

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-59-68>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние разбаланса квадратурного преобразования на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией

Г.В. Куликов[®],
С.Х. Данг

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме

Цели. В настоящее время сигналы с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) активно используются в системах спутниковой связи и, особенно, в системах, работающих в условиях ограниченности спектра радиочастот с повышенными требованиями к качеству передачи данных. В этих системах применяются приемники многоканального типа с принятием решения о принимаемом символе по максимуму правдоподобия (корреляционный приемник) или приемники квадратурного типа. Помехоустойчивость этих приемников напрямую зависит от качества формирования опорных колебаний: для корреляционных приемников – эталонных сигналов, а для квадратурных приемников – синфазной и квадратурной составляющих. Цель работы – анализ влияния разброса амплитудных и фазовых параметров синфазного и квадратурного канала на помехоустойчивость приема сигналов АФМ с круговой формой сигнального созвездия.

Методы. Использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного моделирования.

Результаты. Получены характеристики помехоустойчивости приема сигналов АФМ в зависимости от разброса параметров квадратурного преобразователя. Теоретические расчеты подтверждены результатами имитационного моделирования при передаче АФМ-сигналов в гауссовском канале связи. Проведено сравнение с системами, использующими сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Выводы. Проведенные исследования показали, что разбаланс квадратурных опорных колебаний может привести к существенному снижению помехоустойчивости радиосистем, использующих АФМ-сигналы. Минимальные энергетические потери из-за разбаланса квадратурных опорных колебаний достигаются при значении разбаланса менее 10% по амплитуде и 2°–3° по фазе. Амплитудный разбаланс квадратурных опорных колебаний при приеме сигналов КАМ сказывается сильнее, чем при приеме сигналов АФМ. Фазовый разбаланс сказывается приблизительно одинаково.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая манипуляция, квадратурные каналы, амплитудный разбаланс, фазовый разбаланс, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 27.01.2023 • Доработана: 07.05.2023 • Принята к опубликованию: 13.07.2023

Для цитирования: Куликов Г.В., Данг С.Х. Влияние разбаланса квадратурного преобразования на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):59–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-59-68>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of quadrature transformation imbalance on the noise immunity of signal reception with amplitude-phase shift keying

Gennady V. Kulikov[®],
Xuan Kh. Dang

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract

Objectives. At the present time, amplitude-phase shift keyed (APSK) signals are actively used in satellite communication systems. In particular, they are applied in systems which operate in a limited radio frequency spectrum with increased data transmission quality requirements. Such systems use multi-channel type receivers with maximum likelihood decision on the received symbol (correlation receiver) or quadrature type receivers. The noise immunity of these receivers is directly dependent on the quality of the formation of reference oscillations. These oscillations are reference signals for correlation receivers and in-phase and quadrature components for quadrature receivers. The aim of the work is to analyze the influence of the amplitude and phase parameter spread of the in-phase and quadrature channels on the noise immunity of receiving APSK signals with a circular shape of the signal constellation.

Methods. Methods of statistical radio engineering, theory of optimal signal reception, and computer simulation are used.

Results. The study established the characteristics of noise immunity of the APSK signal reception depending on the spread of parameters of the quadrature converter. The theoretical calculations were confirmed by the results of modeling the transmission of APSK signals in a Gaussian communication channel. A comparison with systems using quadrature amplitude modulation (QAM) was carried out, in order to assess system stability in the presence of spread parameters among other similar systems.

Conclusions. The studies enabled us to conclude that an imbalance of the quadrature reference oscillations can lead to a significant decrease in the noise immunity of radio systems using APSK signals. The minimum energy loss due to imbalance of quadrature reference oscillations is achieved when the imbalance value is less than 10% in amplitude and 2°–3° in phase. The amplitude imbalance of quadrature reference oscillations when receiving QAM signals is more pronounced than in the case of APSK signals. The phase imbalance affects approximately the same.

Keywords: amplitude-phase shift keying, quadrature channels, amplitude imbalance, phase imbalance, bit error probability

• Submitted: 27.01.2023 • Revised: 07.05.2023 • Accepted: 13.07.2023

For citation: Kulikov G.V., Dang X.Kh. Influence of quadrature transformation imbalance on the noise immunity of signal reception with amplitude-phase shift keying. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):59–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-59-68>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Помехоустойчивость радиосистем передачи информации определяется многими внешними и внутренними факторами. К числу внешних относятся условия распространения радиоволн и помехи различного происхождения. Внутренние факторы – это верность работы и стабильность технических характеристик входящих в систему устройств.

В работах [1–4] рассмотрены принципы построения и некоторые особенности реализации систем цифрового телевидения стандарта DVB¹. Для телевидения повышенной или высокой четкости используют скоростные виды модуляции, такие как квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) в DVB-T и DVB-C [2, 4] и амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ) с круговой формой сигнала созвездия в DVB-S2 [1, 3]. Приемники сигналов

КАМ и АФМ могут быть построены по двум основным схемам: многоканального типа с принятием решения о принимаемом символе по максимуму правдоподобия (рис. 1) и квадратурного типа (рис. 2). Характеристики помехоустойчивости таких схем одинаковы. Важной составной частью этих приемников является блок формирования опорных колебаний – синфазной и квадратурной составляющих, сдвинутых по фазе на 90°. Неточная работа этой схемы может вызывать потери ортогональности и в результате приводить к ошибкам в определении передаваемых символов и, как следствие, к снижению помехоустойчивости системы передачи информации. Влияние погрешностей работы схемы формирования квадратурных опорных колебаний на прием КАМ сигналов исследовано в [5–12].

Целью данной работы является оценка влияния амплитудного и фазового разбаланса квадратурных опорных колебаний при приеме сигналов

¹ DVB. <https://www.dvb.org/standards>. Дата обращения 22.05.2023. / Accessed May 22, 2023.

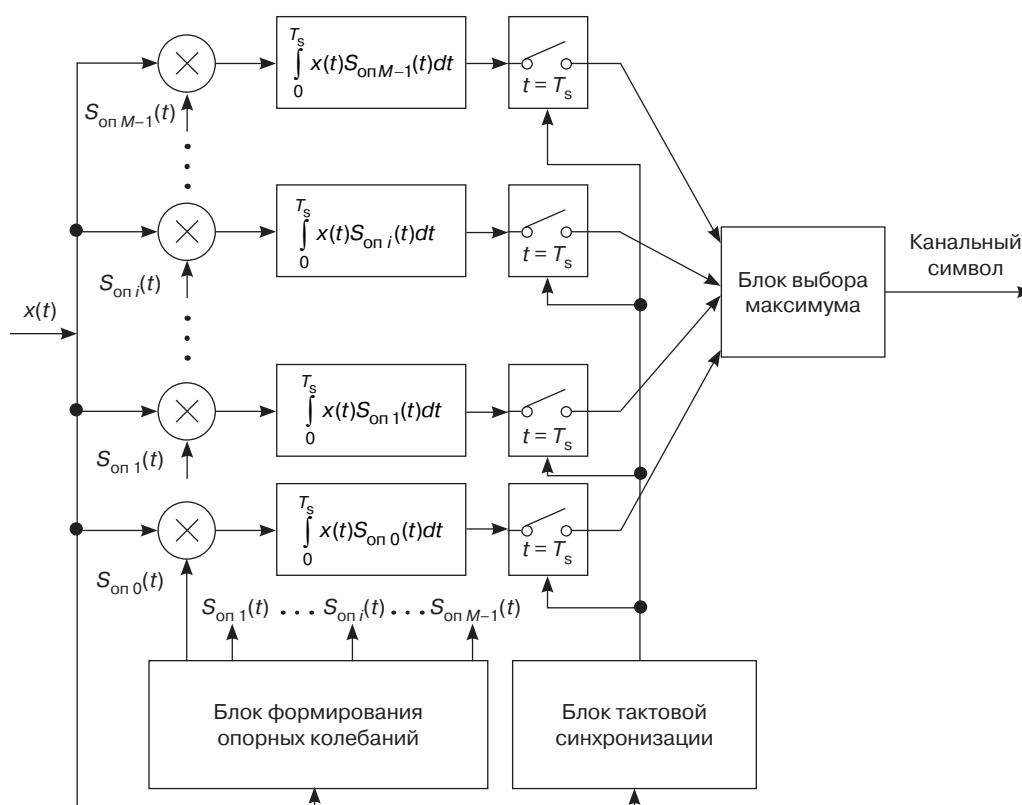


Рис. 1. Структурная схема когерентного приемника многоканального типа

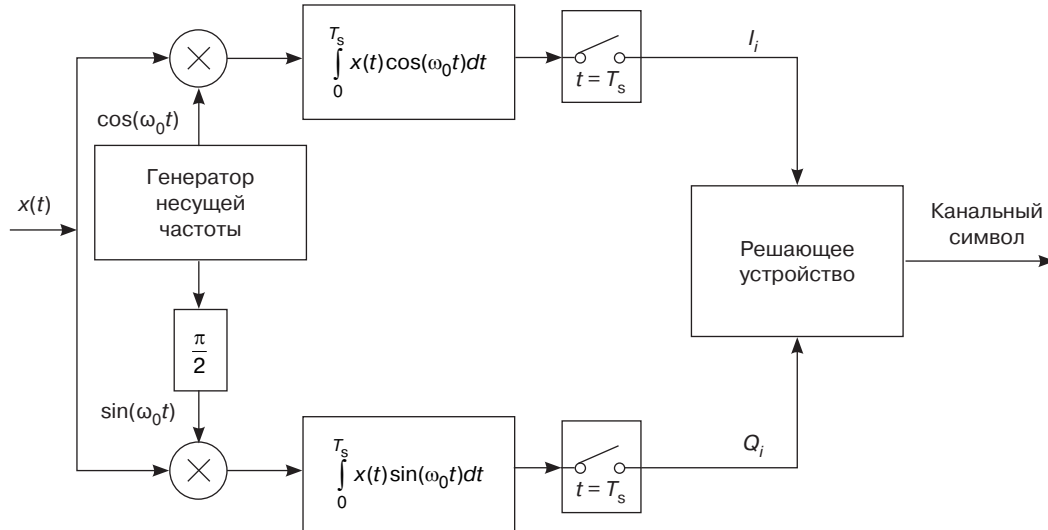


Рис. 2. Структурная схема квадратурного демодулятора

АФМ с круговой формой сигнального созвездия. Задача решается двумя способами: методами статистической радиотехники с помощью теоретических расчетов вероятности битовой ошибки приемника многоканального типа и путем имитационного моделирования квадратурного приемника.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ

Представим сигнал АФМ в квадратурном виде:

$$s_i(t) = A r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i) = A (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad (1)$$

$$t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1},$$

где t – время; $I_i = r_i \cos \varphi_i$; $Q_i = r_i \sin \varphi_i$; A – средняя амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; r_i и φ_i – величины, которые определяют амплитуду и фазу сигнальной посылки; T_s – длительность канального символа; M – позиционность сигнала.

Полагаем, что прием сигнала происходит на фоне белого гауссовского шума $n(t)$ с параметрами:

$$\langle n(t) \rangle = 0, \quad \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1),$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шума, δ – дельта-функция, t_1, t_2 – моменты времени.

Тогда отношение сигнал/шум:

$$E_b/N_0 = E_s/(N_0 \log_2 M) = A^2 T_s / (2 N_0 \log_2 M),$$

где E_s – средняя энергия одного символа (при условии, что все символы имеют одинаковую вероятность появления), E_b – средняя битовая энергия.

Корреляторы многоканального приемника (рис. 1) вычисляют интегралы свертки:

$$J_i = \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{оп } i}(t) dt, \quad i = \overline{0, M-1} \quad (2)$$

входного процесса $x(t) = s_i(t) + n(t)$ с опорными сигналами $s_{\text{оп } i}(t)$, и в идеальном случае $s_{\text{оп } i}(t) = A_{\text{оп}}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t)$, амплитуда опорного сигнала $A_{\text{оп}} = A$.

Величины амплитудного и фазового разбаланса квадратурных опорных колебаний зададим через амплитудный коэффициент a и фазовый сдвиг θ в одном из каналов:

$$s_{\text{оп } i}(t) = A(I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin(\omega_0 t + \theta)). \quad (3)$$

Для расчета вероятности ошибки используем методику, изложенную в [13, 14]. Согласно ей вероятность ошибочного приема любого m -го канального символа равна

$$P_{\text{ес } m} = 1 - \prod_{\substack{i=0 \\ m \neq i}}^{M-1} \left(1 - Q \left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}} \right) \right), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (4)$$

где m_{mi} – математические ожидания, а D_{mi} – дисперсии линейных комбинаций процессов (2).

Рассчитав и проведя усреднение по всем комбинациям $i \neq m$; $i, m = \overline{0, M-1}$, можно найти среднюю вероятность ошибочного приема символа и далее – вероятность битовой ошибки при использовании кодирования Грея [15]:

$$P_{\text{еб}} = P_{\text{ес}} / \log_2 M.$$

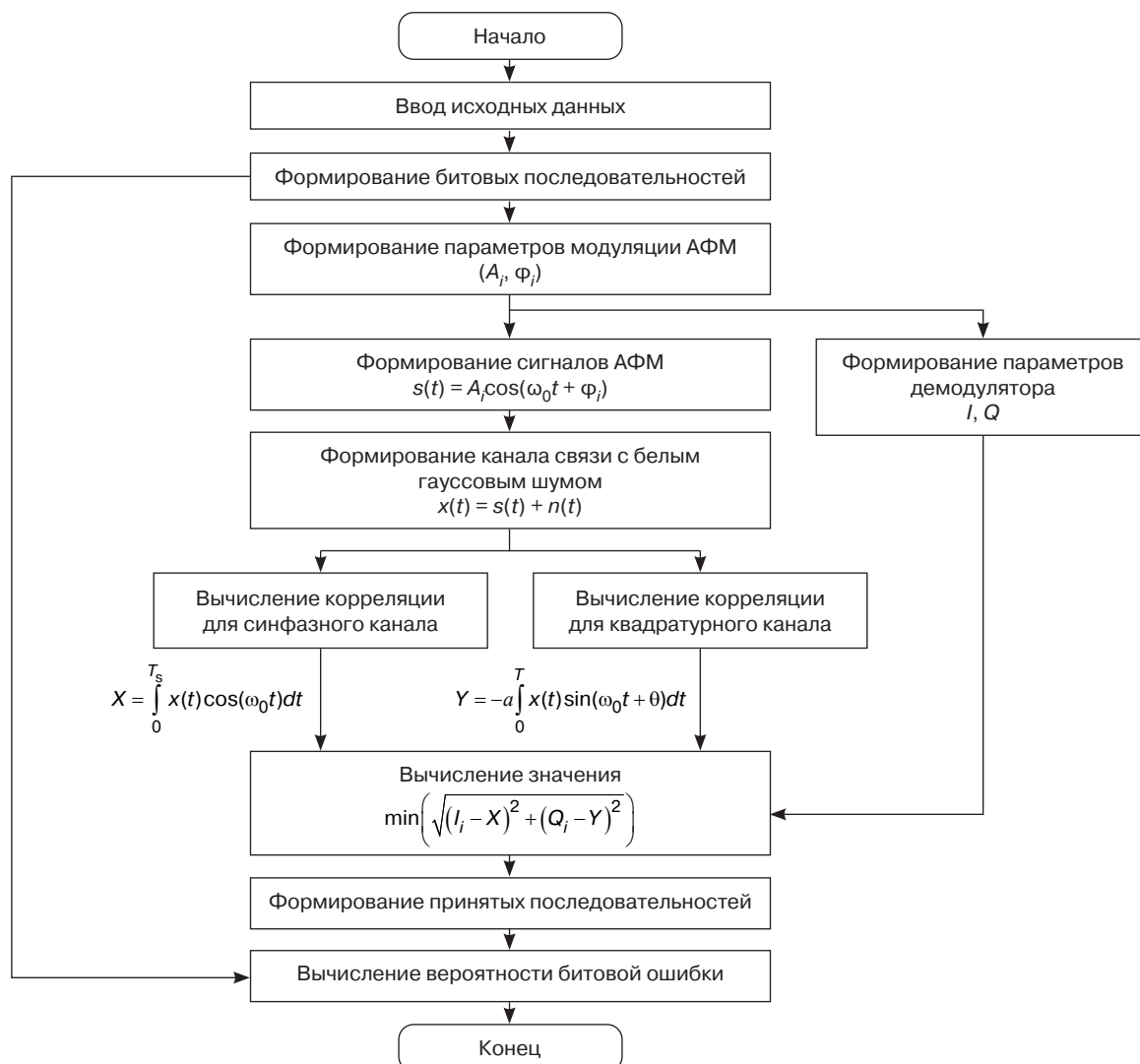


Рис. 3. Алгоритм имитационного моделирования системы передачи сигналов АФМ в канале с гауссовым шумом

Входящие в (4) m_{mi} и D_{mi} с учетом (1) и (3) определяются следующим образом:

$$m_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left(r_m^2 \cos^2 \varphi_m - r_m r_i \cos \varphi_m \cos \varphi_i - a r_m \sin(\theta - \varphi_m) \times \right. \\ \left. \times (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i) - \frac{r_m^2 - r_i^2}{2} \right), \quad (5)$$

$$D_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left((r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i)^2 + a^2 (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i)^2 - \right. \\ \left. - 2a \sin \theta (r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i) \times \right. \\ \left. \times (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i) \right). \quad (6)$$

Для проверки теоретических результатов была разработана имитационная модель системы передачи сигналов АФМ в канале с гауссовым шумом, включающая блоки квадратурного преобразователя с возможностью введения амплитудного a и фазового θ разбалансов. Алгоритм моделирования приведен на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Влияние амплитудного разбаланса квадратурных каналов. При проведении расчетов полагалось, что фазовый разбаланс отсутствует: $\theta = 0$. Тогда формулы (5) и (6) примут вид:

$$m_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left(r_m \cos \varphi_m (r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i) + \right. \\ \left. + a r_m \sin \varphi_m (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i) - \frac{r_m^2 - r_i^2}{2} \right),$$

$$D_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left((r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i)^2 + \right. \\ \left. + a^2 (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i)^2 \right).$$

На рис. 4 показаны зависимости вероятности битовой ошибки от амплитудного разбаланса при $E_b/N_0 = 13$ дБ для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ. На рис. 5 представлены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фиксированных значениях a . Заметим, что случай $a = 1$ соответствует отсутствию разбаланса.

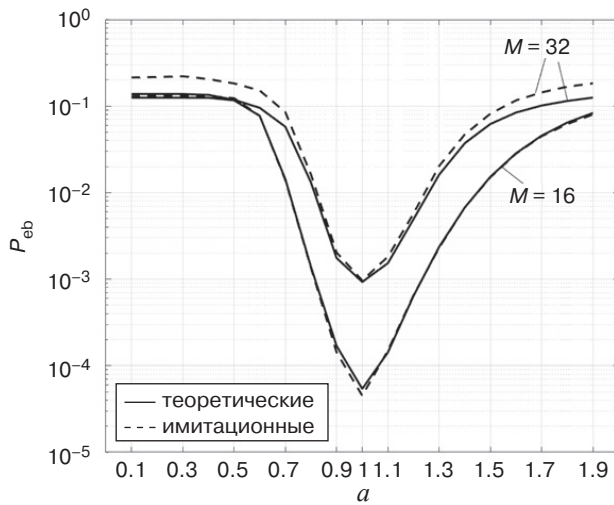


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от величины амплитудного разбаланса квадратурных каналов

Видно, что для обоих сигналов малый амплитудный разбаланс квадратурных каналов $\pm 10\%$ незначительно сказывается на качестве приема информации. Такую его величину можно считать допустимой. В частности, при $P_{eb} = 10^{-3}$ и $a = 1.1$ энергетические потери не превышают 0.5 дБ. При амплитудном разбалансе 20% ($a = 0.8$ и 1.2) вероятность битовой ошибки увеличивается на порядок, а больший разбаланс ($a = 1.5$) недопустим и приводит к разрушению приема, т.к. в этом случае вероятность битовой ошибки возрастает на несколько порядков, а энергетические потери увеличиваются на 8–10 дБ.

Заметим также, что разница в полученных результатах для многоканального (теоретический расчет) и квадратурного (имитационное моделирование) приемников незначительная, что говорит о приблизительно одинаковой устойчивости схем к амплитудному разбалансу квадратур.

Влияние фазового разбаланса квадратурных каналов. При проведении расчетов полагалось, что амплитудный разбаланс отсутствует: $a = 1$. Тогда формулы (5) и (6) примут вид:

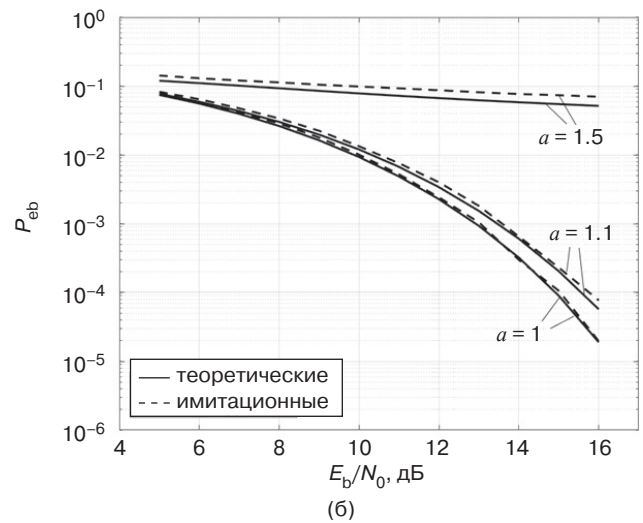
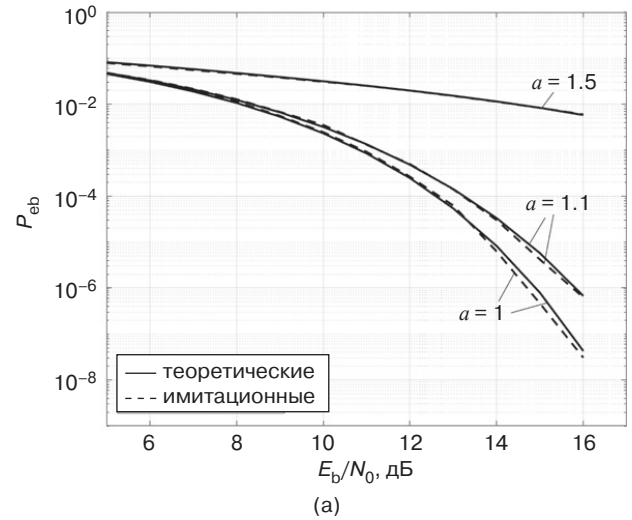


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при наличии амплитудного разбаланса квадратурных каналов: (а) 16-АФМ, (б) 32-АФМ

$$m_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left(r_m^2 \cos^2 \varphi_m - \right. \\ \left. - r_m r_i \cos \varphi_m \cos \varphi_i - r_m \sin(\theta - \varphi_m) \times \right. \\ \left. \times (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i) - \frac{r_m^2 - r_i^2}{2} \right),$$

$$D_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} \left((r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i)^2 + \right. \\ \left. + (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i)^2 - \right. \\ \left. - 2 \sin \theta (r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i) \times \right. \\ \left. \times (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i) \right).$$

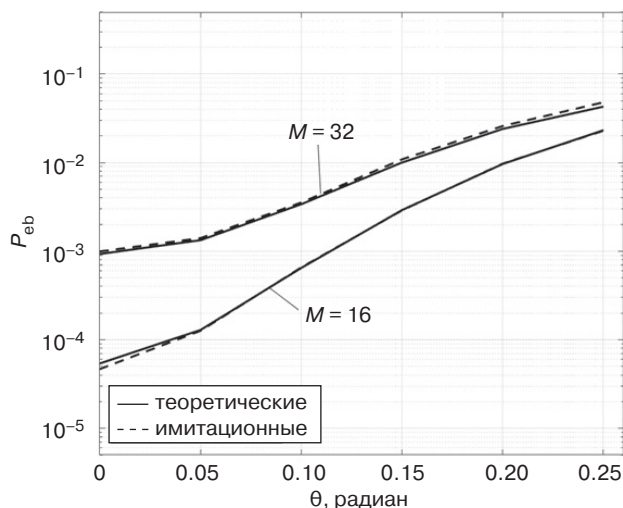


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от фазового разбаланса квадратурных каналов

На рис. 6 показаны зависимости вероятности битовой ошибки от фазового разбаланса θ при отношении $E_b/N_0 = 13$ дБ для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ, а на рис. 7 – зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фиксированных значениях фазового разбаланса.

При наличии фазового разбаланса $\theta = 0.1$ рад ($\sim 5^\circ$) для $P_{об} = 10^{-3}$ наблюдаются энергетические потери 2 дБ для $M = 16$ и 3 дБ для $M = 32$. При увеличении разбаланса до 0.15 рад ($\sim 8^\circ$) потери становятся 4.5 дБ и более. Судя по графикам (рис. 5), для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ можно считать допустимым фазовый разбаланс квадратурных каналов не более 0.03–0.05 рад, т.е. 2° – 3° .

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ СИГНАЛОВ КАМ И АФМ

На рис. 8 приведены сравнительные зависимости вероятности $P_{об}$ от коэффициента амплитудного разбаланса a квадратурных каналов для приемников сигналов АФМ и КАМ одинаковой позиционности [2]. Видно, что в идеальном случае ($a = 1$) сигнал КАМ имеет несколько лучшие показатели помехоустойчивости, но больший наклон графиков в области $0.7 < a < 1.3$ говорит о большей чувствительности приемника КАМ к величине амплитудного разбаланса.

Как следует из рис. 9, влияние фазового разбаланса квадратурных каналов на прием сигналов АФМ и КАМ [5] сказывается примерно одинаково.

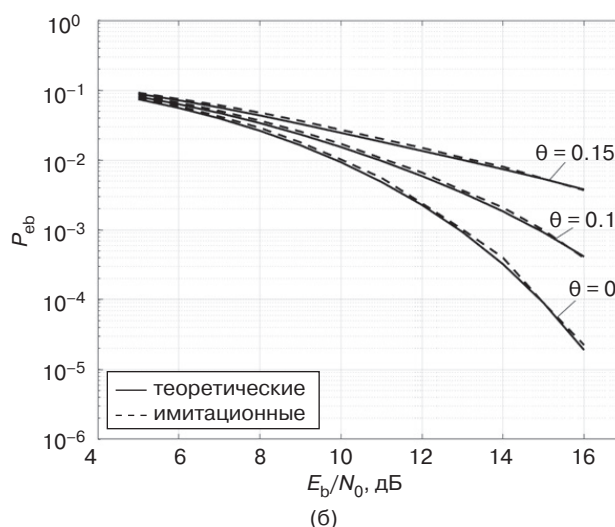
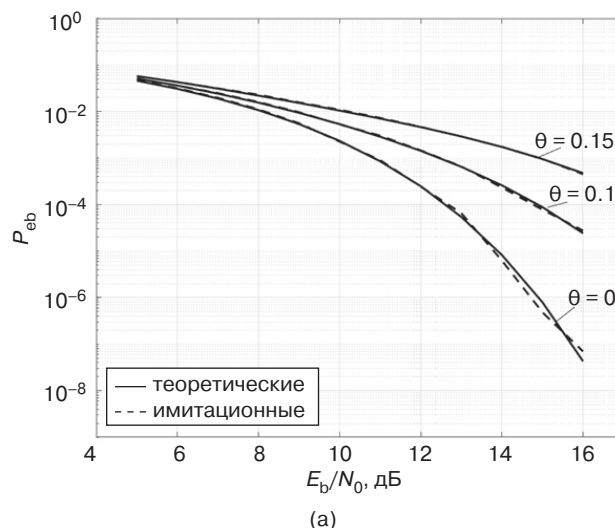


Рис. 7. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнала/шум при наличии фазового разбаланса в квадратурных каналах:
(а) 16-АФМ, (б) 32-АФМ

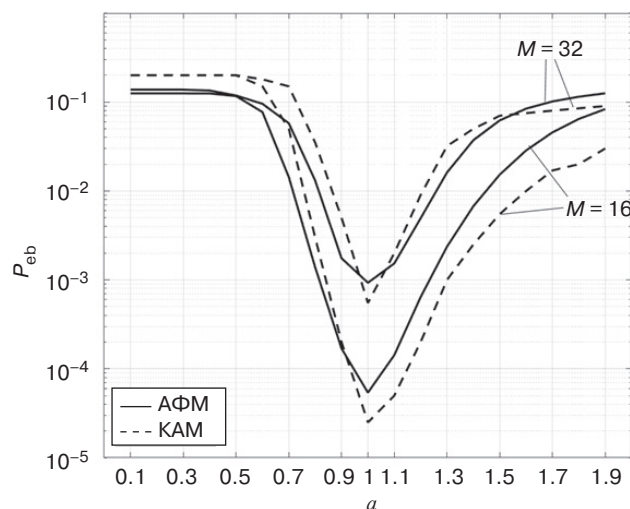


Рис. 8. Зависимости вероятности битовой ошибки от разбаланса амплитуд для сигналов АФМ и КАМ ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

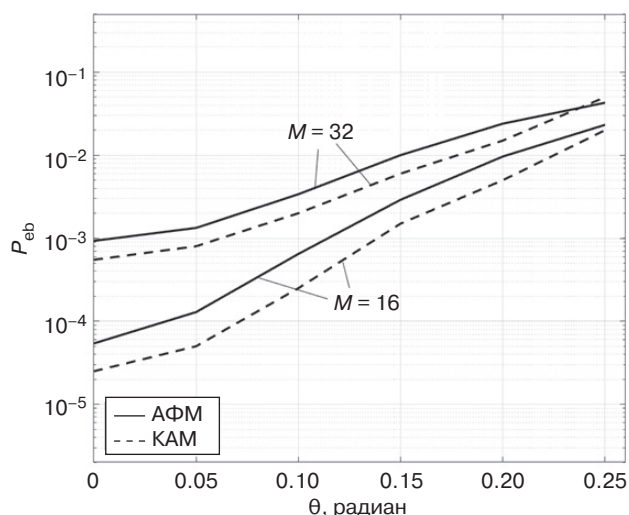


Рис 9. Зависимости вероятности битовой ошибки от фазового разбаланса квадратурных каналов для сигналов АФМ и КАМ ($E_b/N_0 = 13$ дБ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Амплитудный и фазовый разбалансы квадратурных опорных колебаний при приеме сигналов АФМ, также как и для сигналов КАМ, могут приводить к значительному снижению помехоустойчивости.
2. Допустимой величиной амплитудного разбаланса для приемника сигналов АФМ можно считать значение $\pm 10\%$.
3. Допустимой величиной фазового разбаланса для приемника сигналов АФМ можно считать значение $2^\circ - 3^\circ$.
4. Амплитудный разбаланс квадратурных опорных колебаний при приеме сигналов КАМ сказывается сильнее, чем при приеме сигналов АФМ. Фазовый разбаланс сказывается приблизительно одинаково.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.
С.Х. Данг – проведение расчетов, обработка результатов.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.
X.Kh. Dang – making calculations, processing of results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antiufrieva L., Ivchenko A., Dvorkovich A. Features of a coarse frequency synchronization for DVB-S2X system. In: *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En & T)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/EnT50437.2020.9431306>
2. Абрамов С.С., Павлов И.И., Абрамова Е.С., Павлова М.С. *Формирование радиосигналов для цифрового телерадиовещания*. 2-е изд. Новосибирск: СибГУТИ; 2019. 246 с.
3. Маглицкий Б.Н., Сергеева А.С., Синявская А.С. *Принципы построения спутникового телевидения. Теория и практика*. Новосибирск: СибГУТИ; 2016. 95 с.
4. Вершинин А.С., Эрдынеев Ж.Т. *Космические и наземные системы радиосвязи и сети телерадиовещания*. Томск: ТУСУР; 2013. 184 с. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/3449>. Дата обращения 22.05.2023.
5. Куликов Г.В., Лелюх А.А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Russian Technological Journal*. 2021;9(1):29–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>
6. Бабанин И.Г., Михайлова Н.Ю., Николаенко А.И., Коптев Д.С. Процедура оценки влияния неидеальности параметров оптимального демодулирующего устройства системы приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности и коэффициента неравномерности сигнального созвездия на эквивалентные энергетические потери. *Радиотехника*. 2019;83(10–16):60–69.
7. Park J., Park S., Cho P.D., Lee H.-Ho. Effect of phase/quadrature error and I/Q gain imbalance for QAM symbol error probability. *IEICE Trans. Commun.* 2007;E90-B(11):3287–3289. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e90-b.11.3287>
8. Янушковский А.Ю., Кривошейкин А.В. Помехоустойчивость приема сигналов фазоамплитудной модуляции в условиях неидеальности квадратурных каналов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011;54(9):58–63.
9. Гуревич В.Э., Девяткин Д.В., Харьков О.И. Исследование реальной помехоустойчивости системы радиодоступа с квадратурной модуляцией при дефазировании опорных колебаний. В сб.: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: Сборник научных статей: в 4 т.* 2017. Т. 1. С. 154–159.
10. Хасьянова Е.Р., Седов М.О. Экспериментальное исследование методов оценки и компенсации погрешностей квадратурного преобразования сигналов с модуляцией М-КАМ. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2017;8(1):119–122.

11. Пестряков А.В., Поборчая Н.Е., Хасьянова Е.Р. Оценка влияния сдвига несущей частоты на эффективность работы алгоритма компенсации погрешностей квадратурного преобразования. В сб.: *26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМуКо'2016)*: материалы конференции: в 13 т. 2016. Т. 3. С. 413–417.
12. Пестряков А.В., Хасьянова Е.Р. Оценка и компенсация погрешностей квадратурного преобразования при приеме сигнала с модуляцией КАМ-64 с применением метода статистического усреднения. В сб.: *Технологии информационного общества. X Международная отраслевая научно-техническая конференция*. 2016. С. 196.
13. Куликов Г.В., Усманов Р.Р., Трофимов Д.С. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(1): 22–29. URL: http://radiotec.ru/ru/journal/Science_Intensive_Technologies/number/2020-1/article/19749. Дата обращения 22.05.2023.
14. Куликов Г.В., Ханг Д.С., Стариковский А.И. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;4:44–51.
15. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.

REFERENCES

1. Antiufrieva L., Ivchenko A., Dvorkovich A. Features of a coarse frequency synchronization for DVB-S2X system. In: *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En & T)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/EnT50437.2020.9431306>
2. Abramov S.S., Pavlov I.I., Abramova E.S., Pavlova M.S. *Formirovanie radiosignalov dlya tsifrovogo teleradioveshchaniya (Formation of Radio Signals for Digital Television and Radio Roadcasting)*. 2nd ed. Novosibirsk: SibGUTI; 2019. 246 p. (in Russ.).
3. Maglitskii B.N., Sergeeva A.S., Sinyavskaya A.S. *Printsipy postroeniya sputnikovogo televideniya. Teoriya i praktika (Principles of Construction of Satellite Television. Theory and Practice)*. Novosibirsk: SibGUTI; 2016. 95 p. (in Russ.).
4. Vershinin A.S., Erdynееv Zh.T. *Kosmicheskie i nazemnye sistemy radiosvyazi i seti teleradioveshchaniya (Space and Terrestrial Radio Communication Systems and Television and Radio Broadcasting Networks)*. Tomsk: TUSUR; 2013. 184 p. (in Russ.). Available from URL: <https://edu.tusur.ru/publications/3449>. Accessed May 22, 2023.
5. Kulikov G.V., Lelyukh A.A. Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):29–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>
6. Babanin I.G., Mikhailova N.Yu., Nikolaenko A.I., Koptev D.S. Assessment procedure of influence of not idealities of parameters of the optimum demodulating device of the system of signal pick-up with different positioning and coefficient quadrature amplitude shift keying of irregularity of the signal constellation on equivalent power losses. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2019;83(10–2):60–69 (in Russ.).
7. Park J., Park S., Cho P.D., Lee H.-Ho. Effect of phase/quadrature error and I/Q gain imbalance for QAM symbol error probability. *IEICE Trans. Commun.* 2007;E90-B(11):3287–3289. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e90-b.11.3287>
8. Yanushkovsky A.Y., Krivosheikin A.V. Noise-immune of receiving of phase-amplitude signals with imperfect quadrature channels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument Engineering*. 2011;54(9):58–63 (in Russ.).
9. Gurevich V.E., Devyatkin D.V., Kharkov O.I. Analysis of radio access system with quadrature modulation real noise immunity while dephasing the reference oscillation. In: *Actual Problems of Infotelecommunication in Science and Education*. Collection of scientific papers: in 4 v. 2017. V. 1. P. 154–159 (in Russ.).
10. Khasyanova E.R., Sedov M.O. Experimental study of methods of estimation and compensation of errors of quadrature transformation of signals with M-QAM modulation. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Systems of Signal Synchronization, Generation and Processing*. 2017;8(1):119–122 (in Russ.).
11. Pestryakov A.V., Poborchaya N.E., Khasyanova E.R. Influence carrier frequency offset on the performance of the errors of quadrature conversation compensation algorithm transformation. In: *26th International Crimean Conference “Microwave Technology and Telecommunications Technologies” (KrymiCo'2016)*. Conference proceedings: in 13 v. 2016. V. 3. P. 413–417 (in Russ.).
12. Pestryakov A.V., Khasyanova E.R. Estimation and compensation of errors of quadrature transformation when receiving a signal with QAM-64 modulation using the method of statistical averaging. In: *Information Society Technologies. X International Industry Scientific and Technical Conference*: Proceedings. 2016. P. 196 (in Russ.).
13. Kulikov G.V., Usmanov R.R., Trofimov D.S. Noise immunity analysis of amplitude and phase-shift keying signals reception in presence of harmonic interference. *Naukoeemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(1):22–29 (in Russ.). Available from URL: http://radiotec.ru/ru/journal/Science_Intensive_Technologies/number/2020-1/article/19749. Accessed May 22, 2023.
14. Kulikov G.V., Khang D.X., Starikovskiy A.I. Noise immunity of signal reception with amplitude-phase shift keying in the background of frequency shift keying interference. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;4:44–51 (in Russ.).
15. Proakis J.G. *Digital communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Данг Суан Ханг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Xuan Kh. Dang, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dangxuankhang147@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3372-7172>