

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>



УДК 621.391.072

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией

Г.В. Куликов<sup>®</sup>,  
А.А. Лелюх

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

<sup>®</sup>Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах и, в частности, в системах цифрового спутникового телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X. В приемнике, входящем в состав приемо-передающей аппаратуры таких систем, присутствует блок формирования квадратурных колебаний, выступающих в роли опорных при демодуляции сигналов. За счет аппаратурных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приема. В работе исследуется влияние амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур) на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Методами статистической радиотехники получены параметры распределений процессов в приемнике и проведена оценка вероятности битовой ошибки. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента амплитудного разбаланса, фазовой погрешности формирования квадратур и отношения сигнал/шум. Показано, что амплитудный разбаланс квадратур ведет к существенному снижению помехоустойчивости приема сигналов КАМ при  $M \geq 16$ . Допустимым отклонением амплитуды в этом случае можно считать величину 5%. При  $M = 4$  амплитудный разбаланс в широком диапазоне значений практически не сказывается на помехоустойчивости. Фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Допустимая фазовая погрешность составляет не более 0.05 рад (3 градуса). С увеличением позиционности сигналов это влияние также усиливается.

**Ключевые слова:** квадратурная амплитудная модуляция, квадратурные колебания, погрешность, фазовый разбаланс, амплитудный разбаланс, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки

**Для цитирования:** Куликов Г.В., Лелюх А.А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):29–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>

## RESEARCH ARTICLE

# Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation

Gennady V. Kulikov@,  
Andrey A. Lelyukh

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: [kulikov@mirea.ru](mailto:kulikov@mirea.ru)

Quadrature amplitude modulation (QAM) is used for high-speed information transmission in many radio systems and, in particular, in DVB-S and DVB-S2/S2X digital satellite television systems. A receiver included as a part of the transmitting equipment of such systems has a block for the formation of quadrature oscillations used as a reference for signal demodulation. Due to hardware instabilities, amplitude and phase errors may occur, which leads to quadratures imbalance. These inaccuracies cause additional errors in the received signal demodulation. This can significantly degrade the noise immunity of the reception. The paper investigates the influence of amplitude and phase errors in the formation of quadrature oscillations (imbalance of quadratures) on the noise immunity of coherent reception of QAM signals. Using the methods of statistical radio engineering the parameters of the distributions of processes in the receiver are obtained, and the probability of a bit error is estimated. The dependences of the bit error probability on the amplitude unbalance factor, on the phase error of quadrature formation and on signal-to-noise ratio are obtained. It is shown that the amplitude imbalance of the quadratures leads to a significant decrease in the noise immunity of QAM signals reception at  $M \geq 16$ . The acceptable amplitude deviation in this case can be considered to be equal to 5%. At  $M = 4$ , the amplitude imbalance in a wide range of values practically does not affect the noise immunity. The phase imbalance of quadratures markedly affects the noise immunity of coherent reception of QAM signals. The permissible phase error is no more than 0.05 rad (3 degrees). As the signals positionality increases, this influence also increases.

**Keywords:** quadrature amplitude modulation, quadrature oscillations, error, phase imbalance, amplitude imbalance, signal-to-noise ratio, bit error probability

**For citation:** Kulikov G.V., Lelyukh A.A. Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):29-37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-29-37>

## Введение

В настоящее время квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах и, в частности, в системах цифрового спутникового

телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X [1–5]. В приемнике, входящем в состав передаточной аппаратуры таких систем, присутствует блок формирования квадратурных колебаний, выступающих в роли опорных при демодуляции сигналов. Это относится как к схеме приемника, построенного по квадратур-

ной схеме, так и к схеме многоканального когерентного приемника с решением по максимуму правдоподобия. Квадратурные колебания в идеальном случае имеют одинаковые частоты и сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $\pi/2$ . Однако, при их формировании, за счет аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приема [6–9].

Целью данной работы является исследование влияния амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур) в приемнике на помехоустойчивость приема сигналов КАМ.

## 1. Методика анализа помехоустойчивости приема сигналов КАМ

Структурная схема когерентного приемника сигналов КАМ, реализующая алгоритм приема по максимуму правдоподобия, представлена на рис. 1.

Сигнал КАМ на тактовом интервале, равном длительности канального символа несущего информацию об информационных битах, может принимать одно из  $M$  возможных значений:

$$s_i(t) = A_{cp}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad (1)$$

$$t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1,$$

где  $A_{cp} = \sqrt{2E_{ср}/T_s}$  – средняя амплитуда сигнала;  $E_{ср} = kE_{бср}$  – энергия канального символа, средняя по

всем информационным комбинациям;  $E_{бср}$  – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации;  $I_i$  и  $Q_i$  – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала;  $\omega_0$  – несущая частота.

Корреляционный прием сигнала (1) в присутствии белого гауссовского шума  $n(t)$  с односторонней спектральной плотностью мощности  $N_0$  и параметрами

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

предполагает вычисление интегралов свертки:

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} x(t)s_{oni}(t)dt, \quad (2)$$

где

$$x(t) = s_i(t) + n(t)$$

и в идеальном случае  $s_{oni}(t) = A_{oni}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t)$ .

Блок выбора максимума в результате сравнения вычисленных интегралов (с учетом порога) принимает решение по максимуму правдоподобия в пользу того или иного канального символа.

Общую вероятность ошибочного приема канального символа можно определить следующим образом

$$P_{es} = 1 - \prod_{i=0}^{M-1} p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (3)$$

где  $p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$  – вероятность того, что выходное значение  $m$ -го коррелятора приемника больше выходного значения любого другого  $i$ -го коррелятора.

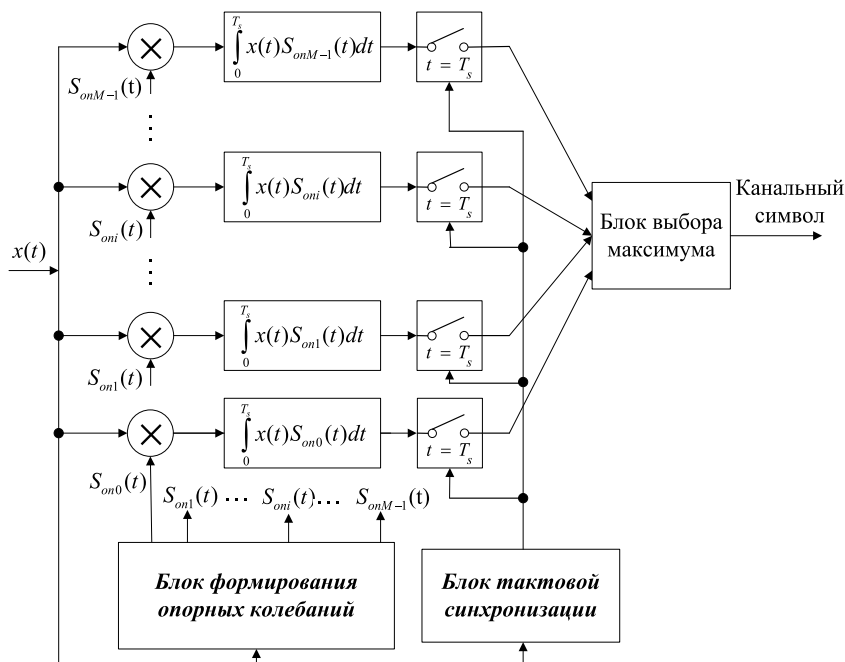


Рис. 1. Структурная схема когерентного приемника КАМ сигналов.

латора при условии, что передавался  $m$ -й символ;  
 $\delta_{mi} = \frac{E_{sm} - E_{si}}{N_0} = \frac{E_{scp}}{N_0} [(I_m^2 + Q_m^2) - (I_i^2 + Q_i^2)]$  – порог принятия решения, определяемый полуразностью энергий сравниваемых канальных символов.

Вероятность битовой ошибки  $P_{eb}$  (BER) при достаточно большом отношении сигнал/шум с учетом кодирования Грея можно найти по формуле [10]:

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (4)$$

Возникновение амплитудного и фазового разбалансов квадратур вносит определенную коррекцию в статистические параметры распределений на выходах всех корреляторов и, соответственно, влияет на величины вероятностей символьной и битовой ошибки.

Принимая во внимание линейность операций, проводимых над сигналами в схеме приемника, распределения случайных процессов  $J_i(2)$  можно считать нормальными и, следовательно, для описания этих распределений достаточно рассчитать средние значения, их линейные комбинации  $m_{mi}$  и дисперсии  $D_{mi}$ . Это позволит определить вероятности

$$p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m = 1 - \Phi\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right), \quad (5)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

## 2. Вывод формул и результаты расчетов

Рассмотрим влияние амплитудного и фазового разбалансов квадратур, возникающих в блоке формирования опорных колебаний.

### А. Влияние амплитудного разбаланса квадратур

При наличии амплитудного разбаланса квадратур опорные сигналы в схеме когерентного приемника будут отличаться от идеальных (2). Учет этот факт введением коэффициента амплитудного разбаланса  $a$ :

$$s_{oni}(t) = I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin \omega_0 t, i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии (в качестве примера расчет показан для сигнала с индексом «0»):

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - \\ &- a Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - \\ &- a Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} I_0^2 T_s + \\ &+ \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} a Q_0^2 T_s = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2). \end{aligned}$$

Здесь и далее для простоты записей принято  $A_{cp} = A_{он}$ .

$$\begin{aligned} m_i &= \langle J_i \rangle = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} I_0 I_i T_s + \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} a Q_0 Q_i T_s = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} I_0 I_i + \frac{2E_{scp}}{N_0} a Q_0 Q_i = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a Q_0 Q_i). \end{aligned}$$

$$m_0 - m_i = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0(I_0 - I_i) + a Q_0(Q_0 - Q_i)).$$

$$\begin{aligned} D_0 &= \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 = \\ &= \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_0 \cos \omega_0 t_2 - a Q_0 \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ &= m_0^2 + \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_0 \cos \omega_0 t_2 - a Q_0 \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2). \end{aligned}$$

$$D_i = \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_i^2 + a^2 Q_i^2).$$

$$\begin{aligned} M_{0i} &= \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_i \cos \omega_0 t_2 - a Q_i \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0 m_i = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a^2 Q_0 Q_i). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_0 + D_i - 2M_{0i} &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2) + \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_i^2 + a^2 Q_i^2) - \\ &- \frac{4E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a^2 Q_0 Q_i) = \frac{2E_{scp}}{N_0} ((I_0 - I_i)^2 + a^2 (Q_0 - Q_i)^2). \end{aligned}$$

Подставив полученные выражения в (3)–(5), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: коэффициента амплитудного разбаланса  $a$  и отношения сигнал/шум  $SNR = E_b/N_0$  (дБ). Заметим, что при вычислениях был проведен перебор всех возможных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии. Для 16 КАМ в зависимости от выбора сигнальной точки использованы корректирующие коэффициенты [11]  $1/\sqrt{10}$  и  $3/\sqrt{10}$ , для

32КАМ –  $1/\sqrt{20}$ ,  $3/\sqrt{20}$  и  $5/\sqrt{20}$  для 64 КАМ –  $1/\sqrt{42}$ ,  $3/\sqrt{42}$ ,  $5/\sqrt{42}$ , и  $7/\sqrt{42}$ .

Соответствующие зависимости для  $M = 4, 16, 32, 64$  приведены на рис. 2 и 3.

Полученные результаты позволяют утверждать, что амплитудный разбаланс квадратур в широком диапазоне значений не сказывается на помехоустойчивости приема сигналов 4 КАМ. При  $M = 16, 32$  и 64 отклонение амплитуды одного из опорных квадратурных колебаний от номинального значения  $a = 1$  приводит к резкому снижению помехоустойчивости. Допустимым отклонением можно считать величину 5%, при этом значение BER при SNR = 13 дБ возрастает в 2 раза, а соответствующий энергетический проигрыш в отношении сигнал/шум составляет от 0.2 до 0.5 дБ. Следует также заметить, что отклонение амплитуды квадратуры от номинального значения в большую сторону сказывается менее заметно, чем отклонение в меньшую сторону.

### Б. Влияние фазового разбаланса квадратур

При наличии фазового разбаланса опорный сигнал в одной из квадратур будет иметь некоторый дополнительный фазовый сдвиг  $\varphi$ :

$$s_{\text{oni}}(t) = I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin(\omega_0 t + \varphi), i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии:

$$m_0 = \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2 \cos \varphi - I_0 Q_0 \sin \varphi).$$

$$m_i = \langle J_i \rangle = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i \cos \varphi - I_0 Q_i \sin \varphi).$$

$$m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0(I_0 - I_i) + Q_0(Q_0 - Q_i) \cos \varphi - I_0(Q_0 - Q_i) \sin \varphi).$$

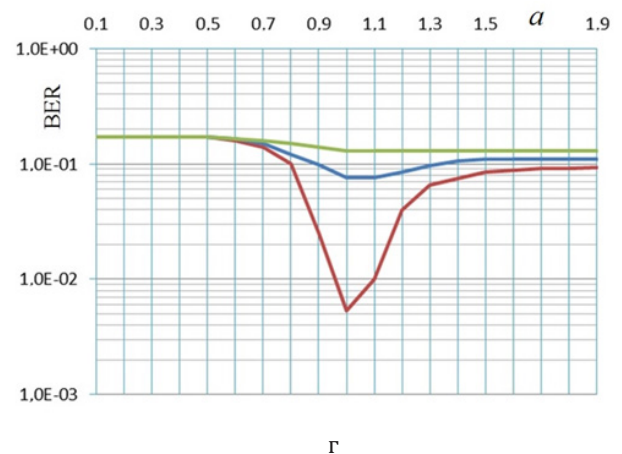
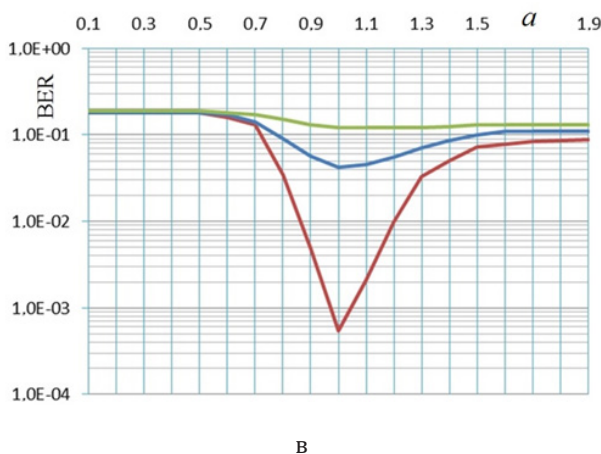
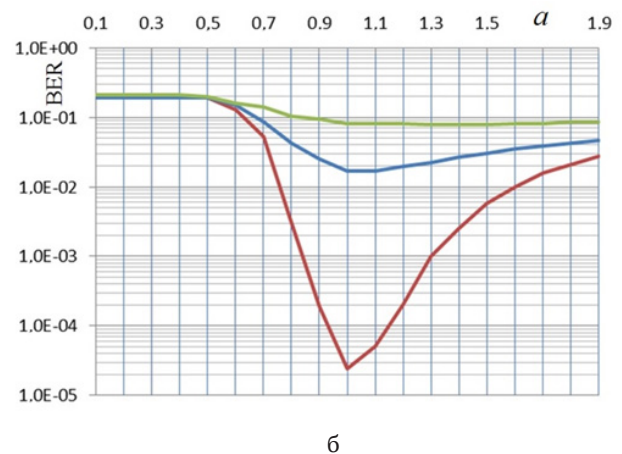
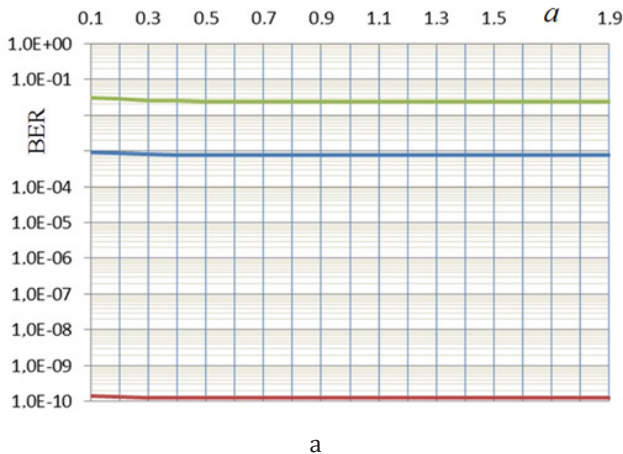
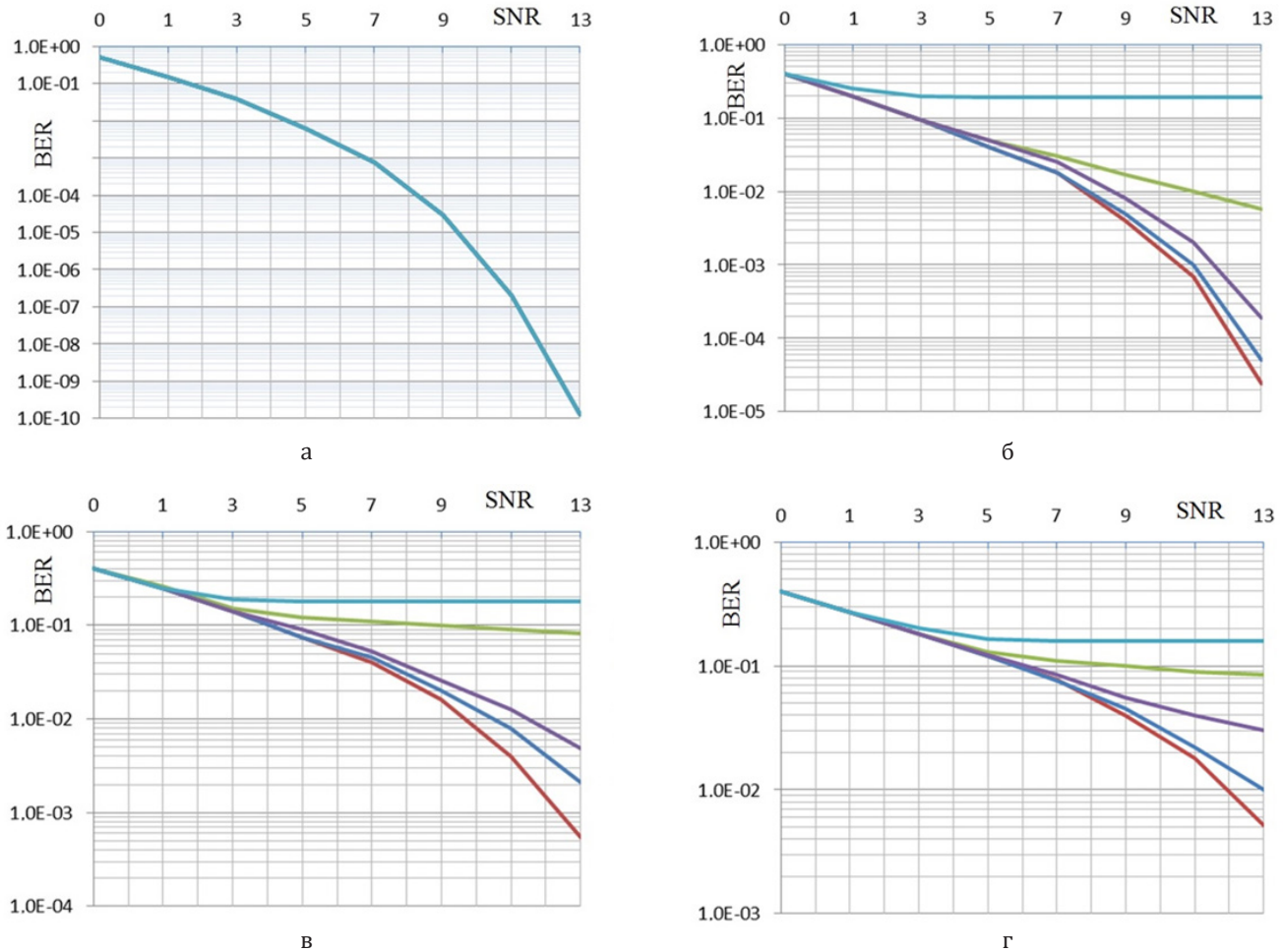


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от коэффициента амплитудного разбаланса  $a$ : а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

— SNR = 13 дБ, — SNR = 7 дБ, — SNR = 3 дБ





**Рис. 3.** Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии амплитудного разбаланса квадратур: а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

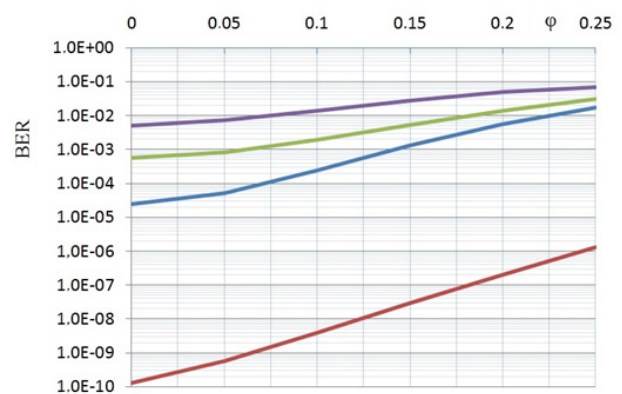
—  $a = 1$ , —  $a = 1.1$ , —  $a = 1.5$ , —  $a = 0.9$  —  $a = 0.5$

$$D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}(I_0^2 + Q_0^2) + \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}(I_i^2 + Q_i^2) - \frac{4E_{\text{ср}}}{N_0}(I_0I_i + Q_0Q_i) = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2).$$

Подставив полученные выражения в (3)–(5), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: фазового сдвига и отношения сигнал/шум  $\text{SNR} = E_b/N_0$  (дБ). При вычислениях, как и ранее, проведен перебор всех возможных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии.

Соответствующие зависимости для  $M = 4, 16, 32, 64$  приведены на рис. 4 и 5.

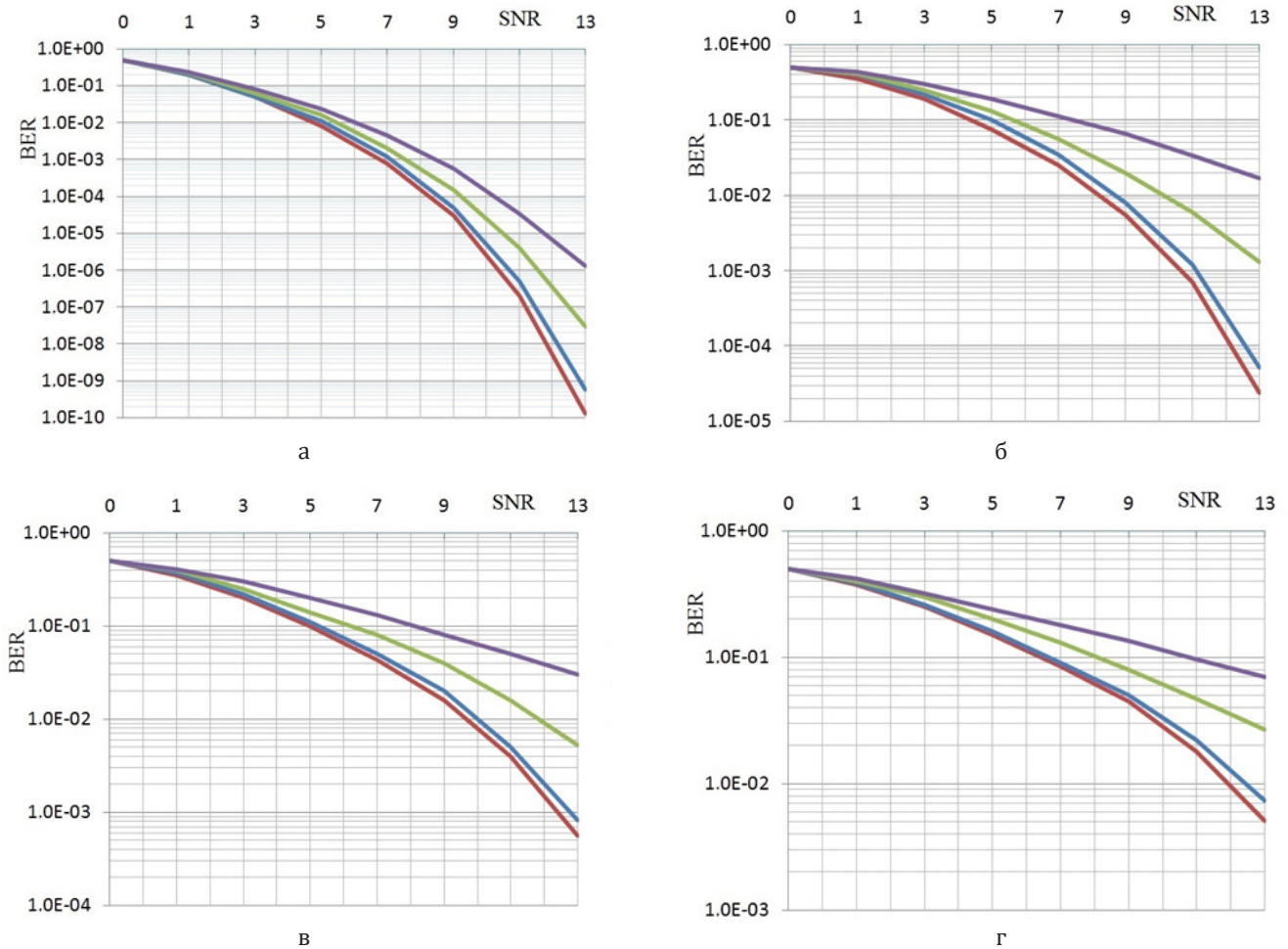
Видно, что фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Так фазовая погрешность в 0.05 рад (3 градуса) эквивалентна при  $\text{BER} = 10^{-3}$  ухудшению отношения сигнал/шум 0.25 дБ для 4 КАМ, 0.5 дБ для 16 КАМ, 0.6 дБ для 32 КАМ и



**Рис. 4.** Зависимости вероятности битовой ошибки BER от величины фазового разбаланса квадратур  $\phi$ .

—  $M = 4$ , —  $M = 16$ ,  
—  $M = 32$ , —  $M = 64$

около 1 дБ для 64 КАМ. При большей фазовой погрешности энергетические проигрыши многократно возрастают, особенно при больших  $M$ .



**Рис. 5.** Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии фазового разбаланса квадратур: а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

—  $\varphi = 0$ , —  $\varphi = 0.05$ , —  $\varphi = 0.15$ , —  $\varphi = 0.25$

### Закключение

Исследование влияния амплитудного и фазового разбалансов квадратур при когерентном приеме сигналов КАМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Амплитудный разбаланс квадратур при  $M \geq 16$  ведет к существенному снижению помехоустойчивости приема сигналов КАМ. Допустимым отклонением амплитуды в этом случае можно считать величину 5%. При  $M = 4$  амплитудный разбаланс в широком диапазоне значений практически не сказывается на помехоустойчивости.

2. Фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. С увеличением позиционности сигналов это влияние также усиливается. Если для 4 КАМ и

16 КАМ можно считать допустимой фазовую погрешность в 0.05 рад (3 градуса), то 64 КАМ эта погрешность уже приводит к существенным энергетическим потерям (около 1 дБ). При большей фазовой погрешности энергетические проигрыши многократно возрастают, особенно при больших  $M$ .

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

## Литература

1. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1, March 2015. 115 p. [Электронный ресурс]  
URL: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf)
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2, March 2015. 183 p.
3. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2-Extensions (DVB-S2X). (Optional). March 2014. [Электронный ресурс]  
URL: [https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2\\_dvb-s2x\\_den302307-2.pdf](https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2_dvb-s2x_den302307-2.pdf)
4. DVB. [Электронный ресурс]  
URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
5. Koen Willems. DVB-S2X demystified. [Электронный ресурс].  
URL: [http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB\\_S2X.pdf](http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB_S2X.pdf)
6. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007;2:81–87.
7. Пастухов А.С., Иванов Ю.А., Малышев С.И. Оценка вероятности битовых ошибок в системах связи 4G. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009;5(4):28–34.
8. Мирошникова Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт*. 2013;9:112–114.
9. Куликов Г.В., Ван Зунг Н. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Российский технологический журнал*. 2019;7(5):47–61.  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
10. Проakis Дж. Цифровая связь. Пер. с англ., под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X
11. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018;11.  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

### Об авторах:

**Куликов Геннадий Валентинович**, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [kulikov@mirea.ru](mailto:kulikov@mirea.ru).

**Лелюх Андрей Александрович**, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

## References

1. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1, March 2015, 115 p.  
URL: [https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1\\_s2\\_guide.pdf](https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf)
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2, March 2015, 183 p.
3. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2-Extensions (DVB-S2X) – (Optional). March 2014.  
URL: [https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2\\_dvb-s2x\\_den302307-2.pdf](https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2_dvb-s2x_den302307-2.pdf)
4. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
5. Koen Willems. DVB-S2X demystified.  
URL: [http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB\\_S2X.pdf](http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB_S2X.pdf)
6. Artemenko A.A., Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Effect of the carrier-phase estimation error on the bit-error rate in M-QAM data transmission systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
7. Pastukhov A.S., Ivanov Yu.A., Malyshev S.I. Bit error probability estimation in 4G communication systems. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data processing Facilities and systems*. 2009;5(4):28–34 (in Russ.).
8. Miroshnikova N.E. Phase and timing synchronization error on digital receiver properties. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport = T-Comm: Telecommunications and Transportation*. 2013;9:112–114 (in Russ.).
9. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(5):47–61 (in Russ.).  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
10. Proakis J. Digital communications. 5th ed. McGraw-Hill Comp.; 2008. 1150 p.
11. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;11 (in Russ.).  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>



*About the authors:*

**Gennady V. Kulikov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru.

**Andrey A. Lelyukh**, Postgraduate Student of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

*Поступила: 19.02.2020; получена после рецензирования: 12.04.2020; принята к опубликованию: 12.06.2020.*