
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.391

ЦИФРОВОЙ ДЕМОДУЛЯТОР СИГНАЛОВ ASK

Дворников Сергей Сергеевич;

✉ Дворников Сергей Викторович;

Бибарсов Марат Рашидович.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия; Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия.

Погорелов Андрей Анатольевич.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, Россия

✉ practicdsv@yandex.ru

Аннотация. Проанализированы тенденции перехода подразделений МЧС России к использованию средств связи, построенных на технологиях цифрового синтеза и обработки сигналов. Показана роль и место сигналов амплитудной манипуляции в современной радиосвязи. Рассмотрены особенности квадратурного синтеза сигналов FSK и ООК, их физическая общность и структурные различия на уровне спектральных представлений. Представлены структурные схемы модуляторов сигналов FSK и ООК. Рассмотрена возможность программной реализации демодуляторов сигналов. Предложен иллюстрационный материал, поясняющий особенности синтеза и демодуляции сигналов FSK и ООК в среде MathCAD. Приведены выражения, характеризующие помехоустойчивость приема сигналов FSK и ООК.

Ключевые слова: синтез сигналов амплитудной манипуляции, квадратурный модулятор сигналов амплитудной манипуляции, демодуляция сигналов амплитудной манипуляции на основе цифровых технологий

Для цитирования: Дворников С.С., Дворников С.В., Бибарсов М.Р., Погорелов А.А. Цифровой демодулятор сигналов ASK // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 2. С. 57–67.

Scientific article

DIGITAL DEMODULATOR OF ASK SIGNALS

Dvornikov Sergey S.;

✉ Dvornikov Sergey V.;

Bibarsov Marat R.

Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg, Russia;

Military academy of communications of Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia.

Pogorelov Andrey A.

Military academy of communications of Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Saint-Petersburg, Russia

✉ practicdsv@yandex.ru

Abstract. The tendencies of the transition of units of EMERCOM of Russia to the use of communication facilities built on digital synthesis and signal processing technologies are analyzed. The role and place of amplitude-shift keying signals in modern radio communication is shown. The features

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

of quadraturesynthesis of FSK and OOK signals, their physical commonality and structural differences at the level of spectral representations are considered. Block diagrams of FSK and OOK signal modulators are presented. The possibility of software implementation of signal demodulators is considered. An illustrative material is proposed that explains the features of the synthesis and demodulation of FSK and OOK signals in the MathCAD environment. Expressions are given that characterize the noise immunity of receiving FSK and OOK signals.

Keywords: synthesis of amplitude-shift keying signals, quadrature modulator of amplitude-shift keying signals, demodulation of amplitude-shift keying signals based on digital technologies

For citation: Dvornikov S.S., Dvornikov S.V., Bibarsov M.R., Pogorelov A.A. Digital demodulator of ASK signals // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 2. P. 57–67.

Введение

Развитие цифровых технологий способствовало их активному внедрению в радиостанции нового поколения, что обеспечило повышение качества связи и появление новых информационных форматов [1]. В рамках указанных тенденций в подразделениях МЧС России активно стали поступать новые средства связи [2–4]. Применение новых средств связи, реализующих современные цифровые технологии, способствовало не только повышению помехоустойчивости приема, но и обеспечило удобство передачи информационного контента [5, 6].

В работе [7] отмечалось, что «...Система радиосвязи МЧС России организуется и совершенствуется в соответствии с принятой системой управления на основании распорядительных и планирующих документов по связи...», при этом «...в связи с переходом телекоммуникационных систем на цифровое оборудование, основу должны составить цифровые автоматизированные приемо-передающие комплексы...».

Таким образом, можно заключить, что дальнейшее развитие системы связи будет связано с непосредственным использованием цифровых технологий синтеза и обработки сигналов, что подтверждается принятием Руководства по радиосвязи Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [8].

Вместе с тем анализ перспективных технологий обработки сигналов [9–12] показал, что они предполагают активное использование для построения радиостанций так называемых SDR-платформ [13, 14], позволяющих создание трактов формирования и обработки сигналов на основе программных модулей. В результате открываются широкие перспективы совершенствования средств связи путем «заливки» в программный модуль нового алгоритма. С учетом указанных тенденций предлагаются результаты исследования по разработке цифрового демодулятора сигналов ASK (*amplitude shift keying*), разновидности которого активно используются в линиях декаметровой радиосвязи МЧС России [15, 16] (программа написана в среде MathCAD).

Общие сведения о сигналах ASK

Сигналы ASK относятся к классу сигналов амплитудной модуляции, в которой информация внесена в изменение амплитуды несущего колебания [17]. Поэтому с таких позиций теории модуляции возможна многоуровневая, например, L -уровневая манипуляция, которую можно обозначить как L -ASK.

В настоящее время многоуровневые сигналы в основном используются в проводных и оптических системах [18], в частности в охранных системах.

Вместе с тем в системах морской радиосвязи амплитудный телеграф считается наиболее помехоустойчивым видом связи, обеспечивающим работу линии радиосвязи в условиях шумов, более на 10 дБ по уровню превышающих полезный сигнал. Но данная

особенность [19] проявляется исключительно при слуховом приеме сигналов. В системах радиосвязи сигналы ASK формируются методом квадратурного синтеза символ [20, 21]:

$$s_{ASK}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}[1 + m_{AM}s(t)]\cos(\omega_0 t) + \frac{1}{\sqrt{2}}[1 + m_{AM}s(t)]\sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – модулирующий сигнал; m_{AM} – индекс модуляции; а $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота; f_0 – значение несущей частоты.

Формула (1) позволяет осуществлять синтез сигнал ASK, используя стандартный квадратурный модулятор. Например, в работе [22] предложена следующая структурная схема (рис. 1):

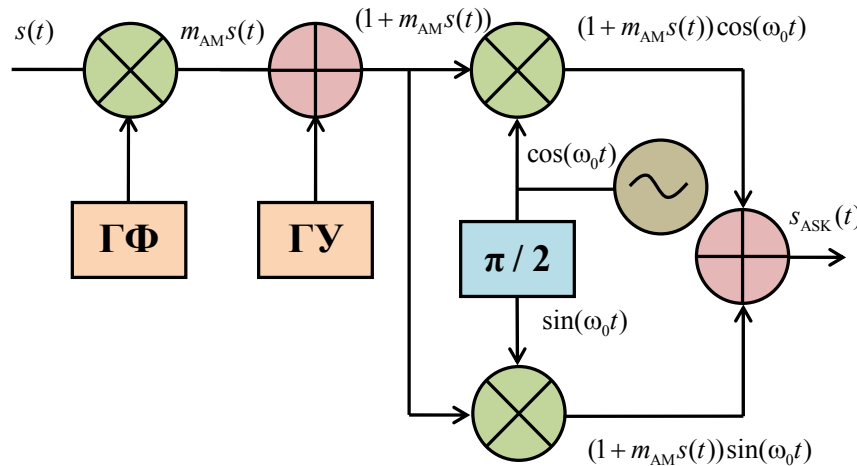


Рис. 1. Структурная схема модулятора сигналов ASK

(ГФ – генератор формирования величины индекса амплитудной модуляции; ГУ – генератор, формирующий напряжение единичного уровня; $\pi/2$ – фазовращатель, реализующий преобразование Гильберта; ~ – генератор несущего колебания)

Как уже отмечалось, внедрение SDR-технологий позволяет осуществлять синтез сигналов на программном уровне. В частности, используя программу синтеза первичных сигналов [23], результирующий AS-сигнал может быть синтезирован путем последовательного выполнения следующих операций. На рис. 2. показан скриншот программы синтеза сигнала ASK в среде MathCAD.

```

N := 1023
n := 0..N      временные отчеты
M := 16       количество импульсов
K := 64       число отсчетов на импульс
F := 128      частота колебаний

Формирование модулирующей последовательности
D := (0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1)ᵀ

Несущее колебание
v_n := sin(2 * pi * n * F / N) * 1

Формирование ПЭС
u := | i ← M
      for i ∈ 0..K - 1
      for d ∈ 0..I - 1
          x_{i+d.K+0} ← D_d - 0
      u ← x

Сигнал ASK
s_n := v_n * (1 + u_n)
    
```

Рис. 2. Скриншот программы синтеза сигналов ASK в MathCAD (ПЭС – первичный электрический сигнал)

Заметим, что формула синтеза сигнала ASK, представленная в скриншоте, имеет упрощенное представление, априори полагая, что индекс модуляции $m_{AM} = 1$ [24]. На рис. 3 показан фрагмент синтезированного информационного манипулирующего сигнала $u(t)$, а на рис. 4 – фрагмент результирующего сигнала ASK.

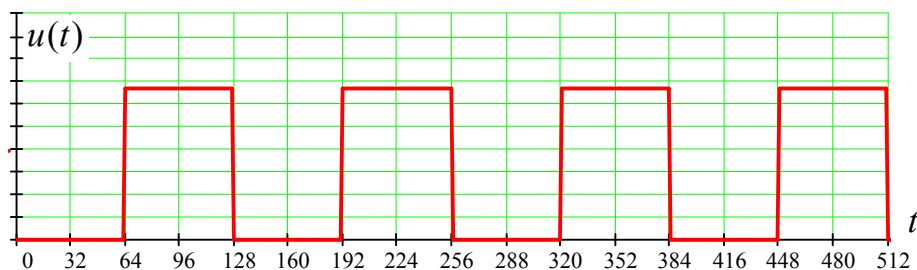


Рис. 3. Фрагмент манипулирующего сигнала

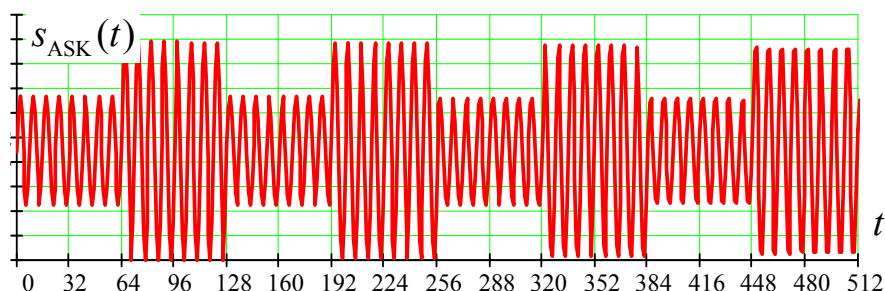


Рис. 4. Фрагмент сигнала ASK

В печатных трудах достаточно часто под сигналом ASK понимают сигналы, так называемой ключевой модуляции OOK (*On-Off Keying*) [25]. Модуляция OOK является частным случаем модуляции ASK в соответствии с формулой (1), полагая при этом, что в сомножителях $(1 + m_{AM})$ вместо 1 используется 0 (рис. 5). Тогда:

$$s_{OOK}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}[0 + m_{AM}s(t)]\cos(\omega_0 t) + \frac{1}{\sqrt{2}}[0 + m_{AM}s(t)]\sin(\omega_0 t) =$$

$$= \frac{m_{AM}s(t)}{\sqrt{2}}[\cos(\omega_0 t) + \sin(\omega_0 t)] .$$

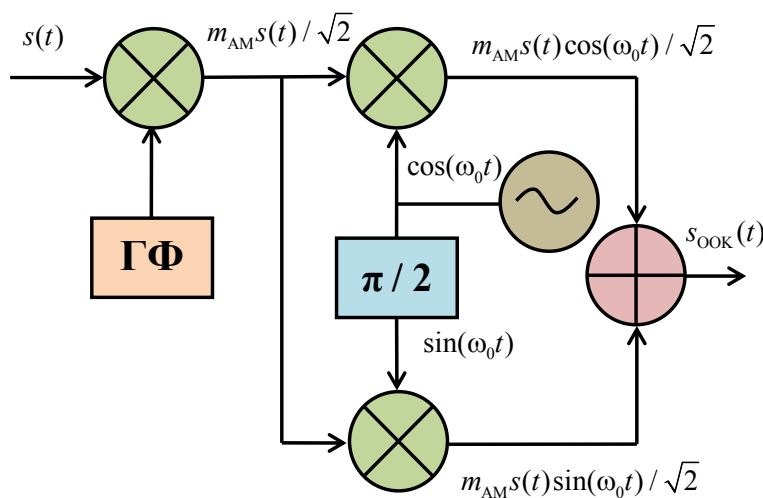


Рис. 5. Структурная схема модулятора сигналов OOK

Заметим, что при общей схожести временных представлений (на рис. 6 показан фрагмент сигнала ООК), сигналы ASK и ООК имеют различные спектры (рис. 7).

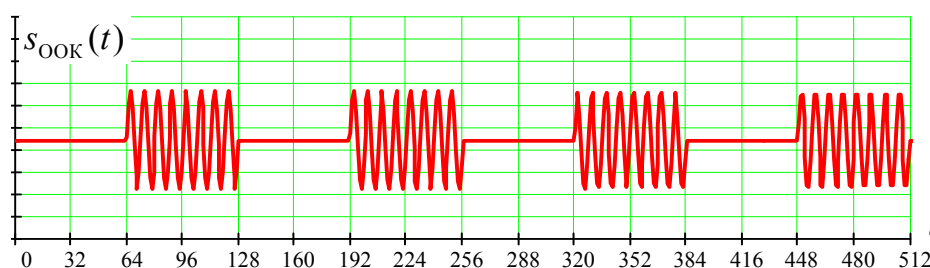


Рис. 6. Фрагмент сигнала ООК

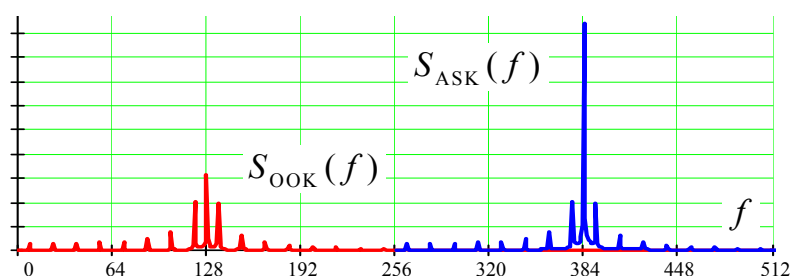


Рис. 7. Спектры сигналов ООК и ASK

Так анализ спектров сигналов ASK и ООК показал, что они имеют одинаковое энергетическое наполнение боковых составляющих. Но при этом сигнал ASK имеет более значительный уровень несущего колебания, выступающего в роли пилот-сигнала. Это обусловлено тем, что при формировании сигнала в ООК амплитуда несущего колебания не используется.

Предложения по цифровой демодуляции сигналов ASK

В настоящее время существуют различные подходы к демодуляции сигналов ASK [25–27]. В их основе лежат процедуры сравнения средней мощности на длительности символа с предварительно установленным порогом. При этом именно выбор порога определяет их уникальность. Вместе с тем наличие программной среды открывает широкий спектр возможности реализации демодулятора сигналов ASK. В частности, предлагается демодулятор без переноса принятой реализации на нулевую частоту. В его основе лежит процедура скользящего среднего на длительности сигнального символа. Программный код в среде MathCAD реализуется просто. На рис. 8 представлен программный код синтеза вектора скользящего среднего Dd_k и вектора демодулированного сигнала ud_k на выходе порогового демодулятора. На рис. 9 показаны фрагменты, поясняющие этапы демодуляции сигнала ASK.

$$Dd_k := \frac{2}{E} \cdot \sum_m dd_{k+m} \quad ud_k := \begin{cases} 1 & \text{if } Dd_k > G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рис. 8. Программный код демодулятора сигнала ASK

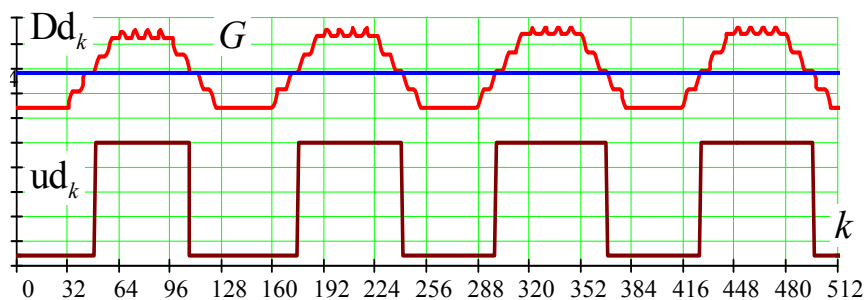


Рис. 9. Фрагменты, поясняющие этапы демодуляции сигнала ASK

Так, на рис. 9 показан вектор скользящего среднего Dd , обеспечивающий усреднение энергии на длительности символа. Здесь же нанесен порог принятия решения G , формируемый путем усреднения обрабатываемой выборки, а также восстановленный сигнал, определяемый вектором ud .

Помехоустойчивость сигналов L -ASK может быть оценена следующей формулой:

$$p_{\text{ASK}} = \frac{2(L-1)}{L \log_2 L} \Phi \left[\sqrt{\frac{\log_2 L}{(L-1)^2} h_0^2} \right], \quad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 0,5 [1 - \text{erf}(x/\sqrt{2})]$ – интеграл вероятности; h_0^2 – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума.

Помехоустойчивость сигналов ООК оценивается согласно выражению:

$$p_{\text{ООК}} = \Phi \left[\sqrt{h_0^2} \right], \quad (3)$$

Заметим, что при $L=2$ формула (2) вырождается в выражение (3). На рис. 10 представлены графики помехоустойчивости сигнала ASK и сигнала бинарной фазовой манипуляции (BPSK – *binary phase-shift keying*).

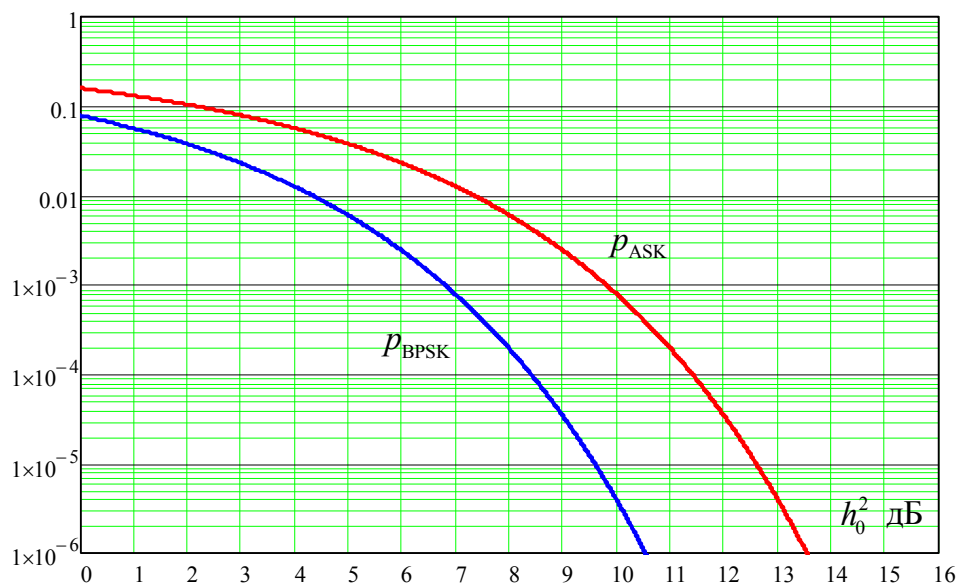


Рис. 10. Вероятность ошибки приема сигналов BPSK и ASK

Заключение

Хотя согласно формулам (2) и (3) помехоустойчивость сигналов 2-ASK и ООК одинакова, правомерность такого утверждения обоснована только в условиях устойчивой синхронизации при приеме, которая для сигналов амплитудной модуляции обеспечивается путем подстройки демодулятора по пилот-сигналу, в качестве которого выступает несущее колебание. Учитывая, что в спектре сигнала ASK несущее колебание существенно выше, то, следовательно, и процесс синхронизации будет более надежным. Данный вопрос авторы рассматривают как направление будущего исследования. Кроме того, по мнению авторов, повышение эффективности приема сигналов ООК можно обеспечить за счет реализации методов частотно-временной обработки сигналов [28–31].

Список источников

1. Дворников С.В., Кудрявцев А.М. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов: монография. СПб.: Военная акад. связи, 2010. 240 с. ISBN 978-5-91690-008-8.
2. Сиников А.А., Асанин А.В. Эффективность функционирования систем радиосвязи МЧС России // Приоритетные направления развития инфокоммуникационных технологий, систем связи и оповещения РСЧС и ГО: сб. трудов XXXI Междунар. науч.-практ. конф. Химки: Акад. гражданской защиты МЧС России, 2021. С. 52–56. EDN IBVWHR.
3. Скрипник И.Л. Применение стандарта цифровой радиосвязи dmrg для управления действиями подразделений МЧС России // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 388–393.
4. Серянин С.С. Развитие мобильных комплексов связи МЧС России // Приоритетные направления развития инфокоммуникационных технологий, систем связи и оповещения РСЧС и ГО: сб. трудов секции № 12 XXXII Междунар. науч.-практ. конф. Химки: Акад. гражданской защиты МЧС России, 2022. С. 24–27.
5. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 221–228. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228.
6. Папырин В.В., Сидоров В.К. Некоторые аспекты организации цифровой коротковолновой радиосвязи в Арктике // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2019. № 3. С. 1–6.
7. Система радиосвязи в МЧС России / С.В. Пацук [и др.] // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. № 2 (12). С. 41–49. DOI: 10.37657/vniipro.avpb.2022.56.71.005.
8. Об утверждении Руководства по радиосвязи Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: приказ МЧС России от 26 дек. 2018 г. № 633. Доступ из справ.-правового портала «Гарант».
9. Тихонов О.С., Гриценко А.А., Жиров В.А. Технические аспекты построения перспективных систем подвижной спутниковой связи для России // Труды Научно-исследовательского института радио. 2009. № 4. С. 34–44.
10. Дворников С.В., Овчинников Г.Р., Балыков А.А. Программный симулятор ионосферного радиоканала декаметрового диапазона // Информация и космос. 2019. № 3. С. 6–12.
11. Предложение по адресованию пользователей перспективной сети радиосвязи специального назначения / М.З. Лящук [и др.] // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 5. С. 32–35.
12. Бобков В., Званцугов Н. Технологии Радиосвязи 2020 – работа на перспективные проекты // Технологии и средства связи. 2020. № S1. С. 50–52.

13. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией / С.В. Дворников [и др.] // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32–35.
14. Коряков Д.А., Маркелов Н.Н., Поспелов А.Д. Перспективы развития КВ-радиосвязи на основе применения технологии SDR // Информационные системы и технологии. 2022. № 5 (133). С. 93–99.
15. Повышение эффективности приема в декаметровых линиях радиосвязи МЧС России / В.И. Власенко [и др.] // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 4. С. 91–100.
16. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Бурыкин Д.А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. № 2. С. 4–7.
17. Анализ помехоустойчивости передач с однополосной модуляцией в каналах с флуктуационными помехами / А.С. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2022. № 4. С. 58–64.
18. Леонов А., Наний О., Трешиков В. Совершенствование форматов модуляции в оптических системах связи DWDM // Первая миля. 2019. № 8 (85). С. 30–37.
19. Семисошенко М.А. Развитие средств и комплексов военной радиосвязи // Военная мысль. 2014. № 11. С. 28–36.
20. Дворников С.В., Дворников С.С., Марков Е.В. Модифицированные импульсные последовательности на основе кодов Баркера // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 1. С. 8–14. DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-1-8-14.
21. Приходько А.И., Стрикица Н.В. Корреляционно-спектральные характеристики сигналов с прямоугольной квадратурной амплитудной модуляцией // The Scientific Heritage. 2020. № 44-1 (44). С. 70–75.
22. Дворников С.В., Дворников С.С., Жеглов К.Д. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 2. С. 261–288. DOI: 10.15622/ia.22.2.2.
23. Дворников С.В., Дворников С.С., Крячко А.Ф. Компактные алгоритмы синтеза манипулированных сигналов в MathCAD // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2020. № 2. С. 104–113.
24. Павлов А.А. Синтез помехоустойчивых сигналов с амплитудной манипуляцией // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 99–105.
25. 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.
26. 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.
27. Зазулин Я.А., Карпунин П.Ю., Киреев К.В. Моделирование приёмной системы с амплитудной демодуляцией и временным разделением каналов в среде LabView // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 6. С. 10. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.6.10.
28. Иванов М.С., Понаморев А.В., Макаренко С.И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104–139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.
29. Дворников С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 268 с.
30. Фокин Г.А. Моделирование многолучевого радиоканала // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 59–78.

31. Евдокимова Е.О., Федосов В.П. Оценка параметров движения мобильных объектов на основании анализа частотно-временных распределений эхосигналов // Телекоммуникации. 2014. № 11. С. 25–29.

References

1. Dvornikov S.V., Kudryavcev A.M. Teoreticheskie osnovy chastotno-vremennogo analiza kratkovremennykh signalov: monografiya. SPb.: Voennaya akad. svyazi, 2010. 240 s. ISBN 978-5-91690-008-8.
2. Sinikov A.A., Asanin A.V. Effektivnost' funkcionirovaniya sistem radiosvyazi MCHS Rossii // Prioritetnye napravleniya razvitiya infokommunikacionnykh tekhnologij, sistem svyazi i opoveshcheniya RSCHS i GO: sb. trudov XXXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Himki: Akad. grazhdanskoj zashchity MCHS Rossii, 2021. S. 52–56. EDN IBVWHR.
3. Skripnik I.L. Primenenie standarta cifrovoj radiosvyazi dmr dlya upravleniya dejstviyami podrazdelenij MCHS Rossii // Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnykh prirodnykh yavlenij i chrezvychajnykh situacij: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. 2019. S. 388–393.
4. Seryanin S.S. Razvitie mobil'nykh kompleksov svyazi MCHS Rossii // Prioritetnye napravleniya razvitiya infokommunikacionnykh tekhnologij, sistem svyazi i opoveshcheniya RSCHS i GO: sb. trudov sekcii № 12 HKHXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Himki: Akad. grazhdanskoj zashchity MCHS Rossii, 2022. S. 24–27.
5. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V. Formirovanie spektral'no-effektivnykh signal'nykh konstrukcij v radiokanalah peredachi dannykh kontrol'no-izmeritel'nykh kompleksov // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. 2017. T. 60. № 3. S. 221–228. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228.
6. Papyrin V.V., Sidorov V.K. Nekotorye aspekty organizacii cifrovoj korotkovolnovoj radiosvyazi v Arktike // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2019. № 3. S. 1–6.
7. Sistema radiosvyazi v MCHS Rossii / S.V. Pacuk [i dr.] // Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti. 2022. № 2 (12). S. 41–49. DOI: 10.37657/vniipo.avpb.2022.56.71.005.
8. Ob utverzhenii Rukovodstva po radiosvyazi Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnykh bedstvij: prikaz MCHS Rossii ot 26 dek. 2018 g. № 633. Dostup iz sprav.-pravovogo portala «Garant».
9. Tihonov O.S., Gricenko A.A., Zhironov V.A. Tekhnicheskie aspekty postroeniya perspektivnykh sistem podvizhnoj sputnikovoj svyazi dlya Rossii // Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio. 2009. № 4. S. 34–44.
10. Dvornikov S.V., Ovchinnikov G.R., Balykov A.A. Programmnyj simulyator ionosfernogo radiokanala dekametrovogo diapozona // Informaciya i kosmos. 2019. № 3. S. 6–12.
11. Predlozhenie po adresovaniju pol'zovatelej perspektivnoj seti radiosvyazi special'nogo naznacheniya / M.Z. Lyashchuk [i dr.] // T-Comm: Telekommunikacii i transport. 2016. T. 10. № 5. S. 32–35.
12. Bobkov V., Zvancugov N. Tekhnologii Radiosvyazi 2020 – rabota na perspektivnye proekty // Tekhnologii i sredstva svyazi. 2020. № S1. S. 50–52.
13. Ocenka imitostojkosti kanalov upravleniya s chastotnoj modulyaciej / S.V. Dvornikov [i dr.] // Informaciya i kosmos. 2016. № 1. S. 32–35.
14. Koryakov D.A., Markelov N.N., Pospelov A.D. Perspektivy razvitiya KV-radiosvyazi na osnove primeneniya tekhnologii SDR // Informacionnye sistemy i tekhnologii. 2022. № 5 (133). S. 93–99.
15. Povyshenie effektivnosti priema v dekametrovykh liniyah radiosvyazi MCHS Rossii / V.I. Vlasenko [i dr.] // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2022. № 4. S. 91–100.
16. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Burykin D.A. Strukturno-funkcional'naya model' signal'nogo sozvezdiya s povyshennoj pomekhoustojchivost'yu // Informaciya i kosmos. 2015. № 2. S. 4–7.

17. Analiz pomekhoustojchivosti peredach s odnopolosnoj modulyaciej v kanalakh s fluktuacionnymi pomekhami / A.S. Dvornikov [i dr.] // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2022. № 4. S. 58–64.
18. Leonov A., Naniy O., Treshchikov V. Sovershenstvovanie formatov modulyacii v opticheskikh sistemah svyazi DWDM // Pervaya milya. 2019. № 8 (85). S. 30–37.
19. Semisoshenko M.A. Razvitie sredstv i kompleksov voennoj radiosvyazi // Voennaya mysl'. 2014. № 11. S. 28–36.
20. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Markov E.V. Modificirovannye impul'snye posledovatel'nosti na osnove kodov Barkera // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2022. T. 8. № 1. S. 8–14. DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-1-8-14.
21. Prihod'ko A.I., Strikica N.V. Korrelyacionno-spektral'nye harakteristiki signalov s pryamougol'noj kvadraturnoj amplitudnoj modulyaciej // The Scientific Heritage. 2020. № 44-1 (44). S. 70–75.
22. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Zheglov K.D. Pomekhoustojchivost' signalov odnopolosnoj modulyacii s upravlyaemym urovnem nesushchego kolebaniya // Informatika i avtomatizaciya. 2023. T. 22. № 2. S. 261–288. DOI: 10.15622/ia.22.2.2.
23. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Kryachko A.F. Kompaktnye algoritmy sinteza manipulirovannyh signalov v MathCAD // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 2. S. 104–113.
24. Pavlov A.A. Sintez pomekhoustojchivyh signalov s amplitudnoj manipulyaciej // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2023. № 2. S. 99–105.
25. 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.
26. 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.
27. Zazulin Ya.A., Karpunin P.Yu., Kireev K.V. Modelirovanie priyomnoj sistemy s amplitudnoj demodulyaciej i vremennym razdeleniem kanalov v srede LabView // Zhurnal radioelektroniki. 2018. № 6. S. 10. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.6.10.
28. Ivanov M.S., Ponamorenov A.V., Makarenko S.I. Metodika povysheniya skorosti peredachi dannyh v seti vozduшной radiosvyazi upravleniya letatel'nymi apparatami za schet adaptivnogo raspredeleniya setevogo chastotno-vremennogo resursa s uchetom intensivnosti peredavaemogo trafika // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2022. № 1. S. 104–139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.
29. Dvornikov S.V. Teoreticheskie osnovy sinteza bilinejnyh raspredelenij. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2007. 268 s.
30. Fokin G.A Modelirovanie mnogoluchevogo radiokanala // Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2021. T. 9. № 1. S. 59–78.
31. Evdokimova E.O., Fedosov V.P. Ocenka parametrov dvizheniya mobil'nyh ob"ektov na osnovanii analiza chastotno-vremennyh raspredelenij ekhosignalov // Telekommunikacii. 2014. № 11. S. 25–29.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.04.2023; одобрена после рецензирования: 25.05.2023;
принята к публикации: 26.05.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.04.2023; approved after review: 25.05.2023;
accepted for publication: 26.05.2023

Информация об авторах:

Дворников Сергей Сергеевич, старший преподаватель кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств (Кафедра 23) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67); научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи им. С.М. Буденного, кандидат технических наук, e-mail: dvornik92@mail.com

Дворников Сергей Викторович, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67); профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, доктор технических наук, профессор, e-mail: practicdsv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Бибарсов Марат Рашидович, старший преподаватель Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3), кандидат технических наук, доцент, e-mail: bibarsovmr@rambler.ru

Погорелов Андрей Анатольевич, доцент кафедры Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3), кандидат технических наук, доцент, e-mail: anpog@yandex.ru

Information about authors:

Dvornikov Sergey S., senior lecturer of the department of design and technology of electronic and laser devices (Department 23) Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67); researcher of the research department of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, candidate of technical sciences, e-mail: dvornik92@mail.com

Dvornikov Sergey V., professor of the department of radio engineering and optoelectronic complexes (Department 21) Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (190000, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67); professor of the department of radio communications of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, doctor of technical sciences, professor, e-mail: practicdsv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Bibarsov Marat R., senior lecturer of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: bibarsovmr@rambler.ru

Pogorelov Andrey A., associate professor of the department Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: anpog@yandex.ru