

УДК 621.396.6:004.732

А. А. БРЕСЛАВЕЦ, А. В. ТОЦКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМИРАНИЙ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ OFDM

*Предложен новый метод оценки замираний в системе связи с использованием технологии OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) при многолучевом распространении сигнала. В качестве практического примера OFDM системы связи выбрана Wi-Fi сеть и воздействие релейского типа замираний в канале радиосвязи. Проведены предварительные экспериментальные измерения параметров сигнала в реальных условиях с целью ознакомления с величинами исходных параметров в такой линии связи. Предложены модель и алгоритм, позволяющие рассчитать показатели системы связи в зависимости от влияния дестабилизирующих воздействий. Разработана компьютерная программа с пользовательским интерфейсом для автоматизации процесса расчёта характеристик модели. С использованием данной программы проведены статистические исследования по выявлению влияния на OFDM-систему: релейских замираний, характера движения пользователя, количества рабочих поднесущих частот, количества приёмных антенн, аддитивного нормального шума. Выполнены расчёты величины скорости битовых ошибок (BER) и исследованы параметры сигнала во временной и частотной областях на разных этапах передачи тестовых данных. Полученные результаты показывают, что величина ошибки передачи данных возрастает с ростом скорости движения пользователя, с уменьшением угла движения, с уменьшением количества антенн и поднесущих частот, и при уменьшении входного отношения сигнал/шум.*

**Ключевые слова:** цифровая радиосвязь, беспроводная сеть, WI-FI, MIMO, OFDM, многолучевое распространение, релейские замирания.

### Введение

В последнее время в сфере проектирования вычислительной техники и современных систем и средств телекоммуникаций в значительной степени наблюдается курс на миниатюризацию. В связи с этим возникла существенная потребность пользователей в получении услуг сетей передачи данных «в любом месте, в любое время». При этом ускорился процесс выпуска новых «умных устройств» и произведенный однажды «девайс» начинает быстро устаревать морально. Как следствие, возникла необходимость обеспечивать очень высокую гибкость сети передачи данных с точки зрения значительно ускорившегося процесса переподключений пользователей и изменений конфигураций сети [1]. Проводные сети, конечно, обеспечивают значительные объёмы и скорости передачи трафика, а также устойчивость к помехам. Однако развёртывание подобных систем на местности и дальнейшая эксплуатация представляются весьма дорогостоящим и трудоёмким процессом. Решением этих проблем для среднестатистического пользователя может стать использование беспроводных сетей и систем радиодоступа, которые передают информацию в свободном пространстве [2]. Компоненты беспроводных

сетей обеспечивают временное подключение к кабельной сети, помогают организовать резервное копирование в кабельную сеть, гарантируют определённый уровень мобильности, позволяют снять ограничения на максимальную протяжённость сети, которые накладываются при прокладке медными или оптоволоконными кабелями. Именно благодаря решению многих проблем, присущих кабельным сетям и возможности использования «в любом месте, в любое время», такие беспроводные сети стали очень распространёнными в быту и профессиональной деятельности широкого круга пользователей [3]. Особенно хорошо применимы технологии беспроводного доступа в странах со слабо развитой наземной инфраструктурой коммуникаций. Характерной особенностью сетей беспроводного доступа является применение их в локальных домашних, корпоративных и общественных сетях (разных масштабов), поэтому в большинстве случаев такое распространение информации осуществляется в условиях городской застройки или в закрытых помещениях (то есть в радиоканалах без прямой видимости, с большим количеством переотражённых лучей и соответственно с замираниями) [4].

Основным показателем качества систем радиодоступа является устойчивость к внешним помехам,

в том числе к замираниям и межсимвольной интерференции. Такую устойчивость обеспечивают помехоустойчивыми способами обработки сигналов, выбором типа модуляции, видом кодирования, синхронизацией и протоколами доступа к каналу. Особый практический и научный интерес представляют исследования релейских замираний. Именно эти замирания, возникающие вследствие взаимного движения передатчика и приёмника, а значит и вследствие доплеровского эффекта изменения частоты, в условиях многолучевого распространения сигнала даже на небольших расстояниях приводят к межсимвольной интерференции и росту битовых ошибок на приемном пункте [5]. Эта проблема особенно актуальна в наше время, так как сейчас широкое распространение получило абонентское радиооборудование, которое даже в условиях помещения и в условиях движения должно обеспечивать надёжный приём данных. Например, крупномасштабные – или «медленные» – замирания могут быть снижены простым повышением мощности передатчика. Именно Релеевское распределение плотности вероятности описывает замирания, вызванные многолучевым распространением в практических условиях. В настоящее время существует множество стандартов, согласованных между производителями беспроводных сетей. Распространёнными примерами являются Wi-Fi (в масштабах учреждения) и WiMAX (в масштабах города) структуры. Обе эти технологии обеспечивают широкополосный беспроводной доступ к локальной сети или к Интернету [6]. В данных сетях часто используются такие современные средства обеспечения помехоустойчивости, как технология MIMO и модуляция OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing). Технология OFDM – это технология, методика мультиплексирования, которая подразделяет частоту канала на множество поднесущих частот с тем условием, что частоты поднесущих будут ортогональны (спектры поднесущих перекрываются, но их взаимная энергия равна нулю, то есть они не влияют друг на друга). Способы борьбы с замираниями будут становиться всё более перспективными и в будущем, так как тенденция миниатюризации телекоммуникационного оборудования и увеличение объёма передаваемого трафика останутся неизменными [7].

*Цель настоящей статьи заключается в исследовании релейских замираний в наиболее распространённых локальных сетях Wi-Fi стандартов IEEE 802.11 a/b/g/n, в теоретическом обосновании предложенной модели, в оценивании достоверности и целостности информации, передаваемой в условиях движения, в анализе методов, которые позволяют уменьшить влияние замираний этого типа, а также в проверке теоретических зависимостей с помощью*

модели. Оценка достоверности выполнена путем сравнения коэффициента битовых ошибок в зависимости от характера движения приемника, а также влияния многолучевости в условиях распространения в свободном пространстве при воздействии шумов.

Поставленная цель достигается с помощью разработанной модели системы связи, в которой учтено многолучевое распространение при условии отсутствия сигнала вдоль линии прямой видимости. Следует отметить, что именно данная модель соответствует Релеевскому распределению замираний. В противном случае – при наличии сигнала вдоль линии прямой видимости, процесс распространения описывается уже распределением Райса. На основе разработанного алгоритма синтезирована моделирующая компьютерная программа, позволяющая рассчитывать величину битовой ошибки в OFDM-канале при изменении:

- скорости движения пользователя,
- угла движения пользователя,
- количества рабочих поднесущих частот,
- количества приёмных антенн,
- уровня аддитивного нормального шума (входного отношения сигнал/шум) [8].

### **Экспериментальные исследования устойчивости сигнала к ошибкам, возникающим в OFDM-канале при воздействии различных факторов**

Величина влияния быстрых замираний с релейским распределением в предлагаемой модели с учётом аппроксимации рассчитывается при помощи формулы вида:

$$\mu_k^{(i)}(t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \times \sum_{N=1}^{N_k} \cos(2 \times \pi \times f_d \times \cos(\frac{\pi}{2 \times N_k} \times ((n - 0,5) + (-1)^{i-1} \times \frac{k}{K + 2})) \times t + \theta_{k,n}^{(i)}), \quad (1)$$

где  $f_d = \frac{V \times f_t}{c} \times \cos(\theta)$  – доплеровский сдвиг частот;  $V$  – скорость передвижения приемника;  $\theta$  – угол между приемным и передающим пунктами.

Так как эти замирания в предлагаемой модели соответствуют мультипликативной помехе, то групповой сигнал на выходе объекта OFDM-модулятора может быть представлен в виде:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \times e^{j2\pi k \Delta}, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

где  $\{X_k\}$  – символы данных;  $N$  – число поднесущих частот;  $T$  – длительность символа в OFDM-канале.

Приведенные ранее формулы использованы при написании моделирующей программы.

Модель описывает гипотетическую ситуацию передачи информации по OFDM-каналу в модели с тремя лучами переотражения сигнала в системе беспроводной связи семейства стандартов Wi-Fi.

Данная модель также учитывает возможность влияния на канал передачи стороннего шумового фона, имеющего характер аддитивного нормального Гаусового распределения.

Гипотетическая идеализированная ситуация, которая является основой для построения задачи, которую решает программа, описана на рисунке 1.

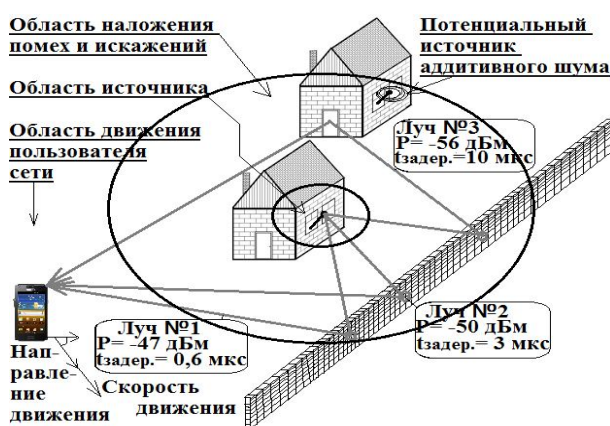


Рис. 1. Постановка задачи в виде идеализированной ситуации для решения моделирующей программой

Алгоритм моделирующей расчётной программы:

- введение начальных параметров для расчёта;
- проверка на адекватность введённых параметров;
- загрузка участка тестового файла данных с преобразованием в числовой массив (сигнал);
- оцифровка и перевод с десятичного в двоичный неравномерный алфавит выборки тестовой последовательности значений (кодирование источника);
- свёрточное канальное кодирование и получение потока бит;
- квадратурная фазовая манипуляция;
- OFDM-модуляция;
- создание и добавление к информационному сигналу последствий эффекта Доплера, релейских замираний и нормального аддитивного шума – получение искажающего канала;
- OFDM-демодуляция;
- детектирование бит из полученной последовательности и послеканальные преобразования;

- канальный декодер Витерби;
- квадратурная фазовая деманипуляция;
- перевод из двоичного неравномерного в десятичное числение тестовых значений;
- подсчёт количества битовых ошибок и коэффициента ошибочных бит, и частотно-временной анализ исследуемой системы;
- вывод полученных результатов на каждом этапе передачи информации по каналу.

Искажающий информационный сигнал канал был получен с помощью расчётных формул, специализированных функций и объектов пакета программирования MATLAB. Работа с программой осуществляется пользователем с помощью графических окон. Программа может быть использована отдельно от среды программирования.

Для оценки ошибочности проведен ряд тестовых экспериментов, которые описаны ниже.

*Первая группа экспериментов:* исследование зависимости коэффициента битовых ошибок от скорости движения пользователя сети при различном количестве OFDM-поднесущих.

*Вторая группа экспериментов:* исследование зависимости коэффициента битовых ошибок от угла движения пользователя при различном количестве OFDM-поднесущих частот.

*Третья группа экспериментов:* исследование зависимости коэффициента битовых ошибок от количества антенн на абонентском оборудовании при различном количестве OFDM-поднесущих.

*Четвертая группа экспериментов:* исследование зависимости коэффициента битовых ошибок от интенсивности аддитивного шума канала связи при различных задержках сигнала.

Количество поднесущих частот, используемых в исследованиях, было выбрано равным: 1, 28 и 50 частот. При выполнении экспериментов с первой по третью группу шум предполагался полностью отсутствующим. В рамках четвёртой группы экспериментов были построены две зависимости: 1) с задержками сигналов, равными 0,6 мкс, 3 мкс и 10 мкс; 2) с задержками сигналов, равными 0,1 нс, 1 нс и 10 нс. Также в четвёртой группе экспериментов отсутствовало движение приёмника и/или передатчика.

Как видно из рисунков 2 – 4, величина битовых ошибок (BER) прямо пропорциональна скорости движения пользователя сети при любом количестве OFDM-поднесущих частот. При этом с ростом количества поднесущих величина BER уменьшается.

Как следует из анализа рисунков 5 – 7, величина BER обратно пропорциональна углу движения пользователя при любом количестве поднесущих. С ростом количества поднесущих частот величина BER также уменьшается.

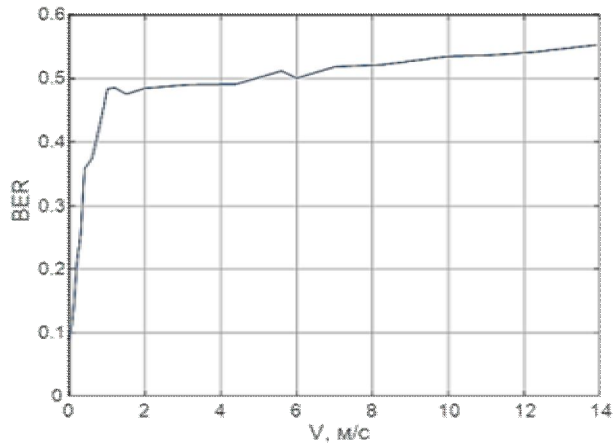


Рис. 2. Зависимость BER от скорости движения при единственной ортогональной поднесущей

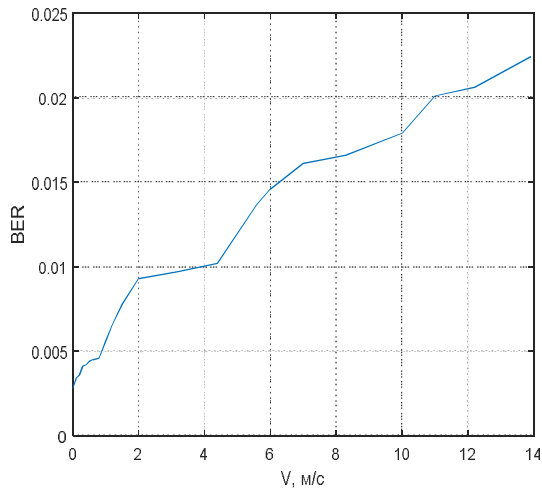


Рис. 3. Зависимость BER от скорости движения при 28-и ортогональных поднесущих

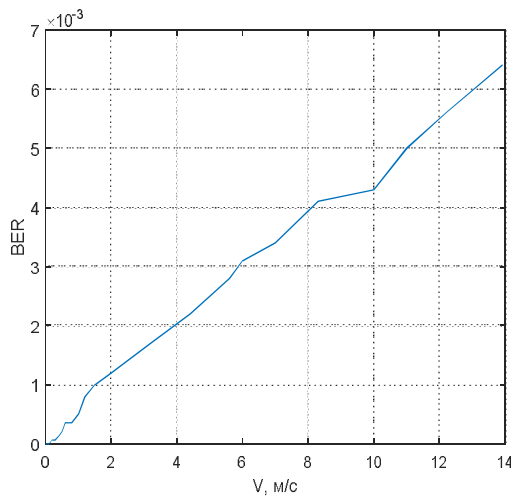


Рис. 4. Зависимость BER от скорости движения при 50-и ортогональных поднесущих

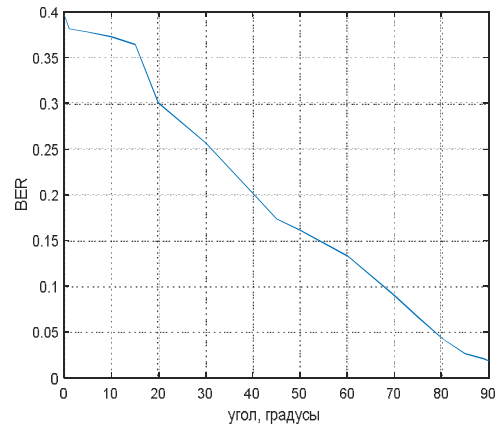


Рис. 5. Зависимость BER от угла движения при единственной ортогональной поднесущей

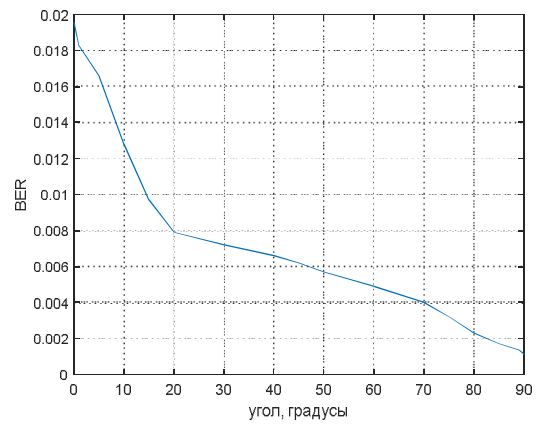


Рис. 6. Зависимость BER от угла движения при 28-и ортогональных поднесущих

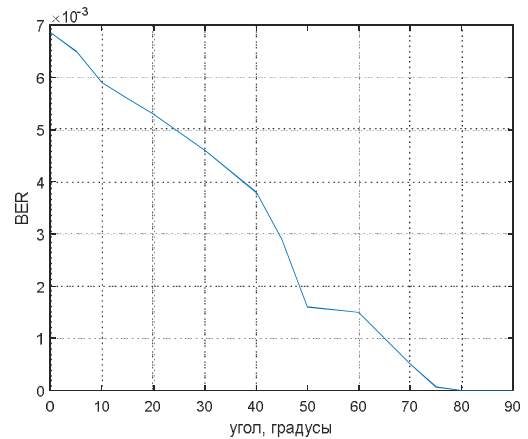


Рис. 7. Зависимость BER от угла движения при 50-и ортогональных поднесущих

Как видно из рисунков 8 – 10, величина BER обратно пропорциональна росту количества антенн при любом количестве поднесущих. При этом с ростом количества поднесущих величина BER уменьшается.

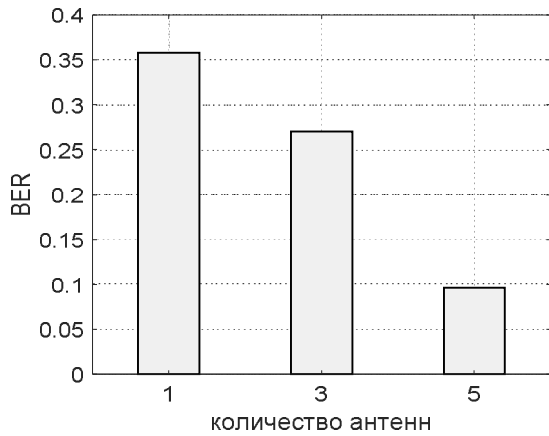


Рис. 8. Зависимость BER от количества антенн при единственной ортогональной поднесущей

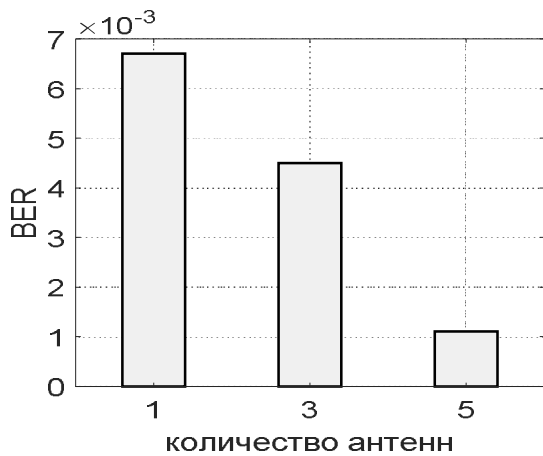


Рис. 9. Зависимость BER от количества антенн при 28-и ортогональных поднесущих

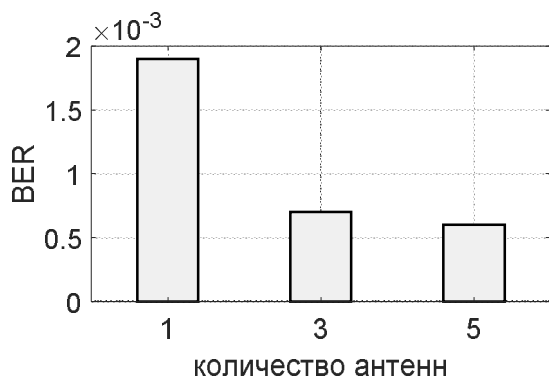


Рис. 10. Зависимость BER от количества антенн при 50-и ортогональных поднесущих

Как следует из анализа рисунков 11 и 12, величина коэффициента битовых ошибок обратно пропорциональна отношению сигнал/шум при наличии в системе аддитивного нормального шума, 50 поднесущих и различном значении задержек флуктуа-

ционных копий сигнала. При этом с ростом количества поднесущих величина BER уменьшается.

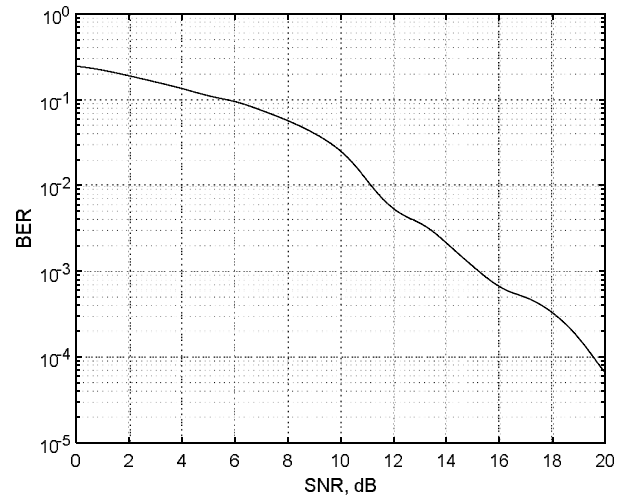


Рис. 11. Зависимость коэффициента ошибок от отношения сигнал/шум, трехлучевая модель с задержками, равными 0,6 мкс, 3 мкс и 10 мкс

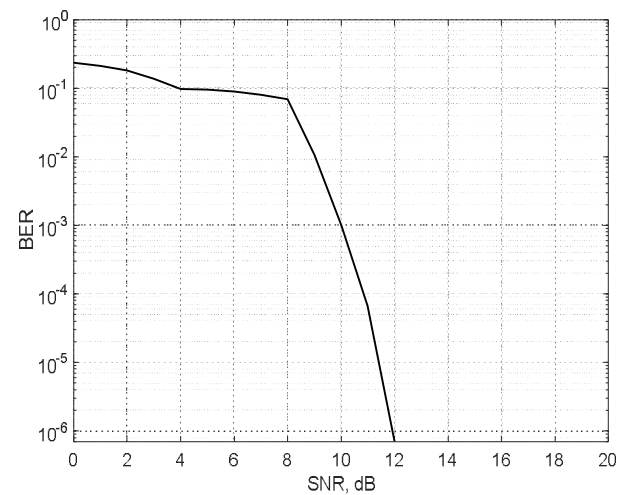


Рис. 12. Зависимость BER от отношения сигнал/шум: трехлучевая модель с задержками, равными 0,1 нс, 1 нс и 10 нс

Дальнейшая деятельность будет продвигаться в сторону проектирования реальной сети беспроводного доступа с учётом полученных результатов. Также предполагается дополнить возможности моделирующей программы за счёт факторов, в том числе и мешающих. Под дополнительными факторами подразумеваются более сложные шумовые условия, а также иные виды замираний.

### Заключение

Представлены результаты статистических исследований воздействия помех в OFDM-системе

связи. Рассмотрено воздействие релейских замираний, эффекта Доплера при движении приемника и нормального аддитивного шума. Оценено сглаживание помех при увеличении числа поднесущих частот и количества антенн. Результаты исследования показывают, что коэффициент битовых ошибок BER прямо пропорционален скорости движения пользователя сети Wi-Fi, обратно пропорционален углу движения пользователя сети, обратно пропорционален росту количества антенн, обратно пропорционален росту количества поднесущих частот, а также обратно пропорционален величине отношения сигнал/шум. Замечено, что с уменьшением длительностей задержек сигналов в переотраженных лучах спад зависимости BER от величины отношения сигнал/шум наступает раньше.

### Литература

1. Головкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь [Текст] : учебное пособие / В. А. Головкин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 432 с.
2. Финк, Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] : Учебник для вузов / Л. М. Финк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство «Советское радио», 1970. – 728 с.
3. Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение [Текст] : пер. с англ. / Б. Скляр. – 2-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс» 2003. – 1104 с.
4. Spatial Modulation – OFDM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/260319340\\_Spatial\\_Modulation\\_-\\_OFDM](https://www.researchgate.net/publication/260319340_Spatial_Modulation_-_OFDM) - 30.05.2016.
5. Bhardwaj, M. A Review on OFDM: Concept, Scope & its Applications [Text] / M. Bhardwaj, A. Gangwar, D. Soni / IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2012. – vol. 1, issue 1. – P. 7-11.
6. Rahmatallah, Y. Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey and Taxonomy [Text] / Y. Rahmatallah, S. Mohan / IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2013. – vol. 15, issue 4. – P. 1567-1592.
7. Schaich, F. Waveform contenders for 5G – OFDM vs. FBMC vs. UFMC [Text] / F. Schaich, T. Wild / 2014 6th International Symposium on Com-

munications, Control and Signal Processing (ISCCSP). – Athens, 2014. – P. 21-24.

8. Banelli, P. Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency [Text] / P. Banelli / IEEE Signal Processing Magazine. – 2014. – vol. 31, issue 6. – P. 80-93.

### References

1. Golovkin, V. A. *Cifrovaja mobil'naja radiosvjaz' Uchebnoe posobie dlja vysshih uchebnyh zavedenij* [Digital mobile radio communication: A Textbook for High Schools.], Moscow, Line-Telecom Publ., 2007. 728 p.
2. Fink, L. M. *Teorija peredachi diskretnyh soobshhenij: Uchebnik dlja vuzov. 2-e izd.* [Theory of Transmission of Discrete Messages: A Textbook for High Schools. 2nd ed.], Moscow, Soviet radio Publ., 1970. 728 p.
3. Sklyar, B. *Cifrovaja svjaz': teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. 2-e izd.* [Digital Communication: Theoretical Foundations and Practical Applications. 2nd ed.], Moscow, Publishing house "Williams", 2009. 1104 p.
4. Spatial Modulation – OFDM. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/260319340\\_Spatial\\_Modulation\\_-\\_OFDM](https://www.researchgate.net/publication/260319340_Spatial_Modulation_-_OFDM) (accessed 30.05.2016).
5. Bhardwaj, M., Gangwar, A., Soni, D. A Review on OFDM: Concept, Scope & its Applications. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2012, vol. 1, issue 1, pp. 7-11.
6. Rahmatallah, Y., Mohan, S. Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey and Taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, vol. 15, issue 4, pp. 1567-1592.
7. Schaich, F., Wild, T. Waveform contenders for 5G – OFDM vs. FBMC vs. UFMC. *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Athens, 2014, pp. 21-24.
8. Banelli, P. Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, vol. 31, issue 6, pp. 80-93.

Поступила в редакцію 24.12.2017, рассмотрена на редколлегии 14.02.2018

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВМИРАНЬ В СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ OFDM

О. А. Бреславець, О. В. Тоцький

Запропоновано новий метод оцінки впливу замирань в моделі багатопроменевого поширення сигналу в системі зв'язку з використанням OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) технології. Розглянуто вплив релейського типу замирань у мережі Wi-Fi. Заздалегідь проведено експериментальні вимірювання сигналу в реальних умовах в такому каналі зв'язку з метою ознайомлення з величинами основних вихідних параметрів. Розроблено алгоритм, що дозволяє виконувати розрахунки згідно з цією моделлю. Інтерфейс

комп'ютерної програми створено для користувачів з умови автоматизації процесу виконання статистичних досліджень. Проведено статистичні дослідження по виявленню впливу на OFDM-канал: релієвських завмирань, характеру руху користувача, кількості робочих піднесуєчих частот, кількості прийомних антен, адитивного нормального шуму. Вплив цих чинників оцінювався шляхом виявлення величини коефіцієнта бітрової помилковості BER. Також програма дозволяла досліджувати кількість помилок і зовнішній вигляд сигналу у часовій і частотній областях на різних етапах передачі. Результати, отримані для серії тестових запусків програми в залежності від швидкості і кута руху користувача мережі Wi-Fi, від інтенсивності адитивного шуму каналу зв'язку при різній кількості піднесуєчих частот, від кількості антен на абонентському обладнанні, показують, що помилковість передачі зростає з ростом швидкості руху, зменшенням кута руху у першій чверті, зменшенням кількості антен і піднесуєчих, зменшенням відношення сигнал/шум при наявності адитивного шуму з гаусовим розподілом.

**Ключові слова:** бездротова мережа, WI-FI, MIMO, OFDM, багатопроменеve поширення, релієвські завмирання.

## INVESTIGATION OF FADING IN THE COMMUNICATION SYSTEM USING OFDM TECHNOLOGY

*O. A. Breslavets, A. V. Totzky*

A new technique exploited for estimating of fading influence in multipath signal propagation environment for communication system using OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) technology is proposed. Rayleigh fading model is considered and studied in suggested approach. Wi-Fi network has been selected as a basis system for study performance of OFDM communication system operating in multipath and noisy communication channel. Preliminary experimental measurements and computations have been carried out in order to evaluate received signal parameters after test signal propagation through multipath communication link contaminating transmitted signal under influence of random Rayleigh fading. An algorithm has been developed that makes it possible to perform computations according considered model. Software corresponding to suggested algorithm has been developed. Proposed software contains user interface that is written in order to automate the process of computations. Developed software was examined experimentally for statistical study of interference behavior and its influence on the OFDM communication system performance. The following data were taking into account in investigations: Rayleigh fading, user's motion, number of operating OFDM subcarriers, number of receiving antennas, additive normal noise. The influence of these factors on the communication system performance was evaluated by computation the value of bit error rate (BER) values. Suggested software also gives an opportunity investigating the number of bit errors and appearance of the signal in the time and frequency domains at different stages of transmission. Computer simulations results were obtained for a sequence of test Monte Carlo runs depending on: the speed and angle of the user's traffic, the intensity of the additive Gaussian noise in communication channel, variations of the number of OFDM subcarriers, the number of antennas contained in the user equipment. Computer simulation results demonstrate the following: bit error rate values tend to increasing with increasing the user velocity as well with decreasing the number of antennas and subcarriers. It has been also shown decreasing the signal-to-noise ratio value under influence of additive noise with a Gaussian distribution according to decreasing the number of OFDM subcarriers and number of antennas in MIMO system.

**Keywords:** wireless network, WI-FI, MIMO, OFDM, multipath propagation, Rayleigh fading.

**Бреславец Алексей Андреевич** – студент кафедри інформаційних і комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: alex.breslavets@gmail.com.

**Тотський Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. інформаційних і комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: totskiyalexander@gmail.com.

**Breslavets Oleksii Andreevich** – student department of information and communication technologies by name O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: alex.breslavets@gmail.com.

**Totzky Aleksandr Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of information and communication technologies by name O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: totskiyalexander@gmail.com.