УДК 004.021

Е.Г. ЖИЛЯКОВ, С.П. БЕЛОВ, Е.М. МАМАТОВ,
Д.И. УШАКОВ, И.А. СТАРОВОЙТ

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫДЕЛЕННОГО ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА В СИСТЕМАХ С OFDM[1]

В статье предлагается метод повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM. Предлагаемый метод позволяет формировать канальные сигналы с максимальной концентрацией энергии в заданной частотной полосе. Таким образом, появляется возможность задействовать для передачи полезной информации вводимые в настоящее время защитные частотные интервалы в спектре OFDM сигнала. Компьютерное моделирование показывает, что применение предлагаемого метода позволяет снизить межканальную интерференцию и таким образом повысить эффективность использования выделенного частотного ресурса.

Ключевые слова: *OFDM; сигнальный базис; субполосная матрица; частотный ресурс; канальные сигналы; концентрация энергии; поднесущие частоты; эффективность использования частотного ресурса.*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Потребность абонентов пользоваться услугами, предоставляемыми мультисервисными системами, независимо от места своего нахождения обуславливает интенсивное развитие беспроводных широкополосных систем связи. Сегодня бесспорным лидером в предоставлении мультисервисных услуг с высоким качеством посредством использования беспроводного широкополосного доступа является технология WiMAX [1]. Вместе с тем, необходимо отметить, что используемые в настоящее время в технологии WiMAX для передачи информации сигнальные конструкции в виде ортогональных базисов с прямоугольной формой прямоугольного импульса не позволяют минимизировать частотно-временную локализацию и обеспечить минимальную чувствительность к межканальной и межсимвольной интерференции [2-4].

Для компенсации этого недостатка, в существующих системах связи в выделенном частотном ресурсе вводятся защитные интервалы, представляющие из себя несколько поднесущих, на которых информация не передается (рис.1).

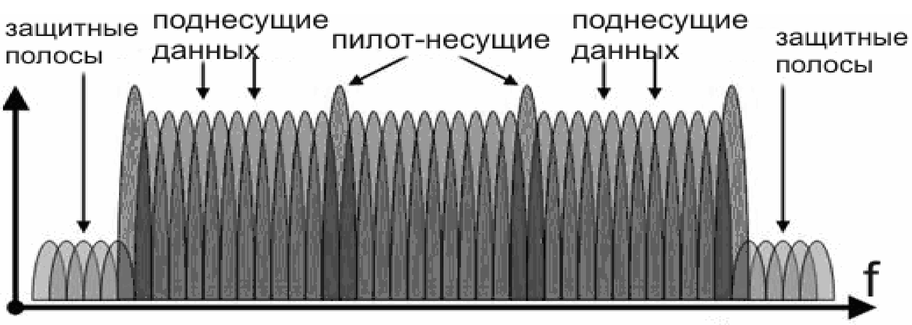

Рисунок 1 – Структура частотного спектра OFDM сигнала

Введение защитных интервалов позволяет снизить уровень внеполосных

[1] Исследования выполнены при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, Государственный контракт № П964 от 27 мая 2010 г.

излучений и, как следствие, минимизировать влияние на смежные каналы интерференционных помех, но данный подход существенно снижает эффективность использования выделенного частотного ресурса. Как показал анализ литературы [1-4], величина заградительных полос в этом случае составляет около 20% от всего выделенного частотного интервала.

Цель статьи – предложить метод повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах связи с OFDM.

ОСОБЕННОСТИ OFDM МОДУЛЯЦИИ

Данный вид модуляции уже используется и хорошо зарекомендовал себя в беспроводных компьютерных сетях, в мобильной связи, а также в цифровом аудио- и видеовещании. Концепция данного метода модуляции в основном базируется на известном с середины 1950-х годов методе модуляции со многими поднесущими. Однако стоит учитывать новейшие достижения последних десятилетий в области цифровых методов передачи информации и высокоэффективных способов модуляции [5-7]. Все это позволяет обеспечивать высокие качественные характеристики систем связи при наличии помех, доплеровских смещений частот, замираний сигналов и т.д.

В OFDM используется разбиение последовательности символов данных на параллельный поток с увеличением длительности каждого символа. Передаваемая последовательность символов данных $x_{m,k}$, которые берутся из алфавитов так называемых m-ичных систем модуляции (m-позиционных) PSK, BPSK, QPSK, QAM и т.п., разбивается на блоки из N символов. Каждый блок из N последовательных символов преобразуется в блок из N параллельных символов длительностью $T=NT_s$ каждый. Эти символы передаются поднесущими, отстающими друг от друга на интервал $\Delta f = 1/T$ Гц, что обеспечивает их ортогональность при прямоугольной форме модулирующих видеоимпульсов, несмотря на случайные фазы, обусловленные модуляцией данными, и уменьшает влияние межсимвольной интерференции [8-10].

Полученные символы модулируют N соответствующих поднесущих частот (рис. 2).

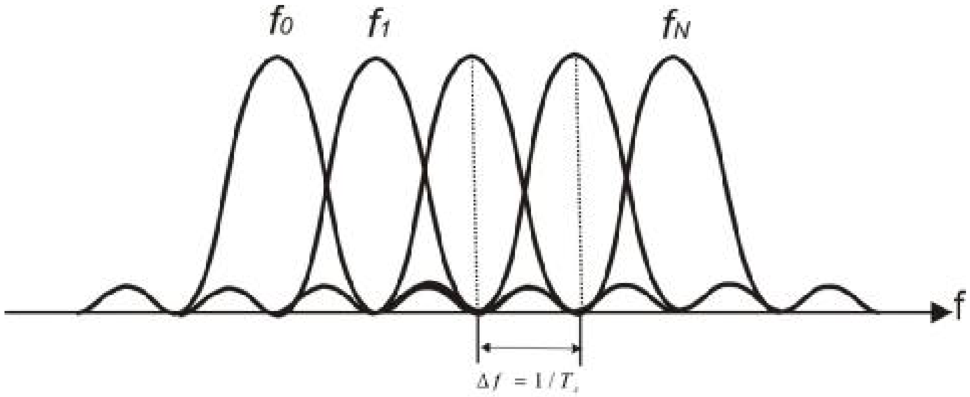

Рисунок 2 – Взаимное расположение ортогональных частот

При этом комплексную огибающую сигнала OFDM на интервале T можно представить в форме:

$$s_m(t) = M \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x_{m,k} \cdot \exp\left\{ j \frac{2p}{T} \left(k - \frac{N-1}{2} \right) \cdot t \right\}, \quad (1)$$

где m – номер блока данных;

M – амплитуда;

$f_k = f_0 + \dfrac{k}{T}$ – поднесущая частота;

$\exp\left\{-j\frac{p\,(N-1)}{T}\cdot t\right\}$ – множитель, обеспечивающий центрирование полосового сигнала относительно поднесущей частоты f_k.

Если длина блока выбрана так, что $T=NT_s >>LT_s$, где LT_s – длительность импульсной характеристики канала поднесущей частоты, то межсимвольная интерференция значительно снижается [1].

Следует обратить внимание на то, что в суммарном сигнале частотные спектры частично перекрываются. Причем перекрытие спектра производится таким образом, что максимум спектральной плотности для любой поднесущей всегда соответствует минимальному значению первого лепестка соседних поднесущих. В этом случае скалярное произведение соседних частотных спектров не равно нулю только на частотах максимальных значений поднесущих. В этом смысл ортогональности.

Главным достоинством метода OFDM, обусловившим его широкое применение, является то обстоятельство, что модуляция и демодуляция сигналов могут быть выполнены в дискретной форме с использованием дискретного преобразования Фурье.

Однако известно [11-13], что частотная характеристика прямоугольного импульса имеет вид, описываемый выражением (Sin(x))/x, что не позволяет говорить об оптимальности этого типа сигнальной конструкции при решении задач минимизации влияния смежных символов и каналов друг на друга.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

В предлагаемом методе используется новый принцип формирования дискретных оптимальных канальных сигналов, основанный на решении вариационной задачи, приведенной в [14], по минимизации просачивания энергии сигнала за выделенный частотный интервал. Математически это выражается следующим соотношением:

$$\left\|\vec{x}\right\|^2 - P_r = \vec{x}'(\mathbf{I}-\mathbf{A}_r)\cdot\vec{x} = \min, \qquad (2)$$

где P_r – энергия в заданном частотном интервале, длительность которого равна $(n_{r+1} - n_r)$;

$\mathbf{I} = diag(1,...,1)$ – единичная матрица;

$\mathbf{A}_r = \{a_{ik}\}$ – субполосная матрица, соответствующая r-ому частотному интервалу с элементами вида:

$$a_{ik}^r = \begin{cases} \dfrac{\sin[v_r(i-k)] - \sin[v_{r-1}(i-k)]}{p\,(i-k)}, & i \ne k \\ \dfrac{v_r - v_{r-1}}{p}, & i = k \end{cases} . \qquad (4)$$

Здесь предполагается выполнение неравенства $0 \le n_r < n_{r+1} \le p$.

Для формирования канальных сигналов необходимо вычислить собственные вектора и собственные числа матрицы $\mathbf{A}_r$.

$Q = (\vec{q}_1, \vec{q}_2, ..., \vec{q}_J)$ $\vec{q}_J$ – собственные вектора субполосных матриц.

λ_i .- собственные числа векторов q_i , $l_1 > l_2 > ... > l_j \approx 1$,

где $i,k = 1,..,N$.

Таким образом, формирование канальных сигналов происходит следующим образом:

$$\vec{x} = Q\cdot\vec{e}; \qquad (5)$$

просачивающаяся за выделенный частотный интервал, существенно меньше, чем в сигналах, сформированных классическим методом (рис. 4).

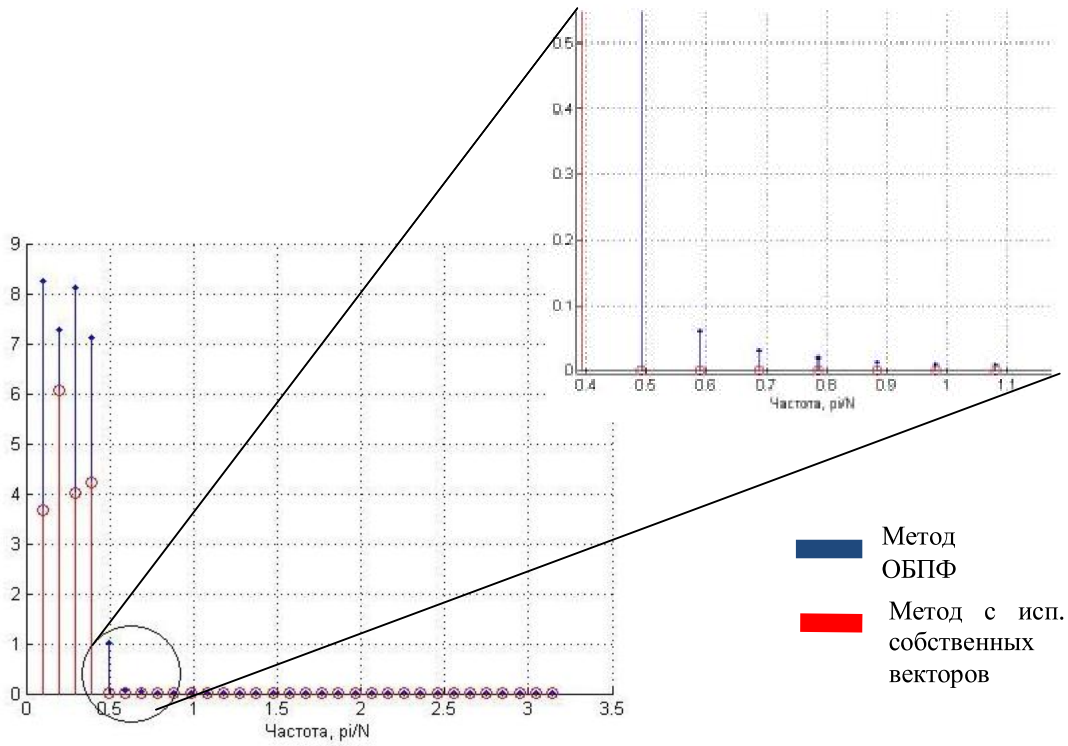

Рисунок 4 – Частотные спектры сформированных сигналов

ВЫВОДЫ

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что предлагаемый способ формирования канальных сигналов может эффективно применяться в системах с OFDM. При этом сформированный канальный сигнал обладает максимальной концентрацией энергии в заданной частотной области, что позволяет задействовать для приёма и передачи информации весь доступный частотный диапазон. Таким образом, достигается эффективное использование выделенного частотного ресурса и существенно снижается межканальная и межсимвольная интерференция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А.Н. Цифровые системы связи / М.: Эко-Трендз, 2007. – С. 294.
2. Еременко А.И., Пименов В.А. Этапы развития и преимущества применения технологии ортогонального частотного мультиплексирования / Телекоммуникации. – №12, 2007.– С.18-21.
3. Уиппл Д. Концепции ортогонального частотного разделения каналов OFDM. «Электронные компоненты».– № 9, 2008.– С. 33-38.
4. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи – М.: Техносфера, 2004.
5. Филин С.А. Уменьшение помех в сети mobile WiMAX с многопользовательским разнесением / С.А. Филин, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков. – «Электросвязь».– №3, 2008.
6. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000.
7. Хилько В.О. Некоторые аспекты применения технологии OFDM в системах мобильной связи. – «Мобильные системы».– №7, 2007.– С.6-9.
8. Волчков В.П., Петров Д.А. Оптимизация базиса Вейля-Гейзенберга для цифровых систем связи, использующих принцип OFDM/OQAM передачи / Научные Ведомости БелГУ.–

№1 (56).– Выпуск 9/1, 2009. – С. 102-112.

9. Сюваткин В.С. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.– С. 99-105.
10. Ahmad R.S. Bahai., Burton R. Salzberg. Multi-Carrier Digital Communication. Theory and Application of OFDM. Kluwer Academic/Plenum Publishers. – New York, 2007.
11. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2006.
12. Голд Б., Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 376 с.
13. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для студ. ВУЗов. – СПб.: Питер, 2002. – 603 с.: ил.
14. Жиляков Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным: монография. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007.

Жиляков Евгений Георгиевич
Белгородский государственный университет, г. Белгород
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии»
Тел.: (4722) 30-13-92
E-mail: Zhilyakov@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович
Белгородский государственный университет, г. Белгород
Кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Компьютерные науки и телекоммуникации»
Тел.: (4722) 30-13-50
E-mail: Belov@bsu.edu.ru

Маматов Евгений Михайлович
Белгородский государственный университет, г. Белгород
Кандидат технических наук, доцент, зам. декана по учебной работе факультета «Компьютерные науки и телекоммуникации»
Тел.: (4722) 30-13-52
E-mail: Mamatov@bsu.edu.ru

Ушаков Дмитрий Игоревич
Белгородский государственный университет, г. Белгород
Ассистент кафедры «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии»
Тел.: (4722) 30-13-00
E-mail: Ushakov_d@bsu.edu.ru

Старовойт Иван Александрович
Белгородский государственный университет, г. Белгород
Ассистент кафедры «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии»
Тел:. (4722) 30-13-00
E-mail: Starovoit@bsu.edu.ru

E.G. ZHILYAKOV, S.P. BELOV, E.M. MAMATOV, D.I. USHAKOV, I.A. STAROVOJT

ABOUT POSSIBILITY OF INCREASING THE EFFICIENCY USING DEDIKATED FREQUENCY RESOURCE IN SYSTEMS WITH OFDM

In the article the method of increase of efficiency of the use of the dedicated frequency resource is offered in the systems with OFDM. The offered method allows to form channel signals with the maximal concentration of energy in the set frequency bar. Thus, possibility to involve for passing to useful information appears, entered presently, protective frequency intervals in the spectrum of OFDM of signal. A computer design shows that application of the offered method allows to reduce interchannel interference and thus to promote efficiency of the use of the dedicated frequency resource.

Keywords: *OFDM; signal basis; subband matrix; frequency resource; channel signals; concentration of energy; subcarrier frequencies; efficiency of the use of frequency resource.*

BIBLIOGRAPHY

1. Berlin A.N. Cifrovy'e sistemy' svyazi / M.: Eko-Trendz, 2007. – S. 294
2. Eremenko A.I., Pimenov V.A. Etapy' razvitiya i preimushhestva primeneniya texnologii orthogonal`nogo chastotnogo mul`tipleksirovaniya / Telekommunikacii. – №12, 2007.– S.18-21.
3. Uippl D. Koncepcii orthogonal`nogo chastotnogo razdeleniya kanalov OFDM. «Elektronny'e komponenty'».– № 9, 2008.– S. 33-38.
4. Shaxnovich I.V. Sovremenny'e texnologii besprovodnoj svyazi. – M.: Texnosfera, 2004.
5. Filin S.A., Umenshenie pomex v seti mobile WiMAX s mnogopol`zovatel`skim razneseniem / S.A. Filin, S.N. Moiseev, M.S. Kondakov «Elektrosvyaz`».– №3, 2008.
6. Prokis Dzh. Cifrovaya svyaz`: per. s angl. / pod red. D.D. Klovskogo. – M.: Radio i svyaz`, 2000.
7. Xil`ko V.O. Nekotory'e aspekty' primeneniya texnologii OFDM v sistemax mobil`noy svyazi. «Mobil`ny'e sistemy'».– №7, 2007.– S.6-9.
8. Volchkov V.P., Petrov D.A. Optimizaciya bazisa Vejlya-Geyzenberga dlya cifrovy'x sistem svyazi, ispol`zuyushhix princip OFDM/OQAM peredachi / Nauchny'e Vedomosti BelGU.– №1 (56).– vy'pusk 9/1, 2009.– S. 102-112.
9. Syuvatkin V.S. WiMAX – texnologiya besprovodnoj svyazi: osnovy' teorii, standarty', primenenie / V.S. Syuvatkin, V.I. Esipenko i dr. SPb.: BKhV-Peterburg, 2005.– S. 99-105.
10. Ahmad R.S. Bahai., Burton R. Salzberg. Multi-Carrier Digital Communication. Theory and Application of OFDM. Kluwer Academic/Plenum Publishers. – New York, 2007.
11. Oppengeym A., Shafer R. Cifrovaya obrabotka signalov M.: Texnosfera, 2006.
12. Gold B., Reyder Ch. Cifrovaya obrabotka signalov: per. s angl. / M.: Sov. radio, 1973. – 376 s.
13. Sergienko A.B. Cifrovaya obrabotka signalov: ucheb. posobie dlya stud. VUZov / SPb.: Piter, 2002. – 603 s.: il.
14. Zhilyakov E.G. Variacionny'e metody' analiza i postroeniya funkcij po empiricheskim danny'm: monogr. – Belgorod: Izd-vo BelGU, 2007.