

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С МНОГОЧАСТОТНЫМИ СПЕКТРАЛЬНО ЭФФЕКТИВНЫМИ OFDM-СИГНАЛАМИ И КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Леньшин Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Ирмагамбетов Максат Нуржанович

слушатель факультета авиационного радиоэлектронного оборудования, Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Адрес: 394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А.

E-mail для связи: andrey-lenshin@yandex.ru

Аннотация: Предложена имитационная модель системы связи и передачи данных с многочастотными спектрально эффективными сигналами с ортогональным мультиплексированием с квадратурной амплитудной модуляцией, использующей для снижения пик-фактора OFDM-сигнала различные функции предварительного канального кодирования. Приведены результаты имитационного моделирования в среде MATLAB радиопередающего и радиоприёмного устройств системы связи. Показано, что дискретное преобразование Фурье обеспечивает наиболее эффективное снижение пик-фактора OFDM-сигнала, при этом использование различных функций предварительного канального кодирования практически не ухудшает помехоустойчивость системы связи.

Ключевые слова: система связи и передачи данных, OFDM-сигналы, пик-фактор сигнала, имитационное моделирование, предварительное канальное кодирование, коэффициент битовой ошибки.

В настоящее время развитие и совершенствование современных систем связи и передачи данных осуществляется за счёт повышения эффективности использования полосы частот, отведённой для передачи информации. При высоких скоростях передачи информации необходимо обеспечить высокое качество работы систем связи и передачи данных. В современных системах связи и передачи данных возрастают требования к приёму информации с высокой достоверностью в сложной помеховой обстановке [1, 2].

Принцип технологии OFDM (ортогональное частотное мультиплексирование) состоит в замене последовательной передачи потока данных с помощью одной несущей на параллельную передачу символов с помощью разделения канала на несколько ортогональных поднесущих частот (подканалов), где каждая создаёт свой отдельный поток. Использование параллельной передачи символов способствует увеличению скорости передачи информации [3]. OFDM-сигналы превосходят классические ортогональные сигналы с частотным разделением по эффективности использования полосы частот. Данная технология широко используется в современных стандартах беспроводной связи, цифрового телевидения и в системах военной связи [4].

Технологии OFDM присущ существенный недостаток — высокое значение пик-фактора сигнала (PAPR). Наличие большого PAPR существенно повышает требования к линейности используемого участка передаточной характеристики выходного усилителя мощности передатчика, что необходимо для неискажённой передачи сигналов. Это, в свою очередь, вызывает увеличение вероятности появления битовой ошибки принимаемого сигнала, влечёт необ-

ходимость применения усилителей с большим динамическим диапазоном усиления, приводит к снижению КПД передатчика, а также требует увеличения разрешения цифро-аналоговых (ЦАП) и аналогово-цифровых (АЦП) преобразователей [4, 5].

В работе [6] приведены алгоритм оценки и результаты моделирования в среде MATLAB оценки потенциальной помехоустойчивости систем передачи информации, использующих спектрально-эффективные сигналы с неортогональным частотным уплотнением, при использовании квадратурной амплитудной модуляции (QAM). В работе [7] представлены результаты исследований помехоустойчивости приёма и демодуляции сигналов BPSK, QPSK с компенсацией неортогональных имитационных помех, приведены результаты оценки вероятности ошибки демодуляции полезных сигналов в каналах с имитационными помехами и аддитивным белым гауссовским шумом.

В работе [8] предложено двухступенчатое преобразование частоты в передающей и приёмной части для уменьшения взаимного влияния составляющих OFDM-сигнала, приводится оценка битовой ошибки в системе связи с OFDM-сигналами и различными видами модуляции (QAM-16, QAM64, QAM-256) поднесущих и величины отношения сигнал/шум. Структурные схемы радиопередающего и радиоприёмного устройств системы связи и передачи данных, использующей для уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала метод предварительного канального кодирования, представлены в работе [9].

Целью работы является повышение скрытности и помехоустойчивости системы связи и передачи данных с квадратурной амплитудной модуляцией, использующей для уменьшения пик-фактора OFDM-

сигнала функции предварительного канального кодирования (ПКК), а также проведение анализа помехоустойчивости системы при использовании различных видов цифровой модуляции, функции ПКК и количества поднесущих частот.

Амплитуду OFDM-сигнала можно записать следующим образом

$$S_1(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} A_k \exp[j\omega_k t], \quad t \in [0; T_C], \quad (1)$$

где A_k — комплексная амплитуда k -ой поднесущей; ω_k — частота; N — количество поднесущих частот; T_C — длительность информационного символа.

При $t \in [-T/2; T/2]$ сигналы с OFDM на несущей частоте f_n описываются выражением

$$z(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp(j2\pi f_i t) \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n \cdot \exp(j\omega_n t) \right\} = \operatorname{Re} \{ \exp(j2\pi f_i t) \cdot s(t) \}, \quad (2)$$

где $\omega_n = n\omega_1 = 2\pi n/T$; ω_n — n -я циклическая поднесущая частота; y_n — комплексный символ канального алфавита, предназначенный для модуляции n -й поднесущей частоты.

Отличие спектрально эффективных сигналов с OFDM от классических сигналов с OFDM заключается в использовании в каждом из каналов формирования на поднесущей частоте скруглённой формы вещественной огибающей. Аналитическая запись таких сигналов имеет вид

$$z(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp(j2\pi f_i t) \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} a(t) y_n \exp(j\omega_n t) \right\}, \quad (3)$$

где $a(t)$ — оптимальная функция [10].

Для обеспечения ортогональности между частотными поднесущими величина частотного сдвига между соседними частотами должна выбираться из условия $\Delta f = 1/T_C$ [11]. Важнейшей характеристикой многочастотных сигналов является коэффициент частотного уплотнения поднесущих частот $\alpha = T_C \Delta f = \Delta f / \Delta f_{\text{ОТ}}$ ($\Delta f_{\text{ОТ}}$ — величина разнесения между поднесущими частотами, обеспечивающая их ортогональность). Для сигналов с ортогональным частотным уплотнением (OFDM-сигналов) $\alpha = 1$ [6].

Структурная схема радиопередающего устройства системы связи с OFDM-сигналами, реализующая ме-

тодику снижения пик-фактора OFDM-сигнала с помощью блоков ПКК и обеспечивающая равномерное распределение мощности на поднесущих без ухудшения качества связи (БПКК₁, ..., БПКК_N — блоки ПКК; АС — антенная система; УМН — умножитель; УМ — усилитель мощности; Σ — сумматор; ОБПФ — обратное быстрое преобразование Фурье; ОГ — опорный генератор) показана на рис. 1 [5].

Входной двоичный информационный поток $S[n]$ с помощью мультиплексора МПЛ (последовательно-параллельного преобразователя) разделяется на параллельные низкоскоростные потоки данных по числу поднесущих. Модуляторы $M_{1\text{-QAM}}$, $M_{2\text{-QAM}}$, ..., $M_{N\text{-QAM}}$ осуществляют модуляцию каждого узкополосного канала (M-Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) — M-позиционная квадратурная амплитудная модуляция).

Сигнал вида M-QAM способен передавать на длительности символа $N = \log_2 M$ информационных битов. Модуляторы многопозиционных сигналов QAM, как правило, строят на основе способа модуляции наложением (SPM — Superposed Modulation): сигналы QAM более высокого порядка формируют на основе сигналов QAM более низкого порядка [12].

Пик-фактор (PAPR — Peak-to-Average Power Ratio) сигнала — отношение его пиковой мощности к средней в полосе пропускания сигнала

$$P = 10 \log \left(\frac{\max_i |s_i|^2}{E_i [|s_i|^2]} \right), \quad (4)$$

где значения $E_i [|s_i|^2] = \bar{P}$ и $\max |s_i|^2$ определяются выражениями [13]

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{N-1} \dot{X}_l \dot{X}_m^* \exp(j(\omega_l - \omega_m)t) dt = \\ &= \frac{1}{T} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{N-1} \dot{X}_l \dot{X}_m^* \int_0^T \exp\left(j2\pi(l-m)\frac{t}{T}\right) dt, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\dot{X}_l = \dot{X}_{c,l} + j\dot{X}_{s,l}$ — низкочастотный комплексный эквивалент сигнала QAM на l -й поднесущей;

$$\max |s_i|^2 = \max \left(\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{N-1} \dot{X}_l \dot{X}_m^* \exp\left[j2\pi \frac{i(l-m)}{N}\right] \right). \quad (6)$$

При использовании метода предварительного кодирования модулированный символ данных X_k

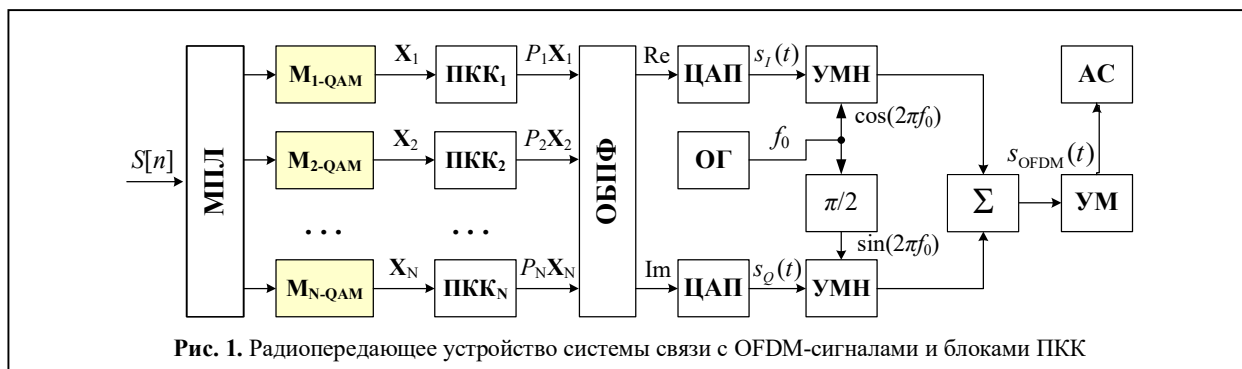


Рис. 1. Радиопередающее устройство системы связи с OFDM-сигналами и блоками ПКК

Таблица 1. Мгновенное значение $PAPR$, дБ, при различных видах модуляции

Вид функции ПКК	16-QAM		64-QAM		256-QAM	
	$N=1024$	$N=16384$	$N=1024$	$N=16384$	$N=1024$	$N=16384$
Дискретное преобразование Фурье	2,274	2,343	3,456	3,619	3,979	4,179
Дискретное преобразование Хартли	5,113	5,234	5,480	6,626	5,734	6,656
Дискретное синусное преобразование	6,184	7,034	6,499	7,738	6,455	7,645
Дискретное косинусное преобразование	6,109	6,942	6,512	7,918	6,474	7,619
Быстрое преобразование Уолша — Адамара	6,778	7,845	6,947	8,899	6,983	9,074
Без использования ПКК	7,141	8,133	7,091	9,362	7,523	9,200

умножают на соответствующую функцию ПКК $P_k(\exp j\omega)$ на k -й поднесущей $\mathbf{D}_k = P_k(\exp j\omega)\mathbf{X}_k$. OFDM-сигнал с ПКК описывается выражением

$$s_{\text{CODE}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_k \exp[j2\pi kt/T_s], \quad 0 \leq t < T_s. \quad (7)$$

Для снижения пик-фактора OFDM-сигнала целесообразно использовать 5 различных функций ПКК, удовлетворяющих критериям Найквиста [14]: 1) дискретное преобразование Хартли (DHT); 2) дискретное косинусное преобразование (DCT); 3) дискретное синусное преобразование (DST); 4) дискретное преобразование Фурье (DFT); 5) быстрое преобразование Уолша-Адамара (FWHT) [15].

В среде «MATLAB» разработана программа для моделирования радиопередающего устройства OFDM-сигналов с использованием функций ПКК [16]. В качестве основного показателя целесообразно использовать выборочную функцию распределения пик-фактора (ВФРП), показывающую вероятность $P(PAPR > PAPR_0)$ того, что величина пик-фактора OFDM-сигнала $PAPR$ примет значение больше заданного (величины порога) $PAPR_0$. Основными входными параметрами в имитационной модели радиопередающей подсистемы OFDM-сигналов являются: 1) количество поднесущих частот N ; 2) вид цифровой модуляции (M-QAM, $M = 16, 64, 256$); 3) тип функции ПКК; 4) полоса частот; 5) частотное разнесение соседних поднесущих частот; 6) относительная длина защитного интервала (ЗИ).

Результаты имитационного моделирования процесса формирования OFDM-сигнала показали, что относительная длина ЗИ ($T_{\text{ЗИ}} = 0,25 \cdot T_s$) не влияет на

значение пик-фактора OFDM-сигнала. Результаты моделирования радиопередающего устройства системы связи с OFDM-сигналами (рис. 1) при использовании модуляции 16-QAM и 64-QAM и 256-QAM представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

На основании анализа результатов имитационного моделирования радиопередающего устройства системы связи с OFDM-сигналами (рис. 2) можно сделать вывод, что среди пяти рассмотренных функций — DFT, DHT, DCT, DST, FWHT — наилучшие результаты во всех сценариях показали DFT и DHT. Дискретное преобразование Фурье показало наилучшие показатели, снизив пик-фактор в среднем на 5 дБ. Дискретное преобразование Хартли обеспечивает снижение пик-фактора в среднем на 3...4 дБ. Косинусные и синусные дискретные преобразования показывают промежуточные результаты, снижение $PAPR$ на 1...2 дБ. Наихудшие показатели у преобразования Уолша — Адамара, снижение пик-фактора в среднем на 1 дБ.

На основании анализа радиопередающего устройства системы связи с OFDM-сигналами и блоками ПКК (рис. 1) и выражения (7) разработана структурная схема радиоприёмного устройства системы связи и передачи данных, использующая для уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала метод ПКК, представленная на рис. 3. Радиоприёмное устройство выполняет строго обратные операции в зеркальном порядке по отношению к радиопередающему устройству системы OFDM (рис. 1), что обеспечивает корректное восстановление переданной информации.

На рис. 3 приняты обозначения: АС — антенная система; МШУ — маломощный усилитель; ДМ — делитель мощности; ОГ — опорный генератор;

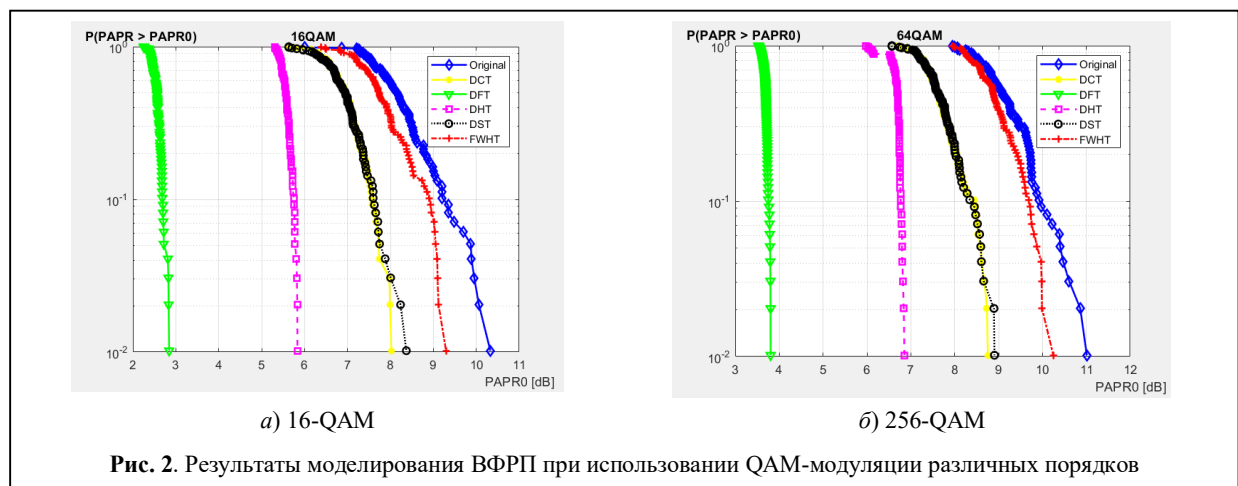
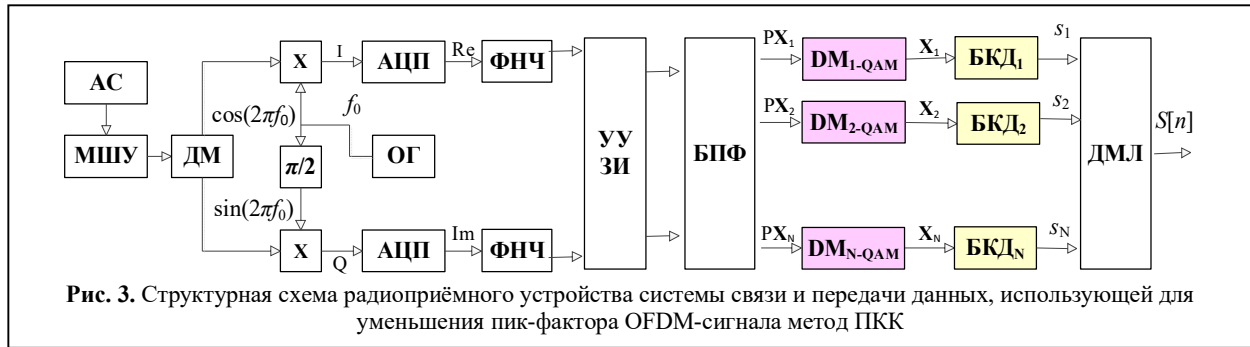


Рис. 2. Результаты моделирования ВФРП при использовании QAM-модуляции различных порядков



УУЗИ — устройство удаления защитного интервала; БПФ — быстрое преобразование Фурье; $DM_{1-QAM}, \dots, DM_{N-QAM}$ — демодуляторы; $BKD_1, \dots, BKD_N$ — блоки канального декодирования.

Принятый на фоне аддитивного белого гауссовского шума OFDM-сигнал с ПКК $s_{CODE}(t)$ с выхода АС поступает на вход МШУ, который обеспечивает поддержание уровня сигнала в динамическом диапазоне АЦП. Далее осуществляется квадратурная обработка сигнала. Выделенные составляющие преобразуются в цифровую форму в АЦП и с помощью ФНЧ убираются высокочастотные составляющие. Сформированный цифровой сигнал поступает на вход блока БПФ, который выполняет переход из временной области в частотную. Размерность БПФ соответствует количеству используемых поднесущих частот N . С выхода блока БПФ символы $PX_1, PX_2, \dots, PX_N$ для каждой поднесущей поступают на демодуляторы ($DM_{1-QAM}, \dots, DM_{N-QAM}$), которые осуществляют демодуляцию в соответствии с используемым видом цифровой модуляции (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM).

После демодуляции символы $X_1, X_2, \dots, X_N$ поступают на блоки канального декодирования ($BKD_1, \dots, BKD_N$). Каждый БКД выполняет преобразование, обратное использованному на передающей стороне (DHT, DCT, DST, DFT или FWHT). После выполнения обратного декодирования информационные символы $S_1, S_2, \dots, S_N$ подвергаются параллельно-последовательному преобразованию в демультимплексе (ДМЛ).

Для оценки эффективности предложенной структурной схемы радиоприёмного устройства системы связи и передачи данных с OFDM-сигналами (рис. 3), использующей для уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала метод ПКК, в среде «MATLAB» разработана программа «Моделирование радиоприёмного устройства системы связи с OFDM-сигналами, использующей функции предварительного канального кодирования» [17].

Помехоустойчивость любой сигнальной конструкции определяется энергией, приходящейся на сигнальный символ. Средняя энергия М-позиционного сигнала QAM равна

$$E_{CP} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M [(a_i^2 + b_i^2) E_s], \quad (8)$$

где E_s — энергия символа с наименьшей амплитудой; $(a_i; b_i)$ — пара независимых целых чисел, опре-

деляющих амплитудные значения положения символа на фазовой плоскости сигнального созвездия [18].

Для оценки помехоустойчивости системы связи (правильности приёма сигнала) в качестве критерия эффективности использовался коэффициент битовой ошибки (КБО), который определяется выражением

$$K_{КБО} = N_{ОШ} / N, \quad (9)$$

где $N_{ОШ}$ — количество ошибочно принятых бит; N — общее количество бит.

Вероятность битовой ошибки в зависимости от ОСШ описывается выражением

$$p_b = \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q \left[\sqrt{2h^2 \frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1}} \right], \quad (10)$$

где L — количество уровней манипуляции, для M-QAM $L = \sqrt{M}$; $h^2 = E_b / N_0$ — ОСШ; E_b — энергия, приходящаяся на бит; N_0 — спектральная плотность мощности шума; $Q[\dots]$ — гауссов интеграл ошибок

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-u^2/2) du = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2}) \quad [12].$$

Помимо битовой ошибки в системах связи часто оценивают вероятность символьной ошибки (SER). Для OFDM-сигналов с M-QAM при больших отношениях сигнал/шум (ОСШ) справедлива оценка

$$SER \leq N_D \exp \left(-\frac{h^2 d_{\min}^2}{4} \right), \quad (11)$$

где N_D — число точек, наиболее близко расположенных к выбранной точке в диаграмме отображения бит в символы; $d_{\min}$ — минимальное евклидово расстояние между символами сигнального созвездия.

В области высоких ОСШ вероятности битовой и символьной ошибок связаны соотношением $BER = SER / k_b$, где $k_b = \log_2 M$ — число бит на символ для модуляции M-QAM.

Вероятность битовой ошибки для модуляции 16-QAM сигналов равна

$$BER = \frac{3}{4} Q \left(\sqrt{\frac{h^2}{5}} \right) + \frac{1}{2} Q \left(3\sqrt{\frac{h^2}{5}} \right) - \frac{1}{4} Q \left(5\sqrt{\frac{h^2}{5}} \right), \quad (12)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-0,5t^2) dt$ — функция Маркума [19].

Вероятность битовой ошибки для модуляции 64-QAM сигналов равна [19]

$$BER = \frac{7}{12} Q\left(\sqrt{\frac{h^2}{21}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(3\sqrt{\frac{h^2}{21}}\right) - \frac{1}{12} Q\left(5\sqrt{\frac{h^2}{21}}\right) + \frac{1}{12} Q\left(9\sqrt{\frac{h^2}{21}}\right) - \frac{1}{12} Q\left(13\sqrt{\frac{h^2}{21}}\right). \quad (13)$$

Для $M \geq 16$ можно использовать приближённое выражение для средней вероятности искажения бита M -ичного QAM-сигнала $\bar{P}_B$ [20]

$$\bar{P}_B \approx \frac{2}{\sqrt{M} \log_2(\sqrt{M})} \left\{ (\sqrt{M} - 1) Q\left(\frac{h^2}{\sqrt{(M-1)/3}}\right) + (\sqrt{M} - 2) Q\left(\frac{3h^2}{\sqrt{(M-1)/3}}\right) - Q\left(\frac{5h^2}{\sqrt{(M-1)/3}}\right) \right\}. \quad (14)$$

На рис. 4 приведены результаты расчёта зависимости средней вероятности искажения бита от ОСШ при когерентном поэлементном приёме QAM-сигнала для $M = 16$, $M = 64$, $M = 256$ и $M = 1024$, полученные с помощью приближенного выражения (14).

По результатам анализа представленных на рис. 4 зависимостей можно сделать вывод, что с ростом M средняя вероятность искажения бита при когерентном поэлементном приёме OFDM-сигналов с QAM увеличивается. Для обеспечения более высокой помехоустойчивости предпочтительнее использовать сигналы с QAM-16, QAM-64, нежели сигналы с QAM-256 и с QAM-1024.

При моделировании радиоприёмного устройства системы связи входными параметрами имитационной модели являются: 1) количество поднесущих частот; 2) вид цифровой модуляции; 3) вид функции ПКК; 4) длина ЗИ (зафиксирована на уровне $T_{\text{зи}} = 0,25 \cdot T_s$). Результаты моделирования зависимости КБО от ОСШ представлены на рис. 5 и в таблице 2.

Анализ результатов моделирования, представленных в таблице 2, показывает, что для всех исследованных видов QAM-модуляции (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) значения требуемого ОСШ при фиксиро-

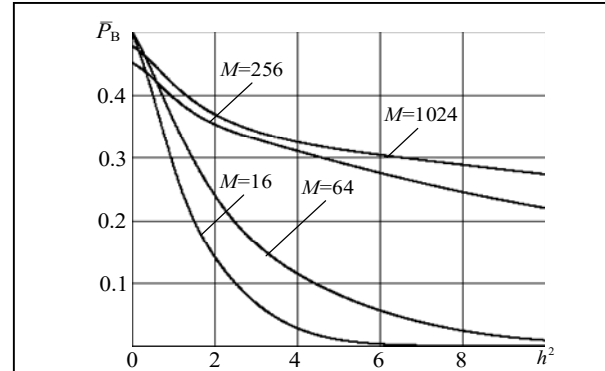


Рис. 4. Зависимости средней вероятности искажения бита от ОСШ при когерентном поэлементном приёме для $M = 16$, $M = 64$, $M = 256$, $M = 1024$

ванном коэффициенте битовых ошибок и числе поднесущих практически одинаковы для всех функций ПКК (DFT, DHT, DST, DCT, FWHT), а также для системы без предварительного кодирования. Разброс значений не превышает 0,2 дБ. Таким образом, применение метода ПКК с целью снижения пик-фактора практически не ухудшает помехоустойчивость системы связи, поскольку требуемое ОСШ остаётся на том же уровне, что и в классическом OFDM.

Таким образом, в данной работе предложена имитационная модель системы связи и передачи данных с многочастотными спектрально эффективными OFDM-сигналами с квадратурной амплитудной модуляцией, использующей для снижения пик-фактора OFDM-сигнала различные функции предварительного кодирования. Результаты имитационного моделирования показали, что коэффициент битовой ошибки зависит от вида цифровой модуляции, но практически не зависит от количества поднесущих и вида функции ПКК, использование функций ПКК практически не ухудшает помехоустойчивости системы связи и передачи данных.

Литература

1. Леньшин А.В., Шаталов Е.В. Помехоустойчивость приема спектрально эффективных сигналов с неортогональным частотным уплотнением. Телекоммуникации. 2021. № 7. С. 18–25.

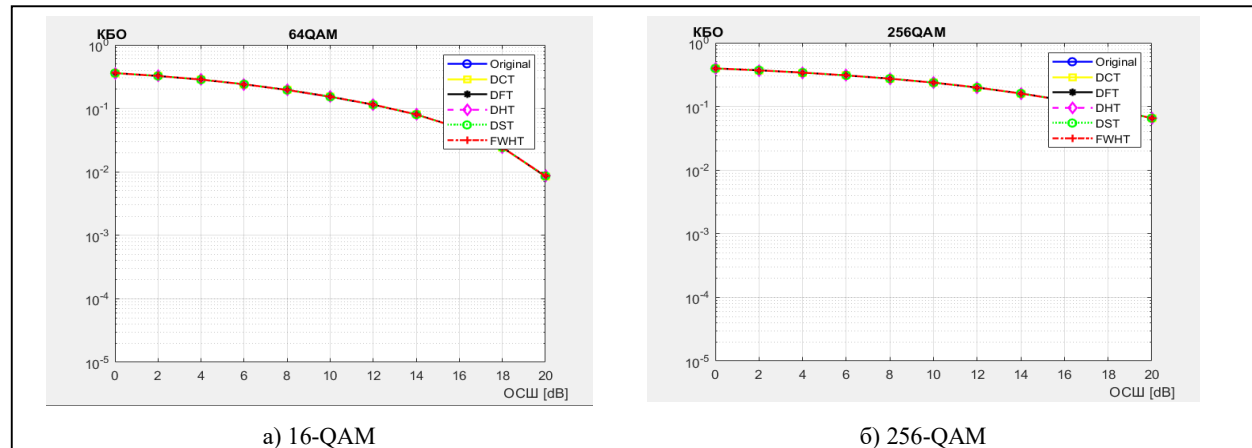


Рис. 5. Результаты моделирования КБО для 64-QAM и 256-QAM при $N = 4096$

Таблица 2. Значение ОСШ при $K_{\text{КБО}} = 10^{-3}$ для $N = 4096$

Вид функции ПКК	Вид модуляции		
	16-QAM	64-QAM	256-QAM
Дискретное преобразование Фурье	16,418	22,320	30,134
Дискретное преобразование Хартли	16,458	22,301	30,333
Дискретное синусное преобразование	16,503	22,275	30,393
Дискретное косинусное преобразование	16,454	22,232	30,213
Быстрое преобразование Уолша — Адамара	16,422	22,213	30,314
Без использования предварительного кодирования	16,459	22,314	30,145

2. *Леньшин А.В.* Особенности построения и организации сетей радиосвязи специального назначения. Телекоммуникации. 2015. № 8. С. 26–28.

3. *Shulze H., Luders C.* Theory and Applications of OFDM and CDMA. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2005. 421 p.

4. *Леньшин А.В., Ирмагамбетов М.Н.* Моделирование радиопередающего устройства системы связи с уменьшенным пик-фактором многочастотного OFDM-сигнала с использованием блоков предварительного канального кодирования. Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 21–23 апреля 2026 г.): в 5 т. Том 2. Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2026. С. 40–49.

5. *Ирмагамбетов М.Н., Леньшин А.В.* Снижение пик-фактора многочастотного OFDM-сигнала с помощью блоков предварительного канального кодирования. Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук (специальный выпуск). 2026. № S116 (116). С. 76–81.

6. *Леньшин А.В., Зезюлин А.А.* Оценка потенциальной помехоустойчивости систем передачи информации, использующих сигналы с неортогональным частотным уплотнением. Телекоммуникации. 2019. № 11. С. 8–14.

7. *Иванов М.С., Леньшин А.В.* Статистические испытания методики приема и демодуляции сигналов с компенсацией неортогональных имитационных помех. Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 4. С. 149–158.

8. *Кузин П.И., Кузина Е.И., Лиманцева Е.В.* Оценка вероятности битовой ошибки в системах с OFDM-сигналами. Телекоммуникации. 2024. № 2. С. 9–15.

9. *Леньшин А.В., Ирмагамбетов М.Н., Калина Н.С.* Моделирование системы связи и передачи данных с многочастотными спектрально эффективными OFDM-сигналами и блоками предканального кодирования. Теория и техника радиосвязи. 2026. № 2. С. 29–37.

10. *Макаров С.Б., Рашич А.В.* Формирование и прием спектрально-эффективных сигналов с OFDM. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телеком-

муникации. Управление. 2011. № 6–2. С. 19–26.

11. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

12. *Дворников С.С.* Модифицированные конструкции сигналов квадратурной модуляции с трансформированными фазовыми диаграммами. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. № 2. С. 10–23.

13. *Гришин И.В., Калинкина А.А.* Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи. Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 55–66.

14. *Nyquist H.* Certain topics in telegraph transmission theory. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. № 47. Pp. 617–644.

15. *Залманзон Л.А.* Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имитационная модель радиопередающей подсистемы OFDM-сигналов с использованием функций предварительного канального кодирования / *М.Н. Ирмагамбетов*. № 2025694534 (РФ); зарег. 05.12.2025 г.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование радиоприемного устройства системы связи с OFDM-сигналами, использующей функции предварительного канального кодирования / *М.Н. Ирмагамбетов*. № 2025694987 (РФ); зарег. 09.12.2025 г.

18. *Прокис Дж.* Цифровая связь / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

19. *Fitz M.P., Seymour J.P.* On the bit probability of QAM modulation. International Journal of Wireless Information Networks. 1994. V. 1. № 3. Pp. 131–139.

20. *Ложкин К.Ю.* Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита M-KAM сигнала при произвольном отношении сигнал/шум. Радиотехника. 2018. № 5. С. 100–105.

Поступила 8 октября 2025 г.

English

SIMULATION MODEL OF A COMMUNICATION AND DATA TRANSMISSION SYSTEM WITH MULTI-FREQUENCY SPECTRALLY EFFICIENT OFDM SIGNALS AND QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Andrey Valentinovich Lenshin — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Aviation Electronic Systems, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

Maksat Nurzhanovich Irmagambetov — Student, Faculty of Aviation Radioelectronic Equipment, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”¹.

Address: 394064, Russian Federation, Voronezh, Starykh Bolshevikov str., 54a.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Abstract: Modern communication and data transmission systems are being improved by increasing the efficiency of the frequency band allocated for information transmission. At high data rates, reliable operation is required in a complex electromagnetic environment. High-speed systems are increasingly based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), which has higher frequency efficiency than orthogonal frequency division signals. OFDM with quadrature amplitude modulation (QAM) is used in IEEE 802.11n/ac, 802.11ad, 802.11ax/be; IEEE 802.16d/e (WiMAX); LTE and LTE-Advanced; DVB-T, DVB-T2, ISDB-T, DTMB and DTMB-A; and MIL-STD-188-100. The principle of OFDM is to replace serial transmission over a single carrier with parallel transmission by dividing the channel into several orthogonal subcarriers, which increases the information transmission rate. A significant disadvantage of OFDM is the high peak factor of the OFDM signal. It increases requirements for the linearity of the output power amplifier's transmission characteristic to ensure undistorted radio signal transmission, raises the probability of a bit error, requires amplifiers with a large dynamic range, reduces transmitter efficiency, and demands higher resolution of digital-to-analog (DAC) and analog-to-digital (ADC) converters. The aim of the work is to increase the secrecy and noise immunity of a communication and data transmission system with QAM that uses pre-channel coding (PCC) functions to reduce the peak factor of the OFDM signal, and to analyze the noise immunity of the system using various types of digital modulation, PCC functions, and numbers of subcarriers. The proposed structural schemes of the radio transmitting and receiving devices ensure a reduction in the peak factor of the transmitted OFDM signal using PCC blocks and its correct restoration. Simulation results showed that the noise immunity of the communication system depends on the type of digital modulation but is practically independent of the number of subcarriers and the type of PCC function. It was established that the use of PCC functions practically does not reduce the noise immunity of communication and data transmission systems.

Keywords: communication and data transmission system, OFDM signals, peak signal factor, simulation modeling, pre-channel coding, bit error coefficient.

References

1. *Lenshin A.V., Shatalov E.V.* Noise immunity of receiving spectrally effective signals with non-orthogonal frequency compression. *Telecommunications*. 2021. No. 7. Pp. 18–25.
2. *Lenshin A.V.* Features of building and organizing special-purpose radio communication networks. *Telecommunications*. 2015. No. 8. Pp. 26–28.
3. *Shulze H., Luders C.* Theory and Applications of OFDM and CDMA. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 421 p.
4. *Lenshin A.V., Irmagambetov M.N.* Modeling of a radio transmission device of a communication system with a reduced peak factor of a multi-frequency OFDM signal using pre-channel coding units. Radar, navigation, communications: proceedings of the XXXII International Scientific and Technical Conference (Voronezh, April 21–23, 2026): in vol. 5. Volume 2 / Voronezh State University; JSC Concern Constellation. Voronezh: VSU Publishing House, 2026. Pp. 40–49.
5. *Irmagambetov M.N., Lenshin A.V.* Reduction of the peak factor of a multi-frequency OFDM signal using pre-channel coding blocks. *Actual problems of the humanities and socio-economic sciences (special issue)*. 2026. No. S116 (116). Pp. 76–81.
6. *Lenshin A.V., Zezulin A.A.* Evaluation of the potential noise immunity of information transmission systems using signals with non-orthogonal frequency compression. *Telecommunications*. 2019. No. 11. Pp. 8–14.
7. *Ivanov M.S., Lenshin A.V.* Statistical tests of signal reception and demodulation techniques with compensation for non-orthogonal simulation interference. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2023. No. 4. Pp. 149–158.
8. *Kuzin P.I., Kuzina E.I., Limantseva E.V.* Estimation of the probability of bit error in systems with OFDM signals. *Telecommunications*. 2024. No. 2. Pp. 9–15.
9. *Lenshin A.V., Irmagambetov M.N., Kalina N.S.* Modeling of communication and data transmission systems with multi-frequency spectrally efficient OFDM signals and pre-channel coding units. *Theory and technology of radio communication*. 2026. No. 2. Pp. 29–37.
10. *Makarov S.B., Rashich A.V.* Formation and reception of spectrally efficient signals with OFDM. *Scientific and technical bulletin of SPbGPU. Computer science. Telecommunications. Management*. 2011. No. 6-2. Pp. 19–26.
11. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical foundations and practical application. 2nd ed., rev. Moscow: Williams, 2003. 1104 p.
12. *Dvornikov S.S.* Modified constructions of quadrature modulation signals with transformed phase diagrams. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2024. Vol. 18. No. 2. Pp. 10–23.
13. *Grishin I.V., Kalinkina A.A.* Review of methods of multi-frequency signal modulation in modern wireless communication networks. *Information Technologies and Telecommunications*. 2020. Vol. 8. No. 2. Pp. 55–66.
14. *Nyquist H.* Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1928. No. 47. Pp. 617–644.
15. *Zalmanzon L.A.* Fourier, Walsh, Haar transformations and their application in management, communications and other fields. Moscow: Nauka Publ., 1989. 496 p.
16. Certificate of state registration of a computer program. Simulation model of the radio transmission subsystem of OFDM signals using pre-channel coding functions. *M.N. Irmagambetov*. No. 2025694534 (Russian Federation); dated 05.12.2025.
17. Certificate of state registration of a computer program. Simulation of a radio receiving device of a communication system with OFDM signals using pre-channel coding functions. *M.N. Irmagambetov*. No. 2025694987 (Russian Federation); dated 09.12.2025.
18. *Proakis J.* Digital Communications / edited by D.D. Klovsky. Moscow: Radio and Communications, 2000. 800 p.
19. *Fitz M.P., Seymour J.P.* On the bit probability of QAM modulation. *International Journal of Wireless Information Networks*. 1994. Vol. 1. No. 3. Pp. 131–139.
20. *Lozhkin K.Yu.* Analytical dependences of the average probability of distortion of a bit of an M-QAM signal at an arbitrary signal-to-noise ratio. *Radio Engineering*. 2018. No. 5. Pp. 100–105.