоустойчивость систем радиосвязи декаметрового диапазона.

*Ключевые слова:* канал с замиранием, сигналы амплитудной модуляции, адаптивный порог принятия решения, ошибка демодуляции

**Для цитирования:** Демодулятор сигналов амплитудной манипуляции с адаптивным порогом принятия решения / Ф.А. Прошин [и др.] // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2025. № 1. С. 31–41. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-31-41.

Scientific article

**AMPLITUDE MANIPULATION SIGNAL DEMODULATOR  
WITH ADAPTIVE DECISION THRESHOLD****Proshin Fedor A.;****Kazakevich Elena V.;****Alekseev Artem I.;****Maslova Anna A.;****Grishanov Ilya S.****Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I, Saint-Petersburg, Russia.****Pogorelov Andrey A.****Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,  
Saint-Petersburg, Russia.****✉Dvornikov Sergey V.****Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg, Russia****✉[practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru)**

*Abstract.* The purpose of this work is to develop a method for adaptive adjustment of the decision threshold value, which will allow demodulation of signal packets in the form of long sequences of amplitude-manipulated zeros (ones) transmitted in channels with fading with minimal errors. To achieve this goal, an analysis of existing prototype devices was carried out, the conditions of their applicability, weaknesses and properties were identified, on the basis of which a block diagram of the device was developed. To substantiate the advantages of the proposed demodulator, its experimental verification was performed. The experimental results show that the developed device has higher noise immunity indicators compared to the considered signal demodulators, providing, under certain parameters, almost error-free demodulation of amplitude manipulation signals, which include long sequences of zeros and ones in the presence of fading in the channel. The developed device can significantly increase the noise immunity of radio communication systems in the decameter range.

*Keywords:* fading channel, amplitude modulation signals, adaptive decision threshold, demodulation error

**For citation:** Amplitude manipulation signal demodulator with adaptive decision threshold / F.A. Proshin [et al.] // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 1. P. 31–41. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-31-41.

**Введение**

Демодуляторы сигналов амплитудной манипуляции (АМ) широко используются в системах радиосвязи декаметрового диапазона [1–3]. Особенностью функционирования указанных систем является возникновение замираний в каналах связи, обусловленных непостоянством характеристик среды передачи и, как следствие, изменение амплитуды передаваемых посылок сигналов АМ [4–7]. Данный факт снижает достоверность демодуляции принимаемых последовательностей, поскольку возникающие замирания в канале могут привести к возникновению ошибок принятия решения. На сегодняшний день известны различные способы снижения ошибок демодуляции в каналах с замираниями, большинство из которых основано на сравнении демодулированных символов с эмпирически рассчитанным порогом принятия решения [8, 9]. Однако такой подход не позволяет получить высокую достоверность демодуляции сигналов в условиях нестационарности параметров канала, поскольку уровни демодулированных символов варьируются в широком диапазоне значений.

Рассмотренные особенности, характерные для каналов с замираниями, стимулируют к применению адаптивных подходов для расчёта пороговых значений решающих устройств демодулятора. В связи с этим в настоящей статье представлены результаты разработки

способа адаптивной подстройки порога демодулятора, основанного на сравнении разности эталонного уровня посылки на предыдущем и текущем тактах. Разработка устройства, реализующего предложенный способ, позволит повысить достоверность связи в каналах с замираниями, характерными для декаметрового диапазона.

### Общие сведения о демодуляторах

Демодулятор сигналов представляет собой устройство, используемое в радиотехнике для выделения информационных импульсов из структуры модулированных (манипулированных) сигналов [10–12]. В настоящее время, как правило, применяют цифровые способы модуляции, основанные на манипулировании одного или нескольких параметров несущего колебания информационными посылками [13].

Демодуляторы принято классифицировать в зависимости от типа сигнала, из которого они извлекают информацию. Учитывая, что в сигналах АМ информация вложена в изменение их амплитуды, то демодулирующие их устройства называют амплитудными демодуляторами [10]. Выбор амплитудной демодуляции обусловлен различными причинами, в частности, их активно используют в авиации и на скоростных железнодорожных магистралях [2]. Это связано с возникновением эффекта Доплера в каналах связи быстро движущихся объектов. Рассмотрим простой вариант реализации амплитудно-манипулированного сигнала, при котором переносчиком полезного сигнала служит гармоническое колебание, которое задаётся амплитудой, частотой и фазой и определяется формулой:

$$S(x) = U_0 \sin(2\pi\omega_0 x + \varphi_0),$$

где  $U_0$  – амплитудное значение несущего гармонического колебания;  $\omega_0$  – циклическая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

Модулирующим сигналом служит периодическая последовательность импульсов:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & 2i\Delta x < x < (2i+1)\Delta x, \\ -1, & (2i+1)\Delta x < x < 2(i+1)\Delta x, \end{cases} \quad i = 0, 1, 2 \dots,$$

где  $\Delta x$  – длительность импульсов;  $T = 2\Delta x$  – период следования импульсов.

При АМ передаваемые сигналы имеют только два значения амплитуды:  $U_{max}$  и  $U_{min}$ . Аналитически сигнал АМ описывается выражением:

$$U(x) = 0,5U_0[1 + m\theta(x)]\sin(2\pi\omega_0 x + \varphi_0),$$

где  $m$  – глубина модуляции;  $\theta(x)$  – модулирующий сигнал.

Обычно коэффициент модуляции при АМ выбирается равным единице, поэтому амплитуда модулированного сигнала изменяется скачкообразно на длительности символа. Модулирующий сигнал при этом принимает значения:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0,5U_0(1 + m), & 2i\Delta x < x < (2i+1)\Delta x, \\ 0,5U_0(1 - m), & (2i+1)\Delta x < x < 2(i+1)\Delta x, \end{cases} \quad i = 0, 1, 2 \dots$$

Пример структуры сигнала АМ для информационного набора символов 1011001 представлен на рис. 1.

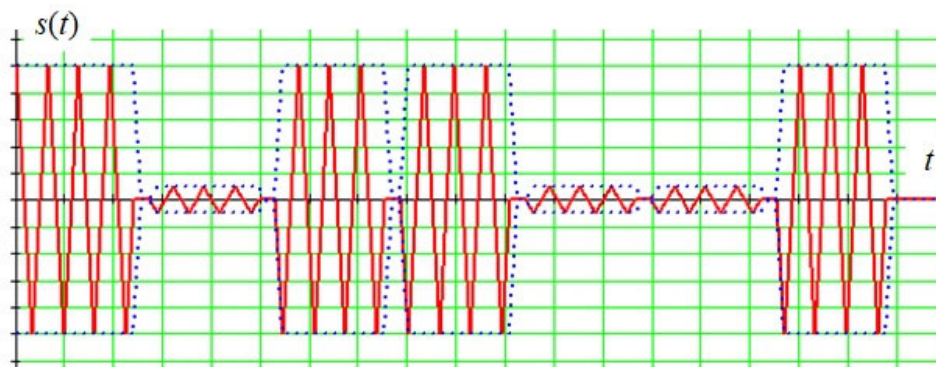


Рис. 1. Фрагмент структуры сигнала АМ во временной плоскости

Вместе с тем в декаметровых каналах радиосвязи сигналы АМ наиболее подвержены искажениям [14]. Это связано с тем, что нестабильность параметров ионосферы приводит к эффекту возникновения замираний, характеризующемуся существенным изменением уровня сигнала. Этот эффект как раз и является причиной возникновения ошибок в демодуляторах с постоянным значением порога.

### Особенности работы демодуляторов АМ в каналах с замираниями

С целью анализа возможных проблем демодуляции сигналов АМ в каналах с замираниями рассмотрим работу стандартного амплитудного демодулятора, представленного в работе [10].

Работа такого демодулятора заключается в преобразовании посылок радиосигнала в информационные импульсы в соответствии с логикой работы его структурной схемы, представленной на рис. 2.

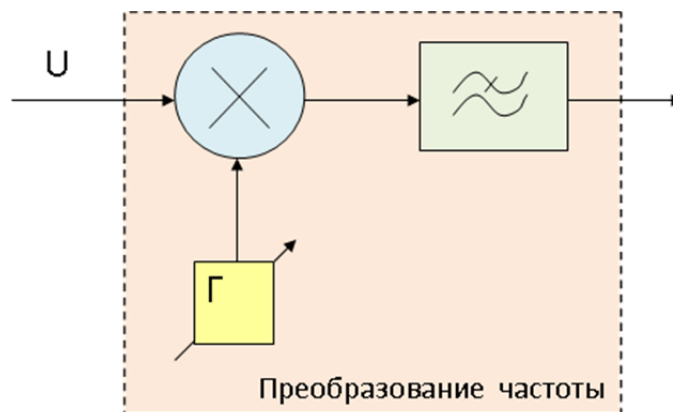


Рис. 2. Структурная схема стандартного демодулятора сигналов АМ

Демодулятор представляет собой преобразователь частоты, который переносит спектр сигнала. Схема демодулятора включает:

- 1) перемножитель (смеситель);
- 2) вспомогательный генератор, который предназначен для регулирования частоты несущего колебания, отличающегося от принимаемого сигнала на единицы кГц;
- 3) фильтр нижних частот для подавления высокочастотного спектра.

Недостатком данной схемы является постоянство порога принятия решения, что недопустимо в каналах с замираниями, поскольку постоянство порога как раз и приводит к возникновению ошибок при демодуляции с вариативным уровнем амплитуды сигнала АМ. Одно из решений подобной проблемы заключается в применении метода адаптивной подстройки порогового значения [15].

Вариант реализации такого устройства, обеспечивающего корректировку уровня порога принятия решения, изображён на рис. 3.

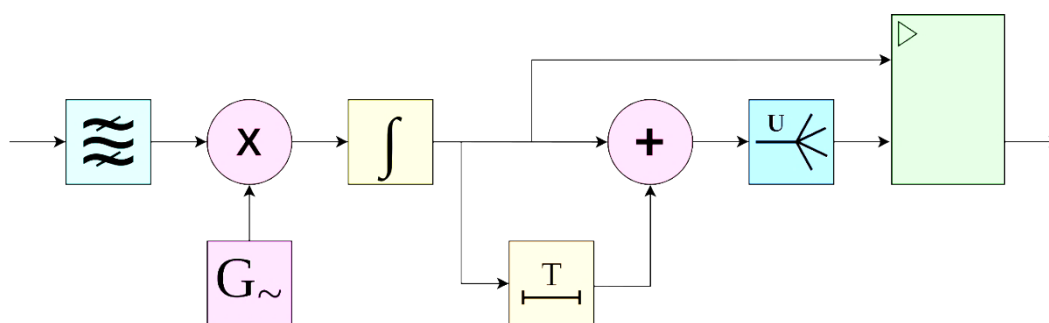


Рис. 3. Структурная схема демодулятора сигналов АМ с адаптивным изменением порога принятия решения

Представленный на рис. 3 демодулятор с адаптивным изменением порога принятия решения работает следующим образом.

На каждом такте демодуляции уровень порога принятия решения выбирается как четверть суммы амплитудных значений текущего и предыдущего демодулируемых импульсов.

Работа такого устройства при демодуляции последовательности 0101010 показана на рис. 4.

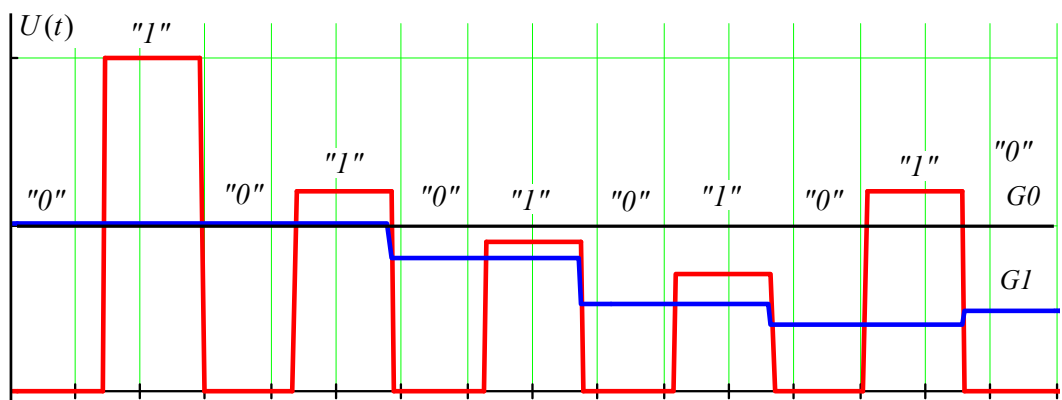
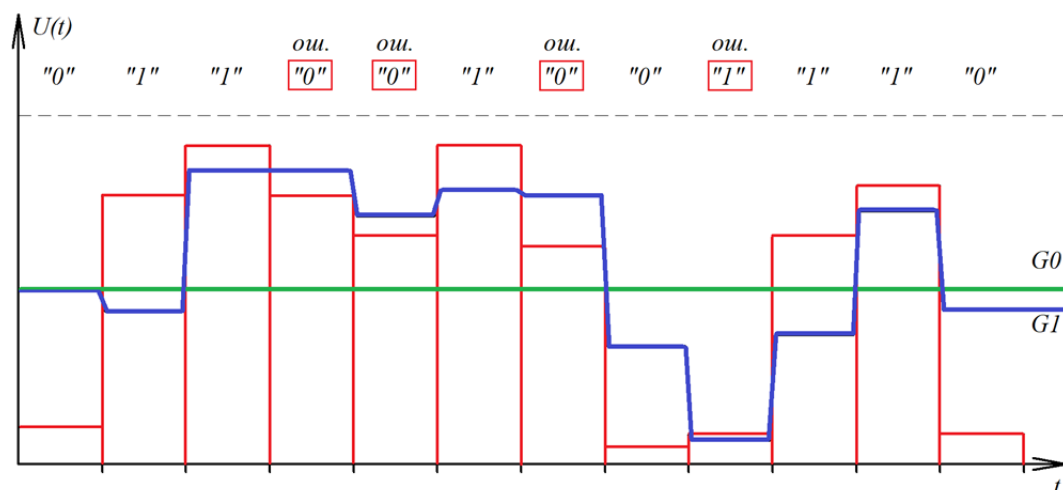


Рис. 4. Результат работы демодулятора с адаптивным изменением порога принятия решения

На рис. 4 линия  $G0$  демонстрирует порог с постоянным уровнем принятия решения, а  $G1$  — значение порога, адаптивно изменяющееся в соответствии с текущей амплитудой демодулированных символов, обусловленной замираниями в канале [16]. Для рассмотренной комбинации символов в представленной ситуации применение порога  $G0$  связано с возникновением ошибок, в частности, пятый и седьмой импульсы демодулированы неверно. В то же время применение порога  $G1$  позволяет избежать указанных ошибок. Работоспособность данного устройства подтверждена патентом на изобретение [15].

Однако такое решение не является оптимальным, так как при длинных сериях повторяющихся символов возможно возникновение ошибок [9]. Например, для серии 011001001110 работа данного демодулятора не обеспечивает достоверный приём. Рассмотренная ситуация представлена на рис. 5.

На рис. 5 представлено два порога принятия решения. Порог  $G0$  имеет постоянный уровень, а уровень  $G1$  формируется в соответствии с устройством, представленным на рис. 3. Для рассматриваемой серии 011001001110 применение демодулятора с адаптивным порогом приводит к возникновению ошибок на кодовых комбинациях №№ 4, 5, 7 и 9.



**Рис. 5. Возникновение ошибки при работе демодулятора**

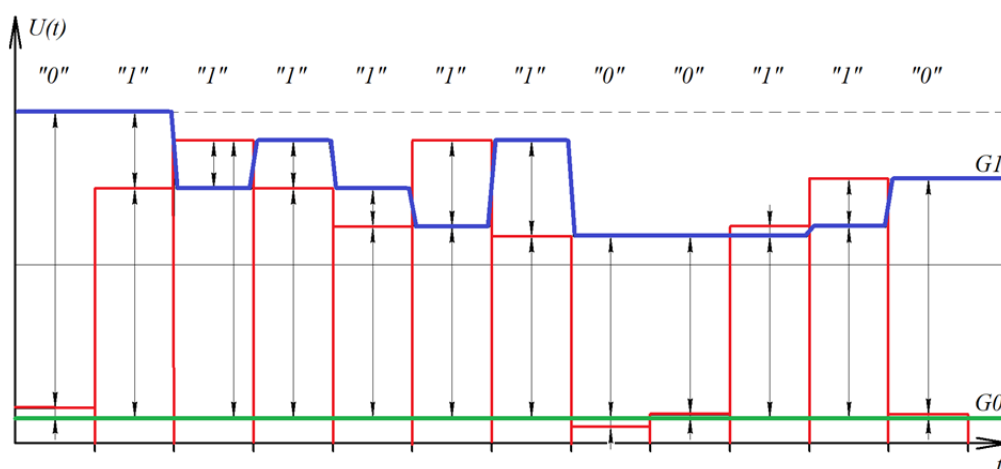
Вместе с тем согласно ГОСТ 33973–2016 [17] на линиях радио- и телеграфной связи перспективных высокоскоростных железнодорожных магистралей предъявляются достаточно высокие требования к достоверности передачи –  $5 \times 10^{-2}$ , что явно не соответствует полученному результату.

Таким образом, необходим поиск новых технических решений, направленных на повышение достоверности передачи информации в каналах с замираниями.

## Предлагаемые технические решения

Одним из направлений решения выявленной проблемы является изменение правила выбора порога принятия решения демодулятора. В частности, предлагается текущее значение принятия порога решения на текущем такте выбирать на уровне амплитуды посылки «1», принятой на предыдущем такте. Такой подход позволяет учитывать уровень замираний, которые приводят к изменению амплитуды принимаемых посылок, тем самым подстраивая под него и значение порога в демодуляторе [18].

Правомерность такого подхода можно продемонстрировать на битовой последовательности, при которой работа известного демодулятора связана с ошибками. Результаты демодуляции последовательности 011001001110 в соответствии с предлагаемым порогом принятия решения демонстрируется на рис. 6.



**Рис. 6. Пример работы предлагаемого демодулятора**

Анализ результатов на рис. 6 показывает, что символы №№ 4, 5, 7 и 9 приняты без ошибок.

Полученное техническое решение позволяет представить структурную схему демодулятора в соответствии с рис. 7.

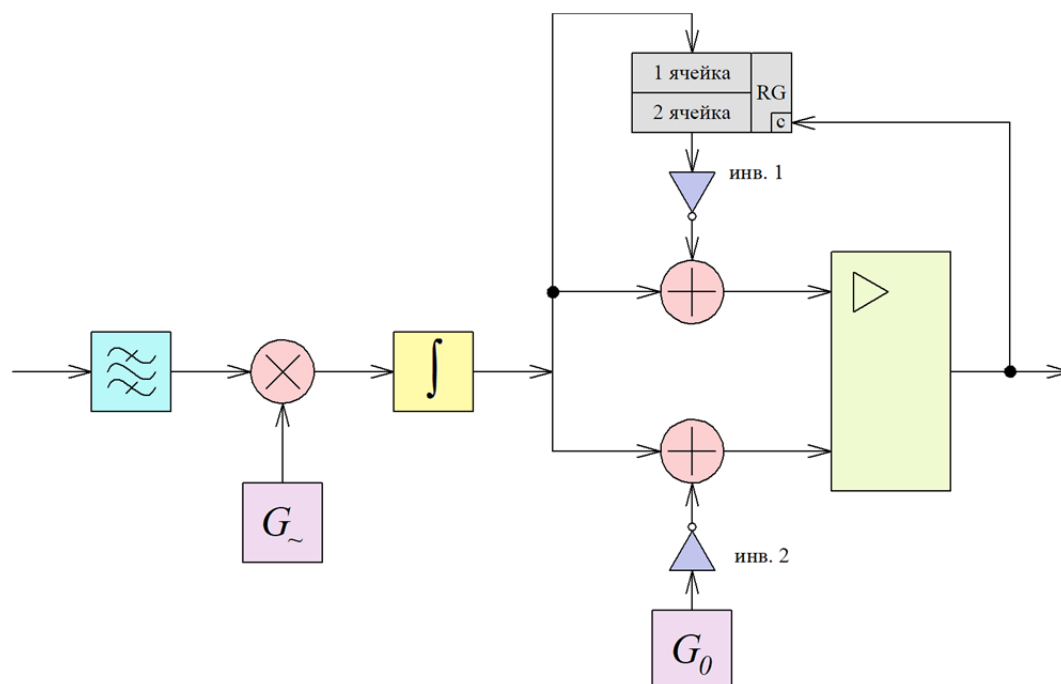


Рис. 7. Структурная схема предлагаемого устройства

Эффективность предложенного технического решения была апробирована на 400 экспериментах, данные по которым приведены в таблице.

Таблица

Результаты экспериментальной проверки

ОСШ, дБ	10	12	14	16	18
Стандартный демодулятор	50	44	32	20	12
Демодулятор с адаптивным изменением порога	40	31	22	12	8
Предлагаемое устройство	18	12	6	2	–

### Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что разработанное устройство не обеспечивает в полной мере решение вопросов достоверного приёма сигналов АМ в условиях многолучевого распространения сигнала. Однако выбранный подход однозначно указывает на прагматичность решения, поскольку предложенное устройство допускает меньшее количество ошибок по сравнению с известными ранее демодуляторами.

Дальнейшее направление исследований авторы связывают с применением технологии искусственного интеллекта, позволяющей анализировать замирования на больших выборках данных [19–20].

**Список источников**

1. Брюханов Ю.А., Поелуев С.С., Надин В.С. Влияние гармонической помехи на прием сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 9. С. 66–72. DOI: 10.18127/j20700784-202209-04.
2. Управление параметрами сигналов с амплитудной манипуляцией в радиолиниях морской подвижной службы / А.А. Павлов [и др.] // Информация и космос. 2023. № 2. С. 12–17. EDN GEDBJE.
3. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. Эффекты квантования сигналов с амплитудной манипуляцией // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 1 (1). С. 42–48. DOI: 10.18127/j00338486-202001(01).
4. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи / Г.В. Куликов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 7. С. 2. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.7.10. EDN AUSXBS.
5. Довбня В.Г., Коптев Д.С. Способы восстановления несущего колебания для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Телекоммуникации. 2020. № 8. С. 2–7. EDN DXGGVB.
6. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной манипуляции / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2014. № 1. С. 3–11. EDN TFLMUN.
7. Довбня В.Г., Севрюков А.Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер.: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 49–55. EDN VAWEMZ.
8. Быстрый цифровой алгоритм демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией / В.П. Литвиненко [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 108–112. EDN XWHIBV.
9. Павлов А.А., Дворников С.В. Повышение энергетического потенциала линий радиосвязи с амплитудной модуляцией // Морской вестник. 2023. № 2 (86). С. 79–82.
10. Общая теория связи / Д.Л. Бураченко [и др.]; под ред. Л.М. Финка. Л.: ВАС, 1970. 412 с.
11. Дворников С.С. Адаптивный порог принятия решения на основе апостериорной обработки сигналов // Информация и космос. 2020. № 3. С. 26–33.
12. Брюханов Ю.А., Поелуев С.С. Влияние гармонической помехи на вероятность ошибочного приема сигналов с амплитудной манипуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 1. С. 69–75. DOI: 10.18127/j20700784-202201-06.
13. Жукова И.Н. Имитационное моделирование обработки сложных сигналов с псевдослучайным законом амплитудной манипуляции в РЛС с синтезированием апертуры // Вестник Новгородского государственного университета. 2013. № 75-2. С. 17–21. EDN SGWLRZ.
14. Орошук И.М. Динамическая модель рэлеевского канала с замираниями // Журнал радиоэлектроники. 2002. № 10. С. 4.
15. Демодулятор сигналов амплитудной манипуляции: пат. 2781271 Рос. Федерация / С.В. Дворников [и др.]; заявитель и патентобладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. № 2022108363; заявл. 30.03.22; опубл. 11.10.22.
16. Денисов В.Е. Влияние неравномерности частотной характеристики затухания морской среды на помехоустойчивость когерентного приема бинарных сигналов с амплитудной манипуляцией и с прямоугольной огибающей // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16. № 5. С. 247–250.
17. ГОСТ 33973–2016. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 24.12.2024).



18. Исследование работы модели приёмного устройства цифрового канала связи / В.В. Андреев [и др.] // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13. № 3. С. 267–274.
19. Жданова И.М., Дворников С.С., Дворников С.В. Обнаружение аномалий трафика на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 14–23. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. EDN BJFZSE.
20. Посягин А.И., Южаков А.А. Разработка двухслойной нейронной сети для самомаршрутизирующегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2013. № 11. С. 10–13. EDN RERAAL.

## References

1. Bryuhanov Yu.A., Poeluev S.S., Nadin V.S. Vliyanie garmonicheskoy pomekhi na priem signalov s kvadraturnoy amplitudnoj manipulyaciej // Uspekhi sovremennoj radioelektroniki. 2022. T. 76. № 9. S. 66–72. DOI: 10.18127/j20700784-202209-04.
2. Upravlenie parametrami signalov s amplitudnoj manipulyaciej v radiolinayah morskoy podvizhnoj sluzhby / A.A. Pavlov [i dr.] // Informaciya i kosmos. 2023. № 2. S. 12–17. EDN GEDBJE.
3. Bryuhanov Yu.A., Lukashevich Yu.A. Effekty kvantovaniya signalov s amplitudnoj manipulyaciej // Radiotekhnika. 2020. T. 84. № 1 (1). S. 42–48. DOI: 10.18127/j00338486-202001(01).
4. Pomekhoustojchivost' priema signalov s kvadraturnoj amplitudnoj manipulyaciej v prisutstvii fazomanipulirovannoy pomekhi / G.V. Kulikov [i dr.] // Zhurnal radioelektroniki. 2019. № 7. S. 2. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.7.10. EDN AUSXBS.
5. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Sposoby vosstanovleniya nesushchego kolebaniya dlya demodulyatorov signalov s kvadraturnoj amplitudnoj manipulyaciej // Telekommunikacii. 2020. № 8. S. 2–7. EDN DXGGVB.
6. Analiz faktorov, vliyayushchih na pomekhoustojchivost' signalov kvadraturnoj amplitudnoj manipulyacii / S.V. Dvornikov [i dr.] // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2014. № 1. S. 3–11. EDN TFLMUH.
7. Dovbnya V.G., Sevryukov A.E. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij na pomekhoustojchivost' priema signalov s kvadraturnoj amplitudnoj manipulyaciej // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2015. № 3 (16). S. 49–55. EDN VAWEMZ.
8. Bystryj cifrovoj algoritm demodulyacii signalov s kvadraturnoj amplitudnoj manipulyaciej / V.P. Litvinenko [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. T. 14. № 4. S. 108–112. EDN XWHIBV.
9. Pavlov A.A., Dvornikov S.V. Povyshenie energeticheskogo potentsiala linij radiosvyazi s amplitudnoj modulyaciej // Morskoy vestnik. 2023. № 2 (86). S. 79–82.
10. Obshchaya teoriya svyazi / D.L. Burachenko [i dr.]; pod red. L.M. Finka. L.: VAS, 1970. 412 s.
11. Dvornikov S.S. Adaptivnyj porog prinyatiya resheniya na osnove aposteriornoj obrabotki signalov // Informaciya i kosmos. 2020. № 3. S. 26–33.
12. Bryuhanov Yu.A., Poeluev S.S. Vliyanie garmonicheskoy pomekhi na veroyatnost' oshibochnogo priema signalov s amplitudnoj manipulyaciej // Uspekhi sovremennoj radioelektroniki. 2022. T. 76. № 1. S. 69–75. DOI: 10.18127/j20700784-202201-06.
13. Zhukova I.N. Imitacionnoe modelirovanie obrabotki slozhnyh signalov s psevdosluchajnym zakonom amplitudnoj manipulyacii v RLS s sintezirovaniem apertury // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 75-2. S. 17–21. EDN SGWLRZ.
14. Oroshchuk I.M. Dinamicheskaya model' releevskogo kanala s zamiraniyami // Zhurnal radioelektroniki. 2002. № 10. S. 4.
15. Demodulyator signalov amplitudnoj manipulyacii: pat. 2781271 Ros. Federaciya / S.V. Dvornikov [i dr.]; zayavitel' i patentobladatel' Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya. № 2022108363; zayavl. 30.03.22; opubl. 11.10.22.

16. Denisov V.E. Vliyanie neravnomernosti chastotnoj harakteristiki zatuhaniya morskoy sredy na pomekhoustojchivost' kogerentnogo priema binarnykh signalov s amplitudnoj manipulyaciej i s pryamougol'noj ogibayushchej // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. 2016. T. 16. № 5. S. 247–250.

17. GOST 33973–2016. Zheleznodorozhnaya elektrosvyaz'. Poehnaya radiosvyaz'. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya // ELEKTRONNYJ FOND pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 24.12.2024).

18. Issledovanie raboty modeli priyomnogo ustrojstva cifrovogo kanala svyazi / V.V. Andreev [i dr.] // Original'nye issledovaniya. 2023. T. 13. № 3. S. 267–274.

19. Zhdanova I.M., Dvornikov S.S., Dvornikov S.V. Obnaruzhenie anomalij trafika na osnove obrabotki ih frejmovykh vejvlet-preobrazovanij // Trudy uchebnykh zavedenij svyazi. 2024. T. 10. № 5. S. 14–23. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-5-14-23. EDN BJFZSE.

20. Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. Razrabotka dvuhslojnoj nejronnoj seti dlya samomارشrutiziruyushchegosya analogo-cifrovogo preobrazovatelya na osnove nejronnoj seti // Elektrotehnika. 2013. № 11. S. 10–13. EDN RERAAL.

#### **Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 30.12.2024; одобрена после рецензирования: 20.01.2025;  
принята к публикации: 22.01.2025

#### **Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 30.12.2024; approved after review: 20.01.2025;  
accepted for publication: 22.01.2025

*Сведения об авторах:*

**Прошин Федор Алексеевич**, ассистент кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), [fedorproshin@gmail.com](mailto:fedorproshin@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0009-5513-9302>, SPIN-код: 7907-6604

**Казакевич Елена Владимировна**, заведующий кафедрой «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), кандидат технических наук, доцент, e-mail: [kev-pgups@yandex.ru](mailto:kev-pgups@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4549-787X>, SPIN-код: 1778-1972

**Алексеев Артем Игоревич**, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), e-mail: [alekseevartem-i@yandex.ru](mailto:alekseevartem-i@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6595-2024>, SPIN-код: 5586-8778

**Маслова Анна Андреевна**, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), e-mail: [bloodyelis@yandex.ru](mailto:bloodyelis@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0001-1573-6171>, SPIN-код: 3511-6210

**Гришанов Илья Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), e-mail: [ilia911119@gmail.com](mailto:ilia911119@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-8573-6333>, SPIN-код: 9368-9050

**Погорелов Андрей Анатольевич**, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3), кандидат технических наук, доцент, e-mail: [anpog@yandex.ru](mailto:anpog@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0004-3225-7414>, SPIN-код: 6413-0148

**Дворников Сергей Викторович**, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67), доктор технических наук, профессор, e-mail: [practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>, SPIN-код: 7109-9590

*Information about the authors:*

**Proshin Fedor A.**, assistant of the department «Electrical communication» of Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I (190031, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 9), e-mail: [fedorproshin@gmail.com](mailto:fedorproshin@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0009-5513-9302>, SPIN: 7907-6604

**Kazakevich Elena V.**, head of the department of «Electrical Communications» of Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I (190031, Saint-Petersburg, Moskovsky pr., 9), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: [kev-pgups@yandex.ru](mailto:kev-pgups@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4549-787X>, SPIN: 1778-1972

**Alekseev Artem I.**, postgraduate student of the department «Electrical communication» of Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I (190031, Saint-Petersburg, Moskovsky pr., 9), e-mail: [alekseevartem-i@yandex.ru](mailto:alekseevartem-i@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6595-2024>, SPIN: 5586-8778

**Maslova Anna A.**, postgraduate student of the department «Electrical communication» of Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I (190031, Saint-Petersburg, Moskovsky pr., 9), e-mail: [bloodyelis@yandex.ru](mailto:bloodyelis@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0001-1573-6171>, SPIN: 3511-6210

**Grishanov Ilya S.**, postgraduate student of the department «Electrical communication» of Saint-Petersburg state transport university of Emperor Alexander I (190031, Saint-Petersburg, Moskovsky pr., 9), e-mail: [ilia911119@gmail.com](mailto:ilia911119@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-8573-6333>, SPIN: 9368-9050

**Pogorelov Andrey A.**, professor of the department of radio communications of Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky ave., 3), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: [anpog@yandex.ru](mailto:anpog@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0004-3225-7414>, SPIN: 6413-0148

**Dvornikov Sergey V.**, professor of the department of design and technologies of electronic and laser means of Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67), doctor of technical sciences, professor, e-mail: [practicdsv@yandex.ru](mailto:practicdsv@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>, SPIN: 7109-9590