

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ,
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ)**

Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
Кафедра космического приборостроения

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Разработка алгоритмов автоматического контроля
и анализа качества синтеза радиолокационного
изображения

Автор:
Студент 4-го курса
Рязанов Данила Сергеевич

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Мордвинов Александр Евгеньевич



Москва 2025

Оглавление

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Введение | 3 |
| 1.1 Вступление | 3 |
| 1.2 Термины и определения | 4 |
| 1.3 Перечень сокращений и обозначений | 4 |
| 2 Постановка задачи | 5 |
| 3 Обзор существующих решений | 8 |
| 3.1 Открытое программное обеспечение для работы с РЛИ уровня SLC | 8 |
| 3.1.1 SNAP | 9 |
| 3.1.2 SARscape | 9 |
| 3.1.3 GMTSAR | 9 |
| 3.1.4 ISCE2 | 9 |
| 3.1.5 DORIS | 10 |
| 3.1.6 SARPROZ | 10 |
| 3.1.7 StaMPS/MTI | 10 |
| 3.1.8 Kite | 10 |
| 3.1.9 sarpy | 10 |
| 3.1.10 ROI_PAC | 11 |
| 3.1.11 pygmtsar | 11 |
| 3.1.12 Xarray-Sentinel | 11 |
| 3.1.13 Sarsen | 11 |
| 3.1.14 pyroSAR | 11 |
| 3.1.15 S1_NRB | 11 |
| 3.1.16 ALUs | 11 |
| 3.2 Выводы | 11 |
| 4 Исследование и построение решения задачи | 12 |
| 4.1 Показатели качества РЛИ | 12 |
| 4.2 Модель формирования псевдоточечных целей | 13 |
| 4.3 Алгоритм поиска псевдоточечных целей на РЛИ | 16 |
| 4.3.1 Выделение информативных участков изображения | 16 |
| 4.3.2 Свёрточная матрица на основе автокорреляционной функции изображения | 17 |
| 4.4 Алгоритм анализа отклика от псевдоточечных целей | 18 |
| 4.4.1 Алгоритм поиска псевдоточечных целей | 19 |
| 4.5 Алгоритм автоматического поиска и анализа псевдоточечных целей . . | 19 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5 Описание практической части | 23 |
| 5.1 Калибровка алгоритма | 23 |
| 5.2 Верификация алгоритма | 23 |
| 5.3 Валидация алгоритма | 23 |
| 6 Заключение | 25 |
| Приложение | 27 |
| 6.1 Математическое обоснование связи дифракции и отклика точечных целей в радиолокации | 27 |
| 6.1.1 Дифракция Фраунгофера | 27 |
| 6.1.2 Дифракция в РСА | 27 |
| 6.1.3 Заключение | 28 |

Глава 1

Введение

1.1 Вступление

В настоящее время радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) используются для решения различных задач по мониторингу поверхности Земли. В отличие от оптической съемки, РСА обеспечивает всепогодное круглосуточное наблюдение за земной поверхностью [1]. В процессе работы радиолокатора выполняется периодическое излучение зондирующего импульса. В интервалах между стробами излучения выполняется запись отраженного от поверхности Земли сигнала, на основе которого формируется радиоголограмма [1]. При помощи алгоритмов синтеза из записанной радиоголограммы формируется радиолокационное изображение (РЛИ).

Потребность в оперативной оценке качества РЛИ возникает как у конечных потребителей, так и у разработчиков. Ввиду наличия разных дестабилизирующих факторов – неоднозначности сигнала, нелинейности тракта, аппаратурных нестабильностей, погрешностей траекторных отклонений, качество РЛИ сильно ухудшается. При наличии неисправностей в сквозном тракте можно выполнить корреляционный анализ и на этапе постобработки программно их исправить.

Согласно мировой практике для оценки качества РЛИ проводят съемку полигонов, оборудованных измерительными мирами из угловых отражателей или используют транспондеры. Для космических РСА периодичность съемки, зависящая от параметров орбиты и реализуемой полосы обзора, обычно составляет несколько суток. Поэтому для достижения оперативности в калибровке и верификации снимков необходимо иметь средства оценки качества РЛИ непосредственно по материалам текущей съемки.

Актуальность данной работы заключается в следующем:

1. Необходимость подтверждения качества РЛИ в отсутствие априорной информации о снимаемой сцене и отсутствие калибровочных целей (угловых отражателей, транспондеров). В особенности РЛИ, полученные с самолетных РСА требуют постоянного контроля вследствие большого влияния траекторных искажений.

2. Также данная работа может использоваться для оценки качества работы алгоритмов синтеза в различных исследовательских задачах.

Таким образом, целью данной работы является разработка алгоритмов для оценки качества синтеза РЛИ по материалам текущей съемки в отсутствие априорной информации о снимаемой сцене.

1.2 Термины и определения

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Радиолокационное зондирование - наблюдение объектов в радиодиапазоне волн с детальностью оптических систем. В отличие от оптических систем системы радиовидения дают возможность получать изображения объектов независимо от метеоусловий и естественной освещенности, на значительном удалении и одновременно в широкой зоне обзора, в том числе объектов, невидимых в оптическом диапазоне волн

Синтезированная апертура - метод получения высокого разрешения по углу при малых размерах антенны путём запоминания отраженного от объекта электромагнитного поля

Точечный отражатель - одиничный, изолированный рассеиватель

Псевдоточечная цель - объекты, которые не являются одиничными, изолированным рассеивателями, но при этом сохраняют дифракционный отклик

1.3 Перечень сокращений и обозначений

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

РЛИ - радиолокационное изображение

РСА - радиолокатор с синтезированной апертурой

РЛС - радиолокационные системы

ФРТ - функция рассеяния точки

АКФ - автокорреляционная функция

Глава 2

Постановка задачи

Согласно мировым стандартам, качество РЛИ измеряется по отклику от угловых отражателей или от транспондеров. Данные калибровочные объекты ещё называют точечными целями, то есть одиночными, изолированными рассеивателями. Пример такого отклика представлен на рисунке 2.1.

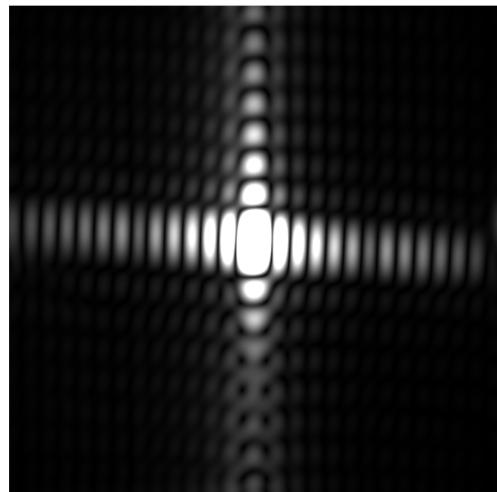


Рис. 2.1: Отклик углкового отражателя

Если мы рассчитаем волновой параметр для радиолокатора $p = \frac{\sqrt{\lambda z}}{b}$, где λ - длина волны, z - наклонная дальность, b - линейный размер антенны, то он окажется намного большим 1. Это означает, что мы находимся в области дифракции Фраунгофера. Действительно, если сравнить дифракционную картину Фраунгофера на прямоугольной щели [2](рисунок 2.2), с изображением отклика от точечной цели (рисунок 2.1), то можно предположить, что механизм формирования отклика от углкового отражателя схож с механизмом формирования дифракции, что по сути является проявлением волновой природы света.

Таким образом, можно предположить, что дифракция может происходить не только на угловых отражателях, но и на других искусственных объектах. Действительно, если взглянуть на РЛИ зданий или кораблей на рисунке 2.3, то можно в этом убедиться.

Проблема дифракции на произвольных искусственных объектах заключается в том, что они не являются одиночными, изолированными рассеивателями, то есть не

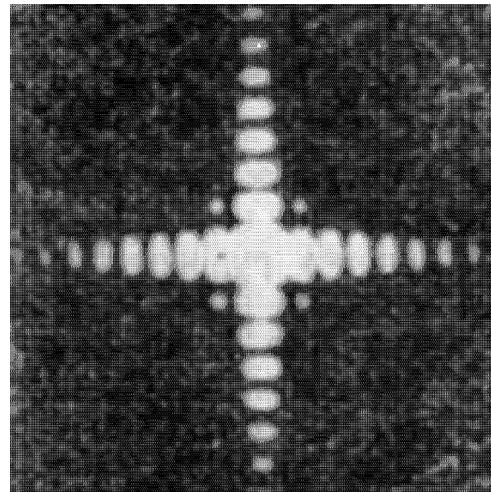


Рис. 2.2: Дифракция Фраунгофера на прямоугольной щели

являются точечным целями. По умолчанию отклик от таких объектов будет суммой откликов от точечных целей. И ввиду ограниченной разрешающей способности радиолокатора они будут сливаться в единую дифракционную картину. Такие объекты, для которых нельзя с полной уверенностью сказать, что они являются одиночными, изолированным рассеивателями, но в тоже время сохраняют дифракционную картину, в данной работе будут называться псевдоточечными целями.

Исходя из цели исследования задача данной работы сводится к разработке алгоритма автоматического контроля качества синтеза РЛИ, используя метод анализа отклика от псевдоточечных целей, при отсутствии априорной информации о снимаемой сцене. Эффективность разработанного алгоритма будет определяться тем, насколько полученные значения будут отличаться от значений, полученных с помощью точечных целей.

Таким образом задачи формулируются следующим образом:

1. Разработать алгоритм автоматического поиска псевдоточечных целей на РЛИ
2. Разработать алгоритм анализа отклика от псевдоточечных целей

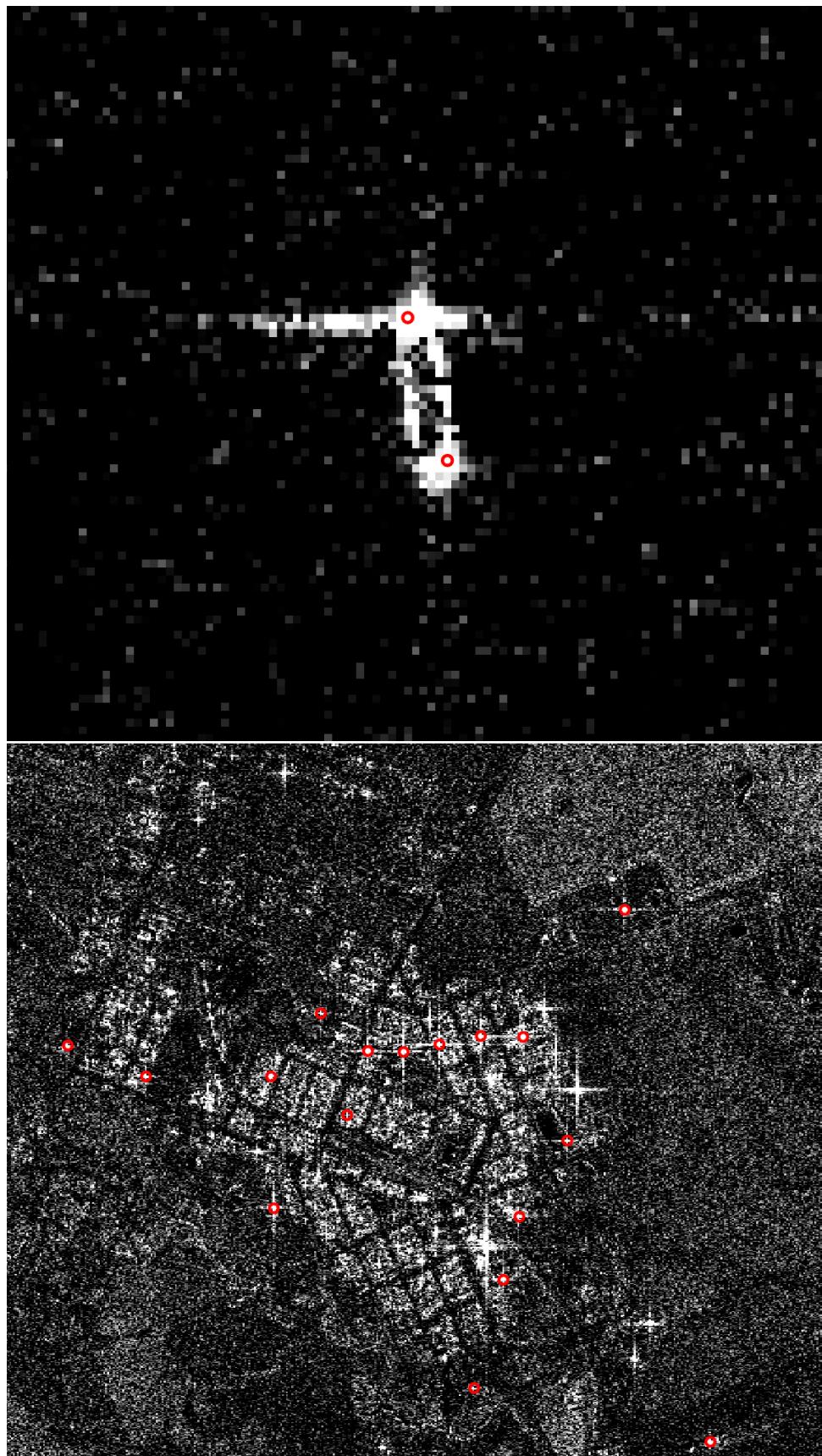


Рис. 2.3: РЛИ корабля и зданий

Глава 3

Обзор существующих решений

Основным критерием поиска подходящего программного обеспечения является его возможность работать с уровнем синтеза L1, то есть Single Look Complex (SLC). Данное требование является следствием того, что в процессе постобработки геометрические и частотные характеристики изображения меняются. Ниже приведен список приложений для работы с SLC:

3.1 Открытое программное обеспечение для работы с РЛИ уровня SLC

1. **SNAP** - Универсальная платформа ESA для обработки данных спутников Sentinel (включая SAR).
2. **SARscape** - Коммерческий пакет для комплексной обработки радарных данных (InSAR, PSI, DInSAR).
3. **GMTSAR** - Бесплатный инструмент для InSAR-анализа, интегрированный с Generic Mapping Tools (GMT).
4. **ISCE2** - Гибкая среда для обработки InSAR-данных (разработана NASA/JPL).
5. **Doris** - Программное обеспечение для радарной интерферометрии (разработано в TU Delft).
6. **SARPROZ** - Инструмент с GUI для обработки SAR (InSAR, PSI, SBAS).
7. **StAMPS/MTI** - Методология для анализа Persistent Scatterers (PSInSAR).
8. **kite** - Инструмент для обработки смещений поверхности (использует квадрантные деревья). Загрузка данных из различных центров обработки данных.
9. **sarpy** - Python-библиотека для работы с SAR-данными (поддержка стандарта NGA SIC).
10. **ROI_PAC** - Программа для InSAR-обработки (разработана JPL/Caltech).
11. **pygmtsar** - python-обёртка для GMTSAR, упрощающая обработку данных.
12. **Xarray-Sentinel** - Инструмент для удобной работы с данными Sentinel-1 через xarray.
13. **Sarsen** - Алгоритмы для геометрической и радиометрической коррекции SAR-данных с учетом рельефа местности.
14. **pyroSAR** - Python-фреймворк для масштабной обработки SAR-данных.
15. **S1_NRB** - Процессор для нормализованного обратного рассеяния Sentinel-1.
16. **ALUs** - Высокопроизводительные GPU-ускорители для обработки когерентности и обратного рассеяния.

3.1.1 SNAP

Бесплатная платформа от ESA с графическим интерфейсом для обработки данных Sentinel-1/2/3, поддерживающая полный цикл обработки SAR-данных: калибровку, интерферометрию (InSAR), поляриметрический анализ (PolSAR) и генерацию продуктов. Обладает модульной архитектурой, интегрируется с GPT для пакетной обработки, но требовательна к ресурсам и имеет сложный интерфейс для новичков.

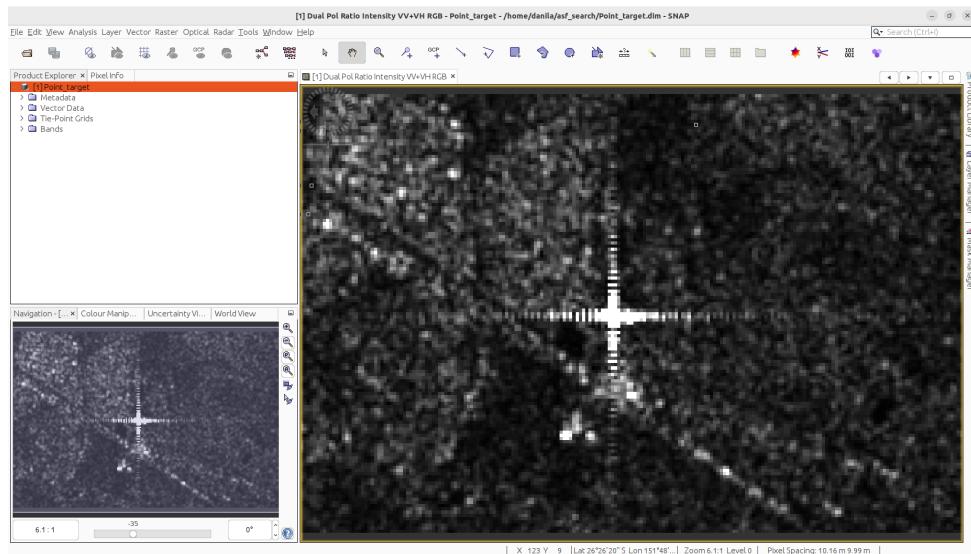


Рис. 3.1: SNAP

3.1.2 SARscape

Коммерческий пакет для ENVI, предлагающий продвинутые алгоритмы обработки радиолокационных данных (InSAR, PSI, SBAS, DInSAR) с поддержкой TerraSAR-X, COSMO-SkyMed и других коммерческих спутников. Отличается высокой автоматизацией, точностью и удобным интерфейсом, но требует дорогих лицензий и не поддерживает кастомизацию кода.

3.1.3 GMTSAR

Бесплатный набор скриптов для обработки InSAR, работающий в связке с Generic Mapping Tools (GMT). Поддерживает Sentinel-1, ALOS и другие данные, позволяет создавать интерферограммы и карты деформаций. Гибкий и мощный инструмент, но требует навыков командной строки и ручной настройки параметров.

3.1.4 ISCE2

Научная среда от NASA/JPL для обработки InSAR с открытым исходным кодом, оптимизированная для работы с данными UAVSAR и будущей миссии NISAR. Поддерживает сложные методы (Split-Spectrum, топографическую коррекцию), но сложна в установке и ориентирована на разработчиков.

3.1.5 DORIS

Классическое ПО для радарной интерферометрии, разработанное в TU Delft. Бесплатное, но с устаревшим интерфейсом, подходит для обучения основам InSAR, однако уступает современным аналогам в скорости и функционале.

3.1.6 SARPROZ

Коммерческий инструмент с графическим интерфейсом для анализа деформаций (PSI, SBAS) и 3D-визуализации. Удобен для инженерных задач, но ограничен по сравнению с SARscape и требует покупки лицензии.

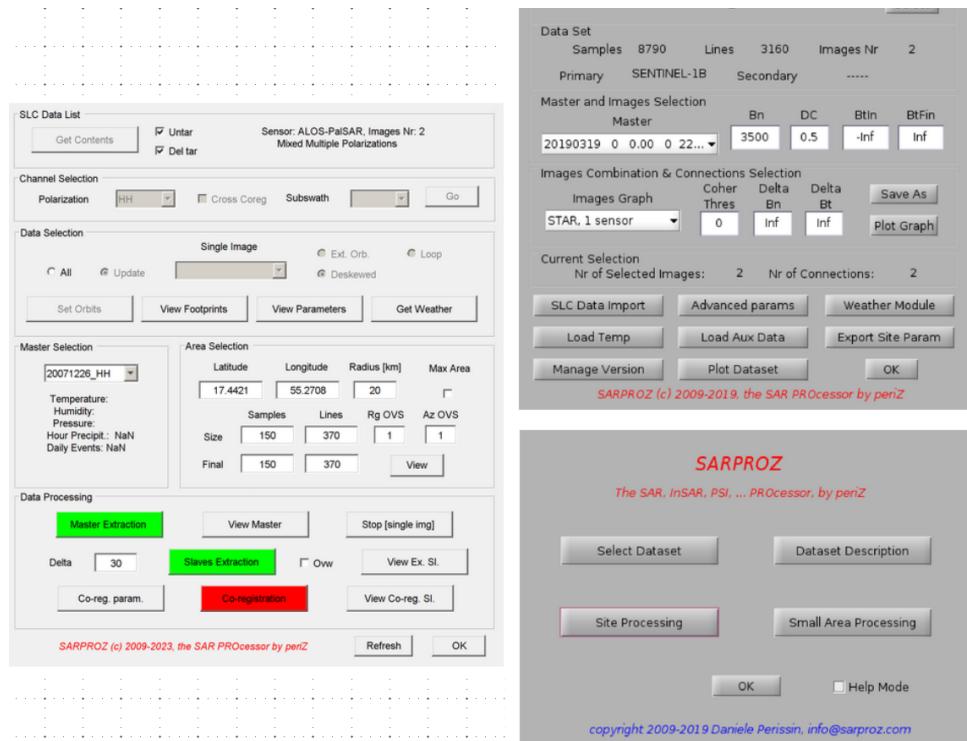


Рис. 3.2: SARPROZ

3.1.7 StaMPS/MTI

Бесплатный пакет MATLAB-скриптов от Стэнфорда для Persistent Scatterer InSAR (PSI), эффективный для мониторинга городских деформаций. Не имеет GUI и требует знания MATLAB, что ограничивает его применение.

3.1.8 Kite

Python-библиотека для квадрантной подвыборки и моделирования смещений из InSAR-данных. Полезна для анализа больших наборов данных, но узкоспециализирована и требует интеграции с другими инструментами.

3.1.9 sarpy

Python-библиотека для чтения и обработки SAR-данных по стандарту NGA SIC. Проста в использовании, но охватывает только базовые операции и не заменяет полноценные InSAR-решения.

3.1.10 ROI_PAC

Устаревший, но проверенный инструмент от JPL для обработки InSAR, поддерживающий данные ERS и Envisat. Используется в академических проектах, но практически не обновляется.

3.1.11 pygmtsar

Python-обёртка для GMTSAR, упрощающая автоматизацию обработки InSAR. Совмещает гибкость GMTSAR с удобством Python, но зависит от его ограничений.

3.1.12 Xarray-Sentinel

Библиотека для удобной работы с данными Sentinel-1 через xarray. Полезна для предобработки, но не включает алгоритмы интерферометрии.

3.1.13 Sarsen

Инструмент для геометрической и радиометрической коррекции SAR-данных с учётом рельефа. Полезен для улучшения точности, но не заменяет полноценные InSAR-пакеты.

3.1.14 pyroSAR

Python-фреймворк для масштабной обработки SAR-данных с поддержкой параллельных вычислений. Мощный, но требует программирования и не имеет GUI.

3.1.15 S1_NRB

Прототип процессора для нормализованного обратного рассеяния Sentinel-1. Экспериментальный инструмент, полезный для радиометрического анализа.

3.1.16 ALUs

Набор GPU-ускорителей для быстрого расчёта когерентности и обратного рассеяния. Обеспечивает высокую производительность, но требует специализированного оборудования.

3.2 Выводы

Все представленные выше программы не имеют возможности оценки пространственного разрешения РЛИ. Исключение составляет Radar Tools (RAT), но данное приложение написано на языке Interactive Data Language (IDL), лцензию на который невозможно получить из России. Также существует платформа SARvis, упомянутое в статье [3], в котором также присутствуют инструменты для определения разрешений РЛИ. Но найти данное приложение в открытом доступе не удалось.

Глава 4

Исследование и построение решения задачи

4.1 Показатели качества РЛИ

Важным показателем качества синтеза РЛИ является пространственное разрешение, которое характеризует наименьшее расстояние для раздельного воспроизведения изображения двух точечных объектов. При разнесении точек в пространстве посередине между ними в изображении возникает локальный минимум интенсивности (провал). Разрешение определяется величиной наименьшего расстояния, на котором достоверно обнаруживается этот провал [4]:

$$\Delta y = k_p * R_g,$$

где Δy - расстояние между точечными объектами (линейное разрешение), k_p - коэффициент ухудшения разрешения относительно идеального, R_g - предельная разрешающая способность РСА. Данное расстояние зависит от контраста наблюдаемого объекта, отношения сигнал-шум и ошибок информационного тракта. Целью синтеза РЛИ является сделать пространственное разрешение равным предельной разрешающей способности РСА.

Общепринятым подходом для оценки разрешения РЛИ является измерение ширины профиля квадрата функции рассеяния точки (ФРТ) по уровню -3 дБ в направлениях азимута и дальности. Также существуют и другие методы, такие как измерение пространственного разрешения по автокорреляционной функции изображения [1], оценка разрешения по протяженным линейным объектам [1], использование элементов алгоритма PGA [1]. Также в [4] предложено измерять разрешение по периодическим структурам.

Преимуществом анализа ФРТ является то, что помимо разрешения, с помощью него можно вычислить и другие параметры РЛИ, такие как контраст, отношение сигнал/шум и др. Так как радиолокационные системы (РЛС) являются линейными [5], то есть вид их передаточных функций не зависит от величины входного воздействия, то естественно исследовать ФРТ как отклик от единичного импульса, который формируется тест объектом. В РСА таким тест объектом является одиночный, изолированный рассеиватель, такой как уголковый отражатель. Особенность его заключается в том, что падающий на него зондирующий импульс отражается точно в противоположном направлении. Такой малый, дискретный рассеиватель ещё называют точечной целью. Большинство параметров РЛС измеряются по отклику от такой цели. Откликом точечной цели или функцией рассеяния амплитуды является sinc-like функция [6].

$$\Phi_\delta(\zeta) = \frac{\sin(\zeta)}{\zeta}, \quad (4.1)$$

где $\zeta = \frac{\pi y}{R_a}$, y - пространственная координата, R_a - расстояние когерентности.

Стоит отметить, что приближение (4.1) работает в том случае, если ширина временного диапазона зондирующего импульса достаточно велика и его спектр близок к премоугольному [7]. ФРТ же в свою очередь является квадратом ФРА:

$$\text{ФРТ}(\zeta) = |(\Phi_\delta(\zeta)|^2$$

Идея данной работы заключается в использовании в качестве тест объектов псевдоточечные цели, то есть цели, для которых заранее известно, являются ли они одиночными, изолированными, то есть точечными. При большой выборке данных целей (100 - 1000 штук), в ней могут оказаться как точечные, так и неточечные. Соответственно профиль функции рассеяния псевдоточечной цели будет шире чем профиль ФРТ, так как функция рассеяния псевдоточечной цели будет суммой ФРТ, сдвинутых друг относительно друга на $\delta x < \Delta y$.

Далее рассмотрим механизм формирования отклика от псевдоточечной цели. Логично, предположить, что данный отклик будет суммой откликов от точечных целей, раз мы считаем точечную цель неделимой, единичной структурой.

4.2 Модель формирования псевдоточечных целей

Точечные цели образуют псевдоточечные цели, если они расположены на расстоянии меньше разрешающей способности радиолокатора. Возьмём точечные цели с разрешением 0.8838 м и расположим случайным образом на фиксированной сцене. Геометрия получившейся модели показана на рисунке 4.1.

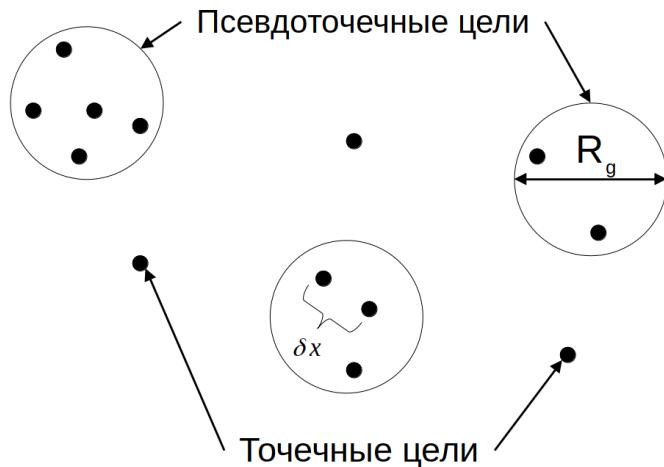


Рис. 4.1: Модель формирования псевдоточечных целей

Те точечные цели, что попали в круг радиуса R_g (разрешающей способности радиолокатора), образует единый отклик псевдоточечной цели. Сгенерируем случайным образом отклонения δx и количество попавших в круг целей и рассчитаем разрешения получившихся псевдоточечных целей. После этого найдем максимум распределения. Код модели, реализованный на языке Python 3 представлен ниже.

4.2. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ СПЕЦИФИКАЦИИ ЗАДАЧИ

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.signal import find_peaks
from scipy.signal import peak_widths

def point_target(x, a):
    """
    Вычисляет квадрат отклика точечной цели
    :param x: массив действительных чисел, числовая ось
    :param a: параметр, отвечающий за разрешение
    :return: массив отклика точечной цели
    """
    arg = np.pi*x/a
    return pow(np.sin(arg)/arg, 2)

def irw(signal):
    """
    Вычисляет IRW (impulse response width) входного сигнала
    :param signal: массив действительных чисел, функция вида sin(x)/x
    :return: значение IRW сигнала
    """
    # Находим локальные максимумы
    peaks = find_peaks(signal)[0]
    # Мерим их ширину на высоте 1/sqrt(2)
    width = peak_widths(signal, peaks, rel_height=1 - pow(10, -0.3))[0]
    # Отбираем максимальную ширину - ширину главного лепестка
    irw = np.max(width)
    return irw

def max_distr(arr):
    """
    Вычисляет максимум распределения массива arr
    :param arr: массив действительных чисел
    :return: максимум распределения
    """
    arr.sort()
    while len(arr) > 1:
        border = (arr[0] + arr[-1])/2
        if all([x == border for x in arr]):
            break
        left = []
        right = []
        for item in arr:
            if item < border:
                left.append(item)
            else:
                right.append(item)
        if len(right) > len(left):
            arr = right
        else:
```

```

arr = left
return arr[0]

a = 1
start = -10
stop = 10
count = 1000
scale = (stop - start)/count

t = np.linspace(start, stop, count)

dx = np.random.rand(1000)
dx = (2*dx - 1)*a
res = []

for n in np.random.randint(1, 10, 1000):
    s = [0]*len(t)
    for delta in np.random.choice(dx, n):
        s += point_target(t + delta, a)
    res.append(scale*irw(s))

print("Разрешение точечной цели:", round(scale*irw(point_target(t, a)), 4))
print("Максимум распределения разрешений псевдоточечных целей", round(max_distr(res)

```

График получившегося распределения представлен на рисунке 4.2.

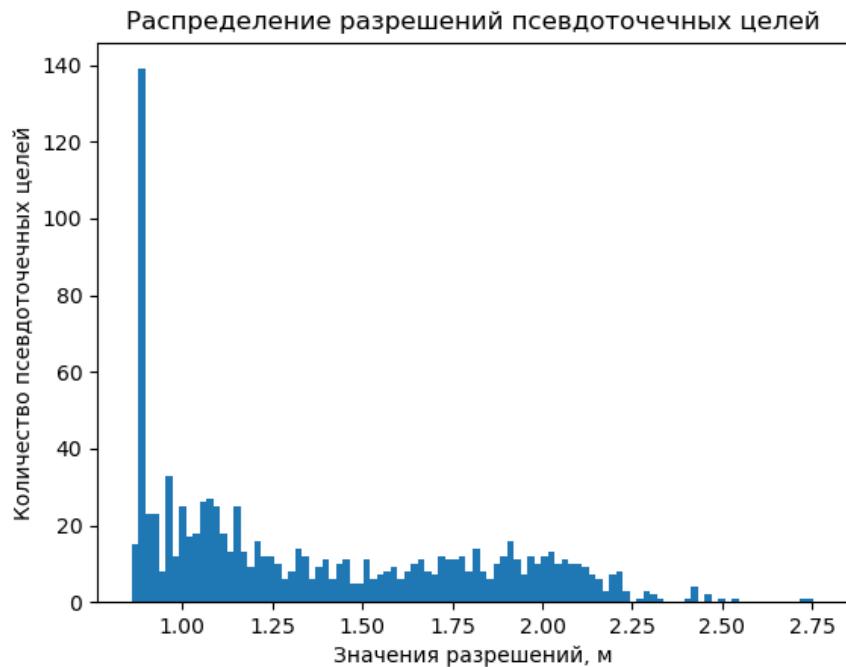


Рис. 4.2: Гистограмма распределения разрешений псевдоточечных целей

Таким образом, максимум распределения разрешений псевдоточечных целей оказалось равно 0.8836, что отличается от эталонного не более чем на 0.03%. Исходя из этого можно сделать вывод, что статистический анализ псевдоточечных целей даёт результаты очень близкие к реальным.

4.3 Алгоритм поиска псевдоточечных целей на РЛИ

Алгоритм автоматического поиска псевдоточечных целей заключается в нахождении центров их откликов. В [6] предложен алгоритм поиска, который заключается в вычислении свертки областей РЛИ с заранее сгенерированными квадратными матрицами, которые задают направления "лучей" отклика. У него есть ряд недостатков:

1. Свертка применяется ко всем областям РЛИ
2. Заранее сгенерированные матрицы имеют ограниченное количество направлений

Данные проблемы решаются с помощью выделения наиболее информативных областей и использовании в качестве свёрточных матриц автокорреляционную функцию изображения.

4.3.1 Выделение информативных участков изображения

Вычисление свёртки - ресурсозатратная операция для компьютера. Нецелесообразно производить вычисления на областях с высоким уровнем шума или на слабо-отражающих участках, так как результат свёртки будет неопределен. Для первичной фильтрации входного изображения используются гистограммные признаки [8]. В начале входное изображение разбивается на равные участки путем создания двумерной сетки. Далее для каждого участка вычисляется гистограммный признак и на основании его значения делается вывод. Всего было протестировано 6 признаков: среднее, дисперсия, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, энергия, энтропия. Однако наибольшей информативностью обладает коэффициент эксцесса. Данный вывод был сделан на основе решения задачи бинарной классификация, где правилом классификации выступало отклонение разрешения псевдоточечной цели от истинной. Таким образом, удалось выяснить, что на участках изображения со значением коэффициента эксцесса больше 10 имеют с большей вероятностью могут находиться псевдоточечные цели с разрешением, близким к истинному. Результат бинарной классификации представлен на рисунке 4.3, где зелеными звездочками помечены те участки изображения, на которых имеются углковые отражатели.



Рис. 4.3: Бинарная классификация

4.3.2 Свёрточная матрица на основе автокорреляционной функции изображения

Вычисление автокорреляционной функции (АКФ) является ключевым элементом в обработке РЛИ: она используется для оценки разрешающей способности РСА, в методе автофокусировки, в оценке когерентности и шумов. По определению автокорреляционная функция комплексного изображения задается формулой:

$$R_{II}(\Delta x, \Delta y) = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \cdot I^*(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy \quad (4.2)$$

где:

- $I(x, y)$ - комплексное изображение,
- $I^*(x - \Delta x, y - \Delta y)$ - комплексно сопряженное изображение, сдвинутое на $(\Delta x, \Delta y)$,
- $\Delta x, \Delta y$ - пространственные сдвиги по осям x и y соответственно.

На практике использование формулы (4.2) крайне затруднительно. Для упрощения формулы (4.2) воспользуемся теоремой о свёртке, которая утверждает, что фурье-преобразование свертки двух функций равно произведению их собственных преобразований [9].

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\left(\iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \cdot I^*(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy\right) &= \mathcal{F}(I(x, y)) \cdot \mathcal{F}(I^*(x, y)) = \\ &= \mathcal{F}(I(x, y)) \cdot \mathcal{F}^*(I(x, y)) = |\mathcal{F}(I(x, y))|^2 \end{aligned}$$

Таким образом, упрощенная формула:

$$R_{II}(\Delta x, \Delta y) = \mathcal{F}^{-1}(|\mathcal{F}(I(x, y))|^2)$$

На практике АКФ часто вычисляется через быстрое преобразование Фурье (БПФ) для ускорения расчётов:

1. Вычисляется Фурье-образ изображения $\mathcal{F}\{I\}$
2. Находится спектр мощности: $S = |\mathcal{F}\{I\}|^2$
3. Обратное Фурье-преобразование от S даёт АКФ

Или же сокращенно:

$$\text{АКФ} = \text{IFFT}(|\text{FFT}(I)|^2)$$

В радиолокации существует глубокая аналогия между АКФ и ФРТ. Обе функции описывают пространственное распределение энергии волнового фронта после взаимодействия с системой.

ФРТ описывается функцией sinc:

$$I(\theta) \sim \text{sinc}^2\left(\frac{\pi L \sin \theta}{\lambda}\right)$$

АКФ линейно-частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала с полосой В:

$$R\tau \sim \text{sinc}(\pi B\tau)$$

Пространственное разрешение обратно пропорциональна ширине главного лепестка АКФ, что верно и для ФРТ. Таким образом, корреляция между ФРТ и АКФ будет иметь значение близкое к 1. Поэтому целесообразно использовать АКФ как свёрточную матрицу для нахождения псевдоточечных целей. Примеры АКФ и ФРТ представлены на рисунках 4.4 и ...:

При повороте точечной цели на некоторый угол, её АКФ также поворачивается, что позволяет учесть всевозможные направления "лучей".

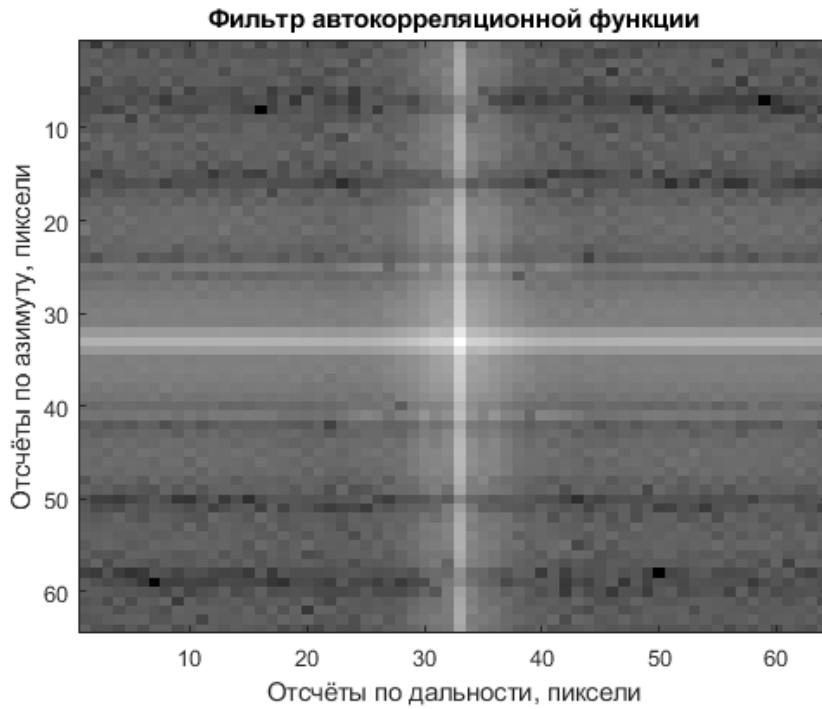


Рис. 4.4: Автокорреляционная функция

4.4 Алгоритм анализа отклика от псевдоточечных целей

Алгоритм анализа отклика от псевдоточечных целей ничем не отличается от анализа отклика от точечных целей. Согласно [5] наиболее важными характеристиками являются IRW (ширина главного лепестка по уровню -3дБ), PSLR (пиковий уровень боковых лепестков) и ISLR (интегральный уровень боковых лепестков). IRW является пространственным разрешением, а ISLR и PSLR отвечают за контраст.

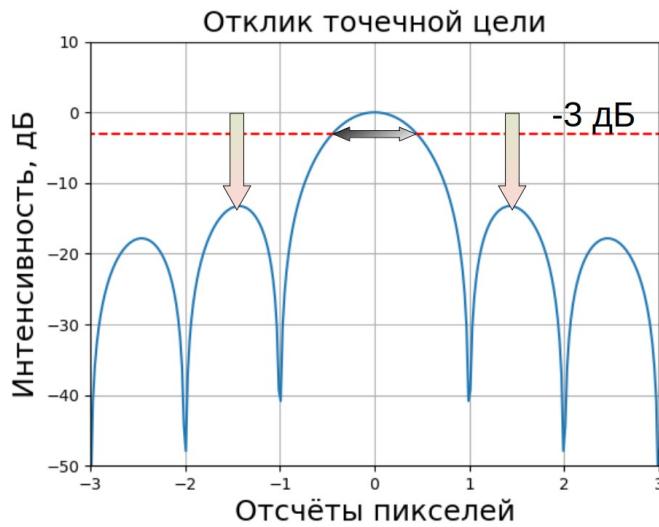


Рис. 4.5: Измерение характеристик по функции отклика

На рисунке 4.6 представлена блок-схема алгоритма анализа псевдоточечных целей. Она состоит из следующих шагов:

1. Интерполяция исходного отклика методом добавления нулей в конец спектра.

4.5. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И АНАЛИЗА ПСЕВДОТОЧЕЧНЫХ ЦЕЛЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

2. Определение направляющих осей по азимуту и по дальности.
3. Вычисление проекции отклика на данные оси
4. Расчёт требуемых характеристик по данным проекциям

4.4.1 Алгоритм поиска псевдоточечных целей

На рисунке 4.7 представлена блок-схема алгоритма поиска псевдоточечных целей:

Она состоит из следующих шагов:

- 1) Создание фильтра на основе автокорреляционной функции изображения
- 2) Создание сетки на изображении с адаптивным шагом
- 3) Вычисление статистического коэффициента ЭКСЦЕСС
- 4) Отбор нужных клеток сетки по критерию $\text{ЭСЦЕСС} > 10$
- 5) Вычисление свертки фильтра, полученного на 1 шаге, и отобранных областей
- 6) Отбор значений пикселей по пороговому значению (данные пиксели являются центром точечных отражателей)

Новизна представленного алгоритма заключается в использовании в качестве фильтра центр автокорреляционной функции изображения. Далее выполняется свёртка этого фильтра с наиболее информативными участками изображения. Это означает, что зашумленные или слабоотражающие участки нас не интересует, так как свертка с ними даст неопределенный результат. Поэтому для выделения наиболее информативных участков изображения используется статистический коэффициент ЭКСЦЕСС. Его особенность заключается в том, что он стремится к нулю при гауссовом распределении. Также была решена задача бинарной классификации, которая показала, что участки изображения с точечными целями с хорошим отношением сигнал/шум имеют значения ЭКСЦЕССа > 10 . Далее после выполнения операции свертки пиксели отбираются по пороговому значению, это и будут центры точечных отражателей.

4.5 Алгоритм автоматического поиска и анализа псевдоточечных целей

После объединения упомянутых выше алгоритмов и добавления статистического анализа распределений, итоговый алгоритм представлен на рисунке 4.8.

4.5. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И АНАЛИЗА ПСЕВДОТОЧЕЧНЫХ ЦЕЛЕЙ

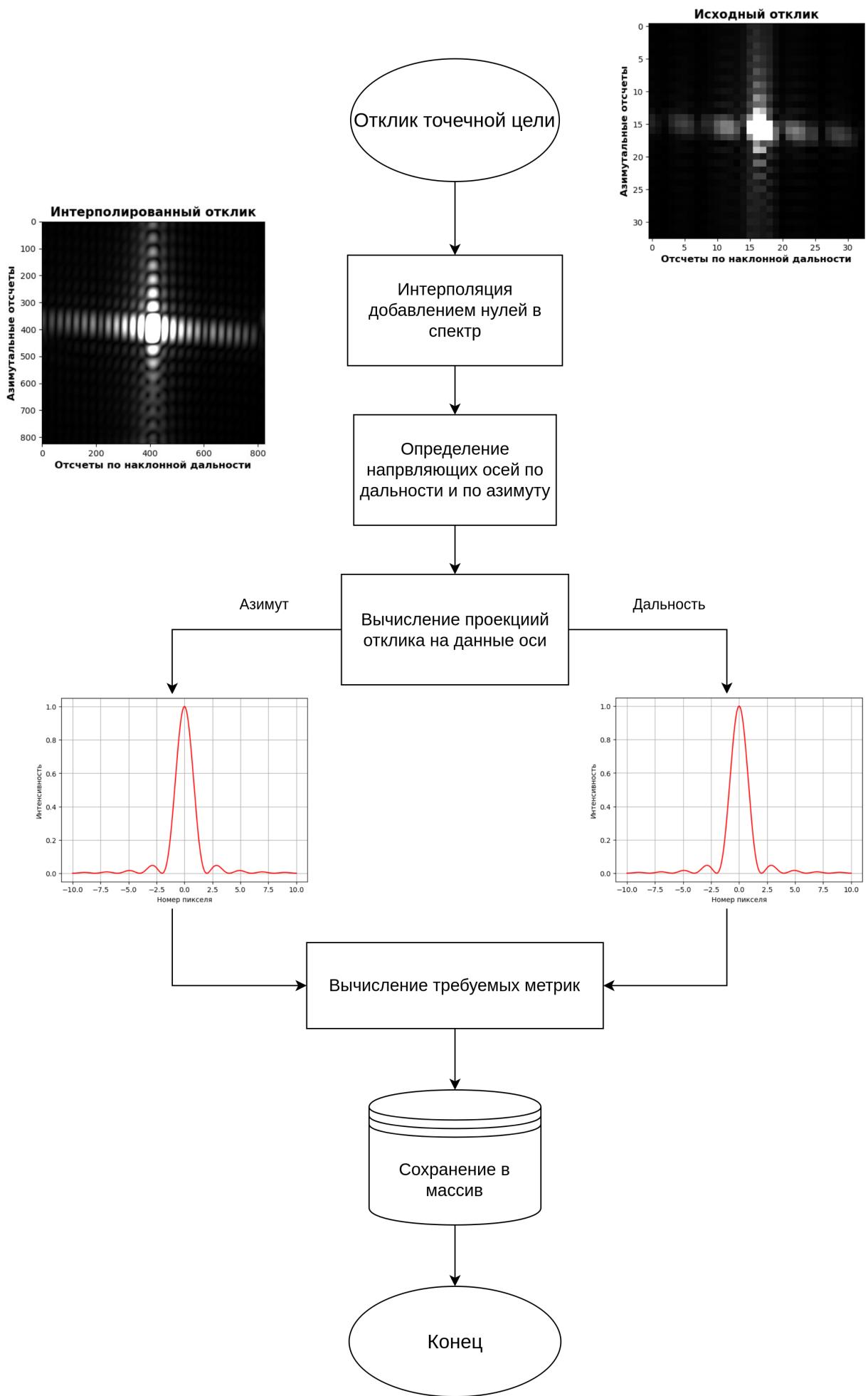


Рис. 4.6: Алгоритм анализа псевдоточечных целей
20

**4.5. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И АНАЛИЗА
ПСЕВДОТОЧЕЧНЫХ ЦЕЛЕЙ**

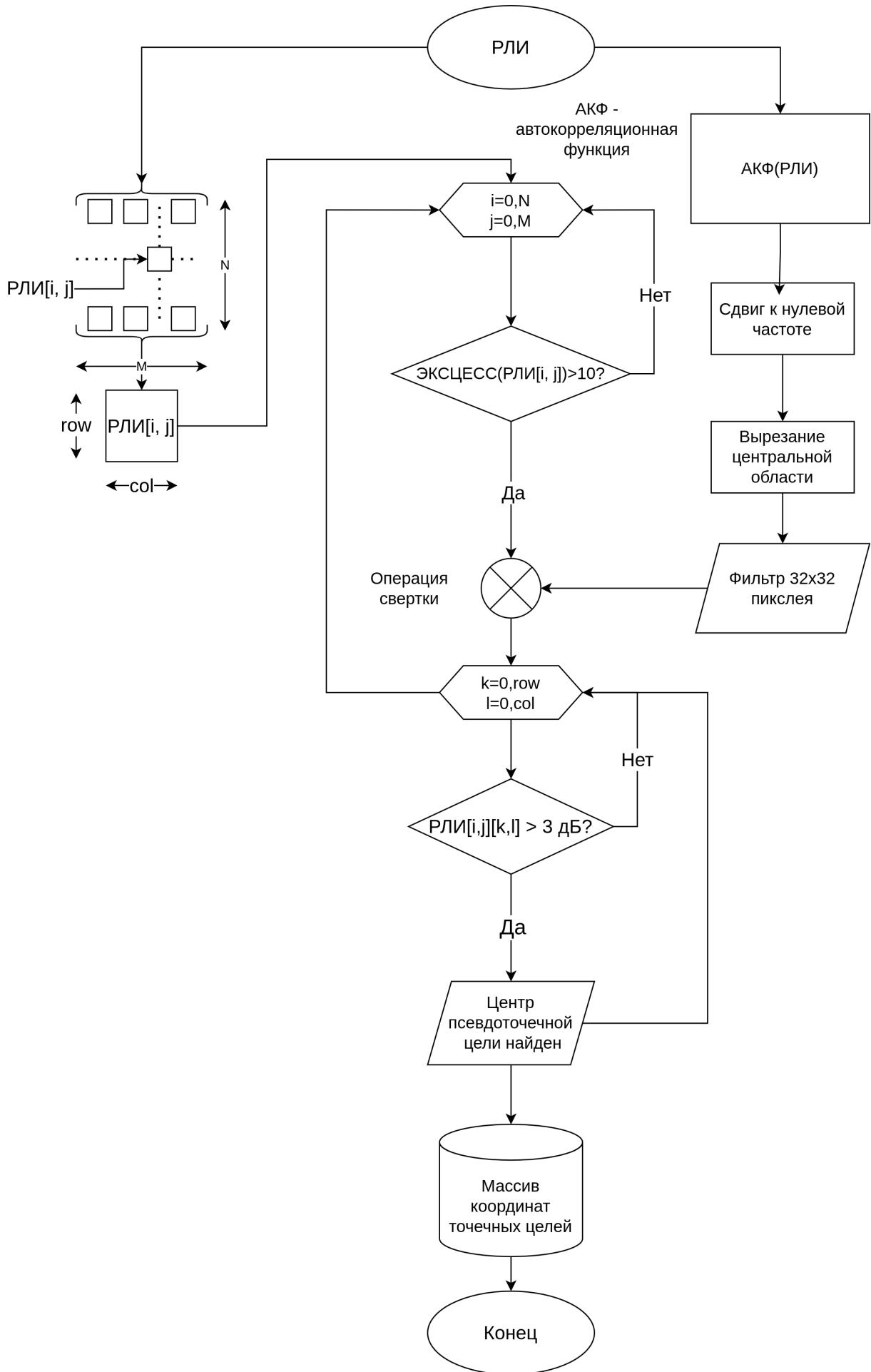


Рис. 4.7: Алгоритм поиска псевдоточечных целей

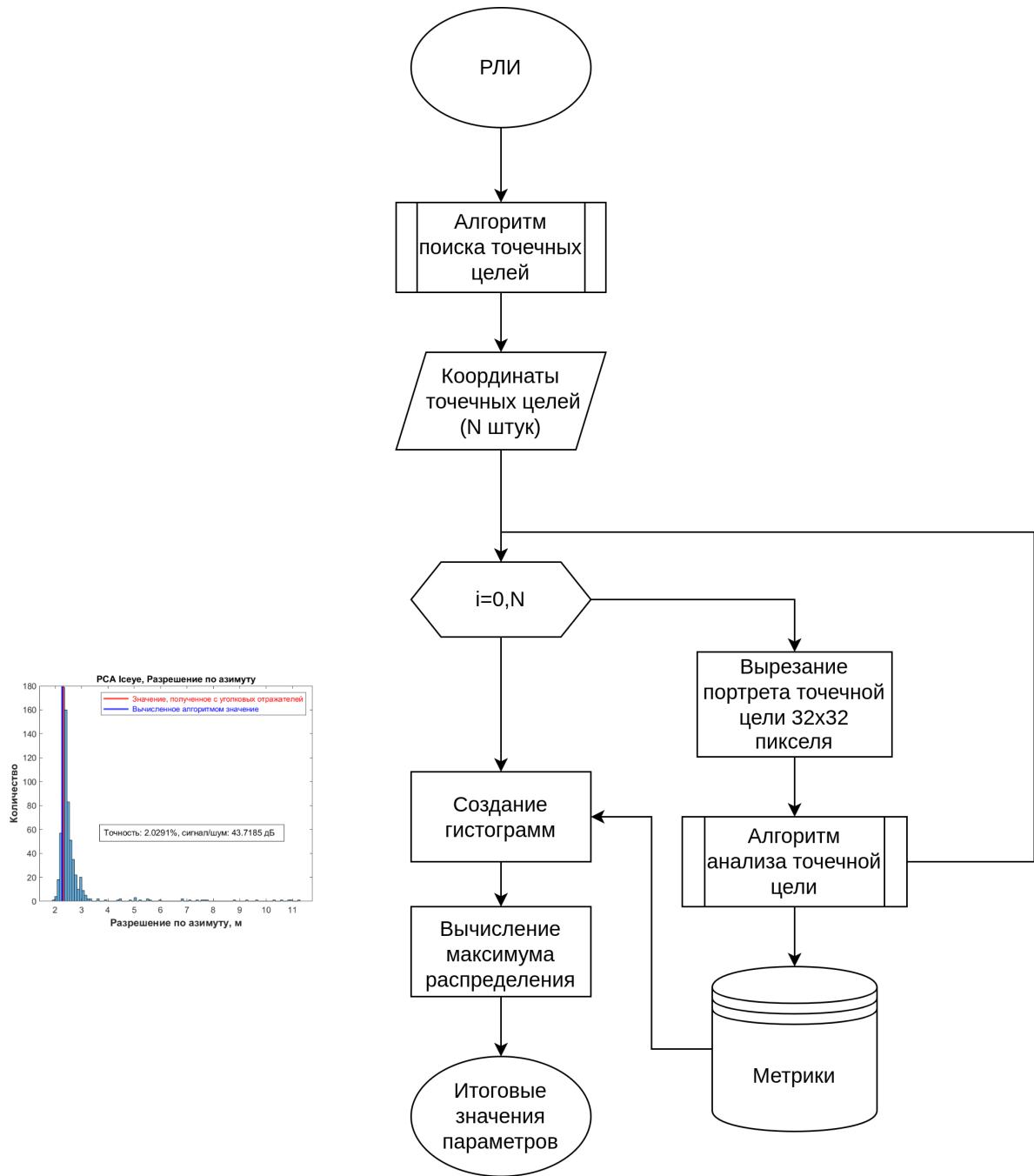


Рис. 4.8: Алгоритм автоматического поиска и анализа псевдоточечных целей

Глава 5

Описание практической части

Алгоритм, описанный в предыдущей главе был реализован на языках Matlab и Python. В Matlab использовались стандартные библиотеки, в Python - библиотеки numpy и scipy.

5.1 Калибровка алгоритма

Необходимым критерием для статистической оценке псевдоточечных целей является их наличие в диапазоне от 100 до 1000. Верхняя граница определяется возможностью вычислительных ресурсов ЭВМ. Для достижения поставленного критерия была выполнена калибровка алгоритма. Она заключается в установлении динамического порога при отборе псевдоточечных целей, который зависит от значения коэффициента эксцесса. Также был реализован динамический диапазон размеров клеток сетки, который зависит от размера входного изображения. Калибровка выполнялась на 22 радиолокационных снимков разного частотного диапазона.

5.2 Верификация алгоритма

Для верификации работы алгоритма был выбран полигон с уголковыми отражателями Surat, который находится в Австралии. Полученные с уголковых отражателей значения разрешений сравнивались с результатом работы алгоритма. Соответствующие ошибки в определении разрешений представлены в таблице 5.1.

5.3 Валидация алгоритма

В качестве валидации был обработан снимок Sentinel-1 в отсутствии какой-либо информации о снимаемой сцене и, соответственно, в отсутствии уголковых отражателей. Результат обработки представлен на рисунке 5.1.

Таблица 5.1: Относительные ошибки в определении разрешений

| Название РСА | Кол-во снимков | Сигнал/шума, дБ | ϵ | ϵ |
|-----------------------|----------------|-----------------|------------|------------|
| Iceye X-диапазон | 7 | 43.9 | 1.09 | 1.80 |
| Novasar-1 S-диапазон | 11 | 38.7 | 0.73 | 3.11 |
| Sentinel-1 C-диапазон | 4 | 32 | 0.50 | 1.40 |
| Среднее значение | | | 0.803 | 2.386 |

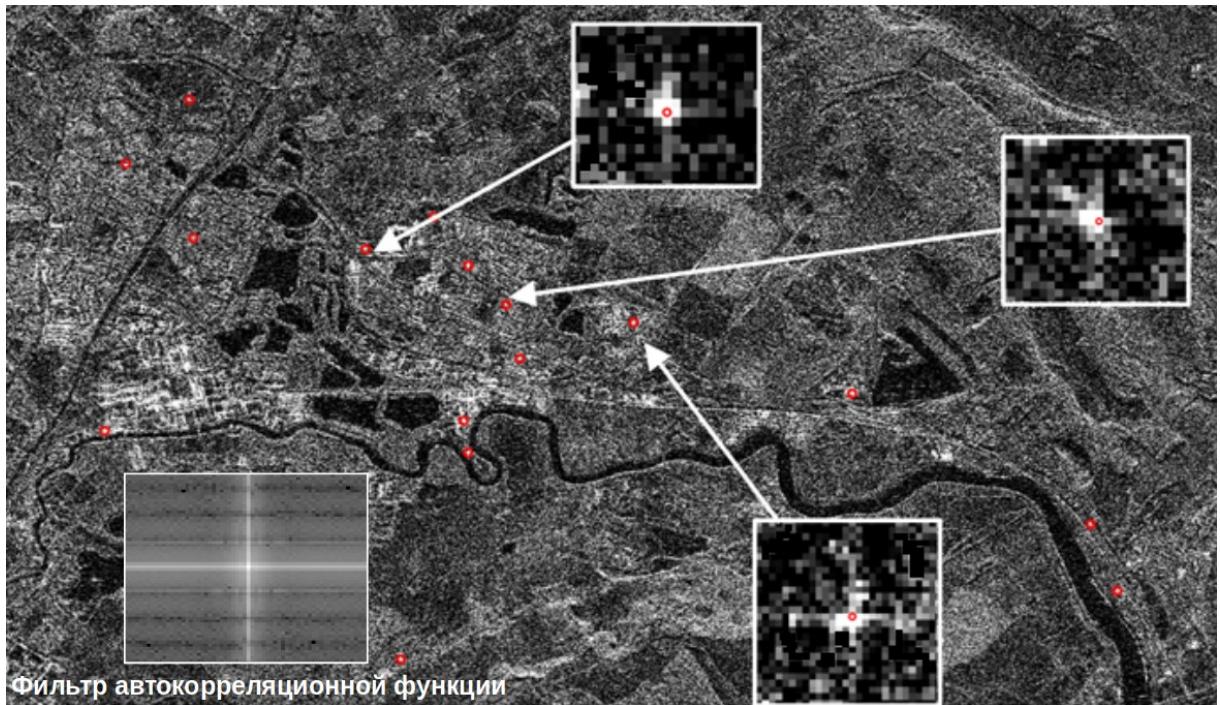


Рис. 5.1: Снимок с PCA Sentinel

Полученные распределения и разрешения представлены на рисунке 5.2.

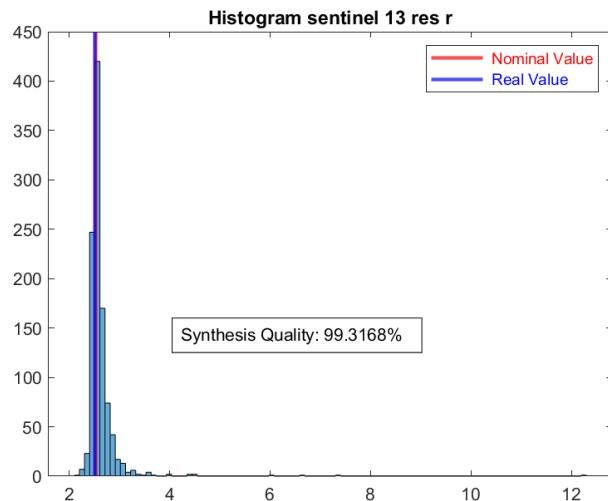


Рис. 5.2: Гистограмма распределения разрешений

Полученные разрешения по дальности и по азимуту оказались равными 2.422 м и 3.524 м соответственно. При этом предельная разрешающая способность РСА равна 2.525 м и 3.56 м, что говорит о хорошем качестве синтеза изображения. То есть, коэффициент ухудшения равен соответственно ... и

Глава 6

Заключение

В данной работе был предложен метод определения качества синтеза РЛИ, основанный на анализе отклика от псевдоточечных целей. Представленная модель формирования отклика от псевдоточечных целей показала равенство между максимумом распределения разрешений псевдоточечных целей и разрешением точечной цели. Был разработан алгоритм поиска псевдоточечных целей на РЛИ, основанный на вычислении АКФ и коэффициента эксцесса. Также были разработаны алгоритмы анализа отклика от псевдоточечной цели и статистической оценке распределения разрешений. Разработанные алгоритмы были реализованы на языках Matlab и Python. Валидация разработанных алгоритмов была проведена на полигоне с угловыми отражателями Surat (Австралия). Итоговая погрешность в определении разрешений по дальности и по азимуту составила 0.8% и 2.37% соответственно по дальности и по азимуту. Валидация на снимке Sentinel показала возможность работы со снимками без априорной информации о снимаемой сцене. Исходя из постановки задачи исследования все требования были выполнены.

В дальнейшем планируется увеличить точность метода с помощью введения показателя точечности псевдоточечных целей и написание промышленного продукта для регулярного использования как в научных целях, так и в практических приложениях.

Литература

- [1] *B .C. Верба, Л. Б. Неронский.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Л. Б. Неронский В .С. Верба. — 2010.
- [2] *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т.IV. Оптика / Д. В. Сивухин. — 2005.
- [3] *Martin Lambers, Andreas Kolb.* Automatic Point Target Detection for Interactive Visual Analysis of SAR Images / Andreas Kolb Martin Lambers. — 2008.
- [4] *Занин, К. А.* Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры / К. А. Занин // Труды МАИ. — 2018. — Vol. 96.
- [5] *Ian G. Cumming, Frank H. Wong.* Digital processing of synthetic aperture radar data / Frank H. Wong Ian G. Cumming. — 2005.
- [6] *Chen, Kun-Shan.* Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging / Kun-Shan Chen. — 2016.
- [7] *HUANG Li-sheng, XU Yong-jian ZHENG Tian-yao.* The Shape of SAR Point Target Response / XU Yong-jian ZHENG Tian-yao HUANG Li-sheng // Journal of remote sensing. — 2005. — Vol. 9.
- [8] *Pratt, William K.* Digital Image Processing / William K. Pratt. — 1978.
- [9] *Steward, E. G.* Fourier Optics: An Introduction / E. G. Steward. — 1983.

Приложение

6.1 Математическое обоснование связи дифракции и отклика точечных целей в радиолокации

6.1.1 Дифракция Фраунгофера

Дифракция Фраунгофера формируется суммированием когерентных волн, то есть волн с постоянной разностью фаз. Напряженность поля в точке (x, y)

$$E \sim \int_a^b e^{i\phi(\xi)} d\xi$$

Линейность фазы является следствием периодичности сигнала. Поэтому фаза подчинена линейному закону, То есть $\phi(\xi) = x * \xi + h$. Таким образом, мы получаем распределение поля:

$$E(x) \sim \int_a^b e^{ix\xi} d\xi \quad (6.1)$$

Уравнение выше является обратным преобразованием Фурье от прямоугольного сигнала:

$$\begin{aligned} rect(\xi) &= \begin{cases} 1 & a < \xi < b \\ 0 & \xi < a, \xi > b \end{cases} \\ E(x) &\sim \int_{-\infty}^{\infty} rect(\xi) e^{ix\xi} d\xi \end{aligned}$$

Интеграл ref является табличным и равен:

$$E(x) \sim \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x}$$

Где α - пространственная частота изменения фазы, не частота сигнала.

Соответственно, если на радиограмме присутствует линейный закон изменения фазы, значит имеет место дифракция. И соответственно имеются точечные цели.

Принцип Гюйгенса-Френеля

6.1.2 Дифракция в РСА

Зондирующий импульс в РСА имеет линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ). Поэтому в отличие от дифракции Фраунгофера, где фаза изменялась по линейному закону, фаза в РСА имеет квадратичную зависимость: $\phi(\xi) = x * \xi^2 + y * \xi + h$. Поэтому интеграл (6.1) принимает вид:

$$E(x) \sim \int_a^b e^{ix\xi^2} d\xi \quad (6.2)$$

Для удобства вычислений был оставлен только квадратичный член зависимости. Аналитическое решение интеграла (6.2) выражается через специальные функции: интегралы Френеля. Поэтому нагляднее будет численное решение:

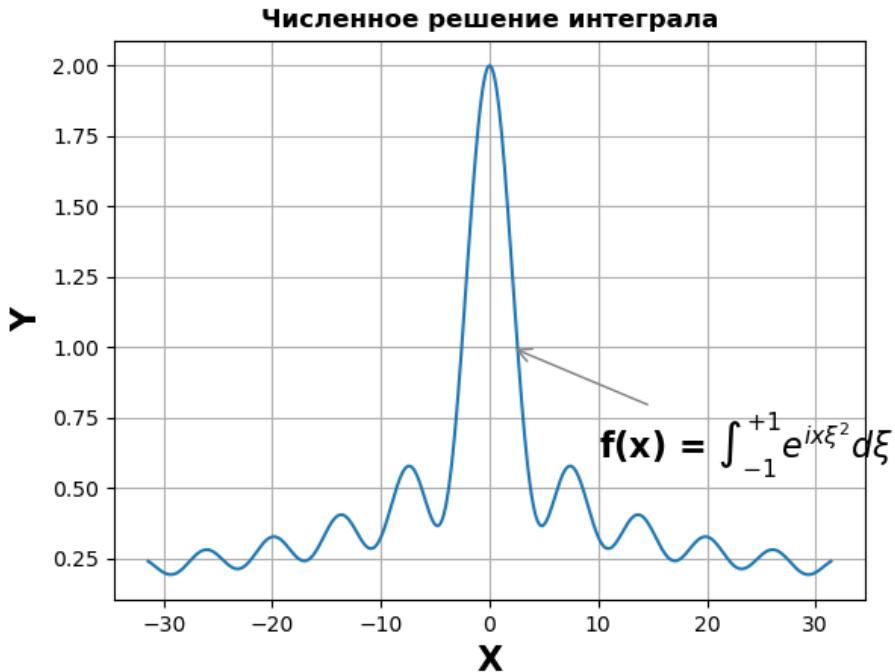


Рис. 6.1: Численное решение интеграла

6.1.3 Заключение

В этой части работы была выявлена связь между дифракцией Фраунгофера и откликом точечных целей в РСА. Отличие заключается только в разном законе распределения фаз.