

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.4>

УДК: 621.396.1

ВЛИЯНИЕ ОШИБКИ ОЦЕНИВАНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ НА КАЧЕСТВО ПРИЕМА СИГНАЛОВ С OFDM-МОДУЛЯЦИЕЙ

К. В. Семенов, С. С. Старицин, А. Н. Абакумов, И. В. Житков

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

Статья поступила в редакцию 9 октября 2021 г.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности и основные этапы формирования OFDM-сигналов. Представлены аналитические модели сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием во временной и частотной областях при отсутствии и наличии рассогласования по несущей частоте передатчика и приемника. Анализ моделей позволил выявить параметры, оказывающие влияние на частотный и фазовый спектр сигналов. Проведено исследование и получены зависимости качества приема OFDM-сигналов (отношение мощности сигнала к мощности эквивалентных шумов) от нормированной ошибки оценивания несущей частоты.

Ключевые слова: OFDM-модуляция, несущая частота, ортогональные поднесущие, частотное рассогласование, замирания сигналов.

Abstract. The article discusses the features and main stages of the formation of OFDM signals. Analytical models of signals with orthogonal frequency multiplexing in the time and frequency domains are presented in the absence and presence of a mismatch in the carrier frequency of the transmitter and receiver. The analysis of the models allowed us to identify the parameters that affect the frequency and phase spectrum of signals. The study was carried out and the dependences of the reception quality of

OFDM signals (the ratio of signal power to the power of equivalent noise) on the normalized error of the carrier frequency estimation were obtained.

Key words: OFDM-modulation, carrier frequency, orthogonal subcarriers, frequency mismatch, signal fading.

Введение.

Эволюция систем связи характеризуется внедрением различных методов и видов сигналообразования, направленных на разрешение трудностей, возникающих при передаче информации по радиоканалам. Например, они направлены на повышение пропускной способности в условиях ограниченного частотного ресурса, повышение эффективности передачи сигналов в условиях плохой помеховой обстановки и т.д.

OFDM-модуляция (от англ. – orthogonal frequency division multiplexing) представляет собой один из современных полосочувствительных видов модуляции сигналов, которая обеспечивает эффективную передачу информации в условиях замирания сигналов. OFDM-модуляция широко применяется в системах связи и передачи данных, например, в системах беспроводной связи, построенных по стандартам IEEE 802.11, 802.16; системах цифрового наземного телевидения (DVB), а также при организации большинства каналов управления и сброса информации беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров) [1].

Необходимо отметить, что для корректной обработки сигналов с OFDM-модуляцией требуются априорные знания о несущей частоте сигнала, которые позволяют обеспечить точную частотную синхронизацию. В реальных системах связи всегда присутствует частотное рассогласование между приемником и передатчиком. К основным причинам частотного рассогласования можно отнести нестабильность гетеродинов на приемной и передающей стороне, а также эффект Доплера, возникающий в том случае, когда передатчик и приемник движутся относительно друг друга. Статья направлена на исследование влияния ошибки оценивания несущей частоты OFDM-сигналов на качество их обработки.

1. Модель формирования OFDM-сигналов.

Сигналы с OFDM-модуляцией представляют собой сигналы с множеством ортогональных поднесущих частот, каждая из которых модулируется отдельно. На практике наиболее применимы следующие виды модуляции поднесущих: ФМн-2, -4, -8, КАМ-16, -32, -64, -128 [2]. Сигнал с OFDM-модуляцией во временной области представляет собой набор блоков – OFDM-слов. Структура OFDM-слова представлена на рис. 1, где CP – защитный интервал во временной области, предназначенный для защиты от межсимвольной интерференции и представляющий собой копию конца OFDM-слова; T_{CP} , T – длительность CP и OFDM-слова, $T_s = T_{CP} + T$; L_{CP} , L – число отсчетов в CP и OFDM-слове, $L_s = L_{CP} + L$ [3].

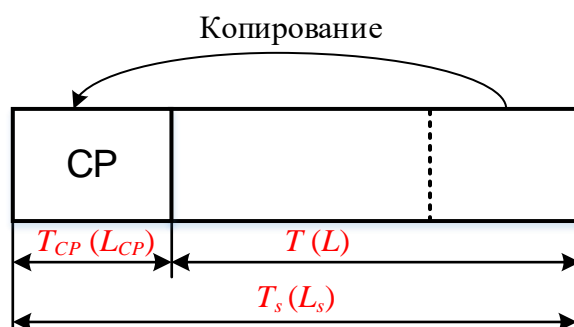
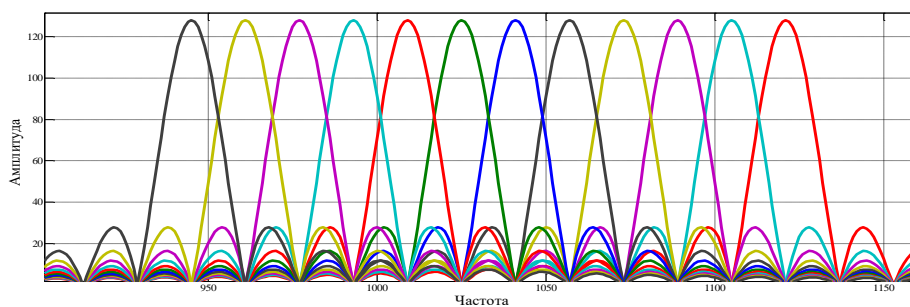
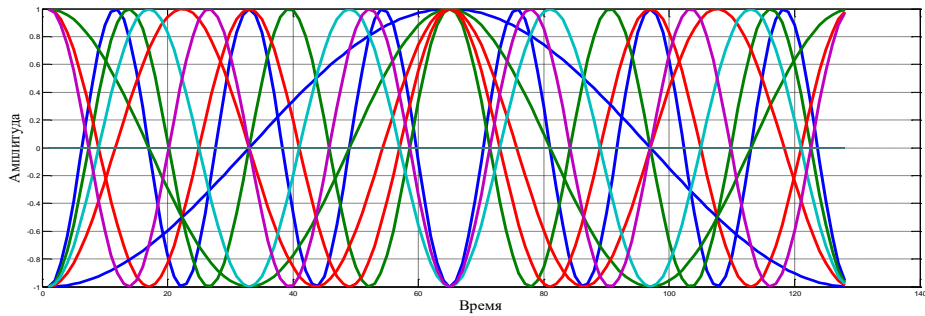


Рис. 1. Структура OFDM-слова.

Одним из условий обеспечения ортогональности поднесущих частот является отсутствие рассогласования по несущей частоте передатчика и приемника. На рис. 2 представлен пример сигналов на 12 ортогональных поднесущих частотах.



a)

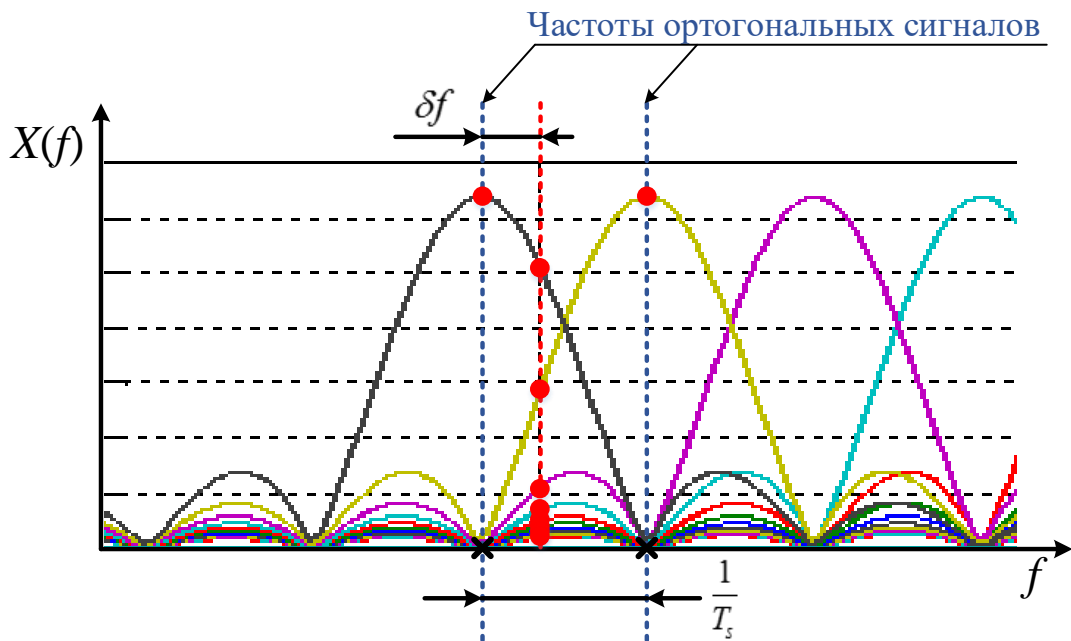


б)

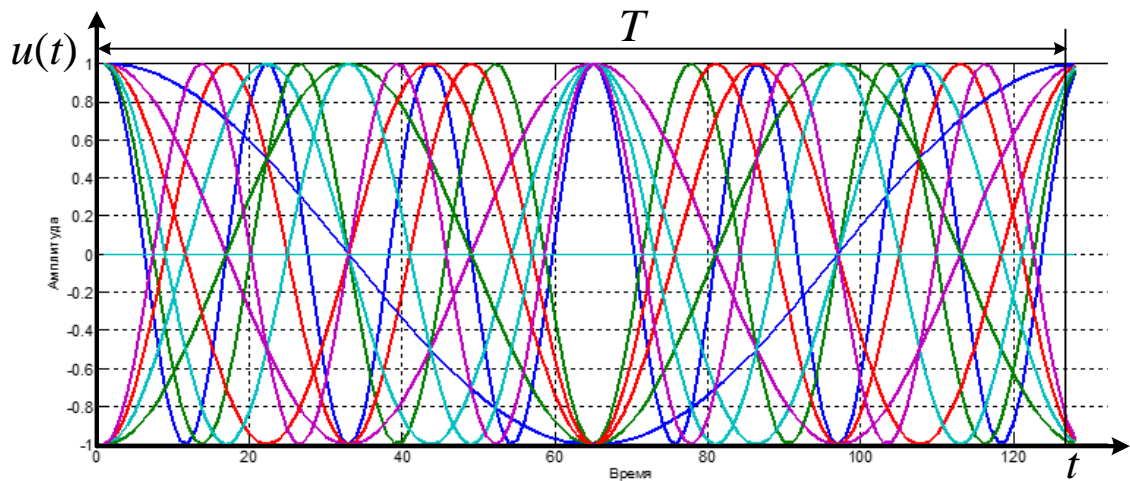
Рис. 2. Пример сигналов на 12 ортогональных поднесущих частотах:
а – в частотной области; б – во временной области.

Из рис. 2, б видно, что сигналы на поднесущих имеют целое число периодов на интервале T .

В том случае, когда рассогласование приемника и передатчика по несущей частоте $\delta f > 0$, ортогональность сигналов на поднесущих не обеспечивается, они осуществляют взаимное влияние и, соответственно, это негативно сказывается на качество обработки сигналов. В качестве примера на рис. 3 представлены сигналы одного OFDM-слова при рассогласовании по несущей частоте на $0,2/T$.



а)



б)

Рис. 3. Пример сигналов на 12 поднесущих частотах в OFDM-слове во временной области при рассогласовании по несущей частоте на $0,2/T$ Гц: а – в частотной области; б – во временной области.

На рис. 4 представлена типовая схема формирователя OFDM-сигналов.

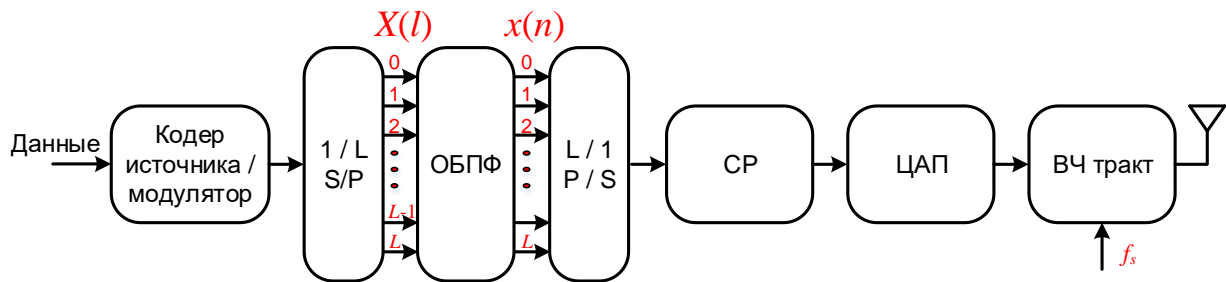


Рис. 4. Схема формирователя сигналов с OFDM-модуляцией.

На первом этапе формирования сигналов с OFDM-модуляцией данные поступают на кодер источника/модулятор, где они преобразуются в комплексный вид. Далее в блоке S/P данные переводятся из последовательного в параллельный вид и поступают в блок вычисления обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Одна из основных особенностей формирователей OFDM-сигналов состоит в наличии этого блока, который обеспечивает формирование ортогональных сигналов на L поднесущих частотах.

После блока ОБПФ данные преобразуются из параллельного вида в последовательный, к ним добавляется защитный интервал во временной области CP (рис. 1) и далее через цифро-аналоговый преобразователь поступают в высокочастотный тракт.

Аналитическая модель z -го OFDM-слова, формируемого на передающей стороне, во временной области без учета СР имеет вид:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=0}^{L-1} d_{l,z} \cdot \exp\left(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n \cdot l}{L}\right), \quad n = 0(1)L-1, \quad (1)$$

где L – число поднесущих частот OFDM-сигнала; $d_{l,z}$ – информационный символ, передаваемый на l -ой поднесущей частоте в z -ом OFDM-слове.

Аналитическая модель z -го OFDM-слова в частотной области может быть представлена следующим образом:

$$X(l) = d_{l,z}. \quad (2)$$

Взаимосвязь моделей в частотной и временной областях описывается обратным IFT (выражение (1)) и прямым FT преобразованием Фурье:

$$X(l) = FT(x(n)) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot \exp\left(-j \cdot 2\pi \cdot \frac{n \cdot l}{L}\right). \quad (3)$$

Таким образом, представлена аналитическая модель OFDM-сигнала, формируемого на передающей стороне, то есть без учета влияния шумов и каналов.

2. Модель OFDM-сигналов при наличии ошибки несущей частоты.

Сигналы с OFDM-модуляцией, описываемые во временной и частотной областях выражениями (1) и (3), при прохождении по каналу связи претерпевают изменения [4]. В рамках статьи рассмотрим канал с аддитивным белым гауссовским шумом. Сигнал во временной области на приемной стороне при условии отсутствия рассогласования по несущей частоте можно представить, как

$$y(n) = h(n) \otimes x(n) + w(n), \quad (4)$$

где $h(n)$ – импульсная характеристика канала связи, $w(n)$ – шумовая составляющая, \otimes – операция свертки.

С учетом (3) OFDM-сигнал в частотной области имеет вид:

$$Y(l) = H(l) \cdot X(l) + W(l) = H(l) \cdot \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot \exp\left(-j \cdot 2\pi \cdot \frac{n \cdot l}{L}\right) + W(l), \quad (5)$$

где $H(l)$ – частотная передаточная функция канала связи, $H(l) = FT(h(n))$; $W(l)$ – спектр шумовой составляющей, $W(l) = FT(w(n))$.

Исследуя сигналы с OFDM-модуляцией при наличии ошибки несущей частоты удобно использовать не абсолютное значение ошибки δf , а нормированное значение $\varepsilon = \delta f \cdot T$.

Модели (4) и (5) могут применяться только в идеализированных случаях, когда ошибка несущей частоты OFDM-сигнала не представляет интереса. В условиях рассогласования по несущей частоте модель OFDM-сигнала на приемной стороне во временной области описывается выражением:

$$y_\varepsilon(n) = h(n) \otimes x(n) \cdot \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{\varepsilon n}{L}\right) + w(n). \quad (6)$$

В таких условиях сигналы на поднесущих оказывают взаимное влияние (рис. 4). Исходя из этого в частотной области модель OFDM-сигнала можно представить как объединение спектров сигналов на всех поднесущих [4,5], а именно:

$$Y_\phi(l) = \sum_{m=0}^{L-1} H(m) \cdot X(m) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot (m-l+\varepsilon))}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (m-l+\varepsilon)}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{j\pi(m-l+\varepsilon)(L-1)}{L}\right) + W(l) =$$

$$H(l) \cdot X(l) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \varepsilon)}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{j\pi\varepsilon(L-1)}{L}\right) +$$

$$+ \sum_{m=0, m \neq l}^{L-1} H(m) \cdot X(m) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot (m-l+\varepsilon))}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (m-l+\varepsilon)}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{j\pi(m-l+\varepsilon)(L-1)}{L}\right) + W(l). \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), а также из рис. 5 смещение по несущей частоте приводит к ослаблению амплитуды сигнала q -ой поднесущей в

$\frac{\sin(\pi \cdot \varepsilon)}{L \cdot \sin(\pi \cdot \varepsilon / L)}$ раз и влиянию этого сигнала на сигналы остальных поднесущих по

следующему закону: $u(m) = \frac{\sin(\pi \cdot (m - q + \varepsilon))}{L \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (m - q + \varepsilon)}{L})}$.

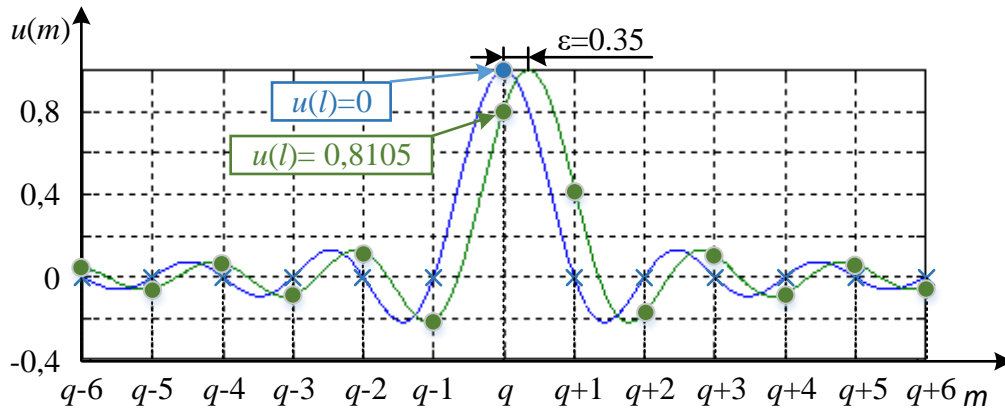


Рис. 5. Влияние сигнала q -ой поднесущей на амплитуды сигналов $q \pm 1, 2, 3, \dots$ поднесущих при $\varepsilon = 0, \varepsilon = 0,35$ и $L = 32$.

Рассогласование по несущей частоте приводит к изменению фазы сигнала q -ой поднесущей на величину $\frac{\pi \varepsilon (L - 1)}{L}$ (рис. 5). Сигнал q -ой поднесущей

изменяет фазу соседних поднесущих по правилу $\Theta(m) = \frac{\pi(m - q + \varepsilon)(L - 1)}{L}$.

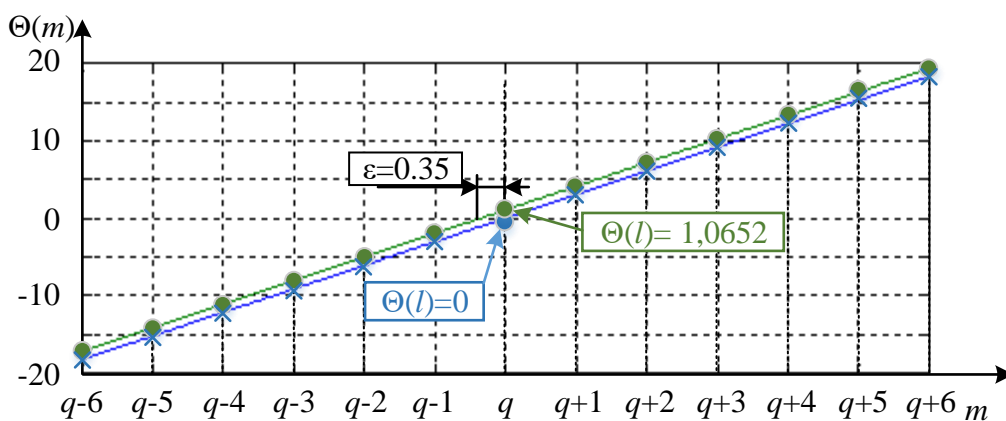


Рис. 6. Влияние сигнала q -ой поднесущей на фазы сигналов $q \pm 1, 2, 3, \dots$ поднесущих при $\varepsilon = 0, \varepsilon = 0,35$ и $L = 32$.

Нормированное значение смещения по частоте можно представить, как сумму слагаемых: целой ε_i и дробной частей ε_f

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_f. \quad (8)$$

Из выражения (7) и рис. 6 видно, что в тех случаях, когда $\varepsilon_f = 0$, ортогональность сигналов на поднесущих обеспечивается, при этом если $\varepsilon_i \neq 0$, то OFDM-сигнал в частотной области претерпевает циклический сдвиг

$$l' = (l + \varepsilon_i) \bmod L,$$

где l' – номер поднесущей при смещении несущей частоты на ε_i [5]. Исходя из этого при исследовании влияния ошибки оценивания несущей частоты на качество приема сигналов с OFDM-модуляцией примем, что $0 \leq \varepsilon \leq 0,5$.

3. Оценивание качества приема сигналов с OFDM-модуляцией при $\varepsilon \neq 0$.

В выражении (7) второе слагаемое можно рассматривать, как совокупное негативное влияние на l -ю поднесущую всех остальных поднесущих. Для оценивания влияния только рассогласования по несущей частоте на качество приема OFDM-сигналов рассмотрим вариант, когда канал связи не оказывает влияние на сигнал, в канале отсутствует шум и мощность сигнала равномерно распределена по всему спектру, то есть $H(l) = 1$, $W(l) = 0$ и $X(l) = 1$, для любых l . Тогда выражение (7) примет вид

$$Y_\phi(l) = \frac{\sin(\pi \cdot \varepsilon)}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{j\pi\varepsilon(L-1)}{L}\right) + \\ + \sum_{m=0, m \neq l}^{L-1} \frac{\sin(\pi \cdot (m-l+\varepsilon))}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (m-l+\varepsilon)}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{j\pi(m-l+\varepsilon)(L-1)}{L}\right).$$

Мощность сигнала на одной поднесущей можно оценить как

$$P_c = \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{\sin(\pi \cdot \varepsilon)}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{L}\right)} \right)^2. \quad (9)$$

Мощность эквивалентного шума (негативного влияния соседних поднесущих) при отсутствии рассогласования равна 0. Когда $\varepsilon \neq 0$ мощность эквивалентного шума равна

$$P_{\text{ш}} = \sum_{m=0, m \neq l}^{L-1} \left(\frac{\sin(\pi \cdot (m-l + \varepsilon))}{L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (m-l + \varepsilon)}{L}\right)} \right)^2. \quad (10)$$

Исходя из выражений (9) и (10) влияние на рассогласования по несущей частоте определяется как

$$\beta = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right).$$

На рис. 7 представлена зависимость влияния рассогласования по несущей частоте на качество обработки сигналов с OFDM-модуляцией.

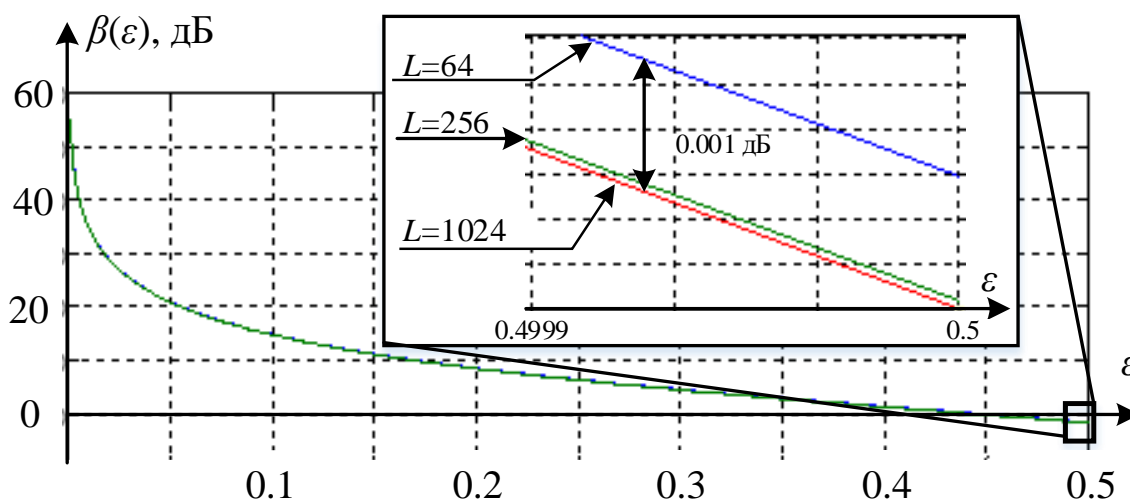


Рис. 7. Влияние рассогласования по несущей частоте при обработке OFDM-сигналов на отношение сигнал\шум.

Как видно из представленных результатов ошибка оценивания несущей частоты OFDM-сигналов оказывает значительное влияние на качество их приема. Например, как видно из рис. 7, при рассогласовании $\varepsilon \approx 0,45$ мощность сигнала соизмерима с мощностью эквивалентных шумов.

Заключение.

Таким образом, в статье представлены аналитические модели при отсутствии и наличии рассогласования по несущей частоте передатчика и приемника, позволяющие оценить зависимость качества приема OFDM-сигналов, а именно отношение мощности сигнала к мощности эквивалентных шумов при ошибке оценивания несущей частоты.

Литература

1. Пукса А.О., Шевченко А.А. Перспективы развития и проблемы OFDM технологии. *World science: problems and innovations: сб. ст. победителей IX Международной науч.-практ. конф.* 2017. С.99-101.
2. Приступа В.В., Зайцев С.В. Исследование характеристик помехозащищенности беспроводных сетей с сигналами OFDM с внутрибитовой псевдослучайной перестройкой поднесущих частот в условиях установки оптимальных помех. *Математические машины и системы.* 2015. №1. С.84-95.
3. Старицин С.С., Абакумов А.Н., Передрий А.В., Павлов А.В. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №6.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.12>
4. Samuel C. Yang. *OFDMA System Analysis and Design.* Norwood, Artech house. 2010. 320 p.
5. Mohseni S., Matin M.A. Investigating the effect of the Carrier Frequency Offset (CFO) and Frequency synchronization on the performance of the OFDM Wireless systems. *International Journal of Computer Science and Network Security.* 2012. V.12 №12. P.85-92.

Для цитирования:

Семенов К.В., Старицин С.С., Абакумов А.Н., Житков И.В. Влияние ошибки оценивания несущей частоты на качество приема сигналов с OFDM-модуляцией. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.4>