

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ  
СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ СТАНДАРТА 802.11G И СИСТЕМ WiMAX**

*Девяцына С.Н., Сахаров А.И., Сидоренко И.А., Ушаков Д.И.*

В статье рассматривается оценка электромагнитной совместимости систем стандартов 802.11g и 802.16-2004 при помощи компьютерного моделирования. Ввиду того, что OFDM сигнал обладает высоким уровнем внеполосных излучений, то наличие частотного разнеса между диапазонами частот систем Wi-Fi и WiMAX не позволяет обеспечить устойчивую электромагнитную обстановку указанных систем. В работе также представлены результаты компьютерного моделирования, которые отражают зависимость вероятности ошибки на бит от расстояния между устройствами Wi-Fi и WiMAX при различной удаленности от базовой станции последнего.

**Ключевые слова:** OFDM, WiMAX, Wi-Fi, вероятность ошибки на бит, электромагнитная обстановка, гармонический базис, межканальная интерференция, электромагнитная совместимость, компьютерное моделирование.

**Постановка проблемы**

Современное развитие информационно-телекоммуникационных систем ориентировано на удовлетворение потребностей пользователей в информационном обмене с высокой скоростью передачи данных независимо от их местоположения. Для этого происходит интенсивное внедрение систем широкополосного доступа на основе беспроводных технологий, позволяющих обеспечивать высокую скорость передачи информации с заданным качеством сервиса (QoS). На сегодняшний день такими технологиями являются системы Wi-Fi, WiMAX, LTE, использующие метод формирования канальных сигналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Широкое внедрение OFDM в беспроводных широкополосных сетях передачи данных городского масштаба обусловлено следующими его преимуществами:

- устойчивость к многолучевому распространению радиоволн, что характерно для городов с многоэтажной застройкой;
- высокая спектральная эффективность метода формирования канальных сигналов;
- адаптивность сигнально-кодовой конструкции, заключающаяся в согласовании параметров

модуляции в зависимости от условий приема радиосигналов;

- простота технической реализации, обусловленная тем, что модуляция и демодуляция сигнала могут быть выполнены на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Этот факт существенно упрощает конструкцию передатчика и приемника и соответственно снижает потребляемую мощность, делая возможным их реализацию в виде мобильных устройств [1-3].

Известно [4], что применение в OFDM гармонического базиса Фурье для формирования канальных сигналов с прямоугольной формой модулирующего импульса вызывает достаточно медленный спад спектральной плотности OFDM символа вне основной полосы системы радиосвязи. Это может стать причиной взаимного влияния систем беспроводной связи, использующих OFDM и работающих на одной территории, что влечет к снижению скорости передачи информации, а иногда и к полной потере связи. Подобная ситуация может возникнуть, например в офисе, где часто используют технологию Wi-Fi при развертывании локальных и персональных сетей, а для широкополосного беспроводного доступа к сети Internet применяют технологию WiMAX. В другом случае источником непреднамеренных помех для WiMAX модема может быть любое устройство с включенным Wi-Fi адаптером (ноутбук, коммуникатор и т.п.), находящееся поблизости от него. Следует отметить, что существующий разнос между диапазонами частот систем Wi-Fi и WiMAX не во всех случаях гарантирует их электромагнитную совместимость. Ситуация усугубляется тем, что в условиях городской застройки из-за удаленности базовой станции уровень сигнала WiMAX на входе приемника оказывается значительно ниже, чем уровень сигнала системы Wi-Fi. В этом случае внеполосные излучения Wi-Fi сигнала становятся соизмеримы с уровнем сигнала WiMAX (см. рис. 1), что может создать серьезные помехи приему сигналов системы стандарта 802.16-2004.

Цель статьи – оценить электромагнитную совместимость систем стандарта 802.16-2004

(WiMAX) и систем связи стандарта 802.11g. Для достижения поставленной цели на основе компьютерного моделирования исследовалась помехоустойчивость приема сигналов стандарта 802.16-2004 при различных расстояниях между устройствами Wi-Fi и WiMAX модемом.

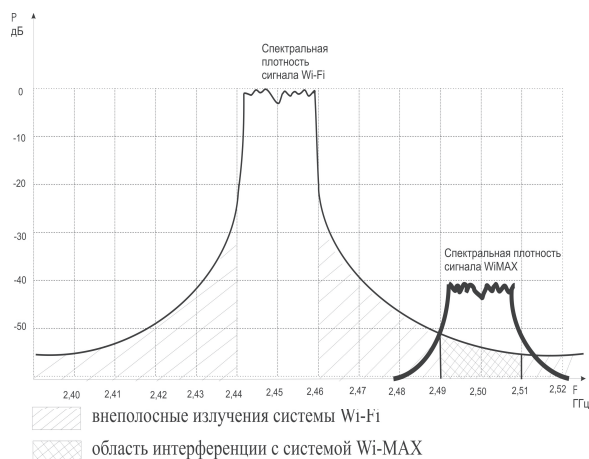


Рис. 1. Влияние спектральной плотности Wi-Fi сигнала на сигнал WiMAX

В ходе эксперимента варьировалась мощность принимаемого сигнала от системы WiMAX (PWiMAX), что позволило имитировать удаленность модема от базовой станции, а также определялось допустимое расстояние до устройства Wi-Fi, создающего помехи приему сигнала WiMAX. В качестве критерия помехоустойчивости приема использовалась вероятность ошибки на бит, при этом моделирование осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Генерируется бинарная ПСП, которая имитирует передаваемые данные.
2. Формируются каналные сигналы OFDM согласно стандарту 802.16-2004, на основе сгенерированной ПСП, с различными уровнями мощности  $P_{WiMAX}$ , которые являются сигналами системы WiMAX.
3. Генерируются сигналы стандарта 802.11g с различной мощностью  $P_{WiFi}$ .
4. К сгенерированным сигналам WiMAX, добавляется флуктуационная помеха в виде гауссова шума с различной мощностью.
5. Полученная совокупность сигнал+шум складывается с сигналом Wi-Fi мощностью  $P_{WiFi}$ .
6. Полученная реализация сигнала ограничивается полосовым фильтром, средняя частота которого настроена на несущую частоту системы WiMAX и демодулируется.
7. По результатам детектирования вычисляется коэффициент ошибок BER.

Разработанная компьютерная модель для оценки электромагнитной совместимости систем радиосвязи стандартов 802.11g и 802.16-2004 реализована в среде MatLAB.

### Расчет параметров сигнала, излучаемого системой WiMAX

Для вычисления мощности принимаемого сигнала системы WiMAX применялась модель распространения радиоволн Okamura, широко используемая для расчета радиолиний в условиях города, пригодна для частот (150...3000) МГц (с учетом экстраполяции) и расстояний от 1 до 100 км.

Средняя принятая мощность сигнала согласно [5] вычисляется по формуле:

$$P_{WiMAX} = P_{BC} - L_{CP} + G_r, \quad (1)$$

где:  $P_{WiMAX}$  – средняя принятая мощность, дБ; РБС – мощность излучения передающей антенны базовой станции 5 Вт (36,99 дБм);  $L_{CP}$  – средняя величина потерь в радиоканале, дБ;  $G_r$  – коэффициент усиления приемной антенны, дБ;

Расчет уровня ослабления сигнала в радиолинии выполняется на основе выражения (2). Затем определяется величина  $A_{ma}(f,d)$  и складывается с ослаблением в свободном пространстве с корректирующей поправкой.

$$L_{CP} = L_{СП} + A_{ma}(f,d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}; \quad (2)$$

где  $L_{CP}$  – средняя величина потерь, дБ;  $L_{СП}$  – потери в свободном пространстве, дБ;  $A_{ma}$  – усредненное дополнительное ослабление, обусловленное влиянием земной поверхности, дБ, определяемое по кривым распространения радиоволн, приведенным в [6];  $G(h_{te})$  – фактор высота-усиление передающей антенны, дБ;  $G(h_{re})$  – фактор высота-усиление приемной антенны, дБ;  $G_{AREA}$  – поправочный коэффициент, зависящий от степени неровности профиля радиотрассы, дБ.

Потери в свободном пространстве  $L_{CP}$  вычисляются согласно выражению:

$$L_{CP} = 10 \lg \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}; \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны несущего колебания излучаемого сигнала, м;  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником, м.

Таким образом, учитывая, что средняя мощность излучения передающей антенны базовой станции составляет  $\approx 5$  Вт (36,99 дБм), можно вычислить согласно выражениям (1)-(3) мощность принимаемого сигнала на различных расстояниях от базовой станции в условиях местности с плот-

ной городской застройкой. Результаты расчетов с применением модели Okumura представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов с применением модели Okumura

$d$ , расстояние между БС и приемником, м	Мощность принимаемого сигнала, дБм	Мощность принимаемого сигнала, мВт
300	-45	$3,16 \cdot 10^{-5}$
600	-58	$1,58 \cdot 10^{-6}$
1000	-66,5	$2,26 \cdot 10^{-7}$

### Расчет параметров Wi-Fi сигнала

Современные устройства стандарта 802.11g излучают сигнал в окружающее пространство со средней мощностью порядка 16 дБм (39,81 мВт). Мощность сигнала Wi-Fi на определенном расстоянии от антенны можно вычислить согласно выражению (3), так как предполагается, что устройства Wi-Fi и WiMAX находятся в зоне прямой видимости. Проведенные в [7-8] исследования показали, что крутизна спада частотной характеристики за выделенным частотным интервалом сигналов стандарта 802.11g составляет примерно 10 дБ на 100 МГц. Поэтому, уровень побочных излучений сигнала, генерируемых системой связи стандарта 802.11g на заданной несущей частоте WiMAX сигнала можно вычислить согласно следующему выражению:

$$P_{\text{роб}} = P_{\text{изл}} \cdot 10^{-3-(\Delta f_{\text{Nes}} \cdot \Psi)/10}; \quad (4)$$

где  $\Delta f_{\text{Nes}}$  – разница между несущими частотами систем связи, МГц;  $\Psi$  – крутизна спада частотной характеристики сигнала вне рабочей полосы частот, дБ/МГц;  $P_{\text{изл}}$  – мощность излучения передатчика системы связи стандарта 802.11g, дБ;

Таким образом, на основании (3)-(4) можно рассчитать мощность сигнала системы Wi-Fi, который будет являться помехой для системы WiMAX. Результаты расчета мощности помехи в зависимости от расстояния приведены в таблице 2. Вероятность ошибки на бит вычисляется согласно следующему выражению:

$$P_{\text{ош}} = \frac{N_{\text{ош}}}{N}; \quad (5)$$

где  $N$  – общее число переданных информационных бит;  $N_{\text{ош}}$  – число ошибочно принятых бит.

Для получения корректных значений  $P_{\text{ош}}$  необходимо чтобы выполнялось соотношение  $N \geq 1 \cdot 10^6$ .

Таблица 2. Расстояния между модемом WiMAX и устройством системы Wi-Fi.

Расстояние между устройствами, м	Мощность внеполосного излучения, дБм	Мощность внеполосного излучения, мВт
1	-29,59	$1,1 \cdot 10^{-6}$
2	-36,02	$0,25 \cdot 10^{-6}$
4	-42,22	$0,06 \cdot 10^{-6}$

### Результаты компьютерного моделирования

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2-4. Полученные кривые помехоустойчивости с номерами от 1 до 4 здесь показывают вероятность ошибки на бит при различных расстояниях между модемом WiMAX и устройством системы Wi-Fi. Значения этих расстояний представлены в таблице 2. При малой удаленности от базовой станции (300 м) уровень принимаемого сигнала системы WiMAX достаточно высок, поэтому помеха от системы Wi-Fi не приводит к снижению помехоустойчивости.

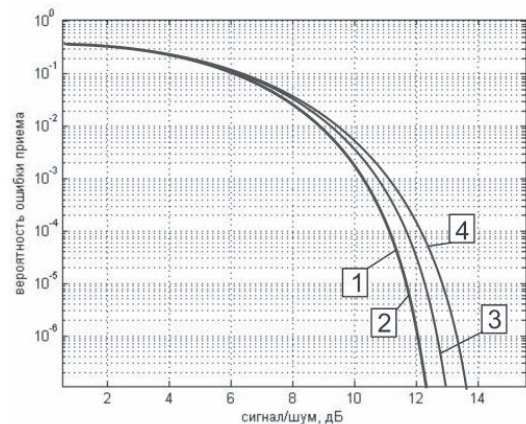


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки от ОСШ для расстояния 300 м: 1 – сигнал без помехи; 2 – расстояние 4 м; 3 – расстояние 2 м; 4 – расстояние 1 м

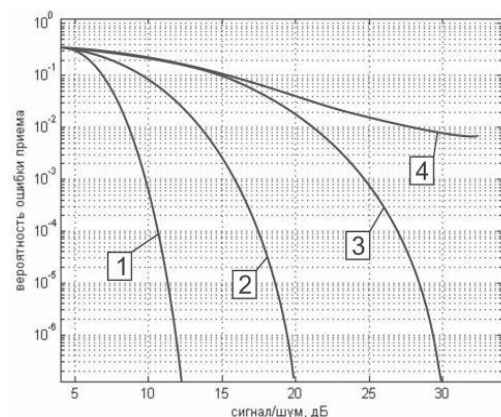


Рис. 3. Вероятность битовой ошибки от ОСШ для расстояния 600 м: 1 – сигнал без помехи; 2 – расстояние 4 м; 3 – расстояние 2 м; 4 – расстояние 1 м



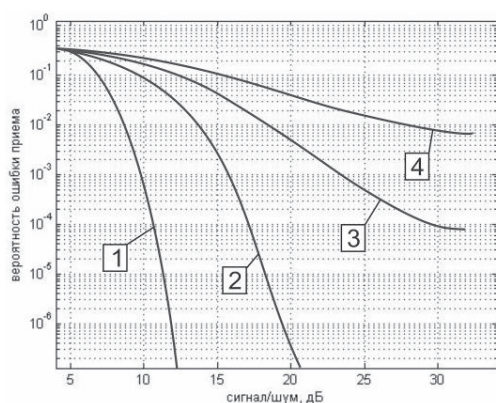


Рис. 4. Вероятность битовой ошибки от ОСШ для расстояния 1000 м: 1 – сигнал без помехи; 2 – расстояние 4 м; 3 – расстояние 2 м; 4 – расстояние 1 м

При удалении модема от базовой станции на 600 м и более помехоустойчивость снижается: при этом кривые (см. рис. 2-4) сдвигаются в сторону большего отношения «сигнал/шум», а затем становятся пологими, что свидетельствует о неработоспособности системы WiMAX.

### Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что устройства стандарта 802.11g могут нарушить работоспособность системы WiMAX. Результаты компьютерного моделирования показывают, что для устойчивой работы указанных систем на одной территории необходимо, чтобы устройства находились на расстоянии не менее 4 м друг от друга. Такой пространственный разнос существенно снижает воздействие сигналов системы стандарта 802.11g на

прием сигналов системы WiMAX, гарантируя достоверность приема передаваемой информации.

### Литература

1. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2004. – 200 с.
2. Берлин А.Н. Цифровые системы связи. М.: Эко-Трендз, 2007. – 294 с.
3. Уиппл Д. Концепции ортогонального частотного разделения каналов OFDM // Электронные компоненты. № 9, 2008. – С. 33-38.
4. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. М.: Эко-Трендз, 2005. – 328 с.
5. Гавриленко В.Г., Яшнов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи. Нижний Новгород: Изд. НГТУ, 2003. – 148 с.
6. Okumura J. et.al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service // Rev. Ins. Elec. Eng. V.16, No. 9-10, 1968. – P. 825-873.
7. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Маматов Е.М., Ушаков Д.И., Старовойт И.А. О возможности повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в система с OFDM // Информационные системы и технологии. № 1, 2011. – С. 39-45.
8. Shinsuke H., Ramjee P. Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communication. Artech House. Boston, 2003. – P.40-41.

## COMPUTER SIMULATION ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF 802.11g AND SYSTEMS WiMAX

Devitsyna S.N., Saharov A.I., Sidorenko I.A., Ushakov D.I.,

**In the article considered evaluation of electromagnetic compatibility systems standards of 802.11g and 802.16-2004 by computer simulation. Because the OFDM signal has high levels of out-of-band emission is the presence of frequency spacing between the frequency ranges of systems Wi-Fi and WiMAX can not provide ensure a stable electromagnetic environment of these systems. . The paper also presents simulation results, which reflect the dependence of bit error probability of the distance between devices, WiFi and WiMAX at various distances from the base station of the latter.**

**Keywords:** OFDM, WiMAX, Wi-Fi, the bit error probability, electromagnetic environment, harmonic basis, interchannel interference, electromagnetic compatibility, computer simulation.

Девицына Светлана Николаевна, к.т.н., доцент Кафедры «Информационно-телекоммуникационных систем и технологий» (ИСТ) Белгородского государственного университета (БГУ), г. Белгород. Тел. (8-4722) 30-13-52. E-mail: devitsyna@bsu.edu.ru

Сахаров Александр Игоревич, магистрант Кафедры ИСТ БГУ. E-mail: alert2003@mail.ru

Сидоренко Игорь Александрович, к.т.н., доцент Кафедры ИСТ БГУ. Тел. (8-4722) 30-13-52. E-mail: sidorenko@bsu.edu.ru

Ушаков Дмитрий Игоревич, ассистент Кафедры ИСТ БГУ. Тел. (8-4722) 30-13-00. E-mail: ushakov\_d@bsu.edu.ru