

Научная статья

УДК 654.19:621.396.9

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-35-44>

Интерференция между поднесущими частотами в системе DRM

Юрий Алексеевич Ковалгин, kovalgin@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. В России и в мире идет процесс постепенного перехода к цифровому радиовещанию (ЦРВ), обеспечивающему более высокое качество воспроизведения звуковых программ, значительную экономию радиочастотного ресурса, высокую помехозащищенность, существенный энергетический выигрыш по сравнению с аналоговыми системами радиовещания, возможность построения одночастотных сетей. Свойственной системам ЦРВ пороговый эффект требует учета влияния уровня интерференции между поднесущими (ИМП) OFDM-сигнала (OFDM, аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) на изменение помехозащищенности систем ЦРВ в целом. Последнее обусловлено в том числе рассогласованием частот генераторов передающего и приемного трактов систем ЦРВ. Однако в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ-R, ITU-R) и доступных публикациях отсутствуют требования, предъявляемые к стабильности частот генераторов. Работа восполняет данный пробел.

Цель работы. Повышение помехозащищенности системы цифрового радиовещания DRM.

Методы. На основе анализа данных, имеющихся в публикациях, развит метод расчета уровня интерференции между поднесущими частотами в ситуации, когда при приеме OFDM-сигнала нет потери ортогональности поднесущих частот, а в радиоканале присутствует только белый шум (AWGN, аббр. от англ. Additive White Gaussian Noise).

Результаты. Исследовано и оценено влияние нормализованного частотного сдвига генераторов приемного и передающего трактов системы DRM на ухудшение отношения сигнал/шум при модуляции поднесущих частот QPSK для разных уровней помехозащищенности (PL0-PL3). Показано, что величина интерференции между поднесущими частотами OFDM-сигнала зависит от условий приема, вида модуляции, скорости кода, требуемого минимального значения напряженности электромагнитного поля сигнала передатчика и требуемого минимального отношения сигнал/шум в точке приема, от собственных шумов приемника и величины атмосферного шума. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными данными других исследователей.

Новизна. Полученные результаты являются новыми для системы DRM, при работе в режиме устойчивости E в случае стационарного приема и модуляции поднесущих частот QAM-4 прием OFDM-сигнала системы DRM становится невозможным уже при рассогласовании частот генераторов приемного и передающего трактов более чем на (2,07... 2, 32) Гц.

Практическая значимость. Знание уровня интерференции между поднесущими частотами OFDM-сигнала при расстройке частот генераторов передающего и приемного трактов систем ЦРВ необходимо для разработки национальных нормативных документов, регламентирующих эксплуатационные характеристики оборудования систем ЦРВ.

Ключевые слова: цифровое радиовещание, DRM, интерференция между поднесущими частотами OFDM-сигнала

Ссылка для цитирования: Ковалгин Ю.А. Интерференция между поднесущими частотами в системе DRM // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 35–44. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-35-44. EDN:MDQDUX

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-3-35-44>

Interference Between Subcarrier Frequencies in DRM System

 Yuriy A. Kowalgin, kowalgin@sut.ru

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

Annotation

Relevance. In Russia and worldwide, there is a gradual transition to digital radio broadcasting. This transition offers higher quality sound reproduction, significant radio frequency resource savings, high interference resistance, substantial energy savings compared to analog broadcasting systems, and the ability to build single-frequency networks. The cliff effect inherent in DRM-systems necessitates considering the influence of the interference level between subcarriers (ICI, Intercarrier Interference) of the OFDM-signal (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) on the overall interference resistance of DRM-systems. This is partly due to the mismatch of generators in the transmitting and receiving paths of DRM-systems. However, the recommendations of the International Telecommunication Union (ITU-R) and available publications lack requirements for the stability of generators in the transmitting and receiving paths of digital radio broadcasting systems, which significantly affect their interference resistance. This work addresses this gap.

Goal. Improve the interference resistance of the DRM-system.

Methods. Based on the analysis and development of data available in publications, a method for calculating the interference level between subcarrier frequencies is proposed for situations where there is no loss of orthogonality of subcarrier frequencies during OFDM signal reception, and only white noise (AWGN - Additive White Gaussian Noise) is present in the radio channel.

Results. The impact of normalized frequency shift of generators in the DRM-system's transceiver path on the degradation of the signal-to-noise ratio when modulating subcarrier frequencies with QPSK for different levels of interference resistance (PL0-PL3) has been studied and evaluated. It is shown that the interference level between subcarrier frequencies of the OFDM signal depends on reception conditions, modulation type, code rate, required minimum signal strength of the transmitter's electromagnetic field, and the required minimum signal-to-noise ratio at the reception point, receiver's own noise, and atmospheric noise level. The validity of the obtained results is confirmed by experimental data from other researchers.

Novelty. The obtained results are new for the DRM-system. In mode stability under stationary reception and QAM-4 subcarrier frequency modulation, DRM-system OFDM signal reception becomes impossible when the frequency mismatch of the transceiver path generators exceeds (2.07...2.32) Hz.

Practical significance. Knowledge of the ICI level of the OFDM-signal when the frequency of the generators in the transmitting and receiving clocks of DRM-systems is detuned is necessary for developing national regulatory documents that govern the operational characteristics of DRM system equipment.

Keywords: digital broadcasting, DRM, interference between subcarrier frequencies of OFDM-signal

For citation: Kowalgin Yu.A. Interference Between Subcarrier Frequencies in DRM System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(3):35–44. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-3-35-44. EDN:MDQDUX

Введение

Технология OFDM (аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, ортогональное мультиплексирование с частотным разделением) широко используется в телевизионном вещании (DVB, ISDB), радиовещании (DAB, DRM, РАВИС, ИВОС HD

Radio, CDR), мобильной связи (3GPP, Mobile WiMAX). При передаче OFDM-сигнал претерпевает целый ряд изменений, что при определенных условиях приводит к появлению межсимвольной интерференции (МСИ) и к интерференции между поднесущими частотами (ИМП) [1–5].

ИМП при передаче OFDM-сигнала возникает, когда приемник из-за наличия временного рассогласования с передатчиком не точно оценивает начало полезной (информационной) части OFDM-символа при старте прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ); иначе говоря, достоверно не знает, с какого дискретизированного отсчета начинается полезная часть OFDM-символа, а также, если имеет место смещение несущей частоты радиоканала.

При когерентном приеме должны быть синхронизированы также и фазы поднесущих частот OFDM-символов. Когерентный приемник должен «знать» амплитуды и фазы всех поднесущих частот при демодуляции.

До процесса демодуляции поднесущих частот OFDM-приемник должен: найти границы полезной части OFDM-символов; определить наиболее оптимальные моменты для временной синхронизации; оценить и скорректировать сдвиг несущей частоты принятого сигнала; осуществлять непрерывное слежение с целью минимизации текущих значений ИМП при изменении условий приема, характеристик приемопередающего оборудования и радиоканала.

МСИ – результат влияния предыдущего OFDM-символа на текущий. ИМП – результат потери ортогональности или сдвига по частоте в текущем OFDM-символе.

Системы синхронизации в цифровом радиовещании (ЦРВ) решают две задачи: захват и слежение. Захват обеспечивается, как правило, оценкой временного и частотного рассогласования; слежение предполагает наличие непрерывного процесса, в течение которого грубая оценка уточняется и минимизируется для получения требуемого результата. Работа посвящена исследованию и оценке влияния ИМП при передаче OFDM-сигнала системы DRM при сдвиге частот генераторов передающего и приемного трактов на изменение его помехозащищенности в ситуации, когда нет потери ортогональности поднесущих частот.

Основная часть

Напомним, что OFDM-сигнал на передающей стороне после обратного ДПФ до его переноса в полосу частот радиоканала может быть записан в виде [6–8]:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{\frac{j2\pi nk}{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1,$$

$$n = \frac{t}{T},$$

где n – дискретное время; t – текущее непрерывное время; T – интервал (период) дискретизации; N – число точек обратного ДПФ; k – индекс (номер) модулированной поднесущей частоты; $X(k)$ – комплексная огибающая модулированной k -й поднесущей.

Пусть при радиоприеме межсимвольные искажения отсутствуют, то есть точка старта прямого ДПФ выбрана в безопасном временном интервале (рисунок 1), где: CP – аббр. от англ. Cyclic Prefix, защитный интервал; светлая область – полезная (информационная) часть OFDM-символа; темная область – безопасная часть защитного интервала для старта прямого ДПФ. Тогда после выполнения процедуры прямого ДПФ OFDM-сигнал примет вид [6, 7]:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1,$$

где $Y(k)$ – модулированная поднесущая частота с индексом k .

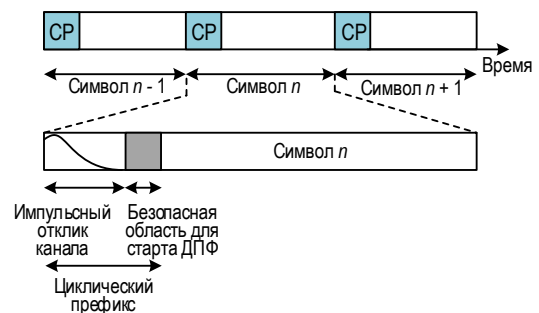


Рис. 1. Расположение окна прямого ДПФ относительно OFDM-символа

Fig. 1. Position of the Direct Discrete Fourier Transform Window with Respect to OFDM-Symbol

Предположим, что имеет место только рассогласование частот генераторов, искажения, обусловленные влиянием радиоканала, отсутствуют, в радиоканале присутствует только белый шум (AWGN, аббр. от англ. Additive White Gaussian Noise). Тогда после выполнения ряда преобразований [6] предшествующее выражение примет вид [7]:

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N_U-1} X(k) \cdot e^{\frac{j2\pi nk\varepsilon}{N}} + \frac{1}{N} \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X(l) \cdot e^{j2\pi n(l-k+\varepsilon)/N} + \sum_{n=0}^{N_U-1} W(n) \cdot e^{-j2\pi nk/N}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta f_1}{\Delta f}.$$

Величина ε (рисунок 2) представляет собой нормализованный сдвиг поднесущей частоты передатчика при приеме, Δf_1 – сдвиг частоты генераторов, Δf – расстояние между поднесущими частотами OFDM-символа, равное $1/T_U$, где T_U – длительность полезной (информационной) части OFDM-символа. Заметим, что при целом значении ε ИМП не возникает, но имеет место сдвиг фазы поднесущих частот, дробное значение ε сопровождается при приеме появлением ИМП.

Первое слагаемое в (1) представляет собой оценку принятой поднесущей частоты с индексом k , амплитуда и фаза которой изменилась вследствие смещения частоты при приеме, и может быть представлено в виде [8–10]:

$$\hat{X}(k) = \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{N \cdot \sin(\pi\varepsilon/N)} X(k). \quad (2)$$

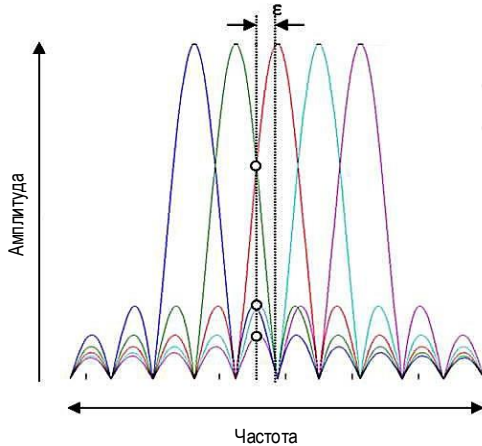


Рис. 2. К появлению ИМП при сдвиге частот генераторов передающего и приемного трактов системы ЦРВ

Fig. 2. On the Appearance of Interference Between Subcarrier Frequencies in Case of a Frequency Shift the DRM-system Transmitting and Receiving Generator Channels

Второе слагаемое в (1) характеризует величину ИМП для частоты с индексом k , обусловленной влиянием остальных поднесущих частот OFDM-символа и определяется как:

$$\hat{I}(k) = e^{j2\pi\varepsilon(N-1)/N} \times \sum_{l=0, l \neq k}^{N_U-1} \frac{\sin(\pi(l-k+\varepsilon))}{N \cdot \sin(\pi(l-k+\varepsilon)/N)} X(l) \times e^{\frac{j\pi(l-k)(N-1)}{N}}, \quad (3)$$

где N_U – число поднесущих частот в OFDM-символе.

Третье слагаемое в (1) – это AWGN. Видно, что в выражении (3) величина ИМП при передаче OFDM-символа зависит от длины выборки N дискретизированного OFDM-сигнала.

В [11] приводится и другое выражение для оценки величины ИМП для поднесущей с индексом k при сдвиге несущей частоты приемника:

$$\hat{X}(k) = \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} X(k)$$

и

$$\hat{I}(k) = \sum_{l=0, l \neq k}^{N_U-1} \frac{\sin(\pi(l-k+\varepsilon))}{\pi(l-k+\varepsilon)} X(k). \quad (4)$$

Для всех поднесущих частот OFDM-символа суммарная величина полезного сигнала и ИМП может быть найдена как:

$$\hat{I}_\Sigma = \sum_{k=0}^{N_U-1} \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} X(k) \quad (5)$$

и

$$\hat{I}_\Sigma = \sum_K \sum_{l=0, l \neq k}^{N_U-1} \frac{\sin(\pi(l-k+\varepsilon))}{N \cdot \sin(\frac{\pi(\varepsilon+l-k)}{N})} X(k).$$

Результаты вычисления величин ИМП по формулам (3) – сплошная кривая, и (4) – пунктирная линия, представленные на рисунке 3, дают практически одинаковые результаты при $N \geq 2k$; здесь и далее величина ИМП дана в дБ.

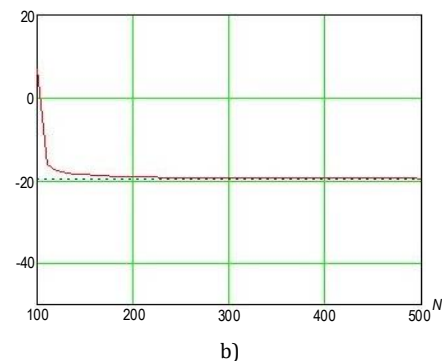
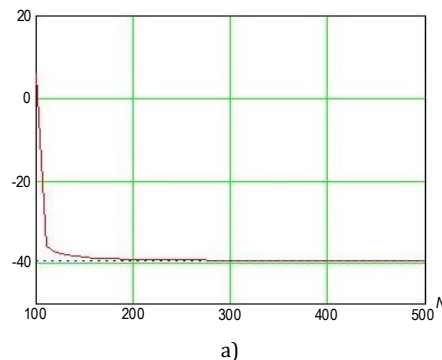


Рис. 3. Оценка уровня ИМП в системе DRM для поднесущей частоты с индексом $k = 106$: а) $\varepsilon = 0,001$; б) $\varepsilon = 0,01$

Fig. 3. Estimation of the Level of Interference Between Subcarrier Frequencies ($k = 106$): а) $\varepsilon = 0,001$; б) $\varepsilon = 0,01$

Для большей наглядности на рисунке 4 приведены результаты вычислений величины ИМП OFDM-сигнала для случая, когда число поднесущих частот равно $N_U = 213$, расстояние между ними по частоте $\Delta f = 444,44$ Гц.

Из рисунка видно, что:

- уровень ИМП для поднесущих, расположенных в центре полосы частот OFDM-сигнала, существенно выше, чем на краях, ибо на них влияют поднесущие с обеих сторон спектра;

- для 213 поднесущих частот, что имеет место в системе DRM при работе в режиме устойчивости E , при числе отсчетов дискретизированного OFDM-сигнала ≥ 426 , различие результатов оценки ИМП по формулам (3) и (4) не превышает 0,1 дБ для поднесущих частот, расположенных в центре полосы частот OFDM-сигнала (рисунок 5).

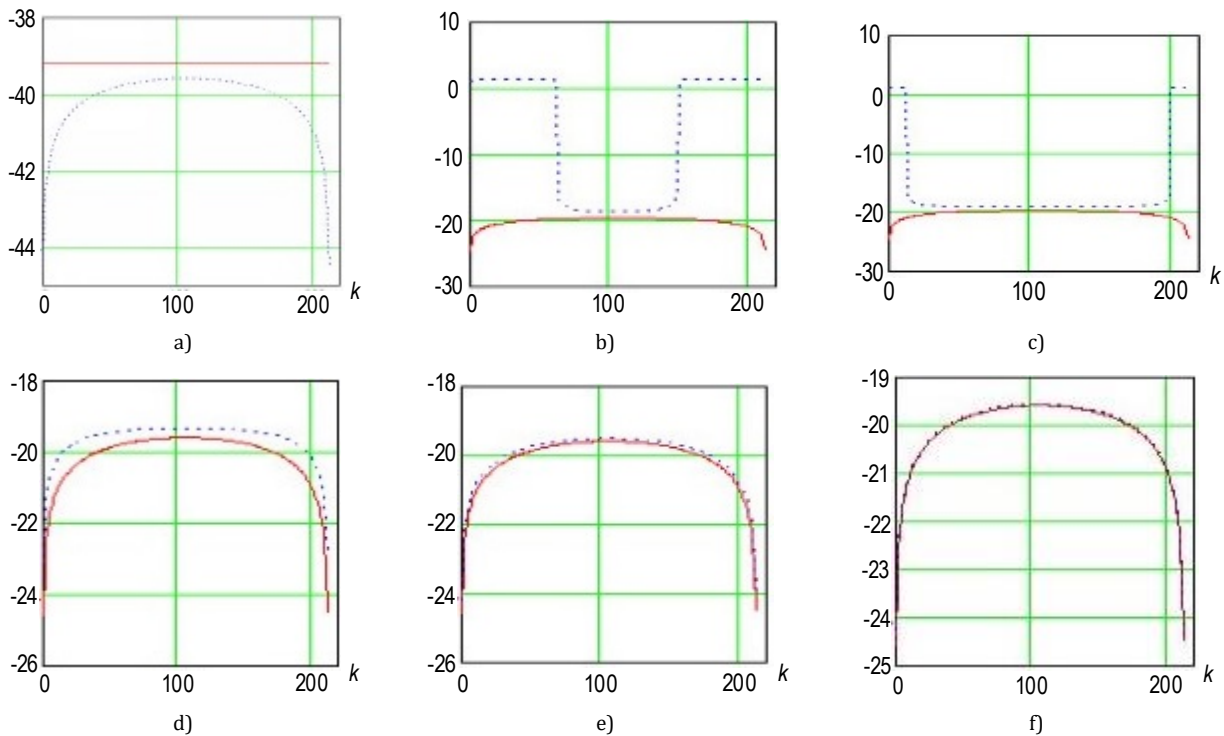


Рис. 4. Результаты вычислений уровня ИМП по выражениям (3) – пунктирные кривые и (4) – сплошные кривые: а) $\epsilon = 0,0001, N = 213$; б) $\epsilon = 0,01, N = 150$; в) $\epsilon = 0,02, N = 200$; д) $\epsilon = 0,01, N = 250$; е) $\epsilon = 0,01, N = 426$; ф) $\epsilon = 0,01, N \geq 750$
 Fig. 4. Calculation of the Level of Interference Between Subcarrier Frequencies, Using Equations (3) – dotted lines and (4) – solid lines: а) $\epsilon = 0,0001, N = 213$; б) $\epsilon = 0,01, N = 150$; в) $\epsilon = 0,02, N = 200$; д) $\epsilon = 0,01, N = 250$; е) $\epsilon = 0,01, N = 426$; ф) $\epsilon = 0,01, N \geq 750$

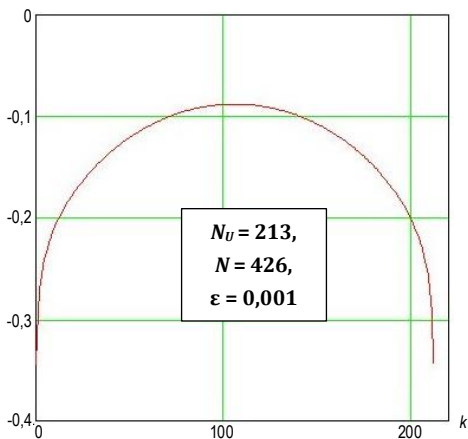


Рис. 5. Различия в результатах вычислений уровня ИМП OFDM-сигнала системы DRM по выражениям (3) и (4)
 Fig. 5. Difference in Calculation Results of the Level of Interference Between Subcarrier Frequencies of OFDM-Signal DRM System, from Equations (3) and (4)

Оценим, используя полученные выражения, влияние частотного сдвига генераторов передающего и приемного трактов на величину ИМП и на изменение помехозащищенности OFDM-сигнала для системы ЦРВ DRM при работе в режиме устойчивости E и модуляции QPSK (аббр. от англ. Quadrature Phase Shift Keying, квадратурная фазовая модуляция). Система DRM в этом режиме работы имеет 213 активных ортогональных поднесущих частот, расстояние

между ними равно 444,44 Гц, полная длительность OFDM-символа – 2,5 мс, длительность его полезной (информационной) части – 2,25 мс, полоса частот радиоканала – 96 кГц. При модуляции QPSK амплитуда поднесущих частот остается неизменной; в расчетах она принята равной $X(k) = 1$. Результаты выполненных вычислений представлены на рис. 6, 7 и 8.

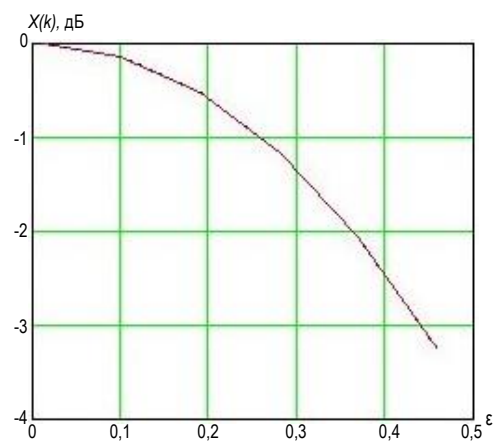


Рис. 6. Изменение амплитуды поднесущих частот от величины нормализованного частотного сдвига ϵ генераторов передающего и приемного трактов для системы DRM (режим устойчивости E)
 Fig. 6. Change of the Amplitude of Subcarrier Frequencies versus Normalized Frequency Shift ϵ of the DRM System Transmitting and Receiving Generator Channels (Stability Regime E)

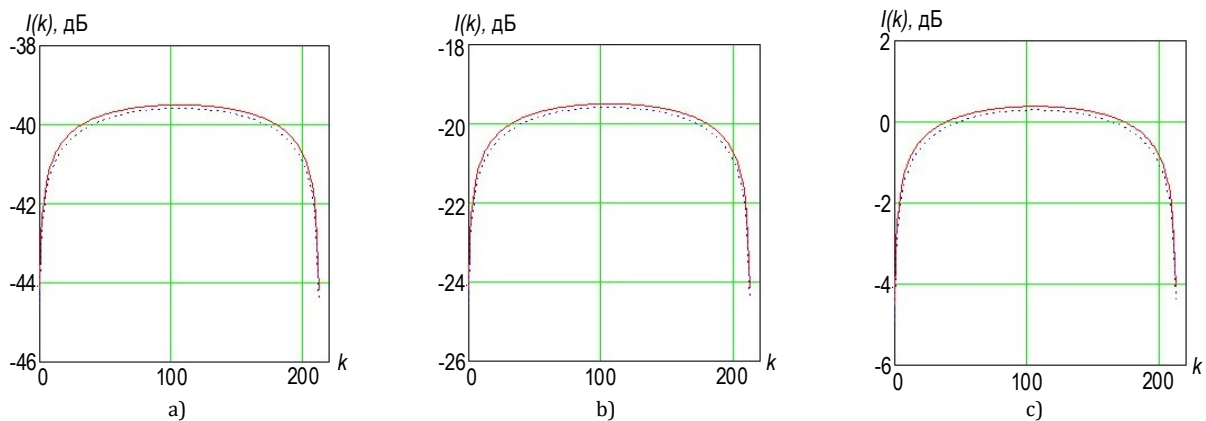


Рис. 7. Уровни ИМП при наличии частотного сдвига генераторов, передающего и приемного трактов для системы DRM при работе в режиме устойчивости E , $X(k) = 1$, модуляция QPSK: а) $\varepsilon = 0,001$; б) $\varepsilon = 0,01$; в) $\varepsilon = 0,1$ (пунктирные кривые – расчет по формуле (3), сплошные линии – расчет по формуле (4))

Fig. 7. Levels of the Interference Between Subcarrier Frequencies in Case of Having a Frequency Shift Between the DRM System Transmitting and Receiving Generator Channels in the Stability Regime E , $X(k) = 1$, QPSK Modulation: а) $\varepsilon = 0,001$; б) $\varepsilon = 0,01$; в) $\varepsilon = 0,1$ (Dotted Lines – Calculations by Equation (3), Solid Lines – Calculations by Equation (4))

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие предварительные выводы.

Во-первых, формулы (3) и (4) дают практически совпадающие результаты уже при $N \geq 2k$. В этом случае различие в оценке величины ИМП для любых значений индексов поднесущих частот k не превышает 0,1 дБ.

Во-вторых, уровень ИМП зависит от величины нормализованного частотного сдвига ε и от индекса поднесущей частоты k : он меньше для крайних поднесущих частот и больше для поднесущих частот, расположенных в центре полосы частот радиоканала. При всех значениях частотного сдвига различие в уровне ИМП для крайних и центральных поднесущих частот OFDM-сигнала составляет $\approx 4,7$ дБ (рисунок 8а).

В-третьих, увеличение нормализованного сдвига по частоте в интервале $\varepsilon = 0,0001 \dots 0,1$ изменяет уровень ИМП для поднесущих частот, расположенных в центре полосы частот OFDM-сигнала, от $-40,5$ до $0,5$ дБ. В-четвертых, величина ИМП для поднесущих, расположенных в центре полосы частот радиоканала, практически не зависит от их числа в OFDM-символе, в то время как суммарное значение ИМП в целом для OFDM-сигнала растет с увеличением числа поднесущих частот. Для системы DRM (режим устойчивости E) при каждом значении сдвига частоты суммарное значение оказывается выше уровня ИМП для поднесущей частоты с индексом $k = 106$ примерно на $20 \cdot \lg 213 = 46,5$ дБ (рисунок 8б).

Величина ИМП зависит от условий приема, вида модуляции, скорости кода, требуемого минимального значения напряженности электромагнитного поля (E_{\min}) сигнала передатчика и требуемого минимального отношения сигнал/шум (SNR_{\min}) в точке приема, от собственных шумов приемника и величины атмосферного шума.

Перечисленные выше источники шума имеют разную природу возникновения и при оценке могут считаться статистически независимыми. Эти параметры влияют на вероятность появления битовой ошибки, величина которой для условий комфортного приема не должна превышать 10^{-4} [13–16]. Напомним, что изменение отношения сигнал/шум от порогового значения на величину $\Delta = 1$ дБ делает прием сигнала системы DRM практически невозможным [13].

Оценим влияние ИМП на прием DRM-сигнала в режиме устойчивости E , используя экспериментальные данные (таблица 1), полученные для условий стационарного приема при модуляции поднесущих частот QAM-4 [17].

ТАБЛИЦА 1. Значения требуемого минимального медианного значения напряженности поля $E_{\text{тр.мин}}$ сигнала передатчика и требуемого минимального значения отношения сигнал/шум $SNR_{\text{тр.мин}}$ для разных значений скорости кода в режиме стационарного приема на штыревую антенну в помещении на расстоянии 12 км от телебашни в Санкт-Петербурге, для системы DRM при работе в режиме устойчивости E (несущая частота DRM-передатчика 95,7 МГц)

TABLE 1. Values of the required minimum median voltage field $E_{\text{тр.мин}}$ of the transmitter signal and the required minimum signal-to-noise ratio $SNR_{\text{тр.мин}}$ for different encoding rates, for stationary receiving on a pin antenna inside a building at a distance of 12 km from the St.-Petersburg's transmitting tower, for a DRM system operating in the stability regime E (main frequency of DRM-transmitter is 95,7 MHz)

Скорость кода	Медианный уровень напряженности поля сигнала передатчика, дБ (мкВ/м)	Требуемое минимальное значение SNR, дБ
0,250 (PL0)	16,997	2,27
0,333 (PL1)	17,437	2,71
0,400 (PL2)	17,657	2,93
0,500 (PL3)	18,817	4,09

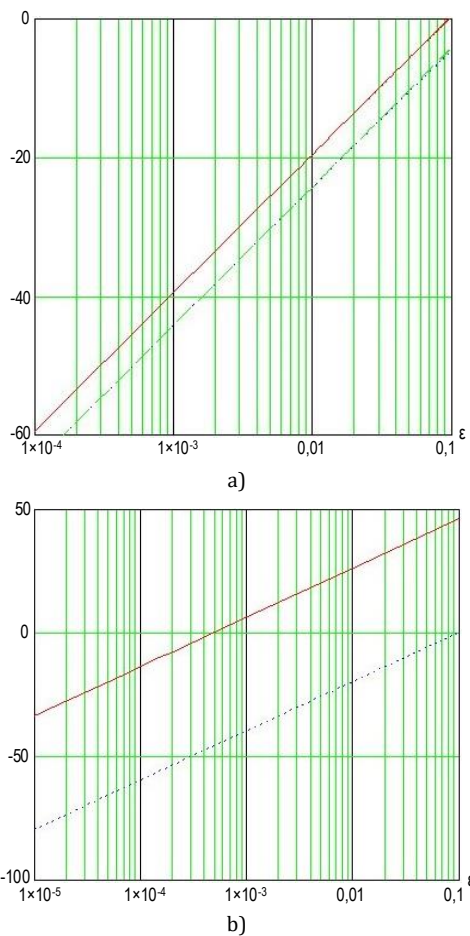


Рис. 8. Уровни ИМП от величины нормализованного частотного сдвига ϵ генераторов передающего и приемного трактов: а) верхняя кривая для поднесущей частоты с индексом $k = 106$, нижние две (совпавшие) кривые для крайних поднесущих частот с индексами $k = 0$ и $k = 212$, соответственно, $X(k) = 1$, модуляции QPSK, $N = 426$; б) нижняя кривая получена для поднесущей частоты с индексом $k = 106$, верхняя кривая – суммарные значения ИМП для всех поднесущих частот OFDM-сигнала, $X(k) = 1$, модуляция QPSK

Fig. 8. Levels of the Interference Between Subcarrier Frequencies versus Normalized Frequency Shift ϵ of the Transmitting and Receiving Generator Channels: a) Upper Curve Corresponds to Subcarrier Frequency Index $k = 106$, Lower Two Curves are for Boundary Subcarrier Frequencies with Indices $k = 0$ and $k = 212$, Respectively; $X(k) = 1$, QPSK Modulation, $N = 426$; b) Lower Curve is Obtained for Subcarrier Frequency Index $k = 106$, Upper Curve – Summarized Values of ICI for all Subcarrier Frequencies of OFDM-Signal, $X(k) = 1$, QPSK modulation

Предположим, что в точке приема медианные уровни напряженности поля сигнала передатчика и требуемые минимальные значения отношения сигнал/шум соответствуют значениям, приведенным в таблице. При появлении частотного сдвига генераторов приемопередающего тракта возникла ИМП, ее уровень можно определить с помощью выражения:

$$U_{\text{ИМП}} = 20 \lg \sqrt{\left(\frac{E_{\text{тр.мин}}}{10^{(SNR_{\text{тр.мин}} - \Delta)/20}}\right)^2 - \left(\frac{E_{\text{тр.мин}}}{10^{SNR_{\text{тр.мин}}/20}}\right)^2}, \quad (6)$$

где $U_{\text{ИМП}}$ – величина ИМП при наличии частотного сдвига генераторов приемопередающего тракта;

$E_{\text{тр.мин}}$ и $SNR_{\text{тр.мин}}$ – требуемые для выбранного условия приема, вида модуляции и скорости кода минимальные значения напряженности электромагнитного поля сигнала передатчика и отношения сигнал/шум в точке приема; Δ – изменение (ухудшение) отношения сигнал/шум из-за появления ИМП в OFDM-сигнале при приеме.

Рассчитанные по формуле (6) с использованием данных таблицы 1 уровни ИМП позволяют, используя выражение (5), определить допустимую величину нормализованного частотного сдвига поднесущих частот. Результаты данных вычислений представлены на рисунке 9а.

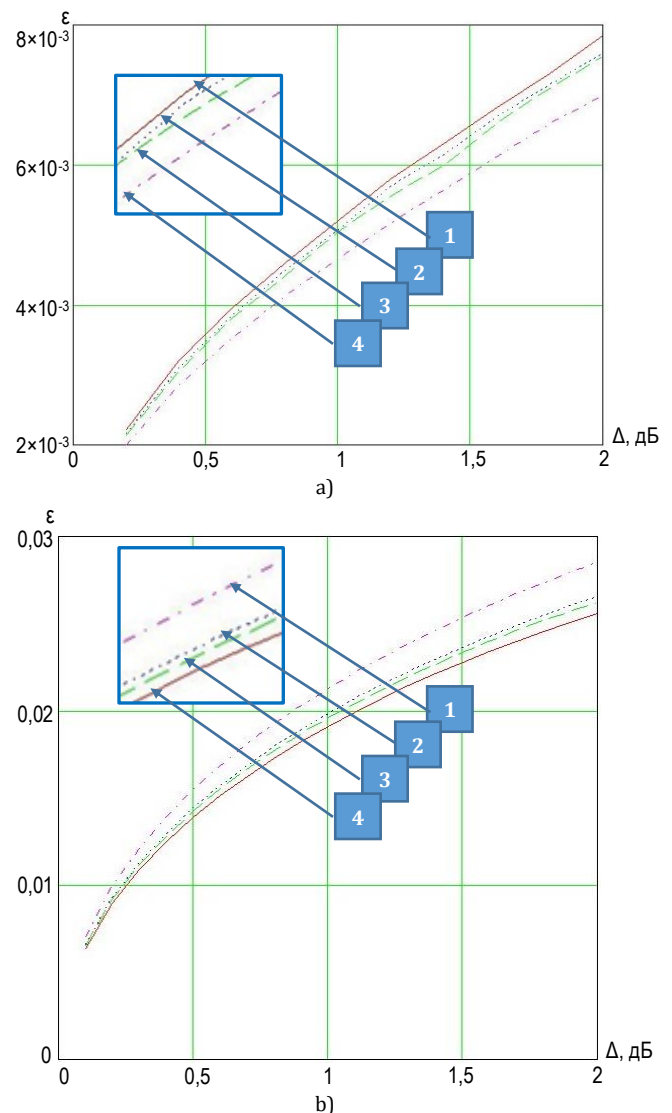


Рис. 9. Изменение нормализованного частотного сдвига ϵ генераторов приемопередающего тракта системы DRM (режим устойчивости E, модуляция поднесущих частот QAM-4) от изменения SNR, вызванного появлением ИМП

Fig. 9. Change of the Normalized Frequency Shift ϵ of the Transmitting and Receiving Generator Channel of a DRM System (Stability Regime E, QAM-4 Modulation) Versus SNR Change Due to Appearance of the Interference Between Carrying Frequencies

Здесь кривая 1 – $E_{\text{тр.мин}} = 16,997$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,27$ дБ; кривая 2 – $E_{\text{тр.мин}} = 17,437$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,71$ дБ; кривая 3 – $E_{\text{тр.мин}} = 17,657$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,93$ дБ; кривая 4 – $E_{\text{тр.мин}} = 18,817$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 4,09$ дБ (расчет по формуле 3).

Для системы DRM при работе в режиме устойчивости E и модуляции QAM-4 величина порога, при котором прием становится невозможным, составляет $\Delta = 1$ дБ [13]. Для данного значения величина нормализованного частотного сдвига (рисунок 9а) не должна превышать: $\varepsilon = 0,00521$ ($\Delta f_1 = 2,32$ Гц) – кривая 1; $\varepsilon = 0,00508$ ($\Delta f_1 = 2,26$ Гц) – кривая 2; $\varepsilon = 0,00505$ ($\Delta f_1 = 2,24$ Гц) – кривая 3; $\varepsilon = 0,00466$ ($\Delta f_1 = 2,07$ Гц) – кривая 4.

Заметим, что в публикации [7] приводится другое выражение для оценки уровня ИМП при OFDM-передаче (7) и (8), где $u^2_{\text{имп}=0}$ – мощность шума при отсутствии сдвига несущей частоты; $u^2_{\text{имп}\neq 0}$ – мощность сигнала ИМП при наличии частотного сдвига несущей частоты при приеме.

Результаты оценки уровня ИМП по формулам (7) и (8) приведены на рисунке 9б. Здесь кривая 1 – $E_{\text{тр.мин}} = 18,817$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 4,09$; кривая 2 – $E_{\text{тр.мин}} = 16,657$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,93$ дБ; кривая 3 – $E_{\text{тр.мин}} = 17,437$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,71$ дБ; кривая 4 – $E_{\text{тр.мин}} = 16,997$ дБ (мкВ/м), $\text{SNR} = 2,27$ дБ (расчет по формуле 8). По данным публикации [7], для системы DRM при работе в режиме устойчивости E и модуляции QAM-4 величина нормализованного частотного сдвига (см. рисунок 9б) при $\Delta = 1$ дБ не

должна превышать следующих значений: $\varepsilon < 0,019$ ($\Delta f_1 < 8,44$ Гц) – кривая 1; $\varepsilon < 0,02$ ($\Delta f_1 < 8,89$ Гц) – кривая 2; $\varepsilon < 0,02$ ($\Delta f_1 < 8,89$ Гц) – кривая 3; $\varepsilon < 0,021$ ($\Delta f_1 < 9,3$ Гц) – кривая 4.

Сравнение полученных результатов показало, что расчет по формулам, предложенным в данной работе, дает существенно более жесткие требования к рассогласованию частот генераторов приемопередающего тракта для системы DRM (режим устойчивости E , модуляция QAM-4, условие стационарного приема F_x , $\Delta = 1$ дБ): (2,07... 2,32 Гц) $\ll \ll$ (8,44 ... 9,3 Гц). Заметим, что расчет по формулам (7) и (8) не учитывает такие факторы как: условие приема и требуемые для уверенного приема минимальные значения напряженности электромагнитного поля сигнала передатчика, а также SNR и с этой точки зрения является более приближенным.

В качестве дополнения на рисунке 10 приведены результаты вычислений допустимого частотного сдвига ε , приведенные в [11]. Смещение частоты при приеме приводит к ухудшению отношения сигнал/шум и, как следствие, разрушает сигнальное созвездие.

Видно, что при модуляции QPSK (QAM-4) прием цифрового сигнала становится невозможным уже при $\varepsilon = 0,5\%$, что дает для системы DRM значение $\Delta f_1 = 2,22$ Гц, которое хорошо согласуется с полученными в работе данными (2,07... 2,32) Гц и подтверждает их достоверность.

$$\varepsilon < \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma_{\text{имп}=0}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\Delta\gamma}\right)}, \quad (7)$$

$$\gamma_{\text{имп}=0} = u^2_{\text{имп}=0} \left(10^{[E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}/20)]}\right)^2, \quad \Delta\gamma = u^2_{\text{имп}\neq 0} = \left(\frac{10^{E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}/20)}}{10^{E_{\text{тр.мин}}/[E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}-\Delta)/20]}}\right)^2$$

или

$$\varepsilon < \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{10^{E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}/20)}}\right)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{10^{E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}/20)}}{10^{E_{\text{тр.мин}}/[E_{\text{тр.мин}}/(SNR_{\text{тр.мин}}-\Delta)/20]}}\right)^2\right)}. \quad (8)$$

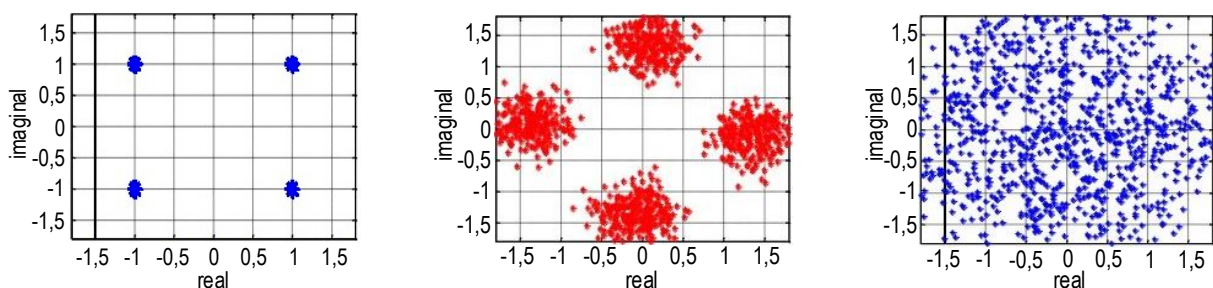


Рис. 10. Влияние нормализованного сдвига частоты на вид сигнальных созвездий при модуляции поднесущих частот QPSK: а) $\varepsilon = 0\%$ ($\Delta f_1 = 0$ Гц); б) $\varepsilon = 0,3\%$ ($\Delta f_1 = 1,33$ Гц); в) $\varepsilon = 0,5\%$ ($\Delta f_1 = 2,22$ Гц)

Fig. 10. Influence of the Normalized Frequency Shift on Signal-Map Distribution on QPSK Modulation:
 a) $\varepsilon = 0\%$ ($\Delta f_i = 0$ Hz); b) $\varepsilon = 0,3\%$ ($\Delta f_i = 1,33$ Hz); c) $\varepsilon = 0,5\%$ ($\Delta f_i = 2,22$ Hz)

Заключение

1) Сдвиг частот генераторов передающего и приемного трактов системы DRM приводит к появлению ИМП. Ее величина зависит от множества факторов: от числа поднесущих частот в OFDM-символе, вида модуляции, скорости кода, условий приема, уровня атмосферного шума, собственных шумов приемопередающего тракта.

2) Для системы DRM при работе в режиме устойчивости E в случае стационарного приема F_x и модуляции поднесущих частот QAM-4 прием OFDM-

сигнала становится невозможным уже при рассогласовании частот генераторов приемопередающего трактов более, чем на (2,07... 2,32) Гц.

3) Полученные результаты наглядно подтверждают необходимость жесткой частотной синхронизации приемопередающего оборудования системы ЦРВ DRM, что может быть реализовано программным путем.

Список источников

1. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 352 с. EDN:YPURRV
2. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab. Singapore: John Wiley & Sons, 2010. 544 p.
3. Fazel K., Kaiser S. Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. John Wiley & Sons, 2008. 384 p.
4. Kung T.L. Synchronization and Coding in Wireless Communications Systems. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota. 2013. p. 156.
5. Younis S.B.T. Synchronization Algorithms and Architectures for Wireless OFDM Systems. PhD Thesis. Newcastle University, 2012. 197 p. URL: <http://hdl.handle.net/10443/1417> (Accessed 20.04.2024)
6. Батырев А.И. Оценка влияния сдвига несущей частоты на качество принимаемого сигнала // Омский научный вестник. 2015. № 3(143). С. 259–262. EDN:VCNUSF
7. Speth M., Fechtel S.A., Fock G., Meyr H. Optimum Receiver Design for Wireless Broad-Band Systems Using OFDM. Part I // IEEE Transactions on Communications. 1999. Vol. 47. Iss. 11. PP. 1668–1677. DOI:10.1109/26.803501
8. Morelli M., Kuo C.C.J., Pun M.O. Synchronization Techniques for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): A Tutorial Review // Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95. Iss. 7. PP. 1394–1427. DOI:10.1109/JPROC.2007.897979
9. Sun Z., Peng T., Wan W. A novel sampling synchronization scheme for OFDM-based system with unified reference clock // Journal on Wireless Communications and Networking. 2012. Vol. 2012. P. 368. DOI:10.1186/1687-1499-2012-368
10. Zhao Y., Häggman S.-G. Inter-carrier Interference Self-Cancellation Scheme for OFDM Mobile Communication Systems // IEEE Transactions on Communications. 2001. Vol. 49. Iss. 7. PP. 1185–1191. DOI:10.1109/26.935159
11. Raboh M.S.A., Al Bassiouni A.A.M., Zakaria H.M., El Bahy M.M. Performance Analysis of OFDM Systems Subjected to Carrier Frequency Offset in Fading Communication Channels // International Journal of Engineering Research & Technology. 2015. Vol. 4. Iss. 7. URL: <https://www.ijert.org/research/performance-analysis-of-ofdm-systems-subjected-to-carrier-frequency-offset-in-fading-communication-channels-IJERTV4IS070404.pdf> (Accessed 20.04.2024)
12. Жерносеков Р.А., Першин В.Т. Синхронизация системы мультиплексирования с ортогональным разделением частот // Доклады БГУИР. 2017. № 4(106). С. 5–11. EDN:ZDINJL
13. Ковалгин Ю.А. Цифровое радиовещание: системы и технологии. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 580 с.
14. ETSI ES 201 980 v4.1.2 (2017-04). Digital Radio Mondiale (DRM); System.
15. Specification // ETSI. 196 p. URL: <http://www.etsi.org/standards-search> (Accessed 20.04.2024)
16. Рекомендация ITU-R BS.1660-8 (10/2015). Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ.
17. Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+') concerning the use in VHF bands I, II and III V 3.0. 2011. URL: https://drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/drmplus-hdradio/Planning-parameters-for-DRMplus-V30.pdf
18. Ковалгин Ю.А. Частотное планирование сетей цифрового радиовещания. СПб.: СПбГУТ, 2021. 194 с. (Accessed 20.04.2024)

References

1. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. *OFDM Technology*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2016. 352 p. (in Russ.) EDN:YPURRV
2. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. *MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab*. Singapore: John Wiley & Sons; 2010. 544 p.
3. Fazel K., Kaiser S. *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. John Wiley & Sons; 2008. 384 p.
4. Kung T.L. *Synchronization and Coding in Wireless Communications Systems*. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota. 2013. p. 156.

5. Younis S.B.T. *Synchronization Algorithms and Architectures for Wireless OFDM Systems*. PhD Thesis. Newcastle University; 2012. 197 p. URL: <http://hdl.handle.net/10443/1417> [Accessed 20.04.2024]
6. Batyrev A.I. The influence of carrier frequency offset on quality of received OFDM signal. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;3(143):259–262. (in Russ.) EDN:VCNUSF
7. Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H. Optimum Receiver Design for Wireless Broad-Band Systems Using OFDM. Part I. *IEEE Transactions on Communications*. 1999;47(11):1668–1677. DOI:10.1109/26.803501
8. Morelli M., Kuo C.C.J., Pun M.O. Synchronization Techniques for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): A Tutorial Review. *Proceedings of the IEEE*. 2007;95(7):1394–1427. DOI:10.1109/JPROC.2007.897979
9. Sun Z., Peng T., Wan W. A novel sampling synchronization scheme for OFDM-based system with unified reference clock. *Journal on Wireless Communications and Networking*. 2012;2012:368. DOI:10.1186/1687-1499-2012-368
10. Zhao Y., Häggman S.-G. Inter-carrier Interference Self-Cancellation Scheme for OFDM Mobile Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*. 2001;49(7):1185–1191. DOI:10.1109/26.935159
11. Raboh M.S.A., Al Bassiouni A.A.M., Zakaria H.M., El Bahy M.M. Performance Analysis of OFDM Systems Subjected to Carrier Frequency Offset in Fading Communication Channels. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015;4(7). URL: <https://www.ijert.org/research/performance-analysis-of-ofdm-systems-subjected-to-carrier-frequency-offset-in-fading-communication-channels-IJERTV4IS070404.pdf> [Accessed 20.04.2024]
12. Zhernosekov R.A., Pershin V.T. The synchronization of the orthogonal frequency division multiplexing system. *Doklady BGUIR*. 2017;4(106):5–11. (in Russ.) EDN:ZDINJL
13. Kovalgin Y.A. *Digital broadcasting: systems and technologies*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2021, 580 p. (in Russ.)
14. ETSI ES 201 980 v.4.1.2. *Digital Radio Mondiale (DRM); System*. April 2017.
15. ETSI. Specification. 196 p. URL: <http://www.etsi.org/standards-search> [Accessed 20.04.2024]
16. Rec. ITU-R BS.1660-8. *Technical basis for on-ground digital audio broadcasting planning in the UHF range*. October 2015.
17. *Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+') concerning the use in VHF bands I, II and III V 3.0*. 2011. URL: https://drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/drmplus-hdradio/Planning-parameters-for-DRMplus-V30.pdf [Accessed 20.04.2024]
18. Kovalgin Y.A. *Frequency planning of digital broadcasting networks*. St.-Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 194 p. (in Russ.)


Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 25.05.2024; принята к публикации 09.06.2024.

The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 25.05.2024; accepted for publication 09.06.2024.

Информация об авторе:

**КОВАЛГИН
Юрий Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-6753-8062>

Ковалгин Ю.А. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов автор не заявлял.

Kovalgin Yu.A. has been a member of the editorial board of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The author has not declared any other conflicts of interest.