

Научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами

М. Р. Бибарсов^{1,2✉}, С. В. Дворников^{1,2}, А. Ф. Крячко², А. В. Пшеничников¹

¹ Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация

Введение. Одной из важнейших задач в современных телекоммуникационных системах является повышение помехоустойчивости приема сигналов в каналах с переменными параметрами. Например, в линиях связи стандартов DVB-T2, DVB-S и DVB-S2/S2X широко применяются сигнальные конструкции (СК) многопозиционной квадратурной амплитудной модуляции (М-КАМ). Однако, как показывает анализ научных публикаций, случайный характер изменения фаз трансформированного сигнального созвездия приводит к потерям помехоустойчивости сигналов М-КАМ. Технические решения для эффективного приема таких сигналов проработаны в недостаточной степени. Предлагаемая структурная схема устройства приема квадратурных амплитудных сигналов и алгоритм функционирования амплитудно-фазового детектора позволяют учитывать и компенсировать случайные изменения фазы.

Цель работы. Разработка научно-технических предложений по повышению эффективности приема сигналов М-КАМ в радиоканалах со случайным изменением фазы.

Материалы и методы. Полученные результаты описаны на основе теории связи, теории сигналов в предметной области методов исследования помехоустойчивости.

Результаты. Предложена структурная схема устройства приема квадратурных амплитудных сигналов и алгоритм функционирования амплитудно-фазового детектора, позволяющие учитывать и компенсировать случайные изменения фазы. Сформулированы научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости приема М-КАМ в каналах с переменными параметрами.

Заключение. Разработанные научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости многопозиционных квадратурных сигналов в каналах с переменными параметрами обосновывают целесообразность использования трансформированной СК М-КАМ с улучшенными энергетическими характеристиками; применение разработанного устройства приема обработки квадратурных амплитудных сигналов и алгоритма функционирования амплитудно-фазового детектора. Полученные результаты позволяют производить демодуляцию с одновременной компенсацией фазовых искажений для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-КАМ.

Ключевые слова: многопозиционные сигналы, канал с переменными параметрами, помехоустойчивость СК, сигнальное созвездие, фазовые искажения, вероятность парной ошибки, отношение сигнал/шум, квадратурная амплитудная модуляция

Для цитирования: Научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / М. Р. Бибарсов, С. В. Дворников, А. Ф. Крячко, А. В. Пшеничников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-15

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.10.2023; принята к публикации после рецензирования 16.11.2023; опубликована онлайн 29.12.2023

Scientific and Engineering Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters

Marat R. Bibarsov^{1,2✉}, Sergey V. Dvornikov^{1,2},
Alexander F. Kryachko², Alexander V. Pshenichnikov¹

¹ Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Abstract

Introduction. An important task faced by the developers of modern telecommunication systems consists in increasing the noise immunity of signal reception in channels with variable parameters. Thus, the communication lines of DVB-T2, DVB-S, and DVB-S2/S2 standards widely apply signal structures (SS) of multi-position quadrature amplitude modulation (M-QAM). However, an analysis of scientific publications shows that the random nature of the phase change of the transformed signal constellation leads to a loss of noise immunity of the M-QAM signals. Engineering solutions for the effective reception of such signals are lacking. The proposed block diagram of a device for receiving quadrature amplitude signals and the developed operation algorithm for an amplitude-phase detector allow random phase changes to be considered and reduced.

Aim. Development of scientific and engineering proposals to improve the efficiency of receiving M-QAM signals in radio channels with random phase changes.

Materials and methods. The study was conducted using the methods of noise immunity research, as well as communication theory and signal theory.

Results. A block diagram of a device for receiving quadrature amplitude signals and an operation algorithm for an amplitude-phase detector were proposed, which allow random phase changes to be considered and compensated for. Scientific and engineering proposals were formulated to improve the noise immunity of M-QAM reception in channels with variable parameters.

Conclusion. The developed scientific and engineering proposals for increasing the noise immunity of multi-position quadrature signals in channels with variable parameters substantiate both the feasibility of using a transformed SS M-QAM with improved energy characteristics, as well as the application of the developed receiving device for processing quadrature amplitude signals and the operation algorithm of an amplitude-phase detector. The results obtained make it possible to perform demodulation with simultaneous compensation of phase distortions to increase the noise immunity of M-QAM signal reception.

Keywords: multi-position signals, channel with variable parameters, signal structure noise immunity, signal constellation vector, phase distortions, pair error probability, signal-to-noise ratio, quadrature amplitude modulation

For citation: Bibarsov M. R., Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Scientific and Engineering Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-6-15

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 15.10.2023; accepted 16.11.2023; published online 29.12.2023

Введение. Исследование свойств многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами, которые находят широкое применение в различных радиотехнических системах, отражено во многих научных работах [1–13]. В частности, сигнальные конструкции (СК) многопозиционной квадратурной амплитудной

модуляции (М-КАМ) представляют собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, фазы которых отличаются на 90°. Каждое колебание при этом модулируется по амплитуде. Таким образом, в таких СК изменяется как фаза, так и амплитуда сигнала, что позволяет увеличить количество информации, передаваемой

одним состоянием сигнала. Принцип использования двух независимо модулируемых несущих лежит в основе квадратурной модуляции. Широкое распространение получила М-КАМ с уровнями амплитуды 16, 32, 64, 128 и 256.

Благодаря своим энергетическим и спектральным характеристикам СК М-КАМ эффективно применяются в различных цифровых системах передачи информации с высокой пропускной способностью, например в современных линиях связи коммуникационных стандартов DVB-T2, DVB-S и DVB-S2/S2X.

Каждый сигнал М-КАМ геометрически изображают вектором в сигнальном пространстве. Причем концы векторов в нем отображаются в виде сигнальных точек, координаты которых определяются значениями комплексных чисел. Точки на диаграмме называют сигнальными точками (или точками созвездия). Они представляют множество модулирующих символов, т. е. модулирующий алфавит (ансамбль) или сигнальное созвездие (СС). Расстояние между двумя ближайшими точками созвездия определяет помехоустойчивость манипуляции.

Сигнал при прохождении по каналу связи подвергается искажению по причине влияния аддитивного белого шума, замираний, многолучевого распространения, затухания, помех, несовершенства радиоаппаратуры и т. п. Сигнальное созвездие позволяет упростить обнаружение искажений сигнала: белый шум представляется как размытые точки СС; некогерентная одночастотная интерференция выглядит как круги вместо точки СС; фазовые искажения видны как сигнальные точки СС, распределённые по кругу; затухание сигнала приводит к тому, что точки СС, находящиеся по углам, оказываются ближе к центру, чем должны быть.

Необходимо отметить, что при равном числе точек в сигнальном созвездии спектр сигналов М-КАМ идентичен спектру многопозиционных фазоманипулированных (М-ФМ) сигналов. Однако СК М-КАМ имеют лучшую помехоустойчивость, поскольку расстояние между сигнальными точками при М-ФМ меньше расстояния между сигнальными точками при М-КАМ. С другой стороны, по показателю пик-фактора сигналы М-ФМ являются более востребованными. Кроме того, как для сигналов М-КАМ,

так и для сигналов М-ФМ необходимо поддерживать баланс между получением высоких скоростей передачи информации и поддержания приемлемой скорости битовых ошибок.

С увеличением порядка модуляции в системах с сигналами М-КАМ возрастает скорость передачи информации. Увеличение скорости передачи данных приводит к увеличению числа точек СС, и расстояние между ними уменьшается, следовательно, возрастает вероятность ошибок при распознавании символа. Кроме того, сигналы М-КАМ чувствительны к изменению параметров синхронизации, особенно к фазовым искажениям, вносимым в канале радиосвязи.

В [12] разработаны технические решения для приема и демодуляции сигналов шестнадцатипозиционной квадратурной амплитудной манипуляции 16-КАМ. Однако указанные практические реализации имеют общий недостаток: низкая помехоустойчивость приема сигналов в каналах со случайным изменением фазы.

Таким образом, анализ научной литературы, посвященной использованию в системах передачи информации сигналов М-КАМ, показал следующее:

- недостаточная степень исследования помехоустойчивости сигналов М-КАМ в настоящее время, особенно в каналах со случайным изменением фазы;
- целесообразность применения трансформированных СК, устраняющих указанные недостатки;
- необходимость разработки технических решений, позволяющих осуществлять прием и демодуляцию сигналов М-КАМ в каналах со случайным изменением фазы.

Целью настоящей статьи является разработка научно-технических предложений по повышению эффективности приема сигналов М-КАМ в радиоканалах со случайным изменением фазы.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе анализа свойств трансформированных СК 16-КАМ и зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (ОСШ) с учетом фазовых искажений разработать структурную схему устройства приема квадратурных амплитудных сигналов.

2. Разработать алгоритм функционирования амплитудно-фазового детектора.

Структурная схема устройства приема квадратурных амплитудных сигналов в каналах со случайным изменением фазы. В [8] представлены трансформированные модели сигнала 16-КАМ (рис. 1, 2) и получены аналитическая и графическая зависимости вероятности парной ошибки от ОСШ для этих моделей, в том числе с учетом фазовых искажений (рис. 3). Анализ рис. 1, 2 показывает примерное

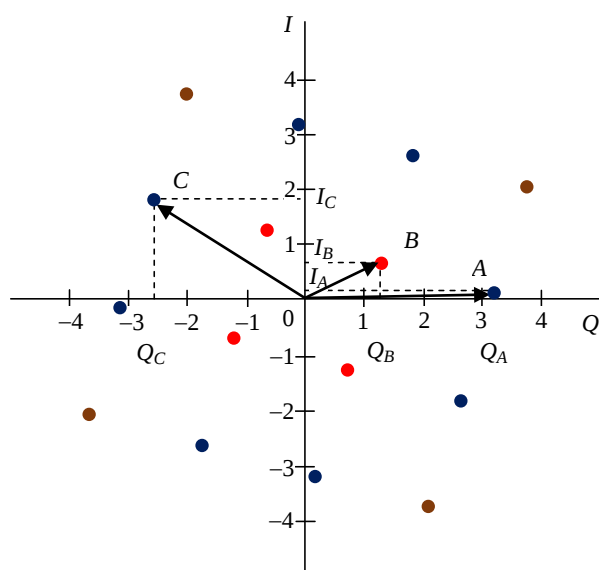


Рис. 1. Модель сигнала КАМ-16, трансформированная по телевизионному стандарту DVB-T2

Fig. 1. Model of the QAM-16 signal, transformed according to the DVB-T2 standard

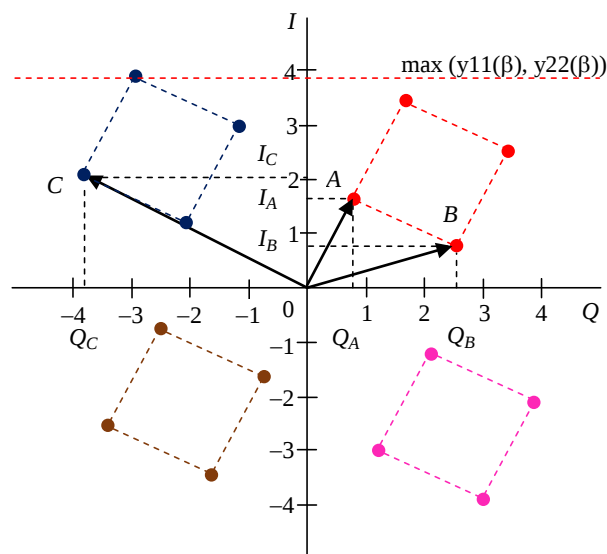


Рис. 2. Модель сигнала КАМ-16, трансформированная по телевизионному стандарту DVB-T2

Fig. 2. Model of the QAM-16 signal, transformed according to the DVB-T2 standard

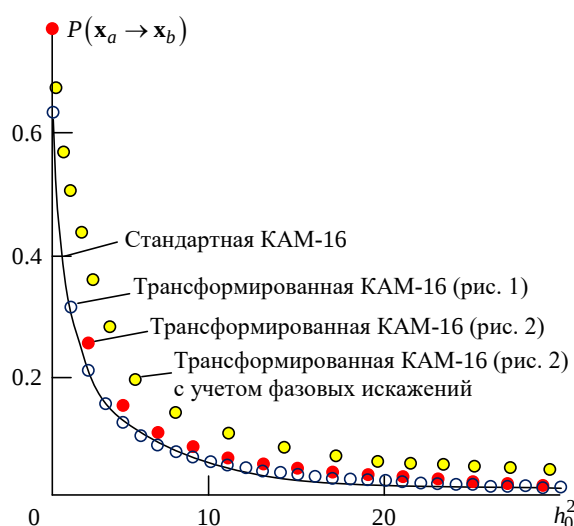


Рис. 3. Зависимость вероятности парной ошибки от отношения сигнал/шум

Fig. 3. Dependence of the pair error probability on the signal-to-noise ratio

равенство значений вероятности ошибки на символ в зависимости от ОСШ, поскольку расстояния между точками СС практически не изменяются и в первом, и во втором случае.

Между тем определение средней энергии и пик-фактора методом имитационного моделирования показало, что значения совокупности этих показателей предпочтительней у модели сигнала 16-КАМ, созвездия которых представлены на рис. 2. В частности, по показателю пик-фактора был получен выигрыш порядка 7.5 %. Однако вследствие этого проигрыш в средней энергии полученного сигнала составил 1.1 %. Таким образом, энергетический выигрыш, полученный за счет предложенной трансформации СС 16-КАМ (рис. 2), определяет увеличение помехоустойчивости приема исходного сигнала.

Следующее аналитическое соотношение учитывает случайный характер изменения фаз трансформированного сигнального созвездия:

$$P(\mathbf{x}_a \rightarrow \mathbf{x}_b) = 0.5 [1 - \text{sgn}(q_m)] \times \exp\{-|q_m| k_m [1 + \text{sgn}(q_m)]\} - 0.5 \left[1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right]^{-0.5} \times \exp\{-[\text{sgn}(q_m) + 0.5 \times$$

$$\times \left(1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 \cdot P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right)^{-0.5} \Bigg\} +$$

$$+ 0.5 \operatorname{sgn}(q_m) \exp \left\{ - \left[\operatorname{sgn}(q_m) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \sqrt{1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 \cdot P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))}} k_m |q_m| \right] \right\} \frac{1}{k_1},$$

где $q_m = \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_a}}{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}$ и $k_m =$

$$= \frac{h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b)) + P_b / P_a - 1}{2 h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b))} - \text{промежуточ-$$

ные параметры, позволяющие рассчитать вероятность ошибки на символ с учетом эффективных значений мощности сигнала КАМ-16, а также текущего ОСШ; $\mathbf{x}_a = \sqrt{P_a} \cdot \mathbf{s}_a$ – вектор СС для точки A ; $\mathbf{x}_b = \sqrt{P_b} \cdot \mathbf{s}_b$ – вектор СС для точки B ; P_a , P_b – мощности вектора СС модели СК; $\mathbf{s}_a$, $\mathbf{s}_b$ – единичные векторы, определяющие положение точки вектора СС относительно осей синфазной и квадратурной составляющих; $\lambda^2 = |\mathbf{s}_a^T \times \mathbf{s}_b|^2$ – величина, определяющая взаимное расположение точек СС моделей КАМ-16 относительно друг друга, при этом $\lambda^2 \neq 1$; h_0^2 – текущее значение ОСШ; k_1 – параметр, учитывающий фазовые искажения, полученный методом имитационного моделирования при передаче трансформированной модели в многолучевом канале связи с релейскими замираниями.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности парной ошибки $P(\mathbf{x}_a \rightarrow \mathbf{x}_b)$ от текущего значения ОСШ h_0^2 : стандарта КАМ-16, трансформированной КАМ-16, трансформированной КАМ-16 по альтернативному варианту и трансформированной КАМ-16 с учетом фазовых искажений.

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 3, следует, что для обработки вышеуказанных сигналов целесообразно применение схемы Пистолькорса. Вместе с тем необходимо учесть многопозиционность и биортогональность СК. Такая разработанная авторами структурная схема устройства приема квадратурных амплитудных сигналов, учитывающая случайные изменения фазы в каналах с переменными параметрами, представлена на рис. 4.

Устройство функционирует следующим образом. Сигнал квадратурной амплитудной манипуляции поступает на вход полосового фильтра, где обеспечивается фильтрация принятого сигнала от помех. С выхода полосового фильтра принятый сигнал поступает одновременно на вход амплитудного детектора и на вход широкополосного ограничителя-усилителя, обеспечивающего ограничение амплитуды сигнала без существенного изменения ширины его спектра.

При этом амплитуда сигнала принимается за нормированное единичное значение. После широкополосного ограничения полученный сигнал возводится в квадрат с использованием квадратора. С квадратора единичное напряжение и сигнал с удвоенным значением фазы по-

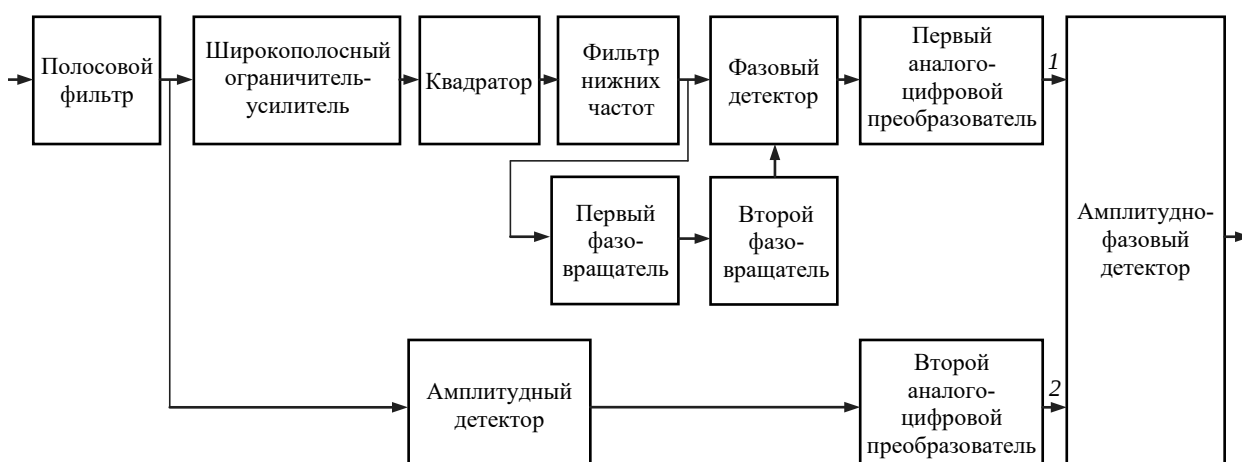


Рис. 4. Структурная схема устройства приема квадратурных амплитудных сигналов в каналах со случайным изменением фазы

Fig. 4. A block diagram of a device for receiving quadrature amplitude signals in channels with random phase changes

ступает на вход фильтра высоких частот, в котором отфильтровывается постоянное единичное напряжение.

Далее сигнал поступает одновременно на входы фазового детектора и первого фазовращателя. В первом фазовращателе фаза сигнала умножается на величину p , при этом p выбирается исходя из условия снятия манипуляции путем доведения фазы манипулирования $\varphi_{\text{ман}}$ до $2\pi, 4\pi, \dots$

Значение величины p может быть найдено следующим образом:

$$p = \frac{2n\pi}{\varphi_{\text{ман}}}; \quad n=1, 2, \dots$$

Таким образом, после прохождения первого фазовращателя в фазе сигнала остается только случайное кратное p изменение фазы. Второй фазовращатель осуществляет деление фазы сигнала на p . В результате получается опорное колебание для приема фазоманипулированных сигналов с учетом случайного изменения фазы.

Полученное опорное колебание подается на фазовый детектор, в котором осуществляется демодуляция сигнала с компенсацией случайного приращения фазы.

Значение напряжения фазы с выхода фазового детектора через первый аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий аналоговое напряжение в цифровую импульсную последовательность, поступает на первый вход амплитудно-фазового детектора. На второй вход амплитудно-фазового детектора поступает цифровая импульсная последовательность с выхода второго АЦП, соответствующая значениям амплитуды сигнала, поступающим с выхода амплитудного детектора. С выхода амплитудно-фазового детектора передается информационная битовая последовательность, полученная на основе значения фазы и амплитуды принимаемого сигнала.

Алгоритм функционирования амплитудно-фазового детектора. Амплитудно-фазовый детектор, в разработанном устройстве формирующий информационные биты в соответствии с поступающими на его входы кодовыми последовательностями, построен на программируемой логической интегральной схеме. Схема ам-

плитудно-фазового детектора может быть реализована, например, на базе интегральной микросхемы 5576 XC1T.

Алгоритм работы амплитудно-фазового детектора (рис. 5) включает следующие технологические этапы.

На первом технологическом этапе заполняется вектор исходных данных. Для этого двоичная последовательность, соответствующая значению фазы сигнала, передается в программируемую логическую интегральную схему с выхода первого АЦП, а с выхода второго АЦП – двоичная последовательность, соответствующая значению амплитуды сигнала.

На втором технологическом этапе поступившая кодовая последовательность, соответствующая фазе сигнала, сравнивается с пороговым значением фазы, на основе которого определяется фаза вектора сигнального созвездия. При этом пороговые значения фазы выбираются на основе углов векторов сигнального созвездия, обрабатываемого КАМ-сигнала.

На третьем технологическом этапе кодовая последовательность, соответствующая амплитуде сигнала, сравнивается с пороговым значением амплитуды, на основе которого определяется модуль вектора сигнального созвездия, соответствующего виду обрабатываемого КАМ-сигнала.

На четвертом технологическом этапе на основе сравнения формируется импульсная битовая последовательность, соответствующая фазе вектора сигнального созвездия и его модулю.

На последнем технологическом этапе через выход программируемой логической интегральной схемы осуществляется вывод сформированной импульсной битовой последовательности.

Заключение. Анализ полученных в статье результатов позволяет обобщить следующие основополагающие научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости многопозиционных квадратурных СК в каналах с переменными параметрами:

1. Анализ трансформированных СС 16-КАМ и зависимости вероятности ошибки от ОСШ позволяет сделать вывод о целесообразности использования модели СК согласно рис. 2. Изменение векторов СС на различные углы разных квадрантов в этой модели приводит к измене-

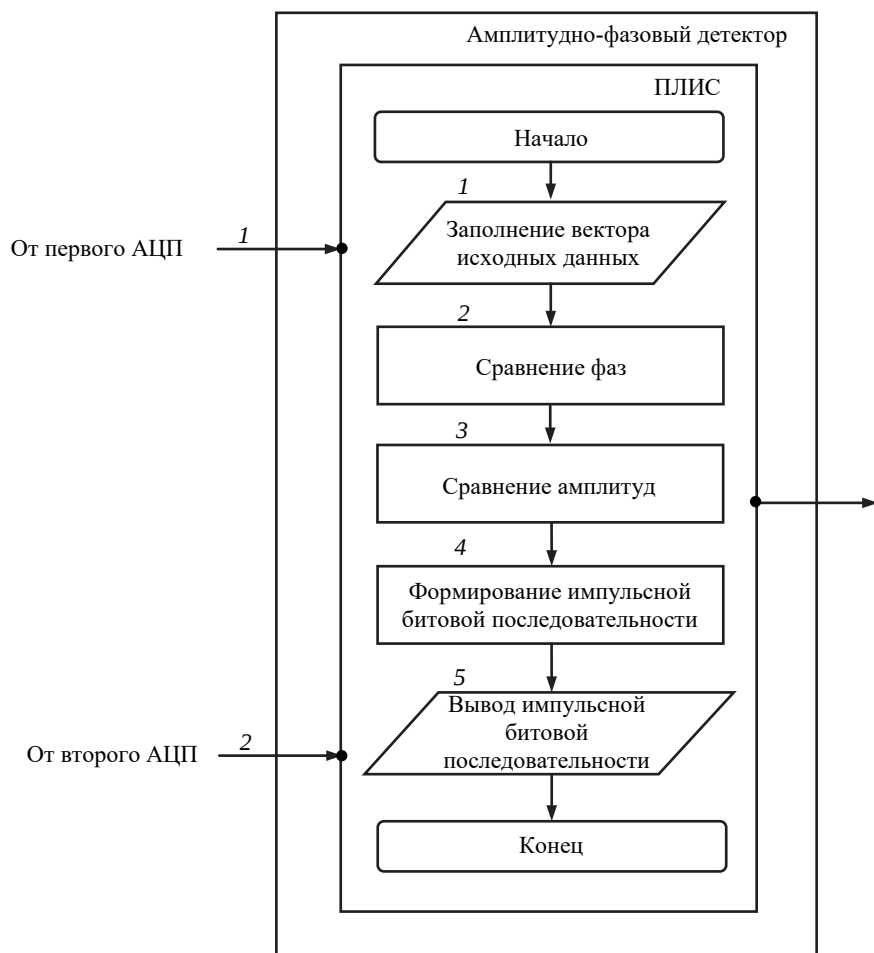


Рис. 5. Алгоритм функционирования амплитудно-фазового детектора

Fig. 5. An operation algorithm for an amplitude-phase detector

нию помехоустойчивости в канале с релейскими замираниями в отличие от модели на рис. 1.

2. Анализ функционирования разработанной структурной схемы устройства приема и обработки квадратурных амплитудных сигналов и алгоритма функционирования амплитудно-фазового детектора показывает целесообразность применения указанных технических решений. Такой вывод обосновывается благодаря новой совокупности существенных признаков с использованием разработанного устройства и алгоритма, обеспечивающих компенсацию случайного изменения фазы сигнала и, таким образом, повышение помехоустойчивости его приема (рис. 3–5).

Таким образом, в статье представлены базовые научно-технические предложения, позволяющие повысить помехоустойчивость приема СК М-КАМ с учетом фазовых искажений, вносимых каналом связи с переменными параметрами.

Направлением дальнейшего рассмотрения вопросов повышения помехоустойчивости приема многопозиционных СК в каналах с переменными параметрами авторы считают исследование обработки амплитудных и фазовых значений сигнала, предполагающее различие трактов по частоте-поляризации и определяющее точность устранения фазовых искажений [14–17].

Авторский вклад

Бибарсов Марат Рашидович – компьютерное моделирование и формирование структуры статьи.

Дворников Сергей Викторович – общая идея разработки научно-технических предложений.

Крячко Александр Федотович – обработка результатов моделирования.

Пшеничников Александр Викторович – формирование структурной схемы и алгоритма.

Author's contribution

Marat R. Bibarsov, computer modeling and formation of the structure of the article.

Sergey V. Dvornikov, general idea of developing scientific and technical proposals.

Alexander F. Kryachko, processing of simulation results.

Alexander V. Pshenichnikov, formation of a block diagram and algorithm.

Список литературы

1. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справ. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
2. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
3. Савищенко Н. В. Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и помехоустойчивость приема / под ред. Д. Л. Бураченко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 420 с.
4. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
5. Framing structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). DVB Document A122. URL: https://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf (дата обращения 04.04.23)
6. Chen Y. M., Ueng Y. L. Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Rayleigh Block Fading Channels // IEEE Transaction on communication. 2013. Vol. 61, № 1. P. 217–226. doi: 10.1109/TCOMM.2012.101712.120023
7. Raphaeli D. Noncoherent coded modulation // IEEE Transaction on communication. 1996. Vol. 44, № 2. P. 172–183.
8. Теоретические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. Ф. Крячко, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15
9. Пшеничников А. В. Интегральная модель радиолинии в конфликтной ситуации // Информация и космос. 2016. № 4. С. 39–45.
10. Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Информационно-управляющие системы. 2019. № 4. С. 62–68. doi: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68
11. Анализ потерь помехоустойчивости в условиях медленных замираний / А. А. Русин, М. Р. Бибарсов, Б. А. Аюков, Д. Ю. Гордиенко, С. А. Лященко, С. В. Дворников, А. А. Устинов // Вопр. радиоэлектроники. Техника телевидения. 2022. № 1. С. 81–85.
12. Метод оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций квадратурной модуляции с трансформированными констелляционными диаграммами / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, В. П. Эконом // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 51–56.
13. Сотников А. М. Демодуляция фазоманипулированного сигнала // Тр. МАИ. 2011. № 45. С. 1–7.
14. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д. Д. Габриэльян, А. Е. Коровкин, С. И. Бойчук, С. В. Дворников, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-41-51
15. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога / С. В. Дворников, А. А. Устинов, А. В. Пшеничников, В. В. Борисов, А. Г. Москалец, Д. А. Бурыкин // Вопр. радиоэлектроники. Техника телевидения. 2013. № 2. С. 90–97.
16. Френкс Л. Теория сигналов / пер. с англ. Д. Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
17. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

Информация об авторах

Бибарсов Марат Рашидович – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 184 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации; адаптивные антенные системы.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: Bibarsovmr@rambler.ru

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук (2009), профессор (2014) кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 428 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия
E-mail: practicsv@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук (2005), профессор (2008), заведующий кафедрой радиосвязи радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 175 научных работ. Сфера научных интересов – прикладная электродинамика; анализ и разработка управляющих информационных комплексов авиакосмических радиосистем телеметрии, связи и управления.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Морская Большая, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия
E-mail: kaf21@guar.ru

Пшеничников Александр Викторович – доктор технических наук (2018), профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 128 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия
E-mail: practicsv@yandex.ru

References

1. Korzhik V. I., Fink L. M., Shchelkunov K. N. *Raschet pomekhoustoichivosti sistem peredachi diskretnykh soobshchenii* [Calculation of Noise Immunity of Discrete Message Transmission Systems]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1981, 232 p. (In Russ.)
2. Klovskii D. D. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po radiokanalam* [Transmission of Discrete Messages Via Radio Channels]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1982, 304 p. (In Russ.)
3. Savishchenko N. V. *Mnogomernye signal'nye konstruksii: ikh chastotnaya effektivnost' i pomekhoustoichivost' priema* [Multidimensional Signal Constructions: Their Frequency Efficiency and Reception Stability]. Ed. by D. L. Burachenko. St Petersburg, *Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta*, 2005, 420 p. (In Russ.)
4. Prokis J. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital Communication]. Transl. and ed. by D. D. Klovskii. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2000, 800 p. (In Russ.)
5. Framing Structure, Channel Encoding and Modulation for the Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2). Document DVB A122. Available at: https://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVB-T/a122_DVB-T2_spec.pdf (accessed 04.04.23)
6. Chen Y. M., Ueng Y. L. Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Raleigh Block Fading Channels. *IEEE Transaction on communication*. 2013, vol. 61, no. 1, pp. 217–226. doi: 10.1109/TCOMM.2012.101712.120023
7. Raphaeli D. Noncoherent Coded Modulation. *IEEE Transaction on Communication*. 1996, vol. 44, no. 2, pp. 172–183.
8. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Kryachko A. F., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Theoretical Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15 (In Russ.)
9. Pshenichnikov A. V. Radio Line Integral Model in a Conflict Situation. *Information and Space*. 2016, no. 4, pp. 39–45. (In Russ.)
10. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Analysis of Frequency Resource for FHSS mode. *Information and Control Systems*. 2019, no. 1, pp. 62–68. doi: 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68 (In Russ.)
11. Rusin A. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A., Gordienko D. Yu., Lyashchenko S. A., Dvornikov S. V., Ustinov A. A. Analysis of Immunity Losses Under Slow Fading. *Radio Electronics Issues. The TV Technique Series*. 2022, no. 1, pp. 81–85 (In Russ.)
12. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Econom V. P. Method of Evaluation of Immunity of Quadrature Modulation Signal Structures with Transformed Constellation Diagrams. *Radio Industry*. 2017, no. 1, pp. 51–56. (In Russ.)
13. Sotnikov A. M. Demodulation of the Phase-Manipulated Signal. *Trudy MAI*. 2011, no. 45, pp. 1–7. (In Russ.)
14. Gabriel'ean D. D., Korovkin A. E., Boychuk S. I., Dvornikov S. V., Bibarsov M. R., Bibarsova G. S. Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency-Polarization. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-41-51 (In Russ.)
15. Dvornikov S. V., Ustinov A. A., Pshenichnikov A. V., Borisov V. V., Moskalets A. G., Burykin D. A. Demodulation of OFT Signals Based on Adaptive Threshold. *Radio Electronics Issues. The TV technique series*. 2013, no. 2, pp. 90–97. (In Russ.)
16. Franks L. *Signal Theory*. N. J., Prentice-Hall, 1969, 317 p.
17. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1989, 656 p. (In Russ.)

Information about the authors

Marat R. Bibarsov, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Associate Professor (2007), Senior Lecturer of the Radio Communications Department of the Military Telecommunications Academy, Associate Professor of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 184 scientific publications. Area of expertise: information transmission and reception systems; adaptive antenna systems.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: bibarsovmr@rambler.ru

Sergey V. Dvornikov, Dr Sci. (Eng.) (2009), Professor (2014) of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy, Professor of the Department of Radio-engineering and Fiber-optic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 428 scientific publications. Area of expertise: radio technology; information transmission and reception systems; signal-code structures.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: practicsdv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Alexander F. Kryachko, Dr Sci. (Eng.) (2005), Professor (2008), Head of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 175 scientific publications. Area of expertise: applied electrodynamics; analysis and development of control information complexes for aerospace radio telemetry, communication and control systems.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Morskaya Bolshaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: kaf21@guap.ru

Alexander V. Pshenichnikov, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 128 scientific publications. Area of expertise: radio technology; information transmission and reception systems; signal-code structures.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: practicsdv@yandex.ru
