

УДК 621.376.9

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-71-77

Исследование влияния рассогласования квадратурных составляющих на помехоустойчивость сигналов OFDM и UFMC

А. Ю. Белоусов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Метод непосредственной модуляции с использованием комплексных сигналов применяется при реализации сигнальных трактов передатчиков в базовых станциях систем сотовой связи. В процессе модуляции возникают рассогласования коэффициента усиления и фазы квадратурных составляющих сигнала. Рассогласование ухудшает модуль вектора ошибки (Error Vector Magnitude, EVM) в приемнике, что, в свою очередь, приводит к повышению частоты появления ошибочных битов (Bit Error Rate, BER). Качество принимаемого сигнала выражается в частоте появления битовых ошибок. Рассогласование амплитуды и фазы квадратурных составляющих является одним из важнейших факторов, вносящих наибольший вклад в амплитуду вектора ошибки, который необходимо исследовать.

В статье приведено исследование влияния рассогласования квадратурных составляющих сигналов технологий OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) и UFMC (universal filtered multi-carrier). Разработана модель передатчика, канала связи и приемника для сигналов OFDM и UFMC. Модель построена в программной среде MatLab при помощи языка MatLab и представляет собой программную модель m-script.

В ходе работы путем исследования имитационной модели изучена зависимость помехоустойчивости технологий путем изменения параметров канала связи, таких как амплитудное и фазовое рассогласование квадратурных составляющих сигнала, а также отношение сигнал/шум. Проведен сравнительный анализ таких параметров сигналов, как занимаемая полоса частот, пик-фактор, частота появления битов с ошибкой. По результатам исследования получены графики зависимости вероятности ошибки и пик-фактора сигнала от рассогласования квадратурных составляющих для двух технологий – OFDM и UFMC. Проведенное исследование позволяет выделить преимущества технологии UFMC, которые выражаются в спектральной эффективности, помехоустойчивости и уровне пик-фактора сигнала.

Ключевые слова: OFDM, UFMC, модуляция и демодуляция сигнала, квадратурный дисбаланс, помехоустойчивость.

Введение
Технология OFDM в настоящее время используется во многих стандартах беспроводной связи, а также цифрового телевидения. В то же время технология имеет ряд недостатков, таких как высокий пик-фактор сигнала [1] и межсимвольная интерференция [2]. Технология UFMC предложена в качестве замены OFDM. UFMC-технология позволяет отказаться от циклического префикса и благодаря этому увеличить спектральную эффективность сети мобильной связи по сравнению с технологией OFDM [3, 4]. Кроме того, благодаря фильтрации технология UFMC позволяет снизить уровень внеполосных излучений.

Целью исследования является оценка зависимости помехоустойчивости сигналов двух технологий от рассогласования квадратурных

составляющих и сравнение полученных результатов.

На рис. 1, а, б представлена структурная схема передатчика и приемника OFDM-сигналов [5].

Формирование сигнала происходит следующим образом. При помощи блока s/p (serial to parallel) происходит преобразование последовательности бит из последовательного в параллельный вид. Затем каждый поток бит модулируется различной схемой модуляции, например, QPSK или QAM [6]. Добавляем защитный интервал слева и справа последовательности бит, при этом защитный интервал равен последовательности нулей, которая занимает обычно 1/4, 1/8, 1/16 или 1/32 часть символа OFDM, после чего происходит выполнение ОБПФ. При сумме синфазной и квадратурной составляющих сигнала получаем сигнал для передачи по каналу связи.

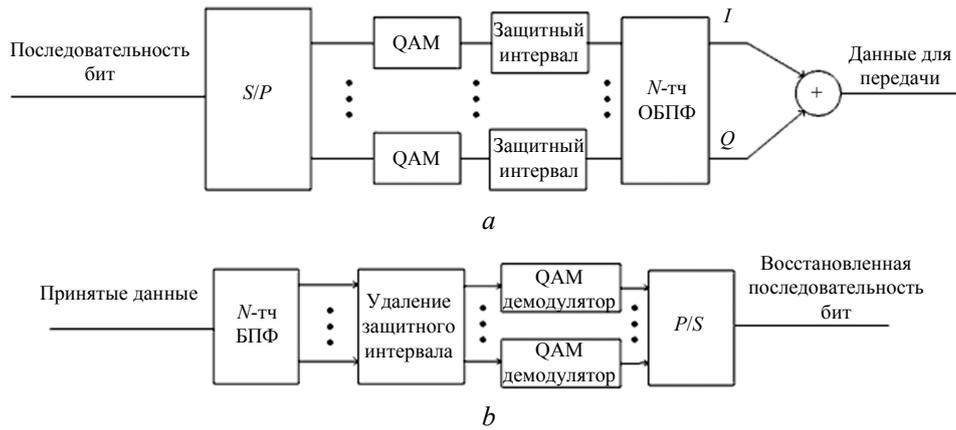


Рис. 1. Передатчик (а) и приемник (b) OFDM-сигналов

Fig. 1. Transmitter (a) and receiver (b) of OFDM signals

На приемной стороне выполняется БПФ и удаление защитного интервала. Затем каждый поток демодулируется соответствующей схемой. При помощи блока p/s (parallel to serial) происходит преобразование параллельного потока в последовательный и восстановление исходной последовательности информационных бит.

Второй рассмотренный метод модуляции – это многочастотная передача с универсальной фильтрацией UFMC.

UFMC представляет собой обобщение OFDM и многочастотной передачи с гребенчатой

фильтрацией FBMC (Filter Bank Multi-carrier). Если при FBMC происходит фильтрация отдельных поднесущих, то в UFMC происходит фильтрация поддиапазонов объединенных поднесущих [7, 8].

Эта группировка поднесущих позволяет уменьшать порядок фильтра (по сравнению с FBMC) [9, 10]. Кроме того, при UFMC также возможно применение таких схем модуляции, как QAM [11].

На рисунке 2, а, b представлен передатчик и приемник UFMC-сигналов [12].

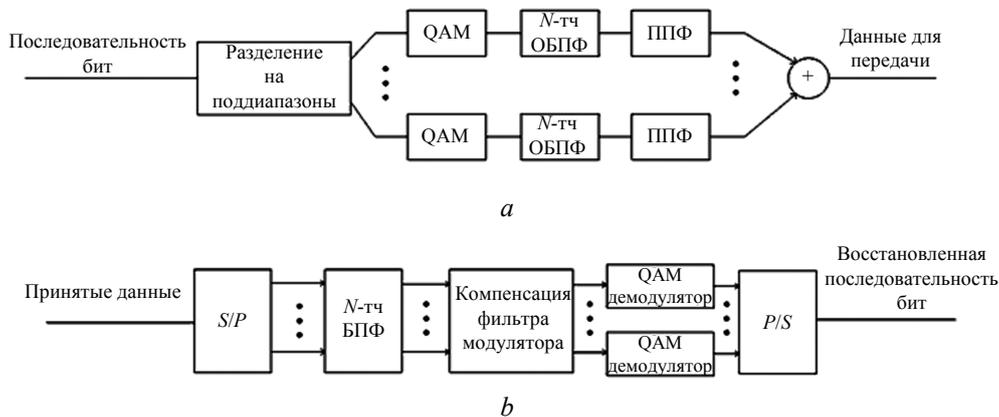


Рис. 2. Передатчик (а) и приемник (b) UFMC-сигналов

Fig. 2. Transmitter (a) and receiver (b) of UFMC signals

Сначала полоса поднесущих разделяется на поддиапазоны. Происходит модуляция каждого поддиапазона соответствующей схемой модуляции. После выполняется N-точечное ОБПФ. Затем каждый поддиапазон фильтруется соответствующим полосно-пропускающим фильтром определенного порядка. Обычно используется фильтр с окном Дольфа – Чебышева; при-

мер представлен на рисунке 3. Тип, порядок фильтра и полоса пропускания напрямую влияют на фильтр компенсации на стороне приемника, где использован фильтр с обратной импульсной характеристикой. Результаты фильтрации суммируются для получения сигнала для передачи через канал связи.

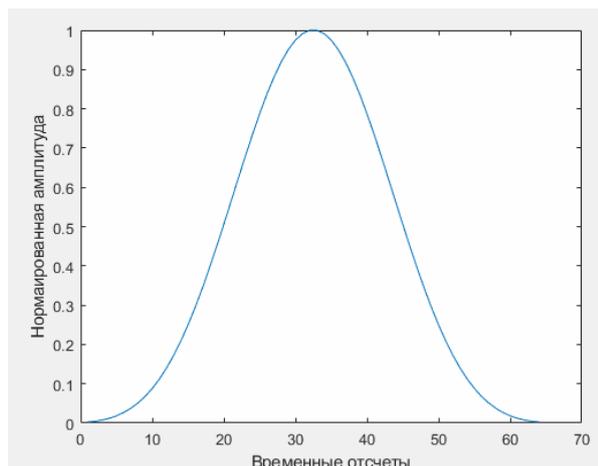


Рис. 3. Импульсная характеристика фильтра

Fig. 3. Impulse response of the filter

При приеме сигнала UFMC выполняется N -точечное БПФ. Затем выполняется компенсация влияния канала связи и фильтра поддиапазона. В этом примере присутствует только компенсация фильтра поддиапазона. Для компенсации используется фильтр с обратной импульсной характеристикой фильтра поддиапазона, при этом учитывается защитный интервал. Импульсная характеристика фильтра компенсации с учетом защитного интервала представлена на рисунке 4. После каждый поддиапазон демодулируется соответствующей схемой. Затем поток параллельных данных преобразуется в последовательный, и восстанавливается исходная битовая последовательность [13].

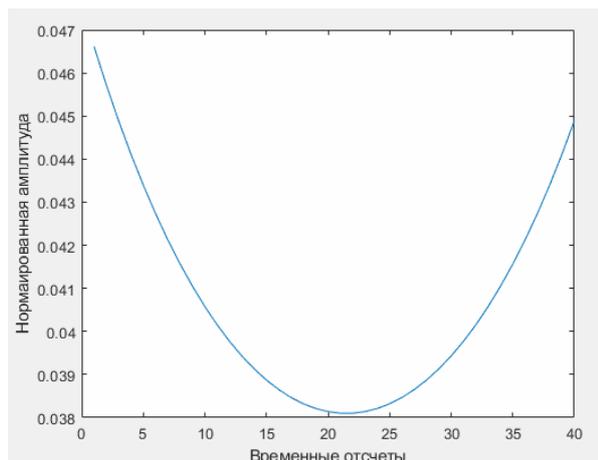


Рис. 4. Импульсная характеристика фильтра компенсации с учетом защитного интервала

Fig. 4. Impulse response of the compensation filter taking into account the guard interval

На основе теоретических данных построена математическая модель в программе MatLab

[14, 15]. Модель соответствует схемам приемника и передатчика сигналов OFDM и UFMC, представленным на рисунках 1 и 2.

Параметры моделирования:

- количество точек БПФ, N – 2048;
- количество поддиапазонов UFMC – 10;
- количество поднесущих в поддиапазоне UFMC – 40;
- порядок фильтра – 64;
- ослабление в полосе задержания фильтра – 80 дБ;
- вид модуляции – 16-QAM;
- отношение сигнал/шум – 20 дБ.

На рисунке 5 представлен спектр совмещенных десяти поддиапазонов сформированного сигнала UFMC. При сложении поддиапазонов получаем общий спектр UFMC-сигнала, который представлен на рисунке 6.

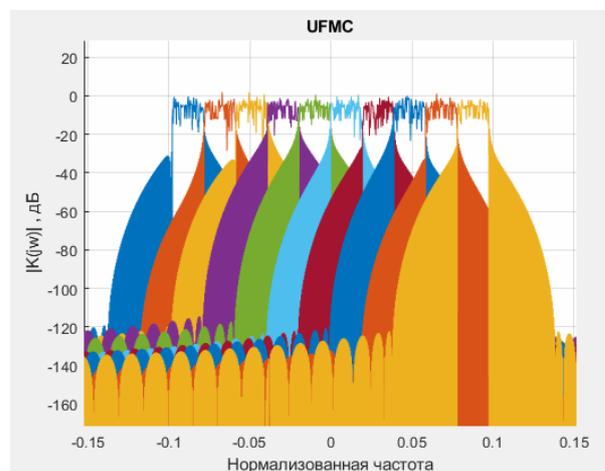


Рис. 5. Спектр поддиапазонов UFMC-сигнала

Fig. 5. Spectrum of UFMC signal subbands

По результатам моделирования из рисунков 6 и 7 видно, что полоса UFMC-сигнала уже, а ослабление внеполосных излучений больше, чем у OFDM-сигнала, что подтверждает теоретические данные. Графики построены по нормализованной частоте по отношению к частоте Найквиста.

На рисунке 8 представлен результат исследования помехоустойчивости при рассогласовании квадратурных составляющих. Исследование проводилось при различных значениях отношения сигнал/шум при фиксированных значениях рассогласования для сигналов OFDM и UFMC.

На рисунках 9 и 10 представлен результат исследования зависимости пик-фактора сигнала от параметров рассогласования квадратурных составляющих, где dA – рассогласование амплитуды, дБ; dP – рассогласование фазы в градусах.

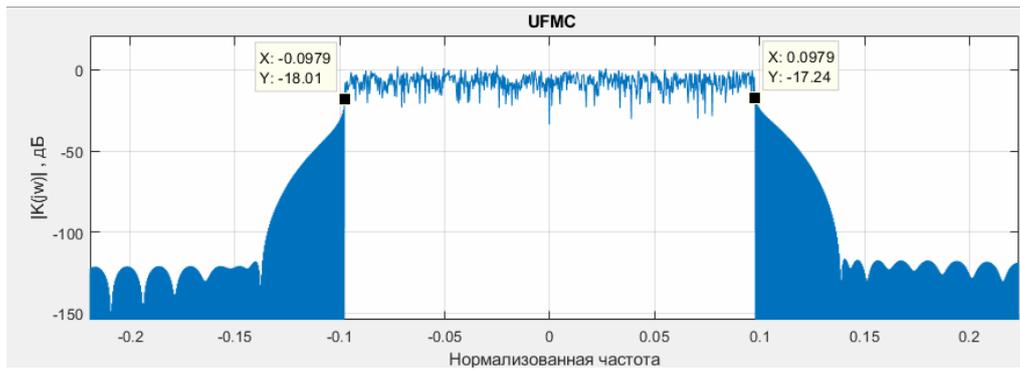


Рис. 6. Спектр UFMC-сигнала

Fig. 6. Spectrum of UFMC signal

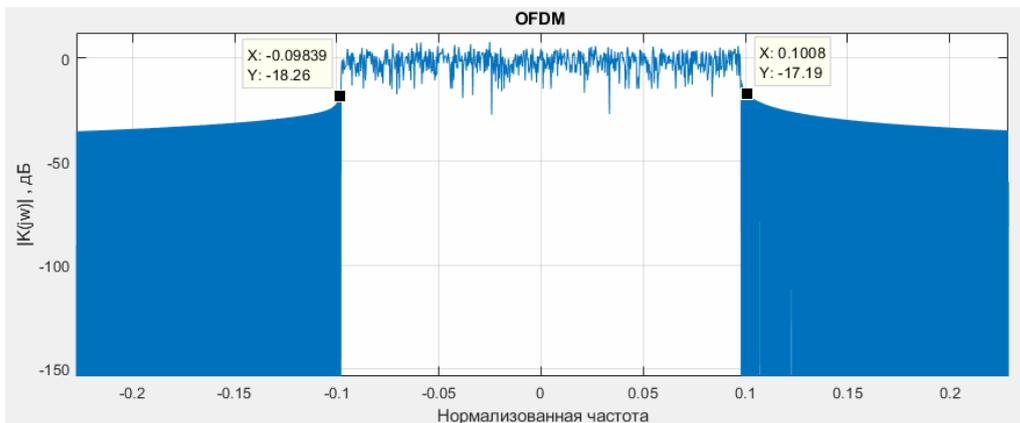


Рис. 7. Спектр OFDM-сигнала

Fig. 7. Spectrum of the OFDM signal

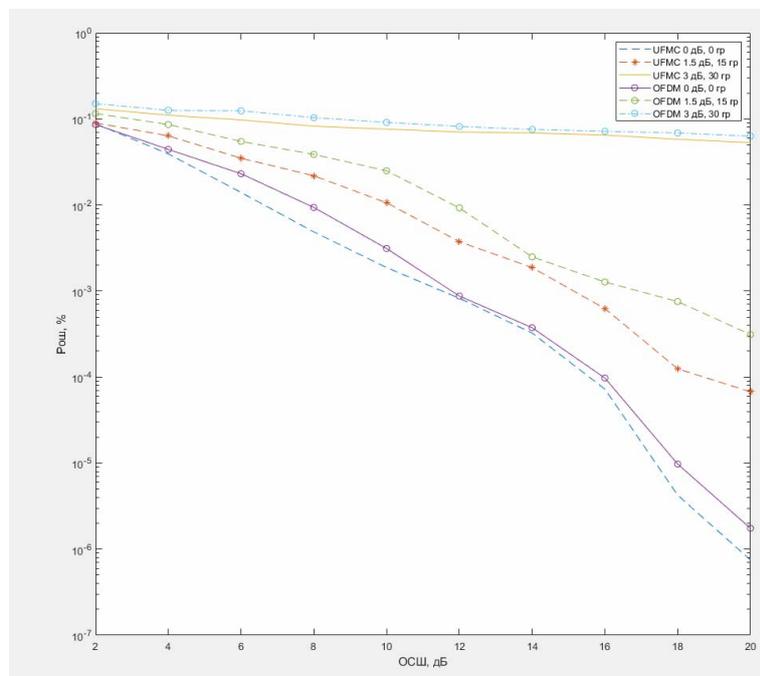


Рис. 8. График зависимости вероятности ошибки приема бита от ОСШ при фиксированном дисбалансе квадратурных составляющих сигнала

Fig. 8. Graph of the dependence of the probability of a bit reception error on SNR with a fixed imbalance of the signal quadrature components

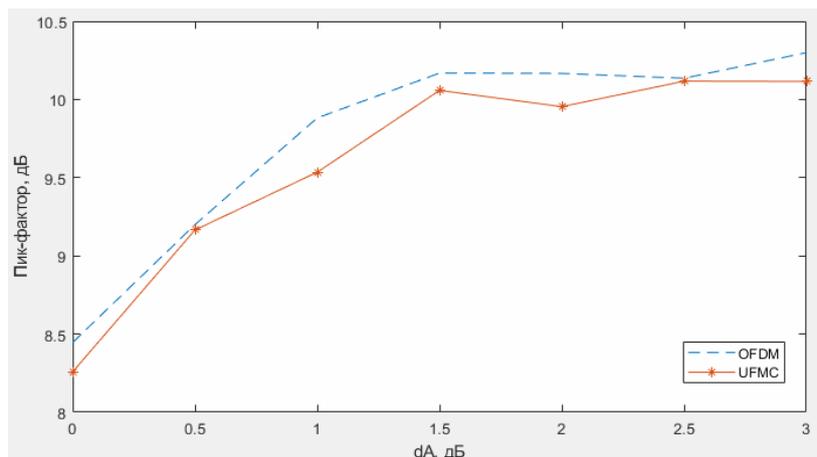


Рис. 9. График зависимости пик-фактора сигнала от рассогласования амплитуды

Fig. 9. Graph of the dependence of the peak to average ratio on the amplitude mismatch

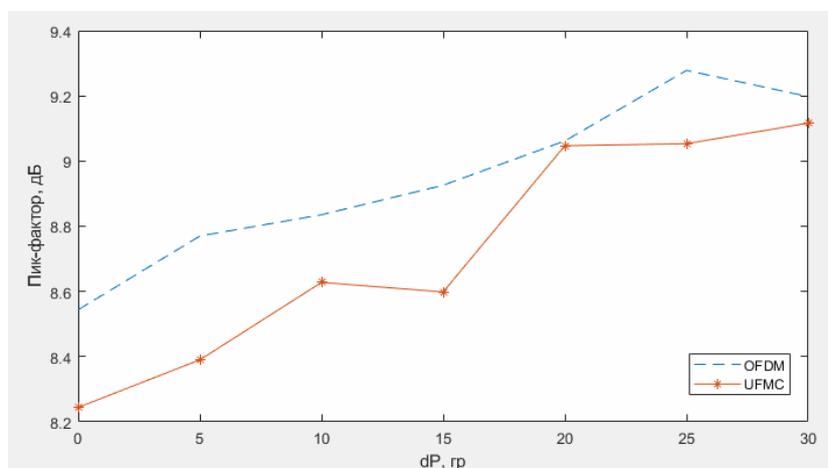


Рис. 10. График зависимости пик-фактора сигнала от рассогласования фазы

Fig. 10. Graph of the dependence of the peak to average ratio of the signal on the phase mismatch

Изменение параметров в диапазонах dA ($[0; 3]$, дБ) и dP ($[0; 30]$, град) обусловлено тем, что при увеличении рассогласования максимальная вероятность ошибки достигает 0,5, и дальнейшее исследование повышения рассогласования квадратурных составляющих не имеет смысла.

Результаты исследования и выводы

В соответствии с поставленной целью исследована помехоустойчивость сигналов OFDM и UFMC в зависимости от рассогласования квадратурных составляющих сигнала и проведен сравнительный анализ. Результаты исследования подтвердили, что метод UFMC является спектрально более эффективным по сравнению с OFDM за счет фильтрации поддиапазонов.

Фильтрация поддиапазонов в методе UFMC позволяет отказаться от циклического префикса, необходимого в OFDM-методе для предотвращения межсимвольной интерференции, что, в свою

очередь, сокращает количество блоков в процессе формирования сигнала.

Результат исследования показывает, что UFMC-сигнал имеет меньший пик-фактор по сравнению с OFDM-сигналом в среднем на 2,4 %; также можно выделить ряд следующих особенностей:

1) при внесении дисбаланса квадратурных составляющих происходит увеличение вероятности ошибки принятого бита и пик-фактора сигнала;

2) амплитудный дисбаланс больше влияет на увеличение пик-фактора сигнала;

3) фазовый дисбаланс имеет большее влияние на вероятность ошибки;

4) метод UFMC показывает лучшую помехоустойчивость по сравнению с OFDM-методом.

При использовании технологии UFMC выигрыш в отношении сигнал/шум при порядке ошибки 10^{-4} составляет 0,9 дБ, а при порядке

ошибки 10^{-6} – 1,2 дБ относительно технологии OFDM.

Полученные результаты исследования можно распространить для других значений количества поддиапазонов и поднесущих.

Библиографические ссылки

1. Антипин В. В., Зиновьев Н. В. Пик-фактор OFDM-сигнала при классической и неортогональной передаче // Сборник трудов конференции «Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук». 2018. С 18–21. ISBN 978-5-6041153-5-0.

2. Поборчая Н. Е. Комбинирование линейных и нелинейных алгоритмов оценивания искажений сигнала OFDM в тракте приемника прямого преобразования // Электросвязь. 2020. № 6. С. 28–33. DOI: 10.34832/ELSV.2020.7.6.005.

3. Вороженищев И. В., Бочечка Г. С. Исследование устойчивости технологии многочастотной передачи с универсальной фильтрацией UFMC к частотным сдвигам в канале // Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 6. С. 25–28. eISSN 2072-8743.

4. Вороженищев И. В., Бочечка Г. С., Тихвинский В. О. Сравнительный анализ использования технологий UFMC и OFDM в сетях 5G // Электросвязь. 2017. № 11. С. 18–23. ISSN 0013-5771.

5. Никшикин П. Б., Витязев В. В. Методы широкополосной передачи данных на основе сигналов с частотным разделением каналов // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 3. С. 45–49. ISSN 1684-2634.

6. Гапанович О. Ю. Перспективные технологии многостанционного доступа // Теория и практика современной науки. 2018. № 9. С. 75–81. eISSN 2412-9682.

7. Гришин И. В., Феденева Н. С. Перспективы использования технологии UFMC в сетях 5G/IMT-2020 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5, № 4. С. 17–24. eISSN 2307-1303.

8. Behadili A. S. G., Alshebaney E. A., Ataby A. L. K. Prospects of using the UFMC technology in 5g/imt-2020 networks. Indonesian J. of Electrical Engineering and Computer Science, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 855-860. DOI: 10.11591/ijeecs.v15.i2.pp855-860.

9. Xiaojie Wang, Thorsten Wild, Frank Schaich, Andre Fonseca Dos Santos. Universal filtered multicarrier with leakage-based filter optimization. European Wireless, At Barcelona, Spain, 2014, pp. 14-21.

10. Jamoos A. L., Hussein M. Estimation of UFMC time-varying fading channel using adaptive filters. Proc. international conference on promising electronic technologies, ICPET 2018, pp. 43-48. DOI: 10.1109/ICPET.2018.00014.

11. Аверина Л. И., Каменцев О. К. Сравнительный анализ спектрально эффективных сигналов с частотным мультиплексированием // Сборник трудов конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2018. Т. 1, № 4. С. 312–319. ISBN 978-5-9500319-4-6.

12. Jagan Naveen V., Murali Krishna K., Raja Rajeswari K. BER estimation in UFMC system for wireless communications. J. of advanced research in dynamical and control systems, 2018, vol. 10, no. 12, pp. 294-299. eISSN 1943-023X.

13. Гришин И. В., Калинин А. А. Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8, № 2. С. 55–66. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66.

14. Глазков Р. В. Применение перспективных методов модуляции в современных системах мобильной связи // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2016). СПб.: СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича, 2016. С. 135–140. ISBN 978-5-89160-143-7.

15. Овчинников В. И., Логвинов В. В. Многостанционный доступ в сетях системы 5G // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6, № 2. С. 69–75.

References

1. Antipin V.V., Zinoviev N.V. [Peak to average ratio of an OFDM signal in classical and non-orthogonal transmission]. Proc. of the conference Fundamental and applied developments in the field of technical and physical and mathematical sciences. 2018, pp. 18-21 (in Russ.). ISBN: 978-5-6041153-5-0.

2. Poborchaya N.E. [Combination of linear and nonlinear algorithms for estimating distortions of the OFDM signal in the direct conversion receiver path] *Elektrosvyaz*. 2020, no. 6, pp. 28-33 (in Russ.). DOI: 10.34832/ELSV.2020.7.6.005.

3. Vorozhenishchev I.V., Bochechka G.S. [Investigation of the stability of multifrequency transmission technology with universal filtering UFMC to frequency shifts in the channel] *Telecommunications and transport*. 2017, vol 11, no 6, pp. 25-28 (in Russ.). eISSN: 2072-8743.

4. Vorozhishchev I.V., Bochechka G.S., Tikhvinsky V.O. [Comparative analysis of the use of UFMC and OFDM technologies in 5G networks]. *Elektrosvyaz*. 2017, pp. 46-51 (in Russ.). ISSN: 0013-5771.

5. Nikishkin P.B., Vityazev V.V. [Methods of broadband data transmission based on signals with frequency division of channels]. *Digital signal processing. Founders: Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after V.I. A.S. Popova (Moscow)*. 2020, no. 3, pp. 45-49 (in Russ.). ISSN: 1684-2634.

6. Gapanovich O. Yu. [Perspective technologies of multi-station access]. *Theory and practice of modern science*. 2018, no 9, pp. 75-81 (in Russ.). eISSN: 2412-9682.

7. Grishin I.V., Fedeneva N.S. [Prospects for using UFMC technology in 5G / IMT-2020 networks]. *Information technologies and telecommunications*. 2017, vol. 5, no. 4, pp. 17-24 (in Russ.). eISSN: 2307-1303.

8. Behadili A.S.G., Alshebaney E.A., Attaby A.L.K. [Prospects of using the UFMC technology in 5g/imt-2020 networks]. *Indonesian journal of electrical engineering and computer science*. 2019, vol 15, no. 2, pp. 855-860. DOI: 10.11591/ijeecs.v15.i2.pp855-860.
9. Xiaojie Wang, Thorsten Wild, Frank Schaich, Andre Fonseca Dos Santos. [Universal filtered multi-carrier with leakage-based filter optimization]. *European Wireless 2014, At Barcelona, Spain*. 2014, pp. 14 -21.
10. Jamoos A.L., Hussein M. [Estimation of UFMC time-varying fading channel using adaptive filters]. *Proceedings - 2018 international conference on promising electronic technologies, ICPET 2018*, pp. 43-48. DOI: 10.1109/ICPET.2018.00014.
11. Averina L.I., Kamentsev O.K., [Comparative analysis of spectrally effective signals with frequency multiplexing]. *Proceedings of the conference "Radar, navigation, communication"*. 2018, vol. 1, no. 4, pp. 312-319 (in Russ.). ISBN: 978-5-9500319-4-6.
12. Jagan Naveen V., Murali Krishna K., Raja Rajeswari K. [BER estimation in UFMC system for wireless communications]. *Journal of advanced research in dynamical and control systems*. 2018, vol. 10, no. 12, pp. 294-299. eISSN: 1943-023X.
13. Grishin I.V., Kalinkina A.A. [Review of methods of multifrequency modulation of signals in modern wireless communication networks]. *Information technologies and telecommunications*. 2020, vol. 8, no. 2, pp. 55-66 (in Russ.). DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-55-66.
14. Glazkov R.V. *Primeneniye perspektivnykh metodov modulyatsii v sovremennykh sistemakh mobil'noy svyazi* [Application of advanced modulation methods in modern mobile communication systems]. *Sbornik trudov konferentsii "Aktual'nyye problemy infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii"* [Proc. of the conference "Actual problems of information telecommunications in science and education" (St. Petersburg, 2016)]. St. Petersburg, SPbSUT them. M. A. Bonch-Bruевич Publ., 2016, pp. 135-140 (in Russ.). ISBN: 978-5-89160-143-7.
15. Ovchinnikov V.I., Logvinov V.V. [Multi-station access in networks of the 5g system]. *Telecommunications and information technologies*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 69-75 (in Russ.).

Research of the Influence of the Quadrature Components Mismatch on the Noise Immunity of OFDM and UFMC Signals

A.Yu. Belousov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia
V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The method of direct modulation using complex signals is used to implement signal paths of transmitters in base stations of cellular communication systems. In the process of modulation, there are mismatches of the gain coefficient and the phase of the quadrature components of the signal. Mismatch degrades the Error Vector Magnitude (EVM) at the receiver, which in turn results in an increased Bit Error Rate (BER). The quality of the received signal is expressed in bit error rate. The mismatch of the amplitude and phase of the quadrature components is one of the most important factors making the greatest contribution to the amplitude of the error vector, and which must be investigated. The paper presents a research of the influence of the mismatch on the OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) and UFMC (universal filtered multi-carrier) technologies. A model of the transmitter, communication channel and receiver for OFDM and UFMC signals has been developed. The model was built in the MatLab software environment.

In the work, by studying the simulation model, the dependence of the noise immunity of technologies was studied by changing the parameters of the communication channel, such as the amplitude and phase mismatch of the quadrature components of the signal, as well as the signal-to-noise ratio. Also, a comparative analysis of such signal parameters as the occupied bandwidth, peak to average ratio, frequency of occurrence of bits with an error was carried out. Based on the results of the study, graphs of the dependence of the error probability and the signal peak to average ratio on the mismatch of the quadrature components were obtained for two technologies, OFDM and UFMC. The study allows us to highlight the advantages of UFMC technology, which are expressed in spectral efficiency, noise immunity and the level of the signal peak to the average ratio.

Keywords: OFDM, UFMC, signal modulation and demodulation, quadrature imbalance, noise immunity.

Получено 26.11.2020

Образец цитирования

Белусов А. Ю., Хворенков В. В. Исследование влияния рассогласования квадратурных составляющих на помехоустойчивость сигналов OFDM и UFMC // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 71–77. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-71-77.

For Citation

Belousov A.Yu., Khvorenkov V.V. [Research of the Influence of the Quadrature Components Mismatch on the Noise Immunity of OFDM and UFMC Signals]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 71-77 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-71-77.