

Теоретические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами

С. В. Дворников^{1,2}, А. В. Пшеничников¹,
А. Ф. Крячко², М. Р. Бибарсов^{1,2}✉, Г. Ш. Бибарсова¹

¹ Военная академия связи им. Маршала Советского Союза
С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время для повышения помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами применяют различные сигнальные конструкции (СК). В частности, в системах связи и телевизионном стандарте DVB-T2 это сигналы квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) с трансформированными констелляционными диаграммами. Однако существующие модели СК при практических расчетах систем связи не учитывают случайный характер изменения фаз трансформированного сигнального созвездия. Это, в свою очередь, приводит к расхождению аналитического значения вероятности ошибки с реальным вследствие асинхронизма в радиолинии. Предлагаемая модель СК и полученное аналитическое соотношение позволяют учитывать вносимые фазовые искажения в каналах с переменными параметрами.

Цель работы. Разработка теоретических предложений по повышению эффективности приема сигналов КАМ в радиоканалах с переменными параметрами.

Материалы и методы. Рассматриваемая трансформированная модель СК и полученное аналитическое соотношение описаны на основе теории связи, теории сигналов в предметной области методов исследования помехоустойчивости. Это, в свою очередь, позволяет проанализировать влияние фазовых искажений в каналах с переменными параметрами на значение вероятности ошибки приема элементов сигналов КАМ.

Результаты. Предложена трансформированная модель СК с улучшенными энергетическими характеристиками и аналитическое соотношение для расчета вероятности ошибки приема элементов сигналов КАМ. Сформулированы теоретические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами.

Заключение. Разработанные теоретические предложения по повышению помехоустойчивости многопозиционных квадратурных сигнальных конструкций в каналах с переменными параметрами позволяют улучшить их энергетические характеристики с учетом фазовых искажений, вносимых каналом связи. Представленная зависимость дает возможность оценить взаимосвязь между значениями вероятности парной ошибки приема элементов сигналов КАМ и пределами изменения фазовых сдвигов, вносимых каналом связи с переменными параметрами. Кроме того, указанные теоретические предложения предопределили направления дальнейших исследований, заключающиеся в разработке научно-практических предложений по повышению помехоустойчивости квадратурных многопозиционных сигналов: алгоритм и структурную схему компенсации фазовых сдвигов, вносимых в каналах связи; обработку амплитудных значений сигнала, предполагающую различие трактов по частоте-поляризации и определяющую точность устранения фазовых искажений.

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

Для цитирования: 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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.02.2023; принята к публикации после рецензирования 16.03.2023; опубликована онлайн 28.04.2023

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

Sergey V. Dvornikov^{1,2}, Alexander V. Pshenichnikov¹,
Alexander F. Kryachko², Marat R. Bibarsov^{1,2}✉, Gulnara Sh. Bibarsova¹

¹ Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

Abstract

Introduction. At present, the noise immunity of receiving multi-position signals in channels with variable parameters is improved using various signal structures (SS). In particular, in communication systems and the DVB-T2 television standard, these are quadrature amplitude modulation (QAM) signals with transformed constellation diagrams. However, in practical calculations of communication systems, the existing SS models fail to take into account the random nature of changes in the phases of the transformed signal constellation. This, in turn, leads to a discrepancy between the analytical value of error probability and its real value due to asynchronism in the radio link. The SS model proposed in this paper and the obtained analytical ratio take into account the introduced phase distortions in channels with variable parameters.

Aim. Development of theoretical proposals for improving the efficiency of receiving QAM signals in radio channels with variable parameters.

Materials and methods. The considered transformed SS model and the resulting analytical relation are described on the basis of communication theory and signal theory in the subject area of noise immunity research methods. This, in turn, enables analysis of the effect of phase distortions in channels with variable parameters on the error probability of receiving QAM signal elements.

Results. A transformed SS model with improved energy characteristics and an analytical relation for calculating the error probability of receiving QAM signal elements are proposed. Theoretical proposals for improving the noise immunity of receiving multi-position signals in channels with variable parameters are formulated.

Conclusion. The developed theoretical proposals for improving the noise immunity of multi-position quadrature signal structures in channels with variable parameters make it possible to improve their energy characteristics, taking into account phase distortions introduced by the communication channel. The presented dependence makes it possible to evaluate the relationship between the values of the probability of a pair error of receiving QAM signal elements and the limits of the change in phase shifts introduced by a communication channel with variable parameters. Future research will address the development of scientific and practical proposals for improving the noise immunity of quadrature multi-position signals, including an algorithm and block diagram for compensating phase shifts introduced in communication channels; processing of the amplitude values of the signal, which assumes the difference in the paths in terms of frequency-polarization and determines the accuracy of eliminating phase distortions.

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

For citation: 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. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15

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

Submitted 15.02.2023; accepted 16.03.2023; published online 28.04.2023

Введение. В современных условиях развития радиотехники с точки зрения повышения помехоустойчивости особое внимание привлекают многопозиционные сигналы в каналах с

переменными параметрами [1–7]. В частности, это сигнальные конструкции (СК) квадратурной амплитудной модуляции (КАМ), которые получают разложением на синфазную и квад-

ратурную составляющие сигнала. Такие СК широко применяют в системах связи и телевизионном стандарте DVB-T2.

Ансамбль сигнала КАМ содержит точки, находящиеся на разном расстоянии от начала координат на сигнальном созвездии (СС). Энергия сигнала непостоянна и зависит от конкретной реализации сигнала. Сигнальное пространство при КАМ используется более эффективно при одинаковой позиционности модуляции, чем при фазовой манипуляции, что проявляется в увеличении минимального расстояния между сигнальными точками СС.

Известно [1–4], что критерием помехоустойчивости СК является минимальное евклидово расстояние (МЕР), характеризующее степень различимости сигналов. При фиксированном МЕР увеличение размера СС приводит к увеличению средней энергии на символ. Это, в свою очередь, снижает чувствительность приемника. Текущее значение отношения сигнал/шум (ОСШ), необходимое для заданной вероятности ошибок в битах, зависит от формы созвездия с их различным количеством и расположением точек СС.

С другой стороны, помехоустойчивость СК также определяется отношением максимальной мощности сигнала к ее среднему значению. Этот энергетический показатель известен как пик-фактор (ПФ).

Более предпочтительными, с точки зрения значения ПФ, являются сигналы фазовой манипуляции. Однако по показателю МЕР сигналы КАМ более помехоустойчивы.

Необходимо отметить, что стандартные сигналы квадратурной амплитудной модуляции практически не реализуются в современных системах радиосвязи, поскольку обладают низкими энергетическими характеристиками и наиболее чувствительны к изменению параметров синхронизации, особенно к вносимым фазовым искажениям в канале радиосвязи. Поэтому целесообразно применение трансформированных СК, устраняющих указанные недостатки.

Целью настоящей статьи является разработка теоретических предложений по повышению эффективности приема сигналов КАМ в радиоканалах с переменными параметрами.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ энергетических показателей многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами.
2. Анализ трансформированных СС КАМ-16.
3. Вывод основных соотношений, связывающих вероятность парной ошибки с текущим значением ОСШ.
4. Численное моделирование и выявление на основе полученных результатов наиболее общих закономерностей, связывающих вероятность парной ошибки с ОСШ для моделей СК: стандартной КАМ-16, трансформированной КАМ-16, трансформированной КАМ-16 по альтернативному варианту, трансформированной КАМ-16 с учетом фазовых искажений.

Энергетические показатели квадратурных сигналов. Сигнал, поступающий на вход приемника, определяется как физически реализуемая функция:

$$z(t) = q(t)s_n(t) + \xi(t)M; \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $q(t)$ – коэффициент передачи канала радиосвязи; $s_n(t)$ – многопозиционный сигнал, принимающий одно из M возможных значений ($n = \overline{0, M-1}$); $\xi(t)$ – аддитивный белый гауссов шум; T – длительность импульса.

Для классической модели с аддитивным белым гауссовым шумом коэффициент передачи канала радиосвязи определяется как $q(t) = 1$. В случае если q является случайной величиной, т. е. $q(t) = q$, получаем модель радиоканала с амплитудными (неселективными) замираниями. При этом сигнал в виде символа практически не расширяется, а межсимвольные искажения отсутствуют. Фаза принимаемого сигнала будет оцениваться практически без ошибок, если $T < \tau_s$, где τ_s – интервал замираний.

Согласно [1–3] принимаемый сигнал представим в следующем виде:

$$s_n(t) = \sum_{v=1}^N s_{nv} \varphi_v(t),$$

где N – количество базисных функций; $\varphi_v(t)$ – базисные функции. Тогда это позволяет геометрически интерпретировать сигнал $s_n(t)$.

Энергия многопозиционного сигнала в этом случае определяется следующим выражением:

$$E_n = \sum_{v=1}^N s_{nv}^2. \quad (1)$$

Рассмотрим энергетические показатели модели сигнала $s_n(t)$, определяющие ее помехоустойчивость. Выражение для определения МЕР имеет вид

$$d_{nk} = \sqrt{\sum_{v=1}^N (s_{nv} - s_{kv})^2} = \sqrt{E_n + E_k - E_{nk}}, \quad (2)$$

где $n, k = \overline{0, M-1}$; E_n, E_k – собственные энергии n -го и k -го импульсов; E_{nk} – взаимная энергия импульсов. При $n \neq k$: $d_{nk} \neq 0$.

В соответствии с определением запишем выражение для ПФ:

$$\Pi^2 = E_{\max}/E_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где $E_{\max}, E_{\text{ср}}$ – максимальная и средняя энергия импульса.

Формулы (1)–(3) определяют коэффициенты помехоустойчивости СС при максимальной и средней энергии сигнала:

$$G_{\max} = \left(\frac{d_{nk}}{2\sqrt{E_{\max}}} \right)^2; \quad G_{\text{ср}} = \left(\frac{d_{nk}}{2\sqrt{E_{\text{ср}}}} \right)^2. \quad (4)$$

Максимальное и среднее ОСШ при этом можно представить в следующем виде:

$$h_{\max}^2 = \frac{E_{\max}}{N_0}; \quad h_{\text{ср}}^2 = \frac{E_{\text{ср}}}{N_0}, \quad (5)$$

где N_0 – спектральная плотность шума.

Тогда с учетом (3)–(5) максимальную энергию сигнала представим следующим образом:

$$h_{\max}^2 = \Pi^2 \frac{E_{\text{ср}}}{N_0}. \quad (6)$$

Выражения для определения, соответственно, максимальной и средней энергии, затраченной для передачи одного бита, будут иметь вид

$$E_{b\max} = \frac{E_{\max}}{\log_2 M}; \quad E_{b\text{ср}} = \frac{E_{\text{ср}}}{\log_2 M}. \quad (7)$$

Из (5)–(7) получим максимальное и среднее ОСШ:

$$h_{b\max}^2 = \frac{E_{b\max}}{N_0}; \quad h_{b\max}^2 = \Pi^2 h_{b\text{ср}}^2. \quad (8)$$

$$h_{b\text{ср}}^2 = \frac{E_{b\text{ср}}}{N_0}; \quad h_{\text{ср}}^2 = h_{b\text{ср}}^2 \log_2 M. \quad (9)$$

Таким образом, проведенный анализ энергетических показателей квадратурных сигналов (1)–(9) позволяет сделать следующие выводы:

1. Помехоустойчивость различных моделей многопозиционных сигналов определяется только ее энергетическими показателями.

2. Повышение помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов определяется управлением ее параметров.

Трансформация модели сигнального созвездия КАМ-16. В качестве прототипа разрабатываемого сигнала для систем радиосвязи выберем модель КАМ-16. Такие сигналы имеют высокоскоростной модуляционный формат и в телевизионном стандарте DVB-T2 с трансформированными СС передаются по каналу: мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

В отличие от стандартной КАМ-16 в трансформированном СС по стандарту DVB-T2 осуществляется поворот всех точек сигнального созвездия на 16.8° (рис. 1) [5]. В результате

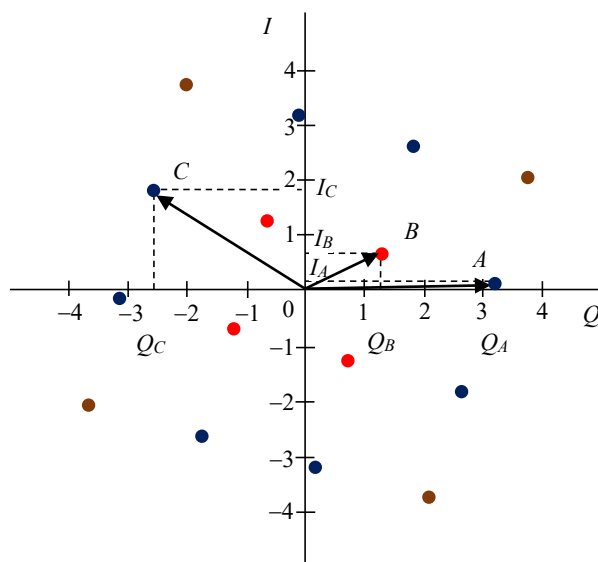


Рис. 1. Модель сигнала КАМ-16, трансформированная по телевизионному стандарту DVB-T2

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

такого сдвига СС значения I_A и Q_A больше не встречаются ни у одной из точек конstellяционной диаграммы, кроме точки A (см. рис. 1). Таким образом, каждая точка в модели сигнала КАМ-16 получает свои уникальные координаты по осям Q и I , которые принадлежат только ей.

Модель сигнала КАМ-16, представленная на рис. 1, предоставляет возможность восстановления любой произвольной точки СС по одному из значений I_A или Q_A . Однако в полученной модели ее энергетические параметры не изменяются, поэтому стремление к более эффективному использованию сигнального пространства привело к разработке другой модели СК КАМ-16, представленной на рис. 2 [8].

При разработке такой модели были сформулированы требования к трансформации СС:

- сохранение расстояния между точками СС при их повороте;
- должна обеспечиваться пара ее уникальных координат синфазной и квадратурной составляющих;
- должно быть реализовано независимое вращение векторов СС каждого из квадрантов СК.

Анализ моделей, представленных на рис. 1, 2, показывает примерное 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.

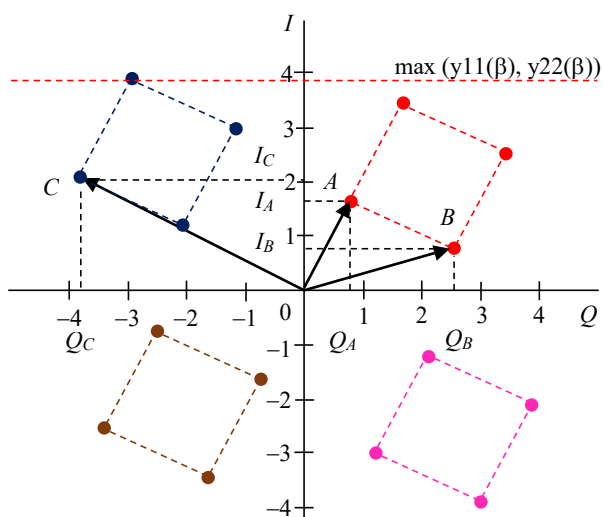


Рис. 2. Модель сигнала КАМ-16, трансформированная по телевизионному стандарту DVB-T2 (альтернативный вариант)

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

Между тем определение средней энергии и ПФ методом имитационного моделирования показало, что значения совокупности этих показателей предпочтительней у модели сигнала КАМ-16, созвездия которых представлены на рис. 2. В частности, по показателю ПФ 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 КАМ-16 на рис. 2, определяет увеличение помехоустойчивости приема исходного сигнала.

Результаты численных исследований. На основе проведенного анализа энергетических показателей многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами, анализа трансформированных СС КАМ-16 с учетом введенных понятий и ограничений выполнено численное моделирование и на основе полученных результатов выявлены наиболее общие закономерности, связывающие вероятность парной ошибки с ОСШ для моделей СК: стандартной КАМ-16, трансформированной КАМ-16, трансформированной КАМ-16 по альтернативному варианту, трансформированной КАМ-16 с учетом фазовых искажений.

Численное моделирование взаимосвязи вероятности ошибки на символ с ОСШ проводилось в предположении релейского канала радиосвязи, т. е. когда рассмотренные модели СС функционируют в условиях воздействия быстрых замираний. В этом случае оценим помехоустойчивость приема сигналов КАМ-16 с позиций проявления вероятности парной ошибки $P(x_a \rightarrow x_b)$: вероятность проявления вектора x_b , характеризующего положение точки B , при условии, что должен отображаться вектор x_a , характеризующий положение точки A сигнального созвездия.

Проанализируем вероятность парной ошибки для точек сигнального созвездия A и B модели нетрансформированного сигнала КАМ-16 и трансформированных моделей.

В [7] получено соотношение для вероятности парной ошибки. Однако это выражение не учитывает фазовые искажения в каналах связи. Между тем во многих случаях при практиче-

ских расчетах систем связи нужно учитывать случайный характер изменения фаз трансформированного сигнального созвездия, иначе аналитическое значение вероятности ошибки не будет совпадать с реальным вследствие асинхронизма в радиолинии. Чаще всего в подобных ситуациях достаточно знать одномерное распределение начальной фазы трансформированного сигнального созвездия, реже – двумерное распределение. Характеристикой одномерного процесса является центральный момент 1-го порядка. В этом случае с учетом введенных понятий и ограничений выражение для определения вероятности парной ошибки в большинстве случаев будет аппроксимироваться в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P(\mathbf{x}_a \rightarrow \mathbf{x}_b) = & 0.5 [1 - \operatorname{sgn}(q_m)] \times \\
 & \times \exp\{-|q_m| k_m [1 + \operatorname{sgn}(q_m)]\} - \\
 & - 0.5 \left[1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right]^{-0.5} \times \\
 & \times \exp\left\{-\left[\operatorname{sgn}(q_m) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 0.5 \left(1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right)^{-0.5} \right] \right\} + \\
 & + 0.5 \operatorname{sgn}(q_m) \exp\left\{-\left[\operatorname{sgn}(q_m) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{1 + \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))}} k_m |q_m| \right] \right\} \frac{1}{k_1}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

где $q_m = \frac{1 + \sqrt{h_0^2 P_a}}{1 + \sqrt{h_0^2 P_b}}$ и $k_m =$
 $= \frac{h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b)) + P_b / P_a - 1}{2 h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b))}$ – промежуточ-

ные параметры, позволяющие рассчитать вероятность ошибки на символ с учетом эффективных значений мощности сигнала КАМ-16, а также текущего ОСШ; $\mathbf{x}_a = \sqrt{P_a} \mathbf{s}_a$ – вектор СС для точки А; $\mathbf{x}_b = \sqrt{P_b} \mathbf{s}_b$ – вектор СС для точки В; 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; $\lambda^2 = \left| \mathbf{s}_a^T \times \mathbf{s}_b \right|^2$ – 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.

Таким образом, представленное аналитическое выражение (10) для оценки вероятности парной ошибки позволяет рассчитать ее для любых двух различных точек конstellляционной диаграммы с учетом фазовых искажений.

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

Из анализа полученных результатов обобщим следующие основополагающие теоретические предложения по повышению помехоустойчивости многопозиционных квадратурных сигнальных конструкций в каналах с переменными параметрами:

1. Для повышения помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах

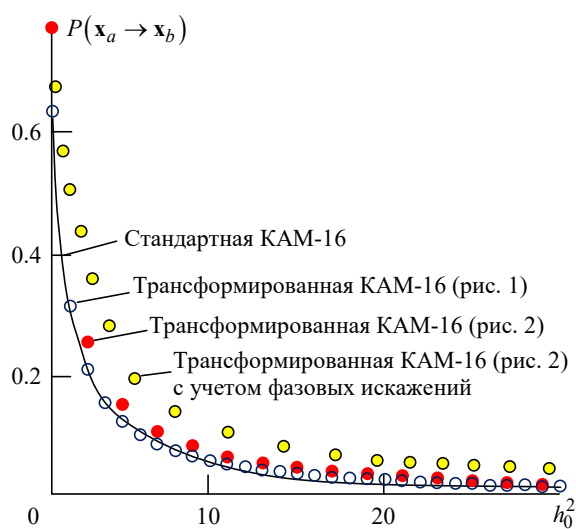


Рис. 3. Зависимость вероятности парной ошибки от отношения сигнал/шум

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

с переменными параметрами целесообразно применять модели СК с трансформированными СС, в которых любая точка СС обладает своими независимыми координатами. Это, в свою очередь, позволяет восстановить точку СС на приеме по одной координате, повышая помехоустойчивость процесса демодуляции.

2. Поскольку поворот всех векторов сигнального созвездия модели сигнальной конструкции на одинаковый угол в канале с релейскими замираниями (см. рис. 1) не изменяет ее помехоустойчивость, то поворот векторов СС из различных квадрантов констелляционной диаграммы следует осуществлять на различные углы (см. рис. 2).

3. В качестве критерия преобразования по п. 1 следует учесть требования по ортогональности точек сигнального созвездия и ограничения энергетических параметров формируемого сигнала, а также моделей каналов радиолиний [8–11].

4. В каналах, характеризующихся переменным значением фазы принимаемого сигнала, до осуществления демодуляции необходимы преобразования, нивелирующие вносимые фазовые сдвиги (рис. 3).

Таким образом, представлены базовые теоретические предложения по трансформации квадратурных амплитудных сигналов, позволяющие улучшить их энергетические характеристики с учетом фазовых искажений, вносимых каналом связи с переменными параметрами.

Заключение. Из сформулированных теоретических предложений следует, что для повышения помехоустойчивости квадратурных многопозиционных сигналов наиболее целесообразным является компенсация фазовых сдвигов, вносимых в каналах связи с переменными параметрами. Для учета данного фактора предлагается разработать метод приема на основе теоретических положений обработки фазоманипулированных сигналов [12–14].

Кроме того, учитывая свойства квадратурных сигналов, необходимо разработать научно-технические предложения по обработке амплитудных значений сигнала, предполагающие различие трактов по частоте-поляризации и определяющие точность устранения фазовых искажений [15, 16].

Разработку данных научно-технических предложений авторы выводят в область дальнейших исследований.

Авторский вклад

Дворников Сергей Викторович – общая идея разработки теоретических предложений.

Пшеничников Александр Викторович – оценка помехоустойчивости моделей СК.

Крячко Александр Федотович – компьютерное моделирование.

Бибарсов Марат Рашидович – обработка результатов моделирования.

Бибарсова Гульнара Шихмуратовна – формирование структуры статьи.

Author's contribution

Sergey V. Dvornikov, the general idea of developing theoretical proposals.

Alexander V. Pshenichnikov, assessment of the noise immunity of SS models.

Alexander F. Kryachko, computer modeling.

Marat R. Bibarsov, processing of simulation results.

Gulnara Sh. Bibarsova, formation of the article structure.

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 Raleigh 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. Методика трансформации сигнальных созвездий сигналов КАМ / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, Д. А. Бурыкин, А. В. Железняк, С. С. Дворников, Д. С. Рябенко // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. 2014. № 4. С. 39–44.

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. Сотников А. М. Демодуляция фазоманипулированного сигнала // Тр. МАИ. 2011. № 45. С. 1–7.

13. 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.

14. Френкс Л. Теория сигналов / пер. с англ. Д. Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.

15. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д. Д. Габриэлян, 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

16. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

Информация об авторах

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 423 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: practicsdv@yandex.ru

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

Пшеничников Александр Викторович – доктор технических наук (2018), профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 125 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: practicsdv@yandex.ru

Крячко Александр Федотович – доктор технических наук (2005), профессор (2008), заведующий кафедрой радиосвязи радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 173 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. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: kaf21@guap.ru

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 183 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации; адаптивные антенные системы.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: Bibarsovmr@rambler.ru

Бибарсова Гульнара Шихмуратовна – кандидат педагогических наук (2006), доцент (2022) кафедры военно-политической работы в войсках (силах) Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 105 научных работ. Сфера научных интересов – правовое обеспечение информационных и коммуникационных технологий.

Адрес: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия
E-mail: bgsh2@rambler.ru

References

1. Korzhik V. I., Fink L. M., Shchelkunov K. N. *Raschet pomexoustoichivosti sistem peredachi diskretnykh soobshchenii* [Calculation of Noise Immunity of Discrete Message Transmission Systems]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1981, 232 p. (In Russ.)
2. Klovsii 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 pomexoustoichivost' priema* [Multidimensional Signal Constructions: Their Frequency Efficiency and Reception Stability]. Ed. by D. L. Burachenko. St Petersburg, *Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta*, 2005, 420 p. (In Russ.)
4. Prokis J. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital Communication]. Transl. and ed. by D. D. Klovsii. 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., Burykin D. A., Zheleznyak A. V., Dvornikov S. S., Ryabenko D. S. Transformation Technique Constellation QAM Signals. *Bulletin of the Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 2014, no. 4, pp. 39–44. (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. Sotnikov A. M. Demodulation of the Phase-Manipulated Signal. *Trudy MAI*. 2011, no. 45, pp. 1–7. (In Russ.)
13. 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.)
14. Franks L. *Signal Theory*. N.J., Prentice-Hall, 1969, 317 p.
15. 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.)
16. 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

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 423 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 V. Pshenichikov, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 125 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: practicsv@yandex.ru

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 173 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, St. Bolshaya Morskaya, St Petersburg 190000, Russia
E-mail: kaf21@guap.ru

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 183 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

Gulnara Sh. Bibarsova, Cand. Sci. (Pedagogical) (2006), Associate Professor of the Department of Military-Political Work in the Troops (forces) of the Military Telecommunications Academy. The author of 105 scientific publications. Area of expertise: legal support of information and communication technologies.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia
E-mail: bgsh2@rambler.ru
