

На правах рукописи



ТАРАСЕНКО АННА МАКСИМОВНА

**МЕТОДИКА ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Институте микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Научный руководитель: **Чистюхин Виктор Васильевич,**
кандидат технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Толстов Евгений Федорович,**
доктор технических наук, начальник отдела АО «АЭРО-КОН», Московская обл., г. Жуковский

Ракитин Алексей Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Ведущая организация: АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», г. Москва

Защита диссертации состоится « 5 » июня 2019 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7, ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета и на сайте ВлГУ <http://dis.vlsu.ru>

Автореферат разослан 4 апреля 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04 Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Формирование и исследование сигналов является важной задачей радиотехники. Современные сложные радиотехнические системы содержат большое количество радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству выходной информации, значительное влияние на которое оказывает вид модуляции и структура сложного сигнала.

Анализ существующих и перспективных разработок показывает, что одним из главных направлений развития и совершенствования РЭС является поиск новых видов сложных сигналов, к которым можно отнести сигналы с комбинированными видами модуляции, программно изменяемыми параметрами, межпериодным расширением спектра и шумоподобные радиосигналы. В системах связи и средствах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяется интеллектуальная перестройка режимов формирования и приёма сигналов для защиты от помех и обнаружения. Большое внимание уделяется разработке РЭС, способных маскироваться, имитируя мобильную связь, используя частотные полосы гражданских систем и сходные виды модуляции.

Системный подход к разработке сложных радиотехнических средств (РТС) подразумевает согласованный выбор аппаратных и программных решений на ранних стадиях разработки. Учитывая растущую потребность нашей страны в современных и перспективных средствах ДЗЗ, следует уделять серьезное внимание поиску, исследованию и разработке методик формирования сложных сигналов РТС на ранних стадиях создания изделия для согласованного выбора аппаратуры формирователя. Новые сигналы должны создаваться совместно с разработкой приемо-передающей аппаратуры сложных радиотехнических систем и заложенными в них алгоритмами обработки информации.

В настоящее время растёт практический интерес к размещению средств ДЗЗ на малых космических и летательных аппаратах, что влечёт за собой требования по уменьшению массы, габаритов, снижению необходимой мощности передатчика. Решение этих задач связано с использованием сложных сигналов. Применение традиционных видов модуляции, таких как линейная частотная модуляция (ЛЧМ), приводит к тому, что для подавления высоких боковых лепестков (БЛ) применяются весовые окна. Это делает фильтрацию несогласованной и приводит к ухудшению разрешающей способности и отношения сигнал/шум. Многие учёные на протяжении последних десятилетий активно занимаются поиском сложных сигналов и модулирующих функций, имеющих низкий уровень БЛ автокорреляционной функции (АКФ).

Несмотря на то, что существуют различные методики оценки сложных сигналов, проблемным вопросом выбора модулирующей функции является максимальный и интегральный уровень боковых лепестков автокорреляционной функции и их расположение. Его решению посвящены труды отечественных ученых: Л. Е. Варакина, В. П. Ипатова, Д. Е. Вакмана, М. Б. Свердлика, В. Б. Пестрякова, В. В. Кострова, Е. И. Кренгеля, А. А. Бессарабовой, А. Н. Леухина, З. В. Черняка, Л. Г. Корниловой, В. А. Едемского, И. В. Каменского. Поиск новых сложных сигналов ведут и зарубежные ученые: В. Sklar, С. Cook, М. Bernfeld, Н. Barker, N. Levanon, Е. Mozeson, J. Jedwab, R. A. Kristiansen, P. Borwein, R. Ferguson, С. Nunn, G. Coxson, К. А. Lukin, М. Gresko и др.

Уровень боковых лепестков (УБЛ), обусловленный корреляционными свойствами модулирующих функций, оказывает существенное влияние на качество выходной информации. В системах связи при передаче информации на вход приемного тракта одновременно поступают сигналы различной амплитуды от нескольких станций. Таким образом, в результате обработки высокие боковые лепестки сжатых сигналов с большой амплитудой могут перекрывать главные лепестки низкоуровневых сигналов, что приводит к снижению скорости передачи и потерям информации. В системах дистанционного зондирования Земли на вход приемного тракта радиотехнического датчика также поступает композиция сложных сигналов, отраженных от множества предметов на снимаемом участке. Как следствие, высокие БЛ откликов от объектов с большой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) скрывают отклики от объектов с малой ЭПР. Также высокие боковые лепестки могут породить ложные отклики, искажающие итоговое изображение. Высокий интегральный уровень боковых лепестков обуславливает «засветку» фона, снижает динамический диапазон и затрудняет обнаружение поверхностно-распределённых объектов с низким коэффициентом обратного рассеяния и распознавание объектов с мало различающимися удельными ЭПР.

Динамический диапазон изображений, получаемых радиотехническим датчиком ДЗЗ, особенно важен для задач сельского и лесного хозяйства. В условиях Крайнего Севера и арктических льдов возрастают требования к радиометрическому разрешению получаемых изображений для определения границы раздела сред морская вода/лёд, молодой/старый лёд, необходимой для нахождения пути прохода каравана судов. При проведении мониторинга чрезвычайных ситуаций ошибки дешифрирования из-за ложных откликов и артефактов на изображении могут привести к неэффективности спасательных мероприятий.

Приведенные выше примеры свидетельствуют о том, что снижение уровней боковых лепестков, обусловленных корреляционными свойствами сложных сигналов, и

порождаемых ими ложных откликов на изображении является актуальной задачей. Возможность излучения сигналов с различными корреляционными свойствами расширяет круг задач, решаемых датчиком ДЗЗ, что особенно важно для космических датчиков, запуск которых в настоящее время осложняется ограниченным финансированием.

Таким образом, важной частью задачи по созданию радиотехнических датчиков ДЗЗ является разработка и практическая проверка методики цифрового формирования сложных сигналов, включая исследование их свойств с целью улучшения зависящих от них характеристик радиотехнических датчиков, так как выбор вида излучаемого сигнала нередко оказывается единственным доступным способом удовлетворения предъявляемых требований.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что методика формирования сложных сигналов, включающая в себя поиск и последующее исследование функции или набора функций для модуляции сигнала, позволяет улучшить радиотехническую систему в целом: уменьшить уровень боковых лепестков, тем самым повысить отношение сигнал/шум и радиометрические характеристики, а также качество выходного продукта.

Объектом исследования является формирователь сигналов радиотехнического датчика ДЗЗ.

Предметом исследования является методика цифрового формирования сигналов радиотехнического датчика ДЗЗ.

Цель работы: разработка методики цифрового формирования сложного сигнала для улучшения характеристик изображения, получаемого радиотехническим датчиком дистанционного зондирования Земли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Исследовать известные модулирующие функции, применяемые для формирования сигналов активных радиотехнических датчиков, и предъявляемые к ним требования.
2. Выбрать методы для проведения дальнейших исследований и сформулировать критерии выбора функций для модуляции радиосигнала.
3. Исследовать современные методы формирования сигналов и рассмотреть возможность их модификации с целью улучшения характеристик изображения путем снижения уровня боковых лепестков функции отклика.
4. Разработать программные средства для реализации выбранных методов исследования и создания моделей сложных сигналов с различной модуляцией.
5. Построить модели сложных сигналов и провести сравнение двумерных функций отклика, получаемых при использовании линейной частотной модуляции, фазокодовой манипуляции комбинациями псевдослучайных последовательностей, а также стохастических функций для модуляции радиосигналов.

6. На основе анализа результатов математического моделирования и сравнения двумерных функций отклика предложить новые виды сложных сигналов, позволяющих улучшить характеристики изображения.

7. Провести эксперименты по формированию сложных сигналов радиотехнических датчиков (РТД). Выполнить анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования.

8. На основе проведённых исследований разработать и экспериментально подтвердить методику цифрового формирования сложных сигналов, а также выработать рекомендации по применению определенного вида сложного сигнала для решения практических задач.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием метода корреляционного анализа, теории сигналов, теории цифровой обработки сигналов, методов математического, имитационного и полунатурного моделирования.

Научная новизна работы

1) Разработана методика формирования сложных сигналов, включающая в себя исследование сигналов различных видов.

2) Предложены новые виды сложных сигналов на основе комбинаций M-последовательностей, последовательностей Лежандра и с использованием стохастических модулирующих функций.

3) На основании полученного аналитического выражения, связывающего вид двумерной функции отклика с функциями внутриимпульсной модуляции и перестройки частоты импульсов радиосигнала, предложена модификация метода межпериодного расширения спектра.

4) Сформулированы критерии выбора функций для модуляции сложного сигнала радиотехнического датчика ДЗЗ.

Достоверность основных положений и выводов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами математического моделирования, а также сравнением изображений, полученных в результате эксперимента, с результатами математического моделирования.

Практическая значимость исследования

На основании проведённого сравнительного анализа выявлено, что при выборе вида сложного сигнала необходимо исходить из целевого назначения РЭС. Выработаны рекомендации по применению сигналов, модулированных различными функциями, для решения практических задач. Предложена методика формирования и новые виды сложных сигналов, которые могут применяться при разработке формирователя сигналов радиотехнических датчиков ДЗЗ.

Новый вид сложного сигнала на базе комбинаций чередования и сдвига М-последовательностей (МП) позволяет улучшить качество получаемого изображения путем снижения яркости ложных откликов без существенного усложнения схемотехнических решений. Для МП длиной 1023 яркость ложных откликов может быть снижена до уровня минус 55,5 дБ. Применение стохастических функций для модуляции импульсов снижает яркость артефактов до уровня минус 45,7 дБ и повышает скрытность работы РТД.

Модификация метода межпериодного расширения спектра позволяет улучшить пространственное разрешение изображения пропорционально расширению спектра и уменьшить при этом ложные отклики на изображении. При расширении спектра с 30 до 200 МГц уровни ложных откликов были снижены с минус 2,1 дБ до минус 15,1 дБ

При решении задач оценки ЭПР снимаемых протяженных объектов предпочтительнее использование комбинационных сигналов на базе последовательностей Лежандра, так как интегральный уровень боковых лепестков, который они обеспечивают, на 3,2 дБ ниже, чем в случае с МП.

Модуляция сигнала комбинациями М-последовательностей с различными законами чередования была применена в макете приемо-передающей аппаратуры космического радиотехнического датчика «ЭЛСАР».

Формирование, имитация и анализ сигналов РЭС средствами аппаратно-программного комплекса экспериментальной отработки применяется при наземных бесполётных испытаниях авиационного радиотехнического комплекса. Имитированные сигналы различных РЭС, сформированные средствами аппаратно-программного комплекса экспериментальной отработки в соответствии с предлагаемыми методиками, могут использоваться для пополнения библиотеки систем радиотехнической разведки.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Института микроприборов и систем управления НИУ «МИЭТ» при проведении занятий по курсу «Цифровая обработка сигналов» и использованы в АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» при проведении опытно-конструкторских работ в части выбора параметров формирователя сигналов.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная методика позволяет найти сложные сигналы, применение которых улучшает характеристики изображения, получаемого радиотехническим датчиком ДЗЗ.
2. Применение непериодического закона перестройки частоты при формировании сложного сигнала методом межпериодного расширения спектра позволяет улучшить характеристики получаемого изображения посредством снижения уровней боковых

лепестков функции отклика на 13 дБ при базе одиночного сигнала 500 и ширине спектра сигнала 200 МГц.

3. При модуляции сигнала радиотехнического датчика стохастическими функциями достигается подавление ложных откликов до уровня минус 45,7 дБ.

4. Формирование фазокодоманипулированного (ФКМ) сигнала путем чередования и циклического сдвига М-последовательностей позволяет уменьшить яркости ложных откликов на изображении на 24 дБ при длине последовательности 1023.

Апробация работы. По материалам диссертации сделаны доклады на XXIV, XXVI, XXVIII и XXIX Международных Крымских конференциях «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2014, 2016, 2017, 2018 гг.), XII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» МНТОРЭС им. А.С. Попова (г. Адлер, 2015 г.), X и XI Всероссийских научно-технических конференциях «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского» (г. Москва, 2013, 2014 гг.), 22-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (г. Москва, 2015), Международной научно-технической конференции «Научно-технические проблемы построения систем и комплексов землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами» (г. Москва, 2013 г.), VII и VIII Всероссийских Армандовских чтениях Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (г. Муром, 2017, 2018 гг.), 11-й Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва, 2017 г.), 5-й и 6-й Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров «Минцевские чтения» (г. Москва, 2017, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 научные статьи в изданиях, входящих в список ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы. Основной текст диссертации изложен на 131 странице, содержит 74 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель исследования и решаемые задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященной вопросам поиска и синтезирования перспективных кодов, выбора моду-

лирующих функций и улучшения их корреляционных свойств. Отмечено, что применение различных способов оценки и критериев выбора закона модуляции затрудняет их сравнение. Проведен анализ существующих подходов и критериев, применяемых для оценки сигналов различного типа, однако с их помощью сделать вывод о преимуществах и недостатках таких сигналов для радиотехнических датчиков, где изображение формируется путем когерентного накопления отраженных сигналов, затруднительно.

Улучшение энергетических характеристик системы, повышение помехоустойчивости и уровня сигнал-шум может быть достигнуто выбором функции для модуляции радиосигнала. В зарубежных и отечественных датчиках ДЗЗ широко используются сигналы на базе ЛЧМ, однако необходимость применения весовых функций для подавления БЛ приводит к ухудшению пространственного разрешения и энергетических характеристик датчика из-за отклонения от условий согласованной фильтрации. Для улучшения корреляционных свойств сигнала при согласованной фильтрации применяется нелинейная частотная модуляция, а также дискретное кодирование по частоте кодами Костаса и другими. Однако всё равно возникает проблема неоднозначности по дальности, обусловленная модуляцией радиоимпульсов в сигнале коррелирующими функциями, которая становится особенно острой при проведении съемки из космоса. Как следствие, к модулирующим функциям предъявляются требования по их ортогональности или низкой взаимокорреляционной функции (ВКФ).

Показано, что перспективным средством снижения яркости ложных откликов на изображении является составление фазокодированных сигналов на базе комбинаций модулирующих функций, обладающих низкой взаимной корреляцией и приближенной к идеальной АКФ. Среди минимаксных последовательностей наибольшее распространение в ДЗЗ получили М-последовательности, в основном, ввиду простоты генерации. Именно сигнал, модулированный МП, был использован при проведении картографирования Венеры в 1983 году. На базе МП формируются ансамбли псевдослучайных последовательностей Голда, Касами, де Брейне и др., также они используются в качестве исходных данных для генетических алгоритмов поиска последовательностей с АКФ, приближенной к идеальной, что подтверждает перспективность построения на их базе новых модулирующих функций. Многоуровневые последовательности, в том числе обобщенные коды Баркера, расширяют набор функций для модуляции, однако имеют дополнительные сложности при генерации, а также менее помехоустойчивы по сравнению с бинарными.

В соответствии с проведенным обзором, актуальной представляется задача разработки методики формирования сложных сигналов, включающей поиск и анализ модулирующих функций и их комбинаций, а также воспроизведение построенного

сигнала на несущей частоте с целью сравнения характеристик изображений, полученных в результате математического и полунатурного моделирования.

Во второй главе представлены основные принципы формирования сложного сигнала и получения изображения, выбор критериев оценки его качества. Таким образом, подготовлена методическая база для формирования сложных сигналов различного вида и оценки их влияния на качество получаемого выходного продукта.

Сформулированы основные параметры для оценки применимости выбранной модулирующей функции или семейства функций, которые необходимы для решения большинства задач. При верификации радиотехнического датчика ДЗЗ выдвигаются требования к измерению пространственной разрешающей способности, динамического диапазона, радиометрической калибровке. Рассмотрены неточности, возникающие при анализе одномерных АКФ.

РТД является линейной системой. Для его описания целесообразно использовать стандартную характеристику, применяемую для линейных систем, импульсную характеристику. Для радиотехнического датчика ДЗЗ ею является двумерная функция отклика (ФО). При правильном выборе серии модулирующих функций характеристики двумерной ФО могут быть улучшены по сравнению с одномерной, анализируемой по тем же критериям. Таким образом, анализ двумерной ФО для оценки применимости семейства модулирующих функций при формировании сложного сигнала РТД вместо анализа АКФ позволяет определить влияние их комбинирования и упорядочения на уровни ложных откликов на изображении.

Одним из способов улучшения пространственного разрешения по дальности является формирование сигналов по методу межпериодного расширения спектра, который предполагает дискретную перестройку несущей частоты импульсов с минимальным шагом Δf по закону $f_k = f_0 + m_k \Delta f$, где k – номер импульса в сеансе, $-M \leq m_k \leq M$. Таким образом, при ширине спектра одиночных импульсов ΔF_0 достигается полная ширина спектра сложного сигнала $\Delta F = \Delta F_0 + 2M\Delta f$ и может быть получено разрешение датчика по дальности $\rho_r = c/2\Delta F$. При обработке радиоголограммы несущая частота всех импульсов f_0 считается одинаковой, а фактическая отстройка по частоте учитывается как второй множитель комплексной огибающей k -го импульса:

$$\dot{a}(k, \tau) = e^{j\varphi_k(\tau)} \cdot e^{2\pi j m_k \Delta f \tau} = \dot{f}(k, \tau) \cdot \dot{g}(k, \tau), \quad (1)$$

где $\dot{f}(k, \tau) = e^{j\varphi_k(\tau)}$ – фазовая модуляция k -го импульса на центральной частоте $f_k = f_0 + m_k \Delta f$, $\dot{g}(k, \tau) = e^{2\pi j m_k \Delta f \tau}$ – множитель, описывающий отстройку центральной частоты k -го импульса от f_0 . Для приведения радиоголограммы $\dot{f}(k, \tau)$ к

виду, пригодному для обработки методом межпериодного расширения спектра, выполняется: 1) построчное преобразование в частотную область с последующим центрированием нулевой спектральной составляющей; 2) дополнение спектров нулевыми отсчётами в области высоких частот до диапазона, достаточного для отображения полного спектра сложного сигнала; 3) обратное преобразование Фурье во временную область и построчное умножение на $\dot{g}(k, \tau)$ для получения комплексной огибающей $\dot{a}(k, \tau)$ по формуле (1).

Расчётный вид двумерной импульсной характеристики датчика получается композицией сжатий комплексной огибающей двумерного сложного сигнала, рассматриваемого как радиоголограмма одиночного точечного отражателя, находящегося на траверсе траектории носителя датчика:

$$\dot{a}_1(k, \Delta\tau) = H_r[a](k, \Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{a}(k, \tau) \cdot \dot{a}^*(k, \tau - \Delta\tau) d\tau - \text{сжатие по дальности,}$$

имеющее вид автокорреляционной функции комплексной огибающей каждого импульса анализируемого сложного сигнала (строки радиоголограммы),

$\dot{a}_2(x, \Delta\tau) = F[\dot{a}_1(k, \Delta\tau)](x, \Delta\tau)$ - сжатие по азимуту, в данной задаче имеющее вид преобразования Фурье матрицы $\dot{a}_1(k, \Delta\tau)$ по столбцам. Такой же композицией двух сжатий по дальности и азимуту из двумерных комплексных функций $\dot{f}(k, \tau)$ и $\dot{g}(k, \tau)$ могут быть получены двумерные функции $\dot{f}_2(x, \Delta\tau)$ и $\dot{g}_2(x, \Delta\tau)$. Первая из них являлась бы двумерной импульсной характеристикой рассматриваемого РТД при отсутствии перестройки частоты импульсов или в случае, когда при обработке радиоголограммы информация об отстройке частоты импульсов не учитывалась бы. Вторая функция не имеет самостоятельного физического смысла, однако позволяет объяснить вид главного и боковых лепестков двумерной импульсной характеристики датчика $\dot{a}_2(x, \Delta\tau)$ для некоторых характерных случаев закона перестройки частоты импульсов сложного сигнала. В главе 2 показана взаимосвязь рассмотренных выше двумерных функций в виде свёртки по азимутальной координате:

$$\dot{s}_2(x, \Delta\tau) = \dot{f}_2(x', \Delta\tau) * \dot{g}_2(x - x', \Delta\tau). \quad (2)$$

Таким образом, эффект сужения главного лепестка функции отклика по дальности при использовании межпериодного расширения спектра обусловлен свойствами двумерной функции $\dot{g}_2(x, \Delta\tau)$, а именно, шириной сечения её главного лепестка по дальности $\dot{g}_2(0, \Delta\tau)$, которое при выполнении свёртки по азимуту является амплитудным коэффициентом. В то же время при выборе функции перестройки частоты необходимо обеспечить отсутствие БЛ $\dot{g}_2(x, \Delta\tau)$, имеющих высокие уровни, в диапазоне задержек, соответствующем ширине дальностного сечения главного ле-

пестка функции $\dot{f}_2(x, \Delta\tau)$: при определённых азимутах в результате свертки могут проявиться высокие боковые лепестки результирующей двумерной функции отклика РТД (рис. 1, слева).

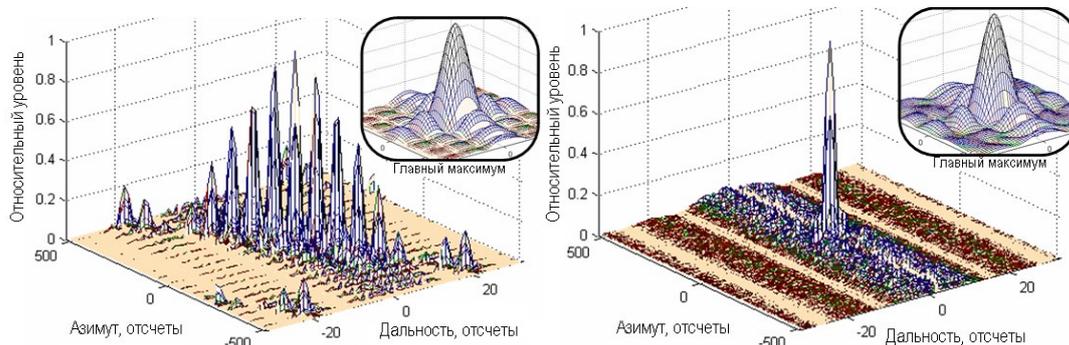


Рисунок 1. Функция отклика при перестройке частоты по линейному закону (слева) и по закону случайных чисел (справа)

Для оценки качества тестового изображения, а значит, и применимости сигнала в датчике ДЗЗ, выбраны следующие параметры двумерной ФО:

- ширина главного максимума по уровню -3дБ ;
- относительный уровень максимального бокового лепестка;
- интегральный уровень боковых лепестков;
- распределение боковых лепестков по площади изображения.

Параметры двумерной функции отклика рассчитывались с помощью аппаратно-программных средств. Программное моделирование цифровых радиоголограмм реализовано на языке Matlab. Для дальнейшей обработки голограммы сохранялись в бинарный файл со специальным форматом, позволяющим хранить не только двумерный массив отсчетов, но и информацию об использованных сигналах в виде массивов параметров модулирующих функций или непосредственных комплексных отсчетов сигнала.

Интегральный ISLR и максимальный PSLR относительные уровни боковых лепестков рассчитываются по формулам

$$\text{ISLR} = 10 \cdot \log_{10} \left(1 - \frac{\sum_{\substack{-2 \leq r \leq 2 \\ -2 \leq x \leq 2}} |z_{rx}|^2}{\sum |z_{rx}|^2} \right);$$

$$\text{PSLR} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{|z_{xr}|_{\max_{(x,r) \notin \Theta}}}{|z_{0,0}|} \right),$$

где x, r – координаты азимута и дальности пиксела первичного комплексного изображения \dot{z}_{rx} , Θ_{rx} – окрестность главного лепестка (ГЛ), имеющая размеры

$2.8\delta r \times 2.8\delta x$, δr , δx – ширина главного лепестка на уровне -3 дБ. Размеры этой окрестности, округлённые до целых значений, 5×5 точек.

Предложенная методика цифрового формирования сложных сигналов для улучшения характеристик получаемого изображения путем выбора модулирующих функций включает следующие шаги.

1. Выбор семейства модулирующих функций на основе анализа их АКФ и ВКФ по критериям: база, ширина ГЛ, интегральный и максимальный УБЛ.
2. Создание цифровых моделей двумерного сигнала, составленного из серии импульсов, модулированных исследуемыми функциями, с учетом различных возможностей их комбинаций и модификаций (чередование/сдвиг).
3. Формирование цифровой модели двумерной функции отклика и её анализ по выбранным критериям.
4. Построение цифровой модели модулирующего сигнала с учётом особенностей генератора.
5. Формирование файла данных в формате, поддерживаемом генератором сигналов (для работы на стенде), или бинарного файла для сохранения в долговременной памяти радиотехнического датчика.
6. Воспроизведение сигнала из цифровой модели, приём этого же сигнала через шлейф, запись цифровой радиоголограммы. Сжатие радиоголограммы по дальности и азимуту.
7. Анализ двумерной аппаратной функции отклика.

Таким образом, в соответствии с предложенной методикой, выбор модулирующих функций, составление цифровых моделей на их основе и анализ модельных функций отклика можно реализовать до начала или на начальных этапах разработки РТД, что позволит оценить ожидаемые характеристики изображения, которые могут быть получены при использовании выбранного вида сложного сигнала. Воспроизведение радиосигналов и сравнительный анализ аппаратной и модельной функций отклика позволит оценить соответствие параметров изображений, полученных в результате полунатурного моделирования, предъявляемым требованиям.

В третьей главе приведены результаты исследования функции отклика для различных видов сложных сигналов методом математического моделирования. Проведена оценка таких параметров ФО, как ширина главного максимума, вид и распределение боковых лепестков, их интегральный и максимальный уровень.

Сравнение вида двумерной функции отклика сигналов с ЛЧМ и ФКМ по закону М-последовательности при одинаковой ширине спектра показывает, что интегральный УБЛ сигнала, модулированного МП, составляет минус 5,1 дБ, что на 2,4 дБ больше, чем у ЛЧМ без применения фильтра, и на 5,1 дБ при наложении окна Хэм-

минга. Однако даже с применением взвешивающей функции относительный УБЛ ЛЧМ сигнала выше, чем в случае ФКМ МП.

Распределение боковых лепестков двумерных функций отклика, полученных при моделировании различных законов чередования модулирующих функций, приведено на рисунке 2 (здесь и далее столбец главного максимума вырезан).

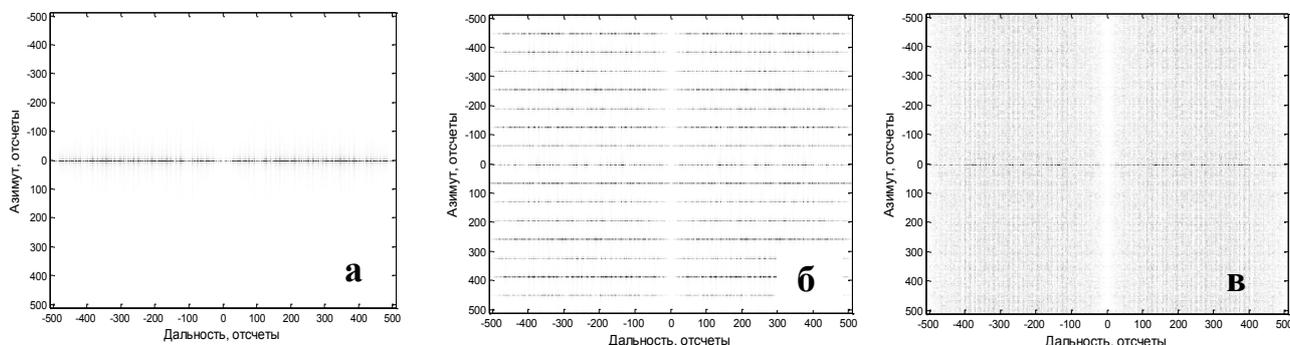


Рисунок 2. Боковые лепестки двумерной функции отклика для случая без чередования (а), с периодическим чередованием (б) и чередованием по закону случайных чисел (в)

Использование чередования М-последовательностей приводит к снижению уровней боковых лепестков в сечении двумерной ФО по дальности, а чередование М-последовательностей по закону случайных чисел приводит к более равномерному распределению боковых лепестков по всей площади изображения. Применение для модуляции импульсов циклического сдвига одной и той же модулирующей М-последовательности также приводит к снижению относительного УБЛ, что видно из таблицы 1.

При линейном сдвиге БЛ концентрируются вблизи главного сечения по дальности, однако в самом сечении наблюдается их снижение (рис. 3). Совмещение чередования и циклического сдвига последовательностей приводит к дополнительному снижению УБЛ. Таким образом, наилучшим из предложенных способов построения сигнала на базе МП является совмещение случайного чередования со случайным циклическим сдвигом. Моделирование сигналов с ФКМ последовательностями Лежандра в диапазоне длин [967; 1091] продемонстрировало относительный УБЛ, сравнимый с полученным для МП 10 порядка, при этом циклический сдвиг каждой из последовательностей на четверть длины обеспечил снижение интегрального УБЛ до минус 8,3 дБ.

Проведенное моделирование и исследование сигналов, формируемых методом межпериодного расширения спектра при перестройке несущей частоты в диапазоне, значительно превышающем ширину спектра одиночного импульса, подтвердило возможность улучшения разрешающей способности по дальности и снижения уровня максимальных боковых лепестков на 13 дБ при случайном законе перестройки частоты импульсов и базе сигнала равной 500.

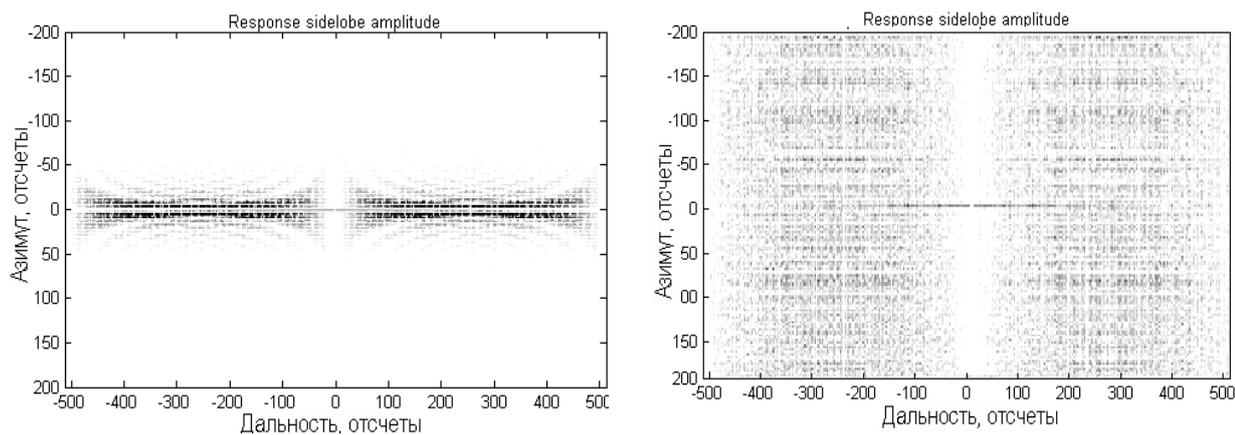


Рисунок 3. Боковые лепестки ФО для линейного (слева) и случайного (справа) циклического сдвига М - последовательности

Таблица 1. Результаты математического моделирования ФКМ сигналов на базе различных комбинаций М - последовательностей

Способ модуляции	Распределение боковых лепестков	Относительный УБЛ, дБ	Интегральный УБЛ, дБ
Чередование МП и циклический сдвиг случайные	Равномерное	-55,5	-5,1
Случайное чередование МП и линейный сдвиг	Равномерное	-47,0	-5,2
Случайный циклический сдвиг одной МП	Локализованы в главном сечении	-53,8	-5,1
Периодическое чередование МП и линейный сдвиг	Периодические полосы	-42,5	-5,2
Случайное чередование М-последовательностей	Максимальные БЛ в главном сечении	-40,6	-5,3
Линейный сдвиг одной М-последовательности	Локализованы вблизи главного сечения	-39,2	-5,2
Периодическое чередование МП	Периодические полосы	-36,3	-5,4
Без чередования и сдвига (одна МП)	Локализованы в главном сечении	-28,4	-5,4

На моделях шумоподобных сигналов с m -позиционной фазовой и m^2 -позиционной квадратурной модуляцией по закону случайных чисел с равномерным распределением получен низкий максимальный УБЛ функции отклика, сравнимый с достигаемым при использовании М-последовательностей. При этом шумоподобные сигналы обладают структурной скрытностью.

Таким образом, из рассмотренных в работе сложных сигналов наиболее низкий интегральный уровень боковых лепестков обеспечивает ЛЧМ - минус 7,5 дБ, а после применения весового окна – минус 10,2. Следует отметить, что при модуляции сигнала

сдвинутыми последовательностями Лежандра достигается интегральный уровень боковых лепестков минус 8,3 дБ без применения весового окна (табл.2).

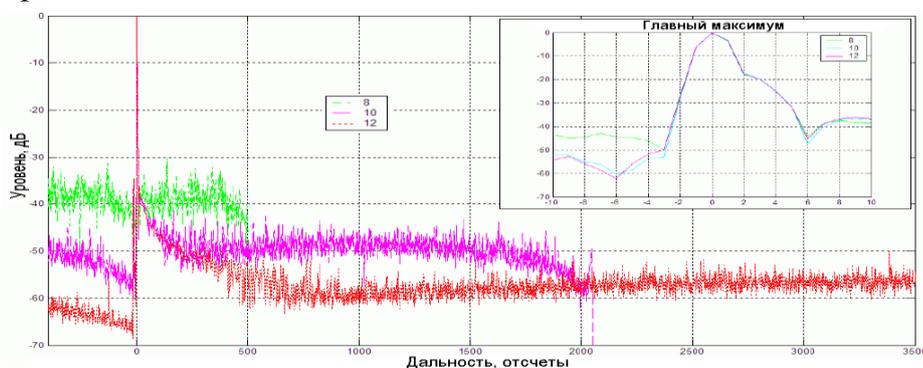
Таблица 2. Результаты моделирования сигналов с различными видами модуляции

	m-позиционная фазовая модуляция				m ² -позиционная квадратурная модуляция			ФКМ, МП 1023	ФКМ посл. Лежандра	ЛЧМ
	m=2	m=4	m=8	m=8	m=2	m=4	m=16			
Максимальный УБЛ, дБ	-51,9	-52,6	-52,2	-45,7*	-51,9	-51,4	-51,3	-55,5	-51,9	-7,5/ -10,2**
Интегральный УБЛ, дБ	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6*	-2,6	-2,6	-2,6	-4,9	-8,3	-13,6/ -42,3**
Примечание:	* с окном Ханна				** с окном Хэмминга					

Изменение законов составления сложного сигнала на базе M-последовательности на этот параметр не влияет. Однако совмещение чередования и линейного сдвига позволяет сформировать такие комбинации модулирующих последовательностей, которые обеспечивают значительное снижение яркости ложных откликов на изображении путем уменьшения пикового УБЛ двумерной функции отклика до минус 55,5 дБ.

В четвертой главе дано описание макета приёмо-передающей аппаратуры космического датчика ДЗЗ с формирователем сигнала, модулированного M-последовательностью. Описан стенд полунатурного моделирования, а также приведены результаты эксперимента по получению ФО для разных длин при периодическом чередовании M-последовательностей.

Формирование сигнала в макете приёмо-передающей аппаратуры осуществлялось путём двухпозиционной фазовой модуляции на промежуточной частоте с помощью переключателя фазы 0/180°, управляемого логическим сигналом. Модулирующая последовательность выбиралась из таблицы, записанной в ПЗУ, в жёстком порядке.



Для различных режимов съёмки были составлены таблицы M-последовательностей длиной от 255 до 8191.

Рисунок 4. Сечения ФО по дальности при длинах образующего регистра M-последовательности 8, 10, 12 (результаты испытаний макета)

Лабораторно-отрабочные испытания фрагмента космического РТД X-диапазона проводились на стенде полунатурного моделирования, содержащем макет приёмо-передающей аппаратуры, а также образцы приёмо-передающего модуля и излучателя АФАР. На рисунке 4 приведены сечения двумерных функций отклика, построенных при модуляции сигнала МП различной длины. Из графиков видно, что длина модулирующей последовательности оказывает влияние на вид и уровни дальних боковых лепестков, в то время как форма главного лепестка и огибающая ближайших боковых лепестков (в сторону запаздывания от главного) определяются спектром сигнала и импульсной характеристикой радиотракта.

Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования приведено на рисунке 5. Ширина сечения главного максимума по дальности экспериментальной функции отклика незначительно превышает ширину расчётной, что связано с ограниченной полосой пропускания радиотракта макета по частоте. Несимметричность главного лепестка обусловлена влиянием импульсной характеристики приёмо-передающего тракта, определённой как функция от времени только при положительных значениях аргумента.

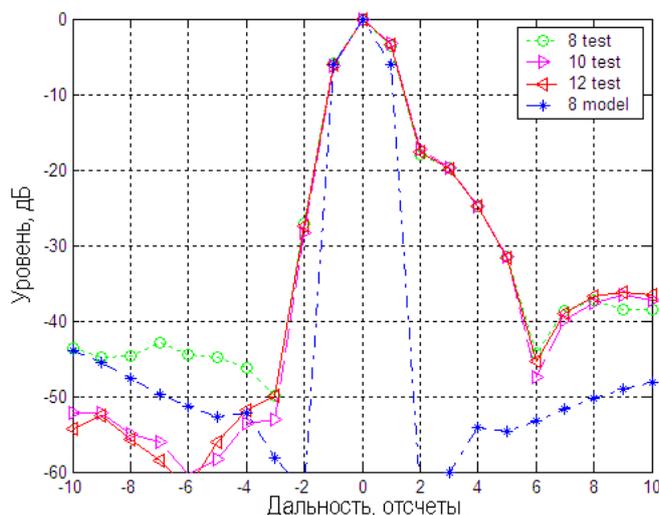


Рисунок 5. Сечения по дальности ФО в окрестности главного максимума при длинах образующего регистра М-последовательности 8 (результаты моделирования и эксперимента), 10, 12 (результаты испытаний макета)

В ходе испытаний опытного образца космического радиотехнического датчика «Кондор-Э» на стенде полунатурного моделирования имитированный отраженный сигнал, предварительно синтезированный с учетом информации о снимаемой поверхности и виде сигнала, воспроизводился с помощью генератора сигналов произвольной формы и подавался на приемную систему радиотехнического датчика. Для синтеза отраженных сигналов использовалась одна и та же модель пространственной миры, принятая согласно международной программе «Открытое небо», и радиосигналы с двумя видами модуляции: ЛЧМ и ФКМ М-последовательностью.

Для оценки радиометрических характеристик моделировался ряд однородных прямоугольных участков, значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) которых задавались с шагом 3 дБ в диапазоне 42 дБ, упорядоченных по возрастанию УЭПР в направлении азимутальной оси.

При проведении сравнения разрешающей способности по дальности в качестве инварианта была выбрана ширина полосы частот радиосигнала 200 МГц, так как при одинаковой ширине полосы разрешающая способность по дальности, согласно теории, должна быть примерно одинаковой.

На рисунке 6 приведены сечения главного лепестка ФО при двух типах модуляции. Для объективности сравнения весовые окна не использовались. Видно, что ближайšie боковые лепестки ФО при ЛЧМ находятся на уровне минус 13 дБ, что соответствует теории и проведенному моделированию. Ближние боковые лепестки ФО при модуляции МП находятся на уровне минус 19 дБ и обусловлены не свойствами функций, модулирующих сигнал, а характеристиками приемо-передающего тракта. Ширина главных лепестков на уровне минус 3 дБ, определяющая разрешающую способность по дальности, приблизительно одинакова, что обусловлено шириной полосы пропускания радиотракта, однако применение окна Хэмминга приведет к расширению главного лепестка и снижению его уровня, что ухудшит пространственное разрешение и уровень сигнал/шум.

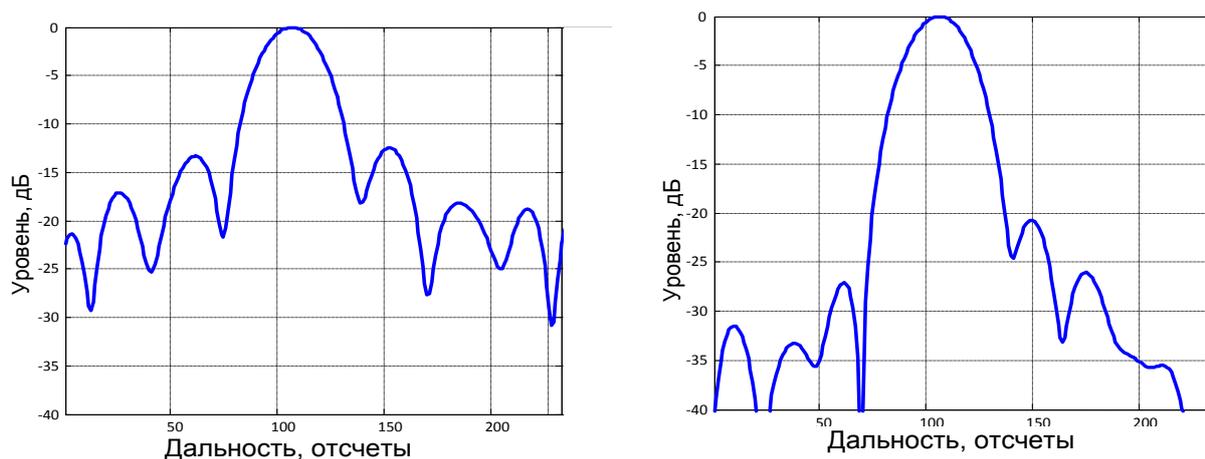


Рисунок 6. Сечение изображения точечного объекта по дальности (слева – ЛЧМ, справа – М-последовательность)

Динамический диапазон изображений поверхностно-распределённых объектов, ограниченный интегральным УБЛ, в обоих случаях значительно ниже диапазона значений УЭПР мира (42 дБ), и составляет 18 дБ для ЛЧМ и 16 дБ для М-последовательности (рис. 7). Данный эксперимент подтверждает, что для задач обнаружения, предпочтительнее использовать ФКМ М, так как при этом обеспечивается лучшее пространственное разрешение и энергетические характеристики, а использование ЛЧМ-сигналов обеспечивает лучшие радиометрические характеристики, что особенно важно для оценки ЭПР пространственно-распределённых объектов.

С помощью макета формирователя сигналов из состава многофункционального испытательно-измерительного комплекса все виды сигналов, предлагаемые в работе, были сгенерированы на несущей частоте.

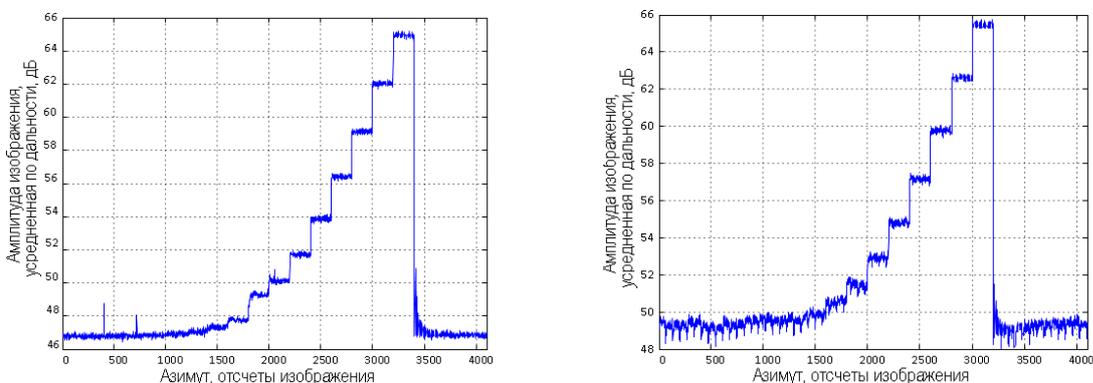


Рисунок 7. Усредненная амплитуда изображения радиометрической миры (слева – ЛЧМ, справа – М-последовательность)

Таким образом, экспериментальные данные, приведенные в четвертой главе, подтверждают результаты математического моделирования, представленные в третьей главе, выводы и рекомендации по применению различных типов модуляции для конкретных задач, а также возможность разработки РТС, в котором будет использоваться несколько функций для модуляции сигнала.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Предложена методика формирования сигналов, применение которой позволяет улучшить характеристики разрабатываемых и перспективных радиотехнических датчиков ДЗЗ.
2. Доказано, что модификация метода межпериодного расширения спектра позволяет снизить яркость боковых лепестков одновременно с улучшением пространственного разрешения пропорционально расширению спектра.
3. Показано, что яркость ложных откликов на изображении, получаемом при межпериодном расширении спектра, в большей степени определяется законом перестройки частоты, чем видом внутриимпульсной модуляции.
4. Предложена модель сигнала датчика ДЗЗ на базе чередования и циклического сдвига М-последовательностей, которая позволяет повысить качество изображения путем снижения яркости ложных откликов до уровня минус 55,5 дБ, что на 27 дБ меньше, чем в случае без чередования и сдвига, при длине последовательности 1023.
5. Показано, что модуляция сигналов последовательностями Лежандра, длина которых лежит в диапазоне [967;1091], обеспечивает относительный уровень БЛ минус 51,9 дБ, а интегральный – минус 8,3 дБ без применения взвешивающих функций,

в то время как ЛЧМ сигнал обеспечивает значения этих же параметров минус 42,3 и минус 10,2 дБ при использовании окна Хэмминга.

6. Установлено, что ФКМ М-последовательностями даёт преимущество при решении задач обнаружения объектов, а использование ЛЧМ приводит к расширению главного максимума (ухудшению пространственного разрешения) и снижению отношения сигнал/шум из-за применения несогласованной фильтрации. Тем не менее, ЛЧМ обеспечивает лучшие радиометрические характеристики, что подтверждается результатами полунатурного моделирования, проведенного на стенде РТД «Кондор-Э».

7. Предложены рекомендации по применению сигналов различного вида для решения конкретных практических задач и показано, что разработка радиотехнического датчика ДЗЗ, использующего различные виды сложных сигналов, является перспективным направлением, так как позволит расширить круг решаемых им задач.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Тарасенко А.М. Выбор вида излучаемых сигналов радиотехнических средств на основании анализа АКФ модулирующих функций // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т.23 – №5. – С. 531-534.
2. Тарасенко А.М. Имитация и анализ сигналов различных радиотехнических систем средствами аппаратно-программного комплекса экспериментальной отработки // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2018» Сб. трудов. – М.: ИПИМ РАН, 2018. – С. 135-142.
3. Тарасенко А.М. Исследование влияния способов формирования зондирующего сигнала космического РСА на качество радиолокационного изображения // Успехи современной радиоэлектроники – 2015, №5. С.13-19.
4. Гусейнов М.Я., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Улучшение разрешающей способности по дальности дозорной РЛС в режимах РСА методом межпериодного расширения спектра // Успехи современной радиоэлектроники – 2015, №5. С.6-12.

Прочие издания

5. Тарасенко А.М. Формирование сигналов с различными видами модуляции радиотехнических средств на несущих частотах // Материалы VIII Всероссийских Армандовских чтений Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», – Муром: МИ ВлГУ, 2018. ISSN 2304-0297 (CD-ROM) – С.538-546.

6. Тарасенко А.М. Экспериментальное исследование влияния модуляции зондирующего сигнала на характеристики радиолокационного изображения // Материалы 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2018. – С. 1605-1609.
7. Савостьянов В.Ю., Ефимов А.В., Зайцев С.Э, Тарасенко А.М. Особенности обработки частотно-манипулированных сигналов в РСА // Материалы VII Всероссийских Армандовских чтений Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», – Муром: МИ ВлГУ, 2017. ISSN 2304-0297 (CD-ROM) – С.274-280.
8. Алексеев С.Б., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Аппаратно-программный комплекс для имитации и записи сигналов существующих и перспективных радиоэлектронных средств // Материалы 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2017. – С. 1536-1540.
9. Тарасенко А.М. Исследование целесообразности совмещения в РСА зондирующих сигналов с непрерывной и дискретной фазовой модуляцией // Материалы 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2017. – С. 1607-1613.
10. Тарасенко А.М., Цветков О.Е. Исследование внутриимпульсной модуляции зондирующих сигналов различными модулирующими функциями для расширения возможностей РСА // Материалы VII Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», – Муром: МИ ВлГУ, 2017. ISSN 2304-0297 (CD-ROM) – С. 339-345.
11. Тарасенко А.М. Выбор способа построения зондирующего сигнала РСА и его критерии // Материалы 11-й Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», – М.: ИРЭ им. Котельникова РАН, 2017. – С. 341-344.
12. Тарасенко А.М. Исследование характеристик радиолокатора с синтезированной апертурой при модуляции зондирующего сигнала шумоподобными функциями // Материалы 26-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2016. – С. 2577-2583.
13. Сивцов А.С., Тарасенко А.М. Исследование свойств модулирующих функций для оценки целесообразности их применения в РСА // 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015», – М.: НИУ МИЭТ, 2015. – С. 277.
14. Тарасенко А.М. Выбор способа построения ансамблей M-последовательностей для модуляции зондирующего сигнала космического РСА с целью уменьшения максимального уровня боковых лепестков функции отклика на одиночную точечную

цель // 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2014. – С. 1235-1236.

15. Тарасенко А.М. Исследование влияния длин М-последовательностей и закона составления их ансамблей на уровни и распределение боковых лепестков функции отклика на одиночную точечную цель // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е.Жуковского». Сб. докладов: – М.: Академия им. Н.Е. Жуковского, 2014. – С. 471-475.

16. Тарасенко А.М. Сравнительный анализ сквозных характеристик космического РСА с зондирующими сигналами, модулированными М-последовательностью и ЛЧМ // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2013. – С. 1161-1162.

17. Мазлов К.А., Тарасенко А.М., Шаронин И.С. Оценка влияния вида зондирующего сигнала на сквозные характеристики космических РСА // Международная научно-техническая конференция «Научно-технические проблемы построения систем и комплексов землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами», Сб. трудов: – М.: АО «Концерн «Вега», 2013. – С. 33-34.

18. Лепёхина Т.А., Лось В.О., Тарасенко А.М. Выбор параметров зондирующего сигнала космического РСА по результатам исследований характеристик функции отклика на одиночную точечную цель // X Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е.Жуковского». Сб. докладов: – М.: Академия им. Н.Е. Жуковского, 2013. – С. 458-462.

19. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Тарасенко А.М. Проблемы аппаратной реализации устройства имитации и регистрации широкополосных сигналов для испытаний космический радиолокаторов с синтезированной апертурой // 5-ая Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике – 2012», – М: НИУ МИЭТ, 2012.

20. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Семёнов М.А., Тарасенко А.М. Система формирования радиолокационного изображения для задач валидации РСА с различными видами зондирующего сигнала // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», – Севастополь: СевГУ, КрыМиКо'2011. С. 1063-1064.

