

## ОТЗЫВ

официального оппонента Кулешова Игоря Александровича на диссертационную работу Рабина Алексея Владимировича «Ортогональное кодирование и многопозиционная модуляция в помехозащищенных системах передачи информации», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки)

### Актуальность темы диссертационной работы

Значительное число исследований, связанных с применением методов теории помехоустойчивого кодирования, посвящено анализу систем связи со сравнительно малым значением спектральной эффективности или малым отношением сигнал/шум. При этом для широкого класса технических решений представляют особый интерес сценарии функционирования телекоммуникационных систем, позволяющих при больших отношениях сигнал/шум обеспечить как высокую спектральную эффективность, так и высокую помехозащищенность.

Тем не менее эта проблематика исследована недостаточно: существующие методы ориентированы в большей степени на обеспечение энергетического выигрыша при введении помехоустойчивого кодирования и в существенно меньшей степени учитывают обменные соотношения между помехоустойчивостью, отношением сигнал/шум, спектральной эффективностью и сложностью реализации.

В настоящее время существует определенное противоречие между требованиями к помехозащищенности современных телекоммуникационных систем, обусловленными, как правило, возможностями систем радиоподавления, и недостаточно разработанными методами повышения помехозащищенности при передаче с высокой спектральной эффективностью, включающими использование высокоскоростных модуляционных кодов.

Именно эти вопросы и были рассмотрены в диссертации Рабина Алексея Владимировича, что свидетельствует об актуальности выполненного исследования.

## Содержание работы

Диссертационная работа Рабина А.В. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, излагается научная новизна, перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и содержит результаты анализа существующих методов и моделей обеспечения помехозащищенности радиолиний телекоммуникационных систем, обоснование научных задач и структурно-логической схемы исследований. В главе представлены вероятностно-энергетические характеристики радиолиний телекоммуникационных систем при управлении ее ресурсами и выполнены оценка параметров рабочих частот для модели радиолинии и оценка чувствительности и устойчивости функциональной модели радиолинии.

Во второй главе диссертации представлены результаты исследования основных существующих методов повышения помехозащищенности и кратко рассмотрены достижения в этой области за счет помехоустойчивого кодирования.

Недостатком известных методов повышения помехоустойчивости является то, что канал связи, как правило, заранее фиксирован. Таким образом, переходные вероятности выходных сигналов при заданных входных сигналах не изменяются. Следовательно, кратность модуляции, применяющейся при передаче сообщений, также, как правило, не меняется. Значит, характеристики канала не зависят от используемого способа помехоустойчивого кодирования.

В главе предложено в цифровых системах передачи сообщений наряду с помехоустойчивым кодированием использовать дополнительное ортогональное кодирование. При этом применение ортогонального кодирования как дополнительного уровня обработки неизбежно приводит к увеличению числа позиций модуляции в системе передачи. Тем самым, по сути, изменяются параметры канала, и за счет этого получается энергетический выигрыш.

Во второй главе работы разработаны метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для



формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, и класс ортогональных кодов, обеспечивающих повышение помехозащищенности каналов передачи информации телекоммуникационных систем.

В соответствии с разработанным классом кодов, предложен способ построения устройств ортогонального кодирования/декодирования и модуляции/демодуляции, отличающихся использованием ортогонального кодирования в помехозащищенных каналах передачи информации телекоммуникационных систем.

Показано, что при использовании полученных ортогональных кодов в различных видах многопозиционной модуляции используются только четные позиции модуляции. Данная особенность позволила расширить множество технически реализуемых ортогональных кодов и повысить число исправляемых ошибок. Построена решетчатая диаграмма ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени. Для этого кода определено свободное расстояние, равное 24, и, следовательно, максимально возможный энергетический выигрыш, равный 13,8 дБ. Результаты имитационного моделирования подтвердили истинность данного теоретического предположения.

В диссертации разработан комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

В третьей главе рассмотрены модели системы связи с применением ортогонального кодирования без помехоустойчивого. В ней приведены результаты анализа некоторых видов модуляции, представляющих интерес с точки зрения цели и задач работы. На примере ОФМ представлены процедура согласования символов ортогонального кода и многопозиционной модуляции и вывод формулы определения вероятности ошибки при применении многопозиционной модуляции и ортогонального кодирования в канале с АБГШ. В главе также рассмотрено применение ортогонального кодирования в системах с ОФМ, АМ, КАМ и ЧМ в каналах с АБГШ, случайной фазой и замираниями, оценено уменьшение результирующей вероятности ошибки за счет использования ортогонального кодирования. Изложение проведено на конкретных примерах передачи противоположных сигналов  $\{+1, -1\}$ . Оценка

энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования получена как аналитическим путем (для канала с АБГШ и ОФМ и ортогонального кодирования на основе матриц порядка 4), так и в результате имитационного моделирования (для всех исследованных случаев).

В четвертой главе работы представлены модели каналов передачи информации телекоммуникационных систем, разработанные для решения задачи проведения анализа совместного применения ортогональных и помехоустойчивых кодов, как блоковых (кодов БЧХ (63,57) и (63,30)), так и сверточных (кодов планетарного стандарта (2,1,7) и (3,1,7)).

В главе приведены оценки величины энергетического выигрыша в канале с АБГШ при сочетании ортогонального кодирования с помехоустойчивым кодированием, полученные путем имитационного моделирования.

В пятой главе работы сформулированы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности.

Анализ применимости разработанных в диссертационном исследовании технических решений для повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем показал необходимость решения следующих задач:

- обеспечения синхронизации сигналов в сочетании с ортогональными кодами;
- разработки метода изменения параметров адаптации радиосредств при ухудшении качества канала связи для уменьшения времени простоя канала радиосвязи и повышения помехозащищенности в системах радиосвязи УКВ-диапазона.

Также в результате сравнительного анализа разработанного ортогонального кодирования и существующих решений с применением кодированной модуляции, ортогональных и квазиортогональных сигналов установлено, что ортогональные коды обеспечивают в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит  $10^{-6}$  энергетический выигрыш:

- по сравнению с ортогональными кодами на основе матриц Адамара в 1,7 дБ;
- по сравнению с кодами Унгербоэка в 1,9 дБ;



- по сравнению с кодами Унгербоека с уменьшенным числом состояний в 1,6 дБ;
- по сравнению с LDPC-кодом со скоростью кодирования  $7/8$  в 0,4 дБ.

### **Научная новизна и теоретическая значимость полученных результатов**

Автором диссертационного исследования получены следующие основные новые научные результаты:

- Предложен и проанализирован метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования, отличающийся свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов.

- Получен класс ортогональных кодов, построенных, в отличие от существующих, на основе синтезированных кодирующих матриц и обеспечивающих повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем.

- Разработан комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

- Сформулированы и обоснованы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности.

Теоретическая значимость диссертации обусловлена разработкой новой методологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем посредством применения ортогональных кодов, формируемых сопряженными парами квадратных матриц.

### **Практическая значимость полученных результатов**

Практическая значимость полученных результатов определяется постановкой задач, рассмотренных в диссертационном исследовании:

- Практическая значимость предложенного метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц состоит в том, что он позволяет

сформировать кодовые последовательности и построить класс ортогональных кодов для повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем.

- Практическая значимость полученного класса ортогональных кодов состоит в том, что они обеспечивают существенный энергетический выигрыш практически без внесения избыточности и без существенного увеличения сложности аппаратуры. В соответствии с разработанным классом кодов, был предложен способ построения устройств ортогонального кодирования/декодирования и модуляции/демодуляции.

- Практическая значимость разработанного комплекса моделей каналов передачи информации определяется тем, что он позволяет оценить в каналах с аддитивным гауссовским шумом, случайной фазой и многолучевых каналах с замираниями уменьшение результирующей вероятности ошибки на бит за счет использования ортогонального кодирования. Вероятность ошибки на бит является контрольным решением данных моделей.

- Практическая значимость сформулированных предложений подтверждается тем, что результаты исследования могут быть использованы в телекоммуникационных системах для практической реализации ортогонального кодирования, эффективность применения которого подтверждена количественными оценками и простыми процедурами кодирования и декодирования.

Эффективность реализации предложенных в диссертации моделей и метода иллюстрируется примерами численных расчетов.

Практическую ценность результатов подтверждают 4 акта о внедрении, а также доведение разработанных моделей и методов до зарегистрированных в Роспатенте 23 программных продуктов.

Результаты диссертации могут быть использованы для практической реализации в телекоммуникационных системах ортогонального кодирования. Эффективность его применения подтверждена количественными оценками и простыми процедурами кодирования и декодирования.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность и достоверность научных положений и результатов проведенных исследований подтверждаются адекватностью выбранных



математических моделей, корректным анализом этих моделей, проверкой выдвинутых гипотез и сделанных допущений методами численного моделирования.

Обоснованность и достоверность всех результатов, сформулированных в качестве выносимых на защиту положений, подтверждаются публикациями автора в ведущих отечественных и зарубежных изданиях и результатами их обсуждения на многочисленных отечественных и международных конференциях, а также реализацией ряда положений диссертации на практике.

### **Замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. В главе 2 на С. 75-76 четко не обозначено, каким входным и выходным векторам кодера соответствуют пути по решетчатой диаграмме, которые позволили получить вес самого короткого пути с переходами из состояния 000000 в состояние 000000, равный 24.

2. В главах 4 и 5 автор рассматривает, в частности, сверточные коды планетарного стандарта, а также два кода с низкой плотностью проверки на четность (LDPC-кода), имеющих скорости кодирования  $r = 5/6$  и  $r = 7/8$ . При этом не приведено сравнение с LDPC-кодами современного спутникового стандарта DVB-S2X, лишь на 0,7-1,0 дБ уступающими границе Шеннона.

3. В работе приводится довольно много результатов имитационного моделирования для оценки энергетического эффекта от применения предложенного автором ортогонального кодирования в различных каналах. Следовало бы привести краткую характеристику имитационных программ и их доступности.

4. В диссертации подробно рассмотрены значения энергетического выигрыша, получаемого в результате применения ортогонального кодирования, неоднократно говорится о том, что использование ортогональных кодов существенно не увеличивает сложность и, следовательно, стоимость устройств приема и передачи. В то же время не приведен анализ экономического эффекта от применения результатов исследования.

### **Общее заключение по диссертации**

Отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации Рабина Алексея Владимировича. Она представляет

собой законченную научную работу, в которой на высоком теоретическом уровне решена актуальная проблема использования ортогонального кодирования для разработки помехозащищенных телекоммуникационных систем, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум передачу с близкой к предельно возможной спектральной эффективностью.

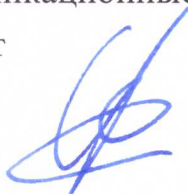
Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати, в том числе изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ. Текст автореферата отражает содержание диссертации.

На основе вышеизложенного можно заключить, что диссертация Рабина А.В. «Ортогональное кодирование и многопозиционная модуляция в помехозащищенных системах передачи информации» является законченным научным исследованием, полностью удовлетворяющим критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки), а ее автор, Рабин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по этой специальности.

Официальный оппонент:

Заместитель генерального директора публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии» по научной работе, доктор технических наук, доцент

«09» февраля 2022 г.



Кулешов Игорь Александрович

Подпись генерального директора публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии» по научной работе, доктора технических наук, доцента Кулешова Игоря Александровича заверяю.

Начальник отдела кадров публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии»

«09» февраля 2022 г.



Лебедева Елена Оттовна