

Д.т.н., проф. Е.Г. Жилияков, к.т.н., проф. С.П. Белов,
Д.И. Ушаков (НИУ «БелГУ»)

E.G. Zhilyakov, S.P. Belov, D.I. Ushakov

**СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ
КАНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ С OFDM**

**COMPARISON OF ALGORITHMS
OF CHANNEL SIGNALS IN SYSTEMS WITH OFDM**

В статье проводится оценка спектральной эффективности канальных сигналов OFDM, сформированных на основе применения ортогонального базиса собственных векторов субполосной матрицы. Показано, что сигналы подобного класса обладают спектральной эффективностью на 20% большей, чем сигналы OFDM, сформированные на основе базиса Фурье, за счет уменьшения величины защитного интервала.

In article conducted the effectiveness of the spectral channel signals OFDM, formed on the basis of orthogonal basis of eigenvectors subband matrix. Shows that the signals of this class have the spectral efficiency is 20% greater than the signals of OFDM, formed on cosine Fourier basis by reducing the value of the guard interval.

Ключевые слова: OFDM, сигнальный базис, субполосная матрица, частотный ресурс, канальные сигналы, концентрация энергии, поднесущая частота.

Key words: OFDM, signal basis, a subband matrix, a frequency resource, channel signals, concentration of energy, subcarrier frequencies.

Введение

Современное развитие информационно-телекоммуникационных систем ориентировано на удовлетворение всё возрастающих потребностей пользователей в информационном обмене с высокой скоростью передачи данных вне зависимости от местоположения. Достаточно часто потребность абонентов в высокой скорости передачи информации превышает возможности каналов связи для обеспечения данного сервиса из-за большой загруженности частотного диапазона, выделенного оператору связи [1]. Таким образом, в современных системах широкополосного беспроводного доступа стремятся применять спектрально-эффективные методы

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

формирования канальных сигналов, такие как OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), что необходимо для осуществления максимальной скорости передачи информации в выделенном частотном ресурсе.

Однако, в [2-4] отмечалось, что указанный метод формирования сигналов из-за медленного спада частотной характеристики обладает высоким уровнем внеполосных излучений, для компенсации которых необходимо вводить защитные интервалы в частотной области, что позволяет обеспечить минимальный уровень межканальной интерференции, но существенно снижает эффективность использования выделенного частотного ресурса. В указанных работах также предлагается один из методов повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса на основе применения альтернативного сигнального базиса, однако с позиции спектральной эффективности этот вопрос не рассматривался. Поэтому представляется актуальным оценить спектральную эффективность предлагаемого класса канальных сигналов, сформированных на основе собственных векторов субполосных матриц с использованием средств вычислительной техники.

Суть метода повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса заключается в том, что вместо базиса Фурье, применяемого в настоящее время для формирования канальных сигналов в системе WiMAX, используется базис собственных векторов субполосных матриц, векторы которого обладают лучшей частотно-временной локализацией, обеспечивая меньший уровень внеполосных излучений синтезируемого канального сигнала. Математический аппарат подробно представлен в [5].

Результаты компьютерного моделирования

В результате компьютерного моделирования было показано, что сигналы, сформированные на основе базиса собственных векторов субполосных матриц обладают достаточно низким уровнем внеполосных излучений (рис.1). Более того, согласно (3), степень локализации энергии в выделенном частотном интервале можно изменять, выбирая такие собственные векторы, собственные числа которых не превышают заданного значения. Это значение будем называть «коэффициентом локализации» и выражать в процентах. На рисунке показано, как изменяется уровень внеполосных излуче-

ний синтезируемого сигнала (концентрация энергии в заданном частотном интервале) при изменении коэффициента локализации. Сплошной линией показана спектральная плотность классического OFDM сигнала применяемого в настоящее время в системах WiMAX (ширина полосы – 20 МГц, длительность полезной части сигнала – 12,8 мкс., количество поднесущих – 256).

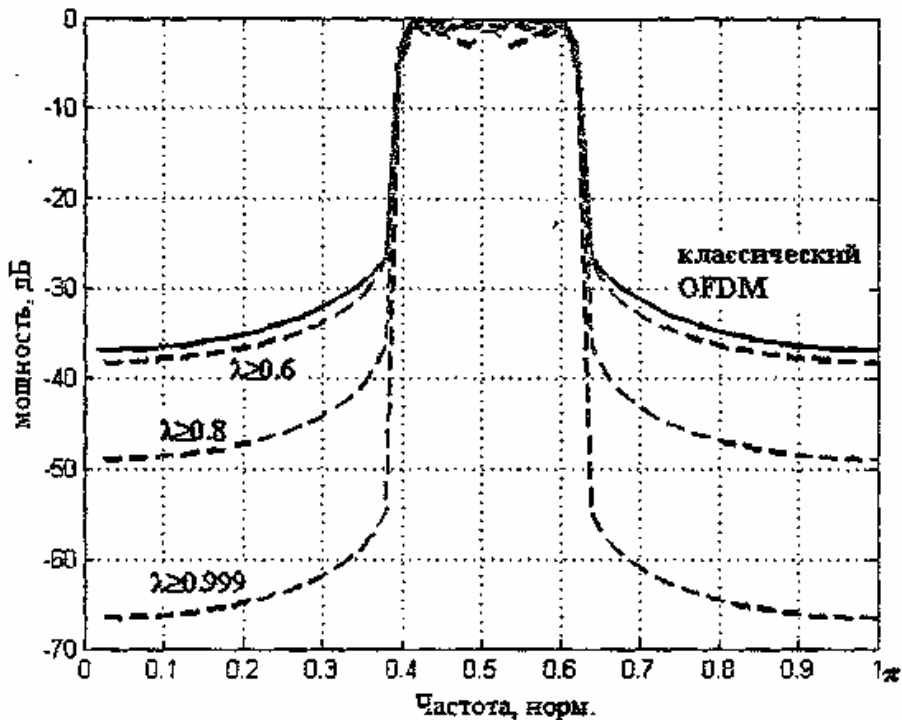


Рис. 1

Спектральные плотности синтезируемого сигнала при различных λ

Можно заметить, что данный сигнал обладает высоким уровнем внеполосных излучений ≈ -37 дБ, что свидетельствует о низкой степени локализации канального сигнала. Как видно из рисунка, сигнал с таким же уровнем внеполосных излучений можно синтезировать, если использовать собственные векторы со степенью локализации ≈ 0.6 . т.е. 60%.

Необходимо также отметить, что при уменьшении коэффициента локализации от $\lambda \geq 0.999$ (99.9%) до $\lambda \geq 0.6$ (60%) увеличивает количество используемых для передачи информации векторов, поэтому число передаваемых символов также возрастает. Зависимость количества передаваемых символов от значения степени локализации энергии отражена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры синтезируемых сигналов при различных значениях λ

| Значение λ | Количество используемых векторов | Уровень внеполосных излучений, сигнала, дБ |
|--------------------|----------------------------------|--|
| 0.6 | 256 | -30 |
| 0.8 | 254 | -50 |
| 0.9 | 252 | -55 |
| 0.95 | 250 | -58 |
| 0.99 | 248 | -62 |
| 0.999 | 246 | -65 |

Таким образом, используя свойство минимизации энергии за выделенным частотным диапазоном в синтезируемых канальных сигналах можно снизить требования к величине защитного интервала. Это позволяет формировать канальный сигнал в более широкой полосе частот, не превышая при этом границы выделенного частотного ресурса, что обеспечит передачу большего количества информационных символов в одном канале при соблюдении минимального уровня внеполосных излучений (рис. 2).

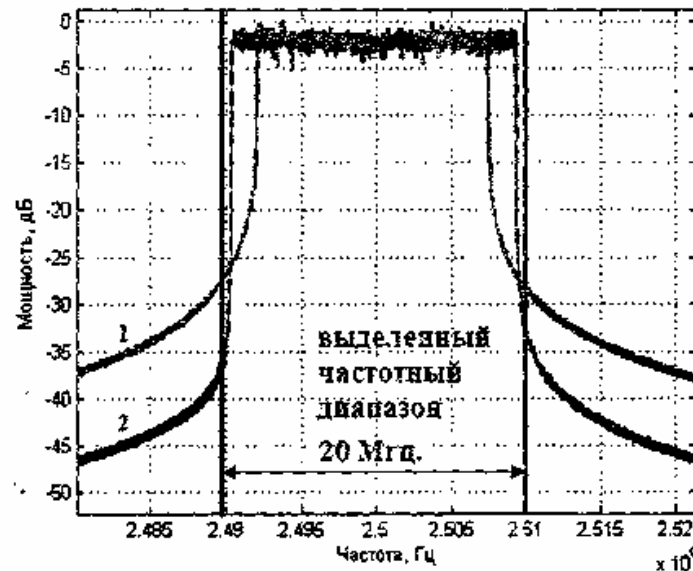


Рис. 2

Спектральные плотности сигналов
(1 – классический сигнал в системе WiMAX; 2 – сигнал, сформированный с использованием предлагаемого метода)

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

За счет применения квадратурной модуляции для передачи сигнала на приёмной стороне для выделения переданного сигнала из общего группового спектра не требуется наличия канальных фильтров с формой АЧХ близкой к прямоугольной.

$$S_{QAM}(t) = a(t) \cos(2\pi f_n t) + b(t) \sin(2\pi f_n t); \quad (1)$$

Известно [6-7], что для демодуляции (6) КАМ-сигнала его обработка должна осуществляться с помощью умножения принятого сигнала на опорные колебания несущей частоты, отличающиеся по фазе на $\pi/2$ и дальнейшей их фильтрацией ФНЧ в тракте приёмника в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} y_I(t) &= S_{QAM}(t) \cos(2\pi f_n t) = (a(t) \cos(2\pi f_n t) + b(t) \sin(2\pi f_n t)) \cos(2\pi f_n t) = \\ &= \frac{1}{2} a(t) + \frac{1}{2} a(t) \cos(2\pi 2 f_n t) + \frac{1}{2} b(t) \sin(2\pi 2 f_n t); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y_Q(t) &= S_{QAM}(t) \sin(2\pi f_n t) = (a(t) \cos(2\pi f_n t) + b(t) \sin(2\pi f_n t)) \sin(2\pi f_n t) = \\ &= \frac{1}{2} b(t) + \frac{1}{2} a(t) \sin(2\pi 2 f_n t) - \frac{1}{2} b(t) \cos(2\pi 2 f_n t); \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда следует, если не требуется фильтрация группового сигнала для выделения нужного канала, то можно уменьшить величину защитных интервалов и размещение канальных сигналов в частотной области окажется более компактным. Причем ограничивающими факторами будут - уровень межканальной интерференции и частотный резерв, в случае возникновения джиттера несущего колебания для обеспечения требуемого уровня межканальной интерференции. Так были проведены эксперименты с использованием компьютерного моделирования оценки минимально-допустимого защитного интервала между спектральными плотностями смежных канальных сигналов при условии воздействия частотного джиттера на одного из них. В эксперименте использовались сигналы длительностью 12.8 мс, полоса частот которых составляет 20 МГц, сформированные на основе базиса собственных векторов субплоской матрицы. Сигналы с данными характеристиками используются для передачи информации в системах стандарта IEEE 802.16d (Fixed WiMAX) [9]. Сформированные сигналы умножались на несущие частоты так, чтобы между ними сохранялся заданный защитный

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

интервал, а также на один из канальных сигналов с более высокой нешей частотой воздействовал частотный джиттер в 50 кГц [8]. Далее канальный сигнал, на который джиттер не воздействовал, демодулировался и вычислялась вероятность ошибки принятой кодовой комбинации. Полученные данные сведены в таблицу (табл. 2).

Таблица 2

Результаты оценки минимального защитного интервала

| Величина защитного интервала, Гц | Вероятность ошибки | Уровень межканальной интерференции, дБ | Вероятность ошибки при джиттере 50 кГц |
|----------------------------------|--------------------|--|--|
| 218000 | $1 \cdot 10^{-4}$ | -22 | $1 \cdot 10^{-2}$ |
| 312500 | $1 \cdot 10^{-5}$ | -24 | $1 \cdot 10^{-3}$ |
| 468750 | $1 \cdot 10^{-6}$ | -26 | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| 625000 | $1 \cdot 10^{-6}$ | -28 | $1 \cdot 10^{-5}$ |
| 781250 | $1 \cdot 10^{-6}$ | -30 | $1 \cdot 10^{-6}$ |
| 937500 | $1 \cdot 10^{-7}$ | -32 | $1 \cdot 10^{-6}$ |
| 1093750 | $1 \cdot 10^{-7}$ | -34 | $1 \cdot 10^{-6}$ |
| 1250000 | $1 \cdot 10^{-7}$ | -36 | $1 \cdot 10^{-7}$ |

На основании полученных данных можно утверждать, что допустимый минимальный защитный интервал составляет 1093750 Гц.

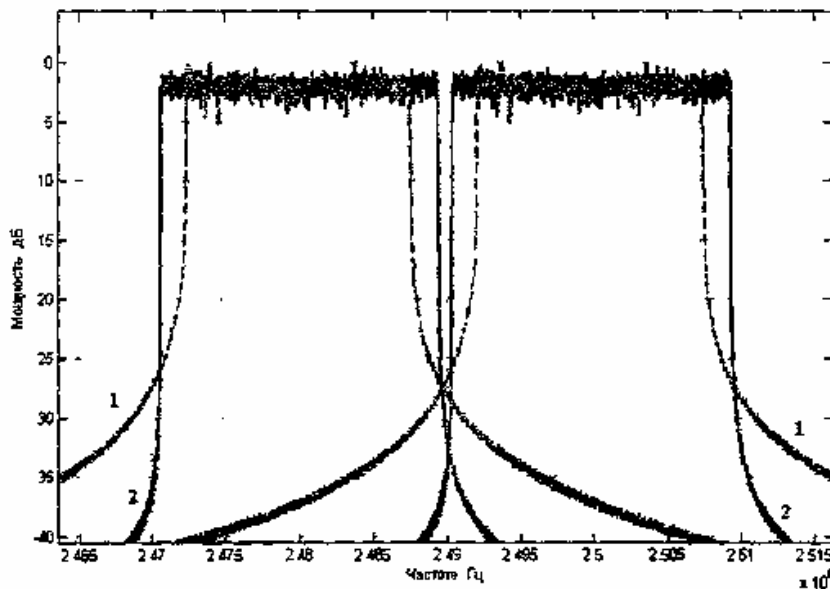


Рис. 3

Спектральные плотности сигналов

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Наличие такого защитного интервала обеспечит заданный уровень межканальной интерференции и достоверность передаваемой информации даже в случае возникновения джиттера несущего колебания. Применение такого защитного интервала между канальными сигналами в общем групповом тракте передачи позволит повысить эффективность использования выделенного частотного ресурса канала связи.

Рассматривая этот вопрос с точки зрения повышения спектральной эффективности, можно отметить, что за счет уменьшения величины защитного интервала соответственно увеличивается спектральная эффективность системы связи. Далее представлен эксперимент для оценки спектральной эффективности предлагаемых сигнально-кодовых конструкций. Результаты проведенных экспериментов сведены в таблицы (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Количество используемых базисных функций
при использовании базиса СВСМ

| Длительность, мкс | Ширина частотного диапазона, МГц | | | | |
|-------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 1,25 | 2,5 | 5 | 10 | 20 |
| 25,6 | 31 | 62 | 124 | 248 | 496 |
| 12,8 | 15 | 31 | 62 | 124 | 248 |
| 6,4 | 7 | 15 | 31 | 62 | 124 |
| 3,2 | 3 | 7 | 15 | 31 | 62 |
| 1,6 | 1 | 3 | 7 | 15 | 31 |

Таблица 4

Количество используемых базисных функций
при использовании базиса Фурье

| Длительность, мкс | Ширина частотного диапазона, МГц | | | | |
|-------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 1,25 | 2,5 | 5 | 10 | 20 |
| 25,6 | 25 | 50 | 100 | 201 | 402 |
| 12,8 | 12 | 25 | 50 | 100 | 201 |
| 6,4 | 6 | 12 | 25 | 50 | 100 |
| 3,2 | 3 | 6 | 12 | 25 | 50 |
| 1,6 | 1 | 3 | 6 | 12 | 25 |

В эксперименте была сформирована совокупность собственных векторов субполосных матриц с различной длительностью от 1.6 до 25.6 мкс, а также для различной ширины частотного интервала от 1.25 до 20 МГц. Далее из полученной совокупности выбирались собственные векторы, собственные числа λ_i , которых удовлетворяют условию $\lambda_i \approx 1$. В качестве сравнения аналогичные вычисления были проведены для сигналов OFDM, сформированных на основе базиса Фурье при таких же частотно-временных ресурсах.

Из табл. 3 и 4 можно заметить, что количество базисных функций собственных векторов субполосных матриц с требуемыми характеристиками находится в линейной зависимости от длительности временного отрезка и ширины частотного интервала, в котором синтезируются данные векторы. Необходимо отметить, что количество сформированных базисных функций с требуемым уровнем внеполосных излучений на 20% больше, чем количество используемых функций в базисе Фурье.

Исходя из проведенных исследований, представляется целесообразным оценить спектральную эффективность сигналов, сформированных на основе собственных векторов субполосных матриц. Для оценки спектральной эффективности необходимо воспользоваться следующим выражением

$$\gamma = \frac{R_{\Sigma}}{\Delta F}; \quad (4)$$

где: R_{Σ} – скорость суммарного (т.е. учитывающего необходимость передачи всех дополнительных бит) цифрового потока, бит/сек;

ΔF – ширина частотной полосы занимаемой сигналом, МГц;

Таблица 5

Спектральная эффективность сигналов

| Вид модуляции | Используемый базис | |
|---------------|--------------------|---|
| | Базис Фурье | Базис собственных векторов субполосных матриц |
| QPSK | 1,57 | 1,96 |
| QAM-16 | 3,14 | 3,9 |
| QAM-64 | 6,28 | 7,78 |

Данные, полученные в результате вычислительных экспериментов, сведены в табл. 5. Значения были рассчитаны исходя из предположения, что полоса, занимаемая сигналом, составляет 20 МГц, длительность OFDM символа – 12.8 мкс, количество поднесущих, на которых передается информация – 201 для базиса Фурье и 248 для базиса собственных векторов субполосных матриц.

Как можно заметить из данных, представленных в табл. 5, канальные сигналы, сформированные на основе базиса собственных векторов субполосной матрицы, имеют спектральную эффективность на 20% больше, чем сигналы, сформированные классическим способом, т.е. на основе базиса Фурье.

Выводы

В результате проведенных исследований свойств канальных сигналов, сформированных на основе применения ортогонального базиса собственных векторов субполосной матрицы, удалось установить, что предлагаемый класс сигналов обладает спектральной эффективностью на 20% большей, чем сигналы, сформированные с использованием базиса Фурье, при одинаковых частотно-временных ресурсах канала связи. Этот факт позволяет утверждать, что применение разработанных сигналов в высокоскоростных широкополосных системах связи позволит повысить эффективность работы системы связи в целом и обеспечить большую скорость передачи информации.

Литература

1. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учеб. пособ. Под ред. Быховского М.А. М., Эко-Трендз, 2006, с. 323-325.
2. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Ушаков Д.И. Об одном методе повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM. – В сб.: Труды междунар. конф. Б.м., 2011.
3. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Старовойт И.А., Ушаков Д.И. Компьютерное моделирование формирования канальных сигналов на основе собственных векторов субполосных матриц. – "Вопросы радиоэлектроники", сер. ЭВТ, 2011, вып. 1.
4. Жилияков Е.Г. Вариационные метода анализа и построения функций по эмпирическим данным. Белгород, БелГУ, 2007.

5. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловско-го. М., Радио и связь, 2000.

6. Жиляков Е.Г., Белов С.П., Ушаков Д.И. Об одном методе повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM. – В сб.: Труды НТОРЭС им. А.С. Попова. М., 2011, вып. XIII-1, с. 188-191.

7. Битнер В.И., Попов Г.Н. Нормирование качества телекоммуникационных услуг: Учеб. пособ. для ВУЗов. 2-е изд., стереотип. М., Горячая линия – Телеком, 2009. 312 с.

8. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М., Техносфера, 2009. 472 с.

9. Кловский Д.Д. Теория передачи сигналов. М., Связь, 1973. 376 с.

Исследования выполнены при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. Гос контракт № 14 740 11 1260 от 17 июня 2011 г

Статья поступила 09 12 2011

Д.т.н., проф. Е.Г. Жиляков, Д.В. Урсол (НИУ «БелГУ»)

E.G. Zhilyakov, D.V. Ursol

**АЛГОРИТМЫ КОДИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

**ALGORITHMS OF CODING AND SIGNAL PROCESSING
WITH NOISE STABILITY OF HIGH SPEED TRANSMISSION
OF INFORMATION**

В статье описан алгоритм кодирования сигналов и обработки полученных данных на основе собственных векторов в заданном диапазоне частот. Приведены результаты компьютерного моделирования вычислительных экспериментов по проверке помехоустойчивости различных методов передачи в информационных коммуникациях при межканальной интерференции.

This paper describes coding algorithm for signal and processing received data based on the eigenvectors in the set frequencies band. Our results of computer simulation computational experiments to test different methods of transferring noise immunity in the information communications with inter-channel interference.