

На правах рукописи



МЕЛЁШИН ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПОЛОСНОЙ  
РАДИОСИСТЕМЫ С ФАЗОКОДОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2020 г.

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

**Научный** **Лялин Константин Сергеевич,**  
**руководитель:** кандидат физико-математических наук, доцент,  
заместитель директора Института микроприборов и систем  
управления имени Л.Н. Преснухина Национального  
исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва.

**Официальные** **Ефимов Андрей Геннадьевич**  
**оппоненты:** доктор технических наук, начальник отдела Обособленного  
подразделения ООО «Ижевский радиозавод», г. Москва.

**Лепехина Татьяна Александровна**  
кандидат технических наук, начальник отдела АО  
«Концерн «ВЕГА», г. Москва.

**Ведущая** Научно-исследовательский институт приборостроения  
**организация:** имени В.В. Тихомирова" (АО "НИИП имени В.В.  
Тихомирова"), г. Жуковский.

Защита диссертации состоится « 03 » марта 2021 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://diss.vlsu.ru>

Автореферат разослан 25.12. 2020 г.

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

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одна из задач цифровой экономики, согласно Национальному проекту на 2019 – 2024 годы, преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы, включая здравоохранение, образование, промышленность, сельское хозяйство, строительство, городское хозяйство, транспортную и энергетическую инфраструктуру, финансовые услуги, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений. В связи с этим существует потребность в создании высокотехнологичных систем для решения актуальных проблем промышленности и сельского хозяйства, а также алгоритмов, связанных с их работой.

В настоящее время широкое распространение получили многодиапазонные радиосистемы (РС). Отличительной чертой данных систем является использование нескольких частотных диапазонов. При этом частотные диапазоны могут быть как сильно разнесены (многодиапазонные РС, в зарубежной литературе называются «Multiband System»), так и могут граничить или пересекаться в частотной области (многополосные РС, называемые в зарубежной литературе «Step-Frequency System»). Несколько рабочих полос частот используется в помехозащищенных системах связи и комплексах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это связано с тем, что помехи, мешающие работе систем связи, как правило, достаточно узкополосные, следовательно, и влияние таких помех значительно ограничивается. Многополосные и многодиапазонные РС ДЗЗ, в свою очередь, активно развиваются, так как результатом работы таких систем, как правило, является изображение местности, а функциональные возможности такой системы по обнаружению искомым объектов сильно зависят от используемых рабочих полос частот. Например, для обнаружения объектов, скрытых листвой или небольшими слоями почвы, применяются низкочастотные (L, P и т.д.) диапазоны частот, а высокая разрешающая способность по дальности, как правило, присуща более высокочастотным диапазонам частот (X, Ku и т.д.).

Однако большинство таких систем работают по принципу разделения на независимые подсистемы с разными рабочими полосами частот, а объединение подсистем в одну происходит уже на поздних этапах обработки. Из-за этого максимальные технические характеристики (например, разрешающая

способность) всей системы ограничены техническими характеристиками используемых подсистем.

Решением данной проблемы является система, где сигналы всех подсистем формируются и обрабатываются не независимо, а по специальному алгоритму, который позволяет эффективно использовать всю суммарную рабочую полосу РС. Это даёт возможность достигнуть максимальной разрешающей способности по дальности и увеличить качество получаемого изображения. Также из-за уменьшенной мгновенной полосы сигнала такая система снижает требования к аппаратной части некоторых типов радиотехнических систем и трудоемкость операций по настройке и регулировке, что уменьшает их себестоимость.

Ввиду фундаментальных отличий принципов построения РС на основе сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) от РС с фазокодовой манипуляцией (ФКМ) исследования в области синтеза и обработки сигналов в многодиапазонных и многополосных радиолокаторах для этих двух случаев следует разделять. Для систем с ЛЧМ сигналами на сегодняшний день известны способы и алгоритмы эффективного использования рабочей полосы частот. Данной проблематикой занимаются как отечественные ученые (Верба В.С., Бомштейн А. Д., Ильин Е. М. Меркулов В.И., Садовский П.А., Лихачев В.П., Пашук М.Ф., Лепёхина Т.А., Николаев В.И), так и зарубежные (Wang A., Zhou D., Gong H., Han B., Ding C., Liang Y., Wang Y., Huynh C., Lee J., Nguyen C., Capria A., Petri D., Moscardini C., Conti M., Cantelli F и др.). Однако для систем с ФКМ сигналами такие алгоритмы отсутствуют.

Отметим растущую потребность реальных секторов экономики в универсальной многодиапазонной РС для выполнения функции как датчиков ДЗЗ (построение изображений местности, определение мест утечек газо- и нефтепродуктов, определение радиовегетационных индексов растительности (RVI) и т. д.), так и системы связи для передачи полученных данных с воздушного носителя на Землю.

Следовательно, актуальными являются вопросы разработки и исследования многополосной РС с ФКМ для требований промышленности и сельского хозяйства, а также алгоритмов ее работы.

**Актуальность темы диссертационной работы** обусловлена тем, что результаты работы позволят строить РС с необходимыми техническими характеристиками с существенно сниженной себестоимостью, что является

ключевым требованием для массового внедрения таких систем в реальные сектора экономики.

**Объект исследования:** многополосная радиосистема.

**Предмет исследования:** алгоритм формирования и обработки сигналов в многополосных радиосистемах с фазокодовой манипуляцией и многополосная радиосистема.

**Цель работы:** разработка и исследование многополосной радиосистемы с фазокодовой манипуляцией и алгоритмов ее работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

1. Провести анализ современных многодиапазонных и многополосных РС.

2. Проанализировать существующие алгоритмы использования суммарной рабочей полосы частот и калибровки каналов в многодиапазонных и многополосных РС с ЛЧМ- сигналами.

3. Разработать алгоритм формирования и обработки сигналов в многодиапазонных и многополосных радиотехнических системах с фазокодовой манипуляцией.

4. Разработать алгоритм компенсации амплитудно-фазовых искажений, возникающих при объединении нескольких рабочих полос частот в одну в многополосных РС с ФКМ.

5. Исследовать технические основы проектирования многодиапазонных и многополосных РС с ФКМ.

6. Разработать структурную схему многополосной РС ДЗЗ для требований промышленности и сельского хозяйства X- диапазона частот.

7. Провести экспериментальные исследования и подтвердить работоспособность разработанных алгоритмов и системы в лабораторных и полевых условиях.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач в работе используются методы математического моделирования, применяются основы корреляционного анализа сигналов и теории цифровой обработки сигналов. Проведены лабораторные и полевые экспериментальные исследования.

**Научная новизна работы:**

1. Разработан оригинальный алгоритм формирования и обработки сигналов в многополосных РС с ФКМ.

2. Разработан алгоритм компенсации амплитудно-фазовых искажений, возникающих при объединении нескольких рабочих полос частот в одну в многополосных РС с ФКМ.

3. Предложены технические основы разработки многополосных РС с ФКМ в части системного проектирования: выбор оптимального разбиения суммарной рабочей полосы частот на поддиапазоны, установлены зависимости выбора режимов работы РС в зависимости от параметров носителя.

**Достоверность** основных положений и выводов, выносимых на защиту, подтверждается использованием общеизвестного математического аппарата, применением математического моделирования и экспериментальными результатами моделирования.

**Практическая значимость исследования:**

- Разработана уникальная малогабаритная многополосная РС ДЗЗ с ФКМ для требований промышленности и сельского хозяйства на основе разработанного алгоритма и предложенных технических основ.

- Проведенные исследования показали, что разработанная многополосная РС с ФКМ и алгоритм формирования и обработки сигналов в многополосных РС с ФКМ могут применяться в разработках новых РС.

- Применение предложенного алгоритма снижает мгновенную рабочую полосу частот в 10 раз (до 250 МГц), что, в настоящее время, снижает себестоимость АЦП модуля формирования и обработки сигналов более чем в 30 раз.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина «МИЭТ» при проведении занятий по курсу «Цифровая обработка сигналов» и использованы при проведении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Исследование и разработка радиолокационных средств оперативного контроля состояния поверхности Земли с беспилотных летательных аппаратов».

**Положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритм формирования и обработки сигналов многополосных РС с ФКМ для РС ДЗЗ, установленной на летательном аппарате, двигающемся с скоростью не более 50 м/с и на высоте не более 2000 метров, позволяющий получить более чем в 10 раз сниженную мгновенную полосу частот и более чем в 30 раз сниженную себестоимость АЦП.

2. Алгоритм компенсации амплитудных и фазовых искажений, отличающийся тем, что позволяет выполнять калибровку в многополосных РС с ФКМ.

3. Метод эффективного ограничения спектра сигнала, позволяющий увеличить амплитуду максимума АКФ на 10% и уменьшить ширину максимума АКФ по уровню половинной мощности на 8%.

4. Разработанная многополосная радиосистема, которая имеет суммарную ширину рабочей полосы частот 2,5 ГГц при полосе модуля формирования и обработки сигналов 250 МГц.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы доложены на десяти научно-технических конференциях: 57-й Научной конференции МФТИ, 2014 г.; 22-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика», 2015 г.; Международной конференции «Инженерные и научные приложения на базе технологий NI NIDays», 2015 г.; 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 2016 г.; 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2016 г.; 2017 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2017 г.; 2018 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2018 г.; 8-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», 2018 г.; 4-й Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», 2018 г.; 2019 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2019 г.

**Публикации.** Основное содержание работы представлено в 26 научных публикациях, в том числе 7 статей в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, 11 публикаций, в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, и 3 патента на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 100 источников, списка сокращений, приложений, изложена на 109 страницах машинописного текста.

## 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 приведен анализ современного состояния вопросов использования многодиапазонных РС, подробно проанализирован вопрос применения многодиапазонных РС ДЗЗ. Рассмотрены системы, конечным продуктом которых является изображение местности (системы картографирования, ледовой разведки, системы военного назначения и т.д.). В такого рода системах количество информации, которую можно извлечь из полученного изображения, сильно зависит от проникающих свойств используемых радиотехнических сигналов. Проникающие свойства сигналов, в свою очередь, зависят от рабочей частоты этих сигналов. Проведенный анализ показал тенденцию применения РС подповерхностного сканирования с частотными диапазонами в пределах 50-500 МГц, что является компромиссом между глубиной зондирования в единицы – десятки метров и разрешающей способностью в единицы – десятки сантиметров для реальных геологических структур.

Также, опорной точкой для дальнейшего анализа послужили РС семейства «Компакт» (разработки ФГУП НИИТП). Каждая подсистема РС построена по единой структуре. Особенностью данной системы является реализация концепции когерентного цифрового "ядра" радиотехнической системы, осуществляющего функции цифрового формирования широкополосного сигнала, аналого-цифрового преобразования принятого сигнала, а также формирование когерентных последовательностей управляющих стробов. Цифровое "ядро" построено на базе центрального компьютера, сопряженного со специализированными цифровыми модулями и обеспечивает когерентность всех радиотехнических трактов.

Данная система позволяет получать картину местности при работе в разных частотных диапазонах, что позволяет как получить больше информации о видимых объектах – на рисунке 1 представлены изображения одной и той же области в двух частотных диапазонах (X и L частотные диапазоны), так и о скрытых объектах – на рисунке 2 показано обнаружение подповерхностных объектов в VHF диапазоне частот по сравнению с L частотным диапазоном.

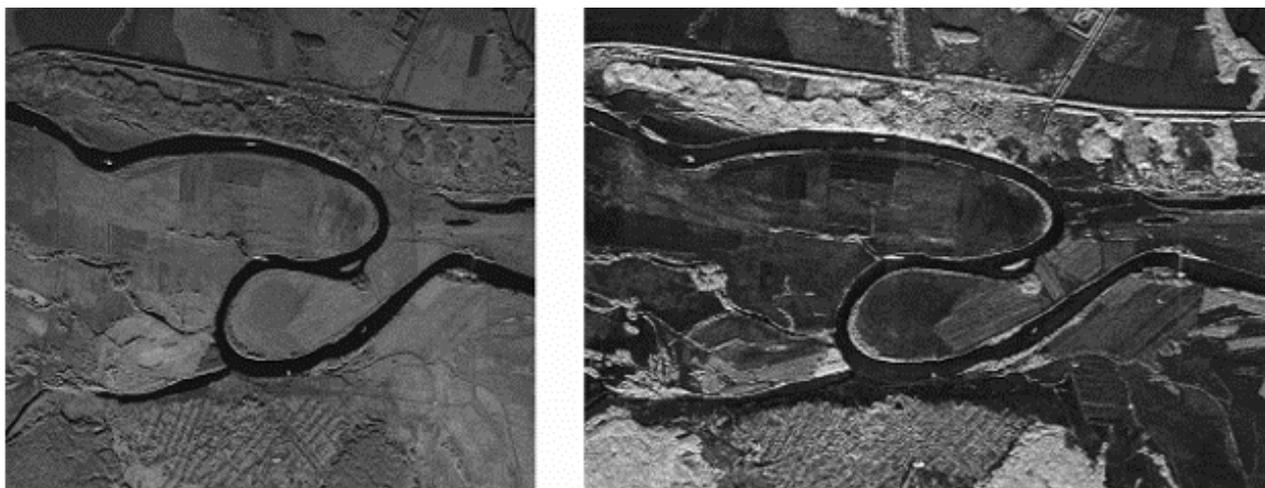


Рисунок 1 – Изображения ландшафта в г. Белоомута (Рязанская область), слева X-, справа L- частотные диапазоны

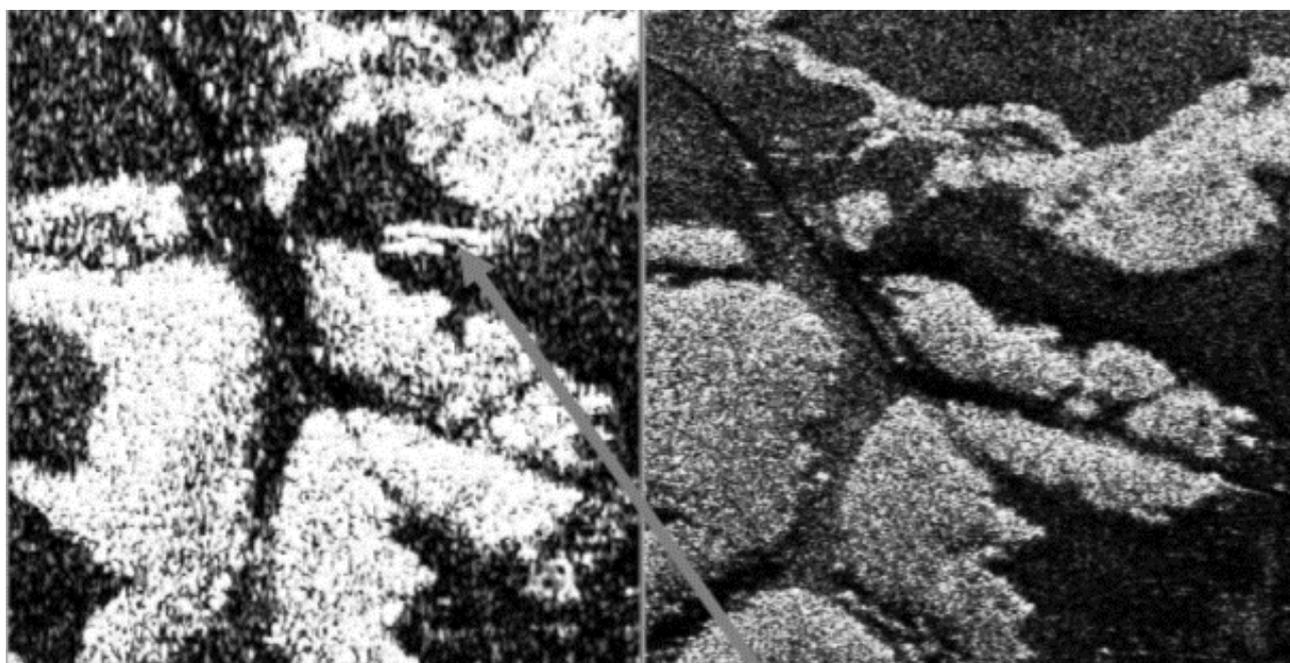


Рисунок 2 – Изображения ландшафта в VHF-диапазоне (слева) с подповерхностным объектом и в L- диапазоне (справа) – объект не наблюдается

Данная система является хорошим примером системы, состоящей из разнодиапазонных подсистем, в которой общее качество системы достигается за счёт обработки информации, полученной отдельно в разных подсистемах. Как пример – достижение высокой разрешающей способности в X-диапазоне и способности обнаруживать скрытые поверхностью объекты в VHF-диапазоне. К недостаткам такой системы можно отнести, что предельно возможные технические характеристики системы упираются в технические характеристики подсистемы.

В ходе дальнейшего анализа было выявлено, что, на данный момент, является актуальным использование РС ДЗЗ в сельском хозяйстве, так как при помощи таких систем существует возможность определения влажности почвы и радиовегетационных индексов (RVI), такие системы отличаются от традиционных РС ДЗЗ наличием дополнительных поляризационных каналов, которые необходимы для определения RVI, который, в свою очередь, находится следующим выражением:

$$RVI = \frac{8\sigma_{HV}}{\sigma_{HH} + \sigma_{VV} + 2\sigma_{HV}} .$$

Данное применение РС позволяет говорить о том, что с развитием сельского хозяйства потребность в малогабаритных и доступных РС ДЗЗ будет только расти, что еще раз подтверждает необходимость проведения дополнительных исследований в данной области.

Далее были рассмотрены существующие способы эффективного использования полосы частот многодиапазонных и многополосных РС с ЛЧМ сигналами, так как ЛЧМ сигналы являются наиболее распространенным типом сигналов в РС ДЗЗ, а также за счет фундаментальных свойств таких сигналов они являются более подходящими для решения описанных задач. Также были рассмотрены алгоритмы компенсации фазовых и амплитудных искажений для многополосных и многодиапазонных РС с ЛЧМ сигналами.

По итогам первой главы работы сделаны следующие выводы:

1. Проведенный анализ современных способов и алгоритмов эффективного использования суммарной рабочей полосы частот показал, что все описанные методы применимы только для систем на основе ЛЧМ-сигналов. Следовательно, необходимо разработать алгоритм эффективного использования рабочей полосы частот в многодиапазонных и многополосных системах с использованием ФКМ- сигналов.

2. Проведенный анализ алгоритмов компенсаций амплитудных и фазовых искажений показал достаточно высокую степень проработанности данного вопроса, в рамках данного исследования необходимо рассмотреть возможность применения представленных алгоритмов в разрабатываемых системах.

3. Проведенный обзор показал, что наиболее значимое применение многодиапазонные и многополосные системы получили в области РС ДЗЗ. В рамках данного исследования предлагается остановиться на вопросах построения именно таких систем.

Во второй главе проведено сравнение корреляционных свойств ЛЧМ и ФКМ сигналов. Показано, что максимальный и интегральные уровни боковых лепестков АКФ ФКМ сигналов в исходном виде хуже, чем у ЛЧМ сигналов, однако, использование циклических сдвигов для модулирующих шумоподобных последовательностей, позволяет нивелировать данное соотношение и добиться для ФКМ сигналов радиотехнических характеристик не хуже, чем для ЛЧМ сигналов. Так, на рисунке 3 показано изменение интегрального уровня боковых лепестков для разных количеств усреднений ФКМ сигналов в сравнении с ЛЧМ сигналом.

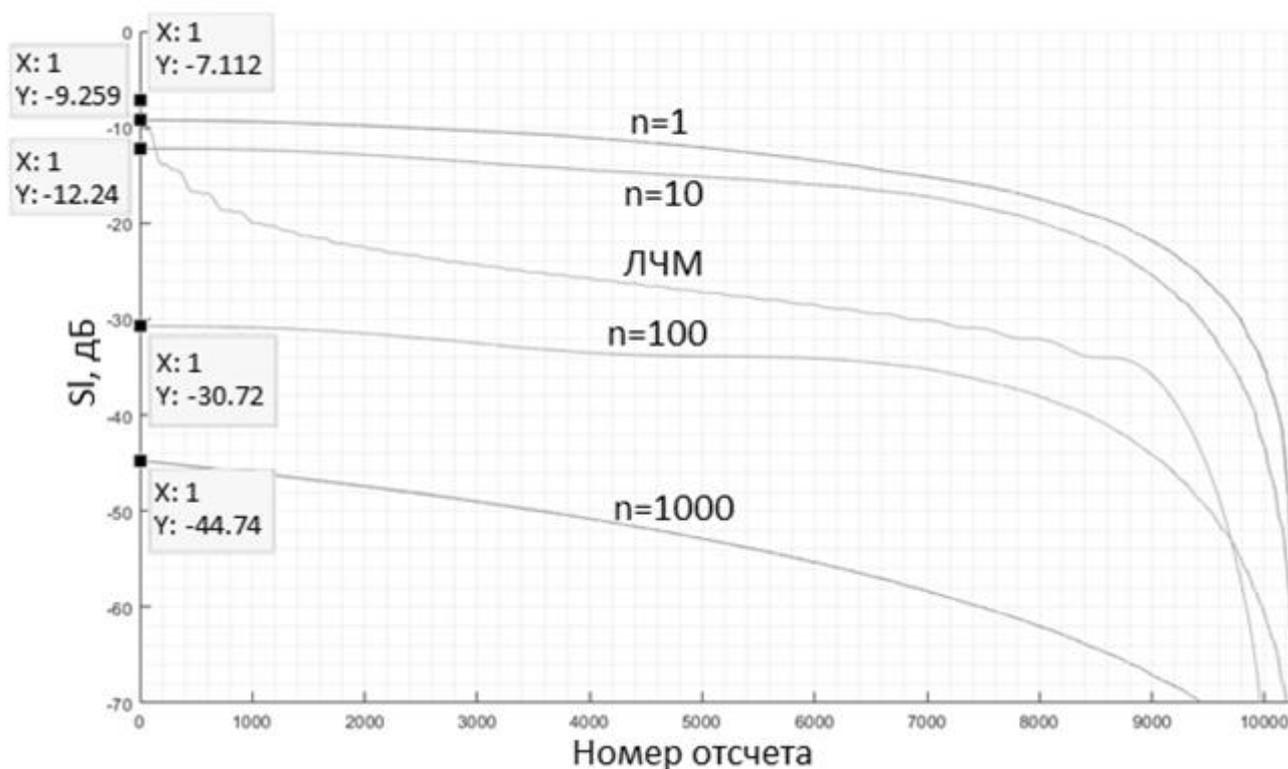


Рисунок 3 – Изменение интегральных уровней боковых лепестков для разных количеств усреднений ФКМ сигналов в сравнении с ЛЧМ сигналом

По представленным данным видно, что уже при  $n=100$  интегральный уровень боковых лепестков для ФКМ сигнала меньше более чем на 4 дБ относительно сигнала ЛЧМ с аналогичными параметрами. Следовательно, в РС ДЗЗ с длиной опорной функции порядка 100...1000 можно говорить о эффективности применения ФКМ сигналов с использованием циклических сдвигов и целесообразности применения ФКМ сигналов в современных РС ДЗЗ.

Все этапы прохождения сигнала в рассматриваемой системе могут рассматриваться как линейные операции, следовательно, сигнал можно разбить

в частотной области на поддиапазоны и восстановить их после приема без искажений (Рисунок 4). Однако, в отличие от систем с ЛЧМ, где сигнал каждой части поддиапазона является ЛЧМ, при расщеплении сигнала с фазовой манипуляцией мы получим сигналы со случайной модуляцией. Отсюда следует, что если использовать расщепление сигнала в прямом виде, то сигналы будут с неравномерным распределением мощности по времени, что приведет к значительному падению эффективности системы, а также усложнит формирование таких сигналов. Таким образом, эффективнее всего использовать сигнал с малыми колебаниями мощности и регулировки его на стадии обработки.

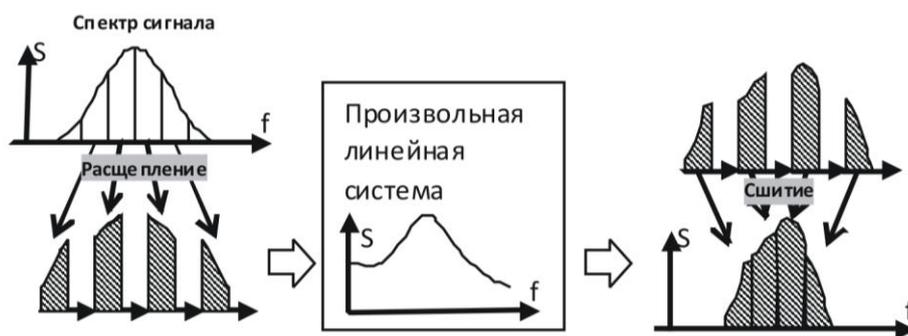


Рисунок 4 – Процесс расщепления сигнала и его восстановление после прохождения через линейную систему

В рамках данного способа предложено использовать разложение Фурье для разделения спектра исходного широкополосного сигнала на компоненты. Длительность исходного широкополосного импульса в отчетах примем за  $N$ , тогда  $K = (N-1)/2$  и разложение Фурье для периодического сигнала  $s_N$  записывается как:

$$s_n(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\pi t/K},$$

где  $c_n$  – комплексные коэффициенты Фурье и записываются следующим образом:

$$c_n = \frac{1}{2K} \int_{-K}^K s(t) e^{-in\pi t/K} dt, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Значение  $K$  является коэффициентом компрессии импульса, поскольку предполагается, что низкочастотный импульс заполняет периодические промежутки между широкополосными импульсами, а его огибающая служит периодической оконной функцией. Количество гармоник в основной доле сигнала  $N$  (Рисунок 5).

Для описанного метода данное число совпадает с количеством используемых поднесущих частот.

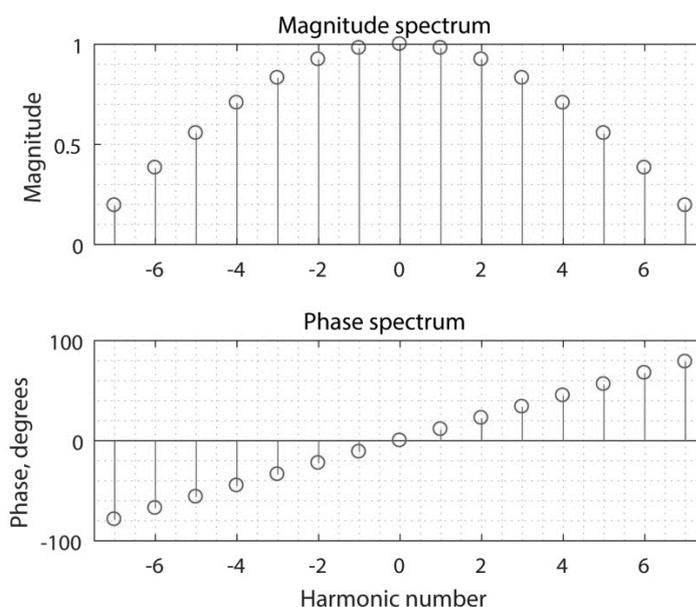


Рисунок 5 – Амплитудный и фазовый спектры прямоугольного импульса для коэффициента компрессии  $K=8$

На основе данного алгоритма был зарегистрирован патент на изобретение.

На рисунке 6 представлена структурная схема алгоритма формирования и обработки сигналов в многополосных радиотехнических системах, где:

1. Формирование исходного широкополосного сигнала.
2. Разложение сигнала на  $N$  гармоник (БПФ).
3. Перенос на ВЧ и излучение сигнала 1.
4. Перенос на ВЧ и излучение сигнала 2.
5. Перенос на ВЧ и излучение сигнала  $N$ .
6. Приём и запись отраженного сигнала 1.
7. Приём и запись отраженного сигнала 2.
8. Приём и запись отраженного сигнала  $N$ .
9. Амплитудная и фазовая коррекция сигнала 1.
10. Амплитудная и фазовая коррекция сигнала 2.
11. Амплитудная и фазовая коррекция сигнала  $N$ .
12. Восстановление исходного широкополосного сигнала (ОБПФ).

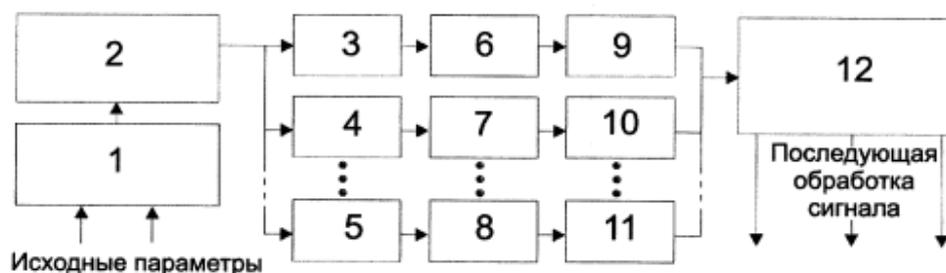


Рисунок 6 – Алгоритм формирования и обработки сигналов

Одним из дополнительных способов улучшения радиотехнических характеристик, также является метод эффективного ограничения спектра модулирующего сигнала. Показано, как применение данного метода позволяет улучшить эффективную разрешающую способность модулирующих сигналов на 12.5%. Также, в данной главе представлен алгоритм калибровки амплитудных и фазовых искажений в РС с ФКМ.

По результатам исследований, приведенных во второй главе сделаны следующие выводы:

1. Применение циклического сдвига модулирующих последовательностей РС ФКМ позволяет существенно сократить интегральный уровень боковых лепестков, а при  $n$  более 100 получить значения лучше, чем для классических ЛЧМ – сигналов.

2. Разработанный алгоритм формирования и обработки сигналов в РС с ФКМ позволяет уменьшить мгновенную рабочую полосу частот РС при сохранении суммарной рабочей полосы частот РС.

3. Разработанный алгоритм калибровки амплитудных и фазовых искажений позволяет проводить калибровку многополосных РС с ФКМ.

4. Разработанный метод эффективного ограничения спектра позволяет улучшить разрешающую способность РС ФКМ, так, при рассмотренных условиях показано улучшение на 12.5 %.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы проектирования РС на основе разработанного ранее алгоритма формирования и обработки сигналов. Одной из ключевых проблем, которые решались в данной работе являлась проблема упрощения аппаратной части РС. Рассмотрены различные варианты построения РС ДЗЗ, проанализированы их преимущества и недостатки. Приведено обоснование выбора структурной схемы многодиапазонной РС (МРС) ФКМ (Рисунок 7).

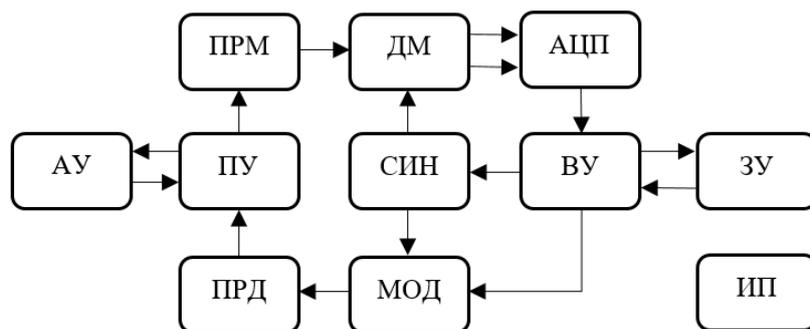


Рисунок 7 – Структурная схема РС ФКМ и МРС ФКМ (АУ – антенный узел; ПУ – переключающий узел; ПРМ – приемный тракт; ДМ- демодулятор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СИИ- синтезатор частоты; ВУ – вычислительное устройство; ЗУ – записывающее устройство; ПРД – передающий тракт; МОД – модулятор; ИП – источник питания)

Произведено сравнение стоимости АЦП для различных частот дискретизации, так как уменьшение частоты дискретизации и является одним из ключевых переходов от РС ФКМ к МРС ФКМ. Сравнение показало, что стоимость АЦП с частотой дискретизации более 500 МГц значительно увеличивается, так, АЦП с частотой дискретизации 2600 МГц будет стоить в 52 раза дороже, чем аналогичное по разрядности АЦП с частотой дискретизации 250 МГц.

Полученная структурная схема имеет два ключевых преимущества: использование простого BPSK модулятора, модулирующего напрямую с ВУ и в 10 раз сниженную мгновенную полосу частот (250 МГц) по сравнению с суммарной рабочей полосой (2.5 ГГц).

Далее были выведены основные ограничения использования МРС ФКМ на носителях в зависимости от их параметров полета, ограничения, связанные с требованиями к частоте повторения импульсов РС ДЗЗ, выражаются следующим выражением:

$$V * N * (0.26 * H + 50) * 10^{-6} \leq 1 ,$$

где  $V$  – скорость движения носителя,  $H$  – высота полета носителя, а  $N$  – количество используемых частотных поддиапазонов

Зависимость максимальной скорости полета от высоты полета носителя при разных значениях  $N$  представлена на рисунке 8.



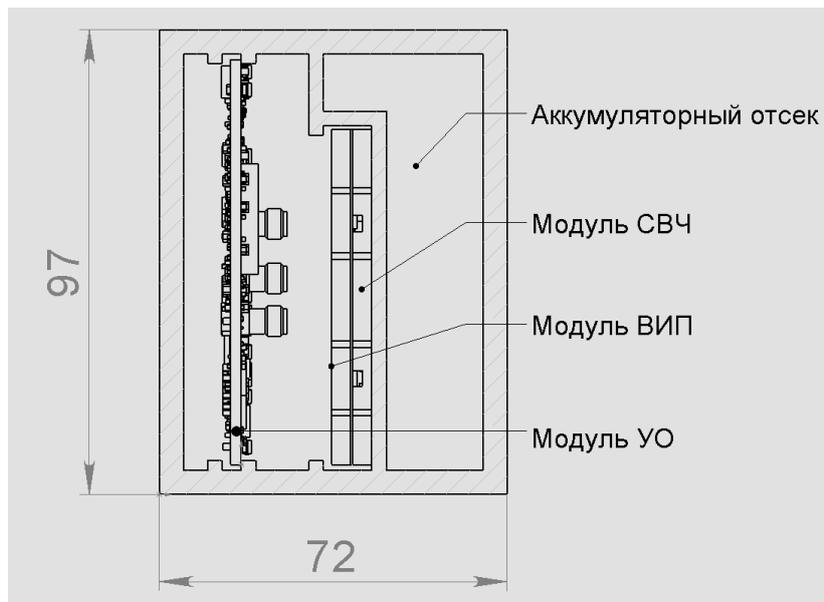


Рисунок 10 – Структура МРС ФКМ

Внешние габариты МРС ФКМ в каждом из сечений составляют менее 10 см, что существенно меньше рассматриваемых в первой главе РС ДЗЗ.

По результатам третьей главы работы сделаны следующие выводы:

1. Исследование возможных вариантов структурных схем построения РС ДЗЗ показало целесообразность использования МРС ФКМ. Такая схема позволила отказаться от использования ЦАП и снизить в 10 раз мгновенную полосу частот аналоговых трактов.

2. Исследование технических основ разработки МРС ФКМ позволило вывести аналитические зависимости параметров МРС ФКМ и характеристик носителя РС, так, для проектируемой МРС ФКМ при скорости менее 100 м/с допустима высота полета до 2 км.

3. Разработанный демонстрационный образец многополосной РС ДЗЗ для требований промышленности имеет габаритные размеры менее 10x10x10 см и может быть установлен на малогабаритные БПЛА.

**В четвертой главе** показаны результаты экспериментальной отработки рассмотренных ранее метода эффективного ограничения спектра, алгоритмов работы МРС с ФКМ и калибровки амплитудно-фазовых искажений. Приведены результаты лабораторной отработки, по которым сделаны выводы о работоспособности предложенных алгоритмов.

Уменьшение ширины откликов от целей в пространстве, после применения разработанного алгоритма при лабораторной отработке показано на рисунке 11.

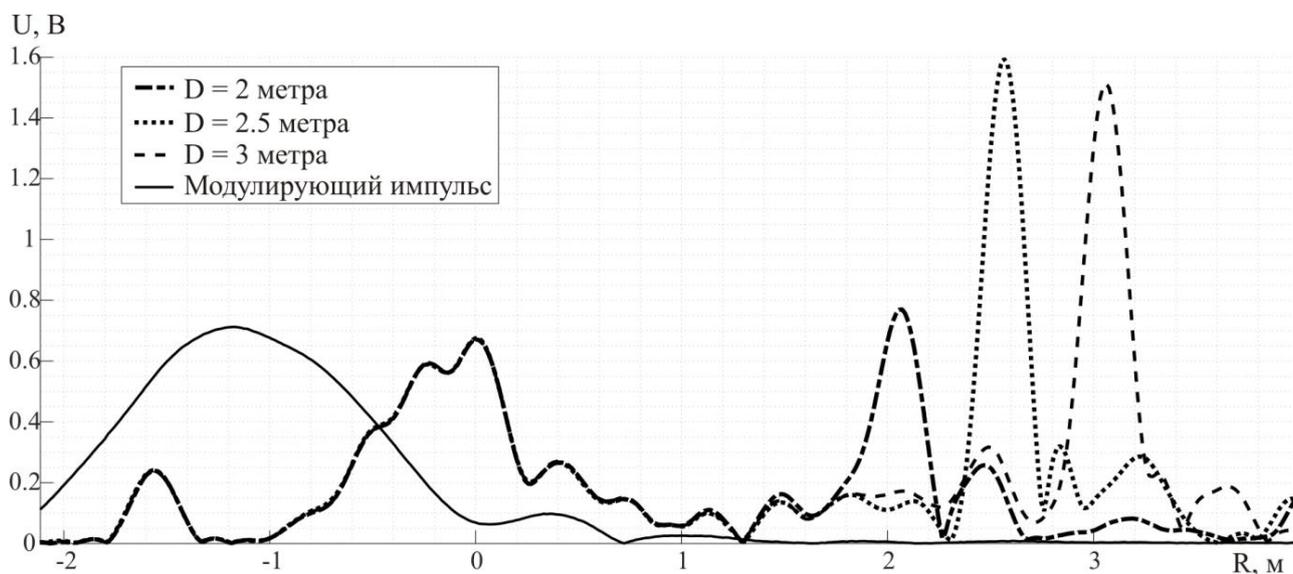


Рисунок 11 – Отклики от целей для трех экспериментов

Как видно из представленных графиков, заметно уменьшение ширины отклика от тестовых объектов после применения описанного алгоритма в  $K=7$  раз. Также, в данном эксперименте был обработан метод эффективного ограничения рабочей полосы частот, который показал уменьшение ширины отклика от целей по уровню  $-3$  дБ на 8% и увеличение амплитуды отклика на 10 %.

Далее показаны результаты полевых экспериментов, их целью было получение изображений местности при помощи РС ДЗЗ с различными конфигурациями зондирующих сигналов и алгоритмов их обработки. Для проверки разрешающей способности на снимаемом участке были разложены 3 группы тестовых объектов с различным расстоянием между друг другом (конфигурация расположения тестовых объектов – рисунок 13, фотография разложенных тестовых объектов – рисунок 12).



Рисунок 12 – Разложенные в поле тестовые объекты

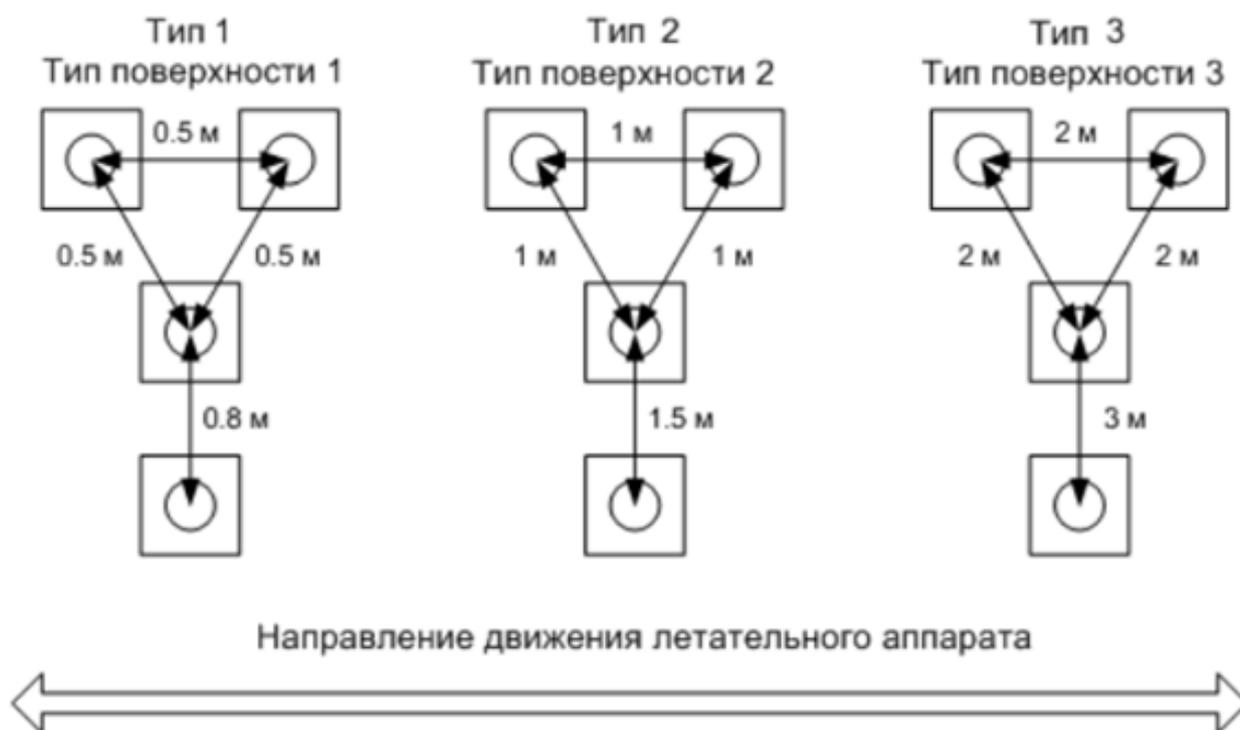


Рисунок 13 – Конфигурация расположения тестовых объектов

По результатам экспериментальной проверки было проведено сравнение полученных изображений тестовых объектов для двух случаев: используется рабочий узкополосный импульс, соответствующий полосе рабочих частот 150 МГц (рисунок 14) и использование восстановленного широкополосного импульса с суммарной рабочей полосой частот 600 МГц (Рисунок 15).

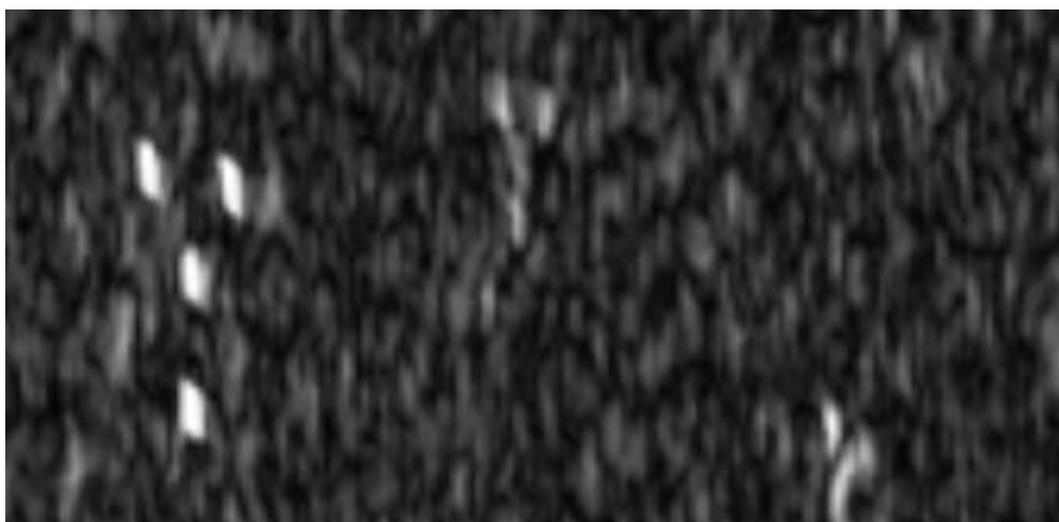


Рисунок 14 – Изображение тестовых объектов при узкополосном импульсе

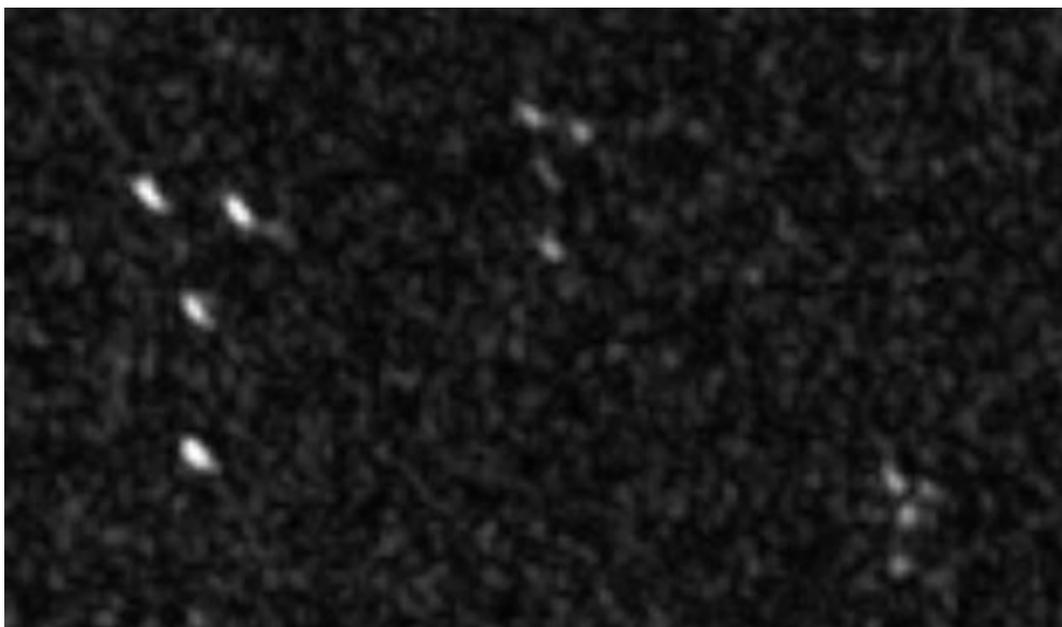


Рисунок 15 – Изображение тестовых объектов при широкополосном импульсе

По представленным изображениям хорошо видно, что при использовании одной полосы частот разрешающая способность составила около 1 м и часть тестовых объектов не разрешились на представленном изображении. Тогда как, после применения разработанного алгоритма – разрешающая способность составила менее 30 см и все три группы тестовых объектов были успешно разрешены между собой.

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

1. Разработан алгоритм формирования и обработки сигналов в РС с ФКМ, позволивший снизить в 10 раз мгновенную полосу частот РС (с 2.5 ГГц до 0.25 ГГц).

2. Разработан алгоритм калибровки амплитудных и фазовых искажений, позволяющий проводить калибровку многополосных РС с ФКМ.

3. Исследованы и предложены технические основы по проектированию многополосных РС с ФКМ. Выведено выражение, связывающее максимальную высоту и скорость носителя для различных конфигураций системы. Показано, что для проектируемой МРС ФКМ при скорости менее 100 м/с допустима высота полета до 2 км.

4. Разработана многополосная РС с ФКМ для нужд сельского хозяйства и промышленности с суммарной рабочей полосой частот 2.5 ГГц.

5. Проведена экспериментальная отработка разработанных алгоритмов и способа, в ходе которой подтверждена их работоспособность.

## Основные публикации по теме диссертации

### Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Мелёшин Ю.М., Лялин К.С., Орешкин В.И., Хасанов М.С., Довгаль Т.А. Метод улучшения разрешающей способности // Известия высших учебных заведений. Электроника, изд. 23, №. 4, 2018. С. 371-378.
2. Мелёшин Ю.М., Лялин К.С., Хасанов М.С., Кузьмин И.А. Спектральный метод подавления боковых лепестков // ТРУДЫ МАИ, №. 103, 2018. С. 23.
3. Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А., Лялин К.С., Хасанов М.С. Автофокусировка радиолокационного изображения в условиях // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), №. 4, 2018. С. 149-154.
4. Мелёшин Ю.М., Переверзев А. Л., Бирюк А.А., Орешкин В.И., Лялин К.С. Аппаратные и алгоритмические решения при проектировании РСА // НАНОИНДУСТРИЯ, №. 89, 2019. С. 149-155.
5. Мелёшин Ю.М., Переверзев А. Л., Хасанов М.С., Затонская А.А., Лялин К.С. Компактный мультидиапазонный радар с синтезированной апертурой // НАНОИНДУСТРИЯ, №. 99, 2020. С. 154-156.
6. Мелёшин Ю.М., Переверзев А. Л., Хасанов М.С., Лялин К.С. Повышение разрешающей способности РСА с применением алгоритма многополосной обработки // ЭЛЕКТРОНИКА: НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ, БИЗНЕС, №. 198, 2020. С. 108-111.
7. Мелёшин Ю.М., Лялин К.С., Орешкин В.И., Меркулов С.С., Чистюхин В.В. Проектирование излучающей апертуры АФАР самолетной РЛС переднего обзора для системы наведения и посадки в автоматическом режиме // Известия высших учебных заведений. Электроника изд. 23, №. 4, 2018. С. 371-378.

### Патенты на изобретение:

8. Мелёшин Ю.М., Лялин К.С., Хасанов М.С., Орешкин В.И. Способ формирования и обработки сигналов в многодиапазонных и многополосных радиолокационных системах, патент на изобретение RU 2 684 896 С1, Апр 16, 2019.
9. Мелёшин Ю.М., Лялин К.С., Кузьмин И.А.. Кольцевая концентрическая модульная антенная решетка RU 2 680 665 С1, Фев 25, 2019.

### **Работы, индексируемые международными базами данных Scopus и WoS:**

10. Meleshin Y.M., Oreshkin V.I., Biryuk A.A., Maksimovskaya A.I. Problems Of Multiband Synthetic Aperture Radar // 2017 IEEE Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference. Moscow. 2017. pp. 1261-1263.
11. Y. M. Meleshin, M.S. Khasanov, V.I. Oreshkin, V.K. Tsvetkov, V.V. Chistukhin. Spectral distortions of a phase-shift keying signal // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017. pp. 1264-1266.
12. Y. M. Meleshin, M.S. Khasanov, V.I. Oreshkin, D.V. Prihodko, V.V. Chistukhin. Radar range resolution improvement using multiband system // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018. pp. 1684-1686.
13. Meleshin Y.M., Khasanov M.S., Prihodko D.V., Oreshkin V.I. 2017 IEEE Russia Section Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering Conference // Numerical Method For Fourier Transform Of Support Function Of SAR Azimuth Synthesis. Moscow. 2017. pp. 1267-1269.
14. Meleshin Y.M., Khasanov M.S., Merkulova Z. V., Dovgal T.A. Kurganov V.V. Proceedings Of The 2018 IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering // Approach To Optimization Of Radar Image Synthesis From Hologram With Redundant Pulse Frequency Rate. 2018. pp. 1681-1684.
15. Meleshin Y.M., Khasanov M.S., Biryuk A.A, Zhmylev V.A. Kurganov V.V. Proceedings Of The 2018 IEEE Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering // Range and phase migration accounted for in radar image range sidelobe level estimation. 2019. pp. 2034-2036.

Подписано в печать

Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ \_\_\_\_\_

Издательство Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.