

Научная статья

УДК 621.391.82

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-57-68>

EDN:KIRRTI



Исследование помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций на основе решетчато-кодовой модуляции в условиях воздействия импульсных помех

Тхе Зуеу Ву vutheduyet99@gmail.com

Евгений Иванович Глушанков, glushankov.ei@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Обеспечение помехоустойчивости радиотехнических систем, работающих в жестких энергетических и спектральных рамках, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, особенно в присутствии импульсных помех с негауссовским распределением. В данной работе рассматривается применение сигнально-кодовых конструкций на основе решетчато-кодовой модуляции в качестве эффективного решения для повышения помехоустойчивости без расширения полосы пропускания.

Целью исследования является комплексная оценка влияния статистических параметров каналов, описываемых моделями Бернулли – Гаусса и Миддлтона класса А, на вероятность битовой ошибки системы, а также установление аналитической взаимосвязи между данными моделями в различных режимах функционирования.

Методология работы базируется на теоретическом анализе с использованием аппарата математической статистики и верификации результатов посредством имитационного моделирования в среде MATLAB.

Научная новизна заключается в проведении обобщенного анализа стабильности системы решетчато-кодовой модуляции при широкой вариации параметров помех и, в частности, в разработке методики определения границ применимости моделей. Предложенный подход позволяет обоснованно переходить от вычислительно сложной модели Миддлтона к более простым аппроксимациям (Бернулли – Гаусса или Гаусса), что обеспечивает упрощение математического описания системы при сохранении требуемой достоверности результатов.

Результаты моделирования демонстрируют, что увеличение отношения мощностей гауссовской и импульсной компонент закономерно повышает помехоустойчивость системы для обоих типов модуляции: 8-позиционной фазовой манипуляции и 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции. В части верификации границ эквивалентности моделей установлено, что аппроксимация моделью Бернулли – Гаусса допустима при значении импульсного индекса $A \leq 0,2$ для обоих типов модуляции. В то же время сходимость к гауссовской модели достигается при различных пороговых значениях: $A \geq 15$ для 8-позиционной фазовой манипуляции и $A \geq 20$ для 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции, что обусловлено различием в плотности сигнальных созвездий.

Ключевые слова: импульсные помехи, модель Миддлтона класса А, модель Бернулли–Гаусса, решетчато-кодовая модуляция, сигнально-кодовые конструкции, MATLAB



Ссылка для цитирования: Ву Т.З., Глушанков Е.И. Исследование помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций на основе решетчато-кодовой модуляции в условиях воздействия импульсных помех // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 57–68. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-57-68. EDN:KIRRTI


Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-57-68>

EDN:KIRRTI

Investigating Noise Immunity of Signal-Code Constructions Employing Trellis Coded Modulation under Impulsive Noise

 **The Duyet Vu** , vutheduyet99@gmail.com

 **Evgeniy I. Glushankov**, glushankov.ei@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Ensuring the noise immunity of radio engineering systems operating under severe power and spectral constraints constitutes a pressing scientific and technical problem, particularly in the presence of impulsive noise with a non-Gaussian distribution. This paper considers the application of signal-code constructions based on Trellis Coded Modulation as an effective solution for enhancing noise immunity without bandwidth expansion.

The objective of this research is a comprehensive evaluation of the impact of statistical parameters of channels described by Bernoulli – Gaussian and Middleton Class A models on the system's Bit Error Rate, as well as the establishment of an analytical relationship between these models across various operating regimes.

The research methodology is based on theoretical analysis utilizing the apparatus of mathematical statistics, with result verification performed via simulation in the MATLAB environment.

The scientific novelty lies in conducting a generalized stability analysis of the Trellis Coded Modulation system under a wide variation of noise parameters and, specifically, in the development of a methodology for determining model equivalence boundaries. The proposed approach enables a justifiable transition from the computationally complex Middleton model to simpler approximations (Bernoulli – Gaussian or Gaussian), thereby ensuring the simplification of the system's mathematical description while maintaining the required accuracy of the results.

Simulation results demonstrate that increasing the power ratio between the Gaussian and impulsive components consistently improves the system's noise immunity for both modulation types: 8-Phase Shift Keying and 16-Quadrature Amplitude Modulation. Regarding the verification of model equivalence boundaries, it has been established that approximation by the Bernoulli – Gaussian model is valid at an impulsive index value of $A \leq 0.2$ for both for both modulation types. At the same time, convergence to the Gaussian model is achieved at different threshold values: $A \geq 15$ for 8-Phase Shift Keying and $A \geq 20$ for 16-Quadrature Amplitude Modulation, which is attributed to the difference in signal constellation density.

Keywords: impulsive noise, Middleton Class A model, Bernoulli–Gaussian model, Trellis Coded Modulation, signal-code constructions, MATLAB

For citation: Vu T.D., Glushankov E.I. Investigating Noise Immunity of Signal-Code Constructions Employing Trellis Coded Modulation under Impulsive Noise. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):57–68. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-57-68. EDN:KIRRTI

Введение

В современных радиотехнических системах, характеризующихся жесткими ограничениями по мощности и полосе пропускания, проблема обеспечения высокой спектральной эффективности при сохранении требуемой помехоустойчивости является одной из ключевых задач [1]. Традици-

онно при проектировании радиоканалов, особенно спутниковых и радиорелейных в качестве основной модели помех рассматривается аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), обусловленный тепловыми шумами приемной аппаратуры и фоновым излучением [2]. Однако в реальных условиях эксплуатации, особенно в перегруженных ча-

стотных диапазонах, спутниковые каналы подвержены воздействию помех импульсного характера, источниками которых могут служить атмосферные явления, коммутационные процессы в бортовом оборудовании, помехи от радиолокационных станций или непреднамеренные промышленные помехи [3]. В отличие от стационарного гауссовского процесса, импульсные помехи обладают высокой амплитудой и непредсказуемостью [4–7], что делает классические методы демодуляции неэффективными.

В условиях ограниченного частотного ресурса спутникового канала применение отдельного кодирования и модуляции становится неоптимальным, так как введение избыточности для защиты от ошибок неизбежно приводит к расширению полосы частот или снижению скорости передачи данных [4, 5]. Эффективным решением данной проблемы является использование сигнально-кодовых конструкций на основе решетчаточковой модуляции (РКМ). Данный метод представляет собой комбинированный подход, объединяющий процессы кодирования и модуляции в единую систему, что позволяет максимизировать свободное евклидово расстояние между сигналами последовательностями без расширения полосы частот [4–6].

Тем не менее, классические схемы РКМ разрабатывались в предположении гауссовского канала. В связи с этим комплексный анализ помехоустойчивости стандартных схем РКМ при работе в условиях негауссовских каналов, описываемых моделями Миддлтона класса А (МКА) и Бернулли – Гаусса (БГ), а также выявление условий взаимозаменяемости данных моделей, представляет собой актуальную научную задачу, решение которой позволит повысить точность и эффективность проектирования перспективных радиотехнических систем.

Модель импульсной помехи в виде гауссовской смеси

Концепция, лежащая в основе многих практически обоснованных моделей импульсных помех, заключается в том, что они могут быть сформированы как суперпозиция (смесь) нескольких независимых гауссовских компонент, каждая из которых характеризуется различным уровнем энергии или интенсивности [7]. Модель гауссовской смеси рассматривается как унифицированная платформа для представления таких сложных типов помех. Согласно данной модели, функция плотности вероятности (ФПВ) помехи представляет собой взвешенную сумму нескольких гауссовских компонент.

Эта структура позволяет гибко описывать различные классы помех: 1) когда число компонент соответствует единице ($K = 1$), модель естествен-

ным образом сводится к гауссовскому шуму; 2) при $K = 2$ модель описывает хорошо известную модель БГ, которая, как правило, состоит из слабой фоновой компоненты и сильной импульсной компоненты; 3) при $K \rightarrow \infty$ модель переходит в модель МКА, наиболее точно описывающую статистическую природу реальных импульсных помех.

В общем виде ФПВ модели гауссовской смеси имеет следующий вид [7]:

$$p(n_k) = \sum_{m=0}^K P_m \mathcal{N}(n_k; \mu_m, \sigma_m^2),$$

где K – общее число компонент смеси; $\mathcal{N}(n_k; \mu_m, \sigma_m^2)$ – это функция плотности гауссовского распределения с математическим ожиданием μ_m , дисперсией σ_m^2 ; P_m – вероятность смешивания m -й компоненты $\sum_{m=0}^K P_m = 1, 0 < P_m < 1$.

Модель Миддлтона класса А

Модель МКА, являющаяся основным предметом данного исследования, построена на фундаментальном предположении, что полоса пропускания помехи значительно уже, чем полоса пропускания входного каскада приемника [8]. Ключевое физическое допущение модели МКА заключается в том, что процесс помехи представляет собой суперпозицию множества отдельных импульсных помех.

ФПВ модели МКА [9–11]:

$$p(n_k) = \sum_{m=0}^K \frac{A^m e^{-A}}{m!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{n_k^2}{2\sigma_m^2}\right),$$

$$\sigma_m^2 = \sigma_i^2 \frac{m}{A} + \sigma_g^2 = \sigma_g^2 \left(\frac{m}{A\Gamma} + 1\right).$$

где σ_m^2 – дисперсия (мощность) m -й компоненты шума; σ_g^2 – дисперсия гауссовской компоненты помех; $\Gamma = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_i^2}$ – отношение мощностей гауссовской и импульсной компонент; A – индекс импульсивности, который представляет собой среднее число импульсных помех, возникающих в течение заданного интервала наблюдения.

При малых значениях A : помеха носит ярко выраженный импульсный и негауссовский характер. Это эквивалентно сценарию с мощными, но редкими импульсными выбросами.

При больших значениях A : помеха становится более непрерывной и ее распределение аппроксимирует гауссовское. Это соответствует сценарию с частыми, но маломощными импульсными помехами, которые накладываются друг на друга. В соответствии с центральной предельной теоремой, сумма большого числа независимых случайных величин стремится к гауссовскому распределению [12].

Модель Бернулли-Гаусса

Модель БГ [7, 10] описывается как гауссовская смесь, переключаемая по стохастическому закону Бернулли, и предполагает нахождение канала в одном из двух дискретных режимов:

- присутствия исключительно фоновой шумовой компоненты;
- возникновения импульсных выбросов.

Модель помехи описывается следующим выражением (ФПВ) [13, 14]:

$$p(n_k) = (1 - p)\mathcal{N}(n_k; 0, \sigma_g^2) + p\mathcal{N}(n_k; 0, \sigma_g^2 + \sigma_i^2).$$

Это выражение можно переписать в развернутом виде [13]:

$$p(n_k) = (1 - p) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} e^{\frac{-n_k^2}{2\sigma_g^2}} + p \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}} e^{\frac{-n_k^2}{2(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}}.$$

Каждая компонента уравнения отвечает за отдельное состояние среды передачи: первое слагаемое соответствует режиму воздействия исключительно фонового шума, тогда как второе слагаемое моделирует наличие импульсных выбросов, появляющихся с частотой p .

Сравнительный анализ моделей МКА и БГ

Фундаментальное различие между этими двумя моделями заключается в их математической структуре. Модель МКА представляет собой бесконечную сумму гауссовских компонент, весовые коэффициенты которых подчиняются распределению Пуассона. В противоположность этому модель БГ является конечной суммой, состоящей всего из двух компонент, взвешенных процессом Бернулли.

Выбор между этими двумя моделями для описания канала связи представляет собой компромисс между общностью и физической достоверностью, с одной стороны, и простотой и аналитической сложностью, с другой [10, 15]. Безусловно, модель МКА считается более общей и имеет более прочное физическое обоснование. Она способна моделировать широкий спектр импульсных помех, допуская флуктуации числа активных источников. С другой стороны, модель Бернулли-Гаусса значительно проще в аналитической и вычислительной обработке. Ее компактная форма часто является предпочтительной, если требуется аналитический вывод теоретических результатов или реализация в практических алгоритмах приемника. В таблице 1 представлена конкретная оценка этих двух моделей каналов.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная оценка двух моделей помех

TABLE 1. Comparative Evaluation of Two Interference Models

Характеристика	Модель МКА	Модель БГ
Теоретическая основа	Основана на пуассоновском процессе появления источников помех	Основана на двухсостоятельном канале с переключениями по закону Бернулли
Математическая форма	Бесконечная сумма взвешенных гауссианов	Конечная сумма взвешенных гауссианов
Основные параметры	A, Γ	p, Γ
Аналитическая податливость	Низкая	Высокая
Ключевое преимущество	Высокая физическая достоверность	Простота и легкость аналитической обработки
Ключевой недостаток	Высокая математическая и вычислительная сложность	Низкая физическая достоверность

Существует взаимосвязь между этими двумя моделями. При очень малых значениях импульсного индекса A в модели МКА (т. е. $A \ll 1$) в распределении Пуассона $P_m = \frac{A^m e^{-A}}{m!}$ доминируют первые два члена ($m = 0$ и $m = 1$).

Когда $m = 0$:

$$P_0 = \frac{A^0 e^{-A}}{0!} = e^{-A}. \quad (1)$$

Согласно разложению в ряд Тейлора, получаем:

$$P_0 = e^{-A} \approx 1 - A + \frac{A^2}{2} - \frac{A^3}{6} + \dots + \frac{A^n}{n!} \approx 1 - A. \quad (2)$$

Вероятность появления импульса $P_s = P(m \geq 1)$, что эквивалентно $P_s = 1 - P_0$.

Используя аппроксимацию из (1) и (2), имеем:

$$P_s = 1 - P_0 \approx A.$$

В этом случае ФПВ модели МКА можно с высокой точностью аппроксимировать, усекая бесконечный ряд и сохраняя только первые два члена:

$$p(n_k) = (1 - A)\mathcal{N}(n_k; 0, \sigma_g^2) + A\mathcal{N}\left(n_k; 0, \sigma_g^2 + \frac{\sigma_i^2}{A}\right).$$

Такая усеченная форма математически эквивалентна ФПВ модели БГ, при следующих аналоговых соответствиях: $p \leftrightarrow A$ и $\sigma_i^2 \leftrightarrow \sigma_i^2/A$. Это демонстрирует, что для случая помех с высокой амплитудой, обе модели сходятся к одной и той же форме. Аналогично случаю малых A , для больших значений импульсного индекса модель МКА и БГ сводятся к гауссовскому каналу.

Для модели МКА при $A \rightarrow \infty$ получаем:

$$P_m(A) \approx \mathcal{N}(m, A, A), \sigma_m^2 \approx \sigma_g^2 + \sigma_i^2.$$

т. е. большинство членов смеси имеют практически одинаковую дисперсию.

Тогда:

$$p_{\text{МКА}}(x) \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}\right).$$

Для модели БГ, если $p \rightarrow 1$, то:

$$p_{\text{БГ}}(x) \xrightarrow{p \rightarrow 1} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_g^2 + \sigma_i^2)}\right).$$

При больших A и $p \approx 1$:

$$P_{\text{МКА}}(x) \approx P_{\text{БГ}}(x) \approx P_{\text{АБГШ}}(x),$$

т. е. шум в моделях МКА и БГ становится практически гауссовским, и канал можно аппроксимировать эквивалентным АБГШ-каналом с той же средней мощностью шума.

Как видно из рисунка 1, результаты моделирования полностью согласуются с полученными выше теоретическими выводами при условии нормированной общей мощности, равной единице. При $A \ll 1$, когда присутствует лишь небольшое число редких импульсов, модель становится эквивалентной модели БГ (см. рисунки 1а, 1б). Напротив, при $A \gg 1$, импульсные помехи становятся плотными, обе модели МКА и БГ постепенно вырождаются в эффективный гауссовский канал с той же дисперсией шума (см. рисунки 1с, 1д).

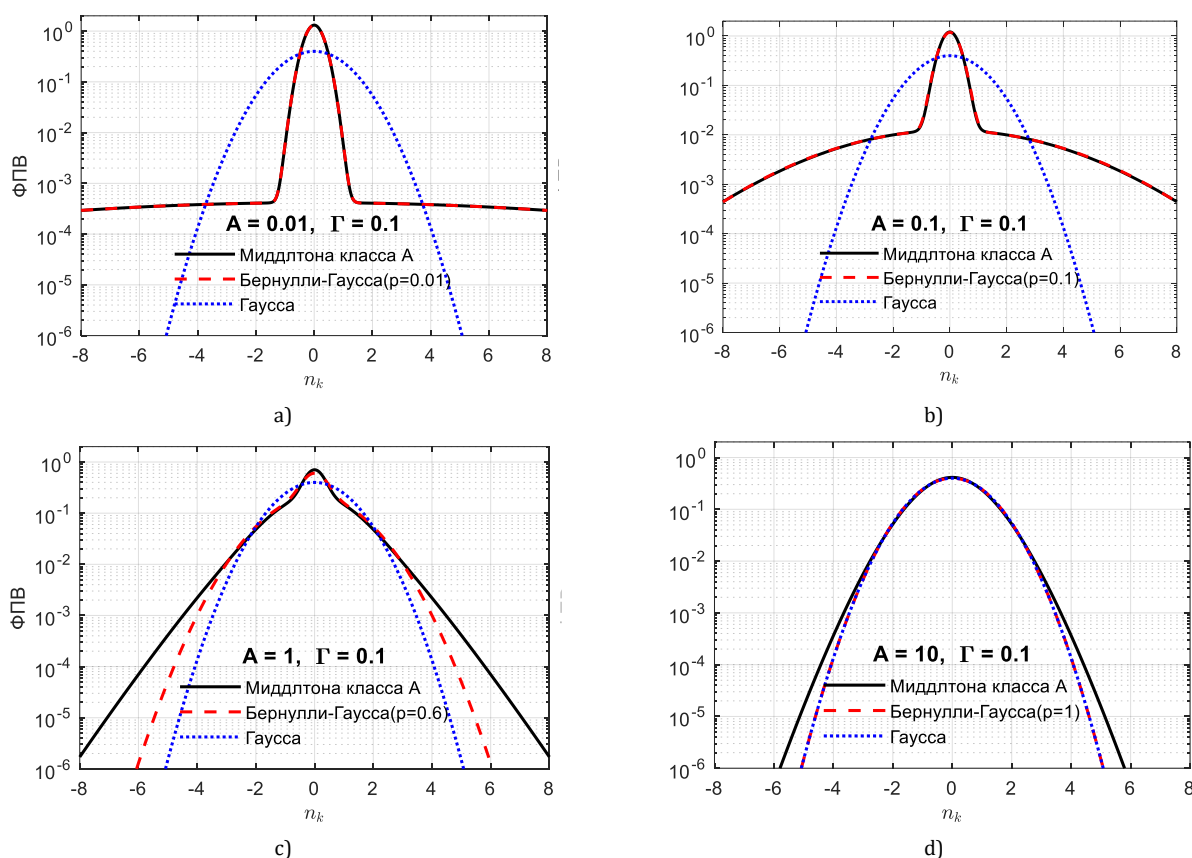


Рис. 1. Характеристики трех моделей канала: МКА, БГ и АБГШ при условиях: а) $A = 0,01, p = 0,01$, б) $A = 0,1, p = 0,1$, в) $A = 1, p = 0,6$; д) $A = 10, p = 1$

Fig.1. Characteristics Of Three Channel Models: MKA, BG and AWGN Under Conditions: а) $A = 0.01, p = 0.01$; б) $A = 0.1, p = 0.1$; в) $A = 1, p = 0.6$; д) $A = 10, p = 1$

Анализ графиков, приведенных на рисунке 1, показывает, что наблюдаемое соответствие форм ФПВ позволяет дать лишь качественную оценку выбранных подходов. При проектировании реальных систем передачи данных замена сложной модели канала на более простую не может основываться на произвольном или интуитивном выборе параметра A . Для обеспечения достоверности результатов моделирования при одновременной оптимизации вычислительных ресурсов необхо-

димо установить строгий количественный критерий. В связи с этим, далее предлагаются алгоритмы для точного определения пороговых значений параметра A . Данная методика позволяет выявить конкретные границы, в пределах которых отклонение значений вероятности битовой ошибки (BER, аббр от англ. Bit Error Rate) между моделями не превышает допустимых значений, что научно обосновывает переход от МКА к упрощенным моделям (БГ или АБГШ).

Алгоритм определения верхней границы A_{upper}

Задано:

– сетка параметров:

$$A \in \{A^{(1)}, \dots, A^{(N_A)}\},$$

$$\gamma_j = (E_b/N_0)_j, j = 1 \dots N_{SNR};$$

– рабочий диапазон BER:

$$[P_{b,\min}, P_{b,\max}] = [10^{-5}, 10^{-1}];$$

– допустимое отклонение: $\Delta_{\max} = 0,2$.

Шаг 1. Расчет BER для двух каналов МКА, БГ.

Для каждого $A^{(k)}$ и γ_j :

– вероятность импульса БГ: $p_0(A^{(k)}) = 1 - e^{-A^{(k)}}$;

– по результатам моделирования получить:

$$P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j), P_{b,\text{БГ}}(A^{(k)}, \gamma_j; p_0).$$

Шаг 2. Расчет отклонения $\Delta_{BER}(A^{(k)})$:

– выбор точек отношений сигнал / шум (SNR, аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio), где BER канала МКА находится в рабочем диапазоне:

$$J_k = \{j | P_{b,\min} \leq P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j) \leq P_{b,\max}\};$$

– для всех $j \in J_k$ вычислить отклонение на логарифмической шкале:

$$\Delta_j(A^{(k)}) = \left| \log_{10} P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j) - \log_{10} P_{b,\text{БГ}}(A^{(k)}, \gamma_j; p_0) \right|;$$

– интегральные показатели:

$$\Delta_{avg}(A^{(k)}) = \frac{1}{|J_k|} \sum_{j \in J_k} \Delta_j(A^{(k)}).$$

Шаг 3. Определение порога A_{upper} :

– выбор используемой метрики:

$$\Delta_{use}(A^{(k)}) = \Delta_{avg}(A^{(k)});$$

– множество значений A , удовлетворяющих критерию:

$$\zeta = \{k | \Delta_{use}(A^{(k)}) \leq \Delta_{\max}\},$$

если $\zeta \neq \emptyset$, то верхняя граница области эквивалентности:

$$A_{upper} = \max_{k \in \zeta} A^{(k)},$$

тогда справедливо:

$$A \leq A_{upper} \Rightarrow P_{b,\text{МКА}}(A, \gamma) \approx P_{b,\text{БГ}}(A, \gamma; p_0(A)).$$

Алгоритм определения нижней границы A_{lower}

Шаг 1. Расчет BER на канале АБГШ (один раз).

Для всех $\gamma_j, j = 1 \dots N_{SNR}$:

– моделированием получить:

$$P_{b,\text{АБГШ}}(\gamma_j), P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j).$$

Шаг 2. Оценка отклонения $\Delta_{BER}(A^{(k)})$:

– выбор точек SNR, где BER канала МКА находится в рабочем диапазоне:

$$J_k = \{j | P_{b,\min} \leq P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j) \leq P_{b,\max}\};$$

– для всех $j \in J_k$ вычислить отклонение на логарифмической шкале:

$$\Delta_j(A^{(k)}) = \left| \log_{10} P_{b,\text{МКА}}(A^{(k)}, \gamma_j) - \log_{10} P_{b,\text{АБГШ}}(\gamma_j) \right|;$$

– интегральные показатели:

$$\Delta_{avg}(A^{(k)}) = \frac{1}{|J_k|} \sum_{j \in J_k} \Delta_j(A^{(k)}).$$

Шаг 3. Определение нижней границы A_{lower} :

– выбор используемой метрики:

$$\Delta_{use}(A^{(k)}) = \Delta_{avg}(A^{(k)}).$$

– множество значений A , удовлетворяющих критерию:

$$\zeta = \{k | \Delta_{use}(A^{(k)}) \leq \Delta_{\max}\},$$

если $\zeta \neq \emptyset$, то верхняя граница области эквивалентности:

$$A_{lower} = \min_{k \in \zeta} A^{(k)},$$

тогда:

$$A \geq A_{lower} \Rightarrow P_{b,\text{МКА}}(A, \gamma) \approx P_{b,\text{АБГШ}}(\gamma).$$

Алгоритм подробно объясняется следующим образом: для определения верхней границы A_{upper} области аппроксимации моделью БГ проводится сравнительный анализ помехоустойчивости каналов МКА и БГ. Для дискретного набора значений импульсного индекса A параметры модели БГ устанавливаются таким образом, что вероятность появления импульса p численно равна рассматриваемому значению A . С использованием метода имитационного моделирования строятся кривые BER $[P_{b,\min}, P_{b,\max}]$ для обеих моделей в идентичном диапазоне SNR. Степень соответствия между двумя моделями количественно оценивается посредством вычисления максимального отклонения в логарифмическом масштабе в пределах целевого диапазона BER. Значение A_{upper} определяется как максимальный порог импульсного индекса, при котором расхождение между моделями остается в пределах допустимой погрешности Δ_{\max} . Полученный результат позволяет утверждать, что для всех $A \leq A_{upper}$ статистические характеристики редких импульсных помех в модели МКА адекватно описываются более простой моделью БГ.

Аналогичная процедура применяется для определения нижней границы $A \geq A_{lower}$ области гауссовской аппроксимации. В данном случае характеристики модели МКА (или БГ при высокой плотности импульсов) сопоставляются с моделью

АБГШ, имеющей эквивалентную полную мощность помехи. Алгоритм осуществляет поиск минимального значения A , при котором эффект наложения плотных импульсных помех приводит к сходимости распределения шума к гауссовскому закону (согласно центральной предельной теореме), вследствие чего отклонение BER от канала АБГШ становится пренебрежимо малым. Определение данной области значений позволяет заменить сложные модели импульсных помех стандартной моделью АБГШ, что существенно сокращает вычислительные ресурсы при моделировании сценариев с насыщенным импульсным шумом.

Анализ влияния параметров импульсных помех на помехоустойчивость

В качестве объекта исследования рассматривается система передачи данных, использующая сигнально-кодовые конструкции на основе РКМ. Для сравнительного анализа помехоустойчивости были выбраны два типа сигнальных созвездий: 8-позиционная фазовая манипуляция (8-PSK) и 16-позиционная квадратурная амплитудная модуляция (16-QAM). Кодирование осуществляется с использованием сверточного кодера [4, 5] с длиной кодового ограничения $K = 4$. Для реализации принципа совмещенного кодирования и модуляции без снижения информационной скорости передачи, параметры кодера выбраны следующим образом: для схемы 8-PSK каждые 2 входных информационных бита преобразуются в 3 кодовых бита, формирующих один канальный символ (кодовая скорость $R = 2/3$); аналогично, для схемы 16-QAM каждые 3 информационных бита преобразуются в 4 кодовых бита (кодовая скорость $R = 3/4$).

В первой части экспериментального исследования проводится оценка влияния ключевых параметров моделей БГ (вероятность появления импульсов p , коэффициент Γ) и МКА (импульсный индекс A , коэффициент Γ) на BER. В данном разделе SNR рассчитывается относительно фиксированной мощности фонового гауссовского шума (σ_g^2), которая служит базовым уровнем $SNR = \frac{E_s}{\sigma_g^2}$. При таком подходе импульсная составляющая рассматривается как дополнительная аддитивная помеха. Это позволяет напрямую оценить степень ухудшения помехоустойчивости системы именно за счет добавления импульсов по сравнению со стандартным каналом АБГШ.

На рисунке 2 представлены характеристики BER системы РКМ (8-PSK, 16-QAM) в канале БГ. Во-первых, увеличение коэффициента мощности Γ (см. рисунки 2а, 2с) снижает влияние импульсной компоненты, приближая канал к модели Гаусса и повышая эффективность кодирования. В частности, при $\Gamma = 5$ и целевом $BER = 10^{-5}$, требуемое

отношение E_b/N_0 составляет 7 дБ для 8-PSK и 9 дБ для 16-QAM. Во-вторых, вероятность импульсов p обратно коррелирует с качеством канала; рост p увеличивает частоту импульсных помех, ухудшая декодирование (см. рисунки 2b, 2d). Оптимальная производительность достигается при $p = 0$ (как канал АБГШ), где пороговое значение E_b/N_0 для $BER = 10^{-5}$ минимально: 6,8 (8-PSK) и 9 дБ (16-QAM).

На рисунке 3 представлена зависимость BER от E_b/N_0 для канала МКА. Аналогично модели БГ, эффективность передачи растет с увеличением Γ (см. рисунки 3а, 3с); при $\Gamma = 5$ пороговое значение E_b/N_0 для BER, равной 10^{-5} , составляет 9,2 дБ (8-PSK) и 11 дБ (16-QAM). Далее увеличение импульсного индекса A (см. рисунки 3b, 3d) приближает характеристики канала к гауссовским. В области малых E_b/N_0 системы с малым A демонстрируют преимущество ввиду низкой частоты импульсных событий. Однако с ростом E_b/N_0 для малых A наблюдается эффект «пола ошибки» из-за высокоамплитудных выбросов, тогда как большие значения A обеспечивают лучшую производительность, достигая целевого уровня при 18 и 18,5 дБ соответственно.

Для объективной оценки степени соответствия производительности между моделями МКА, БГ и АБГШ необходимым условием является выполнение нормировки полной мощности шума. В отличие от предыдущего раздела, где импульсный шум рассматривался как аддитивная добавка, в данном анализе полная дисперсия шума (σ_{total}^2) фиксируется на постоянном уровне для всех трех моделей. Такой подход гарантирует, что любые наблюдаемые различия в характеристиках BER являются прямым следствием структуры распределения вероятностей, а не различий в энергетических уровнях помех.

Основываясь на принципе сохранения энергии, устанавливается количественная взаимосвязь для перехода от параметров обобщенной модели (МКА) к упрощенной модели (БГ). В частности, дисперсия импульсной компоненты в модели БГ определяется как функция от параметра Γ модели МКА, что обеспечивает энергетическую эквивалентность рассматриваемых каналов передачи.

Выполняется нормировка полной мощности шума:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_g^2 + \sigma_i^2 = \sigma_g^2 + p\sigma_i^2. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что полная мощность шума σ_{total}^2 поддерживается на постоянном уровне. Анализ энергетического баланса показывает, что при уменьшении вероятности появления импульсов p в модели БГ происходит компенсаторное увеличение амплитуды импульсных помех. Именно этот рост амплитуды редких выбросов приводит к деградации характеристик и ухудшению помехоустойчивости системы.

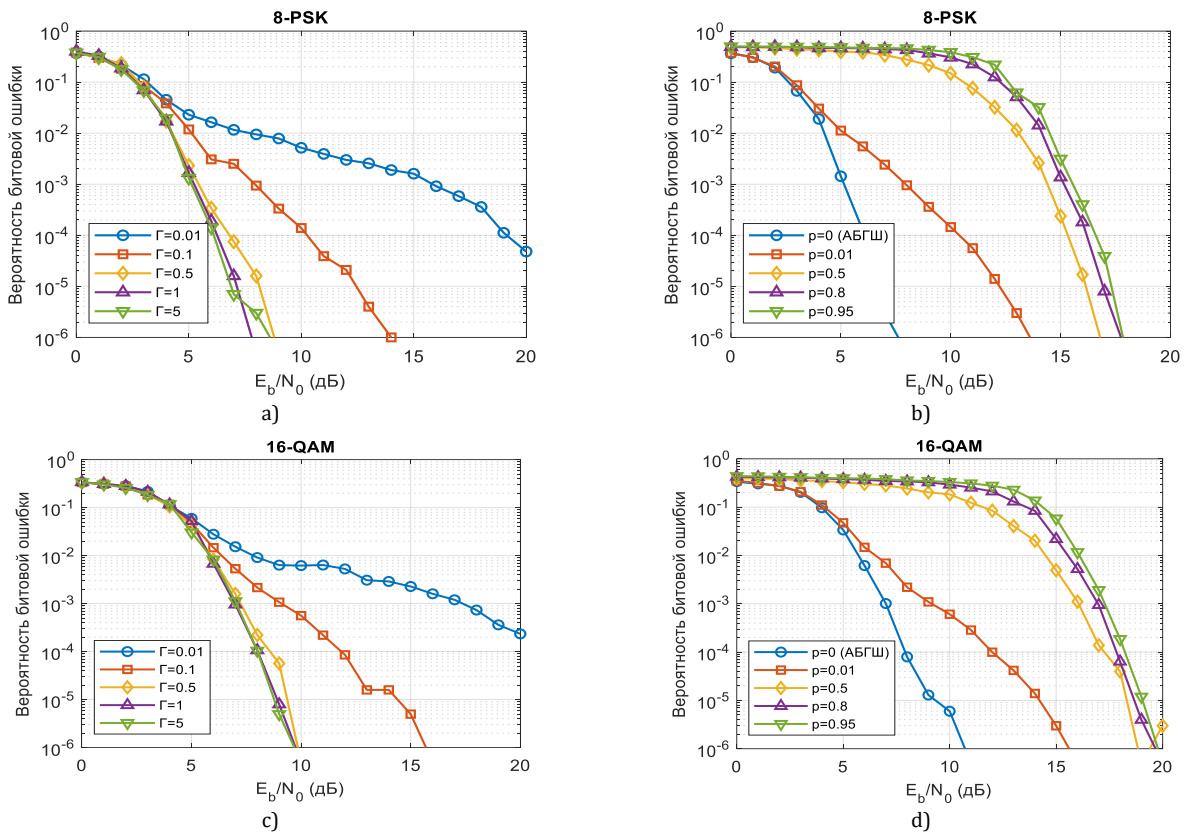


Рис. 2. Характеристики BER для 8-PSK и 16-QAM в канале БГ: зависимость от Γ (а, с) при $\rho = 0,01$; зависимость от ρ (b, d) при $\Gamma = 0,1$
 Fig. 2. BER Performance of 8-PSK and 16-QAM in BG Channel: Dependence on Γ (a, c) at $\rho = 0.01$; Dependence on ρ (b, d) at $\Gamma = 0.1$

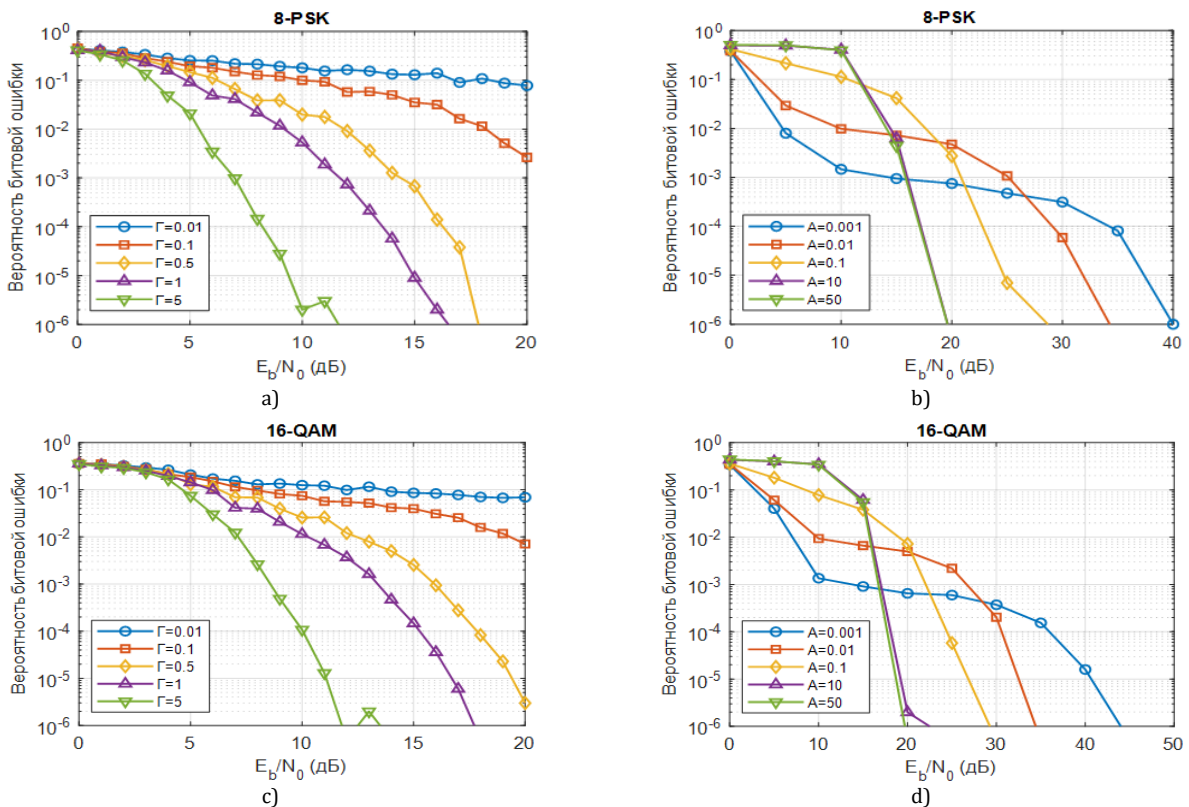


Рис. 3. Характеристики BER для 8-PSK и 16-QAM в канале МКА: зависимость от Γ (а, с) при $A = 0,1$; зависимость от A (b, d) при $\Gamma = 0,1$
 Fig. 3. BER performance of 8-PSK and 16-QAM in MCA channel: a) dependence on Γ ($A = 0.1$); b) dependence on A ($\Gamma = 0.1$)

Далее выполняется применение алгоритма определения верхней и нижней границ, описанного в предыдущем разделе, к системе РКМ с использованием модуляции 8-PSK и 16-QAM в условиях воздействия импульсных помех с параметром $\Gamma = 0,1$. В таблице 2 представлены результаты анализа множеств значений импульсного индекса A , для которых величина расчетного отклонения Δ_{avg} находится в пределах допустимой области погрешности $\Delta_{max} = 0,2$ одновременно для обоих типов модуляции. На основе этих данных производится выбор диапазонов значений A , удовлетворяющих критерию эквивалентности моделей.

Анализ данных (см. таблицу 2) показывает, что верхняя граница области аппроксимации моделью БГ (A_{upper}) для обоих видов модуляции совпадает и составляет $A = 0,2$. В то же время, нижние границы области гауссовской аппроксимации A_{lower} различаются и составляют $A = 15$ и $A = 20$ для 8-PSK 16-QAM соответственно. Полученные пороговые значения определяют интервалы, в пределах которых допустимо корректное замещение вычислительно сложной модели МКА на упрощенные модели без существенной потери точности. Для наглядной верификации предложенного

подхода и оценки совпадения кривых помехоустойчивости результаты моделирования представлены на графиках ниже: рисунки 4 и 5 соответствуют случаю модуляции 8-PSK, а рисунки 6 и 7 – модуляции 16-QAM.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные значения отклонения Δ_{avg} для определения границ при $\Gamma = 0,1$

TABLE 2. Calculated Deviation Values Δ_{avg} for Determining Boundaries When $\Gamma = 0.1$

8-PSK				16-QAM			
Граница A_{upper}							
верхняя		нижняя		верхняя		нижняя	
A	Δ_{avg}	A	Δ_{avg}	A	Δ_{avg}	A	Δ_{avg}
0,001	0,061	1	1,471	0,001	0,045	1	1,14
0,005	0,069	2	0,961	0,005	0,075	2	1,049
0,01	0,078	4	0,755	0,01	0,067	4	0,654
0,05	0,192	8	0,246	0,05	0,063	8	0,377
0,1	0,18	10	0,231	0,1	0,062	10	0,422
0,2	0,134	15	0,197	0,2	0,173	15	0,27
0,5	0,587	20	0,1	0,5	0,428	20	0,2
0,8	0,471	25	0,056	0,8	0,674	25	0,245

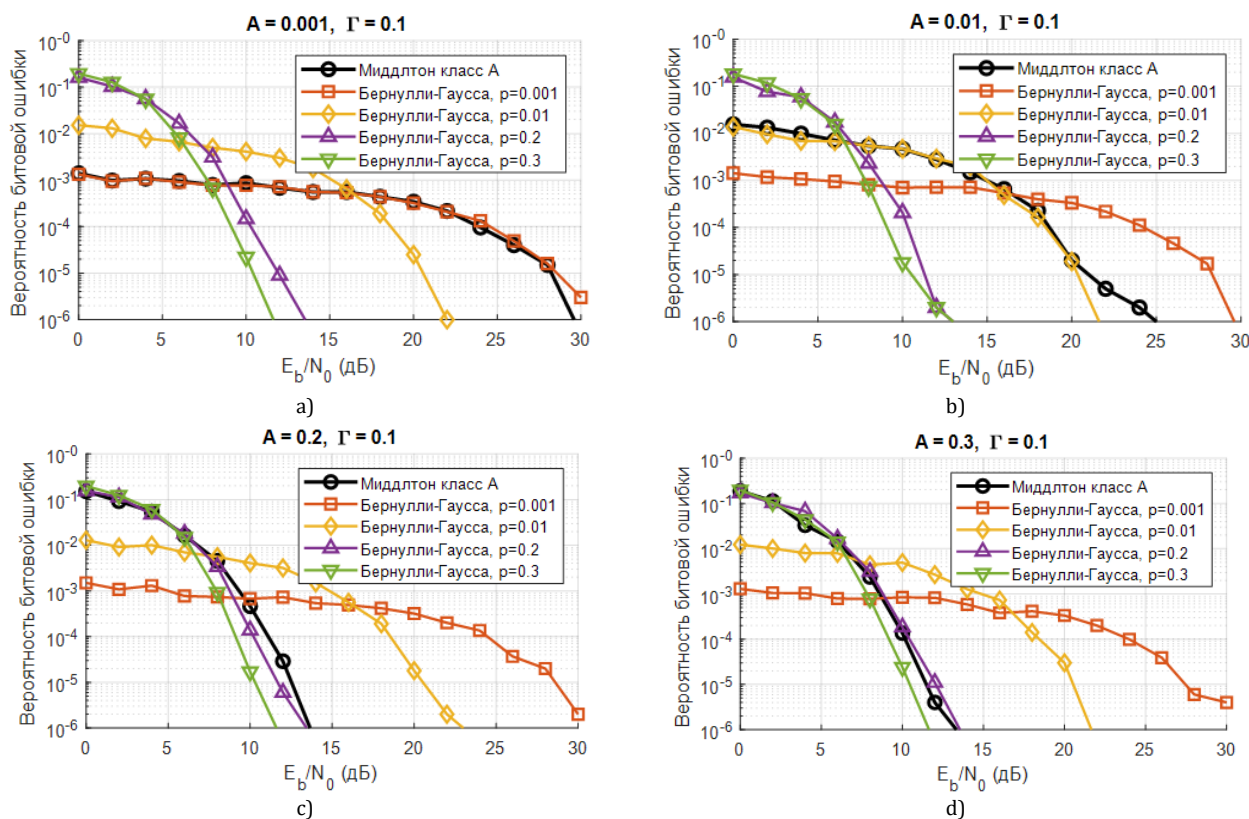


Рис. 4. Верификация верхней границы области эквивалентности ($A = 0,2$) между моделями МКА и БГ для 8-PSK: а) $A = 0,001$; б) $A = 0,01$; в) $A = 0,2$; д) $A = 0,3$

Fig. 4. Verification of the Upper Bound of The Equivalence Region ($A = 0.2$) between the MCA and BG Models for 8-PSK: a) $A = 0.001$; b) $A = 0.01$; c) $A = 0.2$; d) $A = 0.3$

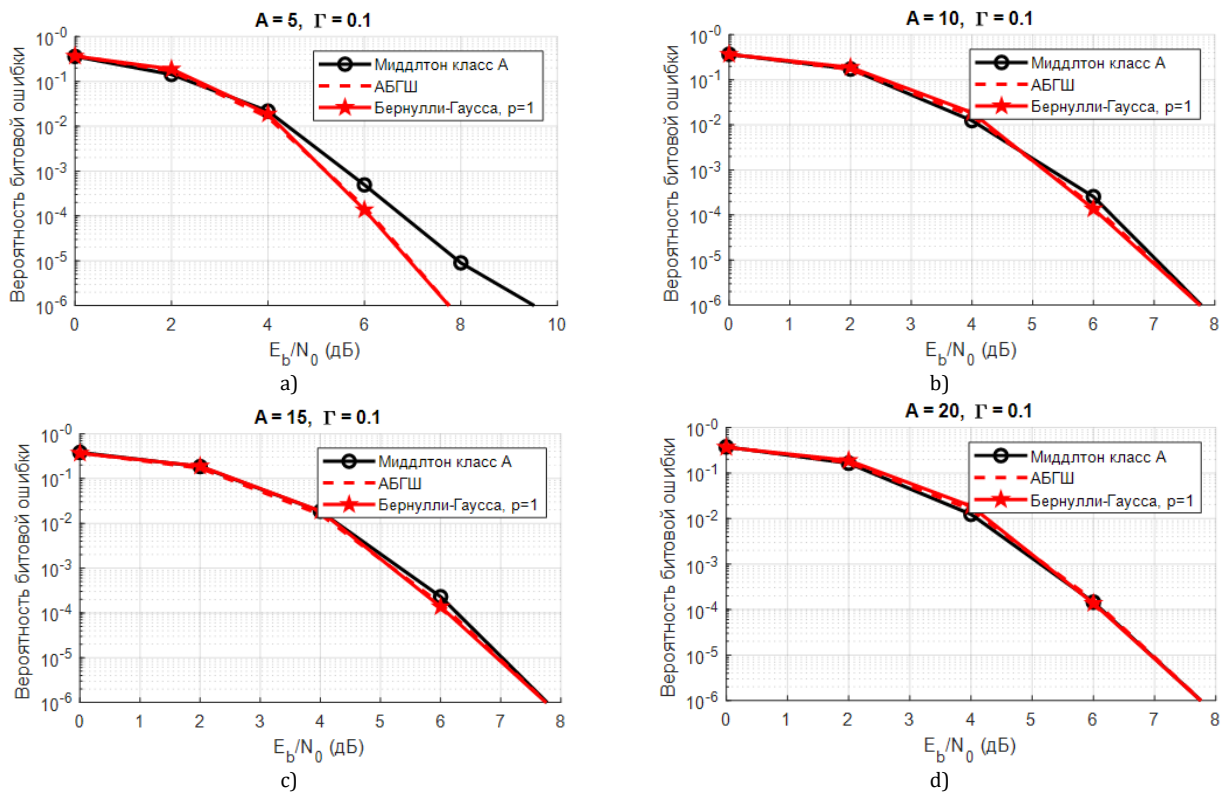


Рис. 5. Анализ сходимости модели МКА к гауссовской модели для 8-PSK и валидация нижней границы аппроксимации ($A = 15$): а) $A = 5$; б) $A = 10$; в) $A = 15$; д) $A = 20$

Fig. 5. Analysis of the Convergence of the MCA Model to the Gaussian Model for 8-PSK and Validation of the Lower Approximation Bound ($A = 15$): а) $A = 5$; б) $A = 10$; в) $A = 15$; д) $A = 20$

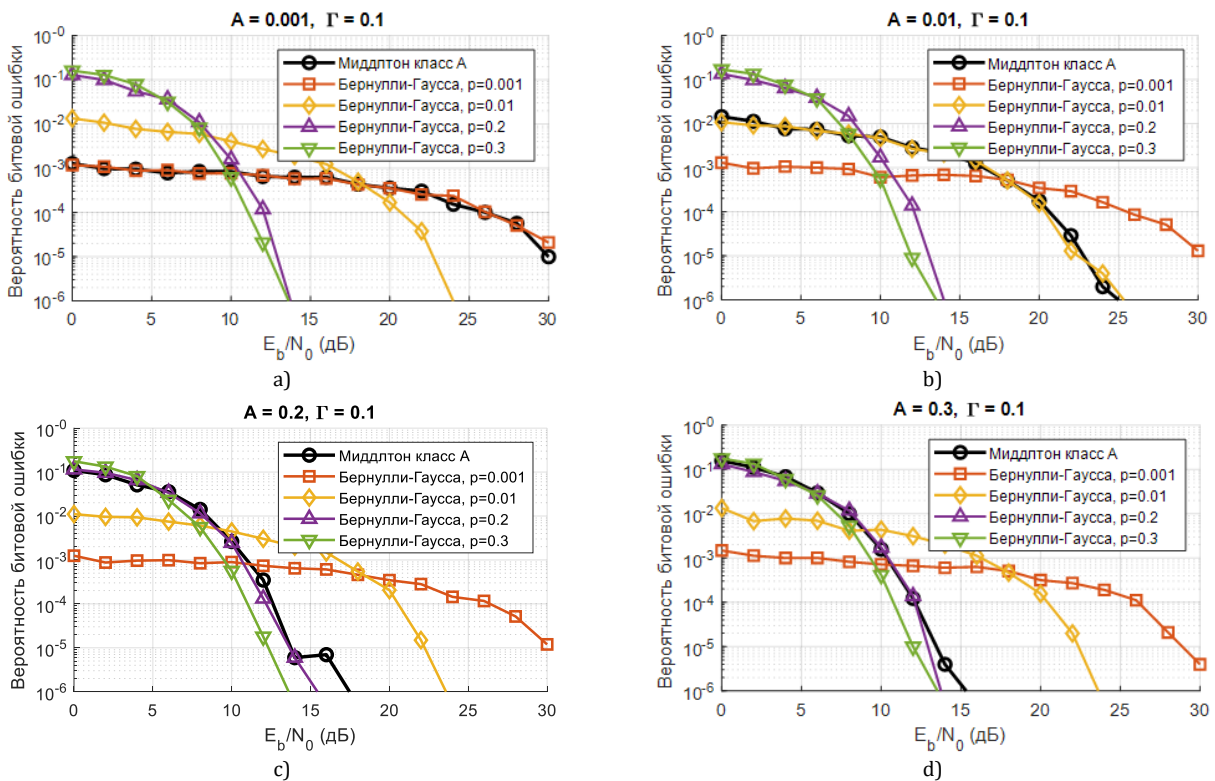


Рис. 6. Верификация верхней границы области эквивалентности ($A = 0,2$) между моделями МКА и БГ для 16-QAM: а) $A = 0.001$, б) $A = 0.01$, в) $A = 0.2$, д) $A = 0.3$

Fig. 6. Verification of the Upper Boundary of the Equivalence Region ($A = 0,2$) between the MCA and BG Models for 16-QAM: а) $A = 0.001$; б) $A = 0.01$; в) $A = 0.2$; д) $A = 0.3$

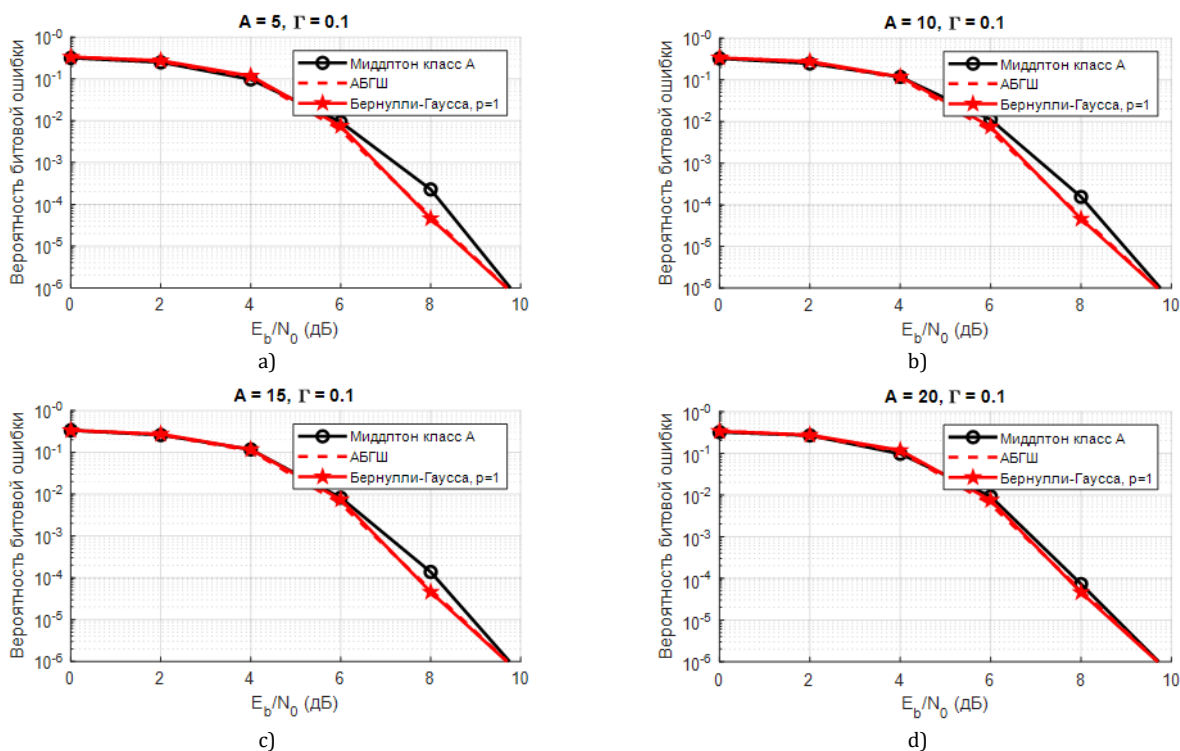


Рис. 7. Анализ сходимости модели МКА к гауссовской модели для 16-QAM и валидация нижней границы аппроксимации ($A = 20$): а) $A = 5$, б) $A = 10$, с) $A = 15$, д) $A = 20$

Fig. 7. Analysis of the Convergence of the MCA Model to the Gaussian Model for 16-QAM and Validation of the Lower Approximation Bound ($A = 20$): a) $A = 5$; b) $A = 10$; c) $A = 15$; d) $A = 20$

Заключение

В рамках данной работы проведено комплексное исследование математических моделей каналов с импульсными помехами и проанализировано влияние их ключевых параметров на помехоустойчивость систем с РКМ. На основе детального сравнительного анализа характеристик распределения и результатов имитационного моделирования установлена взаимосвязь между рассматриваемыми моделями. Ключевым результатом исследова-

ния является разработка и верификация алгоритмов определения границ областей эквивалентности. Предложенная методика позволяет обоснованно заменять вычислительно сложную модель МКА более простыми аппроксимациями (моделью БГ или гауссовской моделью) в соответствующих диапазонах параметров, что существенно снижает вычислительные затраты при проектировании и анализе систем связи.

Список источников

1. Сомов АМ., Корнев С.Ф. Спутниковые системы связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 244 с.
2. Липкович Э.Б. Системы и устройства спутникового мультимедийного вещания и интерактивной связи. Минск: БГУИР, 2020. 308 с.
3. Маслаков П.А., Александров И.С., Хаиров Т.А. Модель канала спутниковой связи в условиях непреднамеренных импульсных // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 129–130. EDN:EUZXNA
4. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
6. Ву Т.З., Глушанков Е.И., Фам К.К. Исследование энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций на основе каскадных и турбокодов для перспективных радиотехнических систем // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 2. С. 69–81. DOI:10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81. EDN:OLWQTV
7. Çürük S.M. Impulsive noise models used in power line communications // Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 2. PP 115–122. DOI:10.17694/bajecce.457393
8. Middleton D. Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1997. Vol. EMC-19. Iss. 3. PP. 106–127. DOI:10.1109/TEMC.1977.303527
9. Alam M.S., Selim B., Kaddoum G. Analysis and Comparison of Several Mitigation Techniques for Middleton Class-A Noise // Proceedings of the Latin-American Conference on Communications (LATINCOM, Salvador, Brazil, 11–13 November 2019). IEEE, 2019. PP. 1–6. DOI:10.1109/LATINCOM48065.2019.8938020

10. Shongwe T., Vinck A.H., Ferreira H.C. A Study on Impulse Noise and Its Models // SAIEE Africa Research Journal. 2015. Vol. 106. Iss. 3. PP. 119–131. DOI:10.23919/SAIEE.2015.8531938
11. Cortés J.A., Sanz A., Estopinán P., García J.I. On the suitability of the Middleton class A noise model for narrowband PLC // Proceedings of the International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC, Bottrop, Germany, 20–23 March 2016). IEEE, 2016. PP. 58–63. DOI:10.1109/ISPLC.2016.7476256
12. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1988. 448 с.
13. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling noise as a Bernoulli-Gaussian process // Journal of Communication and Information Systems. 2023. Vol. 38. Iss. 1. PP. 174–186. DOI:10.14209/jcis.2023.20
14. Herath S.P., Tran N.H., Le-Ngoc T. On optimal input distribution and capacity limit of Bernoulli-Gaussian impulsive noise channels // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Ottawa, Canada, 10–15 June 2012). IEEE, 2012. PP. 3429–3433. DOI:10.1109/ICC.2012.6364379
15. Karakuş O., Kuruoğlu E.E., Altinkaya M.A. Modelling impulsive noise in indoor powerline communication systems // Signal, Image and Video Processing. 2020. Vol. 14(8). PP. 1655–1661. DOI:10.1007/s11760-020-01708-1

References


1. Somov A.M., Kornev S.F. *Satellite Communication Systems*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2012. 244 p. (in Russ.)
2. Lipkovich E.B. *Systems and Devices for Satellite Multimedia Broadcasting and Interactive Communication*. Minsk: BSUIR Publ.; 2020. 308 p. (in Russ.)
3. Maslakov P.A., Aleksandrov I.S., Khairov T.A. Model of a satellite communication channel under conditions of unintentional impulse interference. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg A.S. Popov Society, dedicated to Radio Day*. 2024;1(79):129–130 (in Russ.) EDN:EUZXNA
4. Vargauzin V.A., Tsikin I.A. *Methods for Improving Energy and Spectral Efficiency of Digital Radio Communication*. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ.; 2013. 352 p. (in Russ.)
5. Sklar B. *Digital communications: Fundamentals and applications*. Prentice-Hall PTR, 2001. 1079 p.
6. Vu T.D., Glushankov E.I., Fam K.K. Investigation of the Energy Efficiency of Signal-Code Constructions Based on Concatenated and Turbo Codes for Prospective Radio Communication Systems. *Telecom IT*. 2025;13(2):69–81. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2025-13-2-69-81. EDN:OLWQTV
7. Çürük S.M. Impulsive noise models used in power line communications. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019;7(2):115–122. DOI:10.17694/bajece.457393
8. Middleton D. Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1997;EMC-19(3):106–127. DOI:10.1109/TEMC.1977.303527
9. Alam M.S., Selim B., Kaddoum G. Analysis and Comparison of Several Mitigation Techniques for Middleton Class-A Noise. *Proceedings of the Latin-American Conference on Communications, LATINCOM, 11–13 November 2019, Salvador, Brazil*. IEEE; 2019. p.1–6. DOI:10.1109/LATINCOM48065.2019.8938020
10. Shongwe T., Vinck A.H., Ferreira H.C. A Study on Impulse Noise and Its Models. *SAIEE Africa Research Journal*. 2015;106(3):119–131. DOI:10.23919/SAIEE.2015.8531938
11. Cortés J.A., Sanz A., Estopinán P., García J.I. On the suitability of the Middleton class A noise model for narrowband PLC. *Proceedings of the International Symposium on Power Line Communications and its Applications, ISPLC, 20–23 March 2016, Bottrop, Germany*. IEEE; 2016. p.58–63. DOI:10.1109/ISPLC.2016.7476256
12. Gnedenko B.V. *A Course in the Theory of Probability*. Moscow: Nauka Publ.; 448 p. (in Russ.)
13. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling noise as a Bernoulli-Gaussian process. *Journal of Communication and Information Systems*. 2023;38(1):174–186. DOI:10.14209/jcis.2023.20
14. Herath S.P., Tran N.H., Le-Ngoc T. On optimal input distribution and capacity limit of Bernoulli-Gaussian impulsive noise channels. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 10–15 June 2012, Ottawa, Canada*. IEEE; 2012. p.3429–3433. DOI:10.1109/ICC.2012.6364379
15. Karakuş O., Kuruoğlu E.E., Altinkaya M.A. Modelling impulsive noise in indoor powerline communication systems. *Signal, Image and Video Processing*. 2020;14(8):1655–1661. DOI:10.1007/s11760-020-01708-1

Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена после рецензирования 26.12.2025; принята к публикации 26.01.2026


The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 26.12.2025; accepted for publication 26.01.2026

Информация об авторах:

ВУ
Тхе Зует

аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-0095-8352>

ГЛУШАНКОВ
Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.