

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, Бокк Германа Олеговича 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 предлагается заменить обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ), используемое при формировании сигналов с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)), применяемое в настоящее время в системах радиодоступа, на обобщенное БПФ в базе функций Виленкина-Крестенсона (ВК), вычислительная сложность которого по числу элементарных арифметических операций (без учета операций с памятью) приблизительно в 3 раза меньше, чем традиционного БПФ. В результате такого преобразования набора комплексных информационных символов получается не дискретный групповой информационный сигнал, представляющий собой сумму модулированных дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ), как в случае OFDM сигналов, а сумма полного набора модулированных функций ВК. После перестановки дискретных отсчетов данного сигнала по возрастанию значений элементов любой мультипликативной группы любого расширенного поля Галуа по модулю любого неприводимого примитивного полинома получается дискретный групповой сигнал, сформированный на основе циркулярной матрицы многопозиционной линейной рекуррентной последовательности (ЛРП) максимального периода, соответствующей выбранному полиному. Структура матрицы, то есть соответствие передаваемых информационных символов циклическим сдвигам выбранной ЛРП определяется также выбором неприводимого примитивного полинома, типа его мультипликативной группы и первообразного элемента этой группы. Таким образом, поднесущие группового сигнала после ЦАП будут не гармоническими, как в случае OFDM сигналов, а широкополосными шумоподобными. Каждая поднесущая будет занимать всю выделенную полосу частот. На приемной стороне производится обратная перестановка отсчетов принимаемого сигнала и прямое обобщенное БПФ в базе ВК с в три раза более низкой (без учета операций с памятью) вычислительной сложностью, чем в случае OFDM.

Основные преимущества использования циркулярных матриц многопозиционных ЛРП для формирования группового сигнала системы радиодоступа, по сравнению с функциями ДЭФ, определяется в значительной степени не гармонической шумоподобной структурой каж-

Вход. № 94/26  
« 19 » 05 2026 г.  
подпись

дой поднесущей. В результате система радиодоступа оказывается более устойчивой к доплеровскому сдвигу частоты. К групповому сигналу можно присоединить сверхдлинный шумоподобный синхросигнал, формируемый и ускоренно обрабатываемый с помощью такого же обобщенного БПФ в базисе ВК, что и групповой информационный сигнал. В результате удается избежать требований на использование циклических префиксов и тестовых сигналов для работы эквалайзера, снижающих пропускную способность. Для обработки группового сигнала в многолучевом канале можно применять технику rake-приемника.

Результаты, полученные в диссертации при решении задачи снижения сложности реализации и повышения помехоустойчивости систем радиодоступа за счет применения БПФ в базисе функций ВК и использования многопозиционных ЛРП, могут быть полезными для целого ряда наземных систем различных видов, имеющих важное народнохозяйственное и военное значение. Поэтому тема диссертации и задачи, решаемые в ней, являются весьма актуальными.

### **Основные результаты работы**

В диссертации разработаны принципы построения матриц-циркулянтов многопозиционных ЛРП, приводящихся к матрице функций ВК при любом известном правиле их упорядочения. То есть все возможные варианты циркулярных матриц ЛРП, структура каждой из которых определяется типом используемого неприводимого примитивного полинома, выбором типа мультипликативной группы расширенного поля Галуа по модулю этого полинома и первообразного элемента этой группы путем перестановки строк и столбцов приводятся к одной и той же матрице ВК размерности на единицу большей, чем размерности всех этих исходных матриц. Затем каждая строка циркулярной матрицы ЛРП рассматривается как дискретная поднесущая для формирования группового сигнала системы радиодоступа. Таким образом, для формирования и обработки группового сигнала можно использовать обобщенное БПФ в базисе ВК. В диссертации показано, что при этом обеспечивается выигрыш по числу элементарных арифметических операций (без учета операций с памятью) приблизительно в 3 раза, по сравнению с быстрым преобразованием Фурье, для одинаковых размерностей.

Выделены так называемые упорядоченные матрицы-циркулянты ЛРП, у которых строки и столбцы с одинаковыми номерами совпадают. В результате при циклической перестановке столбцов (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, снижаются помехи от поднесущих соседних лучей при многолучевом распространении сигнала.

Далее, в диссертации 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. Рассмотрено устройство ускоренного обнаружения синхросигнала и способ, а также генераторы мультипликативных групп расширенного поля Галуа сдвиговых регистрах с на многозначными D-триггерами, предназначенными для преобразования любого циклического сдвига ЛРП к функции ВК.

Предложены способы организации кадра для передачи информационных сигналов с присоединенным синхросигналом. Показано, что благодаря свойству широкополосности поднесущих при увеличении размерности используемых матриц-циркулянтов не происходит расширение спектра группового сигнала. В результате этого можно использовать ресурсные блоки разных размерностей в течение длительности времени кадра. Кроме того, не требуется использование циклических префиксов. С другой стороны, в диссертации показано, что в случае их применения удастся добиться заметного подавления взаимных помех сигналов соседних лучей в условиях многолучевого распространения. Также предложен другой способ уменьшения влияния сигналов соседних лучей, предполагающий использование временного окна с подавлением уровня сигнала на краях каждого ресурсного блока.

Указывается, что благодаря широкополосности поднесущих и использования всей выделенной полосы частот каждой из них, а также возможности слежения за частотой и задержкой по времени синхросигнала в многолучевом канале связи все варианты построения канала радиодоступа физического уровня, описанные в работе, обладают повышенной устойчивостью к доплеровскому сдвигу частоты.

### **Научная новизна**

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 началь-

ный 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 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 (без учета операций с памятью) 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/с<sup>2</sup> (скорость изменения частоты не более 100 Гц/с) при увеличении объема ОЗУ до 100 КиВ с учетом возможности передискретизации обрабатываемого синхросигнала в 5 раз;

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 повышенную точность оценки фазовых сдвигов частот сигналов лучей, 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; при этом 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**

Положения, выводы и рекомендации, высказанные в настоящей диссертационной работе, обоснованы с использованием инструментов, методов и методик, применяемых в дисциплинах, имеющих в своей основе основополагающие законы природы – это корреляционный и спектральный анализ сигналов, быстрое преобразование Фурье-Адамара, теория полей Галуа и их мультипликативных групп, статистическая радиотехника и статистическая теория обнаружения сигналов, методы компьютерного моделирования.

Сравнение полученных теоретических 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, соотнесением результатов, полученных на основе теоретических исследований и результатов компьютерного моделирования, а также широкой апробацией на международных и российских конференциях. Основные результаты докладывались и обсуждались на:

- XVI, XVII, XVIII, XIX Международной отраслевой научно-технической конференция «Технологии информационного общества» (2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.) в городе Москва;
- на МНТК «Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)» в 2024, 2025 годах в городах Выборг и Тюмень;
- на МНТК "2025 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications" (2025 г.) в городе Москва;
- на МНТК «Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)» (2025 г.) в городе Москва.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 18 работах, 3 из которых размещены в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых SCOPUS. Получены 14 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## Структура и состав 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.

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

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. В диссертации оценка выигрыша по вычислительным затратам при реализации БПФ на цифровом процессоре выполнена без учета операций с памятью, которые являются одними из самых затратных. Также не учтено, что указанный выигрыш может зависеть не только от числа необходимых элементарных арифметических операций, но и от способа реализации алгоритма; способ такой реализации может зависеть от структуры алгоритма и типа используемого устройства; сравнение алгоритмов разных вариантов БПФ по эффективности их реализации на современных цифровых сигнальных процессорах в диссертации не произведено.
2. На стр. 12 и в п.2 заключения присутствует сомнительное утверждение о том, что системы с OFDM теряют синхронизацию при доплеровских сдвигах частот от 300 Гц. Но нужно заметить, что для диапазона 2.1 ГГц такой сдвиг возникает на скоростях 150-160 км/ч, при которых пассажиры скоростных поездов работают в сети LTE без проблем.
3. Вывод о возможности сведения алгоритма преобразований ВК к алгоритму, содержащему два (или три) этапа блочных преобразований БПФ-ОБПФ с переадресацией (и соответствующая структура рис. 1.17), сформулирован исключительно на основе иллюстративного примера (см. стр. 50-52), что затрудняет оценку общности результата, и не позволяет понять почему автор в работе не воспользовался известными универсальными алгоритмами быстрого преобразования ВК, которые, например, можно найти в работах Машарского С.М. (2002) или Сюзева В.В. (2014), а вместо этого применил технику смешивания чужеродных базисов Фурье и ВК. При этом нужно заметить, что в диссертации автор постоянно критикует свойства базисных функций преобразования Фурье.
4. Следует отметить большое число погрешностей оформления. Так на стр. 18, 109, 111, 112 в показателях  $e_{\text{pr}}$  пропущена мнимая единица; допущены погрешности в вычислении произведения матриц формул (2.15), (2.16); на стр. 84 сомнительное замечание о том, что любая матрица (2.35) размерности  $N \times m$ , может быть преобразована в матрицу

(2.36) 8x8; на рис. 3.3 не понятно какие логические соединения при пересечении имеют взаимодействие, а какие нет; на стр. 18 и 121 полином  $f_2'(x)$  записан с ошибкой; на стр. 28 таблица 1.1. приведена в формате 3GPP для многолучевых моделей, но вместо номеров лучей данные первого столбца обозначены как «номер варианта модели».

### **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: снижение сложности реализации и повышение помехоустойчивости систем радиодоступа путем разработки и применения методов обработки сигналов на основе БПФ в базисе функций ВК и многопозиционных ЛРП. 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 А.В. Ермаковой полностью 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 ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Руководитель направления развития радиоинтерфейса

д.т.н.

« 19 » мая 2026 г.

Бокк Г.О.

Подпись Бокк Германа Олеговича заверяю.

Начальник отдела кадров

Общество с ограниченной ответственностью «НИРИТ-СИНВЭЙ Телеком Технолоджи». 117638, Москва, Одесская ул., 2С.

Тел.: +7 (495) 643-11-86  
e-mail: [bokkg@yandex.ru](mailto:bokkg@yandex.ru)



Колкин А.Е.