УДК 621.396

С.П. Белов, Д.И. Ушаков, С.Б. Зуза

НИУ Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛОВ С OFDM

В статье предлагается метод повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций с OFDM, основанный на использовании в качестве сигнального базиса при формировании канальных сигналов собственных векторов субполосных матриц со значением собственных чисел близких к единице. С использованием компьютерного моделирования показано, что его применение позволяет повысить устойчивость к влиянию флуктуационных, узкополосных и импульсных помех в 2 раза по сравнению с классическими OFDM сигналами.

Ключевые слова: *OFDM, сигнальный базис, субполосная матрица, помехоустойчивость, канальные сигналы, флуктуационная помеха, узкополосная помеха, импульсная помеха, эффективность системы связи.*

Введение

Постановка проблемы. В связи со значительным увеличением потоков удаленного информационного обмена в настоящее время создаются системы связи, обеспечивающие высокую скорость их передачи с заданным качеством обслуживания, среди которых бесспорным лидером являются системы использующие Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) [1 – 3]. Данный метод формирования канальных сигналов обладает высокой спектральной эффективностью, однако на канальном уровне остаётся достаточно уязвимым к определенным видам помех [4]. Указанный недостаток компенсируется за счет использования сложных алгоритмов помехоустойчивого кодирования и перемежения символов, но данный подход существенно увеличивает время формирования и обработки сигнала в аппаратуре связи, уменьшая тем самым её эффективность [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ научно-технической литературы показал, что среди работ, посвященных исследованию вопроса повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций с OFDM, в основном предлагаются методы и алгоритмы, основанные на введении избыточности и использовании дополнительных циклов и алгоритмов кодирования [6 – 8]. Немаловажными являются работы по разработке альтернативных способов модуляции OFDM сигнала, одним из авторов которых является Г.Н. Бочков. В частности, можно выделить предлагаемый им способ относительной фазовой модуляции OFDM сигнала рассматриваемый в работе [9], который позволяет обеспечивать потенциальную помехоустойчивость приема в каналах с АБГШ. Необходимо отметить, что такие подходы являются достаточно эффективными решениями, но увеличивают время обработки сигнала в устройстве и его избыточность, что не всегда оправдано.

Цель статьи – предложить метод повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций с OFDM на основе применения нового сигнального базиса собственных векторов субполосных матриц.

Математическая модель предлагаемого решения

Формирование дискретных оптимальных канальных сигналов в предлагаемом методе осуществляется в результате решения вариационной задачи по минимизации просачивания энергии сигнала за пределы выделенного частотного интервала, которая в математическом виде может быть представлена следующим соотношением:

$$\|\vec{x}\|^2 - P_r = \vec{x}^T(\mathbf{I} - \mathbf{A}_r)\cdot\vec{x} = \min, \qquad (1)$$

где $\vec{x}$ – отсчеты сформированного канального сигнала, представленные в виде вектора;

P_r – энергия сигнала в заданном частотном интервале, ширина которого составляет $(\nu_{r+1} - \nu_r)$;

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

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

$$a_{ik}^r = \begin{cases} \dfrac{\sin[\nu_r(i-k)] - \sin[\nu_{r-1}(i-k)]}{\pi(i-k)}, & i \neq k, \\ \dfrac{\nu_r - \nu_{r-1}}{\pi}, & i = k. \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь предполагается выполнение неравенства $0 \le \nu_r < \nu_{r+1} \le \pi$.

В методе с использованием выражения (1) находится такой набор собственных векторов $\vec{q}_j$ матрицы $\mathbf{A}_r$, собственные числа которых близки к единице, т.е.

$$\lambda_1 > \lambda_2 > ... > \lambda_j \approx 1$$

Выполнение условия (2) является определяющим, так как только в этом случае может быть

© С.П. Белов, Д.И. Ушаков, С.Б. Зуза

сформирован базис собственных векторов субполосных матриц, при использовании которого для формирования канального сигнала будет обеспечен минимальный уровень просачивания его энергии за пределы выделенного частотного интервала.

Действительно, так как собственные числа λ_j равны долям энергии собственных векторов $\vec{q}_j$, которые попадают в выделенный частотный интервал, и в соответствии с равенством общей энергии единице выполняются неравенства $\lambda_j \le 1$. Тогда просачивание энергии собственного вектора за пределы выделенного частотного интервала будет равно $1-\lambda_j$. Отсюда явно видно: чем ближе значения λ_j к единице, тем меньше уровень просачивания энергии за пределы выделенного частотного интервала.

Таким образом, формирование канальных сигналов происходит следующим образом:

$$x_{mN} = \sum_{k=1}^{N} y_{m,k} \cdot q_k(t); \qquad (3)$$

где x_{mN} – отсчеты сформированного канального сигнала длительностью N; $y_{m,k}$ – m-й блок длительностью N, информационные символы которого передаются параллельно.

Также для формирования канальных сигналов можно воспользоваться другими соотношениями, но при этом они будут тождественными (3).

Необходимо сформировать матрицу Q, состоящую из набора таких собственных векторов $\vec{q}_j$, которые имеют значения собственных чисел, близких к единице, т.е. $\lambda_j \approx 1$.

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

Таким образом, формирование канальных сигналов происходит следующим образом:

$$\vec{x} = Q \cdot \vec{e}; \qquad (4)$$

где $\vec{x}$ – сформированный канальный сигнал; $\vec{e} = (e_1, e_2, ..., e_J)$ – информационный вектор, который может быть получен из блока $y_{m,k}$ размерностью N.

Необходимо отметить, что энергия сигнала за пределами заданного частотного интервала вычисляется согласно выражению вида:

$$E_{ПР} = \sum_{i=1}^{J} e_i^2 (1-\lambda_i). \qquad (5)$$

В виду свойства ортогональности собственных векторов субполосных матриц для их восстановления из группового канального сигнала в режиме частотного уплотнения можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\vec{e}' = Q^T \cdot \vec{x}. \qquad (6)$$

Предлагаемый метод позволяет определить канальный сигнал $\vec{x}$, оптимальный в смысле минимума просачивания энергии за пределы выделенного частотного интервала, при сохранении точных значений информационного вектора.

Результаты компьютерного моделирования

Оценка влияния помех проводилась с использованием компьютерного моделирования в среде MatLAB. Ввиду того, что одним из наиболее важных требований, предъявляемых к системам радиосвязи, является верность передаваемой от источника сообщения к получателю информации, то в качестве критерия оценки влияния помехи на сигнал целесообразно использовать вероятность ошибки на бит (BER).

Моделирование осуществлялось по следующему алгоритму:

– генерировалась бинарная ПСП последовательность, которая являлась передаваемыми данными;

– используя полученную ПСП, формировались канальные сигналы с использованием традиционного метода, основанного на использовании ортогонального базиса Фурье и предложенного в работе метода, причем сигналы синтезировались в одинаковой полосе частот (20МГц) и с равной длительностью (12.8 мкс.) [11];

– с каждым из сформированных сигналов складывалась сгенерированная разновидность помехи заданной мощности;

– полученные сигналы демодулировались и вычислялось отношение ошибочно принятых бит к общему количеству переданных.

Результаты помехоустойчивости для сигнала OFDM стандарта 802.16d-Fixed WiMAX (кривые №1) соответствуют результатам, представленным в ряде авторитетных источников [12 – 14], что свидетельствует об адекватности используемых компьютерных моделей и достоверности полученных результатов.

Влияние флуктуационной помехи

Необходимо отметить, что используемый в данном исследовании тип помех обусловлен хаотическим тепловым движением электронов и ионов в элементах самого приёмника. Основными источниками этих шумов являются полупроводниковые приборы, усилительные каскады и т.д. Характерной особенностью этого вида помех является то, что они независимы от сигнала и имеют место даже в том случае, когда сигнал на входе приёмника отсутствует [15].

Используемая в моделировании помеха характеризуется плотностью вероятности и описывается следующим выражением:

$$щ(x) = \frac{1}{y\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2y^2}\right], \qquad (10)$$

где $\omega(x)$ – плотность вероятности случайной величины; σ^2 – дисперсия случайной величины; m – математическое ожидание случайной величины.

Полученные в результате моделирования значения вероятности ошибки на бит были аппроксимированы кривыми и представлены на рис. 1.

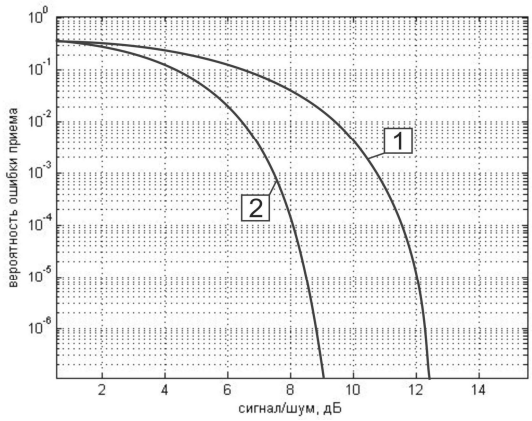

Рис. 1. Вероятность ошибки на бит (BER) при использовании:
а – классического OFDM (кривая № 1); б – сигнала, сформированного на основе собственных векторов субполосных матриц (кривая № 2)

Влияние узкополосной помехи

Рассматриваемый тип помех имеет относительно длительный во времени характер и может создаваться сигналами посторонних радиостанций, например, вещательными или телевизионными, так и излучениями генераторов высокой частоты различного назначения (промышленными, медицинскими), что особенно актуально в условиях современных промышленных городов. В эксперименте данная помеха представлялась временным отрезком синусоидального сигнала длительностью 12.8 мс, что соответствует длительности OFDM символа в стандарте IEEE 802.16d (Fixed WiMAX) и частотой из диапазона сигнала с различной амплитудой. Частотный спектр такой узкополосной помехи представлен на рис. 2.

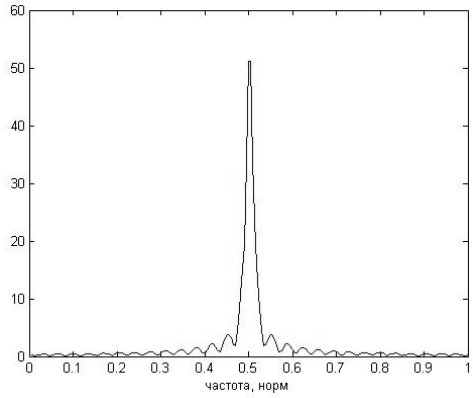

Рис. 2. Частотный спектр узкополосной помехи

Полученные в результате моделирования значения вероятности ошибки на бит были аппроксимированы кривыми и представлены на рис. 3.

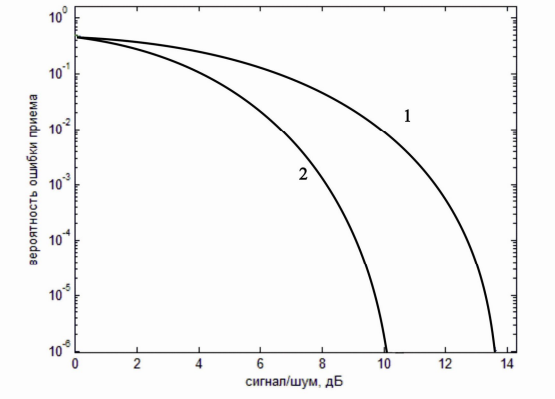

Рис. 3. Вероятность ошибки на бит (BER) при использовании:
а – классического OFDM (кривая № 1); б – сигнала, сформированного на основе собственных векторов субполосных матриц (кривая № 2)

Влияние импульсной помехи

Под импульсной помехой принято понимать такую регулярную или хаотичную последовательность мешающих импульсов, когда за время длительности элемента сигнала T на вход приемного устройства поступает один или несколько импульсов. Мешающим импульсом является любая помеха, длительность которой значительно меньше длительности элемента сигнала и обычно составляет порядка 10^{-5} – 10^{-9} с. Несмотря на то, что импульсная помеха действует весьма короткое время, она может существенно снизить верность передаваемой информации. Ввиду того, что её спектр заполняет всю полосу частот приёмника, энергия её может оказаться весьма значительной [16].

Используемый в исследовании тип помех создаётся электрооборудованием и различными электронными приборами, электротранспортом, линиями электропередачи и другими техническими средствами. При работе электроустройств радиопомехи возникают вследствие резких изменений тока и напряжения в электрических цепях, сопровождающихся часто искрением, например при разрывах контактов или при скольжении щеток электрических машин по коллектору. В результате создаётся непрерывный спектр помех, охватывающий полосу частот, используемую для радиосвязи, радиовещания и телевидения, что особенно актуально в условиях современных промышленных городов. Полученные в результате моделирования значения вероятности ошибки на бит были аппроксимированы кривыми и представлены на рис. 4.

Выводы

Из полученных результатов можно сделать вывод, что применение базиса собственных векторов субполосных матриц для формирования канальных сигналов OFDM позволяет повысить их устойчивость к воздействию флуктуационной, узкополосной

и импульсной помехи в среднем на 3 дБ, по сравнению с сигналами сформированных классическим способом на основе базиса Фурье.

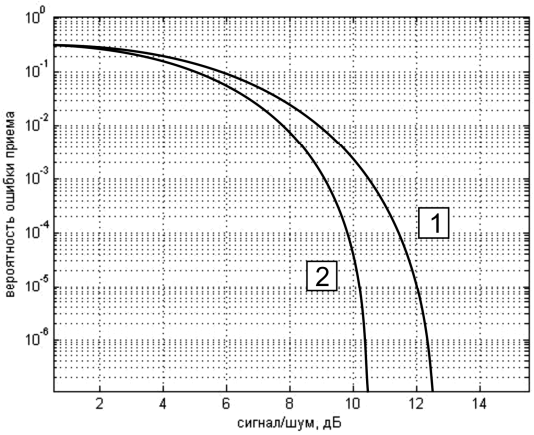

Рис. 4. Вероятность ошибки на бит (BER) при использовании:
а – классического OFDM (кривая № 1); б – сигнала, сформированного на основе собственных векторов субполосных матриц (кривая № 2)

Предлагаемый подход обеспечивает устойчивую работу систем радиосвязи в условиях плохой электромагнитной обстановки и не требует введение дополнительных устройств и алгоритмов кодирования, а также увеличения избыточности сигналов, что не снижает эффективность систем связи.

Список литературы

1. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура / В.О. Тихвинский. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 128 с.

2. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2004. – 187 с.

3. Еременко А.И. Этапы развития и преимущества применения технологии ортогонального частотного мультиплексирования / А.И. Еременко // Телекоммуникации. – 2007. – №12. – С. 18-21.

4. Филин С.А. Уменьшение помех в сети mobile WiMAX с многопользовательским разнесением / С.А. Филин // Электросвязь. – 2008. – №3. – С. 45-47.

5. Хилько В.О. Некоторые аспекты применения технологии OFDM в системах мобильной связи / В.О. Хилько // Мобильные системы. – 2007. – №7. – С. 6-9.

6. Иванов Ю.А. Структура и помехоустойчивость систем беспроводного доступа с OFDM / Ю.А. Иванов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2009. – №3, Т5. – С. 25-29.

7. Андрианов М.Н. Повышение помехоустойчивости при передаче информации по OFDM каналу в сложной помеховой обстановке / М.Н. Андрианов // Электросвязь. – 2010. – №7. – С. 38-41.

8. Давыдов А.В. Анализ помехоустойчивости OFDMA-систем связи, работающих при наличии интерферирующих станций / А.В. Давыдов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, №6. – С. 533-543.

9. Бочков Г.Н. Способ относительной фазовой модуляции OFDM-сигналов / Г.Н. Бочков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского: Серия Радиофизика. – 2009. – №2. – С. 62-70.

10. Жиляков Е.Г. Вариационные метода анализа и построения функций по эмпирическим данным / Е.Г. Жиляков. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 54 с.

11. Сюваткин В.С. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – С. 99-105.

12. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – С. 566-567.

13. Ahmad R.S. Bahai. Multi-Carrier Digital Communication. Theory and Application of OFDM / Ahmad R.S. Bahai, Burton R. Salzberg. – Kluwer Academic/Plenum Publishers. – New York, 2007. – P. 42-43.

14. Schulze Henrik. Theory end Application of OFDM and CDMA. Wideband Wireless Communications / Henrik Schulze, Christian Luders // British library Cataloguing in Publication Data.: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. – С. 21-22.

15. Сикарев А.А. Оптимальный прием дискретных сообщений / А.А. Сикарев, А.И. Фалько. – М.: Связь, 1978. – 328 с.

16. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер. – М.: Радио и связь, 2000. – 42 с.

Поступила в редколлегию 18.01.2012

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Н.А. Бондаренко, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕШКОДОСТІЙКОСТІ СИГНАЛІВ З OFDM

С.П. Белов, Д.І. Ушаков, С.Б. Зуза

У статті пропонується метод підвищення перешкодостійкості сигнально-кодових конструкцій з OFDM, заснований на використанні як сигнального базису при формуванні канальних сигналів власних векторів субсмугових матриць із значенням власних чисел близьких до одиниці. З використанням комп'ютерного моделювання показано, що його застосування дозволяє підвищити стійкість до впливу флуктуаційних, вузькосмугових і імпульсних перешкод в 2 рази в порівнянні з класичними сигналами OFDM.

Ключові слова: *OFDM, сигнальний базис, субсмугова матриця, перешкодостійкість, канальні сигнали, флуктуаційна перешкода, вузькосмугова перешкода, імпульсна перешкода, ефективність системи зв'язку.*

ABOUT POSSIBILITY OF INCREASING IMMUNITY OF SIGNALS WITH OFDM

S.P. Belov, D.I. Ushakov, S.B. Zuza

In the article the method of increase of antijammingness of alarm-code constructions is offered with OFDM, based on the use as an alarm base at forming of channel signals of own vectors of subbar matrices with the value of own numbers near to unit. It is rotined with the use of computer design, that his application allows to promote stability to influence of fluctuation, narrow-band and impulsive hindrances in 2 times as compared to the classic OFDM signals.

Keywords: *OFDM, alarm base, subbar matrix, antijammingness, channel signals, fluctuation hindrance, narrow-band hindrance, impulsive hindrance, efficiency of communication network.*