

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>

EDN OQHKMM



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оптимизация созвездий сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в каналах связи с нефлуктуационными помехами

Г.В. Куликов^{1, @}, Данг Суан Ханг¹, А.А. Лелюх²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи», Москва, 109029 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме

Цели. Многопозиционная амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ) с кольцевой формой сигнальных созвездий является одним из наиболее эффективных способов передачи дискретной информации в спутниковых системах. Применение АФМ регламентируется несколькими стандартами, основными из которых являются DVB-S2 и VSAT. Они определяют параметры модуляции, а также параметры сигнальных созвездий. Цель статьи – определение наилучших созвездий 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающих минимум вероятности битовой ошибки для случаев, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют помехи нефлуктуационного вида.

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

Результаты. Рассмотрены способы и проведена оптимизация созвездий кольцевой формы сигналов 16-АФМ и 32-АФМ изменением распределения точек по радиусу и фазе для случая, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют помехи нефлуктуационного вида: частотно-манипулированная, ретранслированная, фазоманипулированная, гармоническая. Определены наилучшие созвездия 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающие минимум вероятности битовой ошибки.

Выводы. Для улучшения качества связи в системах передачи информации при наличии нефлуктуационных помех можно использовать существующие созвездия 16-АФМ (4, 12) и 32-АФМ (4, 12, 16) с изменением соотношений между радиусами окружностей 2.5 для 16-АФМ и 2.5/3.9 для 32-АФМ. За счет более эффективного использования мощности сигнала применение созвездий с точкой с нулевой амплитудой для 16-АФМ позволяет добиться увеличения помехоустойчивости приема. Например, в случае применения созвездия (1, 5, 10) энергетический выигрыш по сравнению со стандартным созвездием (4, 12) может достигать 1 дБ.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая манипуляция, сигнальное созвездие, нефлуктуационные помехи, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 25.12.2023 • Доработана: 11.07.2024 • Принята к опубликованию: 11.11.2024

Для цитирования: Куликов Г.В., Данг С.Х., Лелюх А.А. Оптимизация созвездий сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в каналах связи с нефлуктуационными помехами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>, <https://elibrary.ru/OQHKMM>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimization of signal constellations with amplitude-phase shift keying in communication channels with non-fluctuating interference

Gennady V. Kulikov ^{1, *}, Dang Xuan Khang ¹, Andrey A. Lelyukh ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Moscow Scientific Research Institute of Radio Communications, Moscow, 109029 Russia

* Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract

Objectives. Multi-position amplitude-phase shift keying (APSK) with a ring-shaped signal constellation is one of the most effective ways for transmitting discrete information in satellite systems. The use of APSK is regulated by several standards. The main are DVB-S2 and VSAT which define both the modulation parameters, and the parameters of the signal constellations. The aim of the paper is to determine the best constellations of 16-APSK and 32-APSK, and provide a minimum BER for cases when the communication channel, along with noise, contains non-fluctuating interference.

Methods. Methods of statistical radio engineering, the theory of optimal signal reception, and computer modeling were used.

Results. The optimization of ring-shaped constellations of 16-APSK and 32-APSK signals is attained by changing the distribution of points along the radius and phase for a case in which the communication channel, along with noise, contains non-fluctuating interference: frequency-shift keyed, retransmitted, phase-shift keyed, and harmonic ones. The best constellations of 16-APSK and 32-APSK are determined, and a minimum bit error rate is provided.

Conclusions. In order to improve the quality of communication in information transmission systems in the presence of non-fluctuating interference, the existing constellations 16-APSK (4, 12) and 32-APSK (4, 12, 16) can be used by changing the ratios between the radii of circles 2.5 for 16-APSK and 2.5/3.9 for 32-APSK. Due to the more efficient use of signal power, the use of constellations with a zero-amplitude point for 16-APSK allows reception noise immunity to be increased. For example, when using constellation (1, 5, 10), the energy gain compared to the standard constellation (4, 12) can reach 1 dB.

Keywords: amplitude-phase shift keying, signal constellation, non-fluctuation interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 25.12.2023 • Revised: 11.07.2024 • Accepted: 11.11.2024

For citation: Kulikov G.V., Dang X.Kh., Lelyukh A.A. Optimization of signal constellations with amplitude-phase shift keying in communication channels with non-fluctuating interference. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):76–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-76-88>, <https://elibrary.ru/OQHKKMM>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многопозиционная амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ) является одним из наиболее эффективных способов передачи данных в спутниковых системах, где доступ к каналу связи ограничен и дорог [1–3]. Она позволяет повысить пропускную способность радиоканала по сравнению с бинарными видами манипуляции и обеспечивает хорошую помехоустойчивость, а, следовательно, высокую эффективность использования частотного ресурса.

Существует несколько стандартов, использующих модуляцию АФМ для спутниковой связи, включая DVB-S2¹ (Digital Video Broadcasting – Satellite Second Generation: второе поколение цифрового спутникового телевидения) [3, 4] и VSAT (Very Small Aperture Terminal: терминал с очень малой апертурой) [3, 5]. Эти стандарты определяют параметры модуляции, такие как вид сигнальных созвездий, отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR), скорость передачи данных и т.д.

С учетом растущих потребностей в высокоскоростной передаче данных и повышенной помехозащищенности систем связи оптимизация форматов созвездий сигналов АФМ является важной задачей, т.к. такой оптимальный формат позволяет увеличить эффективность использования радиочастотного спектра и повысить качество передачи данных, что особенно важно в спутниковой связи и в системах связи, работающих на больших расстояниях.

Исследованию помехоустойчивости систем связи с АФМ посвящено много работ, где рассмотрены вопросы приема сигналов на фоне различных помех [6–11] и в каналах с нелинейностью [12–15].

В настоящей статье рассмотрены способы оптимизации созвездий кольцевой формы сигналов 16-АФМ и 32-АФМ изменением распределения точек по радиусу и фазе для случая, когда в канале связи наряду с шумовой присутствуют и помехи нефлуктуационного вида. Цель статьи – определение наилучших созвездий 16-АФМ и 32-АФМ, обеспечивающих минимум вероятности битовой ошибки.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Модель сигнала АФМ имеет вид:

$$s_i(t) = A r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (0, T_s], i = \overline{0, M-1}, (1)$$

где $A = \sqrt{2E_s / T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_s = E_b \log_2 M$ – средняя энергия канального символа; E_b – средняя энергия, приходящаяся на 1 бит информации; 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, t – время.

Оптимизация формата созвездий осуществляется с помощью оценки вероятности ошибочного приема сигналов, а именно поиском минимума функции, описывающей зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от параметров созвездия. Необходимая для этого методика расчета вероятности битовой ошибки приведена в [16], а расчеты статистических характеристик распределений случайных процессов в решающем устройстве оптимального приемника, таких как математические ожидания m_{mi} и дисперсии D_{mi} при различных комбинациях символов в присутствии разных типов нефлуктуационных помех и шумовой помехи со спектральной плотностью мощности N_0 , подробно изложены в [16–19]. Эти характеристики зависят от многих параметров сигналов и помех. В частности:

- в условиях воздействия фазоманипулированной помехи [17]:

$$s_{int}(t) = \mu A a_j \cos[(\omega_0 t + \Delta\omega_{int})t + \varphi_{int}], \\ t \in ((j-1)T_{int}, jT_{int}], j = \overline{1, N_{int}},$$

где μ – относительная (по амплитуде) интенсивность помехи, $a_j = \pm 1$ – случайный символ помехи, φ_{int} – ее случайная начальная фаза, N_{int} – относительная канальная скорость помехи, $T_{int} = T_s / N_{int}$, $\Delta\omega_{int}$ – расстройка помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} \left\{ 2r_m[r_m - r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)] + \frac{\mu}{N_{int}} \times \right. \\ \times 2S(y)[r_m \sum_{j=0}^{N_{int}-1} a_j \cos(y(2j+1) + \varphi_{int} - \varphi_m)] - \\ \left. - r_i \sum_{j=0}^{N_{int}-1} a_j \cos(y(2j+1) + \varphi_{int} - \varphi_i) \right\}, (2)$$

$$y = \frac{\Delta\omega_{int} T_s}{N_{int}}, S(y) = \frac{\sin y}{y};$$

- в условиях воздействия частотно-манипулированной помехи [18]:

$$s_{int}(t) = \mu A \cos[(\omega_0 + a_j \Delta\omega_d + \Delta\omega_{int})t + \varphi_{int}], \\ t \in ((j-1)T_{int}, jT_{int}], j = \overline{1, N_{int}},$$

где $\Delta\omega_d$ – девиация помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} (r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \frac{2E_s}{N_0} \times \\ \times \frac{\mu}{N_{int}} \sum_{j=1}^{N_{int}} \frac{\sin y}{y} [r_m \cos(x(2j-1) + \varphi_{int} - \varphi_m)] - \\ - r_i \cos(x(2j-1) + \varphi_{int} - \varphi_i)], \\ y = \frac{(a_j \Delta\omega_d + \Delta\omega_{int}) T_s}{2N_{int}}; (3)$$

¹ DVB. <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>. Дата обращения 11.11.2023. / Accessed November 11, 2023.

- в условиях воздействия ретранслированной помехи [19]:

$$s_{\text{int}}(t) = \begin{cases} \mu A r_{\tau} \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi_{\tau} + \varphi_{\text{int}}), & 0 < t \leq \tau, \\ \mu A r_i \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi_i + \varphi_{\text{int}}), & \tau < t \leq T_s, \end{cases}$$

где τ – задержка помехи,

$$m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} [(r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \frac{2E_s}{N_0} \mu r_{\tau} \times \\ \times \frac{\tau}{T_s} [r_m \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\delta} - \varphi_m) - r_i \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\tau} - \varphi_i)] + \\ + \frac{2E_s}{N_0} \mu r_m \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) [r_m \cos \varphi_{\text{int}} - r_i \cos(\varphi_{\text{int}} + \varphi_{\tau} - \varphi_i)]; \quad (4)$$

- в условиях воздействия гармонической помехи [16]:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}], \\ m_{mi} = \frac{E_s}{N_0} [0.5(r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)) + \\ + \mu \frac{\sin(\Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2)}{\Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2} (\cos \eta (r_m \cos \varphi_m - r_i \cos \varphi_i) - \\ - \sin \eta (r_m \sin \varphi_m - r_i \sin \varphi_i)), \\ \eta = \Delta\omega_{\text{int}} T_s / 2 + \varphi_{\text{int}}. \quad (5)$$

Для всех типов помех дисперсии анализируемых случайных процессов определяются по формуле:

$$D_{mi} = \frac{2E_s}{N_0} [r_m^2 + r_i^2 - 2r_m r_i \cos(\varphi_m - \varphi_i)]. \quad (6)$$

В проведенных расчетах для примера приняты следующие параметры: отношение сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ, относительная (по амплитуде) интенсивность помех $0.1 \leq \mu \leq 0.3$, расстройка помех $\Delta\omega_{\text{int}} = 0$, фазоманипулированная и частотно-манипулированная помехи имеют относительную канальную скорость $N_{\text{int}} = 2$, для частотно-манипулированной помехи приведенная девиация $\Delta\omega_d T_s = 6$, относительная задержка ретранслированной помехи $\tau/T_s = 0.5$.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТА СОЗВЕЗДИЯ ДЛЯ 16-АФМ

Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12). Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12) имеет два уровня амплитуд посылок (рис. 1): $A_1 = r_1 A$ и $A_2 = r_2 A$, соотношение между которыми выражается через коэффициент k : $A_1 = k A_2$ и, соответственно, два энергетических уровня E_1 и E_2 . Учитывая, что символы созвездия при передаче информации в среднем имеют одинаковую частоту появления, среднюю энергию символа можно определить усреднением по сигнальному созвездию:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (4E_1 + 12E_2) = \\ = \frac{1}{16} \cdot \frac{A_1^2}{2} T_s (4 + 12k^2) = \frac{1}{8} A_1^2 T_s (1 + 3k^2).$$

Следовательно,

$$A_1 = \frac{2}{\sqrt{1 + 3k^2}} A, \quad A_2 = \frac{2k}{\sqrt{1 + 3k^2}} A. \quad (7)$$

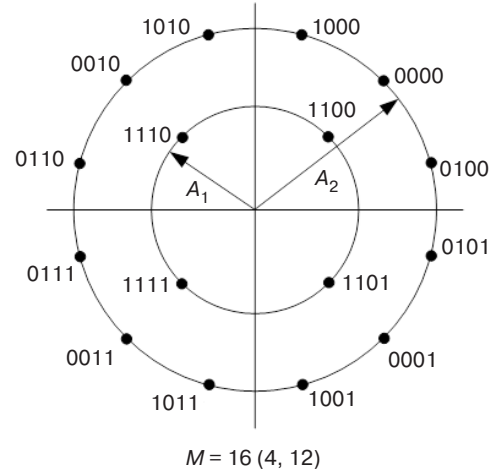


Рис. 1. Сигнальное созвездие 16-АФМ (4, 12)

Подставляя (7) в (2)–(6) с учетом (1) и методики [16], можно получить зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k (рис. 2).

Из представленных графиков видно, что минимум вероятности битовой ошибки для формата созвездия (4, 12) при наличии только шумовой помехи наблюдается при значении $k = 2.5$ и смещается в большую сторону по k при наличии в радиоканале нефлуктуационных помех с большой интенсивностью.

Традиционные созвездия 16-АФМ, такие как (4, 12) в системах DVB-S2 и VSAT или (8, 8) в некоторых других системах, имеют неравномерное распределение энергии между точками разных уровней. Использование точки с нулевой амплитудой в центре созвездия может уменьшить эту разницу в энергии. Чем более равномерное распределение энергии по точкам, тем более эффективно можно использовать полосу частот. В этом случае сокращается количество передаваемых точек в созвездии, но не снижается количество символов, т.е. скорость передачи информации.

Сигнальные созвездия 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10). Рассмотрим два вида формата созвездия для 16-АФМ: (1, 4, 11) и (1, 5, 10). В конфигурации (1, 4, 11) имеется 1 точка с нулевой амплитудой $A_1 = 0$ в центре созвездия, в первом (малом) круге – 4 точки с амплитудой A_2 и 11 точек с амплитудой

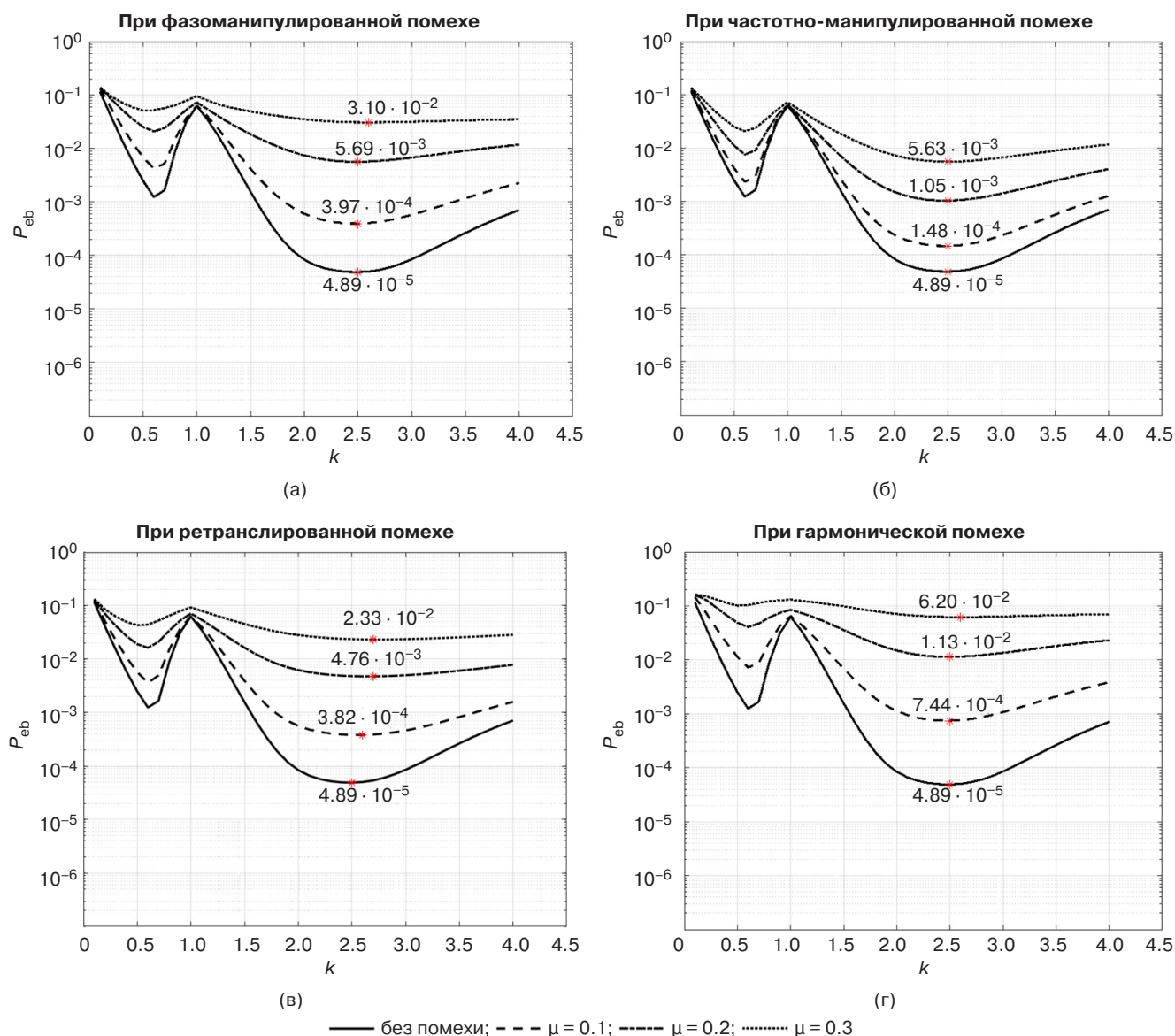


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (4, 12) при разных типах помех

$A_3 = kA_2$ в большом круге (рис. 3а). Аналогично (7) определим соотношения для A_2 и A_3 :

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (E_1 + 4E_2 + 11E_3) =$$

$$= 0 + \frac{1}{16} \cdot \frac{A_2^2}{2} T_s (4 + 11k^2) = \frac{A_2^2}{32} T_s (4 + 11k^2).$$

Следовательно,

$$A_1 = 0, A_2 = \frac{4A}{\sqrt{4 + 11k^2}}, A_3 = \frac{4kA}{\sqrt{4 + 11k^2}}.$$

Для конфигурации (1, 5, 10) (рис. 3б) соответственно получим:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{16} (E_1 + 5E_2 + 10E_3) =$$

$$= 0 + \frac{1}{16} \cdot \frac{A_2^2}{2} T_s (5 + 10k^2) = \frac{A_2^2}{32} T_s (5 + 10k^2),$$

$$A_1 = 0, A_2 = \frac{4A}{\sqrt{5 + 10k^2}}, A_3 = \frac{4kA}{\sqrt{5 + 10k^2}}.$$

Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k при приеме сигналов 16-АФМ при применении формата созвездия (1, 4, 11) для разных типов помех показаны на рис. 4.

На рис. 5 показаны аналогичные результаты для формата 16-АФМ (1, 5, 10).

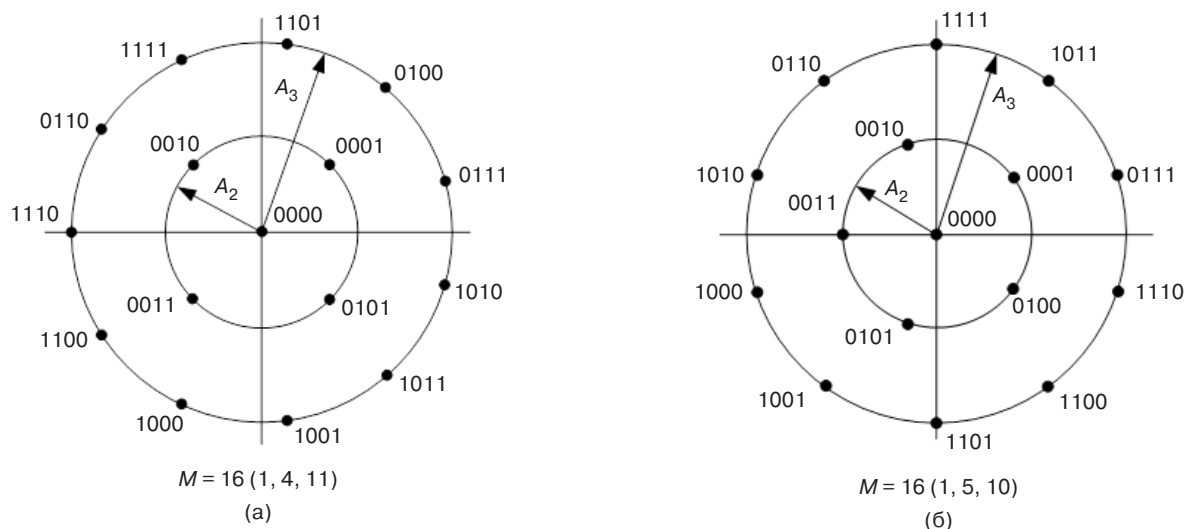


Рис. 3. Сигнальные созвездия сигналов 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10)

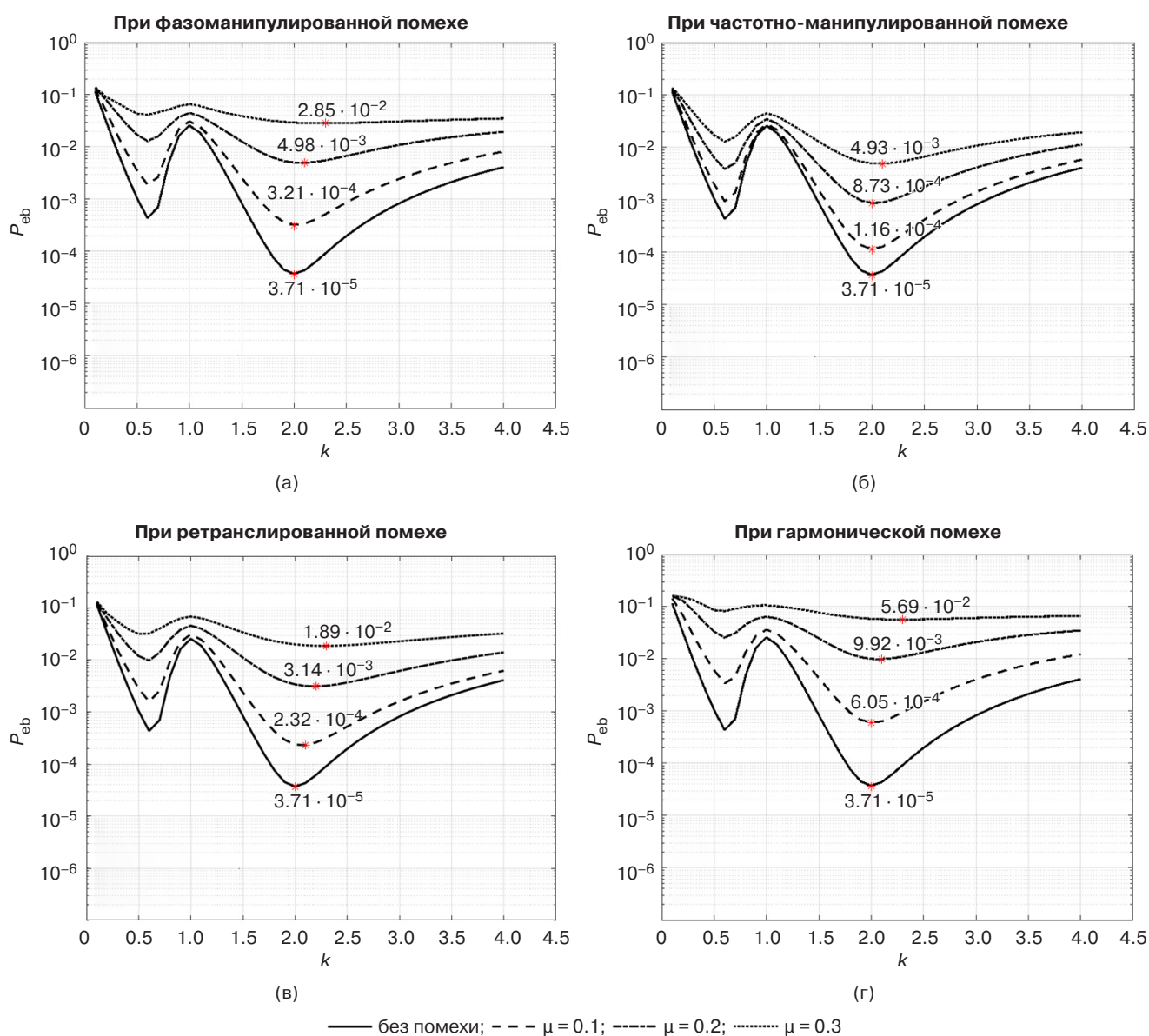


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (1, 4, 11) при разных типах помех

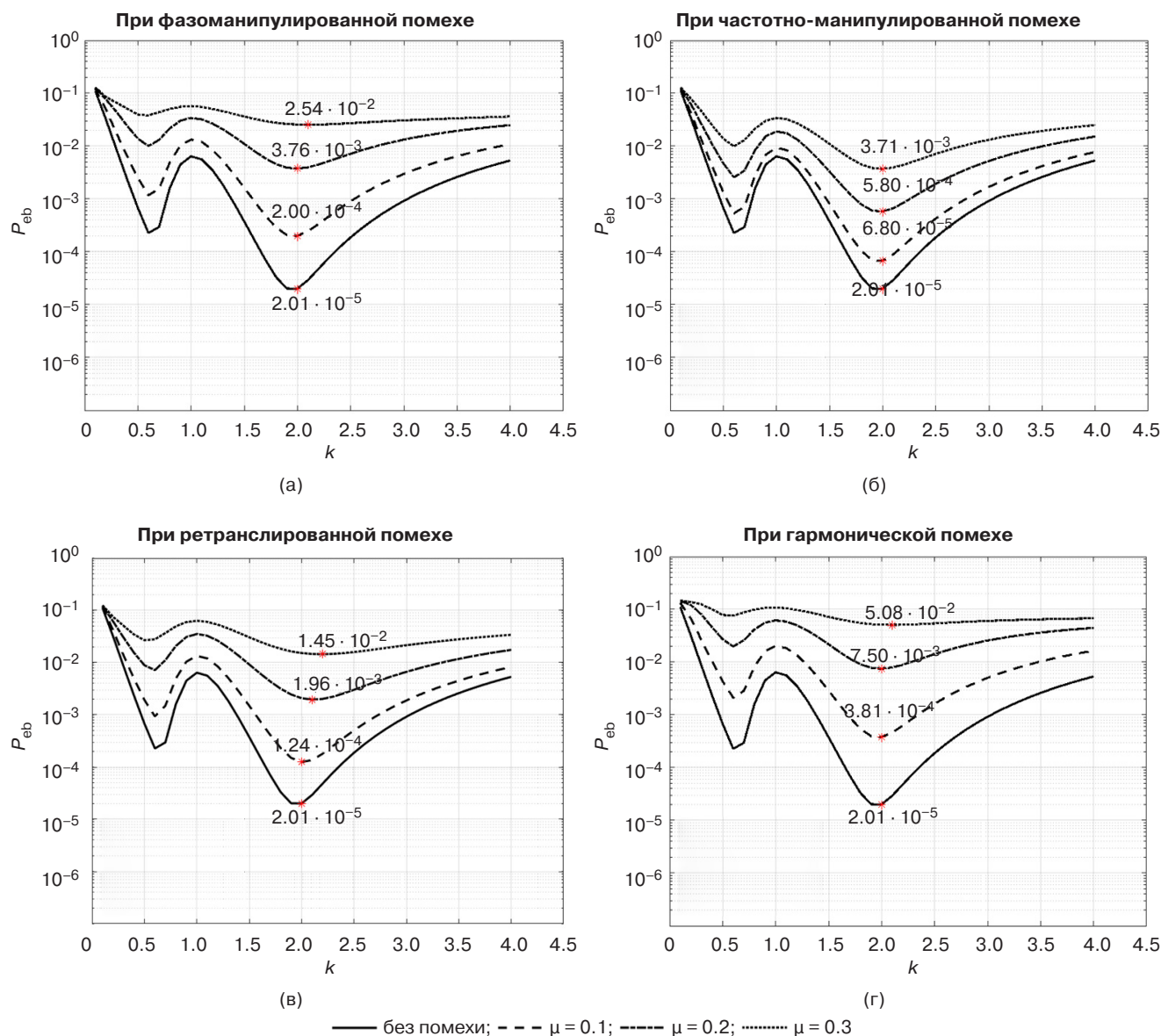


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента k для формата созвездия 16-АФМ (1, 5, 10) при разных типах помех

Из приведенных графиков видно, что использование форматов 16-АФМ (1, 4, 11) и (1, 5, 10) дает при оптимальном значении коэффициента k некоторое повышение помехоустойчивости по сравнению с форматом (4, 12). Кроме того, заметно, что при увеличении относительной интенсивности помех μ оптимальное значение k смещается в большую сторону.

Для сравнения в табл. 1 для разных форматов приведены оптимальные значения коэффициентов k , при которых вероятность битовой ошибки минимальна.

На рис. 6 показаны результаты расчета помехоустойчивости приема сигналов 16-АФМ с форматами (1, 4, 11) и (1, 5, 10), а также оптимизированного

созвездия (4, 12) (при $A_2 = 2.5A_1$) в сравнении со стандартным вариантом (4, 12) (при $A_2 = 2.7A_1$), используемым в стандарте DVB-S2, при приеме на фоне разных типов помех с относительной интенсивностью $\mu = 0.1$. Средние энергии для всех форматов приняты одинаковыми.

Видно преимущество формата (1, 5, 10) перед другим видами созвездий, причем энергетический выигрыш в этом случае достигает 1 дБ. В случае использования формата (1, 4, 11) тоже наблюдается некоторое увеличение помехоустойчивости по сравнению с оптимальным созвездием (4, 12), но оно невелико.

Таблица 1. Оптимальные значения коэффициентов k

Формат	$M = 16$					
	μ		0	0.1	0.2	0.3
1, 4, 11	k	Частотно-манипулированная	2	2	2	2.1
		Ретранслированная	2	2	2.1	2.2
		Фазоманипулированная	2	2	2.1	2.3
		Гармоническая	2	2	2.1	2.3
1, 5, 10	k	Частотно-манипулированная	2	2	2	2
		Ретранслированная	2	2	2	2.1
		Фазоманипулированная	2	2	2	2.1
		Гармоническая	2	2	2	2.1
4, 12	k	Частотно-манипулированная	2.5	2.5	2.5	2.5
		Ретранслированная	2.5	2.6	2.7	2.9
		Фазоманипулированная	2.5	2.5	2.5	2.6
		Гармоническая	2.5	2.5	2.5	2.6

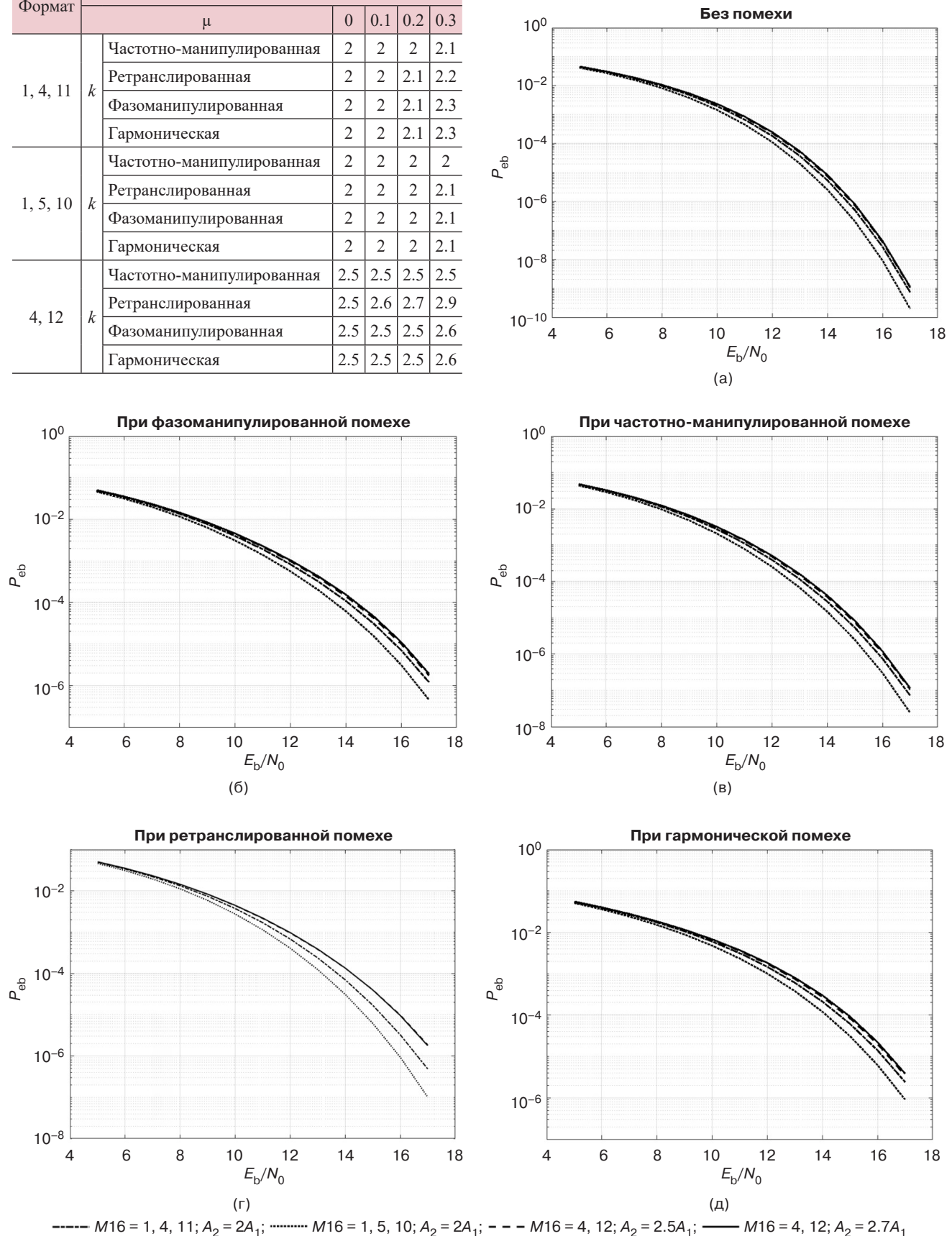


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных форматов созвездий при разных типах помех

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТА СОЗВЕЗДИЯ ДЛЯ 32-АФМ

Сигнальное созвездие 32-АФМ (4, 12, 16) (рис. 7) имеет 3 окружности с отношением амплитуд $A_2 = k_2 A_1$ и $A_3 = k_3 A_1$ и, соответственно, 3 энергетических уровня E_1 , E_2 и E_3 . Расчет соотношений амплитуд может быть выполнен аналогично случаю $M = 16$. Средняя энергия символа:

$$E_s = \frac{A^2}{2} T_s = \frac{1}{32} (4E_1 + 12E_2 + 16E_3) = \\ = \frac{A_1^2}{16} T_s (1 + 3k_2^2 + 4k_3^2).$$

Следовательно,

$$A_1 = \frac{2\sqrt{2}A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}}, \quad A_2 = \frac{2\sqrt{2}k_2 A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}}, \\ A_3 = \frac{2\sqrt{2}k_3 A}{\sqrt{1 + 3k_2^2 + 4k_3^2}}.$$

Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициентов k_2 и k_3 имеет вид поверхности в трехмерной системе координат, ее пример при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ и отсутствии помех представлен на рис. 8. При этом минимальное значение P_{eb} достигается для $k_2 = 2.5$ и $k_3 = 3.9$.

В табл. 2 приведены оптимальные значения коэффициентов k_2 и k_3 , при которых вероятность битовой ошибки минимальна при наличии разных типов помех.

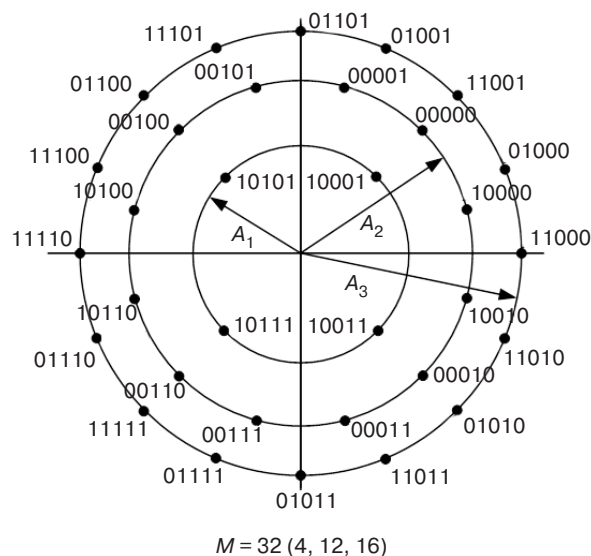


Рис. 7. Сигнальное созвездие 32-АФМ (4, 12, 16)

Из табл. 2 видно, что с увеличением интенсивности помех оптимальные значения этих коэффициентов возрастают, и, если при наличии только шумовой помехи ($\mu = 0$) оптимальные соотношения: $A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$, то при $\mu = 0.3$ можно рекомендовать средние соотношения: $A_2 = 2.65A_1$ и $A_3 = 5.2A_1$.

На рис. 9 показаны результаты расчета помехоустойчивости для формата 32-АФМ ($A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$) в сравнении с форматом, применяемым в стандарте DVB-S2 ($A_2 = 2.64A_1$ и $A_3 = 4.64A_1$), при воздействии разных типов помех. Средние энергии для обоих форматов приняты одинаковыми. Видно, что вероятность ошибки во всех случаях несколько снизилась, и энергетический выигрыш при $10^{-5} \leq P_{eb} \leq 10^{-4}$ составляет около 1 дБ.

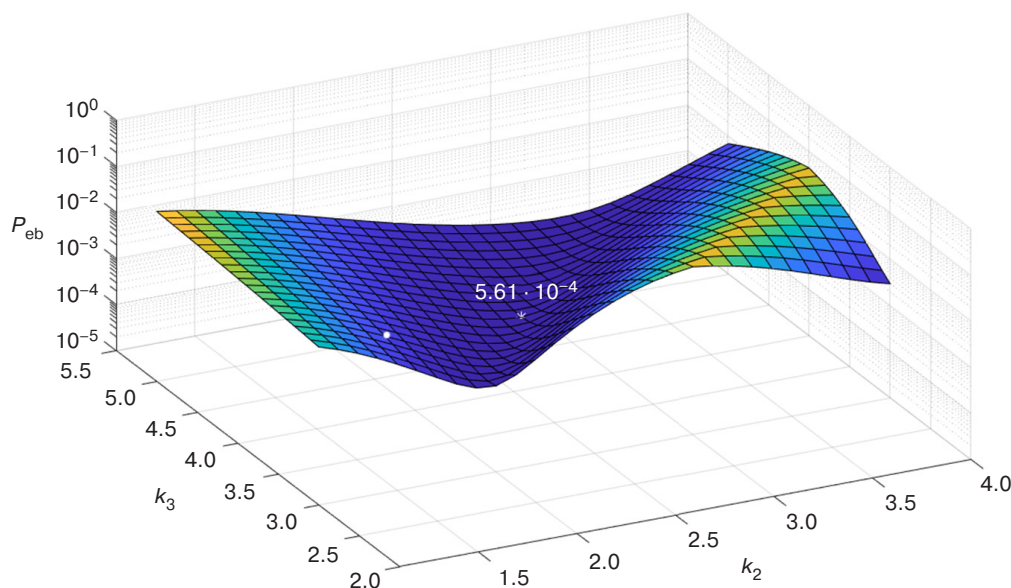
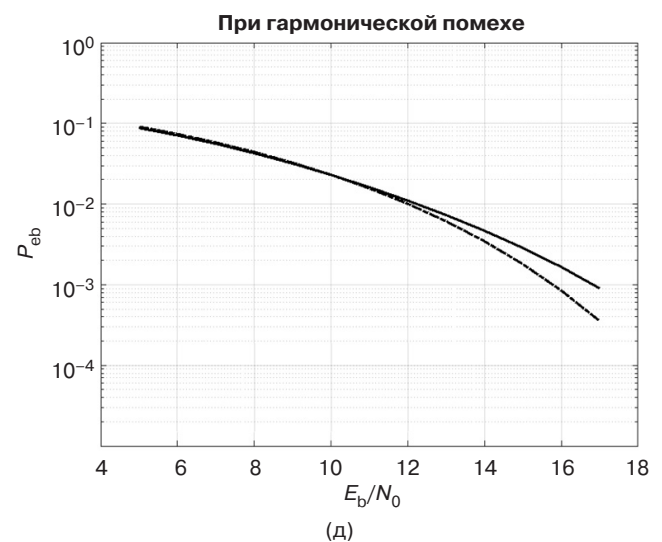
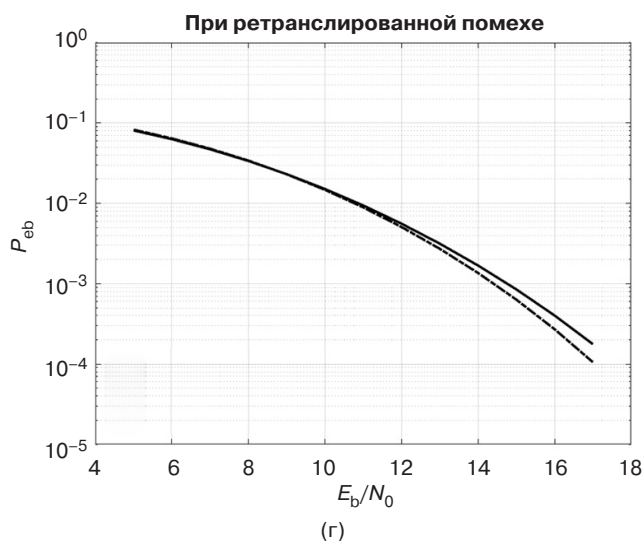
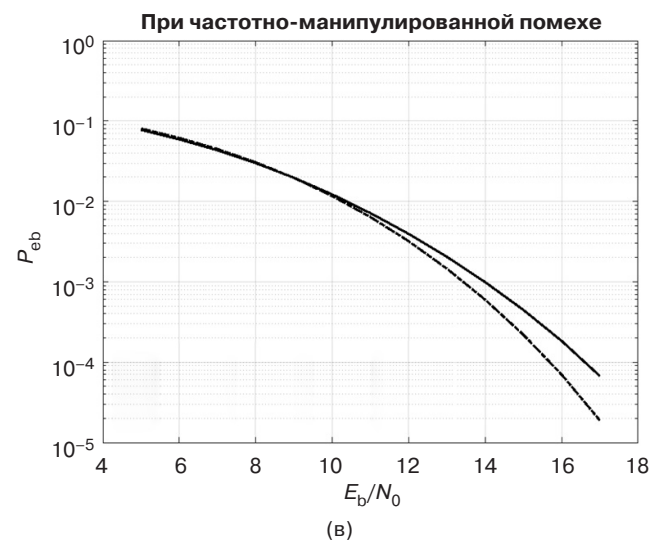
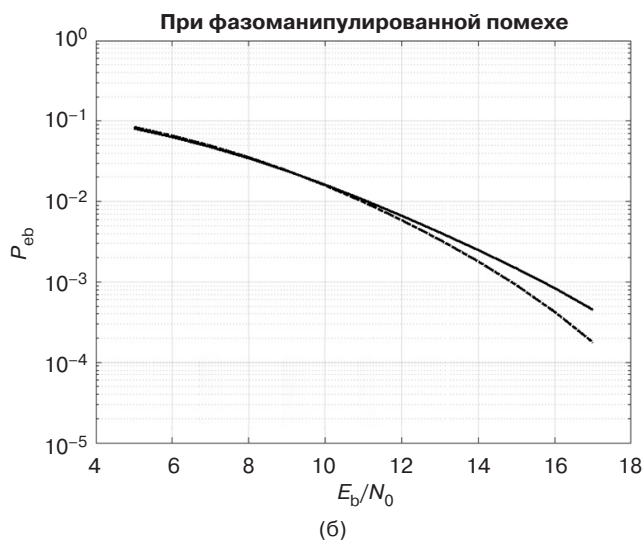
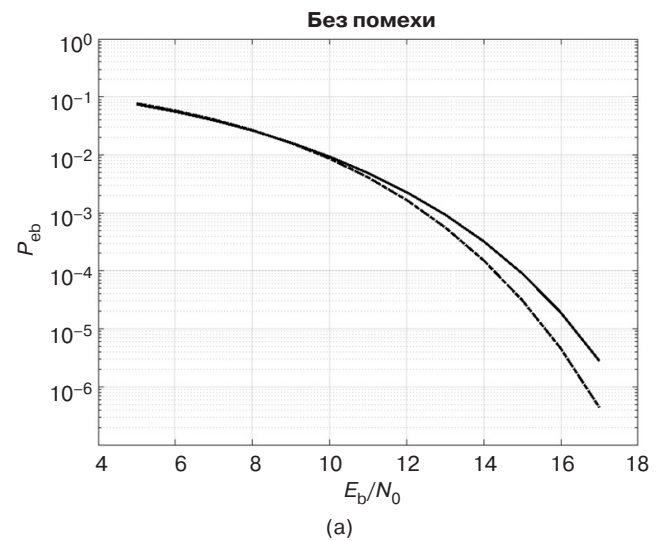


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициентов k_2 и k_3

Таблица 2. Оптимальные значения
коэффициентов k_2 и k_3

Формат	$M = 32$					
	μ		0	0.1	0.2	0.3
4, 12, 16	k_2/k_3	Частотно-манипулированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.5/4.0	2.6/4.4
		Ретранслированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.6/4.5	2.6/4.8
		Фазоманипулированная	2.5/3.9	2.5/3.9	2.6/4.4	2.5/6.0
		Гармоническая	2.5/3.9	2.5/4.0	2.6/4.4	3/6.0



----- $M32; A_2 = 2.5A_1; A_3 = 3.9A_1$; — $M32; A_2 = 2.64A_1; A_3 = 4.64A_1$

Рис. 9. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для предлагаемых амплитудных соотношений и штатных соотношений стандарта DVB-S2 при разных типах помех

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для улучшения качества связи в системах передачи информации при наличии нефлуктуационных помех небольшой интенсивности можно использовать существующие созвездия 16-АФМ (4, 12) и 32-АФМ (4, 12, 16) с изменением амплитудных соотношений ($A_2 = 2.5A_1$) для 16-АФМ и ($A_2 = 2.5A_1$ и $A_3 = 3.9A_1$) для 32-АФМ.
2. За счет более эффективного использования мощности сигнала применение созвездий с точкой с нулевой амплитудой для 16-АФМ позволяет добиться увеличения помехоустойчивости

приема. Например, в случае применения созвездия (1, 5, 10) с соотношением ($A_2 = 2A_1$) энергетический выигрыш по сравнению со стандартным созвездием (4, 12) может достигать 1 дБ.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Данг Суан Ханг – проведение компьютерных расчетов.

А.А. Лелюх – обработка результатов.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

Dang Xuan Khang – conducting computer calculations.

A.A. Lelyukh – processing the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
2. Fuqin X. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Artech House Telecommunications Library. Artech House Publishers; 2006. 1039 p.
3. Сомов А.М., Корнев С.Ф. *Спутниковые системы связи*. М.: Горячая линия – Телеком; 2012. 244 с. ISBN 978-5-9912-0225-1
4. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology: The Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. NY: John Wiley & Sons Ltd; 2015. 441 p.
5. Шелухин О.И. и др. *Сети спутниковой связи VSAT*. М.: Изд-во МГУЛ; 2004. 281 с. ISBN 5-8135-0248-3
6. Савватеев Ю.И., Назаров О.В. (ред.). *Помехозащищенность приема дискретных сигналов*. М.: Радиотехника; 2015. 584 с. ISBN 978-5-93108-094-9
7. Савищенко Н.В., Африкантов И.Н., Капралов Д.Д., Кириллов В.С., Остроумов О.А. Расчет вероятности битовой и символьной ошибок для канала связи при приеме сигнальных конструкций стандарта DVB-S2. *Информация и космос*. 2015;1:9–15.
8. Паршуткин А.В., Маслаков П.А. Помехоустойчивость каналов связи с амплитудно-фазовой модуляцией к воздействию непреднамеренных нестационарных помех. *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2019;11–12:96–101.
9. Выболдин Ю.К. Помехоустойчивость приема многопозиционных АФМ сигналов в каналах связи с замираниями. В сб.: *Научная сессия ГУАП: сборник докладов в 3-х ч.* СПб.: ГУАП; 2018. Ч. 2. С. 32–37. <https://elibrary.ru/ypbhcx>
10. Горобцов И.А., Кирик Д.И. Оценка помехоустойчивости приема сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией. В сб.: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019): сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т.* 2019. Т. 3. С. 111–116. <https://elibrary.ru/vmilnb>
11. Довбня В.Г., Коптев Д.С., Бабанин И.Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приема цифровых сигналов, используемых в современных системах радиорелейной и спутниковой связи. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020;10(1):21–35. <https://elibrary.ru/xeofpi>
12. Носов В.И., Дегтярев С.С. Анализ помехоустойчивости спутниковой линии связи с модуляцией M-APSK при учете нелинейных искажений. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2017;6:14–22. <https://elibrary.ru/yzlemn>
13. Носов В.И., Дегтярев С.С. *Исследование влияния нелинейности усилителя мощности ретранслятора на помехоустойчивость спутниковых систем связи*. Новосибирск: СибГУТИ; 2019. 171 с. <https://elibrary.ru/pgyqxr>
14. Струков А.П. Метод аналитического расчета вероятности символьной и битовой ошибок сигнала с амплитудно-фазовой манипуляцией в нелинейном канале. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2017;4(4):83–88. <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.83>
15. Елкин П.Е. Определение оптимального режима работы усилителя при передаче сигналов 16-APSK в нелинейном канале с АФК. В: *Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции*. Новосибирск: СибГУТИ; 2017. С. 287–290. <https://elibrary.ru/zfmmlj>
16. 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

17. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.7>
18. 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. <https://elibrary.ru/uvasse>
19. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.

REFERENCES

1. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4th ed. NY: McGraw-Hill; 2001. 1002 p.
2. Fuqin X. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Artech House Telecommunications Library. Artech House Publishers; 2006. 1039 p.
3. Somov A.M., Kornev S.F. *Sputnikovyie sistemy svyazi (Satellite Communication Systems)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2012. 244 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0225-1
4. Minoli D. *Innovations in Satellite Communications and Satellite Technology: The Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. NY: John Wiley & Sons Ltd; 2015. 441 p.
5. Shelukhin O.I., et al. *Seti sputnikovoi svyazi VSAT (VSAT Satellite Communication Networks)*. Moscow: MGUL; 2004. 281 p. (in Russ.). ISBN 5-8135-0248-3
6. Savvateev Yu.I., Nazarov O.V. (Eds.). *Pomekhozashchishchennost' priema diskretnykh signalov (Noise Immunity of Reception of Discrete Signals)*. Moscow: Radiotekhnika; 2015. 584 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93108-094-9
7. Savishchenko N.V., Afrikantov I.N., Kapralov D.D., Kirillov V.S., Ostroumov O.A. Calculation of the probability of bit and symbolic errors for the communication channel when receiving signal structures of the DVB-S2 standard. *Informatsiya i kosmos = Information and Space*. 2015;1:9–15 (in Russ.).
8. Parshutkin A.V., Maslakov P.A. Noise stability of satellite communication channels with amplitude-phase modulation to exposure to urged unsteady interference. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Military Enginery. Counter-Terrorism Technical Divices. Issue 16*. 2019;11–12:96–101 (in Russ.).
9. Vyboldin Yu.K. Error probabilities for receiving multipositions APM signals in communication channels with fading. In: *GUAP Scientific Session: collection of reports in 3 v*. St. Petersburg: GUAP; 2018. V. 2. P. 32–37 (in Russ.). <https://elibrary.ru/yphbhc>
10. Gorobtsov I.A., Kirik D.I. Estimation of noise immunity of signal reception with APSK. In: *Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education (APINO 2019): Collection of scientific articles of the 8th International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference in 4 v*. 2019. V. 3. P. 111–116 (in Russ.). <https://elibrary.ru/vmilnb>
11. Dovbnaya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessment of potential interference of receiving digital signals used in modern and perspective radio-relay and satellite communication systems. *Proceedings of the Southwestern State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering, Medical Equipment Engineering*. 2020;10(1):21–35 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xeofpi>
12. Nosov V.I., Degtyarev S.S. Noise immunity analysis for M-APSK signaling over satellite link with nonlinear distortions. *Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2017;6:14–22 (in Russ.). <https://elibrary.ru/yzlemn>
13. Nosov V.I., Degtyarev S.S. *Issledovanie vliyaniya nelineinosti usilitelya moshchnosti retranslyatora na pomekhoustoichivost' sputnikovykh sistem svyazi (Investigation of the Influence of the Nonlinearity of the Repeater Power Amplifier on the Noise Immunity of Satellite Communication Systems)*. Novosibirsk: SibGUTI; 2019. 171 p. (in Russ.). <https://elibrary.ru/pgyqxr>
14. Strukov A.P. Method of analytical calculation of SER and BER for APSK modulation in the nonlinear channel with AWGN. *Raketo-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy = Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2017;4(4):83–88 (in Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.83>
15. Elkin P.E. Determination of the optimal operating mode of the amplifier when transmitting 16-APSK signals in a nonlinear channel with AFC. In: *Modern Problems of Telecommunications: Materials of the Russian Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: SibGUTI; 2017. P. 287–290 (in Russ.). <https://elibrary.ru/zfmmlj>
16. 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. *Naukoemkie 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
17. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of receiving signals with amplitude and phase-shift keying in the presence of phase-shift keying interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2021;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.7>
18. 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.). <https://elibrary.ru/uvasse>
19. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт 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, Институт 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>

Лелюх Андрей Александрович, к.т.н., заместитель начальника технического центра специальной аппаратуры, АО «Московский научно-исследовательский институт радиосвязи» (109029, Россия, Москва, Нижегородская ул., д. 32). E-mail: a.lel@mail.ru. Scopus Author ID 57218678005, SPIN-код РИНЦ 1021-5094

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>

Dang Xuan Khang, 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>

Andrey A. Lelyukh, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Technical Center of Special Equipment, Moscow Research Institute of Radio Communications (32, Nizhegorodskaya ul., Moscow, 109029 Russia). E-mail: a.lel@mail.ru. Scopus Author ID 57218678005, RSCI SPIN-code 1021-5094