

УДК 621.391.072  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>



## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Оптимальный прием многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи

Г.В. Куликов <sup>1, @</sup>,  
Ч.Т. До <sup>1</sup>,  
А.А. Лелюх <sup>2</sup>,  
В.З. Нгуен <sup>3</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>2</sup> Московский научно-исследовательский институт радиосвязи, Москва, 109029 Россия

<sup>3</sup> Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

@ Автор для переписки, e-mail: [kulikov@mirea.ru](mailto:kulikov@mirea.ru)

### Резюме

**Цели.** Проведенный в работах многих исследователей анализ помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов с фазовой (М-ФМ) и квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) показал, что качество приема дискретной информации существенно снижается при наличии кроме шумовой помехи еще и нефлуктуационных помех разных видов в канале радиосвязи. Одной из наиболее опасных является прицельная гармоническая помеха, поэтому разработка алгоритмов компенсации влияния такой помехи является актуальной задачей. Существуют различные методы борьбы с такого рода мешающими воздействиями, обладающие большей или меньшей эффективностью. Целью настоящей работы является синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи.

**Методы.** Использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерное моделирование.

**Результаты.** Выполнен синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи. Показано, что кроме вычисления корреляционных интегралов в приемнике необходимо формировать весовые коэффициенты, величина которых зависит от степени корреляции помехового колебания, выделенного из принимаемой смеси, с копией помехи, хранящейся в приемнике. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, расстройки помехи и неточности установки частоты и уровня копии помехи в приемнике. Показано, что выигрыш в помехоустойчивости приема тем выше, чем больше интенсивность гармонической помехи.

**Выводы.** Синтезированная схема приемника позволяет достаточно эффективно бороться с гармонической помехой. Эффективность ее работы зависит от расстройки гармонической помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Схема некогерентной обработки гармонической помехи сохраняет работоспособность и при небольших (в пределах  $\pm 10\%$ ) неточностях установки частоты и уровня копии помехи в приемнике.

**Ключевые слова:** многопозиционная фазовая модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, гармоническая помеха, оптимальный прием, помехоустойчивость

• Поступила: 02.03.2022 • Доработана: 05.05.2022 • Принята к опубликованию: 24.10.2022

**Для цитирования:** Куликов Г.В., До Ч.Т., Лелюх А.А., Нгуен В.З. Оптимальный прием многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Optimal reception of multiple phase shift keying and quadrature amplitude modulation signals with non-coherent processing of harmonic interference

Gennady V. Kulikov <sup>1, @</sup>,  
Trung T. Do <sup>1</sup>,  
Andrey A. Lelyukh <sup>2</sup>,  
Van D. Nguyen <sup>3</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>2</sup> Moscow Research Institute of Radio Communications, Moscow, 109029 Russia

<sup>3</sup> Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

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

### Abstract

**Objectives.** Analysis of the reception noise immunity of multiple phase shift keying (M-PSK) and quadrature amplitude modulation (M-QAM) signals has demonstrated a significant reduction in the quality of reception of discrete information due to the presence of various types of non-fluctuating interference in a radio communication channel including targeted harmonic interference. Therefore, the development of algorithms for compensating the influence of such forms of interference is an urgent task. While various methods for combatting this kind of interference, these vary in terms of their effectiveness. The aim of the present work is to synthesize and analyze the optimal algorithm for the reception of M-PSK and M-QAM signals with incoherent processing of harmonic interference.

**Methods.** Various statistical radio engineering and computer simulation methods were used in accordance with optimal signal reception theory.

**Results.** Synthesis and analysis of the optimal algorithm for receiving M-PSK and M-QAM signals with incoherent processing of harmonic interference were carried out. In addition to calculating the correlation integrals in the receiver, it is necessary to form weight coefficients, whose value depends on the correlation of the interference oscillation (extracted from the received mixture) with a sample of the interference stored in the receiver. The dependences of the bit error probability on the signal-to-noise ratio, interference detuning, and inaccuracy in setting the frequency and level of the interference sample in the receiver were obtained. It is shown that the higher the gain in the noise immunity of reception, the greater the intensity of the harmonic interference.

**Conclusions.** The synthesized receiver circuit effectively compensates for harmonic interference. However, the efficiency of its operation depends on the detuning of the harmonic interference relative to the center frequency of the spectrum of the useful signal. The scheme for incoherent processing of harmonic interference remains operational even with small (within  $\pm 10\%$ ) inaccuracies in setting the frequency and the level of the interference copy in the receiver.

**Keywords:** multiple phase shift keying, quadrature amplitude modulation, harmonic interference, optimal reception, noise immunity

• Submitted: 02.03.2022 • Revised: 05.05.2022 • Accepted: 24.10.2022

**For citation:** Kulikov G.V., Do T.T., Lelyukh A.A., Nguyen V.D. Optimal reception of multiple phase shift keying and quadrature amplitude modulation signals with non-coherent processing of harmonic interference. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):41–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-41-50>

**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

Анализ помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов с фазовой (М-ФМ) и квадратурной амплитудной модуляцией (М-КАМ) показывает, что качество приема дискретной информации существенно ухудшается, вплоть до полного разрушения связи, при наличии в канале связи кроме шумовой помехи еще и нефлуктуационных помех разных видов [1–10]. Особенно это касается случаев, когда такая помеха является сигналоподобной, например, гармонической [5–7].

Существуют различные методы борьбы с такого рода помехами, обладающие большей или меньшей эффективностью, например, разработанные в [1, 11–14]. Их техническая реализация может быть очень сложной, как в случае синтеза оптимальных алгоритмов [1], или более простой, как в [12, 14], но менее эффективной. Целью настоящей работы является синтез и анализ оптимального алгоритма приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи.

## 1. АЛГОРИТМ ПРИЕМА СИГНАЛОВ М-ФМ И М-КАМ С НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Рассмотрим оптимальный прием сигналов М-ФМ и М-КАМ на фоне белого гауссовского шума  $n(t)$  с односторонней спектральной плотностью мощности  $N_0$  и гармонической помехи

$$s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) = \mu A_0 \cos(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi}), \quad (1)$$

с относительной интенсивностью  $\mu$ , частотой  $\omega_{\Pi} = 2\pi f_{\Pi}$ , близкой к частоте полезного сигнала, и случайной начальной фазой  $\varphi_{\Pi}$ . При этом полагаем, что начальная фаза полезного сигнала известна точно, а распределение случайной величины  $\varphi_{\Pi}$  является равномерным в диапазоне  $(-\pi, \pi]$ . В этом случае можно говорить о некогерентной обработке помехи.

Процесс, поступающий на вход приемника,

$$x(t) = s_i(t) + s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) + n(t)$$

представляет собой аддитивную смесь помехи, шума и сигнала М-ФМ

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i),$$

$$\varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

или М-КАМ

$$s_i(t) = A_{\text{cp}}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \\ t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (2')$$

где  $A_0 = A_{\text{cp}} = \sqrt{2E_s / T_s}$  – амплитуда сигнала;  $E_s = kE_b$  – энергия канального символа;  $E_b$  – энергия, приходящаяся на один бит информации;  $k = \log_2 M$ ;  $I_i$  и  $Q_i$  – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала;  $\omega_0$  – несущая частота. В случае М-КАМ следует говорить о средних по ансамблю сигналов энергиях и амплитуде.

Обозначим для упрощения дальнейших записей сумму сигнала и помехи:

$$s_{\Pi}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) = s_i(t) + s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}). \quad (3)$$

Определим апостериорную вероятность реализации этого процесса, а, следовательно, и совместную апостериорную вероятность канального символа  $C_i$  и фазы  $\varphi_{\Pi}$  следующим образом [15, 16]:

$$p_{\text{ps}}[s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\Pi})] = p_{\text{ps}}(C_i, \varphi_{\Pi}) = K p_{\text{pr}}(C_i) p_{\text{pr}}(\varphi_{\Pi}) \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{N_0} \int_0^{T_s} s_{\text{сн}}^2(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt + \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\text{сн}}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right].$$

Здесь символом  $K$  обозначен нормировочный коэффициент, в котором учтены все составляющие, не содержащие информации о полезном сигнале и нефлуктуационной помехе;  $p_{\text{pr}}(C_i)$  – априорная вероятность канального символа  $C_i$ , а  $p_{\text{pr}}(\varphi_{\Pi}) = 1/2\pi$ .

$$\int_0^{T_s} s_{\text{сн}}^2(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt = \\ = \int_0^{T_s} s_i^2(t, C_i) dt + \int_0^{T_s} s_{\Pi}^2(t, \varphi_{\Pi}) dt + 2 \int_0^{T_s} s_i(t, C_i) s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) dt = \\ = E_s + E_{\Pi} + 2R_i(\varphi_{\Pi}),$$

где  $E_{\Pi}$  – энергия помехи длительности  $T_s$ ,  $R_i(\varphi_{\Pi})$  – коэффициент корреляции между сигналом и помехой.

Следовательно,

$$\begin{aligned} p_{ps}(C_i, \varphi_{\Pi}) &= \\ &= K p_{pr}(C_i) \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{N_0}(E_i + E_{\Pi} + 2R_i(\varphi_{\Pi}))\right] \times \\ &\times \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\Pi}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right] = \\ &= K_1 \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{2}{N_0} R_i(\varphi_{\Pi})\right] \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\Pi}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right]. \end{aligned}$$

В коэффициент  $K_1$  включены члены, не зависящие от значения символа  $C_i$  и от фазы  $\varphi_{\Pi}$ .

Для получения апостериорной вероятности дискретного символа  $C_i$  нужно усреднить величину  $p_{ps}(C_i, \varphi_{\Pi})$  по всем возможным значениям фазы  $\varphi_{\Pi}$ . Тогда получим:

$$\begin{aligned} p_{ps}(C_i) &= K_1 \frac{1}{2\pi} \times \\ &\times \int_{-\pi}^{\pi} \left( \exp\left[-\frac{2}{N_0} R_i(\varphi_{\Pi})\right] \exp\left[\frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_{\Pi}(t, C_i, \varphi_{\Pi}) dt\right] \right) d\varphi_{\Pi}. \end{aligned}$$

Введем обозначения для интегралов, описывающих степень корреляции между принимаемым процессом  $x(t)$  и копиями сигналов при различных значениях канальных символов  $C_i$ :

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_i(t, C_i = 0) dt, \\ &\dots \\ J_{M-1} &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) s_i(t, C_i = M-1) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Если предположить, что в приемнике имеется копия помехи  $s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi})$ , то следующие интегралы, по сути, определяют степень корреляции между ней и образцом принимаемой помехи, сформированным путем вычитания копий сигнала из принимаемого процесса  $x(t)$ :

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i = 0)] s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) dt, \\ &\dots \\ a_{M-1} &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i = M-1)] s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда с учетом (1), (3)–(5) алгоритм принятия решения о значении канального символа  $C_i$

можно записать с использованием модифицированных функций Бесселя  $I_0(\cdot)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} C_i &\Rightarrow \max \{ p_{ps}(C_i) \} = \\ &= \max \left\{ \exp(J_i) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(a_i) d\varphi_{\Pi} \right\} = \max \{ \exp(J_i) I_0(U_i) \}, \\ p_{ps}(C_i = 0) &> \left\{ p_{ps}(C_j \neq 0) \right\}_{j \neq i}, \quad i, j = 0, \dots, M-1. \end{aligned} \quad (6)$$

Последнее выражение можно записать по-другому:

$$\exp(J_i) I_0(U_i) > \{ \exp(J_j) I_0(U_j) \}_{j \neq i} \quad (7)$$

или

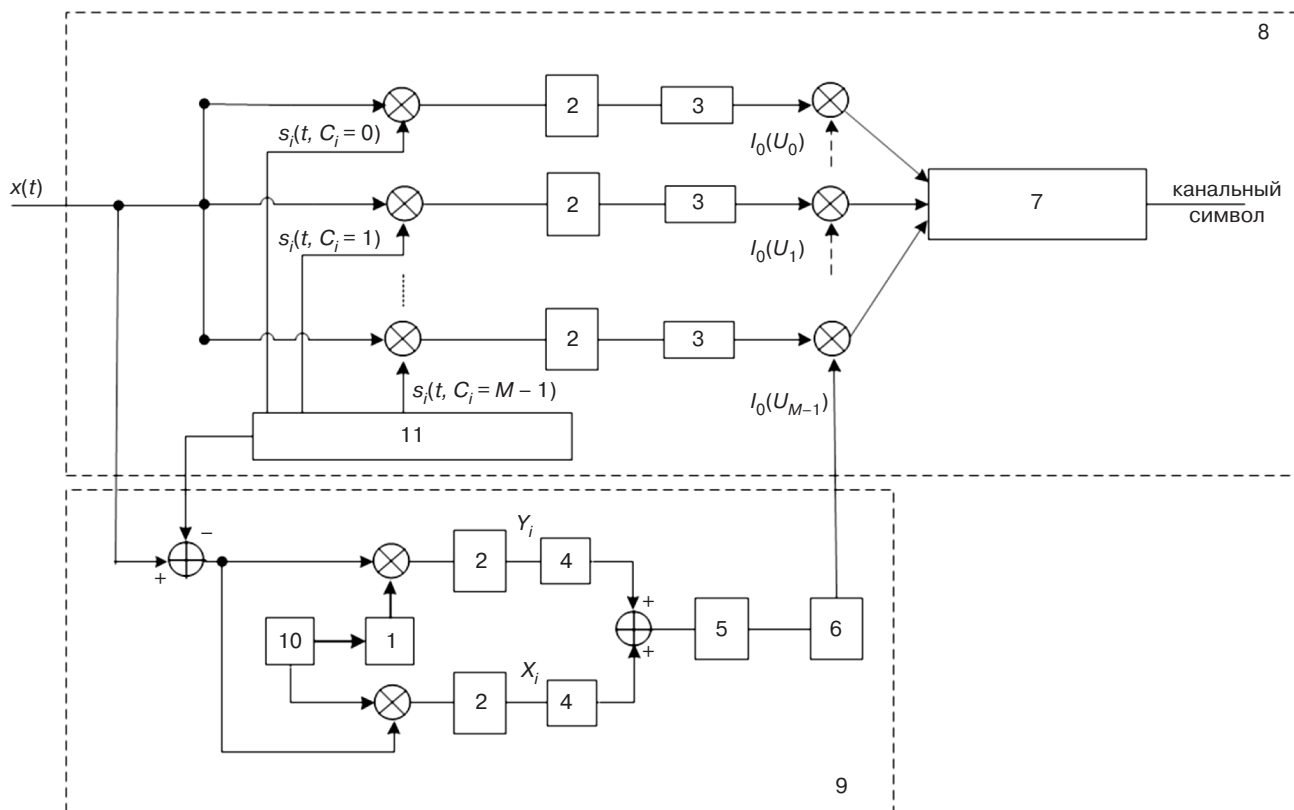
$$J_i + \ln(I_0(U_i)) > \{ J_j + \ln(I_0(U_j)) \}_{j \neq i}, \quad i, j = 0, \dots, M-1.$$

В случае М-КАМ при сравнении величин для нахождения максимума  $\max \{ \cdot \}$  необходимо учитывать, что пороги принятия решения не нулевые, а равны полуразности энергий соответствующих посылок сигнала.

Аргументы функций Бесселя формируются с помощью квадратурных составляющих величин, описываемых выражением (5), например:

$$\begin{aligned} U_i &= \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}, \\ X_i &= \frac{2\mu A_0}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i)] \cos \omega_{\Pi} t dt, \\ Y_i &= \frac{2\mu A_0}{N_0} \int_0^{T_s} [x(t) - s_i(t, C_i)] \sin \omega_{\Pi} t dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Правило принятия решения о канальном символе при наличии в канале связи дополнительно к шумовой еще и гармонической помехи со случайной начальной фазой в основном совпадает с решающим правилом для приемника сигналов М-ФМ и М-КАМ на фоне только белого гауссовского шума. Однако, кроме вычисления корреляционных интегралов, необходимо формировать и весовые коэффициенты для этих интегралов (в виде бесселевых функций), величина которых зависит от степени корреляции помехового колебания, выделенного из принимаемой смеси  $x(t)$ , с копией помехи, хранящейся в приемнике. Соответствующая структурная схема приемника приведена на рис. 1, где обозначено: 1 – фазовращатель на  $90^\circ$ , 2 – интегратор, 3 – блок вычисления экспоненты, 4 – блок возведения в квадрат, 5 – блок вычисления модуля, 6 – формирователь весовых коэффициентов, 7 – блок выбора максимума, 8 – схема оценки канального символа, 9 – схема формирования весовых коэффициентов, 10 – генератор копии помехи, 11 – блок формирования опорных колебаний.



**Рис. 1.** Структурная схема оптимального приемника сигналов М-ФМ и М-КАМ с некогерентной обработкой гармонической помехи

Для примера на рисунке показан один дополнительный канал, остальные строятся аналогично.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки эффективности схемы некогерентной обработки гармонической помехи было проведено моделирование приема для сигналов 2-ФМ, 4-ФМ (4-КАМ), 8-ФМ и 16-КАМ. Определялась вероятность битовой ошибки  $P_{\text{еб}}$  в зависимости от параметров помехи и настроек приемника.

### А. Зависимость вероятности битовой ошибки от расстройки помехи

Моделирование оптимальных приемников сигналов М-ФМ и М-КАМ показало, что эффективность работы схемы некогерентной обработки помехи зависит от расстройки  $\Delta f_{\text{п}}$  частоты помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Рис. 2 иллюстрирует зависимость вероятности битовой ошибки  $P_{\text{еб}}$  от расстройки помехи  $\Delta f_{\text{п}} T_s$  при  $\mu = 0.5$  и отношении сигнал/шум  $SNR = E_b/N_0 = 7$  дБ. Видно, что наибольший выигрыш по помехоустойчивости наблюдается при расстройке  $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0.5$ . Так, для 2-ФМ вероятность ошибки снижается в 1.3 раза, для 4-ФМ (4-КАМ) – в 2.5 раза, для 8-ФМ – в 2.7 раза и для 16-КАМ – в 2.8 раза. При прицельной помехе

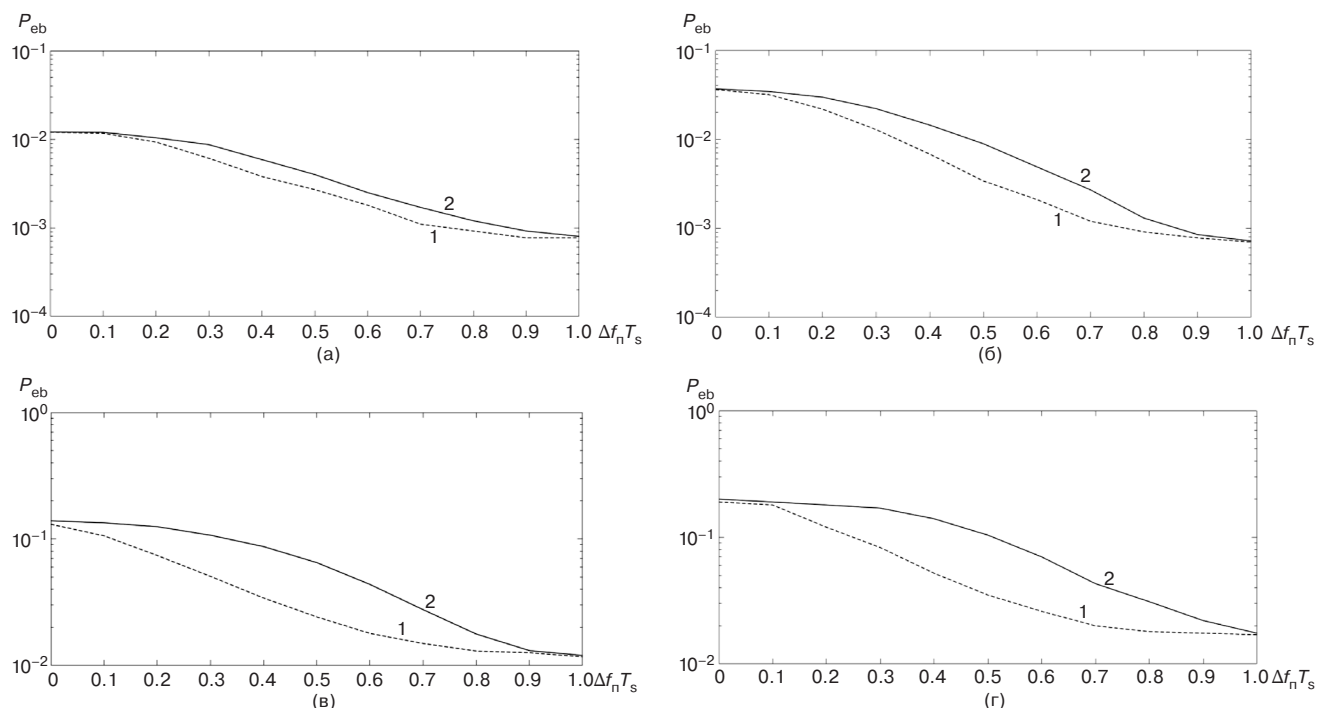
( $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0$ ) схема оказывается неэффективной, а при  $\Delta f_{\text{п}} T_s = 1$  выигрыш отсутствует в связи с тем, что частота помехи совпадает с частотой первого нуля спектра сигнала, и такая помеха не влияет на помехоустойчивость приема.

Рассмотрим более подробно случай, когда частота помехи не совпадает с центральной частотой спектра полезного сигнала, и, как следует из рис. 2, схема некогерентной обработки помехи дает выигрыш в помехоустойчивости.

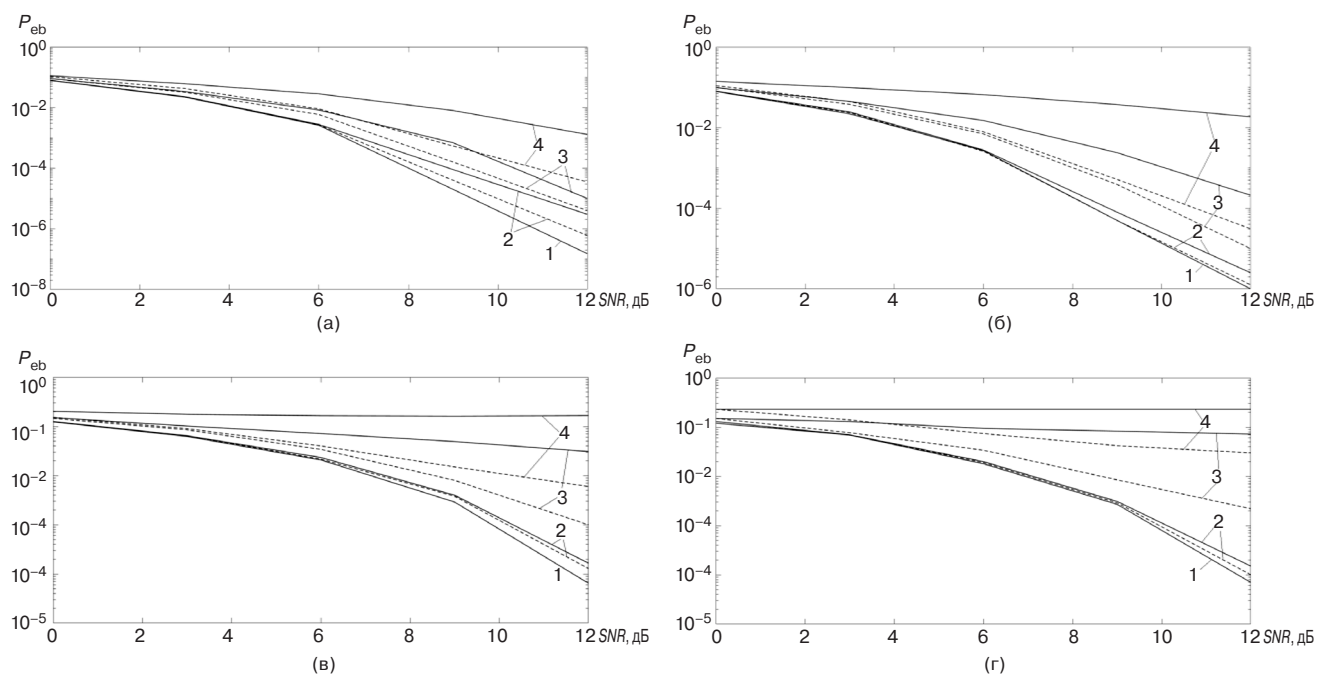
### Б. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

На рис. 3 показаны зависимости вероятности битовой ошибки  $P_{\text{еб}}$  от отношения сигнал/шум  $SNR$  (дБ) при  $\Delta f_{\text{п}} T_s = 0.5$ . Штриховые линии соответствуют случаю включенной схемы некогерентной обработки помехи. Для сравнения сплошными линиями даны кривые, полученные без обработки помехи.

Наглядно виден положительный эффект такой обработки – вероятность битовой ошибки значительно снижается. Особенно это заметно при больших значениях интенсивности помехи  $\mu = 0.5$  и  $0.9$ . Так при  $\mu = 0.5$  и  $P_{\text{еб}} = 10^{-2}$  для 2-ФМ включение схемы некогерентной обработки помехи дает энергетический выигрыш не более 0.5 дБ, для 4-ФМ (4-КАМ) – около 2 дБ и для 8-ФМ и 16-КАМ – более 5 дБ.



**Рис. 2.** Зависимости вероятности битовой ошибки от расстройки помехи с обработкой (1) и без обработки помехи (2): (а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ



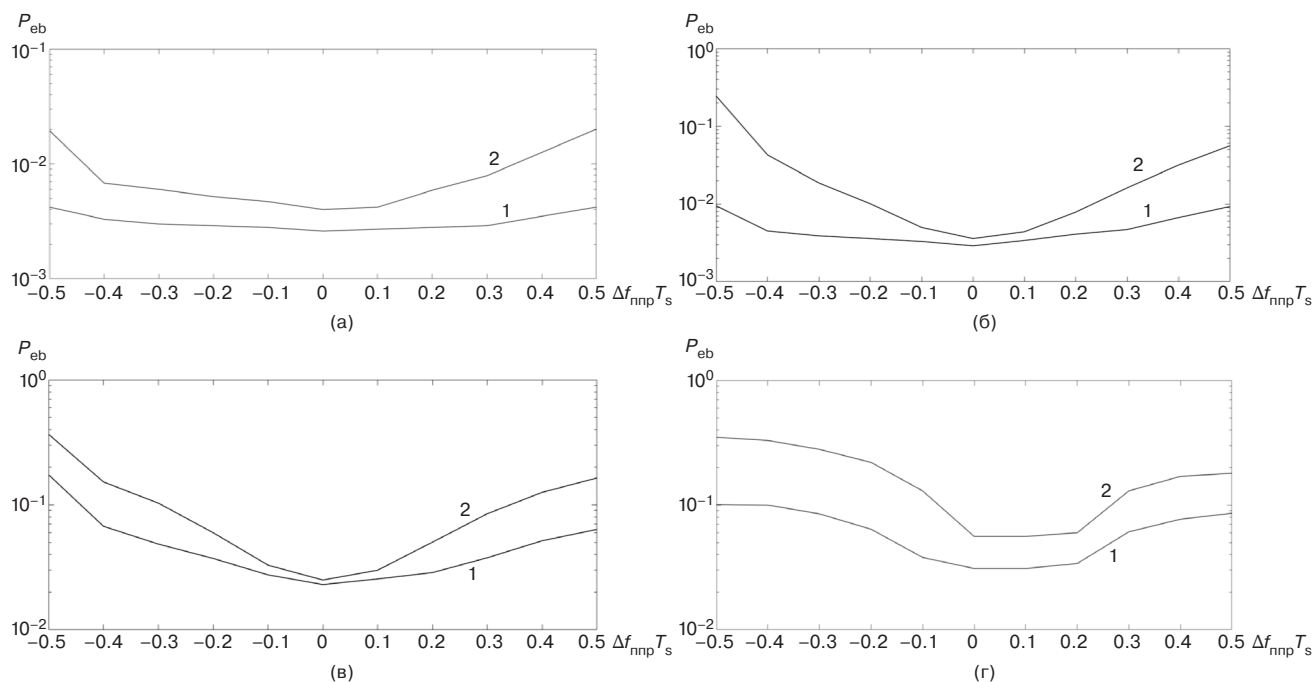
**Рис. 3.** Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при  $\mu = 0$  (1),  $\mu = 0.1$  (2),  $\mu = 0.5$  (3),  $\mu = 0.9$  (4): (а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ

Сравнение эффективности синтезированного алгоритма с адаптивным алгоритмом, примененным в [12, 17], показало, что оптимальная обработка сигнала и помехи обеспечивает наилучшие параметры помехоустойчивости во всем диапазоне изменений уровня помехи.

## В. Влияние неточности установки в приемнике частоты копии помехи

Алгоритм (7) предполагает знание в приемнике частоты помехи, как образца. Естественно, что это предположение часто не выполняется. Рассмотрим, как влияет отклонение частоты копии помехи  $\Delta f_{\text{ппр}}$ ,





**Рис. 4.** Влияние неточности установки в приемнике частоты копии помехи при  $\mu = 0.5$  (1),  $\mu = 0.9$  (2):  
(а) 2-ФМ, (б) 4-ФМ (4-КАМ), (в) 8-ФМ, (г) 16-КАМ

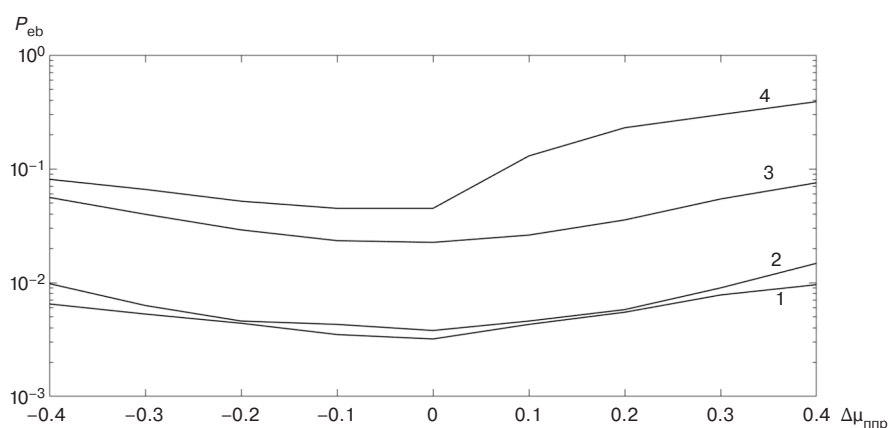
установленной в приемнике, на величину вероятности ошибки  $P_{eb}$ . На рис. 4 представлены графики, иллюстрирующие эту зависимость для разных сигналов при  $SNR = 7$  дБ. Здесь по оси абсцисс отложена величина  $\Delta f_{ппр} T_s$ , нормированная к символьной скорости передачи полезного сигнала.

Естественно, что обработка помехи является наиболее эффективной, когда в приемнике точно известна частота помехи  $\Delta f_{ппр} T_s = 0$ . Небольшие неточности установки в приемнике частоты копии помехи  $\Delta f_{ппр} T_s = \pm 0.1$  незначительно снижают помехоустойчивость приема сигнала, причем это снижение тем сильнее, чем больше интенсивность помехи, но при  $\mu = 0.9$  и расстройке  $\Delta f_{ппр} T_s = \pm 0.5$  для 2-ФМ вероятность ошибки увеличивается уже в 5 раз, а для 8-ФМ – в 7–10 раз.

#### Г. Влияние неточности установки в приемнике уровня копии помехи

Алгоритм (7) предполагает знание в приемнике также и уровня помехи. Рассмотрим, как влияет отклонение уровня копии помехи  $\Delta \mu_{ппр}$ , установленного в приемнике, на величину вероятности ошибки  $P_{eb}$ . На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие эту зависимость для разных сигналов при  $SNR = 7$  дБ и номинальной интенсивности помехи  $\mu = 0.9$ .

Из рис. 5 видно, что величина вероятности ошибки минимальна при отклонении интенсивности  $\Delta \mu_{ппр} = 0$ . Небольшие неточности установки в приемнике уровня копии помехи  $\Delta \mu_{ппр} = \pm 0.1$  незначительно снижают помехоустойчивость приема



**Рис. 5.** Влияние неточности установки в приемнике уровня копии помехи для 2-ФМ (1), 4-ФМ (4-КАМ) (2), 8-ФМ (3), 16-КАМ (4)

сигнала, но при  $\Delta\mu_{\text{ппр}} = \pm 0.4$  для всех сигналов наблюдается почти одинаковое (в 2–3 раза) увеличение вероятности битовой ошибки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальная некогерентная обработка гармонической помехи повышает помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов М-ФМ и М-КАМ за счет использования дополнительной схемы коррекции порогов в блоке принятия решения приемника.
2. Эффективность работы схемы зависит от расстройки частоты гармонической помехи относительно центральной частоты спектра полезного сигнала. Наибольший выигрыш в помехоустойчивости наблюдается при расстройке  $\Delta f_{\text{ппр}} T_s = 0.5$  (энергетический выигрыш от 0.5 дБ для 2-ФМ до более 5 дБ для 8-ФМ и 16-КАМ при  $\mu = 0.5$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савватеев Ю.И., Назаров О.В. (ред.). *Помехозащищенность приема дискретных сигналов*. М.: Радиотехника; 2015. 584 с. ISBN 978-5-93108-094-9
2. Петров А.В., Белобородов Д.А. Воздействие фазоманипулированной помехи на канал передачи данных с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Специальная техника*. 2016;3:2–10.
3. Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2019;671:120–127.
4. Петров А.В. Вероятность ошибочного приема символа в канале с квадратурной амплитудной манипуляцией под воздействием манипулированной по фазе помехи. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2018;5:47–53.
5. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Прохеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита М-КАМ сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018;23(5):32–41.
6. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Наукоемкие технологии*. 2018;19(11):32–38.
7. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11:2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

3. Выигрыш в помехоустойчивости приема тем выше, чем больше интенсивность гармонической помехи.
4. Схема некогерентной обработки гармонической помехи сохраняет работоспособность и при небольших неточностях установки частоты ( $\Delta f_{\text{ппр}} T_s = \pm 0.1$ ) и уровня ( $\Delta\mu_{\text{ппр}} = \pm 0.1$ ) копии помехи в приемнике.

### Вклад авторов

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

**Ч.Т. До** – синтез и анализ приемника сигналов М-ФМ.

**А.А. Лелюх** – синтез и анализ приемника сигналов М-КАМ.

**В.З. Нгуен** – проведение компьютерного моделирования.

### Authors' contributions

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

**T.T. Do** – synthesis and analysis of the M-PSK signal receiver.

**A.A. Lelyukh** – synthesis and analysis of the M-QAM signal receiver.

**V.D. Nguyen** – computer simulation.

### REFERENCES

1. 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
2. Petrov A.V., Beloborodov D.A. Impact of phase-shift keyed noise signal on data transmission channel with multiple phase-shift keying. *Spetsial'naya tekhnika = Special Technique*. 2016;3:2–10 (in Russ.).
3. Buchinskii D.I., Voznyuk V.V., Fomin A.V. Research of noise stability of the receiver with M-PSK modulation under the interference with different structure. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaitskogo = Proceedings of the Mozhaitsky Military Space Academy*. 2019;671:120–127 (in Russ.).
4. Petrov A.V. Symbol error rate in channel, using quadrature amplitude modulation, under the impact of phase-shift keyed jamming. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*. 2018;(5):47–53 (in Russ.).
5. Lozhkin K.Yu., Petrov A.V., Prozhertorko S.S. Analytical dependences of bit distortion average probability M-QAM of a signal against harmonic or PSK interference. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2018;23(5):32–41 (in Russ.).
6. Kulikov G.V., Nguyen V.D., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;19(11):32–38 (in Russ.).



8. Ложкин К.Ю., Петров А.В., Миронов В.А., Михалёв В.В., Прожеторко С.С. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита М-КАМ-сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех с учетом замираний. *Радиотехника*. 2020;84(4–8):27–35.
9. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В., Кузленков П.И. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
10. Nandi M. Symbol error probability of coherent PSK system in the presence of two path interference. *Int. J. Phys. Appl. (IJP4)*. 2013;5(2):133–137. URL: [http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2\\_10.pdf](http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2_10.pdf)
11. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall; 1985. 474 p.
12. Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность фазового алгоритма адаптивной фильтрации при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Журнал радиоэлектроники*. 2020;4:1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>
13. Прилепский А.В., Прилепский В.В., Каменский С.А. Оптимизация спектров сложных фазоманипулированных сигналов при приеме на фоне узкополосных помех и шума. *Теория и техника радиосвязи*. 2005;1: 44–47.
14. Поборчая Н.Е., Смердова Е.О. Вариационный алгоритм компенсации искажений КАМ сигнала на фоне квазидетерминированной полосовой помехи и аддитивного белого шума. *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2014;5(4):141–147.
15. Тихонов В.И. *Оптимальный прием сигналов*. М.: Радио и связь; 1983. 320 с.
16. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь; 1982. 624 с.
17. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Адаптивная фильтрация гармонической помехи при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>
7. 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;11:2 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
8. Lozhkin K.Yu., Petrov A.V., Mironov V.A., Mikhalev V.V., Prozhetorko S.S. Analytical dependences of bit distortion average probability M-QAM of a signal against harmonic or PSK jamming subject to fading. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(4,8):27–35 (in Russ.).
9. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V., Kuzlenkov P.I. Noise immunity of reception of signals with quadrature amplitude modulation in the presence of interference phase-shift keying. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics* 2019;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.10>
10. Nandi M. Symbol error probability of coherent PSK system in the presence of two path interference. *Int. J. Phys. Appl. (IJP4)*. 2013;5(2):133–137. Available from URL: [http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2\\_10.pdf](http://www.irphouse.com/ijpa/ijpav5n2_10.pdf)
11. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall; 1985. 474 p.
12. Kulikov G.V., Do T.T. Efficiency of the phase algorithm of adaptive filtering for receiving signals with multi-position phase shift keying. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2020;4:1 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.9>
13. Prilepskii A.V., Prilepskii V.V., Kamenskii S.A. Optimization of the spectra of complex phase-shift keyed signals when received against the background of narrow-band interference and noise. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Theory and technology*. 2005;1:44–47 (in Russ.).
14. Poborchaya N.E., Smerdova E.O. Variational algorithm for compensating QAM signal distortion against the background of quasi-deterministic band interference and additive white noise. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Systems of Signal Synchronization, Generation and Processing*. 2014;5(4):141–147 (in Russ.).
15. Tikhonov V.I. *Optimal'nyi priem signalov (Optimal Signal Reception)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1983. 320 p. (in Russ.).
16. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika (Statistical Radio Engineering)*: 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 624 p. (in Russ.).
17. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Adaptive filtering of harmonic interference when receiving signals with quadrature amplitude modulation. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2021;8 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.13>

#### 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, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

**До Чунг Тиен**, аспирант 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: dotrungtien1993@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9596-5440>

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

**Нгуен Ван Зунг**, ассистент, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, 236). E-mail: codonmaimai92@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>

#### About the authors

**Gennady V. Kulikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the 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, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

**Trung T. Do**, 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: dotrungtien1993@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-9596-5440>

**Andrey A. Lelyukh**, Deputy Head of the Technical Center of Special Equipment of JSC “Moscow Research Institute of Radio Communications” (32, Nizhegorodskaya ul., Moscow, 109029 Russia). E-mail: a.llel@mail.ru. RSCI SPIN-code 1021-5094.

**Van D. Nguyen**, Assistant, Le Quy Don Technical University, (236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam). E-mail: codonmaimai92@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2810-1204>