

ОТЗЫВ



официального оппонента Яковлева Виктора Алексеевича
на диссертационную работу

Рабина Алексея Владимировича, выполненную на тему
«Ортогональное кодирование и многопозиционная модуляция в помехозащищен-
ных системах передачи информации», представленную на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности
2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки)

1. Актуальность темы диссертации

Повышение помехозащищенности передачи информации в телекоммуникаци-
онных системах, в том числе системах спутниковой и космической связи, продол-
жает оставаться важной проблемой, несмотря на проведенные многочисленные ис-
следования и достигнутые значительные результаты в этой области.

Эта проблема решается по многим направлениям: совершенствованием си-
стем модуляции/демодуляции, применением помехоустойчивых кодов, сигнально-
кодовых конструкций, учетом характеристик помех и параметров каналов связи и
прочим. Увеличение энергетического выигрыша на 1-3 дБ считается хорошим ре-
зультатом.

В этой связи диссертационная работа Рабина А.В., посвященная повышению
помехозащищенности и спектральной эффективности систем передачи информа-
ции с высоким отношением сигнал/шум на основе использования ортогонального
кодирования и многопозиционной модуляции, представляется актуальной. Указан-
ная проблема в работе декомпозирована на ряд частных задач:

1. Разработка метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц для фор-
мирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортого-
нального кодирования.
2. Получение класса ортогональных кодов на основе синтезированных коди-
рующих матриц, обеспечивающих повышение помехозащищенности каналов пере-
дачи информации телекоммуникационных систем.
3. Разработка комплекса моделей каналов передачи информации телекомму-
никационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование.

4. Разработка научно-технических предложений по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем.

2. Содержание работы и основные научные результаты

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и пяти приложений.

Во введении обоснована актуальность исследования, проводимого в работе, определены объект, предмет, цель и сформулированы решаемые в работе задачи, перечислены новые научные результаты, полученные при выполнении работы.

В первой главе представлены результаты анализа существующих методов и моделей обеспечения помехозащищенности радиолиний телекоммуникационных систем, а также обоснованы научные задачи и структурно-логическая схема исследований. В результате проведенного анализа автором сделан вывод, что в настоящее время отсутствует продуктивный методический аппарат, позволяющий обеспечить повышение помехозащищенности и спектральной эффективности радиолиний в диапазоне отношений сигнал/шум, составляющих несколько децибелл.

Во второй главе диссертационной работы разработан регулярный метод построения пар матриц для синтеза ортогональных кодов, что составляет *первый научный результат, выносимый на защиту*.

Ортогональные коды задаются кодирующей и проверочной матрицами, элементами которых являются многочлены от формальной переменной задержки D с целыми коэффициентами. Кодовые слова получаются умножением входного информационного вектора на кодирующую матрицу $G(D)$. На приемной стороне системы связи осуществляется декодирование, которое сводится к умножению на декодирующую матрицу $H(D)$.

Раньше поиск пар кодирующей и декодирующей матриц велся с использованием комбинаторных методов, что позволило найти всего несколько примеров ортогональных кодов, которые использовались для оценки увеличения помехозащищенности телекоммуникационных систем.

Автором разработан метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленных матриц. При этом важное значение имеет выбор многочлена.

Установлено следующее:

- коды на основе многочленов, состоящих из более двух членов, не позволяют однозначно восстановить истинный кодовый вектор;
- коды на основе многочленов $1 \pm D^i$ обеспечивают такой же энергетический выигрыш, как и коды на основе многочленов $1 \pm D$, причем обладают большей задержкой на $i-1$ такт;
- коды на основе многочленов степени больше единицы не приводит к существенному увеличению количества выполняемых операций и, как следствие, сложности технической реализации;
- коды на основе многочленов степени больше единицы также могут найти применение в телекоммуникационных системах, поскольку степень многочлена определяет количество тактов задержки в приемнике; эффект может быть использован в системах связи с требуемой постоянной задержкой, например, спутниковой связи, для эффективного управления процессами передачи.

На основании этого в работе сделан правильный вывод о целесообразности использования в каналах телекоммуникационных систем ортогональных кодов на основе многочленов первой степени.

На основе синтезированных кодирующих матриц во второй главе диссертации построен класс ортогональных кодов, использование которых совместно с многопозиционной модуляцией обеспечивает повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем, что составляет *второй научный результат, выносимый на защиту*. В этом классе выделены коды, предпочтительные для технической реализации.

При этом учтено, что при использовании ортогонального кодирования придется использовать виды модуляции с числом позиций (для исследованных случаев), равным удвоенной максимальной сумме абсолютных значений одного столбца кодирующей матрицы $G(D)$ плюс 1. Автором обоснованно исключены из рассмотрения коды с большим числом позиций модуляции (превышающим 2^6) и, следовательно, не предполагающим техническую реализацию из-за высокой сложности.

Автором также показано, что при передаче по цифровым каналам связи противоположных сигналов и умножении входного информационного вектора на кодирующую матрицу $G(D)$ будет получаться кодовый вектор, все элементы которого

четны. Следовательно, будут использованы только четные позиции модуляции и позиция модуляции с номером 0. Данная особенность позволила расширить множество технически реализуемых ортогональных кодов и повысить число исправляемых ошибок.

Отмечу, что при применении ортогональных кодов операции кодирования и декодирования характеризуются небольшой вычислительной сложностью.

Во второй главе также представлена в качестве примера решетчатая диаграмма ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени. По данной диаграмме определено свободное расстояние кода как минимальное расстояние между различными путями, начинающимися и заканчивающимися в нулевом состоянии. Свободное расстояние ортогонального кода на основе матриц порядка 4 глубины 2 и многочленов второй степени равно 24, поскольку вес самого короткого пути с переходами из состояния 000000 в состояние 000000 равен 24.

В третьей и четвертой главах работы автором вводится комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование. Данный комплекс моделей определяет *третий научный результат, выносимый на защиту*.

Показано, что применение ортогонального кодирования неразрывно связано с выбором параметров многопозиционных систем модуляции. То есть ортогональные коды принципиально следует рассматривать совместно с системами модуляции. Для исследования этого вопроса автором вводятся классы моделей каналов с ортогональным кодированием, помехоустойчивым кодированием и многопозиционной модуляцией, которые правильнее было бы назвать моделями расширенных каналов.

На основе модели расширенного канала с применением ортогонального кодирования проведена оценка энергетического выигрыша по сравнению с системами без его применения при равной эквивалентной вероятности ошибки на бит.

Максимальный энергетический выигрыш составил: в канале с АБГШ – 4,50 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} , в канале с АБГШ и случайной фазой – 3,31 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} , в канале с АБГШ и неселективными по частоте и медленными замираниями – 22,74 дБ при вероятности ошибки на бит

10^{-4} , в канале с АБГШ и рэлеевскими замираниями – 22,50 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-4} , в канале с АБГШ и райсовскими замираниями – 15,60 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-4} .

Также модели расширенных каналов с совместным применением ортогонального и помехоустойчивого кодирования (блокового и сверточного) позволили оценить энергетический выигрыш в каналах с АБГШ по сравнению с использованием помехоустойчивых кодов – от 1,54 до 3,33 дБ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} .

В пятой главе сформулированы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум для достижения требуемой спектральной эффективности, составляющие *четвертый научный результат, выносимый на защиту*.

Научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем и достижения требуемой спектральной эффективности при высоком отношении сигнал/шум на основе использования ортогонального кодирования были разработаны в процессе выполнения пяти научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: трех в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (№ 14.575.21.0021 от 17.06.2014, № 14.578.21.0022 от 05.06.2014, № 14.578.21.0214 от 03.10.2016), одной в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования в сфере научной деятельности в 2014-2016 гг. (№ 2.2716.2014/К от 17.07.2014) и гранта № 18-07-01298 Российского фонда фундаментальных исследований в 2018-2020 гг.

Анализ применимости разработанных в диссертационном исследовании технических решений для повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем в данных проектах показал, что ортогональные коды обеспечивают энергетический выигрыш по сравнению с известными решениями, применяющими кодированную модуляцию, ортогональные и квазиортогональные сигналы:

– на основе матриц Адамара в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,7 дБ;

- с кодами Унгербоека в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,9 дБ;
- с кодами Унгербоека с уменьшенным числом состояний в канале с АБГШ при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 1,6 дБ;
- по сравнению с LDPC-кодом со скоростью кодирования 7/8 при вероятности ошибки на бит 10^{-6} – в 0,4 дБ.

В заключении диссертационной работы представлена обобщенная итоговая оценка проведенного исследования и приведены его основные результаты в соответствии с поставленной целью исследования и его задачами. Список литературы включает 211 наименований.

Структура работы продумана и удобна для восприятия читателем, графический материал выполнен аккуратно, наглядно и является органичным дополнением текстового материала.

3. Основные научные результаты

С учетом вышеизложенного, в работе получены следующие основные научные результаты:

1. Разработан метод синтеза декодирующих и кодирующих матриц на основе многочленов степени больше единицы для формирования кодовых последовательностей, обеспечивающих реализацию ортогонального кодирования. Разработанный метод отличается свойством регулярности от случайного поиска отдельных пар матриц с применением комбинаторных методов и позволяет обеспечить вероятность ошибки благодаря выбору параметров матриц. Доказана корректность метода синтеза. Доказана теорема об эквивалентности полиномиальных кодирующей и декодирующей матриц и канонических матриц диагонального вида.

2. Получен класс ортогональных кодов, построенных, в отличие от существующих, на основе синтезированных кодирующих матриц, обеспечивающих повышение помехозащищенности сигналов, передаваемых по каналам телекоммуникационных систем при большем количестве исправляемых ошибок по сравнению с существующими аналогичными решениями. Полученные коды практически не вносят избыточность и не увеличивают сложность приемо-передающей аппаратуры.

3. Разработан комплекс моделей каналов передачи информации телекоммуникационных систем, использующих предложенное ортогональное кодирование. Данные модели позволяют осуществлять исследование эффективности ортогонального кодирования в комбинации с различными видами цифровой модуляции: амплитудной, квадратурной амплитудной, относительной фазовой и частотной.

4. Сформулированы научно-технические предложения по реализации технологии повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум большие, по сравнению с известными, значения спектральной эффективности.

4. Достоверность результатов диссертации, апробация и публикации по работе

Достоверность результатов подтверждаются корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования и практической реализацией на предприятиях радиотехнической отрасли.

Основные результаты диссертационной работы получили апробацию на 9 международных, 2 всероссийских и 5 межвузовских конференциях.

По основным результатам диссертации опубликовано 73 работы, из них 50 – без соавторов, в том числе 2 монографии, 12 работ, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 10 работ, опубликованных в изданиях, индексируемых «Scopus», 12 докладов в сборниках докладов конференций, 14 отчетов о выполнении 5 НИОКР. По теме исследования получено 23 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены при его участии и под непосредственным научным руководством.

5. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов

Научная новизна разработанного метода синтеза декодирующих и кодирующих матриц состоит в том, что он в отличие от известного метода случайного поиска отдельных пар матриц обладает свойством регулярности, позволяет использо-

вать в матрицах многочлены степени больше единицы и в тоже время дает обоснование для ограничений в использовании этих многочленов (однозначность операции декодирования, сложность реализации, задержка принятия решения).

Научная новизна предложенного класса кодов заключается в том, что он существенно расширен по сравнению с известными и обладает большей вариативностью выбора параметров кодов.

Научная новизна третьего научного положения заключается в обосновании того, что ортогональные коды принципиально необходимо рассматривать совместно с системами модуляции, которые в совокупности образуют классы расширенных каналов. Показано, что только при совместном выборе параметров пары «ортогональный код – многопозиционная модуляция» может быть повышена эффективность радиолинии.

Научная новизна четвертого научного положения состоит в том, что сделаны предложения по синхронизации систем с ортогональным кодированием, также показано, что предлагаемая технология «ортогональный код – многопозиционный манипулятор» в определенных условиях превосходит по эффективности многие известные системы передачи информации по радиоканалам.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке метода построения кодирующих и проверочных матриц для ортогонального кода, создании класса ортогональных кодов, построенных таким методом, исследовании свойств класса кодов, что является вкладом автора в теорию помехоустойчивого кодирования в целях повышения помехозащищенности и спектральной эффективности телекоммуникационных систем при высоком отношении сигнал/шум.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что в созданном классе ортогональных кодов выделены свойства кодов, обеспечивающие их эффективную реализацию, а разработанные модели расширенных каналов обеспечивают согласование параметров кода с параметрами многопозиционных систем модуляции. Это обеспечивает существенный энергетический выигрыш при малом внесении избыточности и без значительного увеличения сложности аппаратуры. Результаты диссертации могут быть использованы для практической реализации в телекоммуникационных системах ортогонального кодирования, эффективность приме-

нения которого подтверждена количественными оценками и простыми процедурами кодирования и декодирования.

6. Внедрение и реализация результатов исследования

Основные исследования и результаты диссертационной работы использованы в акционерном обществе «Концерн «Гранит-Электрон» (г. Санкт-Петербург), акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Пирамида» (г. Санкт-Петербург), федеральном государственном автономном научном учреждении «Научно-исследовательский институт «Специализированные вычислительные устройства защиты и автоматика» (г. Ростов-на-Дону) и внедрены в учебный процесс кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. О практической ценности работы также свидетельствует реализация ее результатов в разработках ведущей организации.

7. Характеристика работы в целом

Материал диссертационной работы Рабина Алексея Владимировича методично изложен и хорошо структурирован. Для каждого раздела представлены содержательные и достаточные выводы. Автор продемонстрировал глубокие знания в части новых телекоммуникационных технологий, а также теории вероятностей, теории информации, теории помехоустойчивого кодирования, а также математических методов моделирования.

Настоящая диссертационная работа позволяет заключить, что Рабин А.В. обладает обширными знаниями и навыками выполнения научных исследований, а полученные им результаты имеют важное значение для теории и практики развития сетей и систем связи.

8. Замечания диссертационной работе

1. В первой главе автор приводит результаты аналитического обзора существующих решений, часто ссылаясь, в частности, на работы Дж. Прокиса, Б. Скляра, А.Н. Трофимова, В.А. Липатникова. Считаю, что объем данного материала мог быть сокращен без ущерба для целостности работы. Также рассматриваются во-

просы по повышению помехозащищенности и управлению радиопередачами связи в различных условиях помеховой обстановки. Однако этот материал в дальнейшем практически не используется.

2. Автор выводит формулы для вероятности ошибки для фазовой и амплитудной модуляции для q -ичных сигналов в условия приема с АБГШ. Заметим, во-первых, что эти формулы известны (см. справочник Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. 1981 г.). Во-вторых, при выводе формул автор ссылается на свои же работы, что не добавляет объективности этим результатам. Результаты имитационного моделирования в значительной степени компенсируют этот недостаток.

3. Оценки энергетического выигрыша от применения ортогонального кодирования в каналах с замираниями получены только для ортогональных кодов. Представляется важным получение аналогичных оценок при совместном использовании ортогональных и помехоустойчивых кодов в этих каналах.

4. Автором не показано, какой максимальной величины могут быть действительные числа на выходе кодера, что является важным, если используется многопозиционная амплитудная или амплитудно-фазовая модуляция. Не понятно, какое значение пик-фактор в этом случае будет иметь место.

5. В работе не проведена оценка эффективности ортогонального кодирования в общепринятых показателях удельной энергетической и удельной спектральной эффективности (так называемые $\beta\gamma$ – кривые энергетической и частотной эффективности).

6. К сожалению, автором не проведено исследование применимости ортогональных кодов в перспективных системах ММО, реализующих пространственное кодирование сигналов и позволяющих увеличить полосу пропускания канала, в котором передача и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Полагаю, что использование ортогональных кодов в таких системах может обеспечить положительный энергетический и, как следствие, экономический эффект.

9. Выводы и заключение

Отмеченные недостатки не являются значимыми. Представленную к защите диссертационную работу оцениваю положительно. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационного исследования.

Диссертация Рабина Алексея Владимировича «Ортогональное кодирование и многопозиционная модуляция в помехозащищенных системах передачи информации» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует пунктам 2, 8, 10, 11, 14 паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки).

В диссертации решена научно-техническая проблема использования ортогонального кодирования для разработки помехозащищенных телекоммуникационных систем, обеспечивающих при высоком отношении сигнал/шум передачу с близкой к предельно возможной спектральной эффективностью.

Диссертация отвечает критериям, изложенным в п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

Считаю, что ее автор, Рабин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки).

Официальный оппонент

Профессор кафедры защищенных систем связи федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ), доктор технических наук, профессор

В.А. Яковлев

«10» февраля 2022 г.

Подпись(-и) В.А. Яковлева

заверяю

начальник отдела кадров - зам. начальника АКУ

/В.В. Новикова/ 10.02.2022

