

Теория сигналов и систем

УДК 621.391

Л.А. Урывский, д.-р. техн. наук, ORCID [0000-0002-4073-9681](https://orcid.org/0000-0002-4073-9681)С.А. Осипчук, ORCID [0000-0002-6174-2986](https://orcid.org/0000-0002-6174-2986)Институт телекоммуникационных систем, НТУУ «КПИ», 03057,
пер. Индустриальный, 2, г. Киев, Украина

Сравнительный анализ энергетических параметров и достоверности приема OFDM-сигналов с разным числом поднесущих частот

В работе на основании результатов имитационного моделирования доказана эффективность применения оптимального коэффициента усиления K_{P_OPT} для OFDM-сигналов.

В этом случае удается добиться независимости энергетических характеристик и достоверности приема группового сигнала, сформированного по технологии OFDM, от числа поднесущих N_{OFDM} . При этом показано, как именно значение оптимального коэффициента усиления K_{P_OPT} зависит от числа поднесущих N_{OFDM} .

Предложено аналитическое выражение для определения оптимального коэффициента усиления K_{U_OPT} , которое реализуется на основании решения интегрального уравнения, в котором определен вид плотности распределения амплитуд усиливаемого сигнала, и требования по достоверности обработки сигналов, а значение является $K_U = K_{U_OPT}$ искомым.

Результаты определения K_{U_OPT} являются продуктом статистического моделирования. Знание K_{U_OPT} дает возможность произвести расчет соответствующего значения энергетического параметра канала связи h_{OPT}^2 (отношение сигнал/шум), которое, в свою очередь, является основанием для последующего аналитического расчета значений ошибки символа $p_{СИМВ}$ и ошибки бита p_b по каждому значению h^2 .

Обоснованный эффект описанной методики формирования групповых OFDM-сигналов позволяет гибко использовать данную технологию как инструмент многостанционного доступа в таких перспективных системах связи как LTE и других подобных технологиях. Кроме того, данное свойство характеризует

технологию OFDM как потенциально эффективную в каналах с многолучевым распространением, поскольку изменение числа поднесущих N_{OFDM} без ущерба энергетике принимаемого луча позволяет управлять длительностью одиночного символа в зависимости от реальных условий запаздывания лучей, снижая влияние фактора многолучевости на качество приема.

Потери достоверности при использовании технологии OFDM относительно одностанционной передачи можно компенсировать выбором соответствующей сигнально-кодовой конструкции, содержащей помехоустойчивый код с требуемыми параметрами.

Библ. 5, рис. 11, табл. 1.

Ключевые слова: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); имитационная модель; число поднесущих частот; ПИК-фактор; оптимальный коэффициент усиления; вероятность ошибки; энергетический параметр канала связи.

Введение

OFDM [1] (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – является широко используемой технологией в современных беспроводных, электропроводных и оптических телекоммуникационных системах [2, 3].

OFDM является технологией, при которой последовательно реализуются:

- разделение входного потока бит от источника на N_{OFDM} субпоток с равной скоростью, в N_{OFDM} раз меньшей, чем входящий поток,
- модуляция каждого субпотока определенным видом манипуляции,
- формирование из субпоток (поднесущих) суммарного сигнала со скоростью исходного потока,
- передача суммарного сигнала в линию связи.

Выделяют следующие преимущества технологии OFDM: высокая эффективность использования спектра, устойчивость к замираниям в канале связи, устойчивость к импульсным помехам. В то же время, недостатками технологии OFDM являются: низкая энергетическая эффективность в силу значительного ПИК-фактора, высокая чувствительность к частотным сдвигам при проявлении эффекта Доплера [4].

В [5] представлена методика определения энергетических параметров группового сигнала, сформированного по технологии OFDM, в зависимости от числа поднесущих OFDM-сигнала при заданном виде многопозиционной манипуляции поднесущих частот. Показано, что возможно и целесообразно применение коэффициента усиления для группового OFDM-сигнала с целью улучшения его энергетики с поддержанием условия линейности усиления в допустимых пределах. Таким образом, использование такой методики улучшает энергетику OFDM сигнала, оставляя уровень нелинейных искажений не более допустимых; при этом достоверность приема информации в точке приема улучшается.

В [5] технология OFDM не исследована на предмет поведения характеристик группового сигнала в зависимости от числа поднесущих частот при разных видах манипуляции, что является актуальной научной и практической задачей. Результаты этого исследования представлены в данной статье.

Постановка задачи

Целью данной работы является определение влияния числа поднесущих N_{OFDM} технологии OFDM и метода манипуляции поднесущих на параметры и показатели группового сигнала, сформированного по технологии OFDM:

- оптимальный коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{У_ОПТ}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$, где $k = \log_2 M$ – число бит на символ многопозиционной манипуляции, M – число символьных позиций в созвездии манипуляции;
- оптимальный коэффициент усиления по мощности $K_{\text{Р_ОПТ}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$;
- энергетический параметр, характеризующий отношение уровня энергии сигнала к уровню спектральной плотности белого шума $h_{\text{OFDM}}^2 = f(N_{\text{OFDM}}, k)$;

- вероятность ошибки приема символа многократной манипуляции $\rho_{\text{СИМВ}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$;
- вероятность ошибки приема бинарного символа при заданном виде многократной манипуляции $\rho_{\text{б}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$;
- характеристику $\frac{K_{\text{Р_ОПТ}}}{N_{\text{OFDM}}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$, которая описывает количественное отношение оптимального коэффициента усиления поднесущих частот к числу поднесущих, как меру соотношения эффективности использования энергетического ресурса в технологии OFDM и при одночастотной передаче.

Методика исследования характеристик технологии OFDM

Статистические свойства группового OFDM-сигнала характеризуются высоким ПИК-фактором, что является обстоятельством, существенно снижающим эффективность использования энергетического ресурса канала связи. Решающим звеном при этом является задача удержания амплитуды группового сигнала в границах линейного участка усилительной характеристики передатчика.

Усиление группового OFDM-сигнала в передатчике с некоторым коэффициентом усиления $K_{\text{У}}$ увеличивает средний уровень принимаемого сигнала, что способствует улучшению достоверности, однако провоцирует выход с некоторой вероятностью амплитуды группового сигнала за пределы линейного участка характеристики усилителя. В качестве оптимального коэффициента усиления $K_{\text{У_ОПТ}}$ принимается такое его значение, при котором достигается условие совпадения вероятности появления нелинейных искажений $\rho_{\text{НИ}}$ в усилителе передатчика и вероятности ошибочного приема символа $\rho_{\text{СИМВ}}$ в приемнике:

$$\rho_{\text{СИМВ}} = \rho_{\text{НИ}} \quad (1)$$

Другими словами, получению оптимального значения коэффициента усиления поднесущих OFDM соответствует условие:

$$K_{\text{У_ОПТ}} = f(\{\rho_{\text{СИМВ}}, \rho_{\text{НИ}}\}) = f(h_{\text{ПРМ}}^2, k, N_{\text{OFDM}}) \quad (2)$$

Пример реализации приведенной методики, использованной для исследования характеристик OFDM-сигналов в данной работе, иллюстрируется на рис. 1.

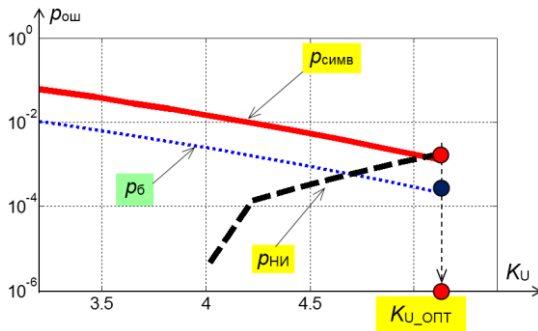


Рис. 1. Достижение условия
 $\rho_{\text{СИМВ}} = \rho_{\text{НИ}} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ при $K_{\text{У_ОПТ}} = 5,1$; вероятность битовой ошибки $\rho_{\text{б}} = 2 \cdot 10^{-4}$. Исходные параметры: $N_{\text{OFDM}} = 10$; QAM-64; $\rho_{\text{б}_0} = 10^{-6}$

Значение вероятности $\rho_{\text{б}_0}$ – это требуемая вероятность битовой ошибки, которая обеспечивается на приемной стороне при одночастотной передаче с параметром канала $h_{\text{ПРМ}}^2$.

Вместе с тем, в современных системах передачи используют многопозиционную манипуляцию (МПМ) несущих частот, при которой происходит экономия частотного ресурса канала связи, поскольку один символ манипулированного сигнала переносит $k = \log_2 M$ бит, где M – число точек сигнального созвездия для заданного вида МПМ-М (например, QAM-64 – Quadrature Amplitude Modulation с 64 точками сигнального созвездия, содержащих по 6 бит). Следовательно, многопозиционная манипуляция ставит блок из k бит в соответствующей определенной точке сигнального созвездия, которая называется символом, и характеризуется определенными значениями амплитуды и фазы. Таким образом, при передаче информации с применением МПМ, можно оценивать как вероятность ошибки принятого символа $\rho_{\text{СИМВ}}$, так и вероятность ошибки принятого бита $\rho_{\text{б}}$.

Вероятность ошибки символа $\rho_{\text{СИМВ}}$ и ошибки бита $\rho_{\text{б}}$ в точке приема, с одной стороны, зависит от отношения энергии сигнала к уровню спектральной плотности белого шума $h_{\text{ПРМ}}^2$ [5]:

$$h_{\text{ПРМ}}^2 = \frac{P_{\text{С}} T_{\text{С}}}{N_0}, \quad (3)$$

где $P_{\text{С}}$ – мощность сигнала в точке приема, $T_{\text{С}} = 1/V_{\text{С}}$ – длительность символа, $V_{\text{С}}$ – скорость передачи символов МПМ; N_0 – спектральная плотность белого шума.

С другой стороны, эти вероятности существенно зависят от кратности манипуляции M так, что рост производительности канала с увеличением M сопровождается одновременным ухудшением показателей достоверности.

Таким образом, значительный ПИК-фактор группового OFDM-сигнала и высокая кратность манипуляции M являются предпосылками к целесообразному увеличению мощности излучения передатчика в границах допустимых нелинейных искажений.

Результаты исследования зависимости параметров OFDM от числа поднесущих N_{OFDM}

В качестве первого шага по результатам имитационного моделирования OFDM-сигнала с МПМ получены распределения амплитуд группового сигнала до и после усиления.

На рис. 2 показано два распределения амплитуд группового OFDM-сигнала: до усиления (линии 1 и 2) и после усиления с $K_{\text{У_ОПТ}}$ (линия 3). Эксперимент показал, что от вида манипуляции распределение практически не зависит, но зависит от числа поднесущих в OFDM-сигнале. Исходная максимальная амплитуда напряжения группового сигнала на выходе усилителя передатчика – $U_0 = 10\text{В}$ ($\rho_{\text{НИ}} = 0$). В этом случае значение энергетического параметра $h_{\text{ПРМ}}^2$ (4) трансформируется в значение энергетического параметра OFDM-сигнала h_{OFDM}^2 через соотношение:

$$h_{\text{OFDM}}^2 = h_{\text{ПРМ}}^2 / N_{\text{OFDM}}.$$

На рис. 2 обозначены границы: $U_0 = 10\text{В}$, где $\rho_{\text{НИ}} = 0$; $U = 10 \dots 12,8\text{В}$, где $\rho_{\text{СИМВ}} > \rho_{\text{НИ}} > 0$; $U_{\text{ОПТ}} = 12,8\text{В}$, где $\rho_{\text{СИМВ}} = \rho_{\text{НИ}}$ и $U_{\text{ОПТ}} = K_{\text{У_ОПТ}} \cdot U_0$. Линии 1 и 3 соответствуют сигналу QAM-64 ($N_{\text{OFDM}} = 60$), линия 2 – сигналу QPSK ($N_{\text{OFDM}} = 20$).

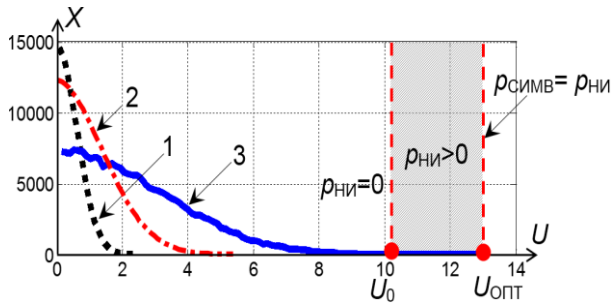


Рис. 2. Распределение амплитуд OFDM сигнала: 1 и 2 – до усиления; 3 – после усиления, X – число отсчетов определенных значений амплитуд OFDM сигнала

Как показал статистический эксперимент и как это можно видеть на рис. 3, с ростом количества поднесущих OFDM сигнала, функция распределения мгновенных значений OFDM сигнала в аппроксимации все ближе приближается к усеченному нормальному распределению:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где $\mu = 0$ – математическое ожидание плотности распределения $f(x)$, σ^2 – дисперсия распределения, σ – среднеквадратичное отклонение.

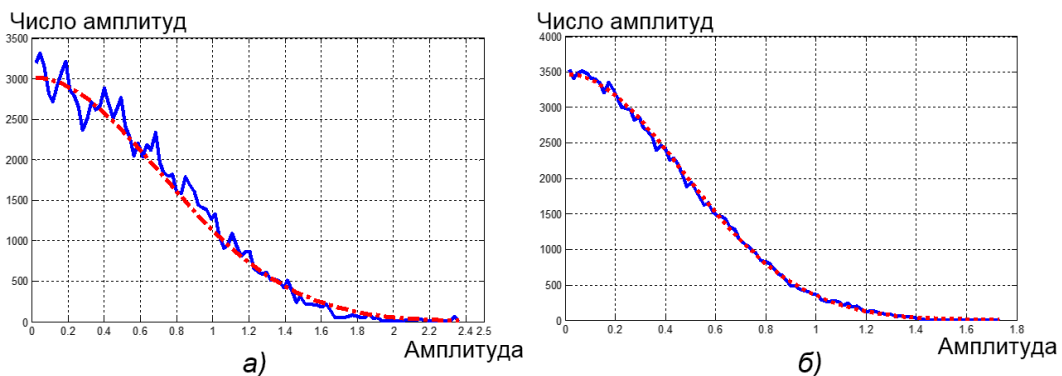


Рис. 3. Аппроксимация распределения амплитуд OFDM сигнала в виде усеченного нормального распределения: а) $N_{\text{OFDM}} = 16$, QAM-16; б) $N_{\text{OFDM}} = 32$, QAM-64

Зависимости исходного (до усиления) среднеквадратичного отклонения σ , а также после усиления группового сигнала, от числа поднесущих N_{OFDM} показаны на рис. 4.

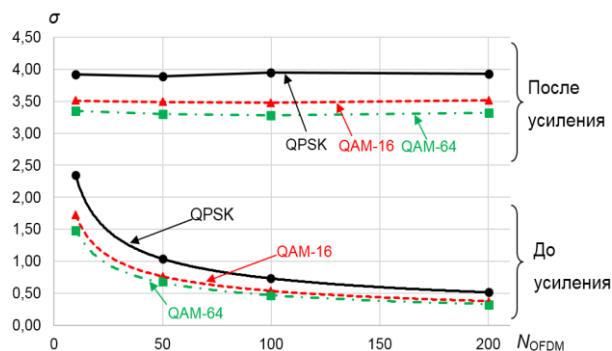


Рис. 4. Зависимость между значением среднеквадратичного отклонения σ и числом поднесущих. Аппроксимация выполнена с коэффициентом соответствия 0,9898 по критерию Хи-квадрат

Как показали экспериментальные исследования, среднеквадратичное отклонение σ распределения (4) является функцией числа поднесущих N_{OFDM} до усиления (5а), и не зависит от числа поднесущих N_{OFDM} после усиления (5б):

$$\sigma = (0,1558k_{\text{QAM}}^2 - 1,9053k_{\text{QAM}} + 10,629) \times N_{\text{OFDM}}^{-0,504}, \quad (5 \text{ а})$$

$$\sigma_U = 0,0294k_{\text{QAM}}^2 - 0,3875k_{\text{QAM}} + 4,58, \quad (5 \text{ б})$$

где $k_{\text{QAM}} = 2$ для QPSK, $k_{\text{QAM}} = 4$ для QAM-16 и $k_{\text{QAM}} = 6$ для QAM-64.

Гипотеза о функции распределения амплитуд OFDM-сигнала в виде нормального закона распределения с параметром σ вида (5а, 5б) подтверждена с использованием критерия Хи-квадрат с коэффициентом соответствия 0,9898.

Условие нормировки усеченного нормального распределения $f(x)$ (4) в случае до усиления выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{U_0} \int_0^{U_0} f(x) dx = 1, \quad (6)$$

т.е. усечение заключается в ограничении рассматриваемых амплитуд участком линейного усиления $(0 \dots U_0)$. При этом используется распределение вида (4) со значениями параметра σ вида (5а).

После усиления с коэффициентом K_U максимальная амплитуда выходного сигнала увеличивается до $U_{MAX} = K_U \cdot U_0$, а параметр σ_U распределения вида (4) пропорционально увеличивается до значения $\sigma_U(N_{OFDM}) = \sigma_U(N_{OFDM}) \cdot K_U(N_{OFDM})$ и определяется соотношением (5б), т.е. ее численное значение не зависит от N_{OFDM} (рис. 4). Соответственно, новая плотность распределения принимает вид:

$$f_U(x) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma_U^2}\right). \quad (7)$$

Тогда вероятность того, что усиливается сигнал не выйдет за пределы участка линейного усиления $P(U < U_0)$, примет вид:

$$\frac{1}{K_U \cdot U_0} \int_0^{U_0} f_U(x) dx < 1, \quad (8)$$

Следовательно, условие определения оптимального коэффициента усиления $K_{U_ОПТ}$ в соответствии с условием (1) реализуется на основании решения интегрального уравнения:

$$\frac{1}{K_U \cdot U_0} \int_0^{K_U \cdot U_0} f_U(x) dx = P_{СИМВ}, \quad (9)$$

где вид плотности распределения $f_U(x)$ определяется (7) с параметром распределения σ_U , описываемым через (5б), при заданных значениях U_0 и $P_{СИМВ}$, а значение $K_U = K_{U_ОПТ}$ является искомым.

На втором этапе моделирования установлена связь между значением оптимального коэффициента усиления $K_{U_ОПТ}$ поднесущих OFDM-сигнала и числом поднесущих N_{OFDM} .

На рис. 5 показаны результаты исследования оптимального коэффициента усиления $K_{U_ОПТ}$ поднесущих OFDM сигнала для числа поднесущих $N_{OFDM} = 10 \dots 250$ при исходной вероятности битовых ошибок $P_{б_0} = 10^{-6}$ и манипуляций видов QPSK, QAM-16, QAM-64 при выполнении условий (1) и (9). Параметры частотного диапазона и уровня белого шума постоянны для каждого эксперимента. Упоминание значения исходной вероятности битовой ошибки $P_{б_0} = 10^{-6}$ относится исключительно к режиму одночастотной передачи, при которой достигается достижение этой вероятности на приемной стороне при $K_{U_ОПТ} = 1$. При этом переход к режиму OFDM не связан с изменением параметров канала связи.

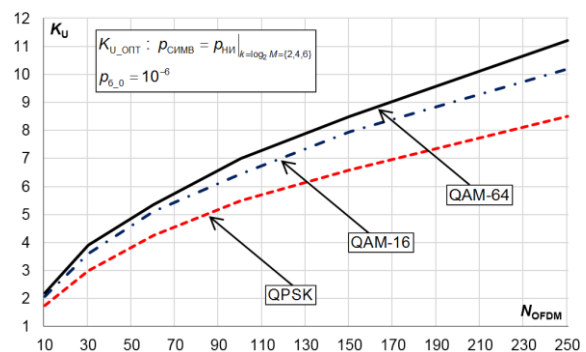


Рис. 5. Оптимальный коэффициент усиления $K_{U_ОПТ}$ поднесущих OFDM сигнала для разных видов манипуляций

Коэффициент усиления по напряжению $K_{U_ОПТ}$ связан с коэффициентом усиления по мощности $K_{P_ОПТ}$ соотношением:

$$K_{P_ОПТ} = (K_{U_ОПТ})^2 \quad (10)$$

На рис. 6 показаны результаты исследования эффективного коэффициента усиления мощности $K_{P_ОПТ}$ для поднесущих OFDM сигнала.

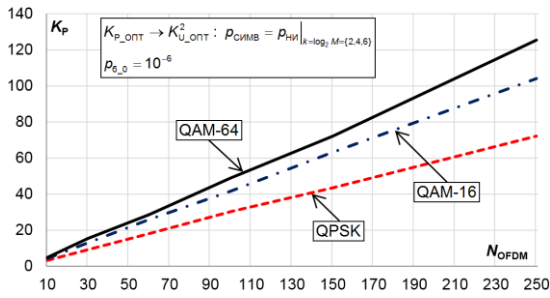


Рис. 6. Оптимальный коэффициент усиления K_{p_opt} поднесущих OFDM сигнала для разных видов манипуляций

На рис. 7 показана зависимость значения энергетического параметра канала $h_{ПРМ}^2$ в точке приема после реализации оптимального коэффициента усиления K_{p_opt} сигнала OFDM с числом поднесущих N_{OFDM} на передающей стороне.

Новым, ранее не описанным результатом, отображенном на рис. 7, является то обстоятельство, что при воздействии оптимального коэффициента усиления K_{p_opt} OFDM-сигнала с достижением условий (1) и (2) энергетический параметр канала h_{OPT}^2 оказывается практически неизменным при изменении числа поднесущих N_{OFDM} для заданного вида манипуляции.

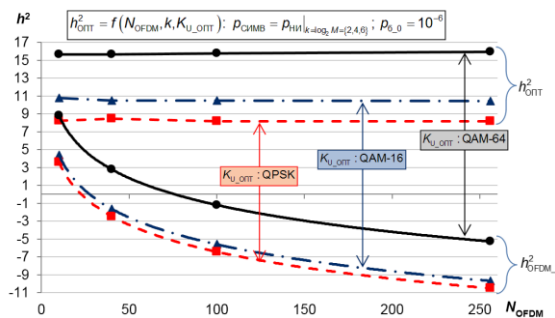


Рис. 7. Зависимость энергетического параметра $h_{OPT}^2 = f(N_{OFDM}, k, K_{u_opt})$:

$\rho_{симв} = \rho_{ни}|_{k=\log_2 M=\{2,4,6\}}$; $\rho_{б_0} = 10^{-6}$
от числа поднесущих N_{OFDM}

Как следствие, на рис. 8 проявляется сходная закономерность в отношении вероятности символьной ошибки $\rho_{симв}$ как числа, не зависящего от числа поднесущих OFDM при применении K_{u_opt} . Аналогичная тенденция наблю-

дается и для вероятности битовой ошибки $\rho_{бит}$ (рис. 9).

Результаты определения K_{u_opt} , показанные на рис. 5, являются продуктом статистического моделирования с объемом выборки $n \sim 10^5$. Знание K_{u_opt} дает возможность произвести расчет соответствующего h_{OPT}^2 , показанного на рис. 7:

$$h_{OFDM}^2 < h_{OPT}^2 = K_{u_opt} \cdot \frac{h_{ПРМ}^2}{N_{OFDM}} < h_{ПРМ}^2 \quad (11)$$

Результаты определения $\rho_{симв}$ и $\rho_{бит}$, показанные на рис. 8 и рис. 9, являются продуктом аналитического расчета ошибки символа $\rho_{симв}$ и ошибки бита $\rho_{бит}$ по каждому значению h^2 [5].

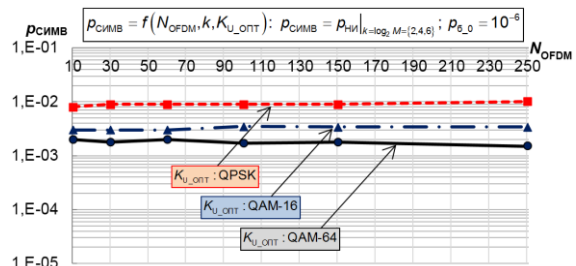


Рис. 8. Зависимости вероятности символьной ошибки

$$\rho_{симв} = f(N_{OFDM}, k, K_{u_opt})$$

$$\rho_{симв} = \rho_{ни}|_{k=\log_2 M=\{2,4,6\}}$$
; $\rho_{б_0} = 10^{-6}$

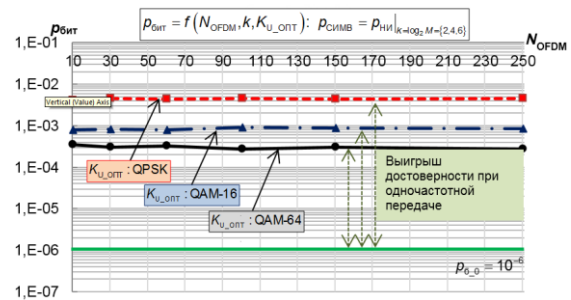


Рис. 9. Зависимости вероятности битовой ошибки

$$\rho_{бит} = f(N_{OFDM}, k, K_{u_opt})$$

$$\rho_{симв} = \rho_{ни}|_{k=\log_2 M=\{2,4,6\}}$$
; $\rho_{б_0} = 10^{-6}$

Выявленный эффект описанной методики формирования групповых OFDM-сигналов позволяет гибко использовать данную технологию как инструмент многостанционного доступа в

таких перспективных системах связи, как LTE [3] и других подобных, когда изменение числа пользователей в системе, диктующее изменение числа поднесущих N_{OFDM} , не ухудшает энергетических параметров группового сигнала и, как следствие, достоверности передаваемых сообщений, хотя и существенно уступает по достоверности режиму одночастотной передачи.

Исследование зависимости оптимального коэффициента усиления OFDM-сигналов от требований к достоверности

На рис. 10 показаны зависимости $K_{\text{U_ОПТ}}$ для манипуляции QAM-64 при разных требованиях к достоверности одночастотной передачи через показатель $\rho_{\text{б}_0}$. Как и следовало ожидать, для обеспечения лучшей достоверности на приемной стороне, необходимо применять больший коэффициент усиления OFDM-сигнала.

Увеличение кратности манипуляции M , как показано выше, также обуславливает рост значения $K_{\text{U_ОПТ}}$.

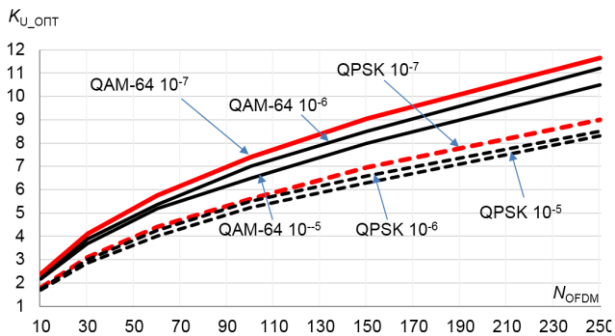


Рис. 10. $K_{\text{U_ОПТ}}$ для манипуляции QAM-64 и QPSK при разных требованиях к достоверности передачи

Анализ зависимости $\frac{K_{\text{P_ОПТ}}}{N_{\text{OFDM}}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$

в виде графиков, представленных на рис. 11, показывает, в частности, что для случая $k = 6$ и $\rho_{\text{б}_0} = 10^{-6}$:

$$\left. \frac{K_{\text{P_ОПТ}}}{N_{\text{OFDM}}} \right|_{\text{MAX}} = f(N, k, \rho_{\text{б}_0}) = f(k, \rho_{\text{б}_0}) = f(6, 10^{-6}) = 0,49 \quad (12)$$

т.е. отношение оптимального коэффициента усиления по мощности $K_{\text{P_ОПТ}}$ к числу подне-

сущих N_{OFDM} OFDM-сигнала является постоянной величиной.

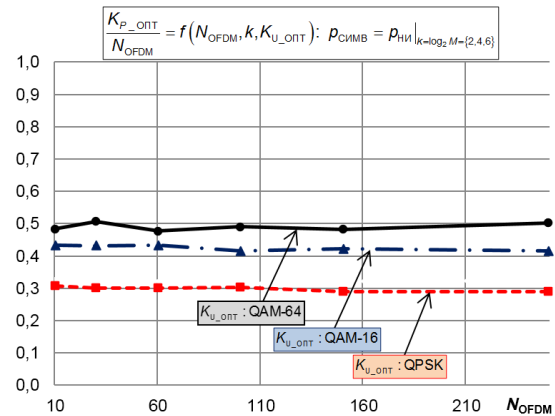


Рис. 11. Относительный показатель оптимального усиления в технологии OFDM как функция числа поднесущих ($K_{\text{P_ОПТ}} / N_{\text{OFDM}}$)

Данные, полученные экспериментально и отображенные в таблице 1, подтверждают эту закономерность уже в зависимости от вида манипуляции и требований к достоверности.

Таблица 1. Зависимость отношения $\frac{K_{\text{P_ОПТ}}}{N_{\text{OFDM}}} = f(N_{\text{OFDM}}, k)$ от требований к достоверности

$K_{\text{P_ОПТ}} / N_{\text{OFDM}}$	$\rho_{\text{б}_0} < 10^{-5}$	$\rho_{\text{б}_0} < 10^{-6}$	$\rho_{\text{б}_0} < 10^{-7}$
QPSK	0,27	0,30	0,32
QAM-16	0,38	0,43	0,47
QAM-64	0,44	0,49	0,54

Важно подчеркнуть, что, хотя режим OFDM существенно уступает по достоверности режиму одночастотной передачи, компенсацию потерянной достоверности из-за разбиения потока информационных символов на поднесущие OFDM-сигнала и на символы многопозиционной манипуляции потенциально можно осуществить на основе применения помехоустойчивых кодов в структуре сигнально-кодовых конструкций с избранным видом манипуляции.

Выводы

1. В работе, на основании результатов имитационного моделирования, доказана эффективность применения оптимального коэффициента усиления $K_{\text{P_ОПТ}}$ для OFDM-сигналов. В этом случае удается добиться независимости энергетических характеристик и достоверности приема группового сигнала, сформированного

по технологии OFDM, от числа поднесущих N_{OFDM} . При этом показано, как именно значение оптимального коэффициента усиления $K_{\text{P_OPT}}$ зависит от числа поднесущих N_{OFDM} .

2. Аналитически условие (1) определения оптимального коэффициента усиления $K_{\text{U_OPT}}$ реализуется на основании решения интегрального уравнения (9), в котором вид плотности распределения $f_{\text{U}}(x)$ определяется соотношением (7) с параметром распределения σ_{U} , описываемым через (5б), при заданных значениях U_0 и $\rho_{\text{СИМВ}}$, а значение $K_{\text{U}} = K_{\text{U_OPT}}$ является искомым.

3. Результаты определения $K_{\text{U_OPT}}$ являются продуктом статистического моделирования. Знание $K_{\text{U_OPT}}$ дает возможность произвести расчет согласно (11) соответствующего значения h_{OPT}^2 , которое, в свою очередь, является основанием для последующего аналитического расчета значений ошибки символа $\rho_{\text{СИМВ}}$ и ошибки бита $\rho_{\text{б}}$ по каждому значению h^2 .

4. Обоснованный эффект описанной методики формирования групповых OFDM-сигналов позволяет гибко использовать данную технологию как инструмент многостанционного доступа в таких перспективных системах связи как LTE [3] и других подобных технологиях. Кроме того, данное свойство характеризует технологию OFDM как потенциально эффективную в каналах с многолучевым распространением, по

скольку изменение числа поднесущих N_{OFDM} без ущерба энергетике принимаемого луча позволяет управлять длительностью одиночного символа в зависимости от реальных условий запаздывания лучей, снижая влияние фактора многолучевости на качество приема.

5. Потери достоверности при использовании технологии OFDM относительно одночастотной передачи можно компенсировать выбором соответствующей сигнально-кодовой конструкции, содержащий помехоустойчивый код с требуемыми параметрами.

Список использованных источников

1. R.W. Chang, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing," U.S Patent 3388455, Jan 6, 1970, Filed Nov.4.1966.
2. Ramjee Prasad, "OFDM for Wireless Communications systems", Artech House Publishers, 2004.
3. Fundamentals of LTE. Arunabha Ghosh; Jun Zhang; Jeffrey G. Andrews; Rias Muhamed. – Prentice Hall, 2010. – 464 p.
4. An Overview: Peak to Average Power Ratio in OFDM system & its Effect; Arun Gangwar, Manushree Bhardwaj, International Journal of Communication and Computer Technologies. Volume 01 – No.2, Issue: 02 September 2012, pp. 22-25.
5. L. Uryvsky, S. Osypchuk, "OFDM signal energy characteristics research in channel with permanent parameters", Telecommunication Sciences, Volume 4, Number 2, 2013, pp. 22-27.

Поступила в редакцию 19 мая 2015 г.

УДК 621.391

Л.О. Уривський, д.-р. техн. наук, ORCID [0000-0002-4073-9681](https://orcid.org/0000-0002-4073-9681)

С.О. Осипчук, ORCID [0000-0002-6174-2986](https://orcid.org/0000-0002-6174-2986)

Інститут телекомунікаційних систем, НТУУ «КПІ», 03057, пров. Індустріальний, 2, м. Київ, Україна

Порівняльний аналіз енергетичних параметрів і достовірності прийому OFDM-сигналів з різним числом піднесучих частот

У роботі на підставі результатів імітаційного моделювання доведена ефективність застосування оптимального коефіцієнта підсилення $K_{\text{P_OPT}}$ для OFDM-сигналів. У цьому випадку вдається досягти незалежності енергетичних характеристик та достовірності прийому групового сигналу, сформованого за технологією OFDM, від числа піднесучих N_{OFDM} . При цьому показано, як саме значення оптимального коефіцієнта посилення $K_{\text{P_OPT}}$ залежить від числа піднесучих N_{OFDM} .

Запропоновано аналітичний вираз для визначення оптимального коефіцієнта посилення $K_{\text{U_OPT}}$, що реалізується на підставі рішення інтегрального рівняння, в якому визначено вигляд

щільності розподілу амплітуд сигналу, що посилюється, та вимоги щодо достовірності обробки сигналів, а значення $K_U = K_{U_OPT}$ є шуканим.

Результати визначення K_{U_OPT} є продуктом статистичного моделювання. Знання K_{U_OPT} дає можливість провести розрахунок відповідного значення енергетичного параметру каналу зв'язку h^2 (відношення сигнал/шум), яке, в свою чергу, є підставою для подальшого аналітичного розрахунку значень помилки символу $p_{СИМВ}$ і помилки біта p_b по кожному значенню h^2 .

Обґрунтований ефект описаної методики формування групових OFDM-сигналів дозволяє гнучко використовувати дану технологію як інструмент багатостанційного доступу в таких перспективних системах зв'язку, як LTE, та інших подібних технологіях. Крім того, дана властивість характеризує технологію OFDM як потенційно ефективну в каналах з багатопроблемним розповсюдженням, оскільки зміна числа під N_{OFDM} без шкоди енергетиці прийнятого променя дозволяє управляти тривалістю одиночного символу залежно від реальних умов запізнювання променів, знижуючи вплив фактора багатопроблемності на якість прийому.

Втрати достовірності при використанні технології OFDM щодо одночастотної передачі можна компенсувати вибором відповідної сигнально-кодової конструкції, що містить перешкодостійкий код з необхідними параметрами. Бібл. 5, рис. 11, табл. 1.

Ключові слова: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); імітаційна модель; число піднесучих частот; ПІК-фактор; оптимальний коефіцієнт підсилення; ймовірність помилки; енергетичний параметр каналу зв'язку.

UDC 621.391

L. Uryvsky, Dr. Sc., ORCID [0000-0002-4073-9681](https://orcid.org/0000-0002-4073-9681)

S. Osypchuk, ORCID [0000-0002-6174-2986](https://orcid.org/0000-0002-6174-2986)

Institute of Telecommunication Systems, National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute", 03057, Industrialny Str., 2, Kyiv, Ukraine

Comparative analysis of energy parameters and OFDM-signal reliability receiving with different OFDM sub-carriers number

The effectiveness of the optimal gain for OFDM-signals is proved based on the simulation results. It's possible to achieve an independence of the energy characteristics and information reliability of group signal generated by technology OFDM from the number of OFDM subcarriers. The paper shows how the value of the optimal gain depends on the OFDM subcarriers number.

The analytical expression for determining the optimum gain K_{U_OPT} is realized on the basis of an integral equation, which defines the form of the density distribution of the amplitudes of the amplified signal, and reliability requirements for signal processing, and the value $K_U = K_{U_OPT}$ is the desired one.

Determination results of K_{U_OPT} are the product of statistical modeling. Knowledge of the K_{U_OPT} value gives you the possibility to calculate the corresponding value of the energy parameter for communication channel (signal to noise ratio) that is the basis for the subsequent analytical calculation symbol and bit error values for each value for signal to noise ratio.

The proposed optimal analytical condition K_{U_OPT} is realized on the basis of the solution of an integral equation in which the form of the density distribution $f_U(x)$ is given by a parameter of the distribution σ_U for given values of U_0 and $p_{СИМВ}$. The value $K_U = K_{U_OPT}$ is the desired one.

Determination result for K_{U_OPT} is the product of statistical modeling. If the value K_{U_OPT} is known, then we have a possibility to calculate the corresponding channel parameter value h_{OPT}^2 , which is the ba-

sis for the subsequent analytical calculation error values $\rho_{\text{СИМБ}}$ and bit error p_6 for each channel parameter value value h^2 .

Justified effect of the described method for forming OFDM-signal allows use this technology as a tool for multiple access communication systems such as promising LTE and other similar technologies. In addition, this property characterizes OFDM technology as potentially effective in a multipath channel, since a change in the number of subcarriers without sacrificing energy received beam allows you to control the duration of a single character, depending on the actual conditions of rays delay, reducing the impact on the quality factor of multipath reception.

Reliability losses when using OFDM technology with respect to single-frequency transmission can be compensated for by the selection of an appropriate signal-code structure that containing anti-noise code with the required parameters to achieve required reliability. Reference 5, figures 11, table 1.

Keywords: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); simulation model; number of subcarriers; crest factor; optimal gain; probability of error; energy parameter of communication channel.

References

1. Chang, R. W. (1970). Orthogonal Frequency Division Multiplexing. U.S Patent 3388455, Jan 6, 1970, Filed Nov.4.1966.
2. Ramjee Prasad. (2004). OFDM for Wireless Communications systems. Artech House Publishers.
3. Arunabha Ghosh; Jun Zhang; Jeffrey G. Andrews. (2010). Fundamentals of LTE.; Rias Muhamed. Prentice Hall, P. 464.
4. (2012). An Overview: Peak to Average Power Ratio in OFDM system & its Effect; Arun Gangwar, Manushree Bhardwaj, International Journal of Communication and Computer Technologies. Volume 01 – No.2, Issue: 02 September Pp. 22-25.
5. Uryvsky, L., Osypchuk, S. (2013). OFDM signal energy characteristics research in channel with permanent parameters. Telecommunication Sciences, Volume 4, Number 2, Pp. 22-27.