

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
http://sut.ru
E-mail: rector@sut.ru
ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОКТМО 40909000

06.05.2026 № 71/54-99
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по
научной работе

ФГБОУ высшего образования СПбГУТ
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

д.т.н., доцент

А.В. Рабин



« 21 » 05 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

В диссертационной работе А.В.Ермаковой рассматривается использование матриц-циркулянтов многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей (ЛРП) в качестве широкополосных ортогональных негармонических поднесущих для формирования групповых сигналов систем мобильной связи и радиодоступа. Эти системы функций рассматриваются в качестве альтернативы дискретным экспоненциальным функциям, применяющимся для формирования сигналов с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)), весьма популярным в настоящее время и широко используемым в различных системах радиосвязи. Однако дальнейшее совершенствование такого рода систем

Вход. № 102/26
« 21 » 05 2026
подпись

радиодоступа и связи с различными вариантами OFDM сигналов затруднено в силу целого ряда причин:

- к групповому сигналу, сформированному на основе системы ДЭФ, трудно присоединить синхросигнал, позволяющий эффективно измерить временную задержку, смещение по частоте, фазовый сдвиг несущей частоты, мощность сигнала с целью повышения эффективности его приема как при прямом распространении, так и в многолучевом канале связи;

- обстоятельство, указанное в предыдущем пункте, приводит к необходимости использования циклических префиксов, позволяющих бороться с межсимвольной интерференцией при отсутствии синхронизации по времени как в однолучевом, так и в многолучевом канале связи, в результате чего снижение пропускной способности радиосистемы может достигать 25% от потенциально наибольшего его значения при отсутствии префиксов;

- в системах с OFDM сигналами оценка фазовых сдвигов и амплитуд поднесущих на приемной стороне с помощью эквалайзера требует передачи пилот-сигналов, что приводит к дополнительному снижению пропускной способности канала связи приблизительно на (5...10)%; использование эквалайзера для подавления межсимвольных помех и искажений OFDM сигналов не эффективно при отсутствии синхронизации по времени из-за утраты свойства ортогональности гармонических поднесущих этого сигнала при любой циклической перестановке отсчетов ресурсного блока, сформированного на основе ДЭФ;

- при отсутствии разнесения сигналов лучей многолучевой канал системы связи с OFDM сигналами следует рассматривать как канал с релеевскими замираниями, проигрыш которого в отношении сигнал/шум по мощности может достигать 20 дБ, по сравнению с гауссовским каналом;

- системы связи с OFDM сигналами неустойчивы к доплеровскому сдвигу частоты, и при его значениях достигающих (200...250) Гц, происходит срыв синхронизации;

- с целью повышения устойчивости системы связи с OFDM сигналами к доплеровскому сдвигу частоты ограничивают число гармонических поднесущих,

использующихся в общем канале связи, что дополнительно приводит к снижению его пропускной способности; в настоящее время не используется более 1200 поднесущих при размерности используемого быстрого преобразования Фурье (БПФ) 2048;

- в силу предыдущего пункта существует ограничение на размерность ресурсного блока в данной системе, что не позволяет уменьшить общую длительность циклических префиксов на длительности времени кадра; то есть увеличение скорости вычисления БПФ и его размерности никак не скажется на повышении пропускной способности канала связи с OFDM сигналами;

- общепризнанное преимущество OFDM сигналов, состоящее в низком уровне внеполосных излучений в силу естественной структуры этого сигнала, в действительности является сомнительным, поскольку при переносе его на радиочастоту в передатчике и обработке в радиотракте приемника неизбежно использование частотных фильтров; искажения спектра сигнала приводят к возникновению межсимвольной интерференции.

В данной диссертации показано, что все вышеперечисленные проблемы, возникающие при использовании OFDM сигналов, могут быть решены при построении группового сигнала системы радиодоступа на основе совокупности разных по структуре полных ортогональных систем дискретных функций, сформированных на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей, причем формирование и обработка такого сигнала может производиться с использованием БПФ в базисе функций Виленкина-Крестенсона (ВК), имеющего приблизительно в три раза меньшую вычислительную сложность по критерию числа элементарных арифметических операций, чем традиционное БПФ той же размерности.

Таким образом, тема диссертационной работы и ее цель, состоящая в снижении сложности реализации и повышении помехоустойчивости систем радиодоступа за счет применения БПФ в базисе функций ВК и использования многопозиционных ЛРП, является актуальной. Результаты, полученные в диссертации, могут быть полезными при дальнейшем развитии целого ряда наземных и спутниковых систем радиодоступа, имеющих важное народнохозяйственное и военное значение.

Структура и основные результаты работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Ее объем составляет 190 страниц с 30 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 145 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, приведена историческая перспектива разработанности темы, сформулирована цель работы и связанная с ней научная задача; определен круг частных задач и методов их решения, указаны практическая, теоретическая значимость работы и ее научная новизна; сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе выполнен анализ современных технологий многостанционного доступа и принципов построения устройств формирования и обработки сигналов физического уровня систем радиодоступа. Рассмотрены варианты OFDM с цифровой фильтрацией поднесущих и показано, что их применение приводит к значительному усложнению алгоритмов обработки сигналов при незначительном выигрыше по помехоустойчивости. Отмечены ограничения, связанные с межсимвольной интерференцией, пик-фактором и внеполосными излучениями, также проведено сравнение технологий DS-CDMA и IDMA, выявлены их преимущества и ограничения при различном числе абонентов. Дополнительно обоснована целесообразность использования альтернативных ортогональных базисов и обобщенного быстрого преобразования Фурье, позволяющего снизить вычислительные затраты алгоритмов формирования и обработки групповых сигналов.

Во **втором** разделе рассматривается подход к организации многостанционного доступа на основе циркулярных матриц многопозиционных ЛРП. Обоснованы способы построения таких матриц, формируемых на основе неприводимых примитивных полиномов и их сопровождающих матриц. Показано, что структура каждой циркулярной матрицы ЛРП определяется выбором первообразного элемента мультипликативной группы поля Галуа по модулю неприводимого примитивного полинома. Выделены так называемые упорядоченные матрицы, у которых строки и столбцы с одинаковыми номерами совпадают. Данное свойство сохраняется при

любой циклической перестановке их строк и (или) столбцов. Доказано, что это обстоятельство позволяет организовать квазиортогональное кодовое разделение сигналов лучей при многолучевом распространении сигналов и формировании группового сигнала на основе упорядоченных циклических матриц многопозиционных ЛРП. Показано, что матрицы ДЭФ, Уолша-Адамара или ВК не обладают этим свойством, поскольку они перестают быть симметричными и ортогональными при любой циклической перестановке строк или столбцов. Разработаны правила преобразования матриц-циркулянтов многопозиционных ЛРП к единственной матрице функций ВК, упорядоченной по любому известному в настоящее время правилу. Это позволяет при формировании и обработке групповых сигналов, сформированных на основе всех возможных матриц-циркулянтов ЛРП использовать одно и то же БПФ в базисе ВК. То есть групповой сигнал на передающей стороне формируется с помощью однократного обратного БПФ в базисе ВК столбца передаваемых информационных символов с последующей перестановкой элементов полученного столбца с помощью выбранного генератора мультипликативной группы поля Галуа по модулю выбранного неприводимого примитивного полинома. На приемной стороне, наоборот, сначала осуществляется обратная перестановка дискретных отсчетов принятого сигнала с помощью такого же генератора, а затем выполняется прямое БПФ в базисе ВК.

В третьем разделе рассматриваются вопросы синхронизации периодических многозначных ЛРП на основе БПФ в базисе ВК. С целью разработки ускоренного алгоритма синхронизации этих ПСП в многолучевом канале связи при реализации алгоритма обнаружения-различения совокупности соответствующих им шумоподобных сигналов с неизвестными параметрами так же, как и в предыдущем разделе, разрабатываются и исследуются варианты построения матриц-циркулянтов псевдослучайных ЛРП на основе мультипликативных групп расширенного поля Галуа по модулю неприводимого примитивного полинома, а также варианты приведения этих матриц к полной или усеченной матрице ВК. На основе проведенных исследований разработаны структурные схемы устройства ускоренного обнаружения-различения совокупности сдвинутых по времени копий одного и того

же сигнала, а также генераторов мультипликативных групп расширенного поля Галуа, необходимых при преобразовании ЛРП к функциям ВК.

В **четвёртом** разделе разработаны варианты построения кадров как восходящего, так и нисходящего каналов связи, сформированных на основе симметричных ортогональных и квазиортогональных матриц циклических сдвигов многопозиционных ЛРП, с присоединенными синхросигналами, а также рассмотрены алгоритмы обработки как однолучевых, так и многолучевых групповых сигналов.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В **приложениях** к работе представлены акты об использовании результатов диссертационной работы и полученные свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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; установлено, что на основе вариантов сопровождающих матриц исходного полинома можно построить как минимум четыре мультипликативных группы поля;

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. Научную новизну составляют результаты исследования корреляционных свойств p -ичных ЛРП и впервые введенных автокорреляционных матриц ортогональных сигнатур на их основе. Установлено, что перемножение действительной и мнимой частей матрицы одной ЛРП дает нулевую матрицу, а

перекрестное перемножение частей матриц разных ЛРП — ненулевую, что позволило разработать способ компенсации взаимных помех при совместном использовании нескольких систем сигнатур в общей полосе частот;

4. 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 значимость

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 $N=256-1024$ 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 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, дает возможность увеличения скорости передачи данных до 25% при увеличении вычислительной

сложности алгоритма обработки пропорционально увеличению числа используемых систем сигнатур;

4. Оценивание параметров сверхдлинного синхросигнала и его многолучевых копий по действительной и мнимой частям их основных корреляционных пиков позволяет обеспечить точность оценки фазовых сдвигов частот сигналов лучей порядка $5^0 - 7^0$, а также погрешность сдвига по времени этих сигналов, не превышающую 0,1 тактового интервала; это позволяет реализовать 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.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость обосновывается новыми результатами, полученными в области использования теории ускоренного декодирования циклических p -ичных блоковых кодов максимальной длины на основе обобщенного БПФ для формирования и обработки групповых сигналов систем радиодоступа.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и выводов подтверждается апробацией результатов работы на Международных научных конференциях и публикациями в рецензируемых научных изданиях, относящихся к списку ВАК и соотнесением результатов, полученных на основе теоретических исследований, и результатов компьютерного моделирования.

Результаты работы были представлены автором при его личном участии 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)» (2024г., 2025 г.) 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, 3 публикации в Scopus.

Результаты диссертации внедрены в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» и ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», что подтверждается актами о внедрении.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в проведении теоретических исследований и разработке программного кода для компьютерного моделирования. Все результаты получены автором самостоятельно.

Соответствие паспорту специальности

Исследования, проведенные автором диссертации, соответствуют пунктам паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения: п. 1. «Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем»; п. 5. «Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки»; п. 10. «Разработка и исследование методов и устройств передачи, приема, обработки, отображения, регистрации, хранения и распространения информации, включая беспроводные, космические, эфирные, кабельные и мобильные системы передачи информации».

Недостатки и рекомендации по диссертационной работе

1. Наличие и значения количественных оценок выигрышей обобщенного БПФ в базисе функций Виленкина-Крестенсона, по сравнению с традиционным БПФ, по числу элементарных арифметических операций известны еще с начала 60-х годов, и не являются научным достижением данной работы, что не подчеркивается ни в тексте диссертации, ни в автореферате. Следовало бы

изложить результаты работы так, чтобы было понятно, что в ней обоснована лишь возможность и целесообразность использования обобщенного БПФ для формирования и обработки сигналов систем радиодоступа.

2. В разделе, посвященном синхронизации многолучевых сигналов, рассмотрена только синхронизация многопозиционных ЛРП. То есть все научные и важные для практических приложений результаты диссертации по данной проблеме относятся только к ускоренной синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП). Было бы целесообразно в первом разделе данной диссертации привести обзор соответствующих результатов, подчеркнув, что они относятся лишь к двоичным ПСП, чего не сделано.
3. В разделе 2 диссертации в таблице 2.3 порядок следования элементов мультипликативной группы расширенного поля Галуа соответствует циклическому сдвигу строк матрицы-циркулянта влево на один символ, в то время как матрица, приведенная в данной таблице, сдвинута вправо.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации А.В.Ермаковой, не снижают её теоретическую и практическую ценность.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации могут применяться в системах передачи информации с многолучевым характером распространения сигналов, в которых одновременно производится определение местоположения абонентов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию разработанных методов обработки сигналов и архитектур построения канала радиодоступа для широкополосных мобильных систем связи (включая стандарты 5G Advanced и перспективные 6G), а также для спутниковых систем на низких орбитах, характеризующихся значительными доплеровскими сдвигами.

Заключение

Диссертационная работа Анастасии Всеволодовны Ермаковой «Повышение эффективности систем радиодоступа на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей» является

законченной научной квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на актуальную тему и на достаточном научном уровне. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.13. - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции). Соискатель, Анастасия Всеволодовна Ермакова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Отзыв подготовил:

Профессор кафедры радиотехники СПбГУТ

д.т.н., профессор



Е.И. Глушанков

« 4 » 05 2026 г.

Доклад по диссертационной работе заслушан и одобрен, а также отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры радиотехники (протокол № 09 от 30 апреля 2026 г.)

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Адрес: 193232, Санкт-Петербург, проспект Большевиков, д. 22, корп. 1

Веб-сайт: <https://www.sut.ru/>

Телефон: +7 (812) 305-12-18

Адрес электронной почты: pk@sut.ru