



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

---

Институт (Филиал) № 8 «Компьютерные науки и прикладная математика» Кафедра 806  
Группа М8О-408Б-20 Направление подготовки 01.03.02 Прикладная математика и  
информатика

Профиль Информатика

Квалификация: бакалавр

---

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Фильтрация двумерного траекторного сигнала для формирования  
радиолокационных изображений на беспилотных аппаратах»

Автор ВКРБ: Велесов Даниил Игоревич (\_\_\_\_\_)

Руководитель: Гаврилов Константин Юрьевич (\_\_\_\_\_)

**К защите допустить**

Заведующий кафедрой № 806 «Вычислительная математика  
и программирование» Крылов Сергей Сергеевич (\_\_\_\_\_)

\_\_\_\_\_ 2024 года

Москва 2024

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра состоит из 58 страниц, 29 рисунков, 3 таблиц, 10 использованных источников, 1 приложения.

СОЗДАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,  
СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ, БЫСТРОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
ФУРЬЕ, ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА

Объектом разработки в данной работе является алгоритм создания РСА изображений.

Цель работы - создание алгоритма обработки двумерных радиолокационных сигналов, обеспечивающего формирование изображения сцены земной поверхности при минимальных вычислительных затратах. В качестве рассматриваемых методов выбраны алгоритмы двумерной согласованной фильтрации, выполняемой в частотной области.

В работе представлена программная реализация алгоритма двумерной согласованной фильтрации, основанной на двумерном быстром преобразовании Фурье для фильтрации радиосигнала для получения радиолокационных изображений. Проведен анализ работы разработанных алгоритмов и сравнение их с известными из литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ .....	2
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ .....	15
1.1 Получение РСА сигналов.....	15
1.2 Обработка сигналов в РСА .....	19
1.3 Согласованная фильтрация двумерных сигналов при формировании радиолокационных изображений.....	22
1.4 Радар с реальной апертурой (РРА) .....	26
1.5 Радар с синтезированной апертурой (РСА) .....	27
1.6 Как правильно интерпретировать изображения РСА.....	29
2 МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ .....	35
2.1 Двумерное преобразование Фурье .....	35
2.2 Согласованная фильтрация .....	36
2.3 Инструменты Matlab для реализации фильтрации .....	39
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОГРАНИЧЕННОГО НАБОРА ФИЛЬТРОВ .....	44
3.1 Разработка алгоритма для моделирования и фильтрации РСА изображений.....	44
3.2 Анализ работы при разном количестве фильтров .....	45
3.3 Анализ полученных результатов .....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А Разработанные алгоритмы.....	55

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В настоящей выпускной квалификационной работе бакалавра применяют следующие сокращения и обозначения:

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

РСА – радар синтетической апертуры

ЛА – летательный аппарат

РЛИ – радиолокационное изображение

ИХ – импульсная характеристика

ДПФ – двумерное преобразование Фурье

БПФ – быстрое преобразование Фурье

## **ВВЕДЕНИЕ**

Съемка местности является важной и актуальной технологией в современном мире. Она используется в различных областях, начиная от разведки и заканчивая научными исследованиями. Человеку, особенно в современное время, всегда полезно знать больше о том или ином участке местности. Оценить рельеф местности для последующей застройки, использовать снимки поверхности земли для составления карт, военная разведка, получение большей информации о природной катастрофе и так далее. Применений у съемки огромное количество, актуальность которых отнюдь не на последнем месте. Аппаратов, с помощью которых можно сделать съемку определенного участка земной поверхности тоже немало: самолеты, БПЛА, съемки с космических спутников и т.д.. В зависимости от целей, которые стоят перед специалистами, а также от специфики объекта и местности, на котором он находится, выделяют несколько типов геосъемки.

Топографическая съемка (бывает наземная, воздушная, космическая). Она дает полное представление об исследуемом участке, всех его надземных и подземных коммуникациях и сооружениях. В результате составляется план местности, который впоследствии может быть использован для различных целей – будь то строительство или внедрение в жизнь ландшафтного проекта. Есть три вида топографической геодезической съемки местности.

Плановая - показывает плоскостную картину без рельефа.

Высотная - в противовес плановой акцентируется на рельефе.

Комбинированная геосъемка – сочетание плановой и высотной.

Исполнительная съемка. Осуществляется во время строительных работ, а также после завершения строительства. Цель – выявление возможных отклонений от проектной документации, а также фиксирование

фактического местоположения и конфигурации сооружений, объектов и их элементов (например, подземные коммуникации – кабели, трубы).

Фасадная съемка. Применяется во время строительных работ по их окончанию, а также при реконструкции/реставрации и демонтаже объекта. Позволяет выявить отклонения от проектной документации во внешнем виде фасада. Итог съемки – детально зафиксированный образ фасада.

В зависимости от назначения и вида геодезических съемок бывает также вертикальная съемка (топографическая или фасадная, дает представление о вертикальном срезе местности) и горизонтальная (контурный срез местности без рельефа, используется на плотно застроенных территориях).

В данной работе рассматривается особый вид съемки – радиолокационный.

Радиолокационная съемка позволяет получить изображение местности, несмотря на визуальные помехи, которые могут мешать оптике. Главное здесь - это сигнал, который улавливается аппаратурой. Затем, на основе алгоритмов и математической модели, лежащей в основе программного обеспечения, формируется нужное изображение.

Однако, на текущий момент РСА (Радиолокационное синтезирование апертуры) съемка требует довольно тщательной подготовки. Для проведения съемки отправляют специально подготовленные самолеты, и, как правило, масштаб таких съемок довольно крупный. Это связано с тем, что основой технологии РСА является сложный процесс, который необходимо обрабатывать в реальном времени.

В данной работе рассматривается вариант технологии РСА, который может быть использован для беспилотных аппаратов. Это открывает новые возможности для распространения этой технологии. Благодаря этому,

радиолокационная съемка может стать более доступной и широко использоваться в различных областях.

Важно отметить, что развитие технологии РСА может привести к значительным изменениям в области съемки местности. Это может открыть новые возможности для исследований, разведки и других областей, где требуется получение точных и надежных изображений местности, независимо от внешних условий.

Стоит подчеркнуть, что развитие и усовершенствование технологии РСА является важным шагом на пути к созданию более эффективных и надежных систем съемки местности. Это открывает новые горизонты для научных исследований и практического применения, делая эту технологию более доступной и привлекательной для широкого круга пользователей.

Радар с синтезированной апертурой (РСА) - это вид радара, который используется для создания двухмерных изображений или трехмерных реконструкций объектов, например, ландшафтов. РСА использует движение антенны радара над целевой областью для обеспечения более тонкого пространственного разрешения, чем обычные стационарные радары с лучевым сканированием. РСА обычно устанавливается на подвижной платформе, такой как самолет или космический аппарат, и берет свое начало в усовершенствованной форме бортового радара бокового обзора (SLAR). Расстояние, на которое устройство РСА проходит над целью в течение периода, когда она освещена, создает большую синтетическую апертуру антенны. Как правило, чем больше апертура, тем выше разрешение изображения, независимо от того, является ли апертура физической (большая антенна) или синтетической (подвижная антенна) - это позволяет РСА создавать изображения высокого разрешения с помощью сравнительно небольших физических антенн. При фиксированном размере и ориентации антенны объекты, расположенные дальше, остаются освещенными дольше - поэтому РСА обладает свойством создавать более крупные синтетические

апертуры для более удаленных объектов, что приводит к постоянному пространственному разрешению в диапазоне расстояний наблюдения.

Для создания изображения РСА передаются последовательные импульсы радиоволн, которые "освещают" объект съемки, а эхо от каждого импульса принимается и регистрируется. Импульсы передаются, и эхо принимается с помощью одной формирующей луч антенны с длиной волны от метра до нескольких миллиметров. По мере перемещения устройства РСА на борту самолета или космического аппарата расположение антенны относительно цели меняется со временем. Обработка сигналов последовательных зарегистрированных радиолокационных эхо-сигналов позволяет объединить записи с этих нескольких положений антенны. Этот процесс формирует синтетическую апертуру антенны и позволяет создавать изображения с более высоким разрешением, чем это было бы возможно при использовании данной физической антенны.

Сравнивая её с распространённой, оптической съемкой, можно выделить ряд преимуществ и особенностей. Разберем вкратце принцип работы оптической съемки на примере фотоаппарата. Первое что нужно для получения фото это источник света. Частицы света фотоны покидают источник света, отталкиваются от предмета и входят в камеру через несколько линз. Затем фотоны следуют по установленному пути. Целый ряд линз позволяет сделать максимально четкое изображение.

Пройдя сквозь диафрагму, линзы и войдя в отверстие, свет отталкивается от зеркала и направляется в видоискатель.

До этого свет преломляется, проходя сквозь призму, поэтому то мы и видим изображение в видоискателе не вверх ногами и если нас устраивает композиция, то мы нажимаем на кнопку.

Как мы видим, основной принцип оптической съемки заключается в отражении света от поверхности. Однако, при съемке местности может



возникнуть ряд причин, которые создадут помехи и преграды, делающие съемку невозможной. Задымленность создает визуальную помеху, и не дает камере сфотографировать объект находящийся в задымлении. Аналогичная проблема наблюдается и при тумане. Аналогично, оптическая съемка невозможна и в ночное время суток, так как, очевидно, света для захвата его камерой оптики наблюдаться не будет.

Здесь радиолокационная съемка будет обладать огромным рядом преимуществ, так как в отличие от оптики, РСА съемка опирается именно на сигнал, полученный антенной. И он мало того, что игнорирует визуальные помехи, так еще и способен возвращать сигнал от объектов, находящиеся за преградой, или под поверхностью земли. Из недостатков можно выделить ограниченную передачу цвета изображения, так как эту информацию радиосигнал передавать банально не способен.

Естественно, подобная съемка имеет ряд применений, где оптика со своей задачей не справляется. Те области применения, которые ценят больше возможность получения большего числа информации в ущерб её визуальному представлению.

Областей применения, как и упоминалось, у данной технологии хватает. Основное преимущество, это съемка сквозь визуальные помехи по типу тумана или дыма. Очень популярный пример РСА съемки, демонстрирующий данную особенность – снимок извергающегося вулкана, приведенном на Рисунке 1. Слева изображен результат оптической съемки. Справа – РСА изображение.

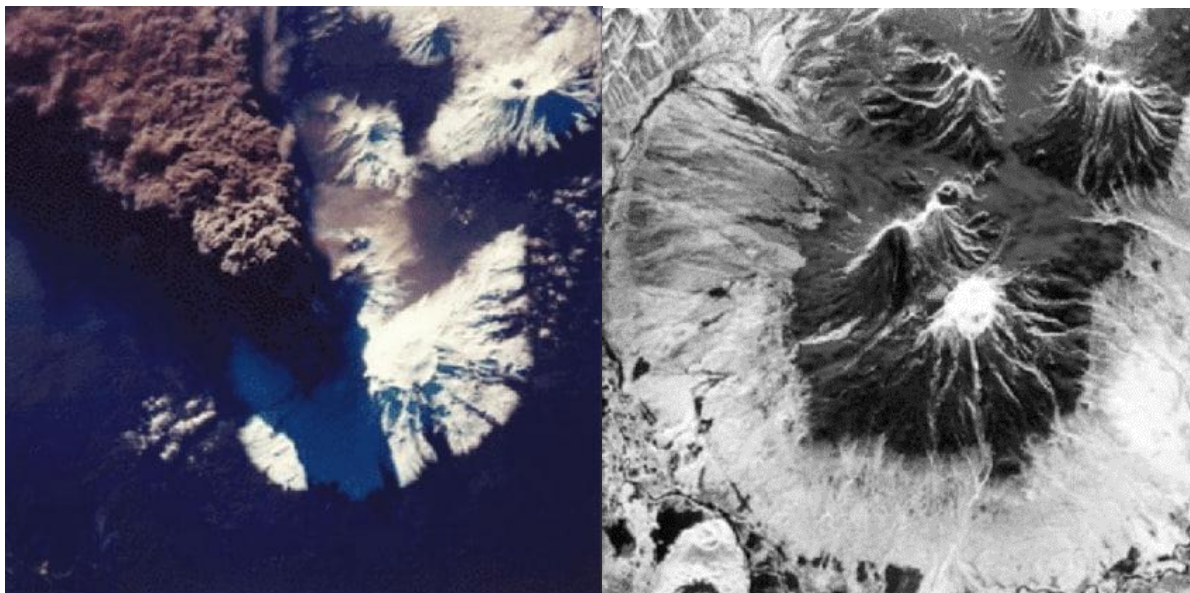


Рисунок 1 — Снимок извержения вулкана

На данном изображении представлено в сравнении два снимка. Слева – полученный с помощью оптической съемки, справа - РСА изображение. Как видно, съемка оптикой позволяет зафиксировать поверхностную картину: сам факт извержения вулкана, примерные очертания рельефа, однако немалая часть закрыта дымом от извержения, а также тенью, которые эти клубы дыма создают. На данном снимке очень сложно (даже практически невозможно), оценить маршрут распространения лавового потока, потенциальный и реальный ущерб на текущий момент. Однако всю эту информацию мы можем наблюдать на РСА снимке. От поверхности земли отразился непосредственно рельеф, и ни облачность, ни клубы дыма не помеха обзору. Мы можем четко наблюдать очертания вулкана, а также прекрасно видим, как растекается лавовый поток. Эту информацию мы можем использовать для оценки ущерба, а так же для прокладки маршрута для эвакуации ближайшего населения, и собственно, выстроить приоритет регионов, которые первыми подлежат эвакуации.

Вторым, не менее полезным применением можно упомянуть съемки арктических льдов. На подобных снимках можно оценивать толщину льдов, и предоставлять наиболее оптимальные и безопасные маршруты для

ледоколов. Оптические снимки точно не смогут предоставить оптимальную картину плотности ледников. Ведь лед будет плавать на поверхности вне зависимости от его толщины. Подобный снимок даст очень слабое представление о кучности льдов нуждающемуся в этом экипажу. Пример представлен на рисунке 2 и 3.

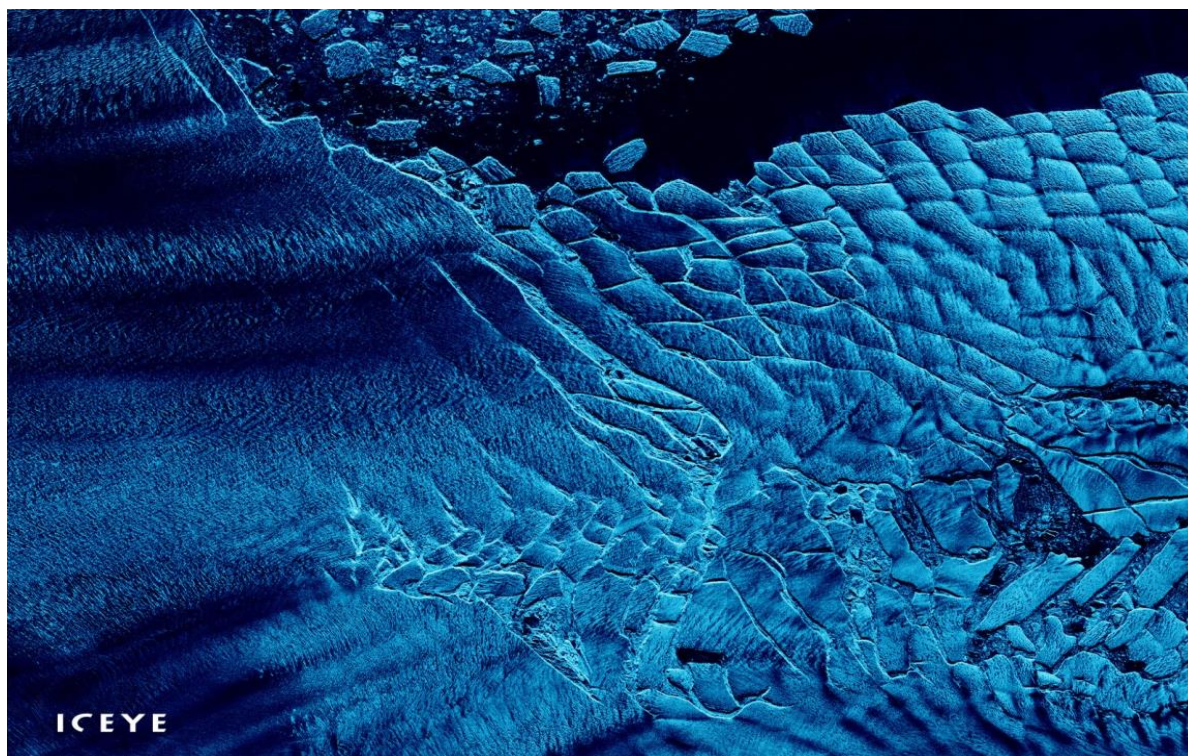


Рисунок 2 — РСА снимок ледника



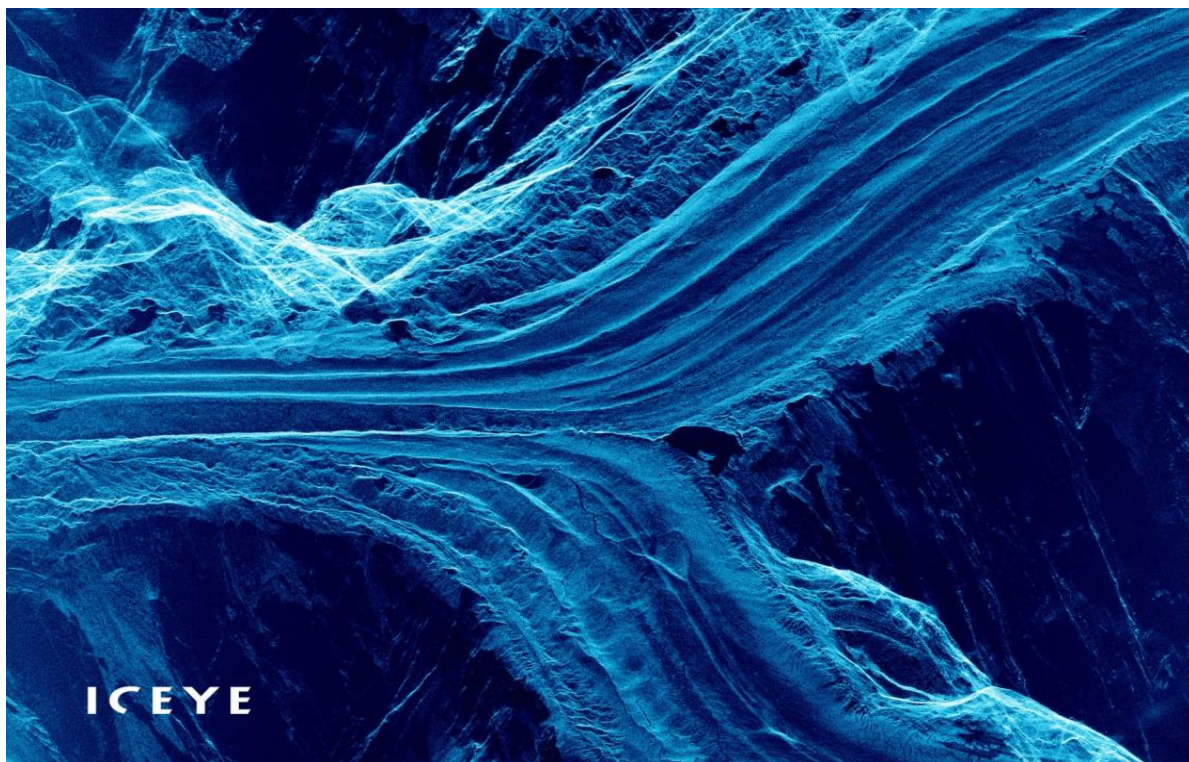


Рисунок 3 — РСА снимок ледника

Различить толщину с помощью радиолокационного сигнала мы можем благодаря тому, что в более толстых льдах сигнал отражается от стенок льда больше, чем от тонких. За счет этого возвращаемый сигнал гораздо более явный. Схематически это изображено на рисунке 4.

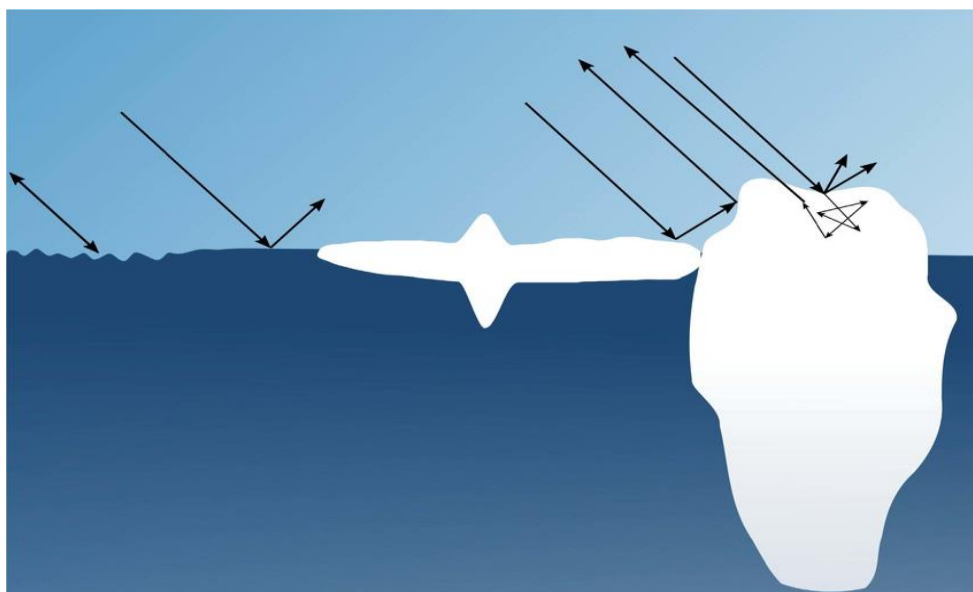


Рисунок 4 — Схематическое представление отражения волн радара от поверхности льда

Также подобные снимки будут полезны и при военной разведке. Военная техника, мины, скрытые за естественными укрытиями войска также смогут быть обнаружены за счет отражаемого сигнала. При этом и время суток, и погодные условия не будут являться для съемок помехой. Ниже, на рисунке 5 приведен пример РСА съемок различных видов военной техники (сверху РСА снимки, снизу – оптическая съемка). На рисунке 6 приведен снимок порта с обозначенными на нем кораблями.

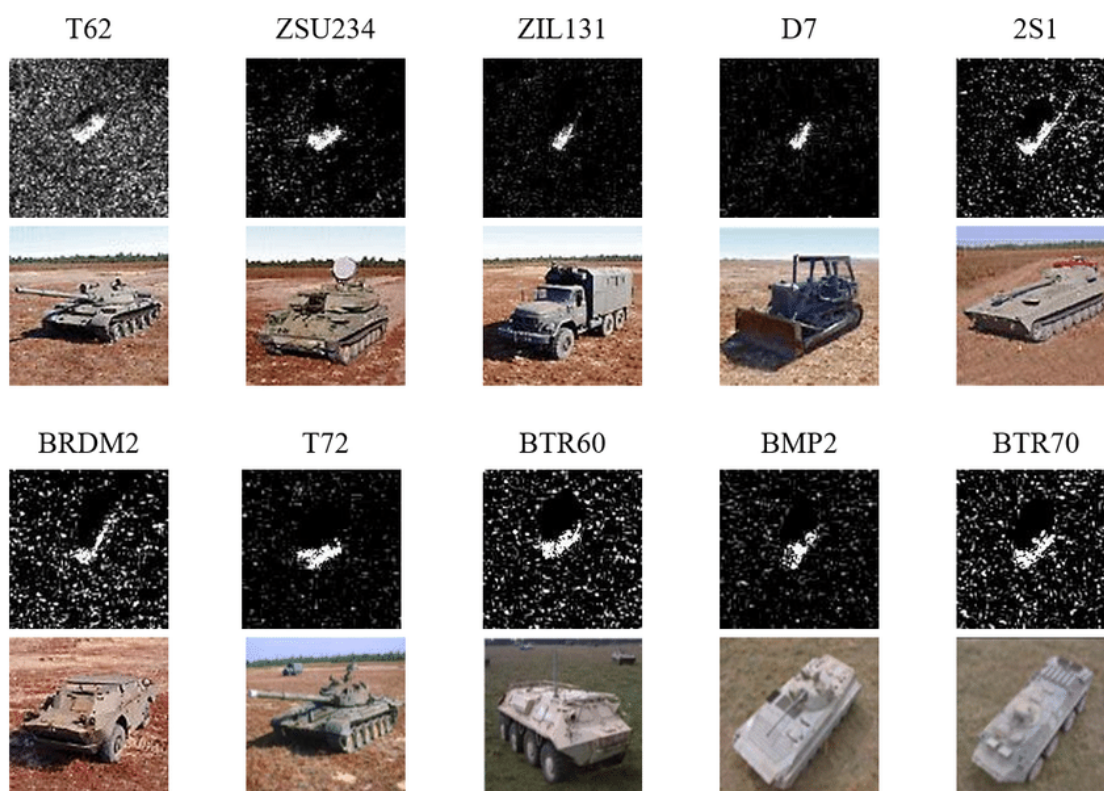


Рисунок 5 – Снимки военной техники

Стоит отметить, что в настоящее время крайне актуально делать подобные снимки именно с БПЛА в силу их маневренности и малых

габаритов.

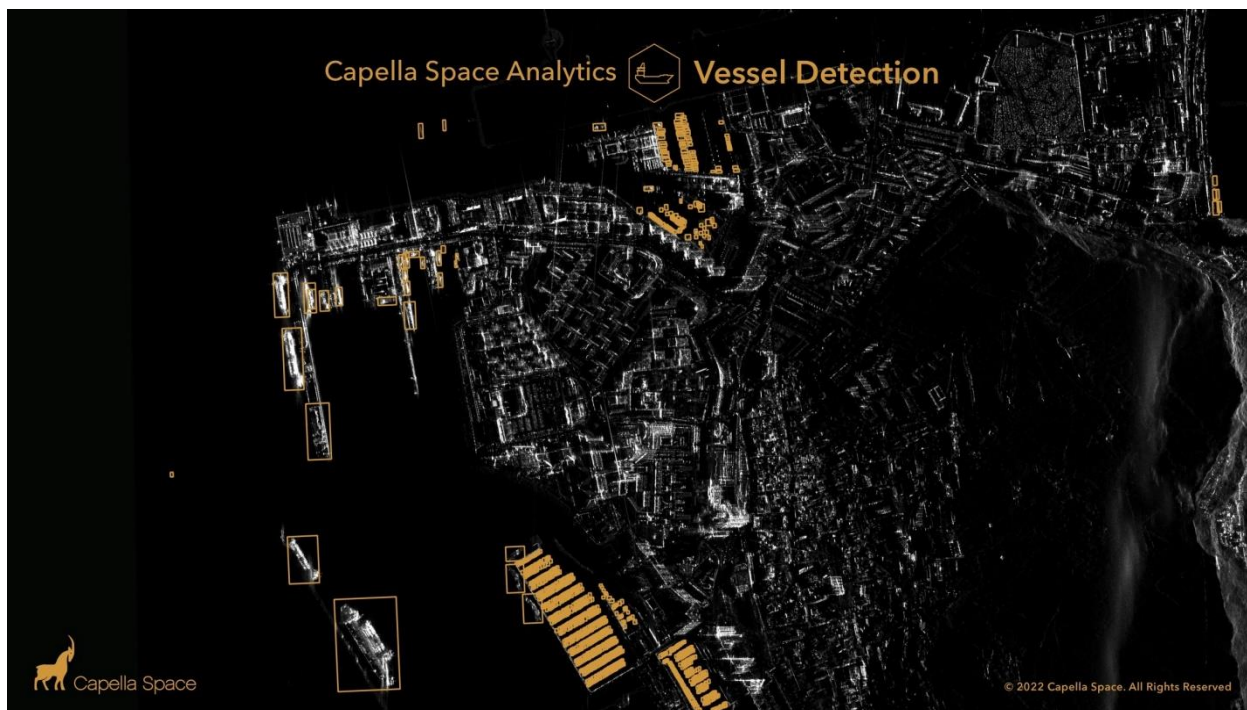


Рисунок 6 — РСА снимок порта, где оранжевыми прямоугольниками обозначены замеченные в результате съемки корабли

Целью данной выпускной работы является создание подходящего алгоритма для реализации алгоритма съемки с помощью радара с синтезированной апертурой, ориентированное на беспилотные аппараты. Цель данного программного обеспечения - получать подробные изображения местности, построенные на основе радиоволновых сигналов для применения радиолокационной съемки в различных областях конечным потребителем. Также, перед нами также стоит цель исследовать и оценить возможности фильтрации и параметры, при которых съемка будет эффективной по обработке, и при этом не терять в качестве конечного результата. Для этого будет проведен ряд исследований и проверок на основе программного обеспечения, разработанного в рамках данной квалификационной выпускной работы.



# 1 ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

## 1.1 Получение РСА сигналов

Перед тем как подробно рассмотреть, как именно формируются Радиолокационные изображения, разберем процесс их формирования в общих чертах. Радар с синтезированной апертурой – как и говорилось ранее это способ создания изображения с помощью радиоволн. Радиоволны, используемые в РСА, обычно имеют длину волны от примерно 3 см до нескольких метров, что намного больше длины волны видимого света, используемого для создания оптических изображений. Эти длины волн относятся к микроволновой части спектра, как показано на рисунке ниже.

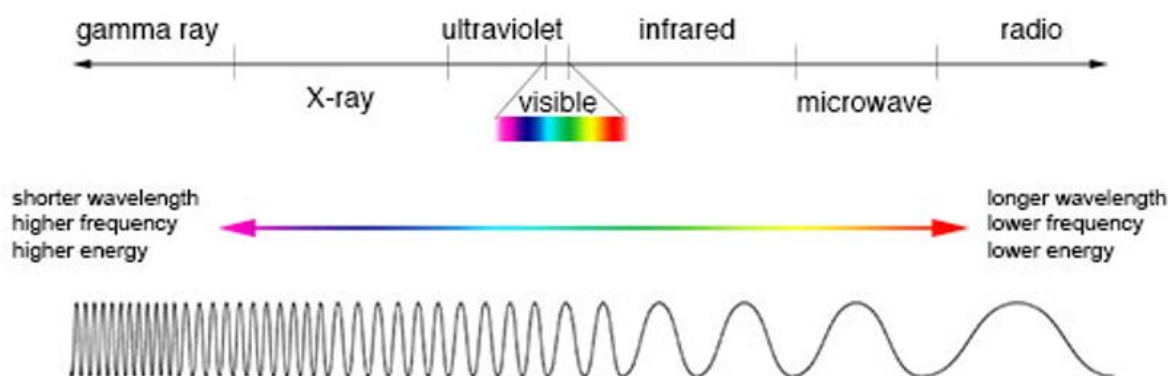


Рисунок 7 — Сравнение длины волны, частоты и энергии в  
электромагнитном спектре

Различные длины волн РСА часто называют диапазонами с буквенными обозначениями, такими как X, C, L и P. В таблице ниже указаны диапазоны с соответствующими частотами, длинами волн и областями применения, типичными для данного диапазона.

Таблица 1 — Таблица частотных диапазонов, используемых для РСА

Обозначения	Частотный диапазон	Длина волны	Область применения
Ka	27–40 ГГц	1.1–0.8 см	Редко используется для РСА (система слежения аэропортов)
K	18–27 ГГц	1.7–1.1 см	Редко используется (поглощение H <sub>2</sub> O)
Ku	12–18 ГГц	2.4–1.7 см	Редко используется для РСА (спутниковая альтиметрия)
X	8–12 ГГц	3.8–2.4 см	РСА высокого разрешения (мониторинг городов; лед и снег, слабое проникновение в растительный покров; быстрое разрушение когерентности в растительных зонах)
C	4–8 ГГц	7.5–3.8 см	РСА Workhorse (глобальное картографирование; обнаружение изменений; мониторинг районов с низким и умеренным проникновением; высокая когерентность); лед, океанская морская навигация
S	2–4 ГГц	15–7.5 см	Развивающееся использование для РСА-наблюдения Земли; мониторинг сельского хозяйства (NISAR обладает каналом S-диапазона; расширяет применение С-диапазона для более высокой плотности растительности)



Продолжение таблицы

L	1–2 ГГц	30–15 см	РСА среднего разрешения (геофизический мониторинг; картирование биомассы и растительности; высокая проникающая способность, InSAR)
P	0.3–1 ГГц	100–30 см	Биомасса. Первый космический РСА в р-диапазоне был запущен в 2020 г.; картографирование и оценка растительности. Экспериментальный РСА.

Длина волны - важная характеристика, которую необходимо учитывать при работе с РСА, поскольку она определяет, как сигнал радара взаимодействует с поверхностью и как далеко сигнал может проникнуть в среду. Например, радар Х-диапазона, работающий на длине волны около 3 см, обладает очень малой способностью проникать в широколиственный лес, и поэтому в основном взаимодействует с листьями в верхней части полога деревьев. Сигнал L-диапазона, напротив, имеет длину волны около 23 см, что обеспечивает большее проникновение в лес и взаимодействие между сигналом радара и крупными ветвями и стволами деревьев. Длина волны влияет не только на глубину проникновения в лес, но и на другие типы почвенного покрова, такие как почва и лед.

После подготовки специального летательного аппарата, оснащенного всем необходимым оборудованием, в частности, антенной радара для принятия сигнала, он направляется в область, которую необходимо запечатлеть на снимке. После того как подготовки завершены, радар направляет сигналы на объект или область необходимые для съемки. Радар - это активная система, которая генерирует собственные радиоволны и

передает их от своей антенны в направлении цели. Полученный сигнал будет зависеть от свойств радара, объекта, на который он был направлен, а также от геометрии (угла, под которым будет происходить распространение волн). Сигнал будет распространяться в течение времени, пропорциональному расстоянию цели от антенны (что тоже будет влиять на конечный сигнал с поверхности).

Сигнал, идущий от радара, достигает поверхности и начинает отражаться от неё. В зависимости от количества и дальности отражения, яркость возвращаемых точек будет разной. Это в конечном счете и образует наше будущее изображение.

Однако то, что мы получаем сразу после отражения, сложно будет назвать изображением. Это будет большое количество сигналов, которые мы будем сохранять как двумерную матрицу. Также стоит отметить, что из-за того, что летательный аппарат чаще всего находится в непрерывном движении, то и сигналы мы будем получать “растянутые” (Рисунок 8).

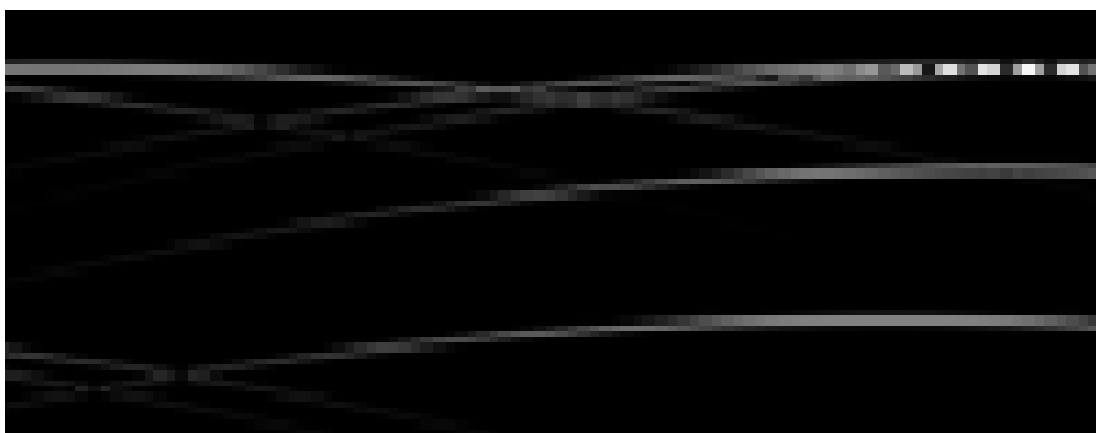


Рисунок 8 — Простой пример нескольких отраженных сигналов, полученных в виде дуги

Далее же нам предстоит отфильтровать полученный сигнал, сжать все полученные сигналы с помощью фильтров, что бы, в конечном счете, получить точки, которые и будут конечными “пикселями” нашего РЛИ изображения.

Сам процесс фильтрации происходит с помощью двумерной согласованной фильтрации, где мы применяем метод Быстрого преобразования Фурье.

Для фильтрации нам необходимо иметь эталонный сигнал, который будет использоваться для свертки всех полученных сигналов. И яркость, и размытость конечной точки напрямую зависит от того, насколько данный будет близок к эталонному. Соответственно, эталонные сигналы должны быть должным образом подобраны под фильтр, с учетом того, на какую область этот фильтр рассчитан.

## 1.2 Обработка сигналов в РСА

Чтобы понимать принципы обработки сигналов в РСА, необходимо подробно рассмотреть формирование сигналов в матрице траекторного сигнала, и, прежде всего, вид сигнала, соответствующий точечному отражателю.

Рассмотрим подробно принцип формирования сигналов от точечного отражателя, который поясняется с помощью рис. 2.3. На рис. 2.3 предполагается, что носитель РСА движется вдоль оси  $Ox$  с постоянной скоростью  $V$ . Зондирования импульсным сигналом осуществляются в дискретных точках  $x_i$ ,  $i = -N, -N+1, \dots, 0, \dots, N-1, N$  ( $x_0 = 0$ ), а точечный отражатель находится в точке  $A$  напротив точки  $x_0$  перпендикулярно траектории полета, причем в этой точке траектории расстояние до отражателя минимально и равно  $R_0$ .

Во всех указанных точках траектории отражатель попадает в зону «видимости» ДНА, установленной на борту ЛА. При этом в точке  $x_{-N}$  «видимость» точки  $A$  только начинается (левым краем ДНА), а точке  $x_N$  «видимость» точки  $A$  заканчивается (правым краем ДНА). Поскольку видимость точки  $A$  имеет место на протяжении всего интервала  $L_s = x_N - x_{-N}$ , то этот интервал и есть интервал синтеза апертуры, который ранее

обозначался как  $d_{эфф}$ . При этом время синтезирования (время облучения цели) зависит от скорости полета носителя РСА и равно  $T_c = L_s / V$  (Схематично изображено на Рисунке 9).

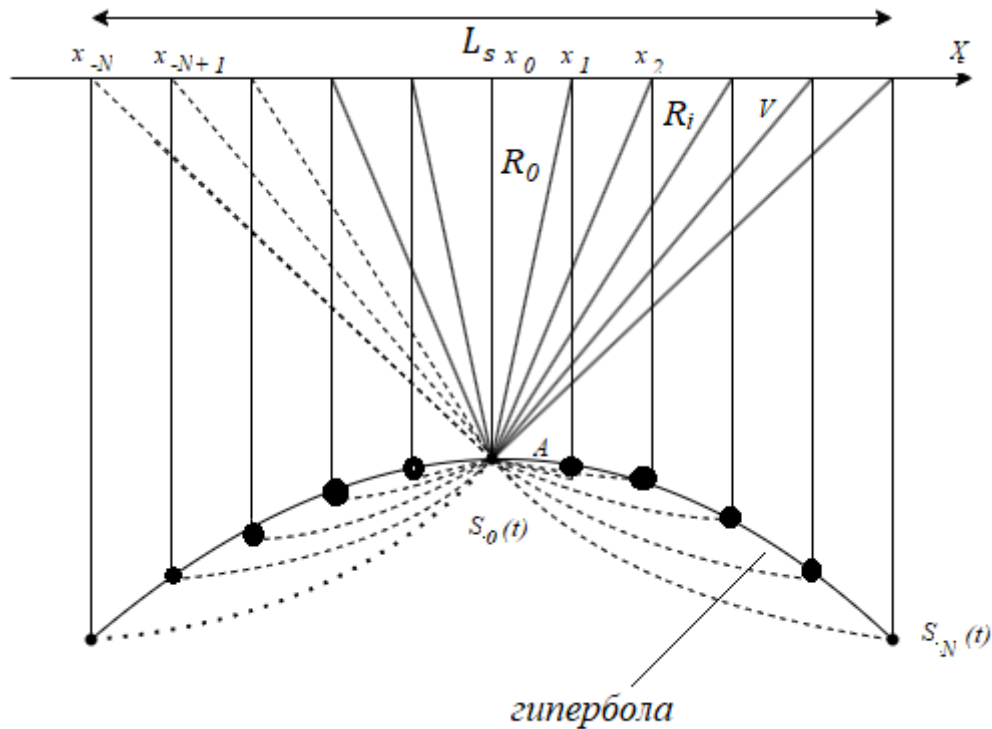


Рисунок 9 – Формирование траекторного сигнала для точечного отражателя

Согласно введенным ранее определениям, дальность  $R_0$  есть фокусируемая дальность и все данные, полученные на рассматриваемом интервале синтезирования используются только (и только) для формирования одной лишь точки РЛИ, находящейся на дальности  $R_0$  с координатой  $x_0$  на оси  $Ox$ , т.е. для точки  $A$ .

Для каждого положения носителя  $x_i = Vt_i$ ,  $t_i \in [-T_c / 2, T_c / 2]$  дальность  $R_i$  (изображено на рисунке 9) от фазового центра антенны до точки  $A$  различная: сначала она уменьшается до значения  $R_0$ , а затем опять увеличивается. Для значений этих дальностей имеет место соотношение

$$R_i = \sqrt{R_0^2 + x_i^2} = \sqrt{R_0^2 + (Vt_i)^2}. \quad (1)$$

Функция, описывающая кривую на двумерном графике в виде зависимости  $R_i$  от  $x_i$ , является *гиперболой*. Именно на этой кривой расположены наблюдаемые сигналы  $s_i(t)$ ,  $i = -N, \dots, N$  точечного отражателя (см. обозначения на рисунке 9) на двумерной матрице траекторного сигнала.

Для сигналов, схематически представленных на рисунке 10, по вертикальной оси отложены отсчеты быстрого времени, а по горизонтальной оси  $Ox$  – отсчеты медленного времени.

В каждом положении траектории  $x_i$  сигналы подвергаются согласованной фильтрации в быстром времени или сжатию по дальности, в результате чего образуются отсчеты быстрого времени, которые схематически представлены на следующем рисунке 10.

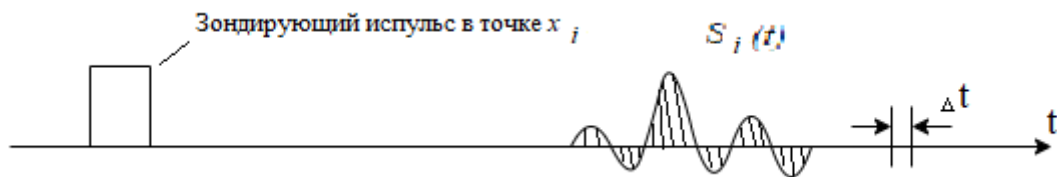


Рисунок 10 – Отсчеты быстрого времени

Таким образом, образуется траекторный сигнал в виде двумерной матрицы отсчетов быстрого и медленного времени – это уже отсчеты комплексной огибающей принимаемого сигнала.

### 1.3 Согласованная фильтрация двумерных сигналов при формировании радиолокационных изображений

В радиолокации одной из задач, имеющей широкие практические приложения, является формирование радиолокационного изображения (РЛИ) поверхности земли с борта авиационного (самолеты, вертолеты и др.) или космического носителя радиолокатора. При этом обычно антенна радиолокатора «смотрит» перпендикулярно направлению полета летательного аппарата (ЛА), как показано на рисунке 11. Такой метод зондирования пространства земли при неподвижной антенне называется режимом бокового обзора.

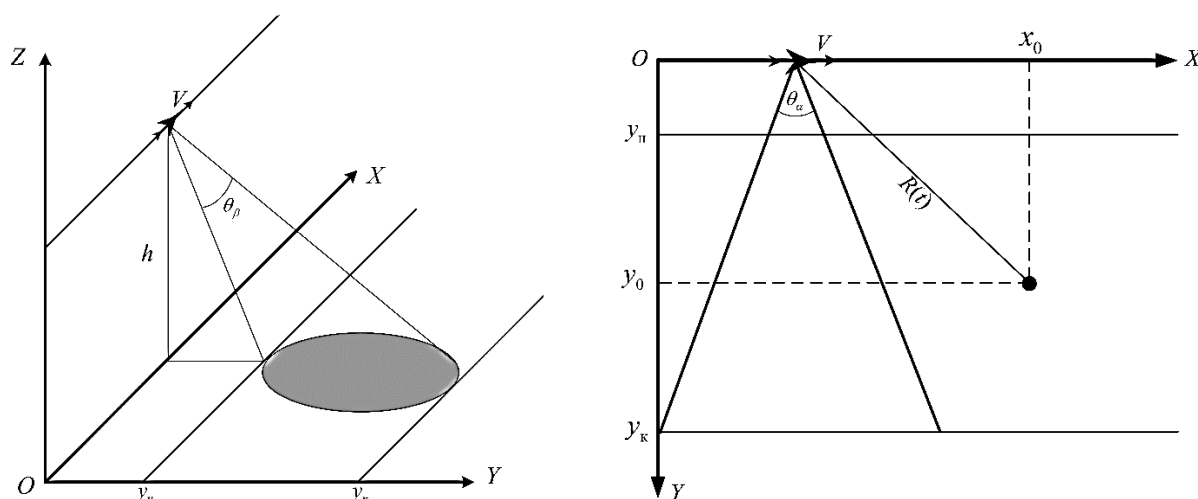


Рисунок 11 – Геометрическое расположение траектории полета ЛА и полосы обзора в проекции на поверхность земли в режиме бокового обзора

На рисунке 11 обозначено:  $\theta_a$  – ширина луча диаграммы направленности антенны (ДНА) в горизонтальной плоскости;  $V$  – скорость полета носителя радиолокационной системы (РЛС) (предполагается, что носитель РЛС совершает полет в горизонтальной плоскости вдоль прямой линии – оси  $Ox$ );  $(x_0, y_0)$  – координаты некоторой точки отражения радиоволн на поверхности земли.

В режиме бокового обзора сигналы, отраженные от различных объектов, формируются в виде двумерной матрицы, называемой траекторным сигналом. Эту матрицу можно рассматривать как изображение, в котором значения каждого элемента матрицы (пикселя) являются комплексными числами, соответствующими комплексной огибающей сигнала в определенный момент времени.

Сигналы двумерной матрицы траекторного сигнала, пропускаются через фильтр, согласованный с сигналом точечного отражателя. При этом множество точек отражения с различными амплитудами сигналов образуют после согласованной фильтрации множество точек в пространственной области, амплитудные значения которых принимаются за яркости пикселей синтезированного изображения.

Получим радиолокационное изображение сцены путем согласованной фильтрации матрицы траекторного сигнала при наличии только одной точки отражения с координатами  $(x_0, y_0)$  (изображено на рисунке 11). В качестве комплексного сигнала будем рассматривать огибающую сжатого сигнала с линейной частотной модуляцией, описываемую выражением:

$$s_k(t_m) = a_k \operatorname{sinc}\{2\pi\Delta F(t_m - t_R)\} \exp\{-j(\pi\Delta F(t_m - t_R) + \varphi_R + \varphi_0)\}, \quad m=1, \dots, M, \quad (2)$$

где  $t_m$  – дискретные значения времени в течение одного периода повторения импульсов (индекс  $m$  определяет номер пикселя по оси  $Oy$ );  $a_k$  – амплитуда сигнала в  $k$ -й точке положения носителя РЛС (индекс  $k$  определяет номер пикселя по оси  $Ox$ );  $\Delta F$  – ширина спектра зондирующего сигнала;  $\varphi_0$  – начальная фаза сигнала, принимающая произвольное значение. В соотношении (1.2)  $t_R$ ,  $\varphi_R$  – время задержки и фаза принимаемого сигнала, зависящие от дальности  $R(t)$  точки отражения и определяемые формулами:

$$R(t) = \sqrt{(x(t) - x_0)^2 + y_0^2 + h^2}, \quad x(t) = Vt, \quad t_R = \frac{2R(t)}{c}, \quad \varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda} 2R(t), \quad (3)$$

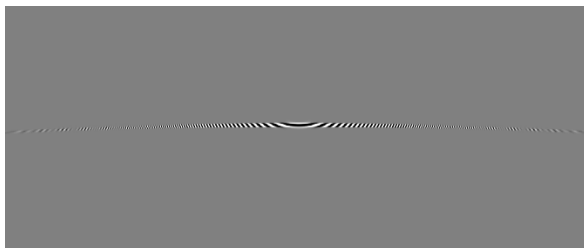
где  $h$  – высота полета носителя РЛС;  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $\lambda$  – длина волны несущего колебания.

Зависимость  $R(t)$  от  $x(t)$  в (3) определяет линию гиперболы на плоскости. В случае, когда  $y_0^2 + h^2 \gg (x(t) - x_0)^2$  (т.е. когда интервал синтезирования антенны существенно меньше расстояния до точки фокусирования) используют линейную аппроксимацию зависимости  $R(t)$  от  $x(t)$ , что позволяет рассматривать принимаемый сигнал от одной точки, как сигнал с линейной частотной модуляцией.

Изображение матрицы траекторного сигнала представлено на рис. 5.10: а) действительные значения; б) абсолютные значения. При формировании траекторного сигнала согласно (2), (3) использованы значения:

$\Delta F = 50$  МГц,  $h = 100$  м,  $V = 100$  м/с,  $\lambda = 0,1$  м,  $x_0 = 1000$  м,  $y_0 = 100$  м,  $\theta_a = 60^\circ$ ,  $T_{\pi} = 0,5$  мс (период повторения импульсов, определяющий интервал между зондированиями по оси  $Ox$ , равный  $VT_{\pi} = 0,05$  м).

Как видно из рисунка 12 гиперболическая зависимость между  $R(t)$  и  $x(t)$  просматривается весьма слабо, что и позволяет аппроксимировать ее линейной зависимостью при небольшой потере качества фильтрации. Явление искривления сигнальной линии для точек отражения (т.е. отклонение ее от прямой линии) называют миграцией по дальности, и в тех случаях, когда этим явлением пренебречь нельзя, следует использовать фильтрацию сигналов в двумерном пространстве  $xOy$ .



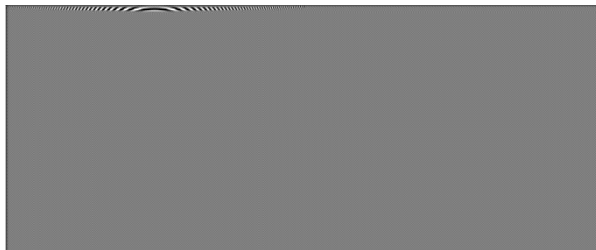


*a)*

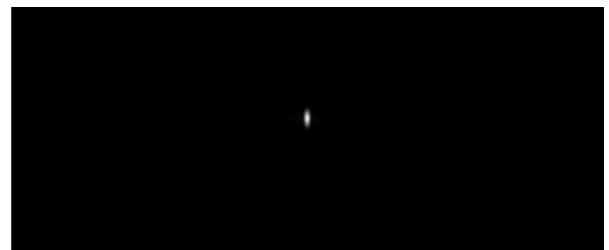
*б)*

Рисунок 12 – Изображение траекторного сигнала: *a)* действительные значения; *б)* абсолютные значения

На рисунке 13 *a* представлено изображение импульсной характеристики двумерного согласованного фильтра (действительные значения после дополнения нулями) и на рисунке 13 *б* – синтезированное изображение после согласованной фильтрации в увеличенном масштабе.



*a)*



*б)*

Рисунок 13 – Изображение импульсной характеристики согласованной фильтра после дополнения нулями (*a*) и синтезированное изображение после фильтрации в увеличенном масштабе (*б*)

Как видно из рисунка 13 *б*, согласованная фильтрация позволяет восстановить истинный вид отражателя в виде точки. При этом размер точечного отражателя занимает несколько пикселей по вертикальной и горизонтальной оси и определяется соответственно разрешающей способностью по дальности, зависящей от параметров сигнала, и по линии траектории, зависящей от параметров синтеза апертуры.

Заметим, что параметры согласованного фильтра зависят от координаты  $y_0$  (или дальности) точки, для которой выполняется согласованная фильтрация (или, как говорят, сжатие сигнала), поэтому такую обработку называют фокусированной.

Теперь рассмотрим поподробнее процесс получения сигналов, и сравним синтетическую апертуру с реальной (RAR).

#### **1.4 Радар с реальной апертурой (PPA)**

Радар бокового обзора отличается от радара прямого обзора, например, метеорологического радара. Если антенна радара, которая усиливает передаваемый и принимаемый сигнал, установлена на самолете или орбитальном спутнике, радар может использоваться для получения изображения объектов, находящихся под поверхностью земли на определенной глубине. Радары прямого обзора не могут создавать изображения. Радарное изображение формируется путем передачи импульсов радиочастотной энергии (РЧ) в направлении земли от самолета и измерения интенсивности обратного сигнала (иногда называемого "эхом") и времени, которое требуется для того, чтобы проделать обратный путь к антенне. Таким образом, земля "сканируется" в двух измерениях. Одно измерение - это измерение "дальности". Объекты располагаются в этом измерении в соответствии с их расстоянием до радара. Второе измерение - это измерение "вдоль трассы" (или "поперек трассы", или "по азимуту"). В этом измерении земля сканируется лучом, движущимся по земле со скоростью, равной скорости платформы (самолета или спутника), а объекты располагаются в этом измерении в соответствии с положением самолета вдоль трассы. Изображение формируется из отраженных сигналов в обоих измерениях.

Пространственное разрешение, то есть способность разрешать объекты на земле, отличается в направлении дальности (перпендикулярно направлению полета) по сравнению с направлением азимута (параллельно направлению полета). В "радаре с реальной апертурой" разрешение по дальности определяется интенсивностью импульсов, передаваемых антенной. Азимутальное разрешение определяется шириной следа луча на местности, а ширина луча обратно пропорциональна длине антенны. Малая длина антенны соответствует большой ширине луча (отпечаток луча на земле).

Поскольку передвижение антенны, достаточно большой для получения приемлемого разрешения по азимуту, в космосе невозможно, это ограничивает пространственную съемку в азимутальном направлении. Разработка усовершенствованных алгоритмов обработки позволила решить эту проблему, что привело к появлению нового поколения радаров с формированием изображений, названных радаром с синтезированной апертурой.

### 1.5 Радар с синтезированной апертурой (РСА)

Чтобы смягчить нежелательные последствия плохого разрешения радара с реальной апертурой по азимуту, движение антенны вдоль азимутального направления используется для "синтеза" или создания эффекта длинной антенны, как показано на рисунке 14.

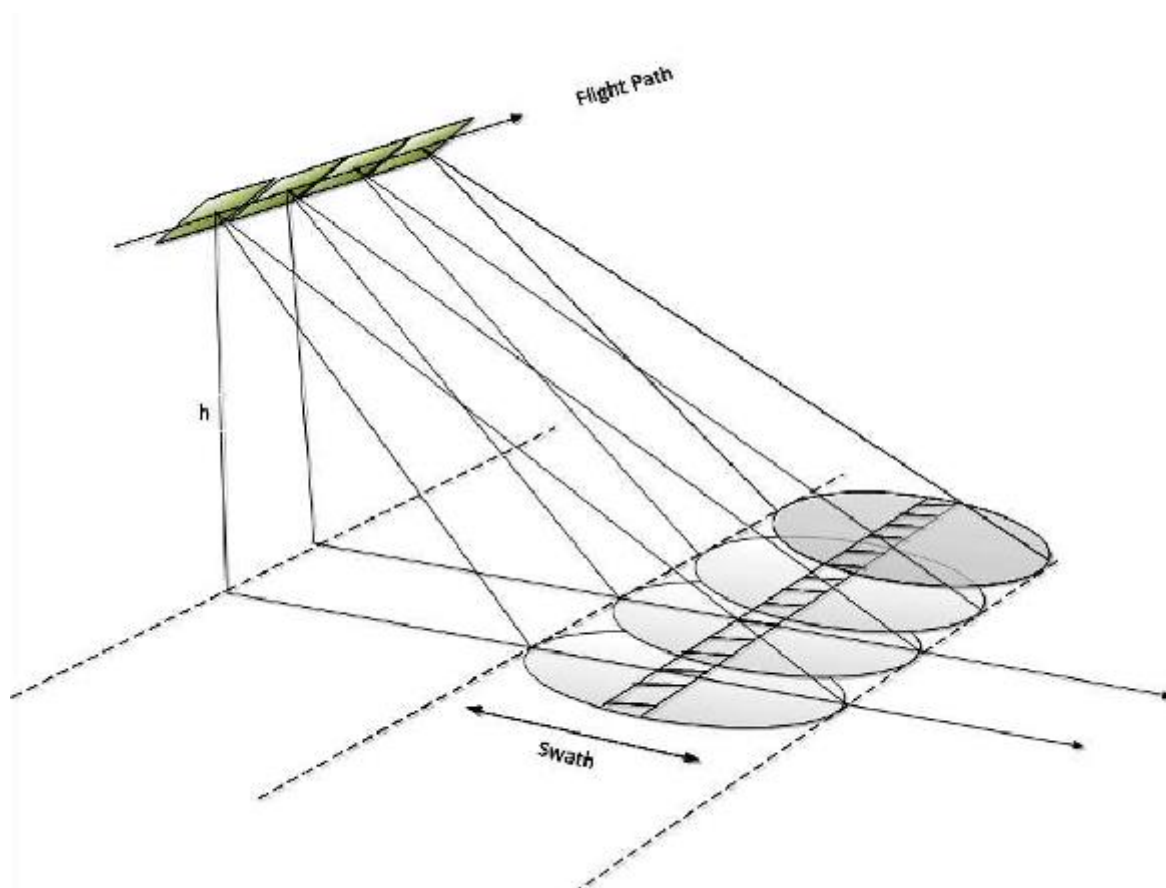


Рисунок 14 — Генерация синтетической апертуры (Источник: NASA)

Этот процесс синтезирования возможен потому, что рассеиватель (цель) на земле остается в пределах луча радара с реальной апертурой в течение многих радиолокационных импульсов. Суммирование отражений от всех этих импульсов позволяет синтезировать большую антенну с гораздо более узкой шириной луча, что приводит к лучшему пространственному разрешению в азимутальном направлении. Эта техника применима как для воздушных, так и для космических систем.

Данные РСА также позволяют использовать метод анализа, называемый интерферометрией, или *InSAR*. InSAR использует фазовую информацию, записанную датчиком, для измерения расстояния от датчика до цели. При наличии как минимум двух наблюдений за одной и той же целью расстояние и дополнительная геометрическая информация с датчика могут быть использованы для измерения изменений в рельефе поверхности земли. Эти измерения очень точны (вплоть до сантиметра) и могут использоваться для определения областей деформации в результате таких событий, как извержения вулканов и землетрясения (изображено на Рисунке 15).

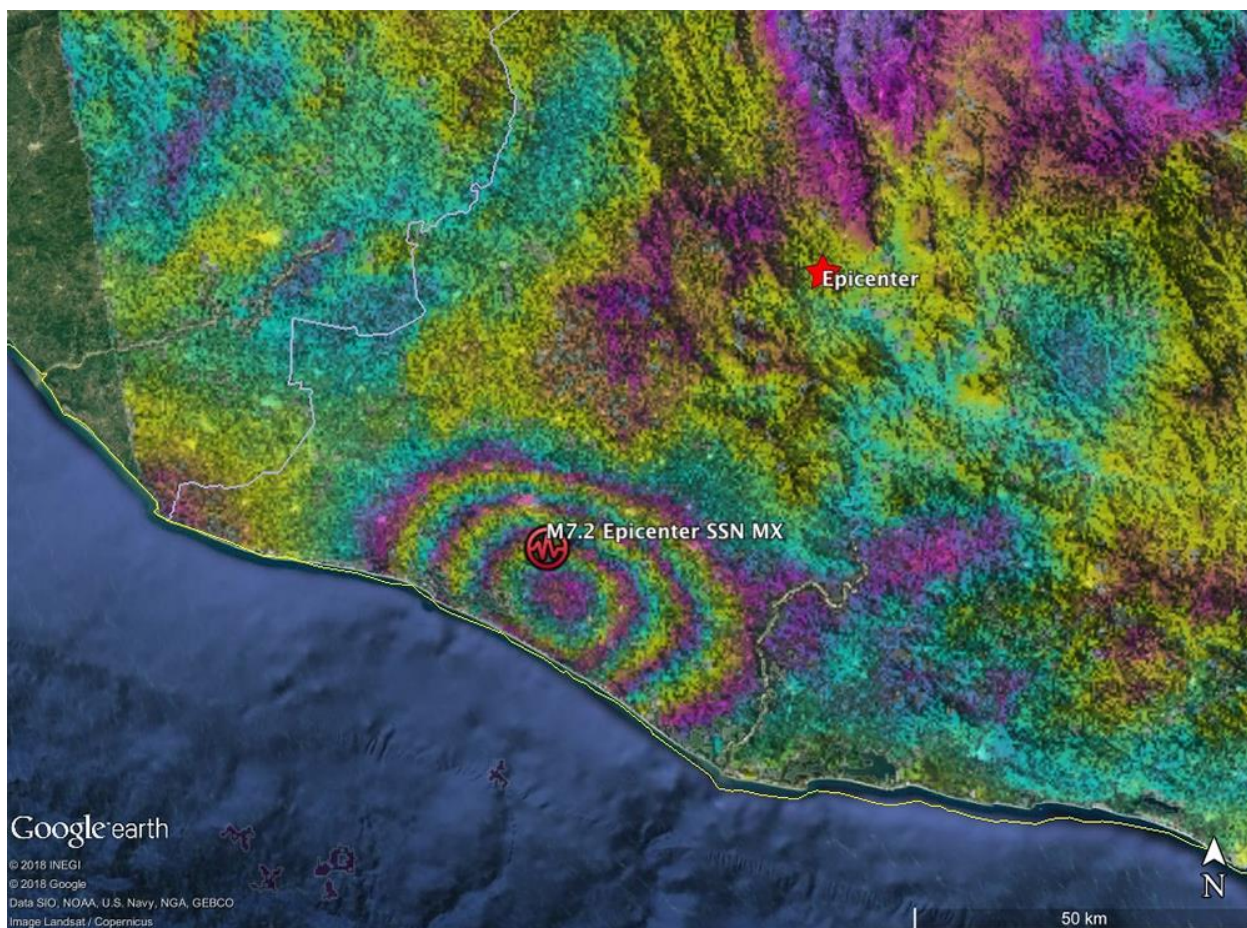


Рисунок 15 — Интерферограмма с данных Sentinel-1 SAR, Движение оконтурено 9-сантиметровыми цветными контурами, также известными как бахрома

## 1.6 Как правильно интерпретировать изображения РСА

Хотя изображения, полученные с помощью РСА, могут быть преобразованы в узнаваемую карту местности, между оптическими снимками и снимками РСА существуют важные различия. Снимки РСА считаются нелитеральным типом изображений, поскольку они не похожи на оптические изображения, которые обычно интуитивно понятны человеку. Для точной интерпретации снимков необходимо хорошо понимать ряд аспектов.

*Затенение* возникает по тем же причинам, что и тени при оптической съемке: объект преграждает путь прямому излучению - видимому свету в случае оптической съемки и лучу радара в случае РСА. Однако в отличие от

оптических снимков, на которых объекты в тени видны благодаря атмосферному рассеянию, в тени РСА нет никакой информации, поскольку нет обратного сигнала.

Поскольку РСА - это прибор бокового обзора, рассеянные обратные сигналы будут располагаться на изображении в зависимости от того, насколько далеко цель находится от антенны вдоль наклонной плоскости (в плоскости радар-изображение). Это приводит к некоторым интересным геометрическим искажениям изображения, например, таким как ракурсное искажение. В результате высокий объект с уклоном, например гора, кажется более крутым, с тонким ярким "краем". Стоит обратить внимание, что угол обзора датчика влияет на ракурс; больший угол обзора уменьшает эффект.

Наложение - это крайний пример ракурсного искажения, когда объект настолько высок, что сигнал радара достигает точки с большей высотой (В) раньше, чем точки с низкой высотой отражения (А). Это приводит к тому, что сигналы от точки В располагаются на изображении ближе к сенсору (ближний диапазон) и заслоняют точку А (Пример: вершина накладывается на подножие горы).

Эффекты этих явлений меняются в зависимости от угла обзора датчика. Большой угол обзора увеличивает эффект теней (удлиняет тень), но при этом минимизирует эффект наложения (меньше наложения). Меньший угол обзора имеет противоположный эффект. На рисунке 16 показан пример того, как здания в городской среде искажаются под воздействием тех же эффектов. Все высокие здания кажутся расположенными горизонтально из-за наложения.

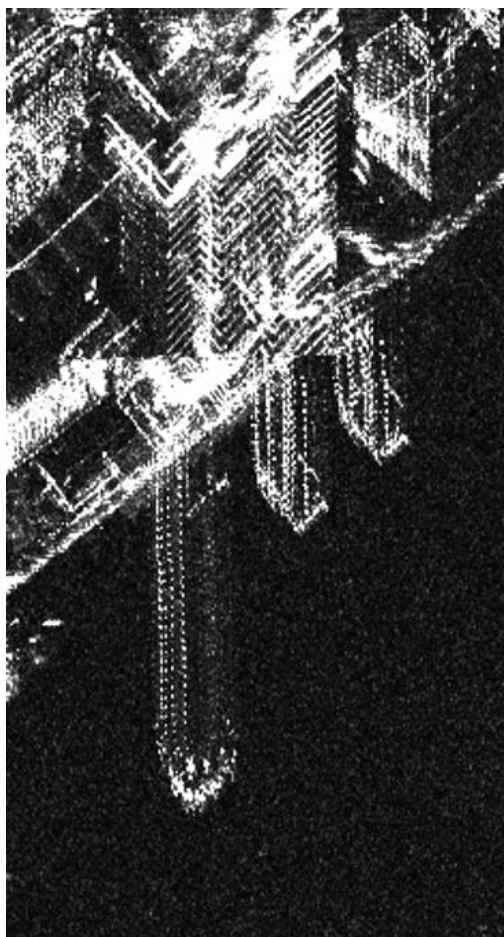


Рисунок 16— Снимок городского здания, сделанный с помощью РСА

Хотя радарное изображение может выглядеть как монохромное оптическое изображение, это не так. Интенсивность пикселей на радарном изображении не является показателем цвета объекта (как на цветной фотографии). Вместо этого интенсивность зависит от количества энергии, переданной датчиком РСА (например, от яркости источника освещения), свойств материала объекта, физической формы объекта и угла, под которым объект рассматривается.

Параметры конструкции и работы позволяют инженерам контролировать отраженный обратный сигнал (так называемое обратное рассеяние). Инженеры разрабатывают и моделируют систему и рабочие параметры, чтобы максимизировать отдачу радара и, соответственно, собранную информацию по конкретным целям. При проектировании выбираются длина волны и поляризация системы (о них речь пойдет ниже),



которые после запуска изменить невозможно. Эти фиксированные параметры сенсора на определенном уровне определяют результирующую яркость пикселя на конкретном изображении.

Длина волны влияет на разрешение по азимуту, но также имеет важные последствия для проникновения, что видно на изображении 17. В целом, проникающая способность радара увеличивается с ростом длины волны.

Угол обзора влияет на залегание и тень, как описано выше, но также может влиять на яркость пикселей, поскольку изменяет способ взаимодействия луча радара с объектом.

Поляризация на передаче и на приеме также влияет на яркость пикселя.

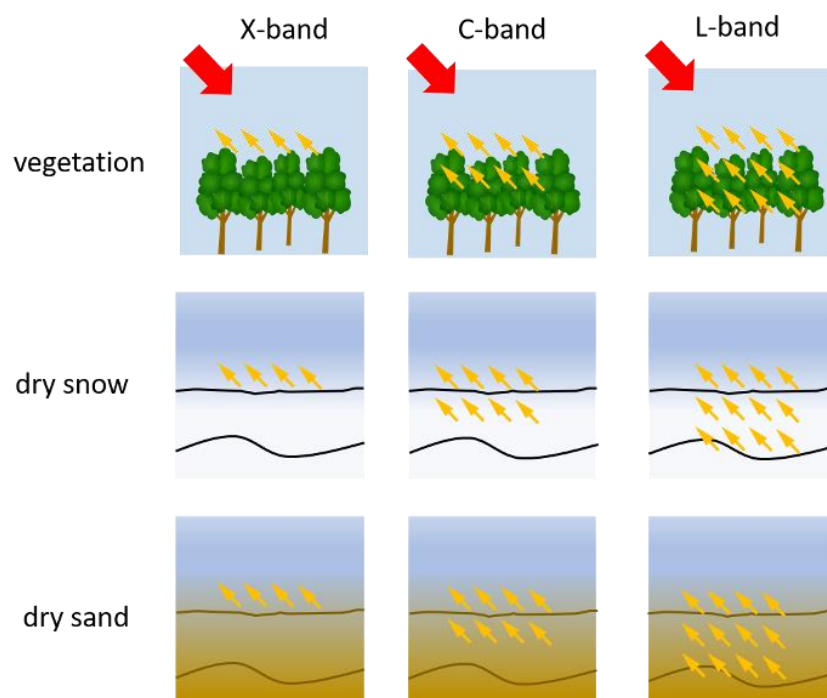


Рисунок 17 — Проникновение волн в зависимости от частоты

Параметры поверхности, влияющие на яркость пикселей, - это шероховатость материала относительно длины волны системы и рассеивающий материал (диэлектрическая проницаемость объекта). Если шероховатость поверхности материала гладкая по отношению к длине волны системы, то луч радара отражается (рисунок 18). Если поверхность шероховата по отношению к длине волны системы, луч радара рассеивается



во всех направлениях. Это называется диффузным рассеянием. Различная шероховатость поверхности приводит к разному количеству диффузного рассеяния и разной яркости пикселей. Диэлектрическая проницаемость рассеивающего материала - это физическое свойство материала, которое определяет, насколько он отражает электромагнитные волны. Металлические объекты и вода имеют более высокую диэлектрическую проницаемость и являются более отражающими, однако, поскольку они гладкие по отношению к длине волны системы и обычно плоские, луч радара отражается зеркально, в сторону от датчика.

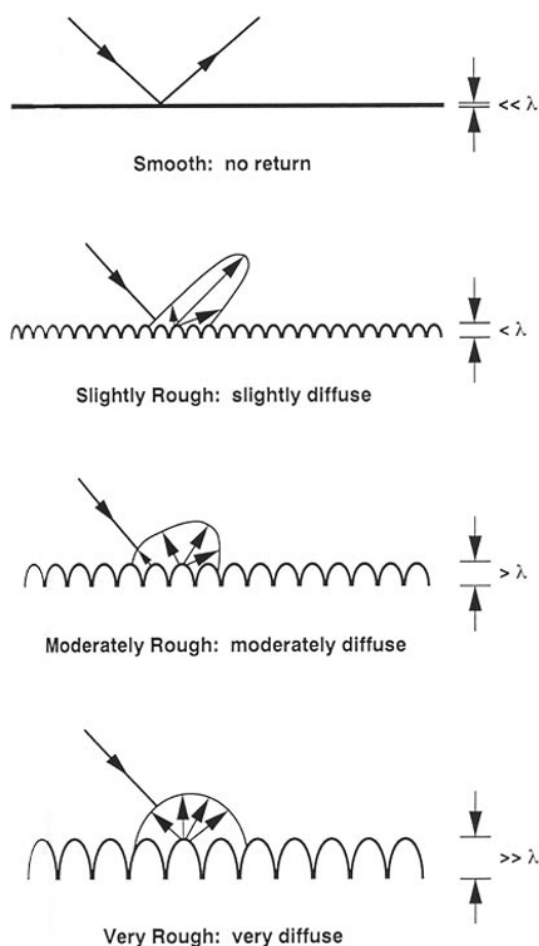


Рисунок 18 — Рассеивание на шероховатой поверхности

Кроме того, некоторые особенности поверхности будут вызывать зеркальное отражение в сторону датчика, отражаясь от нескольких поверхностей. Двойное отражение называется двугранным, а тройное -

трехгранным. Их вызывают гладкие поверхности, ориентированные под углом 90 градусов друг к другу, как показано на рисунке 19.

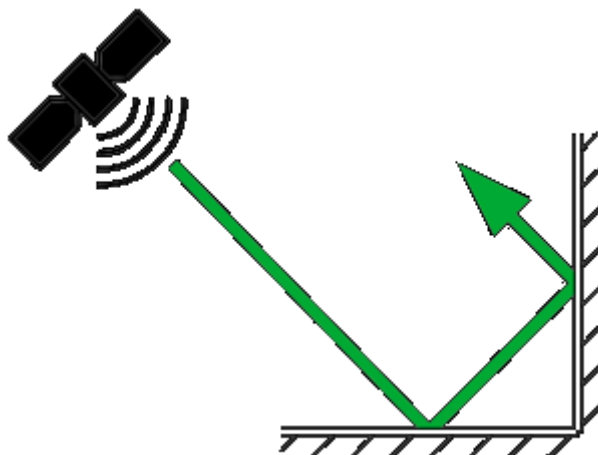


Рисунок 19 — Схема двугранное рассеяние

Спекл — это эффект, который возникает при обработке радиолокационных изображений, включая изображения SAR. Это своего рода “шум”, который проявляется в виде зернистости на изображении. Спекл является результатом конструктивной и деструктивной интерференции сигнала обратного рассеивания. Изображения, генерируемые лазерными, ультразвуковыми и радиолокационными системами с синтезированной апертурой (SAR), подвержены спекл-шуму из-за интерференции возвращаемых электромагнитных волн, рассеянных от нескольких поверхностей.

Для улучшения качества изображений SAR и уменьшения влияния спекла применяются различные методы обработки, включая специальные фильтры.

## 2 МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

### 2.1 Двумерное преобразование Фурье

Быстрое преобразование Фурье (БПФ, или FFT на английском) - это алгоритм ускоренного вычисления дискретного преобразования Фурье, позволяющий получить результат за время, меньшее чем  $O(n^2)$  (требуемого для прямого, поформульного вычисления).

Дискретное преобразование Фурье преобразует набор чисел в набор чисел  $X_k$ , такой, что  $X_k = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \varepsilon^{kj}$ .

Основной шаг алгоритма состоит в сведении задачи для  $N$  чисел к задаче с меньшим числом. Для этого вводятся два новых набора чисел:  $a_k = x_{2k}$  и  $b_k = x_{2k+1}$ , где  $k$  — любое число.

Таким образом, для того чтобы полностью перейти к набору чисел  $X_k$ , необходимо  $O(n \log(n))$  действий. Это значительно быстрее, чем прямое вычисление дискретного преобразования Фурье, которое требует  $O(n^2)$  действий.

БПФ широко используется в области обработки сигналов и анализа данных, а также в цифровых осциллографах для проведения спектрального анализа сигналов. Этот же алгоритм лежит в основе согласованной фильтрации.

Построим фильтр с ИХ

$$h(j,k) = f(J-1-j, K-1-k), j = 0, \dots, J-1, k = 0, \dots, K-1 \quad (4)$$

Если построить фильтр, который согласован с изображением искомого объекта  $f(j, k)$  (эталона) и имеет ИХ вида (4), и пропустить через него панорамное изображение, то на выходном изображении фильтра в

местах положения эталонных объектов будут формироваться значения коэффициентов автокорреляции эталонов, соответствующие положению нижнего правого пикселя эталона на панорамном изображении.

Фильтр с ИХ вида (4) называется *согласованным фильтром* для изображения  $f(j, k)$ , а фильтрация с помощью такого фильтра называется *согласованной фильтрацией*.

## 2.2 Согласованная фильтрация

Согласованный фильтр, являющийся линейным оптимальным фильтром, строится на основе известных спектральных характеристик полезного сигнала и шума. Этот фильтр предназначен для выделения сигналов известной формы на фоне шумов. Процесс использования согласованного фильтра называется согласованной фильтрацией, которая позволяет получить максимальное отношение сигнал/шум на выходе фильтра. Комплексная частотная характеристика согласованного фильтра должна быть равна произведению выражения, комплексно сопряжённого с выражением, описывающим спектр обнаруживаемого сигнала. Импульсная характеристика такого фильтра представляет собой отражённую относительно нуля копию входного сигнала, сдвинутую на длительность сигнала. Согласованная фильтрация нашла широкое применение в радиолокации, поскольку фильтр можно настроить на заранее известный тип принимаемого сигнала. Важно отметить, что согласованный фильтр - это устройство, которое на выходе максимизирует отношение сигнал/шум. Это открывает новые возможности для улучшения качества обработки сигналов и повышения точности радиолокационных систем.

Несомненным преимуществом метода согласованной фильтрации является возможность выполнения ее в частотной области. Это позволяет существенно (в десятки и сотни раз) сократить время вычислений благодаря использованию процедуры БПФ.

Проанализируем структуру СФ. Видим, что ИХ двумерного согласованного фильтра получается путем зеркального отображения эталонного изображения относительно двух осей – горизонтальной и вертикальной. Эта процедура эквивалентна повороту изображения на 180 градусов относительно его центра.

Частотная характеристика СФ получается с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от ИХ. Процедура фильтрация – стандартная, она включает четыре этапа:

- Дополнение нулями панорамного изображения и ИХ фильтра таким образом, чтобы число пикселей этих изображений стало одинаковым (по каждому измерению) и равным сумме числа пикселей каждого изображения минус единица (это выполняется по каждой оси).
- Вычисление двумерного ДПФ каждого дополненного нулями изображения;
- Поэлементное перемножение результатов полученных ДПФ изображения и ИХ;
- Вычисление обратного двумерного ДПФ от произведения и взятие действительной части от полученного результата;

При дополнении нулями стараются получить такие размеры изображения и ИХ, чтобы число пикселей по каждому измерению было равно степени двойки. В этом случае операция ДПФ выполняется намного быстрее благодаря использованию быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Хорошие характеристики метода согласованной фильтрации ограничиваются тем, что она не является инвариантной к повороту изображения и изменению его масштаба. Чтобы выделять повернутые изображения или изображения с измененным масштабом необходимо

создавать множество эталонов (с различными углами поворота, масштаба, ракурса, вида фона и т.д.).

Базовая модель фильтрации в частотной области определяется равенством

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (5)$$

где  $F(u, v)$  – Фурье-образ исходного изображения, которое подлежит фильтрации. Цель состоит в выборе передаточной функции  $H(u, v)$ , которая осуществляет необходимое преобразование исходного изображения.

Согласно рисунку 20, схема фильтрации изображений в частотной области в общем случае может быть представлена с помощью схемы, представленной ниже

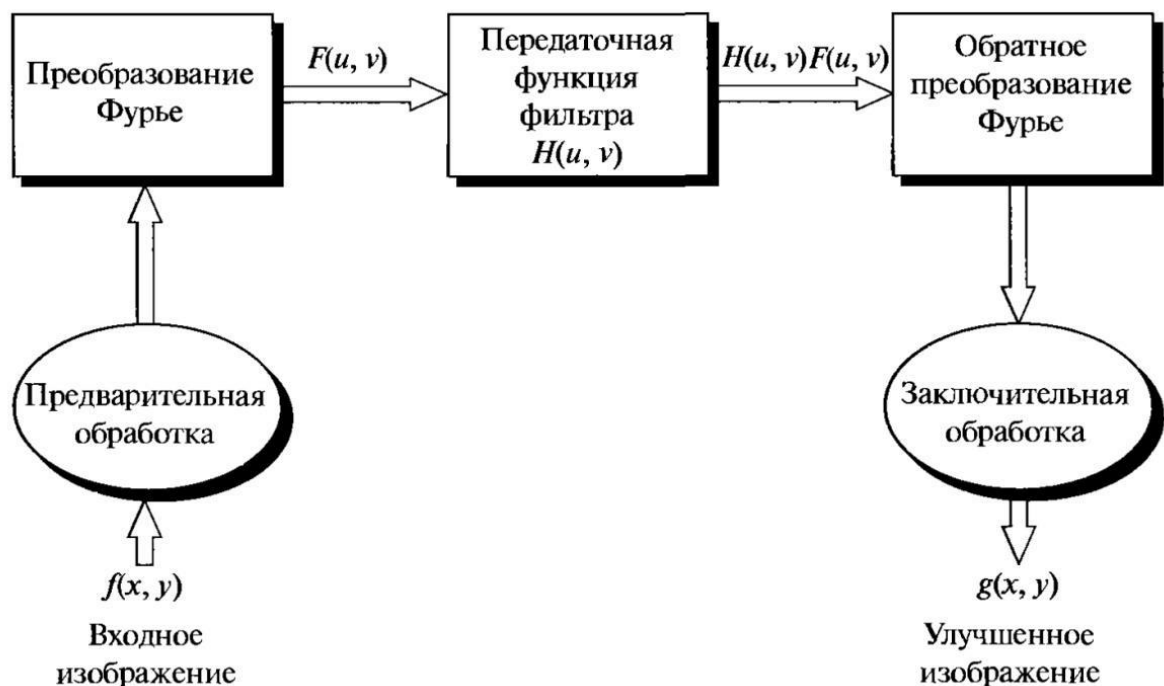


Рисунок 20 – Общая схема процедуры фильтрации изображений в частотной области

Вид передаточной функции  $H(u, v)$  может быть выбран из стандартного набора заданных функций, или определен с помощью двумерного ДПФ от импульсной характеристики пространственной функции,

которые рассматривались в предыдущем разделе. В качестве импульсных характеристик ранее использовались так называемые маски.

Здесь важно отметить, что схема на рисунке 20 справедлива в случае нецентрированного изображения в пространственной области и нецентрированной передаточной функции. Если же передаточная функция фильтра центрированная, то исходное изображение необходимо умножить на центрирующую функцию  $(-1)^{x+y}$ .

### 2.3 Инструменты Matlab для реализации фильтрации

В Matlab для формирования импульсной характеристики двумерного фильтра  $H$  используется функция `fspecial`, которая имеет следующий синтаксис:

```
H = fspecial('type');
```

Возможными значениями параметрами типа фильтра `'type'` являются:

- 'average' усредняющий фильтр;
- 'disk' фильтр кругового усреднения ;
- 'gaussian' гауссов фильтр нижних частот;
- 'laplacian' фильтр Лапласа, аппроксимирующий 2-D оператор Лапласа;
- 'log' лапласиан гауссовского фильтра;
- 'motion' фильтр движения;
- 'prewitt' горизонтальный фильтр с подчеркиванием краев;
- 'sobel' горизонтальный фильтр Собела с подчеркиванием краев;

В качестве примера рассмотрим формирование кругового усредняющего фильтра.

В Matlab для создания шахматной матрицы имеется встроенная функция *checkerboard* (англ. шахматная доска).

`I = checkerboard` создает изображение шахматной доски, состоящее из квадратов, каждая сторона которых имеет по 10 пикселей. Светлые квадраты в левой половине шахматной доски белые. Светлые квадраты в правой половине шахматной доски серые.

`I = checkerboard(N)` создает шахматную доску, в которой каждый квадрат имеет N пикселей на стороне.

`I = checkerboard(N, P, Q)` создает прямоугольную шахматную доску, где P – число строк и Q – число столбцов. Если опустить параметр Q, то по умолчанию шахматная доска будет квадратной размером P x P пикселей.

На рисунке 21 приведен пример создания обычной шахматной доски размером 40 x 40 пикселей, где каждый квадрат имеет размер одного пикселя:

```
K = (checkerboard(1, 40, 40) > 0.5);  
figure; imshow(K);
```

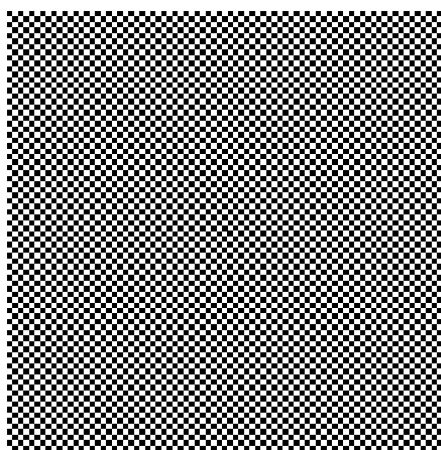


Рисунок 21 – Создание шахматной доски 40 x 40 пикселей

Радиус диска равен 10 точек (пикселей), а размер всего изображения после дополнения нулями 221 x 221 пикселей (число пикселей после дополнения нулями удваивается). Для центрирования изображения в



частотной области используется поэлементное умножение на матрицу СН (имеющую вид шахматного расположения черных и белых пикселей), что равносильно умножению на функцию  $(-1)^{x+y}$ . Для вычисления матрицы СН используется функция `F_chess_2D`, текст которой приведен сразу после программы.

Результаты формирования фильтра в виде изображений в пространственной и частотной областях (результаты выполнения программы) представлены на рисунке 22.

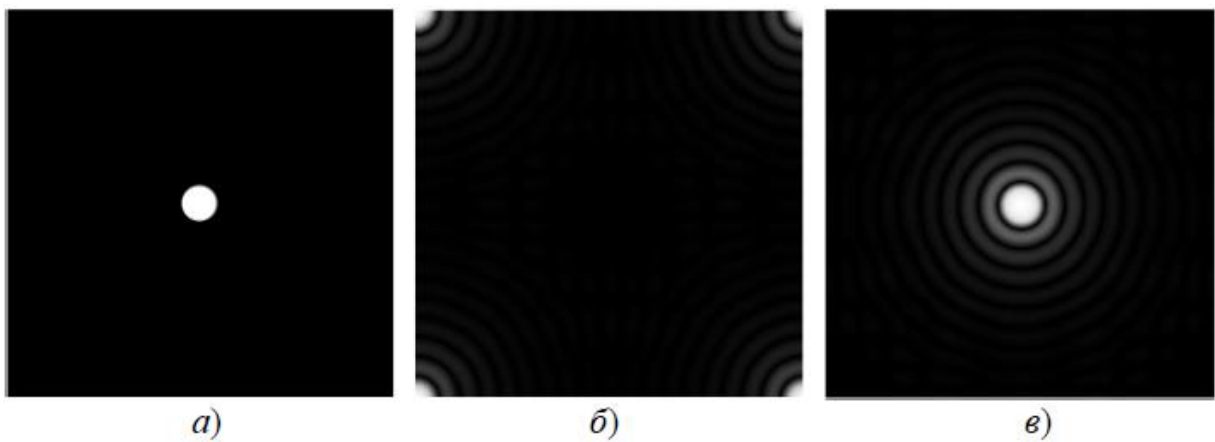


Рисунок 22 – а) ИХ (маска) кругового фильтра; б) частотная характеристика фильтра без центрирования; в) частотная характеристика фильтра с центрированием

Сравнение рисунков 22 б и 22 в наглядно показывает целесообразность центрирования спектра в частотной области для анализа свойств фильтров.

Для проектирования фильтров в частотной области в Matlab используются следующие функции:

Таблица 2 – Функции для проектирования фильтров в частотной области

freqspace	формирует симметричный частотный диапазон, используемый при расчете частотной характеристики фильтра
freqz2	возвращает частотную характеристику КИХ-фильтра по заданной импульсной характеристике и частотному диапазону
fsamp2	формирует двумерную характеристику КИХ-фильтра по заданной частотной характеристике
ftrans2	формирует двумерную импульсную характеристику КИХ- фильтра по заданной одномерной импульсной характеристике
fwind1	создает двумерную ИХ КИХ-фильтра по заданной частотной характеристике с использованием одномерного окна
fwind2	создает двумерную ИХ КИХ-фильтра по заданной частотной характеристике с использованием двумерного окна

Мы будем использовать первые три функции, которые рассмотрим более подробно.

Функция  $[f1, f2] = \text{freqspace}(m, n)$  формирует два одномерных частотных вектора с частотами  $f1$  и  $f2$ , имеющими  $m$  и  $n$  отсчетов соответственно. Если в функции указан еще один параметр, например, 'meshgrid', то это означает, что формируется двумерный вектор-сетка (т.е. двумерная матрица) вида  $[f1, f2]$ .

Результат выполнения программы представлен на рис. 2.4. Нетрудно модифицировать приведенную программу с целью формирования более сложных видов областей – прямоугольных, кольцевых (см. закомментированную строку в программе), составных и т.д.

Расчеты подобных областей можно использовать в качестве ИХ КИХ-фильтров, которые, как будет показано далее, могут быть использованы для вычисления частотных характеристик соответствующих фильтров (Рисунок 23).

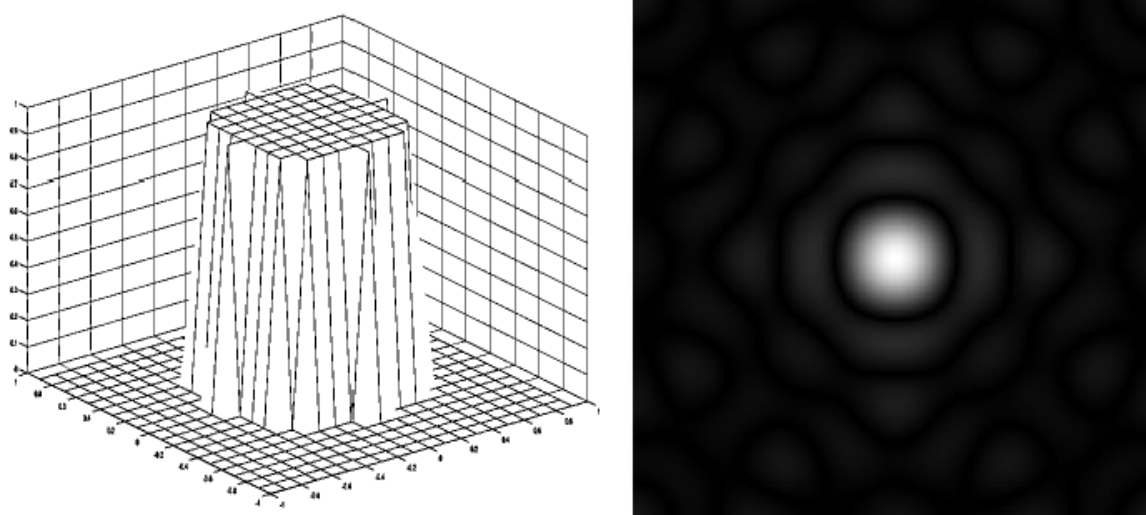


Рисунок 23 – Импульсная характеристика КИХ-фильтра (слева) в виде трехмерного графика и соответствующая ей частотная характеристика фильтра (справа) в виде полутонового изображения

Анализируя рисунок 23, важно отметить, что резкие перепады ИХ в пространственной области приводят к расширению спектра в частотной области. Визуально это выглядит как появление колец (см. рис. 2.4 справа). Аналогичное свойство имеет и обратное действие: резкие перепады частотной характеристики фильтра приводят к волнообразной функции (т.е. появлению таких же колец) для ИХ в пространственной области.

Понимание этого свойства весьма важно при анализе искажений изображений, вызываемых фильтрами различных видов.

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОГРАНИЧЕННОГО НАБОРА ФИЛЬТРОВ**

#### **3.1 Разработка алгоритма для моделирования и фильтрации РСА изображений**

Основная проблема, стоящая при формировании РЛИ изображений – это эффективность их создания. Для создания радиолокационных изображений необходимо большое количество вычислительных ресурсов. По этой причине наиболее распространённый метод съёмки – с использованием специально подготовленных самолётов или спутников (например, Sentinel-1). Однако, учитывая нашу цель реализации данного процесса на более локальных масштабах и меньших мощностях (в частности, на беспилотных летательных аппаратах), необходимо разработать оптимальный вариант фильтрации.

Для этого требуется определить несколько ключевых параметров: угол обзора синтетической апертуры, дальность обзора, а также, что наиболее важно, количество фильтров, необходимых для достаточной обработки изображения. Неправильный выбор количества фильтров может существенно повлиять на качество и эффективность радиолокационных изображений. Если фильтров будет слишком мало, изображение получится неполным и может потерять важные детали. С другой стороны, чрезмерное количество фильтров приведёт к значительным временным затратам на обработку сигнала, что нежелательно в условиях ограниченных ресурсов беспилотных летательных аппаратов.

В данной главе мы рассмотрим методологию оптимизации этих параметров, направленную на обеспечение баланса между качеством получаемых изображений и эффективностью вычислительных затрат. Будет проведён анализ влияния количества фильтров на точность и детализацию

изображений, а также определены критерии для выбора их оптимального числа. Особое внимание будет уделено вопросам минимизации вычислительной нагрузки при сохранении высокого уровня детализации и точности радиолокационных изображений.

С помощью разработанной в рамках данной работы программы, составим изображение, получаемое с помощью синтетической апертуры. Так выглядит совокупность сигналов, полученных с помощью антенны.

В разработанной программе нам необходимо задать ряд переменных, обозначающих параметры радара. Наш смоделированный радар имеет следующие параметры:

Таблица 3 – Параметры радара для моделирования сигналов

Параметр	Значение
Период повторения импульсов	0.000004
Девияция частоты (ширина спектра)	50e+7
Длительность сигнала	1/(50e+7)
Частота дискретизации	5*50e+7
Шаг дискретизации по времени	1/5*50e+7
Время полета (с)	1.5
Высота полета ЛА (м)	100
Скорость ЛА (м/с)	100
Расстояние до центра целевой области (м)	2000
Половина ширины целевой области (м)	200
Ширина ДНА	60

### 3.2 Анализ работы при разном количестве фильтров

Зададим в программе массив координат, точек отражения, которые составляют образ самолета. Координаты представлены в виде элементов массива с тремя параметрами (оси  $Ox$ ,  $Oy$ , и  $Oz$  соответственно, где  $Oz = 0$ ,

так как мы рассматриваем двумерные сцены). Из них и получим изображение, представляющее собой совокупность сигналов, которое будет выглядеть как множество дуг. Полученное изображение имеет большой масштаб, и должным образом увидеть всю картину будет сложно. Поэтому на рисунке 24 приведен фрагмент полученного изображения, на котором содержатся сигналы, полученные непосредственно от объекта (самолета).

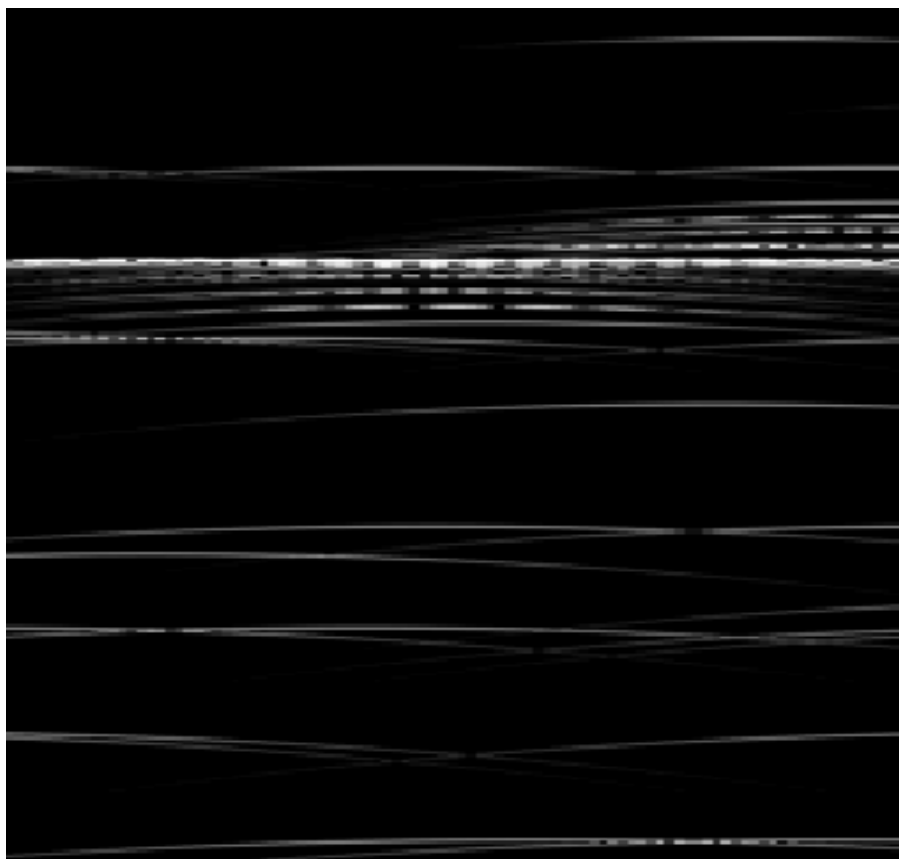


Рисунок 24 — Часть изображения, полученного в результате моделирования сигналов с радара

Проведем свертку и фильтрацию сигнала, получив набор точек, которые и являются готовым радиолокационным изображением.

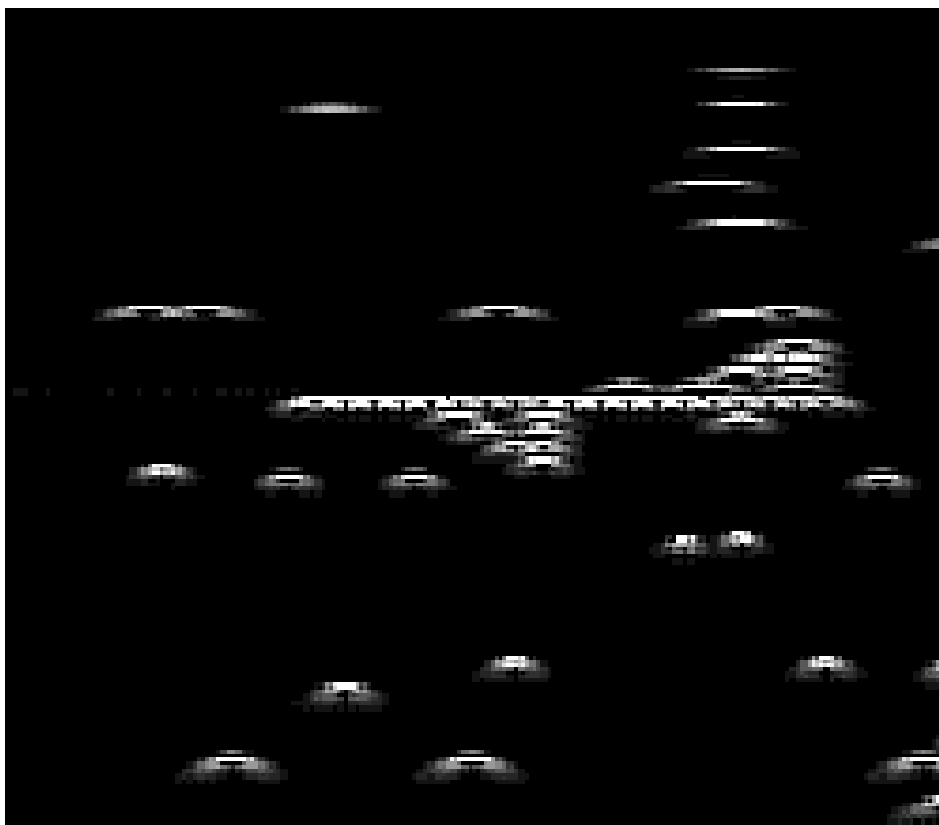


Рисунок 25 — Свёрнутое, отфильтрованное изображение. Получен образ самолета

Чем ближе точка к эталону, тем ярче и точнее она будет свернута. Однако чем больше фильтров мы используем, тем медленнее и ресурсозатратнее процесс становится. Мы будем проверять разное количество фильтров, равномерно распределяемых на один и тот же диапазон. Если же мы не будем соблюдать границы диапазонов, и фильтры будут расставлены на равномерно, то возникнет проблема пересечения фильтров, в результате которой качественная свертка будет накладываться на плохую, что исказит и повлияет на качество конечного изображения. Пример подобного явления представлен на рисунке 26.

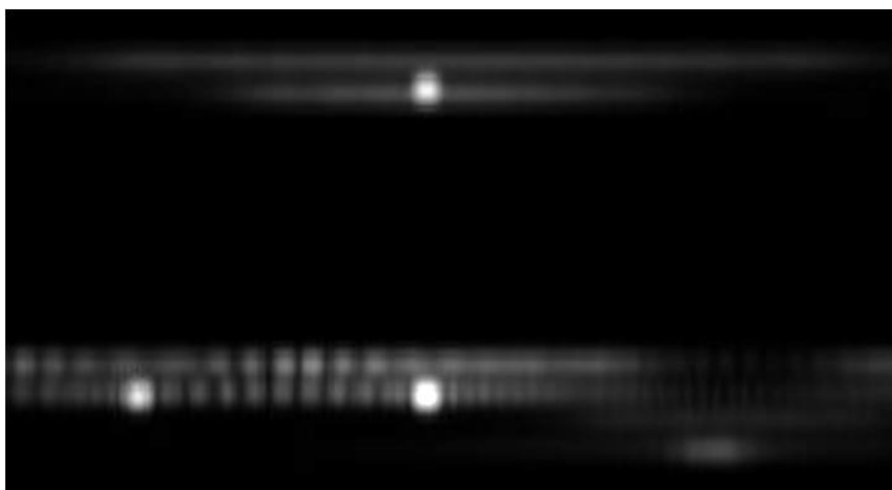
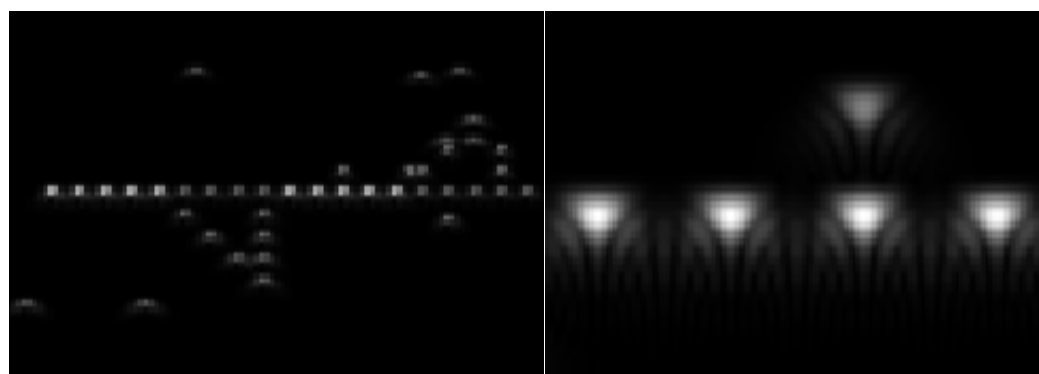


Рисунок 26 — Результат свертки при пересечении фильтров

Диапазон, на котором мы обозреваем точки – 150 метров. Распределим фильтры равномерно по всему диапазону, что бы они полностью его охватывали. Эталонем является сигнал, находящийся на середине полосы диапазона. Теперь же проведем обработку изображения на разном числе фильтров: 10, 3, 1 (весь диапазон). Будем приводить изображение самого самолета, так и приближенное изображение получившихся точек (что бы оценить качество свертки). На рисунках 27, 28 и 29 представлены результаты сверток при соответствующем количестве фильтров.

Проведем обработку при 10 фильтрах (полоски в 15 метров):



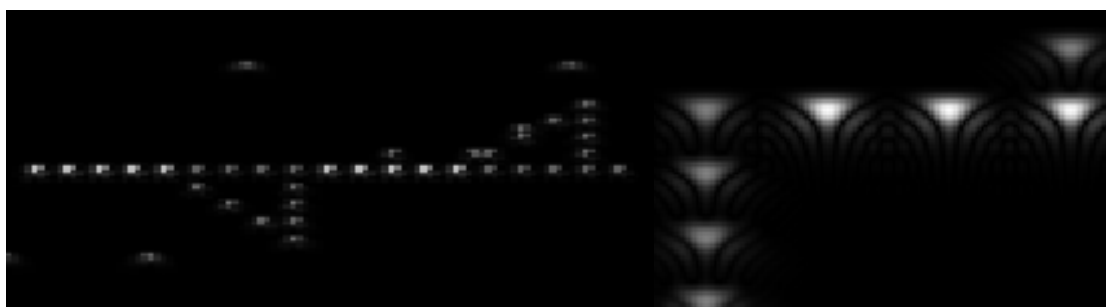
а)

б)

Рисунок 27 – фильтрация сигнала при 10 фильтрах. а) – общий рисунок, б) – изображение точек



Далее проведем обработку при 3 фильтрах (полоски в 50 метров):

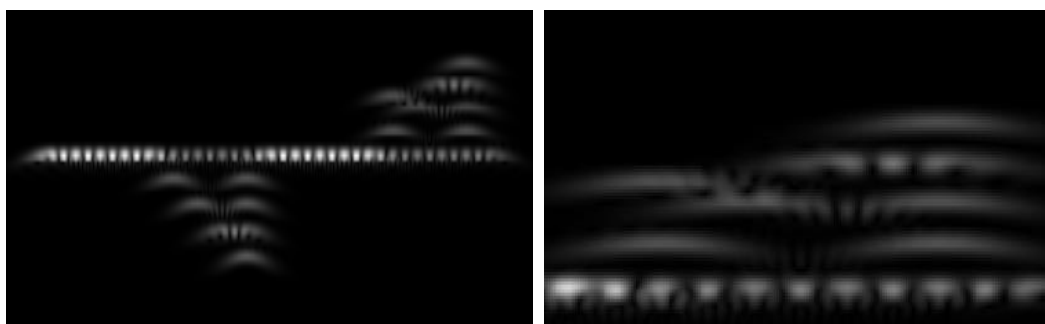


*а)*

*б)*

Рисунок 28 – фильтрация сигнала при 3 фильтрах. а) – общий рисунок, б) – изображение точек

Проведем обработку при одном фильтре (целый диапазон в 150 м)



*а)*

*б)*

Рисунок 29 – фильтрация сигнала при 1 фильтре. а) – общий рисунок, б) – изображение точек

### 3.3 Анализ полученных результатов

Как можно заметить, потеря качества у свертки точек зависит напрямую от удаленность от эталона. Если отраженный сигнал находится в центре полосы (практически совпадает с эталоном), то потеря качества минимальна. Точки начинают плохо сворачиваться при отклонении более чем на 5м, что заметно при свертке с одним фильтром. В данном случае “фюзеляж” самолета располагался практически на эталоне, поэтому при его свертке искажения точек присутствуют, но минимальны, и конечное

изображение все еще остается читаемым. Однако “крылья” и “хвостое оперение” самолета уже начинают размываться, принимая образ дуг, и конечное качество изображения падает. Особенно это будет заметно при более плотных сигналах, где точки будут друг на друга накладываться. Следовательно, оптимальная длина полосы, которая не будет излишней для получения конечного результата – приблизительно 10 метров.

В результате полученных наблюдений можно сказать, что оптимальное количество фильтров позволяют значительно улучшить качество радиолокационных изображений при минимальных затратах ресурсов. Это особенно важно для беспилотных летательных аппаратов, которые обладают ограниченными вычислительными возможностями и ресурсами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках предложенной выпускной квалификационной работы был разработан алгоритм фильтрации радиолокационного сигнала в изображение, называемое радиолокационным. Данный тип съемки имеет множество применений: военная разведка, планирование спасательных операций при проблемной погоде, оценка плотности леса, оценка зрелости урожая, прокладка маршрута для ледоколов, а также для отслеживания изменений сейсмической активности на местности.

Однако в зависимости от целей и области применения, средства для производства такой съемки варьируются, и наиболее распространёнными аппаратами для съемки являются спутники и самолеты. В данной работе был анализирован и разработан вариант для использования на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), принимая во внимание их меньший масштаб обзора, а также более малую допустимую вычислительную мощность, которую эти устройства могут себе позволить. Важным аспектом разработки было обеспечение стабильности работы алгоритма, что особенно критично в условиях ограниченных ресурсов беспилотных летательных аппаратов.

Основу разработанного алгоритма составляет применение двумерной согласованной фильтрации на основе двумерного преобразования Фурье. Основной принцип работы алгоритма заключается в свертке сигнала, полученного с синтетической апертуры, с подобранным эталоном для преобразования его в точку, или “пиксель” конечного изображения. Данный метод позволяет добиться высокой точности и детализации изображения, что является ключевым для успешного применения в указанных областях.

Кроме того, в процессе разработки уделялось внимание оптимизации алгоритма для его эффективного функционирования на беспилотных летательных аппаратах. Это включало минимизацию вычислительных затрат и обеспечение высокой скорости обработки данных. Проведенные испытания

подтвердили работоспособность и эффективность предложенного алгоритма в реальных условиях, что открывает широкие перспективы для его использования в различных сферах, требующих высокоточной радиолокационной съемки.

Дополнительно, проведенные исследования показали, что применение разработанного алгоритма позволяет значительно улучшить качество радиолокационных изображений при меньших затратах на оборудование и обслуживание. Это делает метод более доступным для широкого круга пользователей, включая научные исследовательские организации и коммерческие предприятия. В частности, использование беспилотников с предлагаемым алгоритмом может значительно расширить возможности мониторинга удаленных и труднодоступных территорий, обеспечивая более оперативное и точное получение данных.

Также была проведена оценка надежности и устойчивости алгоритма к помехам и различным неблагоприятным условиям, таким как плохая погода и сложные ландшафтные условия. Результаты показали, что алгоритм обладает высокой устойчивостью и может эффективно функционировать даже в условиях значительных внешних воздействий. Это подчеркивает его потенциальную применимость в различных экстремальных условиях, что является важным для многих сфер, включая военную и спасательную.

В заключение можно сказать, что разработанный алгоритм представляет собой значительный шаг вперед в области радиолокационной съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, предлагая высокую точность, надежность и доступность при сравнительно низких затратах на реализацию. Это открывает новые возможности для применения радиолокационной съемки в самых различных областях, от науки и экологии до обороны и промышленности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. An Introduction to Synthetic Aperture Radar // Capella Space URL: <https://www.capellaspace.com/sar-101-an-introduction-to-synthetic-aperture-radar>. (дата обращения: 15.02.2024).
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - 3-е изд. - М.: Техносфера, 2012. - 1105 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. - 1-е изд. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 770 с.
4. Сойфер В. А. Компьютерная обработка изображений, Часть 2. Методы и алгоритмы // Соросовский образовательный журнал. - 1996. - №3. - С. 110-121.
5. Syntetic Aperture Radar // Science Direct URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/synthetic-aperture-radar> (дата обращения: 23.02.2024).
6. Radar scattering mechanism for iceberg // Research Gate URL: [https://www.researchgate.net/figure/Radar-scattering-mechanisms-for-iceberg-and-its-surrounding-open-water-and-sea-ice\\_fig1\\_320070090](https://www.researchgate.net/figure/Radar-scattering-mechanisms-for-iceberg-and-its-surrounding-open-water-and-sea-ice_fig1_320070090) (дата обращения: 23.02.2024).
7. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.1. РЛС — информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / Под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2006. — 656 с. — ISBN 5-88070-094-1.

8. Кондратенков, Г. С. Радиолокационные станции обзора Земли / Г. С. Кондратенков, В. С. Потехин [и др.]. — М.: Радио и связь, 1983. — 272 с.
9. Антипов, В. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов [и др.]. — М.: Радио и связь, 1988. — 304 с. — ISBN 5-256-00019-5.
10. Сафронов Г.С. Введение в радиоголографию. — М.: Сов. радио, 1973. — 288 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Разработанные алгоритмы

Программа:

```
clear all;close all;

%% Параметры PCA
lamb = 0.1;
t_per = 0.000004;           % период повторения импульсов
dev_F = 50e+7;              % девиация частоты (ширина спектра)
t_imp = 1/dev_F;            % длительность сигнала
phi = 0;                    % начальная фаза сигнала
df = 5*dev_F;               % частота дискретизации
dt = 1/df;                  % шаг дискретизации по времени
T = -t_imp*dt:t_imp;        % сетка времени сигнала
T_per = 0:dt:0.5*t_per-dt;  % сетка времени периода ПИ
t_dur = 1.5;                 % Время полета (с)
t_dur_1 = 1;

h_la = 100;                  % высота полета ЛА
v_la = 100;                  % Скорость ЛА (м/с)
x_c = 2000;                  % Расстояние до центра целевой области (м).
x_c2 = 200;                  % Половина ширины целевой области (м)
teta = 60;                   % ширина ДНА
c = 3e8;                     % скорость света

nT_per = length(T_per);
nS = length(T);

% Define the coordinates of reflection points
C_trg = [
    % Those 10 signals are taken as etalons for 10 filters
    0.75*t_dur_1*v_la, 7.5, 0; %7.5 25
    0.75*t_dur_1*v_la, 24.5, 0; %24.5 75
    0.75*t_dur_1*v_la, 37.5, 0; %37.5 125
    0.75*t_dur_1*v_la, 52.5, 0;
    0.75*t_dur_1*v_la, 67.5, 0;
    0.75*t_dur_1*v_la, 82.5, 0;
    0.75*t_dur_1*v_la, 97.5, 0;
    0.9*t_dur_1*v_la, 112.5, 0;
    0.9*t_dur_1*v_la, 127.5, 0;
    0.9*t_dur_1*v_la, 142.5, 0;
    % Script takes first n signals as etalons for n filters, where n is number of filters
    % (variable flt_num)

    0.45*t_dur_1*v_la, 80, 0; % tail
    0.47*t_dur_1*v_la, 80, 0;
    0.49*t_dur_1*v_la, 80, 0;
    0.51*t_dur_1*v_la, 80, 0;
    0.53*t_dur_1*v_la, 80, 0; % start of wings
    0.55*t_dur_1*v_la, 82, 0;
    0.57*t_dur_1*v_la, 84, 0;
    0.59*t_dur_1*v_la, 86, 0;
    0.61*t_dur_1*v_la, 88, 0; % end of wings
    0.61*t_dur_1*v_la, 86, 0;
    0.61*t_dur_1*v_la, 84, 0;
    0.61*t_dur_1*v_la, 82, 0;
    0.63*t_dur_1*v_la, 80, 0; % body
    0.65*t_dur_1*v_la, 80, 0;
```

```

0.67*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.69*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.71*t_dur_1*v_la, 80, 0; % start of wings
0.73*t_dur_1*v_la, 78, 0;
0.75*t_dur_1*v_la, 76, 0;
0.77*t_dur_1*v_la, 74, 0;
0.79*t_dur_1*v_la, 72, 0; % end of wings
0.79*t_dur_1*v_la, 74, 0;
0.79*t_dur_1*v_la, 76, 0;
0.79*t_dur_1*v_la, 78, 0;
0.81*t_dur_1*v_la, 80, 0; % nose
0.79*t_dur_1*v_la, 80, 0; % closing the shape
0.77*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.75*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.73*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.71*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.69*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.67*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.65*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.63*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.61*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.59*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.57*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.55*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.53*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.51*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.49*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.47*t_dur_1*v_la, 80, 0;
0.45*t_dur_1*v_la, 80, 0; % back to tail

0.12*t_dur_1*v_la, 145, 0;
0.78*t_dur_1*v_la, 67, 0;
0.34*t_dur_1*v_la, 89, 0;
0.56*t_dur_1*v_la, 123, 0;
0.91*t_dur_1*v_la, 56, 0;
0.67*t_dur_1*v_la, 78, 0;
0.29*t_dur_1*v_la, 134, 0;
0.85*t_dur_1*v_la, 90, 0;
0.47*t_dur_1*v_la, 115, 0;
0.73*t_dur_1*v_la, 45, 0;
0.58*t_dur_1*v_la, 67, 0;
0.39*t_dur_1*v_la, 123, 0;
0.96*t_dur_1*v_la, 78, 0;
0.52*t_dur_1*v_la, 90, 0;
0.81*t_dur_1*v_la, 112, 0;
0.63*t_dur_1*v_la, 145, 0;
0.37*t_dur_1*v_la, 67, 0;
0.94*t_dur_1*v_la, 123, 0;
0.51*t_dur_1*v_la, 149, 0;
0.72*t_dur_1*v_la, 78, 0;
0.86*t_dur_1*v_la, 134, 0;
0.43*t_dur_1*v_la, 90, 0;
0.59*t_dur_1*v_la, 112, 0;
0.77*t_dur_1*v_la, 145, 0;
0.33*t_dur_1*v_la, 67, 0;
0.88*t_dur_1*v_la, 123, 0;
0.46*t_dur_1*v_la, 26, 0;
0.71*t_dur_1*v_la, 98, 0;
0.35*t_dur_1*v_la, 134, 0;
0.92*t_dur_1*v_la, 120, 0;

```



```

];

flt_num = 10; % Number of filters in range [0;150] ( etalons in C_trg must be
corrected according to number of filters)
% If not corrected, filtering will give wrong result

% Basic parameters
dx = 0.05;
dr = 3e8*dt*0.5;
nx = round(t_dur*v_la/dx);
ny = nT_per;

X_la = 0:dx:dx*(nx-1);
C_la = zeros(1, 3);
C_la(2) = 0;
C_la(3) = h_la;

% Initialize etalon signals and Sig_Trek
Sig_Etal = cell(1,flt_num); %
Sig_Trek = cell(1,flt_num); %
for i=1:flt_num %
    Sig_Etal{i} = [];
    Sig_Trek{i} = zeros(ny, nx);
end

% Initialize categorization lists
C_dist = cell(1,flt_num); %
for i=1:flt_num
    C_dist{i} = [];
end

% Categorize signals and apply to corresponding etalons
for trg_idx = 1:size(C_trg, 1)
    x0 = C_trg(trg_idx, 1);
    y0 = C_trg(trg_idx, 2);
    C_trg_single = [x0, y0, 0];

    % Categorize based on distance
    if y0 >= 1 && y0 <= 150
        dist_cat = ceil(y0 / (150 / flt_num)); %<- 150 / number of filters
    else
        dist_cat = 0;

    end
    C_dist{dist_cat} = [C_dist{dist_cat}; trg_idx];

    % Loop through each
    indx_1 = 0;
    for ix = 1:nx
        C_la(1) = (ix - 1) * dx;
        r_trg = norm(C_trg_single - C_la);
        alf = atand(abs((C_la(1) - C_trg_single(1)))) / C_trg_single(2));
        ku = exp(-0.7 * (2 * alf / 30)^2)^4;
        t_zad = 2 * r_trg / 3e8;
        phi = (4 * pi / lamb) * r_trg;
        ST = F_Insert_Signal(t_zad,T_per,dt,dev_F,ku,phi);

        % Add to corresponding Sig_Trek
        Sig_Trek{dist_cat}(:,ix) = Sig_Trek{dist_cat}(:,ix) + ST';
    end
end

```

```

        % Add to corresponding Sig_Etal
        if ku > 0.1
            indx_1 = indx_1 + 1;
            ST = F_Insert_Signal(t_zad/20,T_per,dt,dev_F,ku,phi);
            nST = length(ST);
            n0 = round(nST/20);
            Sig_Etal{dist_cat}(1:n0,indx_1) = ST(1:n0)';
        end
    end
end

% Display Sig_Trek
for i=1:flt_num %
    figure(i+1); imshow(abs(Sig_Trek{i}),[]);
end

Combined_Signal = zeros(ny, nx);

% Filter each Sig_Trek and add to Combined_Signal
for i=1:flt_num %
    Sig_Etalon = Sig_Etal{i};
    figure(3); imshow(abs(Sig_Etalon),[]);

    A = Sig_Etalon;
    A = A / max(abs(A(:)));
    A = imrotate(A,180);
    A = conj(A);
    [mB, nB] = size(A);
    C1 = [A zeros(mB, nx-nB)];
    C2 = [C1; zeros(ny-mB, nx)];
    FS = fft2(Sig_Trek{i});
    FC = fft2(C2);
    FH = FS.* FC;
    H = ifft2(FH);

    Combined_Signal = Combined_Signal + H;
end

% Display the final result for the combined signal
figure(50); imshow(abs(Combined_Signal),[]);
title('Final Combined Filter Result');

```

## Программа 2:

```

function ST = F_Insert_Signal(t_zad,T_per,dt,dev_F,ampl,phi)
%% Программа вставки эталонной функции отклика цели (ФОЦ)
% в период повторения импульсов (ППИ) с заданным временем запаздывания.
% ФОЦ - функция sinc(), соответствует комплексной АКФ ЛЧМ сигнала.
% Важно! Вставка сигнала выполняется с учетом дискретности оцифровки,
% т.е. момент появления сигнала м.б. расположен между
% дискретными отсчетами времени.
% t_zad - время задержки сигнала (с)
% T_per - сетка времени одного ППИ
% dt - шаг дискретизации по времени (с)
% dev_F - ширина спектра сигнала (Гц)
% phi - начальная фаза сигнала (рад)
%
% ST - отсчеты в одном ППИ

```

```

t_imp = 1/dev_F;          % длительность сигнала
T      = -t_imp:dt:t_imp; % сетка времени сигнала
nS      = length(T);
%% Вставка сигнала в период ПИ
nT_per = length(T_per);
n_zad  = floor(t_zad/dt);
dt_zad = t_zad - n_zad*dt;
S      = sinc(dev_F.*(T-dt_zad)).*exp(-1i*(pi*dev_F.*(T-dt_zad)+phi));% АКФ
S      = S.*exp(-((1.2/t_imp)*(T-dt_zad)).^2); % весовое окно
ST      = zeros(1,nT_per);
nS2      = floor(nS/2);
n1      = n_zad - nS2;
n2      = n_zad + nS2;
if (n1 > 1) && (n2 <= nT_per)
    ST(n_zad-nS2:n_zad+nS2) = ampl*S;
end

end

```