

СИСТЕМЫ ШИРОКО- ПОЛОСНОГО РАДИОДОСТУПА 4 ПОКОЛЕНИЯ:

выбор сигнально-кодовых конструкций

В.Николаев, д.т.н., nikolaev@sozvezdie. su

А.Гармонов, к.т.н., avg@wipline. ru

Ю.Лебедев, leb@leb.vrn.ru

Концерн «Созвездие»

Технологии широкополосного доступа являются ключевыми в развитии инфокоммуникаций 21 века. Основные направления этих технологий определены в международных стандартах четвертого поколения (4G), в частности, – в семействе стандартов IEEE 802.16 (WiMAX). Однако ряд важнейших научно-технических вопросов, относящихся к реализации мобильного беспроводного широкополосного доступа по технологии OFDMA, остаются открытыми. Предлагаемая работа отчасти восполняет этот пробел.

Несмотря на чрезвычайно бурное развитие технологий беспроводного широкополосного доступа на основе технологии OFDM, до сих пор открыты такие вопросы, как:

- учет частотно-временных параметров канала распространения в условиях релейских замираний при больших скоростях движения;
- высокие накладные расходы при передаче речи по технологиям VoIP;
- снижение качества обслуживания из-за низкой внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости

(ЭМС) и доплеровских сдвигов частоты и др.

Нерешенность этих вопросов при реализации мобильного исполнения не позволяет добиться предельных значений помехоустойчивости, пропускной способности и скорости передачи.

Нами проведен ряд исследований для нахождения оптимальных решений перечисленных задач. В основу исследований положен современный подход к проектированию систем передачи данных для нестационарных каналов, заключающийся в расширении алфавита передаваемого сообще-

ния путем преобразования первичного информационного сообщения в многопозиционную сигнально-кодовую конструкцию. Тем самым достигается избыточность сигнала, которая может быть направлена на решение поставленных задач.

Современные радиоэлектронные системы специального и гражданского назначения функционируют, как правило, в условиях сложной радиоэлектронной обстановки, обусловленной влиянием как внутрисистемных, так и внешних помех. Фактически мы имеем дело с дуэльным радиоэлектронным конфликтом (РЭК) между

системой связи (СС) и системой помех (СП), потенциально находящимися в условиях динамического равновесия. Результаты такого дуэльного конфликта могут быть смоделированы на основе эргатического подхода с использованием теоретико-игровых методов анализа [1], поскольку технический конфликт СС–СП – это в конечном счете реализация конфликта людей, спроектировавших эти системы. Как и в игре в шахматы, участникам приходится умозрительно анализировать свои действия (стратегии) за обе стороны и оптимизировать возможные тактико-технические характеристики систем и способы их применения в условиях априорной неопределенности. При этом надо иметь в виду, что теория игр дает решения, оптимальные только в среднем.

В качестве единого показателя эффективности конфликтующих сторон принята средняя вероятность ошибки на бит информации P_E как основная мера помехоустойчивости систем связи. Путем последовательного выбора наиболее оптимальных стратегий со стороны СС и СП этот показатель эффективности максимизируется со стороны СП (максимин) и минимизируется со стороны СС (минимакс). При этом, если обе цены игры близки между собой, такая ситуация является игрой с седловой точкой, при которой определенные пары стратегий определяют как максимин, так и минимакс, а их совокупность является решением игры. В результате предварительного анализа возможных системных стратегий для дальнейшего рассмотрения оставлено шесть конфликтующих пар (комбинаций), образуемых тремя типами у СП (помеха в части полосы, ответная следящая и заградительная помехи) и двумя типами у СС (псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) и широкополосный сигнал (ШПС)). В дальнейшем проводится оптимизация параметров, влияющих на результаты парных конфликтов, в результате которой определяются наилучшие системные стратегии как со стороны СС, так и со стороны СП.

Конфликт между СС с ППРЧ и ответной следящей помехой наиболее сложен. Необходимым условием для эффективного

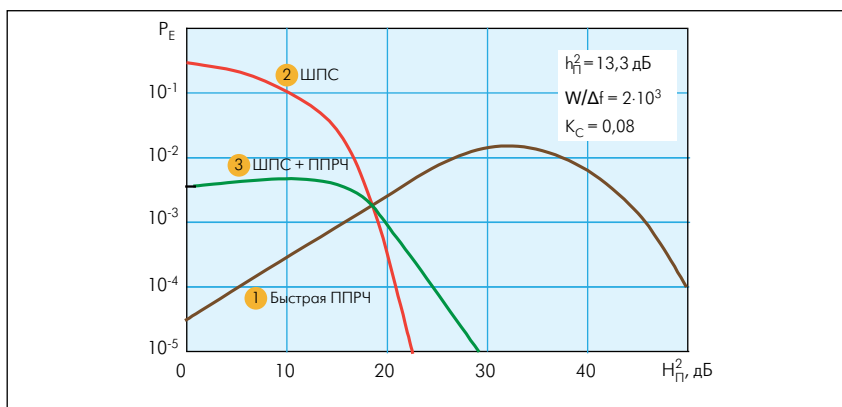


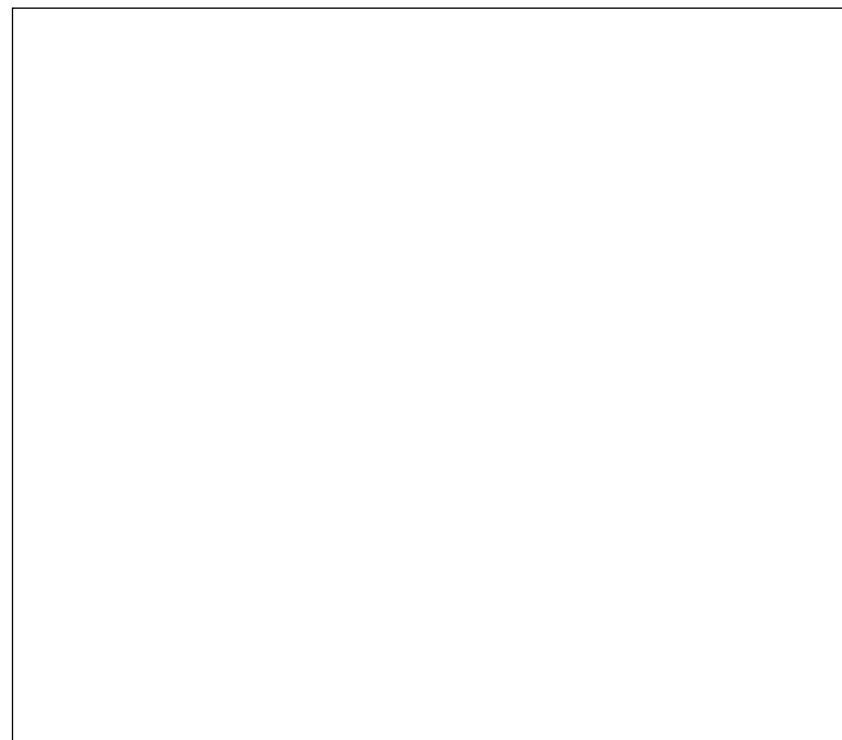
Рис.1. Вероятность ошибки на бит в зависимости от соотношения сигнал/помеха: 1 – быстрая ППРЧ и ответная следящая помеха, 2 – ШПС и заградительная помеха, 3– гибридная технология (ШПС+ППРЧ)

подавления сигнала является достаточная величина перекрытия помехой длительности элемента ППРЧ. Данный параметр не оптимизируется, а определяется достигнутым соотношением быстродействия в СС и СП. Результат конфликта будет различен для «медленных» и «быстрых» ППРЧ.

Зависимость вероятности ошибки P_E от соотношения сигнал/помеха ($H_{П}^2$) для СС с ШПС имеет классический вид (рис.1) [2], в то время как для СС с быстрой ППРЧ такая зависимость носит экстремальный характер (имеется максимум).

В результате проведенной оптимизации P_E для СС с ППРЧ был сделан важный вывод о наличии в функциональной зависимости для глобального максимума вероятности ошибок, поскольку у СП больше нет резервов повышения своей эффективности даже путем увеличения мощности.

Выполненные исследования по шести парам конфликтов СС–СП позволяют сделать вывод, что для СП перспективны заградительные помехи в части полосы, а также ответные следящие помехи с быстродействием, более высоким,



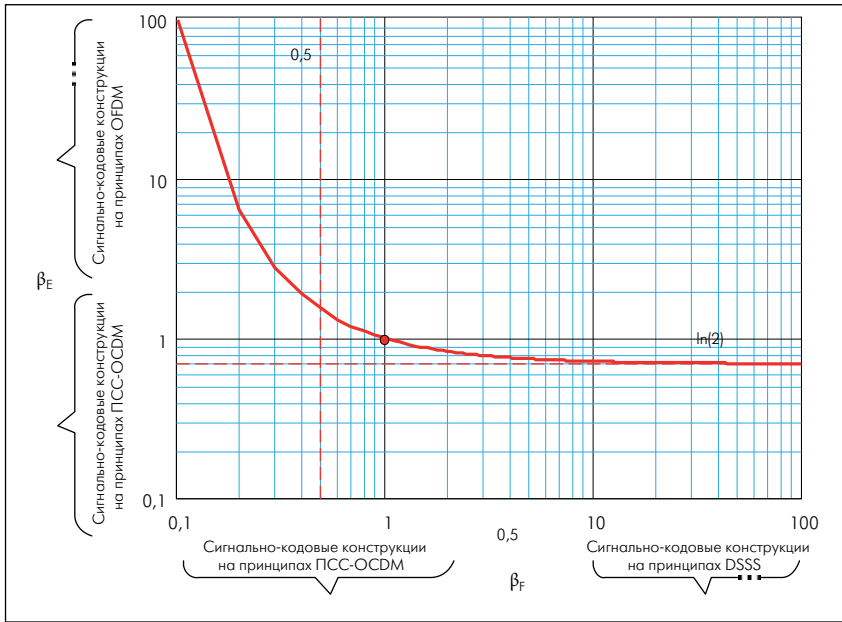


Рис.2. Границы пределов Шеннона для непрерывного канала связи

чем у СС. В то же время для СС ни одна из стратегий не является доминирующей.

Вместе с тем можно отметить принципиально разный ход зависимости конфликтов «ШПС – заградительная помеха» (см. рис.1, кривая 2) и «ППРЧ – следящая помеха» (см. рис.1, кривая 1), при том, что указанные помехи являются оптимальными для соответствующих сигналов ШПС и ППРЧ. Поэтому напрашивается решение на основе гибридного метода, путем совместного использования ШПС и ППРЧ. При этом получим суммарный выигрыш, величина которого будет определяться методом обработки гибридного сигнала (см. рис.1, кривая 3). Видно, что β_E при гибридной технологии имеет существенно меньшие значения, чем для одиночных стратегий. Главное же – вероятность ошибок квазипостоянна во всем диапазоне отношений сигнал/помеха $H_{\Pi}^2 \leq 20$ дБ.

В предыдущих рассуждениях мы не конкретизировали структуру ШПС как части сложной сигнально-кодовой конструкции. Теоретической основой создания любых мультимедийных СС, обеспечивающих высокую степень помехозащитности канала связи при работе на принципах разделения каналов с помощью ортогонального кодового мультиплексирования, является теорема

Шеннона, а именно – основополагающая формула пропускной способности системы связи [3]:

$$C = \Delta F \cdot \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}),$$

где C – пропускная способность канала связи, ΔF – полоса пропускания, P_c и $P_{\text{ш}}$ – мощности сигнала и флуктуационного шума.

Формула Шеннона обозначает возможные пути решения проблемы работы под шумами мультимедийных систем связи. С введением понятия удельной скорости передачи информации $\beta_F = F/R$ (R – скорость передачи), которую можно трактовать как частотные затраты на передачу информаци-

онного сигнала, и удельных энергетических затрат $\beta_E = P_c/P_{\text{ш}} = E_0/N_0$ (E_0 – энергия сигнала на один бит информации в канале связи, $N_0/2$ – спектральная плотность мощности шума в канале связи) формула Шеннона преобразуется к виду:

$$\beta_E = \left(2^{\beta_F} - 1\right)\beta_F,$$

характеризуя границы Шеннона для непрерывного сигнала (рис.2).

Из графика на рис.2 следует, что в зависимости от цели использования систем связи можно различить три основных направления построения сигнально-кодовых конструкций:

- сигнально-кодовые конструкции для высокоскоростных систем связи, обеспечивающих максимальные пределы пропускной способности каналов связи для заданной полосы пропускания и вероятности ошибки в условиях естественных помех. Оптимальным является разделение каналов посредством ортогональных несущих (OFDM);
- сигнально-кодовые конструкции для каналов связи с достижением максимально-возможной скорости передачи информации при минимально-возможных мощности передающих устройств и полосе пропускания канала связи, а также заданной вероятности ошибки в условиях внутрисистемных и внешних помех. Оптимально ортогональное кодовое разделение каналов (OCDFM) [4];

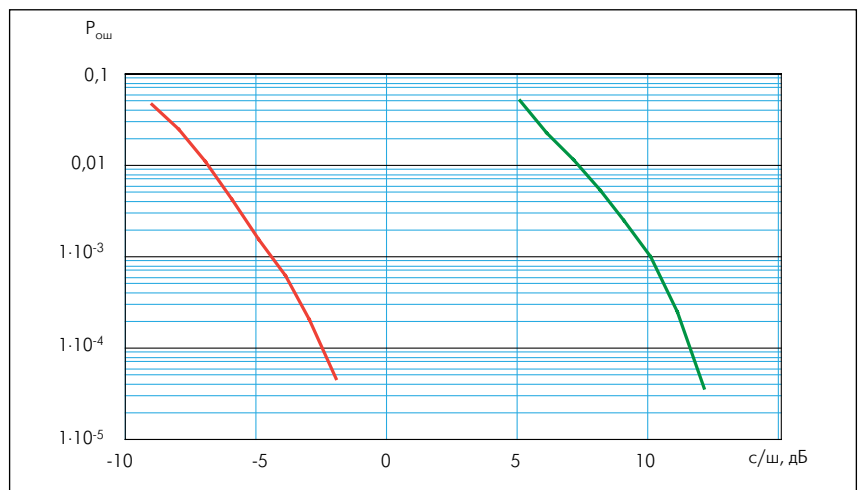


Рис.3. Результат моделирования вероятности ошибки для сигнально-кодовой конструкции OCDFM и OFDM

- сигнально-кодовые конструкции для каналов связи с минимально-возможной вероятностью ошибки при высокой степени возможного поражения канала связи естественными и искусственными помехами. Оптимальным является кодовое разделение каналов (CDMA), а также гибридные сигналы CDMA + FHSS.

Технология ортогонального кодового разделения каналов (OCDM) сравнительно малоизвестна, хотя первые патенты и публикации, описывающие принципы OCDM, появились еще в середине-конце 1990-х годов. Суть технологии в следующем. Как и в технологии расширения спектра посредством прямой последовательности (CDMA или DS-CDMA) каждый бит (группа битов) информационного потока заменяется одной из ортогональных кодовых последовательностей (например, Уолша-Адамара). В результате один информационный бит оказывается представленным N кодовыми битами – так называемыми чипами, что формирует избыточность. Кодовое усиление и определяет ряд важных свойств CDMA-сигналов. В технологии OCDM после преобразования бита в поток из N чипов происходит распараллеливание в N чиповых каналах. Каждый канал дополнительно кодируется посредством ортогональной циклической кодовой последовательности (например, M -последовательности) аналогично тому, как это происходит в технологии OFDM – только принцип разделения не частотный, а кодовый. Затем кодированные

последовательности чипов мультиплексируются в один общий поток (в отличие от OFDM – методом простого суммирования), который после аналогового преобразования и выдается в эфир. В приемнике все происходит в обратном порядке: распределение входного сигнала на параллельные чиповые каналы, восстановление чипового потока, восстановление исходного информационного потока.

Из результатов имитационного моделирования вероятности ошибки для сигнально-кодовых конструкций OCDM и OFDMA (рис.3) видно, что помехозащищенность технологии OCDM на ~14 дБ выше, чем у OFDM. При этом технология OCDM, конечно, уступает OFDM по пропускной способности и скорости передачи.

Помехозащищенность трех рассмотренных технологий построения систем широкополосного доступа может быть существенно повышена путем реализации гибридных сигнально-кодовых конструкций (ШПС + ППРЧ). В частности, экспериментально была проверена возможность достижения предельно высокой помехозащищенности и надежности связи в условиях воздействия как внутрисистемных, так и внешних помех, в том числе от средств радиоэлектронного противодействия, на основе гибридного сигнала CDMA + FHSS.

ВЫВОДЫ

Выбор сигнально-кодовых конструкций для современных систем связи сопряжен с учетом многокритериальных функционально-связанных требований: помехоустойчивости, пропускной способнос-

ти, скорости передачи, мультисервисности и др. В наибольшей мере этим противоречивым требованиям удовлетворяют телекоммуникационные системы, реализуемые на основе технологии OCDM, либо интеграции сложных широкополосных сигнально-кодовых конструкций с псевдослучайной перестройкой центральной частоты, что и подтверждает проведенный расчет помехоустойчивости таких сигналов. В гражданском секторе, характеризующемся большой требуемой абонентской емкостью, возможно применение технологий OFDM в варианте стандартов LTE либо 802.16m, использующих различную пропускную способность в восходящих и нисходящих потоках. Для удешевления абонентских терминалов предлагается реализовать модемы по технологиям OFDM и OCDM на единой аппаратной платформе на принципах SDR-радио.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972.
2. **Николаев В.И., Федоров А.Е.** Функционирование цифровых систем связи в условиях радиоэлектронного конфликта с минимаксных позиций теории игр. Ч. I и II. – Теория и техника радиосвязи, 2010, № 2.
3. **Шеннон К.** Математическая теория связи. – М.: Иностранная литература, 1963.
4. **Боровков К.В.** Перспективные способы модуляции в широкополосных системах передачи данных – Сетевые решения, 2000, № 12.