

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Лисничука Александра Александровича на диссертацию Анастасии Всеволодовны Ермаковой на тему «Повышение эффективности систем радиодоступа на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Актуальность темы диссертационного исследования

Результаты исследований, проведенных в работе А.В.Ермаковой, направлены на снижение вычислительной сложности алгоритмов формирования и обработки сигналов, а также улучшения характеристик широкого круга радиосистем, использующих наборы ортогональных функций для передачи информации через физическую среду распространения радиоволн. К таким радиосистемам относятся, прежде всего, их варианты с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), использующие дискретные экспоненциальные функции – ДЭФ), формирующие групповой канальный информационный сигнал после дискретного быстрого преобразования Фурье (БПФ) набора канальных информационных символов и цифро-аналогового преобразования (ЦАП).

Следует отметить, что рост количества поднесущих, в том числе за счет снижения вычислительной сложности алгоритмов формирования и обработки групповых сигналов в радиосистемах с OFDM сигналами, не приведет к увеличению пропускной способности радиоканалов для высококомобильных сценариев, поскольку из-за влияния доплеровского сдвига частоты на практике (например в LTE) обычно не используется одновременно более 1200 гармонических поднесущих в общей полосе частот при размерности БПФ 2048. В этом случае увеличение размерности БПФ при снижении его вычислительной сложности в целом не приведет к увеличению общего числа используемых поднесущих, но при заданной неизменной ширине занимаемой полосы частот увеличится длительность времени передачи каждого ресурсного блока. Данное обстоятельство несомненно приведет к увеличению качества приема информационных символов, но их количество, передаваемое в течение длительности, например кадра, сократится, по сравнению с использованием менее длинных поднесущих, хотя и уменьшится общая длительность времени передачи циклических префиксов в этом кадре. В силу вышесказанного интерес представляет использование группового сигнала, состоящего из широкополосных шумоподобных поднесущих, общее число которых в выделенной полосе частот будет соответствовать размерности применяемого быстрого спектрального преобразования. В этом случае увеличение размерности ресурсного блока за счет увеличения быстродействия и размерности БПФ не будет приводить к снижению пропускной способности канала связи, а наоборот, к ее увеличению.

Как отмечено во введении к диссертационной работе А.В.Ермаковой, одной из основных проблем использования OFDM сигналов является трудность присоединения к ним синхросигналов, позволяющих эффективно измерить смещение по времени, частоту, возможно с точностью до фазы, а также мощности сигналов как в однолучевом, так и многолучевом каналах связи.

Вход. № 104/26
* 20. 05 2026.
ПОДПИСЬ

Принято считать, что проблему отсутствия синхронизации по времени с точностью до значения, обратного частоте дискретизации формируемого или обрабатываемого группового сигнала, в системах с OFDM можно решить при использовании циклических префиксов, эквалайзера и передачи тестовых сигналов параллельно с информационными сигналами. Но следует отметить, что, во-первых, это приводит к снижению пропускной способности каналов связи зачатую более чем на 25%, по сравнению с ситуацией отсутствия префиксов и тестовых сигналов, а, во-вторых, работа эквалайзера малоэффективна при отсутствии синхронизации по времени. Последнее объясняется не ортогональностью дискретных гармонических поднесущих при циклических перестановках столбцов ресурсного блока, поскольку матрица ДЭФ теряет свойство ортогональности и симметричности при любой циклической перестановке столбцов (и строк). В результате этого помеха при обработке тестового сигнала, отсчеты которого берутся произвольно, начиная с префикса, будет складываться из помех от сигналов других поднесущих этого же луча, зависящих от передаваемых с их использованием информационных символов, а также от сигналов всех соседних лучей. При этом значение помехи информационному сигналу не будет точно таким же, как значение результирующей помехи тестовому сигналу даже если рассматриваются помехи только в пределах одного ресурсного блока. Данную проблему отчасти удастся решить при дополнительной фильтрации поднесущих, что не позволяет использовать циклические префиксы и эквалайзер.

Можно отметить и другие недостатки радиосистем, использующих OFDM сигналы, например, рэлеевский многолучевой канал связи, когда потери в отношении сигнал/шум по мощности могут достигать 20 дБ, по сравнению с гауссовским каналом, а также повышение вероятности утраты синхронизации при доплеровском сдвиге частоты, превышающем 200...250 Гц.

Таким образом, разработка и исследование новых методов многостанционного доступа, позволяющих хотя бы отчасти решить вышеперечисленные проблемы систем с OFDM сигналами, является весьма актуальной для широкого круга современных радиосистем, а также области радиотехники и связи в целом.

Основные результаты работы

В диссертации показано, что дискретный сигнал, при формировании которого используется любая многопозиционная линейная рекуррентная последовательность (ЛРП) максимального периода, может быть преобразован к любой функции Виленкина-Крестенсона (ВК) при перестановке ее символов по возрастанию значений элементов мультипликативной группы расширенного поля Галуа, построенного по модулю неприводимого примитивного полинома, использовавшегося при формировании исходной ЛРП; установлено, что на основе вариантов сопровождающих матриц любого исходного полинома можно построить как минимум четыре мультипликативных группы поля. Это позволило разработать способы построения систем квазиортогональных сигнатур и правила их преобразования к одной и той же матрице функций ВК. Таким образом, доказано, что все возможные матрицы-циркулянты ЛРП, построенные на основе всех возможных неприводимых примитивных полиномов и первообразных элементов всех возможных мультипликативных групп соответствующих полей Галуа выбранной размерности приводятся к

одной и той же матрице функций ВК. В результате этого формирование и обработка группового сигнала системы радиодоступа, построенного на основе любой матрицы-циркулянта ЛРП может быть произведено с использованием обобщенного БПФ в базисе ВК, вычислительная сложность которого более чем в 3 раза ниже по числу элементарных арифметических операций, чем традиционного БПФ.

Далее, в диссертации показано, что при увеличении размерности базовой матрицы-циркулянта любой ЛРП, используемой для построения группового сигнала канала радиодоступа, увеличивается только длительность сигнала, передаваемого в выделенной полосе частот, а расширения его спектра не происходит при сохранении значения тактовой частоты, поскольку каждая поднесущая занимает всю выделенную полосу частот; данное свойство позволяет использовать базовые матрицы разных размерностей в течение длительности времени одного кадра при сохранении общего числа переданных информационных символов, и уменьшить приблизительно в 3-5 раз суммарную длительность циклического префикса, если он используется (вероятно в многолучевом канале); в случае OFDM сигналов при увеличении размерности базовой матрицы уменьшается расстояние по частоте между соседними поднесущими группового сигнала, что приводит к повышению чувствительности системы к доплеровскому сдвигу частоты и увеличению уровня межсимвольных помех.

Далее, показано, что к групповому сигналу, сформированному на основе матрицы-циркулянта любой ЛРП, можно присоединить широкополосный шумоподобный синхросигнал, обработка которого при его обнаружении в приемнике как в однолучевом, так и в многолучевом канале, может производиться с использованием обобщенного БПФ того же типа, что и преобразование, используемое при формировании и обработке группового информационного сигнала. Кроме того, установлено, что при циклической перестановке столбцов и строк матрицы-циркулянта любой многопозиционной ЛРП, являющейся симметричной квазиортогональной матрицей, вновь получаем симметричную квазиортогональную матрицу, а после присоединения к ней крайнего левого столбца и верхней строки, состоящих лишь из единиц, получим симметричную ортогональную матрицу; благодаря данному свойству этих матриц, при их использовании для формирования группового сигнала системы радиодоступа отсутствуют помехи от поднесущих соседних лучей при многолучевом характере распространения сигнала; необходимо отметить, что данным свойством не обладают другие симметричные ортогональные матрицы и, в частности, система ДЭФ. Данное свойство матриц-циркулянтов ЛРП позволило разработать алгоритм обработки многолучевого сигнала, описанный в диссертации. Он предполагает предварительную оценку задержки по времени и сдвига по частоте с точностью до фазы сигналов лучей, а также измерение их мощностей по сверхдлинному синхросигналу.

Все разработанные и описанные в работе варианты построения канала радиодоступа мало чувствительны к доплеровскому сдвигу частоты, поскольку в них используются шумоподобные сигналы и распределенный по кадру (по времени) синхросигнал, за смещением которого по частоте (и задержке по времени) производится постоянное слежение в канале синхронизации, причем в многолучевом канале связи; уменьшение или увеличение длительности кадра из-за доплеровского сдвига частоты, либо нестабильность тактовой частоты синхросигнала, едва ли может

оказать сколько-нибудь существенное влияние на характеристики его обнаружения на всем периоде его повторения, поскольку при тактовых частотах порядка единиц-десятков МГц данная проблема решается при увеличении частоты дискретизации обнаруживаемого синхросигнала с параллельной быстрой обработкой всех его дискретных копий.

Научная новизна результатов

1. Дискретный сигнал, при формировании которого используется p -ичная ЛРП максимального периода, может быть преобразован к любой функции ВК при перестановке его символов по возрастанию значений элементов мультипликативной группы расширенного поля Галуа, построенного по модулю неприводимого примитивного полинома, использовавшегося при формировании исходной ПСП.

2. Способ преобразования p -ичной ЛРП на основе выбранной мультипликативной группы расширенного поля Галуа, а также выбор первообразного элемента группы, с которого начинается перестановка элементов исходной ПСП, позволяет однозначно определить начальный блок преобразованной p -ичной ЛРП с использованием обобщенного БПФ в базисе функций ВК.

3. Мнимая часть двумерной автокорреляционной функции любой p -ичной ЛРП не имеет центрального пика; при вычислении двумерной взаимно корреляционной функции p -ичной ЛРП и ее копии, сдвинутой по фазе, получим центральные пики как у действительной, так и у мнимой части этой функции, по соотношению уровней которых можно определить фазовый сдвиг одной ПСП относительно другой.

Практическая ценность

1. Показано, что применение БПФ в базисе ВК с плавающей точкой вместо классического БПФ (базис ДЭФ) при размере преобразования $N=2048$ дает максимальный выигрыш по числу арифметических операций от 2,1 до 3,5 раз относительно OFDM: для $N=256 \dots 1024$ выигрыш составляет от 2,1 до 2,8 раза, а при $N=2048$ достигает 3,5 раза;

2. Предложен вариант построения системы радиодоступа, обладающих низкой чувствительностью к доплеровским сдвигам частоты, достигающимся за счет непрерывного слежения за смещениями шумоподобного синхросигнала по частоте и задержке, что обеспечивает стабильность синхронизации в условиях движения абонентов с постоянной скоростью до 500 км/ч (1400 Гц) и более, а также при ускорении до (30...50) м/с² (скорость изменения частоты не более 100 Гц/с) при увеличении объема ОЗУ до 100 КиВ с учетом возможности передискретизации обрабатываемого синхросигнала в 5 раз, тогда как стандартные схемы OFDM теряют синхронизацию при сдвигах свыше 300 Гц;

3. Разработан новый способ подавления взаимных помех при одновременном использовании нескольких систем ортогональных сигнатур в общем радиоканале, позволяющий повысить пропускную способность пропорционально числу используемых систем за счет применения обобщенного БПФ, что дает возможность увеличения скорости передачи данных до 25% при увеличении вычислительной сложности алгоритма обработки пропорционально увеличению числа использующихся систем сигнатур;

4. Оценивание параметров сверхдлинного синхросигнала и его многолучевых копий по действительной и мнимой частям их основных корреляционных пиков позволяет обеспечить погрешность сдвига по времени этих сигналов, не превышающую 0,1 тактового интервала; это реализует возможность квазикогерентного разделения сигналов лучей, что обеспечивает приближение статистических характеристик многолучевого канала к гауссовскому и достижение энергетического выигрыша до 3–5 дБ относительно классического OFDM; вычислительная сложность приемного тракта возрастает в 2,3–3 раза по числу операций комплексного умножения при разделении сигналов 2...3 лучей, по сравнению с OFDM.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, результатов и выводов настоящей работы подтверждается использованием в ней методов и инструментов дисциплин, в основе которых лежат: теория полей Галуа и их мультипликативных групп, теория представления дискретных сигналов, заданных на конечных интервалах, в системах ортогональных дискретных функций и способы быстрого вычисления спектров в этих системах, корреляционный и спектральный анализ сигналов, статистическая теория обнаружения-различения и оценки параметров сигналов на фоне шума, методы статистической радиотехники и компьютерного имитационного моделирования.

Сравнение полученных результатов с результатами компьютерного моделирования подтверждает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в данной диссертации.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются использованием адекватных современных методов исследований, сопоставлением результатов, полученных на основе теоретических исследований и результатов компьютерного моделирования, а также широкой апробацией на международных и российских конференциях. Основные результаты работы были представлены автором на XVI, XVII, XVIII, XIX Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.) в городе Москва; МНТК «Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)» в 2024, 2025 годах в городах Выборг и Тюмень; МНТК "2025 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications" (2025 г.) в городе Москва; МНТК «Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)» (2025 г.) в городе Москва.

Основные результаты диссертации изложены в 18 печатных изданиях, 3 из которых размещены в журналах, рекомендованных ВАК. Получены 14 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. В изданиях, индексируемых SCOPUS, опубликованы 3 статьи.

Состав работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Ее объем составляет 182 страницы с 30 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 145 наименований.

Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации и позволяет получить о них достаточно полное представление.

Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями, написана хорошим литературным языком с соблюдением научного стиля и практически не содержит языковых ошибок.

Необходимо отметить **недостатки** диссертации, которые заключаются в следующем:

1. Не проработаны принципы построения и не исследованы характеристики обратного канала связи, хотя и предложен общий подход к его организации с выравниванием по времени кадров абонентов с использованием сверхдлинных синхросигналов и обработкой группового сигнала на базовой станции в соответствии с алгоритмом, предложенным в диссертации для многолучевого нисходящего канала связи с циклическими префиксами; но это возможно лишь в том случае, если сигналы абонентов обратного канала разделяются по времени, и каждому абоненту предоставлен один или несколько разноразмерных ресурсных блоков в течение кадра;
2. Указанный в п.3 Практической ценности выигрыш по пропускной способности в 25% при использовании одновременно нескольких действительных частей циркулярных матриц ЛРП для организации группового сигнала, по сравнению с передачей только одной полной матрицы, является явно заниженным, поскольку очевидно, что этот выигрыш должен быть в число раз, равное числу одновременно используемых матриц;
3. В табл.2.3 второго раздела диссертации структура синтезированной циркулярной матрицы не соответствует структуре ее мультипликативной группы, приведенной в той же таблице.

Следует отметить, что данные замечания не касаются основополагающих результатов диссертации, составляющих ее основу, которых вполне достаточно для присуждения ее автору степени кандидата наук. Проработка проблем, указанных в п.1 и 2 данных замечаний, потребовала бы существенного увеличения объема исследований, что явно привело бы к значительному увеличению ее объема и превышению требований, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

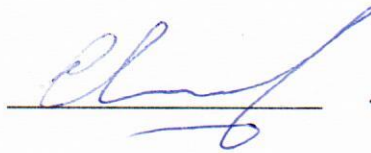
Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

На основании изложенного выше, можно сделать вывод, что представленная диссертационная работа А.В.Ермаковой на тему «Повышение эффективности систем радиодоступа на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей» в соответствии с п.9 "Положение о присуждении ученых степеней" (Далее – Положение), является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для развития отрасли радиотехники, а именно снижения сложности реализации и повышения помехоустойчивости систем радиодоступа за счет применения быстрого преобразования Фурье в базисе функций Виленкина-Крестенсона и использования многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей. Диссертационная работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты,

свидетельствует о личном вкладе автора в науку и соответствует п.10 Положения. Замечания по диссертации не снижают ценности научно-квалификационной работы.

Диссертационная работа Анастасии Всеволодовны Ермаковой полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции). Соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Профессор кафедры «Радиоуправление и связь» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», доктор технических наук, доцент



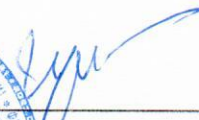
Лисничук Александр Александрович

e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.ru

« 18 » 05 2026 г.

Подпись Лисничука А.А. заверяю

Проректор по научной работе и инновациям



С.И. Гусев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1

Тел. +7(4912) 72-03-03