

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>



УДК 621.391

## Влияние качества функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приёма сигналов цифровых линий связи и коррекция межсимвольных искажений

Д. С. Коптев<sup>1</sup> ✉, В. Г. Довбня<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

### Резюме

**Целью исследования** является теоретическая оценка потенциальной помехоустойчивости приёма сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией в цифровых линиях связи при условии неидеальности параметров устройства автоматической регулировки усиления.

**Методы исследования** опираются на теорию потенциальной помехоустойчивости многопозиционных цифровых сигналов, основы квазиоптимального приёма, методы математического моделирования сигналов. Допущено предположение, что синтезатор колебаний гетеродинов устройств восстановления несущей и тактовой синхронизации в радиоприёмной системе функционирует идеально, т. е. фазы выходного колебания синтезатора колебаний гетеродина и выходного колебания устройства восстановления несущей равны нулю, отсутствует неустойчивость периода следования тактовых импульсов, а частотная характеристика канала соответствует условию Найквиста.

**Результаты.** Разработаны комплексные аналитические модели, позволяющие оценить потенциальную помехоустойчивость приёма многопозиционных КАМ-сигналов с учётом влияния факторов статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регулировки усиления. Показано, что требования к точности установки уровня сигнала на входе решающего устройства радиоприёмной системы ужесточаются с увеличением кратности модуляции. Так, результаты математического моделирования показали, что для видов модуляции КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 статическая ошибка установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения должна составлять не более 0,27, 0,12, 0,054 и 0,027 дБ соответственно. Указанные значения, как показали проведенные расчеты и полученные теоретические зависимости, позволяют получить приемлемые значения уровня эквивалентных энергетических потерь, который не превышает 0,3 дБ.

**Заключение.** Показано, что разработка и проектирование адаптивных корректоров межсимвольных искажений являются весьма актуальными направлениями повышения помехоустойчивости радиоприёмных систем, позволяющих компенсировать неидеальность характеристик различных структурно-функциональных элементов демодуляторов многопозиционных цифровых сигналов, в том числе и устройства автоматической регулировки усиления. В корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки. Наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

**Ключевые слова:** цифровые линии связи; радиоприёмная система; сигнал с квадратурной амплитудной манипуляцией; демодулятор многопозиционных сигналов; автоматическая регулировка усиления; адаптивный корректор; межсимвольные искажения.

© Коптев Д. С., Довбня В. Г., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(2):74–89

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Коптев Д. С., Довбня В. Г. Влияние качества функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приёма сигналов цифровых линий связи и коррекция межсимвольных искажений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 74–89. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>

Поступила в редакцию 16.04.2025

Подписана в печать 13.05.2025

Опубликована 30.06.2025

## Influence of the quality of functioning of the automatic gain control device on the noise immunity of reception of signal digital communication lines and correction of intersymbol distortions

Dmitry S. Koptev<sup>1</sup> ✉, Vitaly G. Dovbnya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

### Abstract

**The purpose of the research** is a theoretical assessment of the potential noise immunity of quadrature amplitude modulation signals in digital communication lines under the condition of imperfect parameters of the automatic gain control device.

**Methods.** The research methods are based on the theory of potential noise immunity of multi-position digital signals, the fundamentals of quasi-optimal reception, and methods of mathematical modeling of signals. It is assumed that the synthesizer of heterodyne oscillations of the carrier and clock synchronization devices in the radio receiving system function ideally, i.e. the phases of the output oscillation of the heterodyne oscillation synthesizer and the output oscillation of the carrier recovery device are zero, there is no instability in the clock pulse repetition period, and the frequency response of the channel corresponds to the Nyquist condition.

**Results.** Complex analytical models have been developed that allow estimating the potential noise immunity of multi-position QAM signals reception taking into account the influence of static and dynamic error factors in the operation of the automatic gain control device. It has been shown that the requirements for the accuracy of setting the signal level at the input of the decision device of the radio receiving system become more stringent with increasing modulation multiplicity. Thus, the results of mathematical modeling have shown that for the QAM-16, QAM-64, QAM-256 and QAM-1024 modulation types, the static error in setting the signal level at the input of the decision device should be no more than 0,27, 0,12, 0,054 and 0,027 dB, respectively. The specified values, as shown by the calculations and the obtained theoretical dependencies, allow obtaining acceptable values of the equivalent energy loss level, which does not exceed 0,3 dB.

**Conclusion.** It is shown that the development and design of adaptive correctors of intersymbol distortions is a very relevant direction for increasing the noise immunity of radio receiving systems, allowing to compensate for the imperfection of the characteristics of various structural and functional elements of multi-position digital signal demodulators, including the automatic gain control device. In correctors of complex signal demodulators, the most appropriate criterion is the minimum mean square error. The lowest level of the square error in the range of low signal-to-noise ratios is provided by an algorithm that is a combination of a modified start-stop algorithm and a two-mode algorithm with a constant modulus.

**Keywords:** digital communication lines; radio receiving system; quadrature amplitude-shift keying signal; multi-position signal demodulator; automatic gain control; adaptive corrector; intersymbol distortion.

**Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Koptev D.S., Dovbnaya V.G. Influence of the quality of functioning of the automatic gain control device on the noise immunity of reception of signal digital communication lines and correction of intersymbol distortions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(2):74–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-74-89>

Received 16.04.2025

Accepted 13.05.2025

Published 30.06.2025

\*\*\*

## Введение

Приём сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) требует преодоления априорной неопределенности относительно медианного ослабления сигнала в канале распространения радиоволн [1]. Данная задача в демодуляторе радиоприёмных систем (РПС) решается устройством автоматической регулировки усиления (АРУ), показателем качества функционирования которого являются статическая и флуктуационная ошибки установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения РПС [2]. Одним из основных факторов, в значительной степени влияющих на качество приема высокоскоростных сигналов цифровых линий связи (ЦЛС), является межсимвольная интерференция, вызванная многолучевым распространением радиоволн, а также неидеальностью частотных характеристик передающего и приемного устройств ЦЛС [3]. Это, в свою очередь, объективно обуславливает необходимость применения в демодуляторах ЦЛС адаптивных корректоров межсимвольных искажений [4].

Коррекция искажений сигнала может быть осуществлена как во временной, так и в частотной областях и реализована либо в полосе канала, либо в полосе модулирующих частот [5]. Реализация адаптивного корректора межсимвольных искажений во временной области и в полосе модулирующих частот отличается меньшей сложностью [6].

Для коррекции искажений могут быть использованы как линейные, так и нелинейные с решающей обратной связью корректоры. Нелинейные корректоры наиболее пригодны для каналов с большими амплитудными искажениями и, кроме того, менее чувствительны к ошибке установки фазы тактового колебания. Однако эффективность применения таких корректоров при низких отношениях сигнал / шум невысока из-за увеличения ошибок ввиду наличия обратной связи [7].

## Материалы и методы

Для оценки влияния качества функционирования устройства АРУ на помехоустойчивость приема КАМ будем полагать, что синтезатор колебаний

гетеродинов, устройства восстановления несущей и тактовой синхронизации в модели РПС функционирует идеально, т. е. фаза выходного колебания синтезатора колебаний гетеродина  $\psi_R(t) = 0$ , фаза выходного колебания устройства восстановления несущей  $\psi_V(t) = 0$  и нестабильность периода следования тактовых импульсов  $\tau_R(t) = 0$ , а частотная характеристика канала соответствует условию Найквиста – выражение [8].

С учетом сделанных допущений выражения для огибающих квадратурных составляющих сигнала на входе устройства принятия решений (УПР) и правило максимума правдоподобия соответственно могут быть записаны в следующем виде:

$$U_x(t) = \mu [dG_\Sigma(t)m_r + N_{Rx}(t)], \quad (1)$$

$$U_y(t) = \mu [dG_\Sigma(t)n_r + N_{Ry}(t)], \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент передачи непрерывного канала;  $G_\Sigma(t)$  – огибающая импульсной характеристики непрерывного канала;  $N_{Rx}(t), N_{Ry}(t)$  – огибающие квадратурных составляющих аддитивного белого гауссова шума, имеющего нулевое математическое ожидание и дисперсию  $\sigma_N^2 = N_0 B_R$ ;  $m_r, n_r$  – амплитуды синфазной и квадратурной составляющих сигналов [9].

$$\begin{aligned} & m_r \left( m_r - \frac{\mu m_r}{2} \right) + n_r \left( n_r - \frac{\mu n_r}{2} \right) + \\ & \frac{m_r N_{Rx0} + n_r N_{Ry0}}{dG_{\Sigma 0}} > m_p \left( m_r - \frac{\mu m_p}{2} \right) + \\ & + n_p \left( n_r - \frac{\mu n_p}{2} \right) + \frac{m_p N_{Rx0} + n_p N_{Ry0}}{dG_{\Sigma 0}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$r \neq p,$

где  $G_{\Sigma 0} = G_\Sigma(\tau_0)$  – значение огибающей импульсной характеристики канала в момент принятия решения;  $N_{Rx0} = N_{Rx}(\tau_0), N_{Ry0} = N_{Ry}(\tau_0)$  – значения огибающих квадратурных составляющих шума в момент принятия решения [10].

Решение в РПС принимается отдельно по каждой из огибающей квадратурных составляющих сложного цифрового сигнала согласно нижепредставленному алгоритму:

$$\begin{cases} \text{sgn}(m_p - m_r) \left[ 0,5\mu(m_p - m_r) + \right. \\ \left. + (\mu - 1)m_r \right] > N_{Rx0} / dG_{\Sigma 0}, \\ \text{sgn}(n_p - n_r) \left[ 0,5\mu(m_p - m_r) + \right. \\ \left. + (\mu - 1)m_r \right] > N_{Ry0} / dG_{\Sigma 0}, m \neq p. \end{cases} \quad (4)$$

где  $\text{sgn}(x)$  – знаковая функция;

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Тогда условная вероятность ошибки в принимаемом символе будет рассчитываться по следующей формуле:

$$P_s(\mu) \approx 2P(\mu) = 2P\left\{\xi_s > \operatorname{sgn}(p-r) \times \left[0,5\mu(p-r) + (\mu-1)r\right]\right\}, \quad (5)$$

где  $r, p = \{-(L-1), -(L-3), \dots, (L-1)\}$ ,  $m \neq p$ ;  $\xi_s = N_{Rx0} / dG_{\Sigma 0}$  – центрирован-

$$\|P_{p,m}(\mu)\| = \left\| \begin{array}{cccc} P_{-(L-1),-(L-3)}(\mu) & P_{-(L-1),-(L-5)}(\mu) & \dots & P_{-(L-1),L-1}(\mu) \\ P_{-(L-3),-(L-1)}(\mu) & P_{-(L-3),-(L-5)}(\mu) & \dots & P_{-(L-3),L-1}(\mu) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{L-1,-(L-1)}(\mu) & P_{L-1,-(L-3)}(\mu) & \dots & P_{L-1,L-3}(\mu) \end{array} \right\|, \quad (6)$$

$$P(\mu) = \sum_r \sum_p P(r)P(p/r, \mu) = \frac{1}{L} \sum_p \sum_r Q\left\{\sqrt{\frac{3}{M-1}} h \operatorname{sgn}(p-r) [0,5\mu(p-r) + (\mu-1)r]\right\}, \quad (7)$$

где  $M$  – позиционность сигнала;  $L$  – число значений амплитуд огибающих квадратурных составляющих КАМ-сигнала, равное  $\sqrt{M}$  если  $\log_2 M$  четное, и  $\sqrt{1,125M}$ , если  $\log_2 M$  нечетное;

$$Q(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_y^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

– гауссов интеграл ошибок [12].

Полагая элементы матрицы (6), для которых  $|0,5(p-r)| \neq 1$ , равными нулю и опуская промежуточные преобразования, получим модифицированное выражение для определения условной вероятности битовой ошибки в следующем виде:

$$P_b(\mu) = \frac{1}{L \log_2 L} \sum_l \operatorname{erfc} \times \left\{ \sqrt{\frac{1,5}{M-1}} h [1 + (\mu-1)l] \right\}, \quad (8)$$

ная случайная величина, имеющая нормальное распределение [11].

Матрица условных вероятностей и выражение для среднего значения условной вероятности ошибки в рассматриваемом случае примет следующий вид:

где – дополнительная функция ошибок; отношение сигнал / шум, обеспечивающее заданную вероятность битовой ошибки [13].

В связи с тем, что для идеального устройства АРУ  $\mu = 1$ , выражение (8) целесообразно переписать в виде

$$P_b(\chi) = \frac{1}{L \log_2 L} \sum_l \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{1,5}{M-1}} h [1 + \chi l] \right\}, \quad (9)$$

где  $\chi = 1 - \mu$  – ошибка установки уровня сигнала на входе УПР.

Выражения (8) и (9) позволяют оценить влияние статической ошибки установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов.

Одним из методов оценки влияния флуктуационной ошибки функционирования устройства АРУ является усреднение условной вероятности ошибки  $P_b(\mu)$  по всем набору заданных

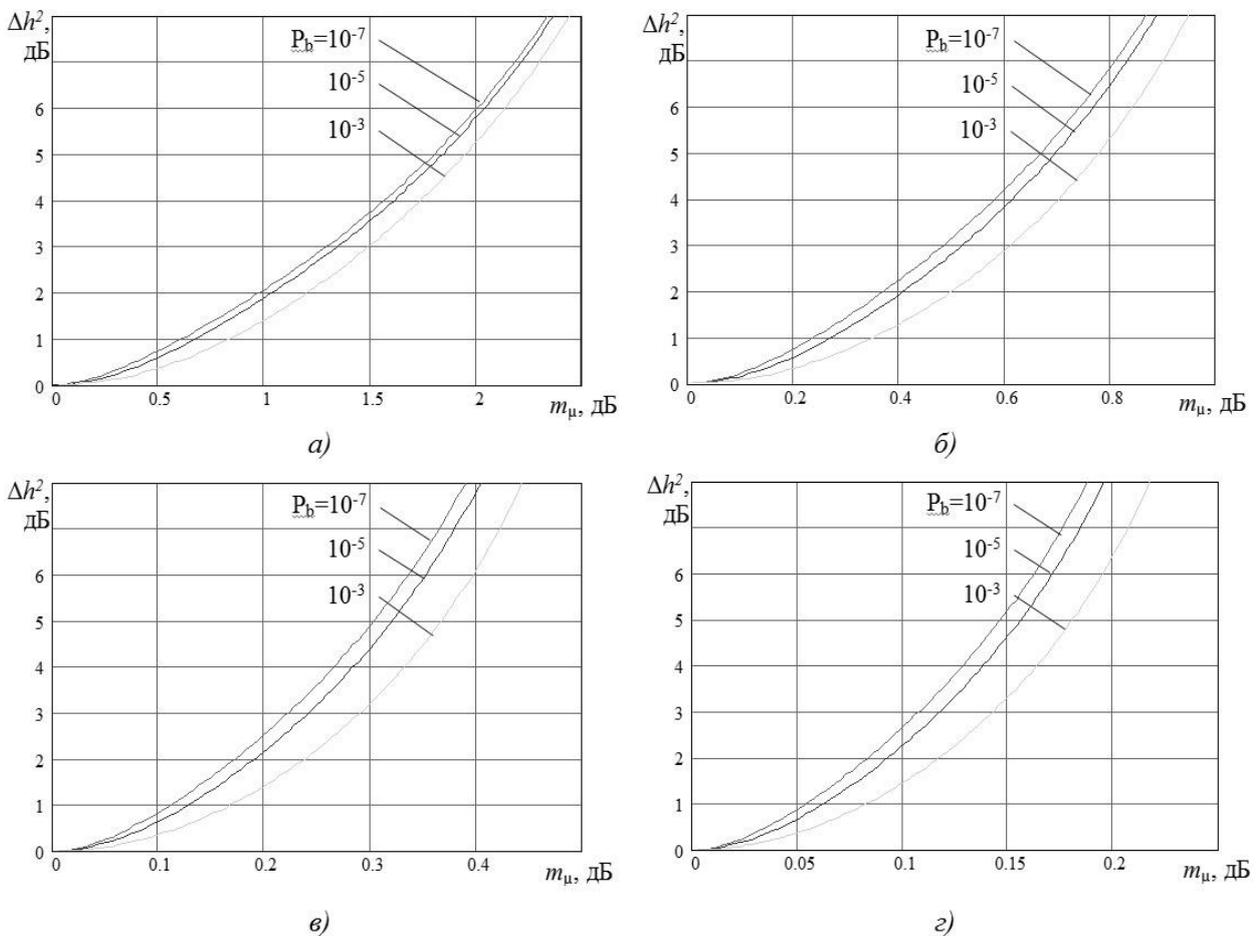
значений амплитуды многопозиционного сигнала:

$$P_b = \int_{1-\mu_1}^{1+\mu_1} P_b(\mu) w(\mu) d\mu, \quad (10)$$

где  $\mu_1 = 2/L$ ;  $w(\mu)$  – функция плотности распределения ошибки оценки уровня принимаемого сигнала (в общем случае имеет вид нормального закона распределения) [14].

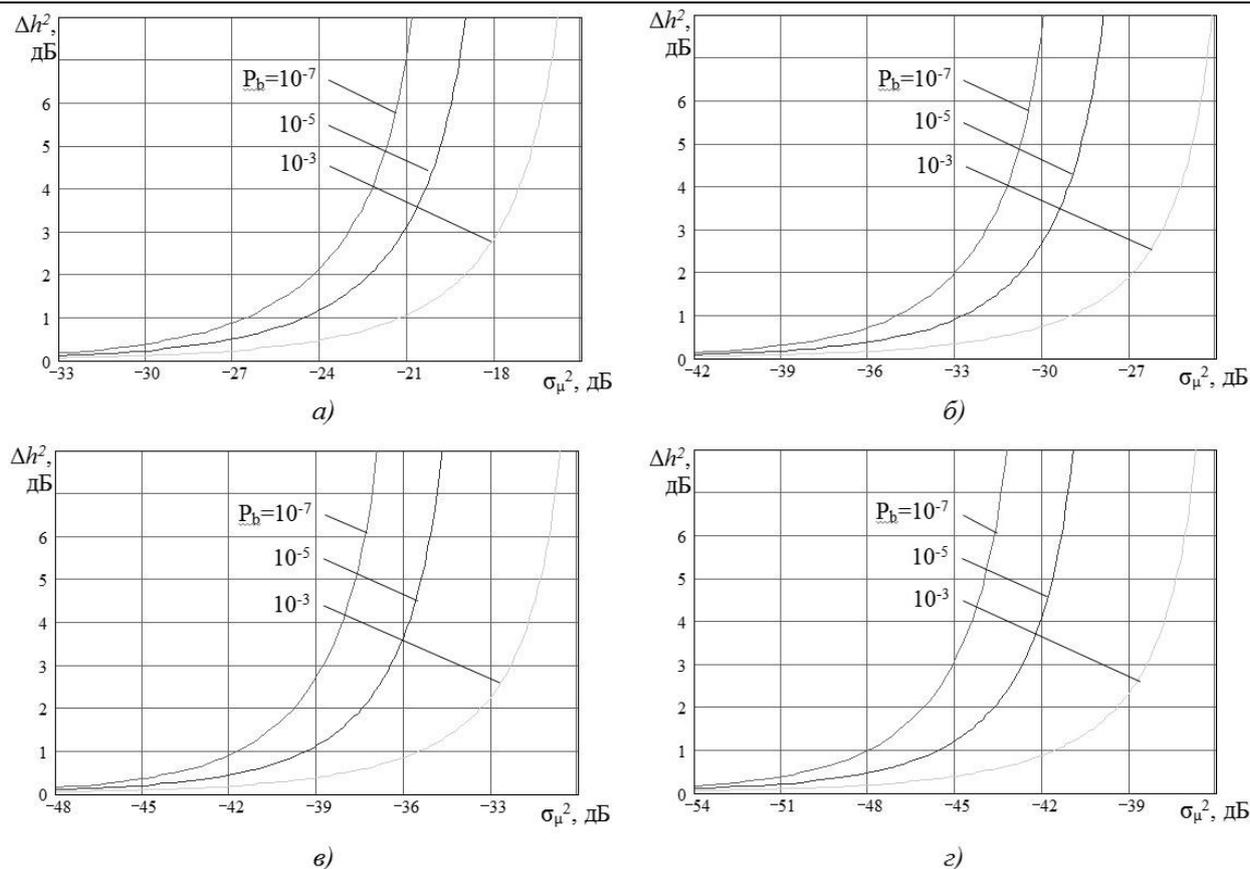
## Результаты и их обсуждение

С использованием аналитических выражений (8) и (9) итерационным методом в среде *MathCad 11* получены графические зависимости эквивалентных энергетических потерь от статической и флуктуационной ошибок установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения РПС цифровых линий связи (рис. 1 и 2).



**Рис. 1.** Графические зависимости оценки эквивалентных энергетических потерь от статической ошибки установки уровня сигнала на входе решающего устройства для сигналов: а – KAM-16; б – KAM-64; в – KAM-256; з – KAM-1024

**Fig. 1.** Graphic dependencies of the assessment of equivalent energy losses on the static error of setting the signal level at the input of the decision device for signals: а – QAM-16; б – QAM-64; в – QAM-256; з – QAM-1024



**Рис. 2.** Графические зависимости оценки величины эквивалентных энергетических потерь от джиттера сигнала на входе решающего устройства для сигналов: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

**Fig. 2.** Graphic dependencies of the estimate of the equivalent energy loss value from the signal jitter at the input of the decision device for signals: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Из анализа графиков следует, что:

- повышение позиционности цифровых сигналов способствует ужесточению требований к точности установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения, которые возрастают пропорционально шагу изменения кратности модуляции;

- для видов модуляции КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 допустимый уровень эквивалентных энергетических потерь (от 0,2 до 0,3 дБ) обеспечивается при статической ошибке установки уровня сигнала на входе устройства принятия решения не более

0,27, 0,12, 0,054 и 0,027 дБ и флуктуациях не более –30, –39, –45 и –51 дБ соответственно.

Реализация вышеуказанных достаточно высоких требований обуславливает необходимость применения как минимум двух контуров автоматической регулировки усиления, первый из которых обеспечивает отслеживание неглубоких ( $\pm 1$  дБ) быстрых замираний сигнала с частотой от 2 до 10 Гц, второй – более медленных замираний с частотой менее 2 Гц и глубиной до  $\pm 10$  дБ. При этом второй контур регулировки усиления целесообразно реализовать в виде

цифровой астатической системы с интегратором в цепи обратной связи.

Разработанная аналитическая модель и полученные графические зависимости позволяют адекватно оценить степень влияния статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регулировки усиления на потенциальную помехоустойчивость приема сложных сигналов и, таким образом, теоретически обосновать требования к точности поддержания уровня принимаемого сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора сигналов с многопозиционными видами модуляции.

В условиях сильных искажений характеристики группового времени запаздывания наиболее эффективно применение дробно-интервальных, в частности  $T/2$ -интервальных, линейных корректоров. Кроме того, такие корректоры не требуют применения формирующего входного фильтра, в меньшей степени повышают уровень шума при коррекции амплитудных искажений и менее чувствительны к фазе сигнала дискретизации.

В общем случае выходной сигнал корректора на  $k$ -м интервале может быть записан в виде

$$\dot{y}_k = \sum_{i=0}^{N_c-1} \dot{c}_i \dot{x}_{k-i} - \sum_{j=1}^{N_b} \dot{b}_j \hat{y}_{k-j}, \quad (11)$$

где  $N_c, N_b$  – порядок трансверсальных фильтров соответственно в прямой и обратных цепях корректора;  $\dot{c}_i, \dot{b}_j$  – комплексные весовые коэффициенты фильтров соответственно в прямой и

обратных цепях корректора ( $i = 0, 1 \dots N_c - 1; j = 1, 2 \dots N_b$ );  $\dot{x}_k, \hat{y}_k$  – выборки комплексных входного сигнала и сигнала на выходе решающего устройства.

Выражение (11) описывает сигнал на выходе нелинейного корректора с решающей обратной связью. Если второй член в выражении (11) положить равным нулю, то получим формулу для сигнала на выходе линейного корректора.

В матричной форме выражение (11) будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{y}_k = X_k C^T - \hat{Y}_{k-1} B^T, \quad (12)$$

где  $X_k = [\dot{x}_k, \dot{x}_{k-1}, \dots, \dot{x}_{k-N_c+1}]^T$  – вектор-столбец отсчетов входного процесса;  $C = [\dot{c}_0, \dot{c}_1, \dots, \dot{c}_{N_c-1}]^T$  – вектор-столбец весовых коэффициентов трансверсального фильтра в прямой цепи;  $\hat{Y}_{k-1} = [\hat{y}_{k-1}, \hat{y}_{k-2}, \dots, \hat{y}_{k-N_b}]^T$  – вектор-столбец решений;  $B = [\dot{b}_1, \dot{b}_2, \dots, \dot{b}_{N_b}]^T$  – вектор-столбец весовых коэффициентов фильтра в обратной цепи [15].

Задача проектирования адаптивных корректоров содержит две частные задачи: первая – выбор структуры (порядка) комплексных трансверсальных фильтров в цепи прямой и обратной связи; вторая – выбор критерия оптимальности и алгоритма расчета весовых коэффициентов.

Анализ [16; 17; 18; 19] показал, что оптимальной структуры, минимизирующей вероятность ошибки в широком диапазоне отношений сигнал/шум и возможных видов импульсной характе-

ристики канала, не существует. В связи с этим порядок (количество весовых коэффициентов) используемых в корректорах трансверсальных фильтров должен выбираться с точки зрения достижения компромисса между снижением влияния МСИ и уровнем дополнительного шума, обусловленного случайными блужданиями значений весовых коэффициентов. В настоящее время максимально необходимая глубина коррекции межсимвольных искажений для большинства практически встречающихся случаев приема сигналов цифровых спутниковых линий связи не превышает 8 символов, для приема сигналов цифровых радиорелейных линий связи – 16, а в случаях приема сигналов с многопозиционными видами модуляции от КАМ-256 и выше или наличия глубоких (до 10 дБ) частотно-селективных замираний – не менее 32.

Одними из наиболее распространенных критериев оптимальности корректоров межсимвольных искажений являются минимум среднего квадрата ошибки и минимум наименьших квадратов [20].

Корректоры, использующие критерий минимума среднего квадрата ошибки, отличаются более высокой устойчивостью функционирования в условиях низких отношений сигнал / шум и повышенной МСИ и относительно малым объемом вычислительных затрат, а реализующие критерий минимума наименьших квадратов – быстрой сходимостью итерационных алгоритмов.

В связи с тем, что среда распространения радиоволн характеризуется относительно медленными замираниями, что не предъявляет высоких требований к скорости адаптации, и учитывая существенно более высокий объем вычислительных затрат для алгоритмов, реализующих критерий наименьших квадратов, в корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки.

В общем случае оптимальное значение вектора весовых коэффициентов  $W_{\text{опт}}$  является решением уравнения [21]:

$$\nabla J(W) = 0, \quad (13)$$

где  $J(W) = \overline{|\dot{\epsilon}_k|^2}$  – показатель качества критерия МСКО;

$$W = [\dot{c}_0, \dot{c}_1, \dots, \dot{c}_{N_c-1}, \dot{b}_1, \dot{b}_2, \dots, \dot{b}_{N_b}]^T;$$

$\dot{\epsilon}_k = \dot{I}_k - \dot{y}_k$  – ошибка при приеме  $k$ -го информационного символа;  $\dot{I}_k$  – переданный (эталонный)  $k$ -й информационный символ;  $\nabla$  – оператор градиента.

Все методы решения (алгоритмы адаптации) уравнения (13) делятся на прямые и итерационные [20].

Прямые методы предусматривают нахождение оптимальных весовых коэффициентов из решения системы линейных уравнений, матричный вид которой

$$W_{\text{опт}} = R^{-1}P, \quad (14)$$

где  $R$  – ковариационная матрица отсчетов входного процесса;  $P$  – вектор коэффициентов взаимной корреляции между

передаваемым (эталонным) информационным символом и отсчетами входного процесса.

Итерационные методы, реализуемые методом кратчайшего спуска, обеспечивают пошаговый расчет весовых коэффициентов корректора по формуле

$$\begin{cases} \widehat{C}_{k+1} = \widehat{C}_k - \mu \cdot \dot{\epsilon}_k \cdot X_k^* \\ \widehat{B}_{k+1} = \widehat{B}_k - \mu \cdot \dot{\epsilon}_k \cdot \widehat{Y}_{k-1}^* \end{cases} \quad (15)$$

где  $\mu$  – достаточно малый положительный коэффициент, определяющий скорость сходимости адаптивных корректоров межсимвольных искажений.

Отсутствие априорной информации об эталонном сигнале не позволяет использовать вышеуказанные методы для решения уравнения (14), что объективно обуславливает необходимость применения алгоритмов «слепого» выравнивания.

Из алгоритмов «слепого» выравнивания благодаря простоте реализации наибольшее распространение получили следующие стохастические градиентные алгоритмы: Годарда (алгоритм с постоянным модулем) [22] и старт-стопный [23].

Анализ [22; 23] показал, что наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

Комбинированный алгоритм адаптации выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{c}_{i,k+1} = \dot{c}_{i,k} - \mu \cdot \dot{\epsilon}_{Gk} \cdot x_{k-i}, \\ \dot{b}_{j,k+1} = \dot{b}_{j,k} - \mu \cdot f_k \cdot \dot{\epsilon}_{Gk} \cdot y_{k-j}; \\ y_k \notin D_n; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{c}_{i,k+1} = \dot{c}_{i,k} - \mu \cdot \dot{\epsilon}_{Gnk} \cdot x_{k-i}, \\ \dot{b}_{j,k+1} = \dot{b}_{j,k} - \mu \cdot f_k \cdot \dot{\epsilon}_{Gnk} \cdot y_{k-j}, \\ y_k \in D_n, \end{cases} \quad (17)$$

где

$$\dot{\epsilon}_{Gnk} = \dot{y}_k \left( |\dot{y}_k|^2 - R_{2n} \right); \quad (18)$$

$$R_{2n} = \left| \hat{y}_k \right|^2, \quad (19)$$

$D_n$  – область близких решений с центрами в точках  $-d(L - 1), -d(L - 3), \dots, d(L - 1)$  и размером  $\pm \Delta$  (рис. 3, на примере амплитуд квадратурных составляющих сигнала КАМ-64).

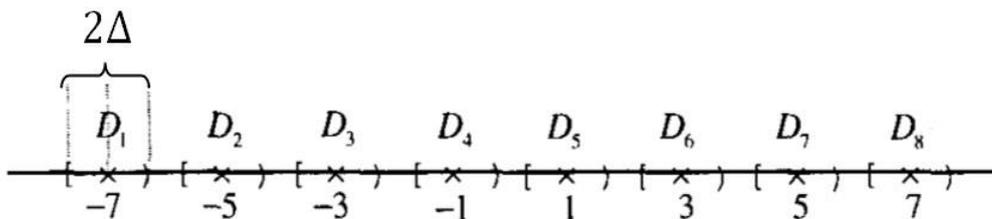


Рис. 3. Область близких решений для сигнала КАМ-64

Fig. 3. Region of close solutions for the QAM-64 signal

## Выводы

Таким образом, разработанная аналитическая модель и полученные графические зависимости позволяют оценить степень влияния статической и динамической ошибок функционирования устройства автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приема сложных сигналов и, таким образом, теоретически обосновать требования к точности поддержания уровня принимаемого сигнала на входе устройства принятия решения демодулятора сигналов с многопозиционными видами модуляции. Показано, что в корректорах демодуляторов сложных сигналов наиболее целесообразно применение критерия минимума среднего квадрата ошибки. Наименьший уровень квадрата ошибки в диапазоне низких отношений

сигнал / шум обеспечивает алгоритм, являющийся комбинацией модифицированного старт-стопного алгоритма и двухрежимного алгоритма с постоянным модулем.

Модификация приведенного выше комбинированного алгоритма, заключающаяся в использовании селективной обратной связи по решению, позволит повысить устойчивость и точность функционирования адаптивного корректора межсимвольных искажений в области низких отношений сигнал / шум. Использование таких корректоров позволяет существенно повысить исправляющую способность в условиях сильных межсимвольных искажений, при которых амплитудные отклонения принимаемых отсчетов превышают размеры зон принятия решения.

## Список литературы

1. Макаров С. Б., Завьялов С. В., Овсянникова А. С. Оптимизация формы сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией с использованием критерия заданной скорости спада уровня внеполосных излучений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 6–22. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-4-6-22>
2. Ершов И. А., Данишевский Н. С. Методика расчета системы автоматической регулировки усиления в усилителях приёмных устройств // Computing, Telecommunications and Control. 2022. Т. 15, № 3. С. 22–37. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15302>
3. Алёшинцев А. В. Оптимизация структуры многочастотного модема // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 10–19.
4. Белов А. Д., Полушин П. А. Методы «мягкой» и «жесткой» коррекции для борьбы с межсимвольными искажениями цифровых сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. № 1. С. 33–37.
5. Полушин П. А., Архипов Н. А., Шалина В. В. Эффективность «физической» и «логической» коррекции межсимвольных искажений цифровых сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 2(50). С. 21–28. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-2-21-28>

6. Лобов Е. М., Алаа А. Обзор существующих методов коррекции межсимвольных искажений радиосигналов в цифровых системах связи с использованием машинного обучения // Телекоммуникации и информационные технологии. 2023. Т. 10, № 1. С. 109–119.

7. Полушин П. А., Архипов Н. А., Шалина В. В. Модификация метода кодирования при борьбе с межсимвольными искажениями цифровых сигналов с модуляцией QPSK // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 1(49). С. 33–40. <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-1-33-40>

8. Шарамет А. В., Азаров И. С. Особенности работы приемного тракта в многоканальной радиолокационной станции с временной автоматической регулировкой усиления // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 47–51.

9. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Влияние качества функционирования гетеродинов на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 9(17). С. 40–48. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-03)

10. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–50.

11. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, L. R. Herman Floresmilo, G. I. Podkhalidin // T-Comm. 2023. Vol. 17, N 5. P. 58–63. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-5-58-63>

12. Бобровский В. И., Латыпова С. С. Модификация сигнальной конструкции с тридцати двух позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией // Техника средств связи. 2018. № 4(144). С. 36–47.

13. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3(28). С. 35–40.

14. Расчет вероятности ошибки в канале с общими к-μ-замираниями и аддитивным белым гауссовским шумом / Н. В. Савищенко, А. Исса, А. С. Ишимов, Е. А. Попов // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 3. С. 109–121. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202303-11>

15. Санников В. Г., Волчков В. П. Повышение помехоустойчивости модема с оптимальными финитными сигналами, не вызывающими межсимвольную интерференцию в линейном канале связи // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6, № 2. С. 19–28.
16. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Исследование минимизации вероятности ошибок, возникающих при четырехкратных методах дискретной модуляции // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 31–33.
17. Дегтярев А. Н., Конева С. А. Минимизация вероятности ошибки при взвешенном приеме сообщения с двухпозиционной импульсно-кодовой манипуляцией в условиях межсимвольной интерференции // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.1>
18. Флакман А. Г., Сорокин И. С., Кокарев А. О. Минимизация вероятности ошибки на бит в многоэтапной релейной ММО-системе // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 4. С. 36–44. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44>
19. Кудрявцев А. А., Шестаков О. В. Асимптотическое поведение функции потерь в методе мультипликативного масштабирования вейвлет-коэффициентов функции сигнала // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2017. № 1. С. 16–9.
20. Анализ методов борьбы с межсимвольными искажениями в цифровых тропосферных линиях связи / А. И. Жирнов, Е. В. Орлов, В. Е. Егрусев [и др.] // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 42. С. 874–879.
21. Особенности реализации демодулятора блочных сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией / О. И. Атакищев, К. Ю. Рюмшин, А. А. Амеленков, А. П. Журавлев // Известия Института инженерной физики. 2021. № 4(62). С. 16–19.
22. Система алгоритмов цифровой обработки сигнала для когерентной оптической связи / Т. О. Базаров, М. А. Сенько, Л. А. Самоделкин [и др.] // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 6. С. 894–912. <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>
23. Принципы формирования сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием / Р. И. Кочубей, М. М. Бычковский, Н. Н. Зайкин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 134–141. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-134-135>

## References

1. Makarov S.B., Zavyalov S.V., Ovsyannikova A.S. Optimization of the shape of signals with quadrature amplitude modulation using the criterion of a given rate of decay of the level of out-of-band emissions. *Computing, Telecommunications and Control = Proceedings of Russian Universities. Radio Electronics*. 2022;25(4):6–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-4-6-22>

2. Ershov I.A., Danishevsky N.S. Methodology for calculating the automatic gain control system in amplifiers of receiving devices. *Computing, Telecommunications and Control*. 2022;15(3):22–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15302>

3. Alyoshintsev A.V. Optimization of the structure of a multi-frequency modem. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2021;15(6):10–19. (In Russ.)

4. Belov A.D., Polushin P.A. Methods of "soft" and "hard" correction to combat intersymbol distortions of digital signals. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2020;(1):33–37. (In Russ.)

5. Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V. Efficiency of "physical" and "logical" correction of intersymbol distortions of digital signals. *Radio-tekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(2):21–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-2-21-28>

6. Lobov E.M., Alaa A. Review of existing methods for correcting intersymbol distortions of radio signals in digital communication systems using machine learning. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii = Telecommunications and Information Technologies*. 2023;10(1):109–119. (In Russ.)

7. Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V. Modification of the coding method in the fight against intersymbol distortions of digital signals with QPSK modulation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023;(1):33–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-1-33-40>

8. Sharamet A.V., Azarov I.S. Features of the receiving path in a multi-channel radar station with temporary automatic gain control. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2023;(3):47–51. (In Russ.)

9. Dovbnja V.G., Koptev D.S. Influence of the quality of heterodyne operation on the noise immunity of reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2020;84(9):40–48. (In Russ.) [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-03)

10. Dovbnja V.G., Koptev D.S. Main directions of increasing the noise immunity of radio receiving systems based on spatio-temporal processing of complex signals in the antenna device. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):36–50. (In Russ.)

11. Dovbnja V.G., Koptev D.S., Herman Floresmilo L.R., Podkhaldin G.I. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad. *T-Comm*. 2023;17(5):58–63. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-5-58-63>

12. Bobrovsky V.I., Latypova S.S. Modification of a signal design with thirty-two-position quadrature amplitude keying. *Tekhnika sredstv svyazi = Communication Equipment*. 2018;(4):36–47. (In Russ.)
13. Dovbnja V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of noise immunity of wireless digital communication systems exposed to interference via side reception channels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(3):35–40. (In Russ.)
14. Savishchenko N.V., Issa A., Ishimov A.S., Popov E.A. Calculation of the error probability in a channel with general  $\kappa$ - $\mu$  fading and additive white Gaussian noise. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2023;87(3):109–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.18127/j00338486-202303-11>
15. Sannikov V.G., Volchkov V.P. Increasing the noise immunity of a modem with optimal finite signals that do not cause intersymbol interference in a linear communication channel. *Telekommunikatsii i informatsionnye tekhnologii = Telecommunications and Information Technologies*. 2019;6(2):19–28. (In Russ.)
16. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Yu. Study of minimizing the probability of errors arising from four-fold discrete modulation methods. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii = Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. 2022;(4):31–33. (In Russ.)
17. Degtyarev A.N., Koneva S.A. Minimizing the error probability in weighted reception of a message with two-position pulse-code manipulation under conditions of intersymbol interference. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2024;(6). (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.1>
18. Flaksman A.G., Sorokin I.S., Kokarev A.O. Minimizing the bit error probability in a multi-stage relay MIMO system. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communication*. 2020;6(4):36–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44>
19. Kudryavtsev A.A., Shestakov O.V. Asymptotic behavior of the loss function in the method of multiplicative scaling of wavelet coefficients of the signal function. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 15: Vychislitel'naya matematika i kibernetika = Bulletin of Moscow University. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2017;(1):16–19. (In Russ.)
20. Zhirnov A.I., Orlov E.V., Egrushev V.E., et al. Analysis of methods for combating intersymbol distortions in digital tropospheric communication lines. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education*. 2021;(42):874–879. (In Russ.)

21. Atakishchev O.I., Ryumshin K.Yu., Amelenkov A.A., Zhuravlev A.P. Features of the implementation of a block signal demodulator with quadrature-amplitude modulation. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Bulletin of the Institute of Engineering Physics*. 2021;(4):16–19. (In Russ.)

22. Bazarov T.O., Senko M.A., Samodelkin L.A., et al. A system of digital signal processing algorithms for coherent optical communications. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*. 2024;94(6):894–912. (In Russ.) <https://doi.org/10.61011/JTF.2024.06.58131.3-24>

23. Kochubey R.I., Bychkovsky M.M., Zaykin N.N., et al. Principles of signal generation with orthogonal frequency multiplexing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;(1):134–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-134-135>

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Коптев Дмитрий Сергеевич**, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [d.s.koptev@mail.ru](mailto:d.s.koptev@mail.ru), ORCID: 0000-0002-7759-579X

**Dmitry S. Koptev**, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [d.s.koptev@mail.ru](mailto:d.s.koptev@mail.ru), ORCID: 0000-0002-7759-579X

**Довбня Виталий Георгиевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [vit\\_georg@mail.ru](mailto:vit_georg@mail.ru)

**Vitaly G. Dovbnya**, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [vit\\_georg@mail.ru](mailto:vit_georg@mail.ru)