

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Придушення завади на радіолокаційних
зображеннях»**

Виконав :

студент IV курсу, групи РС-01

Данілов Віталій Денисович

Керівник:

ст.викл., к.т.н.

Вишневий Сергій Валерійович

Рецензент:

к.т.н., доц. каф ПРЕ.

Приходько Ірина Олександрівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – **172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

Освітня програма **«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Данілову Віталію Денисовичу

1. Тема роботи «Придушення завади на радіолокаційних зображеннях»,
керівник роботи Вишневий Сергій Валерійович, ст.викл., к.т.н.
затверджені наказом по університету від «29» 05 2024р. № 2178-с
2. Термін подання студентом роботи 15.06.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи Виконати дослідження фільтрації обраними методами при обробці синтезованих РСА-зображень, що спотворені спекл-шумом.

4. Зміст роботи 1. Вступ. 2. Опис фізичних основ (принципа отримання) РСАзображень. Пояснення причин появи спекл-шуму. Сфери практичного застосування РСА-зображень та пояснення щодо переваг та недоліків РСА-зображень порівняно із оптичними зображеннями. 3. Синтезування РСА-зображення в MATLAB за допомогою математичної моделі. 4. Моделювання математичної моделі спотворення РСА-зображення спекл-шумом. 5. Аналіз та моделювання трьох методів (алгоритмів), які застосовуються для придушення спекл-шуму. Дослідження фільтрації цими методами. 6. Висновки по роботі.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Презентація у формі слайдів.

6. Дата видачі завдання 16 квітня 2024 р.

Календарний план

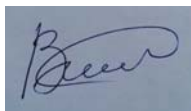
№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз принципу отримання РСА-зображення.	16.04 – 20.04	
2	Виконання математичної моделі та синтезування РСА-зображення в MATLAB.	20.04 – 29.04	
3	Розгляд та моделювання математичної моделі спотворення РСА-зображення спекл-шумом.	29.04 – 08.05	
4	Аналіз алгоритмів для придушення спекл-шуму.	08.05 – 19.05	
5	Моделювання трьох методів в MATLAB та вибір кращого шляхом дослідження фільтрації цими методами.	19.05 – 28.05	
6	Написання пояснювальної записки та підготовка презентації.	28.05 – 06.06	

Студент



Віталій ДАНИЛОВ

Керівник



Сергій ВИШНЕВИЙ

АНОТАЦІЯ

Обсяг пояснювальної записки дипломної роботи становить 51 сторінок, які включають в себе 7 розділів, 16 ілюстрацій і 24 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

Актуальність теми: Антени з синтезованою апертурою стали одним з найважливіших інструментів в області дистанційного зондування Землі завдяки своїй унікальній здатності отримувати високоякісні зображення незалежно від погодних умов, часу доби або атмосферних перешкод. Висока роздільна здатність РСА-зображень роблять їх незамінними в багатьох областях діяльності.

Мета дослідження: Обрати кращий метод фільтрації РСА-зображень, які спотворені спекл-шумом, шляхом проведення моделювання.

Об'єкт дослідження: Обробка зображень.

Предмет дослідження: Придушення завад на радіолокаційних зображеннях в віртуальному середовищі Matlab.

Ключові слова: РСА, АНТЕНИ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ, ФІЛЬТРАЦІЯ ЗОБРАЖЕННЯ

ANNOTATION

The volume of the explanatory note of the thesis is 51 pages, which include 7 chapters, 16 illustrations and 24 bibliographic names according to the list of reference sources.

Relevance of the topic: Antennas with a synthesized aperture have become one of the most important tools in the field of remote sensing of the Earth due to their unique ability to obtain high-quality images regardless of weather conditions, time of day, or atmospheric interference. The high resolution of SAR images make them indispensable in many areas of activity.

The purpose of the study: to choose the best method of filtering PCA images that are distorted by speckle noise, by conducting simulations.

Research object: Image processing.

Research subject: Suppression of interference on radar images in the Matlab virtual environment.

Keywords: SAR, ANTENNAS WITH SYNTHESIZED APERTURE, IMAGE FILTERING.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ.....	9
2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОЯВИ СПЕКЛ-ШУМУ.....	13
3 СФЕРИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ.....	17
3.1 Переваги та недоліки РСА-зображення порівняно з оптичним зображенням.....	23
3.2 Приклади вирішення прикладних задач.....	27
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РСА-ЗОБРАЖЕННЯ...	30
5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОТВОРЕННЯ РСА-ЗОБРАЖЕННЯ СПЕКЛ-ШУМОМ	35
6 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ СПЕКЛ-ШУМУ	38
6.1 Фільтрація в просторі зображень.....	38
6.3 Адаптивна фільтрація... ..	39
6.3 Вейвлетна обробка	39
6.4 Non-Local Means(NLM).....	40
7 МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ.....	41
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	48

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

PCA(SAR) – антена з синтезованою апертурою

MSE(Mean Squared Error) – середньоквадратична похибка

PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) – пікове відношення сигнал/шум

ВСТУП

На сьогоднішній день антени з синтезованою апертурою надають унікальні можливості для дистанційного зондування і стали надзвичайно важливими в сучасному світі. Їх застосування варіюється від природничих наук до безпеки і оборони.

РСА-зображення використовуються для спостереження за екосистемами, виявлення змін у лісах, відстеження динаміки берегової лінії та моніторингу стану льодовиків і морського льоду. Реалізація зображення не залежить від погодних умов і дані можна отримувати в будь-яку пору року. У сільському господарстві РСА-зображення використовується для моніторингу стану посівів, виявлення хвороб рослин, оптимізації рошення та планування врожаю. Це підвищує ефективність сільськогосподарських операцій і запобігає втратам.

РСА-технології необхідні для оцінки наслідків стихійних лих, таких як землетруси, повені, зсуви і урагани. Вони забезпечують швидкий доступ до детальної інформації про постраждалі райони і відіграють важливу роль в організації рятувальних операцій і плануванні відновлювальних робіт після катастроф.

Технології SAR (Synthetic Aperture Radar) широко використовуються військовими для розвідки, спостереження та моніторингу кордонів, що являється досить важливою задачею наразі (в воєнний стан). Вона дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю незалежно від погоди. Тому дослідження фільтрації спекл-шуму на РСА-зображенні є досить актуальною темою, для отримання більш точної інформації в різних галузях.

1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ

Антенa з синтезованою апертурою (SAR) – це радіолокаційна система, яка використовується для отримання високоякісних зображень земної поверхні або інших об'єктів. Принцип дії SAR(PCA) заснований на переміщенні антени щодо цілі, що дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю.

Отримання радіолокаційних зображень включає кілька етапів: передачу радіосигналів, їх розсіювання від об'єктів на землі, прийом та обробку цих сигналів для створення зображення.

1. Передача сигналів:

- Антенa передає короткі радіоімпульси у напрямку цілі, наприклад земної поверхні
- Ці імпульси поширюються у просторі, відбиваються від об'єктів на поверхні та повертаються до антени.

2. Прийом відбитих сигналів:

- Антенa приймає відбиті сигнали.
- Кожен прийнятий сигнал містить інформацію про відстань до відбиваючого об'єкта, залежно від часу затримки.

3. Синтезування апертури:

- Система SAR рухається (наприклад, літак або супутник) і приймає безперервні імпульси в різних положеннях.
- Цей процес дозволяє створити ефект великої антени, або “синтезованої апертури”, що значно покращує роздільну здатність зображення.

4. Обробка сигналів:

- Обробка сигналу включає в себе обробку з доплерівською компенсацією, обробку дальності і азимута.
- Доплерівська компенсація дозволяє враховувати переміщення антени і усувати доплерівський зсув частоти.

- Обробка дальності виконується за допомогою перетворення Фур'є для отримання інформації про відстань до об'єкта.
- Обробка по азимуту виконується для отримання зображення в поперечному напрямку (перпендикулярному напрямку руху антени).

5. Створення зображення:

- Дані, отримані після обробки сигналу, використовуються для створення радіолокаційних зображень.
- Це зображення відображає інтенсивність відбитого сигналу від кожного об'єкта на поверхні та відображає його радіолокаційні характеристики.

Сучасні супутникові системи використовують безліч методів для поліпшення зображень, включаючи адаптивне фокусування, оптимізацію діафрагми і корекцію ефектів затемнення в атмосфері. Ці технології дозволяють отримувати дуже детальні зображення об'єктів на землі навіть за різних умов спостереження.

Ще одним виявленим наслідком використання РСА є створення передумов для подальшого розвитку використання РСА в певних регіонах. Дослідження визначило перспективні сфери застосування технології SAR [1], а саме: військова розвідка, страхування, енергетика та видобуток корисних копалин, сільське господарство та державний сектор, гідрологічні дослідження, моніторинг ґрунтів, розвиток міст та інфраструктури. Найблищим часом SAR не отримає широкого поширення, але його ринок значно зросте в найближчі роки. Найближчим часом РСА- зображення може стати для певних країн інструментом для оцінки збитків, моніторингу стану території, відновлення міст та інфраструктури.

Радар з синтезованою апертурою містить великий обсяг інформації, що забезпечує більш високу продуктивність в порівнянні з іншими системами супутникової зйомки. Незважаючи на переваги, зображення SAR мають недоліки, такі як ефект розмиття через використання радара, який освітлює землю по діагоналі. Отже, зображення, створені такими радаром, містять просторові спотворення, пов'язані з геометричними характеристиками, властивими новій отриманій геометрії. Деякі з цих геометричних спотворень можна усунути, наприклад, у випадку “укорочення”. Якщо модель місцевості доступна, її можна видалити за допомогою процесу геокодування.

Виявлення радіолокаційної тіні включає багато характеристик. Кілька різних методів виявлення. Тут представлені фактори, що впливають на затінення, і механізм моделювання. Кут падіння визначається як кутове зміщення від вертикального положення датчика поля зору в напрямку цілі. Це важливий параметр, який визначає форму тіні. Він залежить від висоти антени та її положення відносно об'єкта. Зі збільшенням кута падіння тінь змінює свою форму і розмір. З іншого боку, якщо висота датчика фіксована, існують інші параметри, які можуть впливати на кількість затінених областей. Наприклад, висота об'єкта зйомки може впливати на область затінення. Якщо кут нахилу рельєфу перевищує кут падіння радіолокаційного сигналу, то затінена область буде дуже погано реагувати на датчик. Крім того, велика площа рельєфу обумовлена малим кутом поглиблення, що призводить до появи великих тіней. Таким чином, ми бачимо, що втрата інформації через тіні залежить від кута падіння. Радіолокаційні тіні створюють ефекти тривимірної візуалізації без використання стереоскопічного прицілу, але інформація про висоту, яку дає ефект тіні, ненадійна.

Illustration of shadow phenomenon on a given row of SAR image.

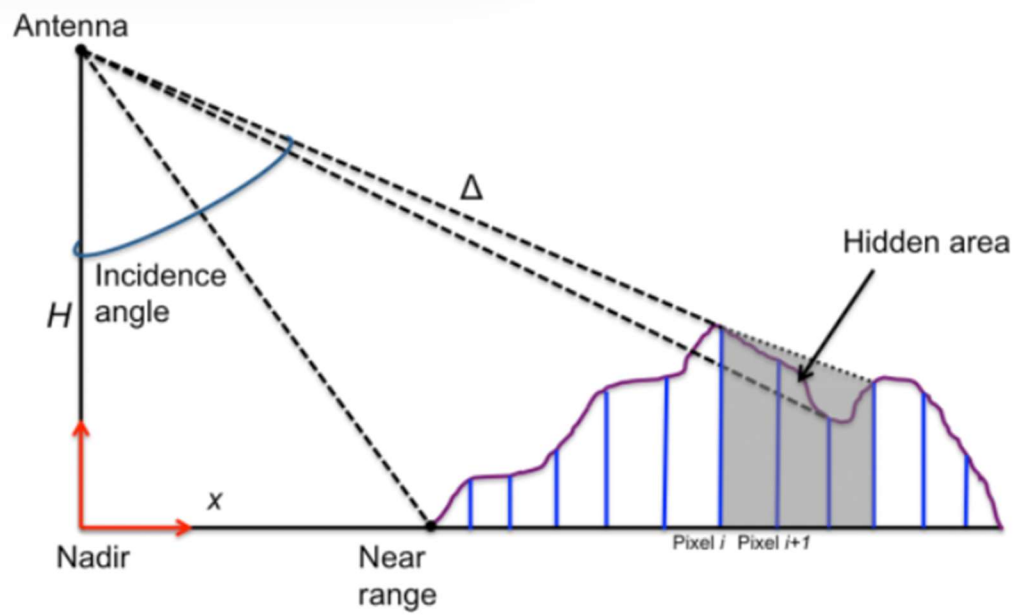


Рисунок 1.1 - Ілюстрація явища тіні на заданому рядку зображення SAR.

2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОЯВИ СПЕКЛ-ШУМУ

Фізичні основи появи спекл-шуму на РСА-зображенні

Спекл-шум (*speckle noise*) являється однією з важливих характеристик зображень радара з синтетичною апертурою (SAR). Його виникнення пов'язане з когерентністю радіолокаційного сигналу та інтерференцією між відбитими хвилями. Фізичні основи генерації спекл-шуму докладно пояснюються нижче.

1. Когерентність радарних сигналів

РСА використовує когерентне випромінювання, де всі імпульси мають постійну фазову кореляцію. Це означає, що фаза радіохвилі стабільна від імпульсу до імпульсу. Когерентність дозволяє синтезувати великі апертури, що є основою для досягнення високої роздільної здатності зображення.

2. Принцип дії РСА

РСА випромінює радарні імпульси, які відбиваються від об'єктів на землі та повертаються до антени. Повернений сигнал містить інформацію про амплітуду і фазу відбитого імпульсу. Обробляючи відбиті сигнали, РСА може створювати детальні зображення поверхонь.

3. Інтерференція відбитих сигналів

Поверхня Землі складається з багатьох дрібних розсіювачів (рослинність, каміння, будівлі тощо), кожен з яких відбиває радіолокаційні сигнали. Відбиті сигнали від цих розсіювачів мають різні фази, оскільки вони знаходяться на різних відстанях від антени. Коли ці відбиті сигнали досягають приймача, вони створюють перешкоди. Тобто їх амплітуда і фаза суміщені.

Інтерференція може бути:

- **Конструктивною:** коли фази сигналів сумуються, підсилюючи загальний сигнал.
- **Деструктивною:** коли фази сигналів компенсують одна одну, зменшуючи загальний сигнал.

4. Випадковий характер спекла

Оскільки положення і властивості розсіювачів на поверхні є випадковими, фаза відбитого сигналу також буде випадковою. Це робить інтерференційну картину кожного пікселя на зображенні РСА випадковою. Ця випадковість призводить до коливань амплітуди сигналу кожного пікселя, що призводить до спекл-шуму.

5. Статистичні моделі спекла

Спекл-шум може бути описаний статистичними моделями:

- **Розподіл інтенсивностей:** у когерентному випадку інтенсивність сигналу в пікселі відповідає розподілу Релея.
- **Розподіл амплітуд:** амплітуди сигналів зазвичай мають негативний експоненціальний розподіл.

6. Залежність від роздільної здатності

Чим вища роздільна здатність РСА, тим менше окремих когерентних областей (спеклів) включено в кожен піксель. Це усереднює варіації та зменшує спекл-шум. Зі збільшенням роздільної здатності кожен піксель стає деталізованішим, а вплив випадкових коливань сигналу зменшується.

Приклади реальних РСА-зображень:

- **Sentinel-1:** Супутники Sentinel-1, запуснені Європейським космічним агентством в рамках програми Copernicus, є прикладом системи, яка використовує РСА для отримання зображень земної поверхні. Вони працюють у С-діапазоні і можуть надавати дані в різних режимах, таких як *Stripmap*, *Interferometric Wide Swath*, *Extra-Wide Swath*, і *Wave*. Ці супутники дозволяють отримувати високоточні дані про земну поверхню, включаючи водні тіла, урбанізовані райони, та інші природні об'єкти. Більш детальна інформація щодо супутника [2].



Рисунок 2.1 – Зображення супутника Sentinel – 1 [3].

- **Radarsat-2:** Іншим прикладом є супутник Radarsat-2, який використовує РСА для моніторингу різних природних явищ і об'єктів. Радіолокаційні зображення цього супутника показують різні типи розсіяння, включаючи дзеркальне відбиття (від гладких поверхонь, як вода), подвійне відбиття, та дифузне розсіяння (від рослинності або нерівних поверхонь).

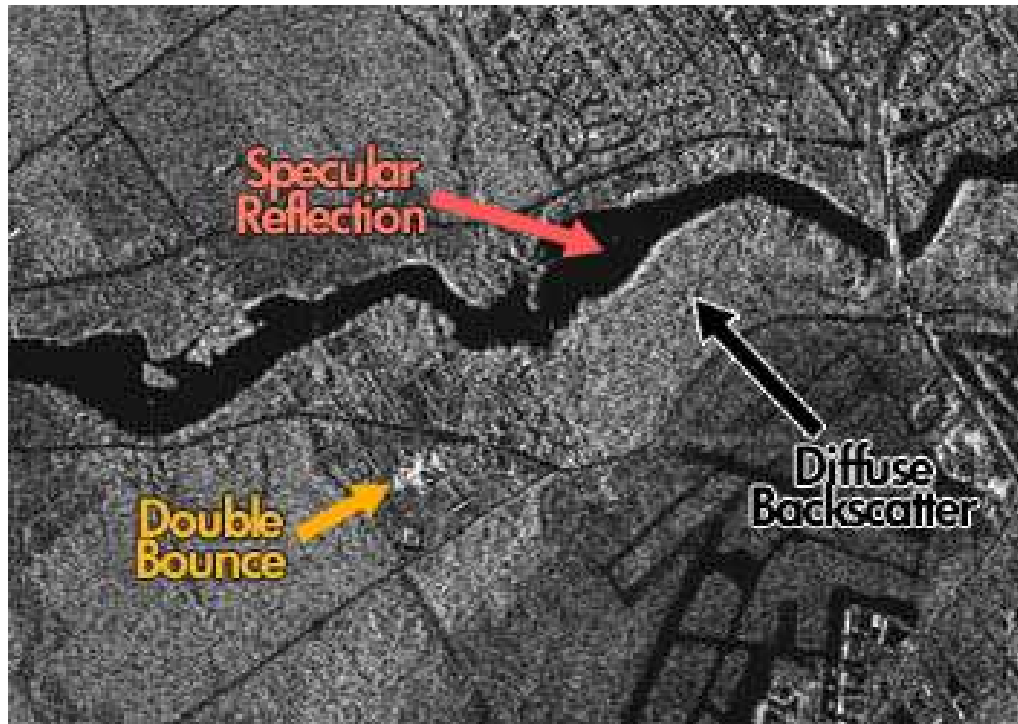


Рисунок 2.2 – Зображення трьох типів розсіяння (дзеркальне відбиття, подвійне відбиття та дифузне розсіяння) [4].

Ці приклади демонструють, як РСА можна використовувати для отримання детальних зображень поверхні Землі, які можна використовувати для різноманітних дослідницьких і прикладних цілей, зокрема: моніторинг природних ресурсів, управління ризиками стихійних лих та дослідження зміни клімату.

3 СФЕРИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ

Радар із синтезованою апертурою є досить потужним інструментом для дистанційного зондування земної поверхні. Він забезпечує високу роздільну здатність і може використовуватися за будь-яких погодних умов, і в будь-який час доби. Зображення РСА використовуються в багатьох сферах і надають цінну інформацію для досліджень і управління. Основні практичні використання зображень РСА:

1. Картографування та моніторинг поверхні землі

Моніторинг змін у ландшафті та землекористуванні:

- **Сільське господарство:** Визначення типів рослинності, моніторинг росту рослин та оцінка врожайності.
- **Лісове господарство:** Оцінка стану лісових масивів, виявлення вирубок та незаконних рубок.
- **Геологічне картування:** Визначення геологічної будови, моніторинг зсувів та інших геологічних процесів.



Рисунок 3.1 – Частина гір Блакитного хребта у Вірджинії [5].

Зображення РСА надають детальну інформацію про поверхню Землі завдяки своїй високій роздільній здатності та можливості бачити крізь хмари та в темряві.

2. Управління природними ресурсами

Моніторинг водних ресурсів:

- **Гідрологія:** Моніторинг рівня води в річках, озерах, водосховищах і водних басейнах.
- **Виявлення затоплення:** Швидке визначення та моніторинг зон затоплення під час паводків.

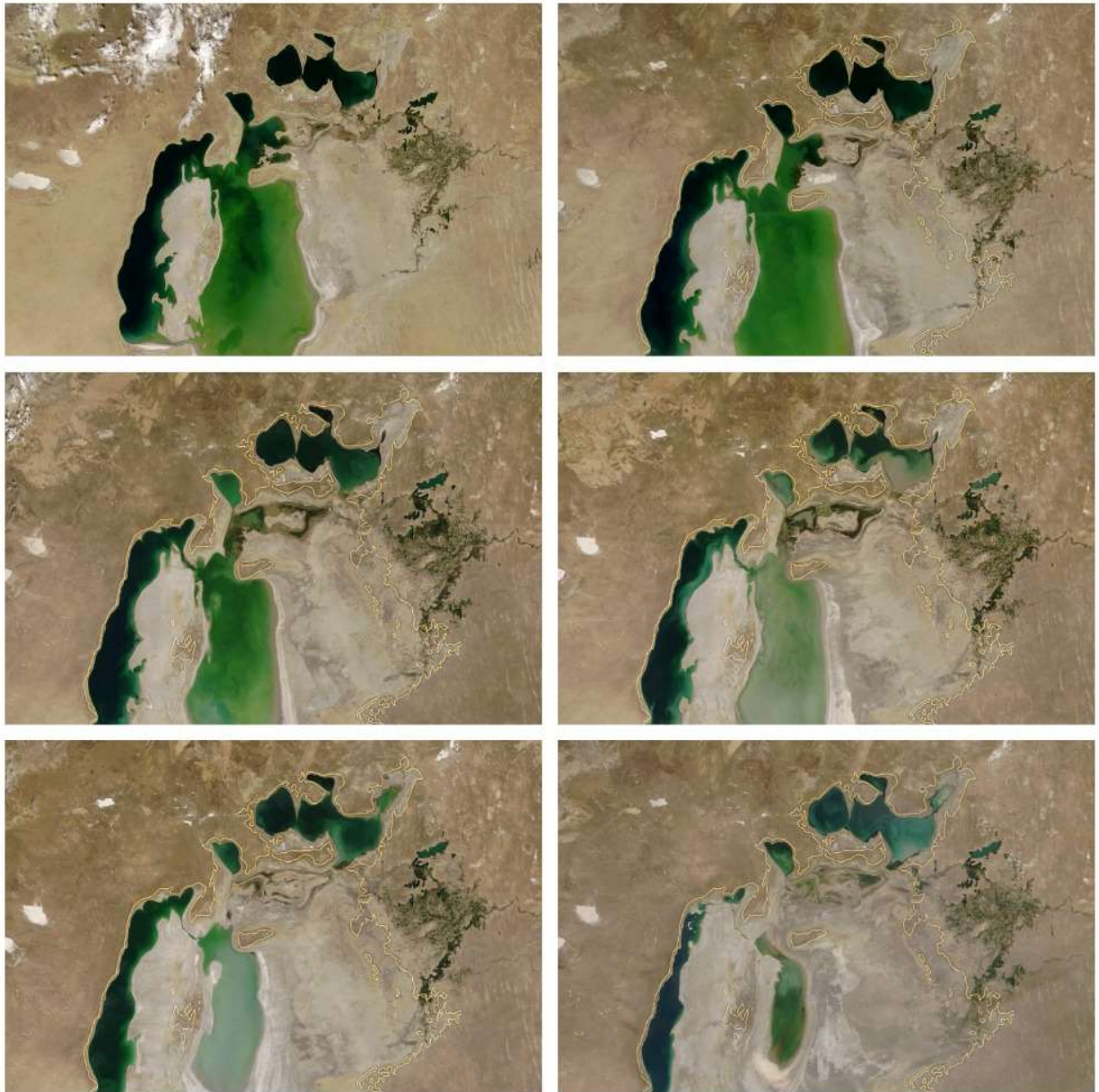


Рисунок 3.2 – Серія зображень висихання Аральського моря в період з 2000-2018 років [6].

РСА дозволяє відстежувати зміни у водоймах і швидко реагувати на стихійні лиха, такі як повені та посухи.

3. Екологічний моніторинг

Охорона навколишнього середовища:

- **Виявлення забруднення:** Моніторинг забруднення води та ґрунтів, оцінка впливу техногенних аварій.
- **Стан льодовиків і льодовикових щитів:** Спостереження за таненням льодовиків, аналіз сезонних змін в крижаному покриві.

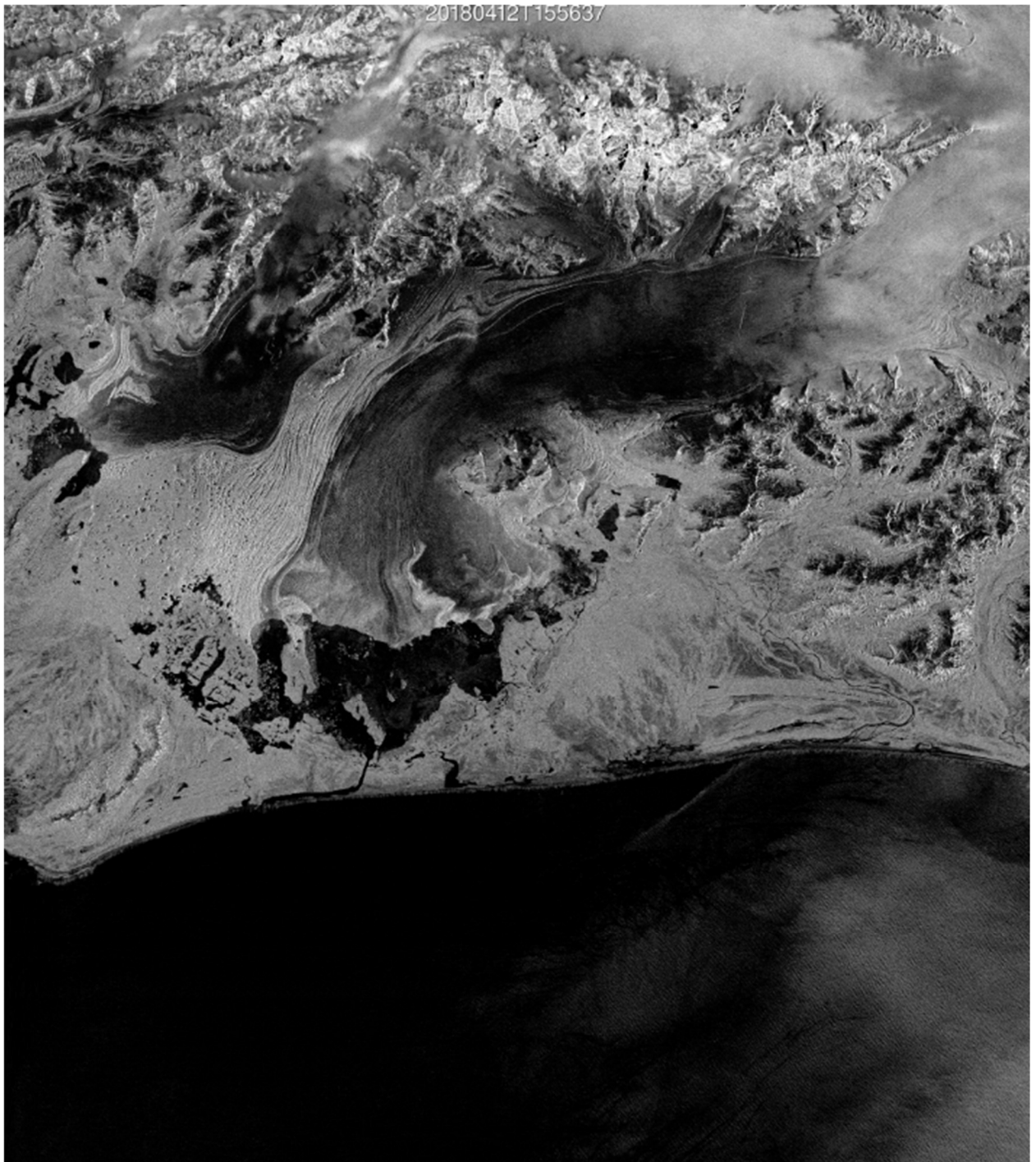


Рисунок 3.3 – Зображення Берінгового льодовика на Алясці [7].

Зображення РСА надають важливу інформацію для моніторингу навколишнього середовища та допомагають визначити й оцінити вплив людської діяльності на природу.

4. Містобудування та управління міською територією

Моніторинг розвитку міст:

- **Аналіз інфраструктури:** Оцінка стану будівель та інфраструктури, моніторинг будівництва нових об'єктів.
- **Планування території:** Аналіз землекористування, планування нових житлових та промислових зон.

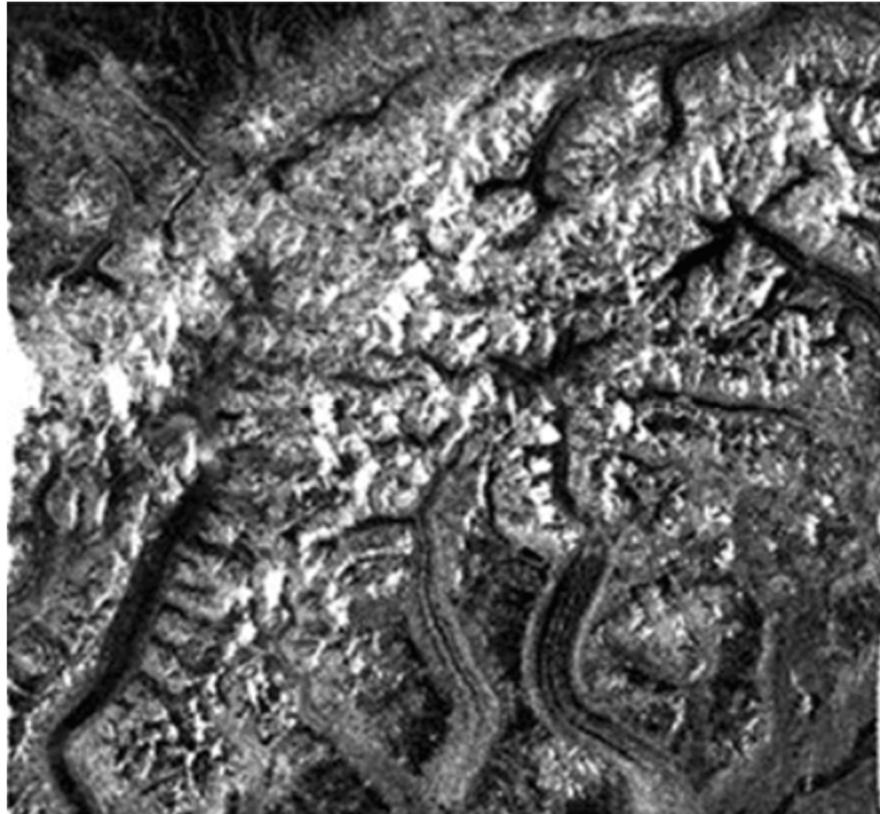


Рисунок 3.4 – Частина Аляскинського хребта в національному парку Деналі [8].

Зображення РСА дозволяють отримати точні дані про міські території, що важливо для планування та управління міським розвитком.

5. Управління стихійними лихами

Моніторинг стихійних лих:

- **Землетруси та зсуви:** Моніторинг зсувів, аналіз пошкоджень після землетрусів.
- **Вулканічна активність:** Виявлення змін в структурі вулканів, моніторинг вивержень.

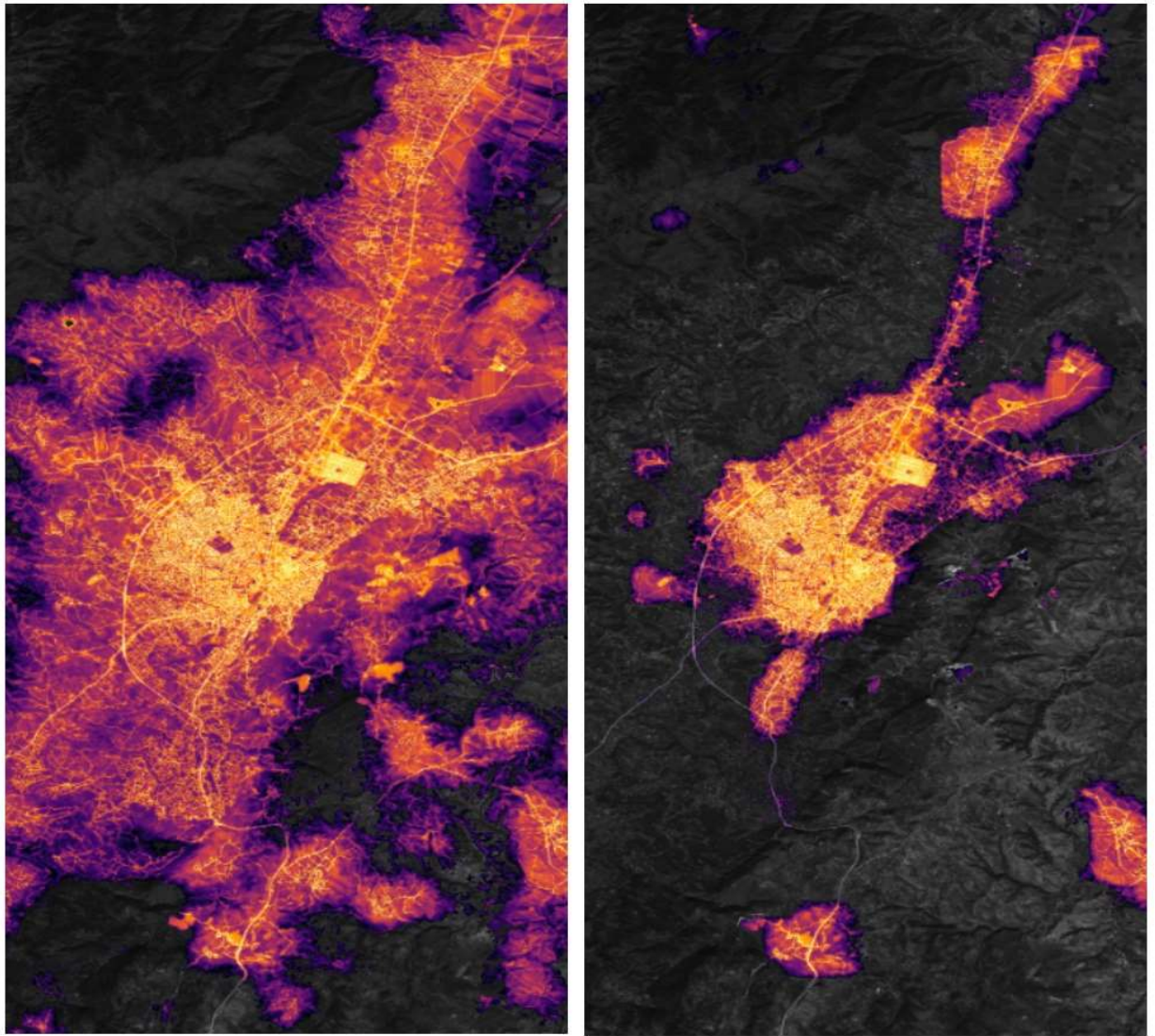


Рисунок 3.5 – Зображення землетрусу в Туреччині в період 04.02.2023 – 08.02.2023 року [9].

Зображення РСА можуть швидко надати дані про території, які постраждали від стихійних лих.

Загалом, SAR-зображення є потужним інструментом для багатьох галузей завдяки своїм унікальним властивостям та здатності надавати високоякісні дані незалежно від зовнішніх умов.

3.1 Переваги та недоліки РСА-зображення порівняно з оптичним зображенням

Якщо порівнювати РСА-зображення з оптичними зображеннями, то кожен з них має свої переваги та недоліки залежно від конкретного застосування.

До прикладу переваги РСА-зображень:

- **Незалежність від погодних умов.** SAR-зображення можна робити за будь-якої погоди(дощ, сніг, хмари) та в будь-який час(вдень чи вночі), оскільки вони використовують активні радіохвилі. Це особливо важливо під час моніторингу катастрофічних подій, таких як повені та зсуви, де потрібні дані в реальному часі.
- **Висока проникна здатність.** Зображення SAR можуть проникати через рослинність, ґрунт і певні матеріали, що дозволяє перевіряти підземні споруди та об'єкти, приховані під густою рослинністю. Це досить важливо для геологічних досліджень, археології та лісового господарства.
- **Висока роздільна здатність.** Завдяки синтетичній апертурі зображення SAR можуть мати дуже високу роздільну здатність, що дозволяє детально аналізувати невеликі об'єкти. Зазвичай це використовується для військової розвідки, моніторингу інфраструктури та міського планування.

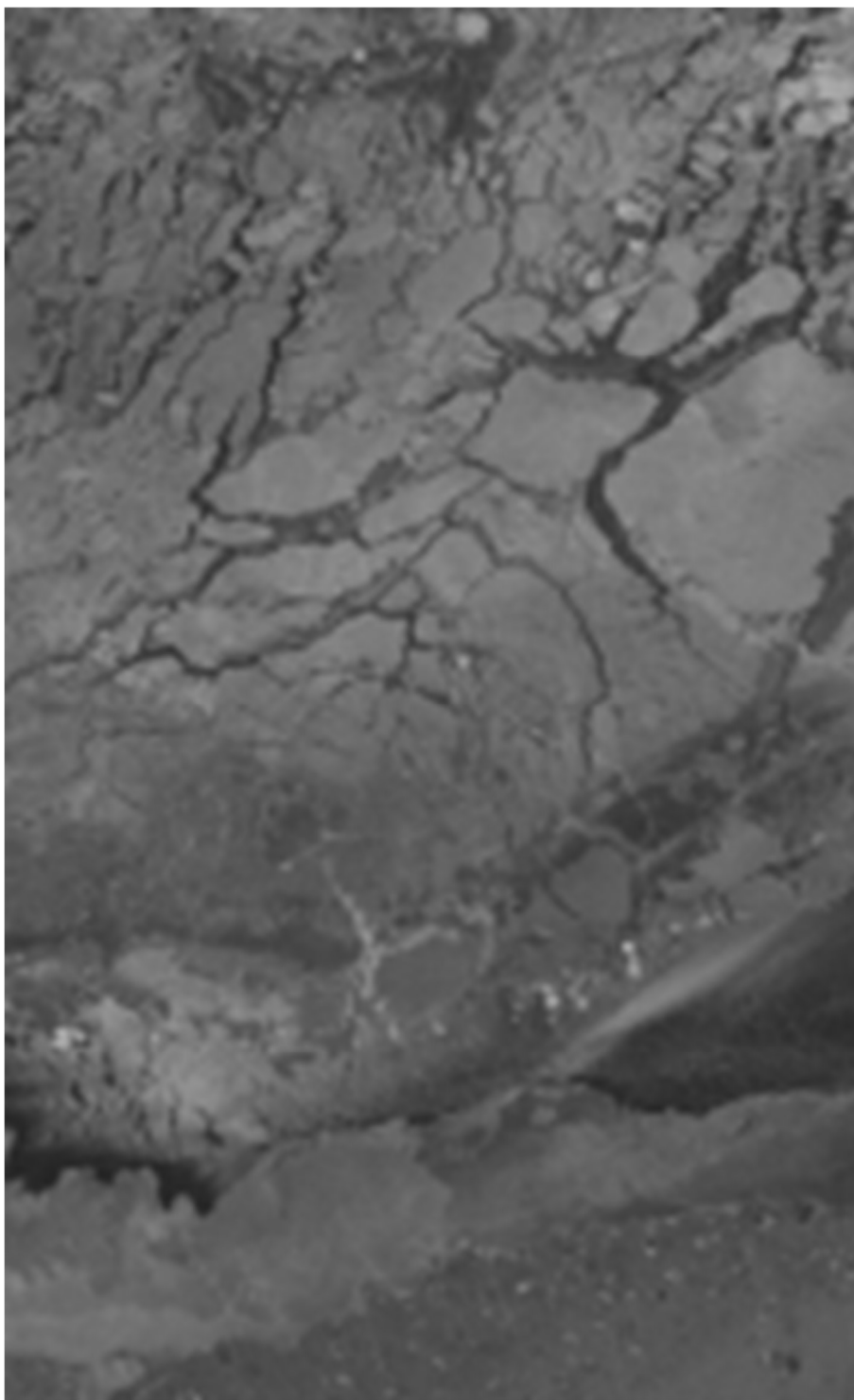


Рисунок 3.6 – Льодові умови в регіоні Прудо-Бей, Аляска [10].

Якщо розглядати недоліки SAR зображення, то ось декілька з них:

- **Труднощі в інтерпретації.** Інтерпретація зображень РСА вимагає спеціальних знань і досвіду, оскільки радіолокаційні зображення важко зрозуміти, на відміну від оптичних зображень. Необхідно залучення спеціалістів для аналізу даних.
- **Спекл-шум.** Зображення SAR часто містять спекл-шум, який ускладнює виявлення та аналіз дрібних деталей. Зниження рівня шуму вимагає використання спеціальних методів фільтрації.
- **Висока вартість обладнання та обробки даних.** Пристрої для отримання зображень SAR дорогі, як і обробка великих обсягів даних. Це обмежує їх використання у певних галузях через високу вартість.

Що до переваг оптичних зображень, деякі з них перераховані нижче:

- **Легка інтерпретація.** Оптичні зображення нагадують звичайні фотографії, що робить їх чіткими та легкими для інтерпретації. Їх широко використовують в картографії, сільському господарстві та моніторингу навколишнього середовища.
- **Висока спектральна роздільна здатність.** Оптичні системи можуть використовувати різні спектральні діапазони(видимий, інфрачервоний), що дозволяє отримувати додаткову інформацію про об'єкти. Це використовується для аналізу рослинності, водних ресурсів і виявлення забруднення.
- **Відносно низька вартість.** Оптичні датчики та обробка даних відносно недорогі порівняно з SAR. Це дає доступ в використанні широкому колу користувачів, включаючи дослідницькі установки та приватні компанії.

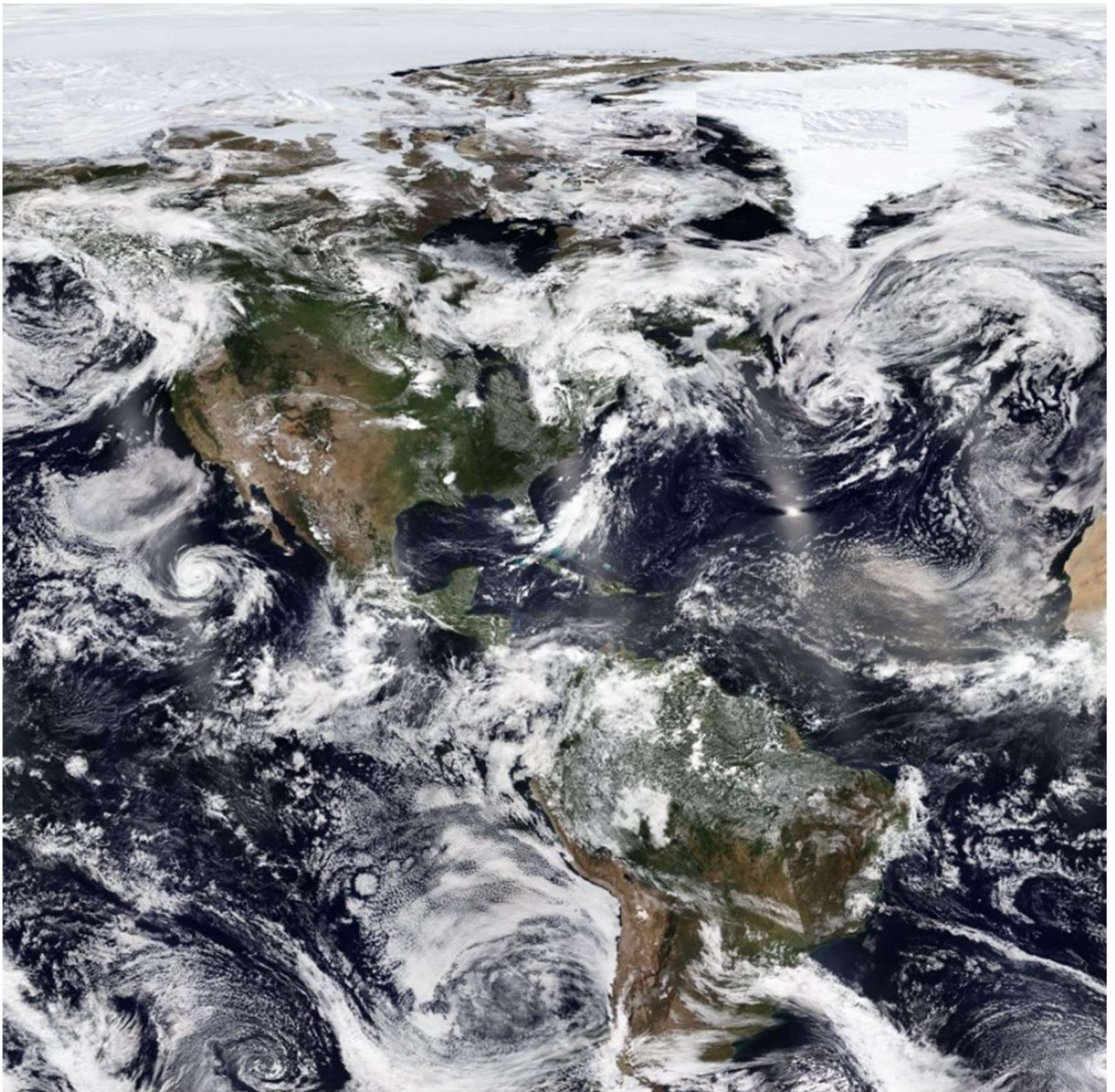


Рисунок 3.7 – Оптичний знімок з супутника високої роздільної здатності [11].

Декілька недоліків оптичних зображень:

- **Залежність від погодних умов та освітлення.** Хмари, туман або відсутність світла (вночі) заважають оптичній системі приймати зображення. Цей недолік відкидає можливість постійного моніторингу та інспектування певних зон.
- **Обмежена проникаюча здатність.** Оптичні зображення не можуть проникнути крізь щільну рослинність, ґрунт чи інші матеріали, що обмежує їх використання під час дослідження надр. Тому це не дуже ефективно для геологічних та археологічних досліджень.

Вибір між SAR та оптичним зображенням залежить від конкретного завдання та умов. РСА-зображення необхідні в ситуаціях, коли потрібна висока роздільна здатність і прозорість незалежно від погодних умов і часу доби. Оптичне зображення в свою чергу є більш інтуїтивно зрозумілим і економічно ефективним для різноманітних застосувань, особливо в умовах ясного неба.

3.2 Приклади вирішення прикладних задач

Радіолокаційні зображення з синтезованою апертурою мають широкий спектр застосувань у вирішенні прикладних задач у різних галузях. Ось кілька детальних прикладів таких застосувань:

1. **Моніторинг землетрусів і зсувів.** В Італії зображення РСА використовувалися для аналізу поверхневих зсувів після землетрусу в Авілі в 2009-му році. Вченим вдалося точно визначити територію, де стався зсув, що допомогло в оцінці збитків і плануванні відновлення. Завдяки інтерферометричному SAR(InSAR), SAR може виявляти навіть невеликі зміни на земній поверхні. Це досить важливо для раннього виявлення зсувів і запобігання катастрофам.
2. **Моніторинг льодовиків і полярних зон.** У Гренландії та Антарктиді знімки SAR використовуються для моніторингу руху та товщини льодовиків. Європейське космічне агенство (ESA) використовує дані спутника Sentinel 1, щоб відстежувати зміни в льодовиках і оцінювати їх вплив на рівень моря.

3. **Моніторинг лісових пожеж.** Коли в Каліфорнії сталася велика лісова пожежа, для оцінки масштабу збитків використовувалися зображення SAR. Ці зображення допомогли рятувальникам краще спланувати свої операції та визначити нові джерела вогню. Саме через те, що РСА зображення можуть проникати скрізь дим і виявляти зміни в структурі рослинності, це дозволило швидко оцінити стан лісових насаджень під час і після пожежі.
4. **Моніторинг інфраструктури.** У Японії цей вид зображень використовували для оцінки стану дамб і мостів після землетрусу та цунамі 2011 року. Висока роздільна здатність SAR дозволила виявити пошкодження інфраструктури, які не видно на традиційних оптичних зображеннях. Це дозволяє детально аналізувати стан великих інфраструктур і може виявити навіть найменші деформації.
5. **Моніторинг нафтових розливів у морі.** Під час розливу нафти в Мексиканській затоці 2010-го року, зображення РСА допомогли виявити масштаб нафтової плями та оцінити її розмір. Ці дані використовувалися для координації заходів та реагування на катастрофи.
6. **Картографування та моніторинг міських територій.** Великі міста, такі як Токіо та Нью-Йорк, використовують даний тип зображень для моніторингу змін у розвитку міст. Це може допомогти скерувати розвиток міст і визначити небезпечні зони, схильні до зсувів і повеней.
7. **Моніторинг сільськогосподарських угідь.** В Індії SAR-зображення використовуються для оцінки вологості ґрунту та здоров'я врожаю, щоб допомогти фермерам приймати обґрунтовані рішення щодо зрошення та використання добрив. Зображення надають інформацію про вологість ґрунту та стан рослинності.

8. **Археологічні дослідження.** У Єгипті та Ірані знімки SAR використовуються для виявлення підземних руїн. Це дозволяє археологам виявити нові споруди, приховані під піском та рослинністю.
9. **Військова розвідка та безпека.** У багатьох країнах, наприклад у Сполучених Штатах та Ізраїлі, зображення SAR використовуються для спостереження за військовими цілями та виявлення підозрілої діяльності. Це допомагає забезпечити національну безпеку та планувати військові дії.



Рисунок 3.8 - Розлив нафти на узбережжі Мексиканської затоки в 2010 році [12].

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РСА-ЗОБРАЖЕННЯ

Безпосередньо перед представленням математичної моделі формування РСА-зображення, необхідно пройти через основні етапи, а саме: генерація сигналу, відбиття і прийом сигналу, обробка сигналу та формування кінцевого зображення. Обробка сигналу в свою чергу проходить через два етапи: обробку по дальності та обробку по азимуту. Основні кроки для представлення математичної моделі:

1) Генерація та передача сигналу

Переданий радаром сигнал часто є лінійно частотно-модульованим [13]:

$$s(t) = A \cdot \exp(j(2\pi f_0 t + \pi K t^2))$$

де:

A- амплітуда сигналу

f_0 - початкова частота

K - коефіцієнт частотної модуляції

t - час.

2) Прийом відбитого сигналу

Відбитий сигнал буде затриманий на час τ , який залежить від відстані R до об'єкту [14]:

$$r(t, \tau) = A \cdot \exp(j(2\pi f_0(t - \tau) + \pi K(t - \tau)^2))$$

де:

$\tau = \frac{2R}{c}$ - затримка сигналу

c - швидкість світла

R - відстань до об'єкту

3) Обробка по дальності

Обробка по дальності виконується за допомогою дискретного перетворення Фур'є для кожної лінії дальності [15]:

$$R_f(f) = F\{r(t, \tau)\} = \int r(t, \tau) \cdot \exp(-j2\pi f t) dt$$

де:

F - оператор перетворення Фур'є

4) Обробка по азимуту

Обробка по азимуту виконується шляхом компенсації доплерівського зсуву та застосуванням зворотного перетворення Фур'є:

Доплерівська компенсація:

Доплерівський зсув для кожного відбиття:

$$f_D = \frac{2v_r f_0}{c}$$

де:

v_r - радіальна швидкість

Корекція доплерівського зсуву [16]:

$$R_{fc}(f, \eta) = R_f(f) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{v_r f_0}{c} \eta\right)$$

Зворотне перетворення Фур'є по азимуту:

$$I(x, y) = F^{-1}\{R_{fc}(f, \eta)\}$$

де:

F^{-1} - оператор зворотного перетворення Фур'є

η - час по азимуту.

Синтезування РСА-зображення в MATLAB.

Для початку необхідно задати параметри, а саме: швидкість світла, початкову частоту, довжину хвилі, ширину смуги, час імпульсу, коефіцієнт частотної модуляції, амплітуду сигналу та радіальну швидкість.

Задаємо параметри

```
c = 3e8; % Швидкість світла  
f0 = 5e9; % Центральна частота радарного сигналу (5 ГГц)  
lambda = c / f0; % Довжина хвилі сигналу  
B = 20e6; % Ширина смуги (20 МГц)  
T = 1e-6; % Тривалість імпульсу (1 мкс)  
K = B / T; % Коефіцієнт частотної модуляції  
A = 1; % Амплітуда сигналу  
v_r = 30; % Швидкість радару (30 м/с)
```

Далі задаємо бажані розміри РСА - зображення:

```
points_antenna = 128; % Кількість точок на антені  
points_time = 256; % Кількість часових точок
```

Розраховуємо кроки для рівномірного розподілу точок:

```
step_antenna = 2000 / points_antenna; % Крок на антені  
step_time = T / points_time; % Крок по часу
```

Задаємо координати радару:

```
x_radar = linspace(-3500, 3500, points_antenna); % Вздож  
осі x  
y_radar = zeros(size(x_r)); % Вздож осі y (не рухається)  
z_radar = zeros(size(x_r)); % Вздож осі z (не рухається)
```

Задаємо координати цілі та часові інтервали:

```
x_target = 0; % Вздож осі x  
y_target = 1000; % Вздож осі y  
z_target = 0; % Вздож осі z
```

```
t = linspace(-T/2, T/2, points_time); % Часові точки для  
генерації сигналу
```

Виконуємо саму генерацію переданого сигналу:

```
s = A * exp(1j * (2 * pi * f0 * t + pi * K * t.^2));
```

Далі виконуємо моделювання відбитого сигналу:

```
R = sqrt((x_radar - x_target).^2 + (y_radar - y_target).^2 +  
(z_radar - z_target).^2);  
Tau = 2 * R / c;  
r = zeros(length(x_radar), length(t));  
for i = 1:length(x_radar)  
    r(i, :) = A * exp(1j * (2 * pi * f0 * (t - Tau(i)) + pi  
* K * (t - Tau(i)).^2));  
end
```

Виконання двох основних етапів обробки сигналу, а саме по дальності та по азимуту:

Обробка по дальності:

```
R_f = fft(r, [], 2);
```

Доплерівська компенсація:

```
Eta = linspace(-T/2, T/2, length(x_radar));  
F_D = 2 * v_r * f0 / c;  
R_fc = R_f .* exp(1j * 2 * pi * F_D * Eta.');
```

Та обробка по азимуту шляхом зворотного перетворення Фур'є:

```
I = ifft(R_fc, [], 1);
```

Останнім етапом являється безпосередньо візуалізація РСА-зображення:

```

figure;
imagesc(abs(I));
colormap('gray');
colorbar;
title('РСА-зображення');
xlabel('X координата');
ylabel('Часова координата');

```

В результаті за допомогою математичної моделі на основі алгоритму Ренгінгова, виконано синтезування РСА- зображення:

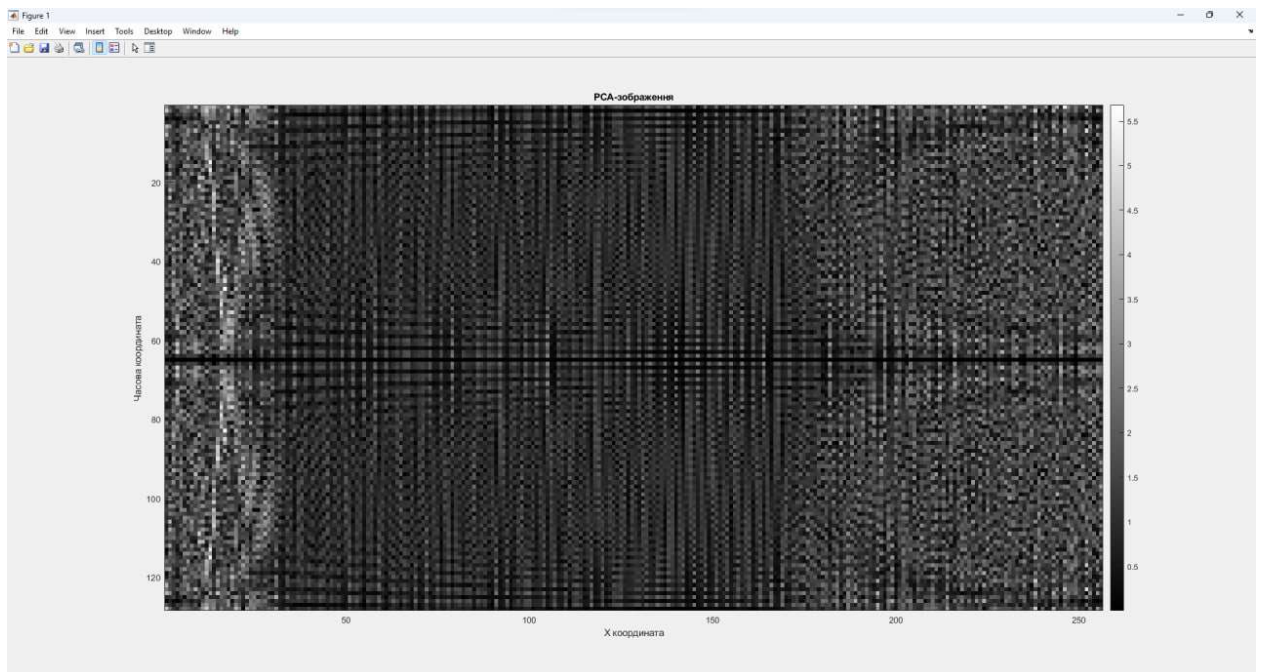


Рисунок 4.1 – Змодельоване РСА-зображення в MATLAB.

5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОТВОРЕННЯ РСА-ЗОБРАЖЕННЯ СПЕКЛ-ШУМОМ

Спекл-шум є важливим спотворенням радарних зображень із синтезованою апертурою. Це мультиплікативний шум, що виникає внаслідок когерентної інтерференції хвиль, відбитих від безліч дрібних розсіювачів в межах одного пікселя зображення. Спекл-шум може мати значний вплив на якість зображення, ускладнюючи аналіз та інтерпретацію даних.

Математична модель спекл-шуму.

До прикладу математична модель, що описує формування РСА-зображення з урахуванням спекл-шуму:

Припустим, що $I(x, R)$ - це інтенсивність сигналу в точці з координатами (x, R) без шуму. Виходить модель спекл-шуму можна описати таким чином [17]:

$$I_s(x, R) = I(x, R) \cdot S(x, R)$$

де:

$I_s(x, R)$ - інтенсивність сигналу в точці (x, R) з урахуванням спекл-шуму

$S(x, R)$ - мультиплікативний спекл-шум.

Безпосередньо спекл-шум має декілька властивостей, наприклад:

мультиплікативність - тобто він масштабує інтенсивність кожного пікселя зображення,

статистична незалежність - тобто сам шум для різних пікселей вважається статистично незалежним,

розподіл - спекл-шум часто моделюється як випадкова величина з розподілом Райса або, для сильної когерентності, з експоненційним розподілом амплітуд.

Модель спекл-шуму може бути створена з використанням комплексного гауссівського шуму, який потім перетворюється у магнітуду для отримання розподілу Райса.

Реалізація моделі спекл-шуму з застосуванням його до зображення.

Генеруємо початкове РСА-зображення без шуму:

```
I = abs(I); % Інтенсивність без шуму беремо як абсолютне  
значення комплексного сигналу.
```

Далі генеруємо сам спекл-шум:

```
spec_noise = abs(sqrt(0.5) * (randn(size(I)) + 1i *  
randn(size(I)))); % Генеруємо комплексний гаусівський шум, що  
має середнє значення 0 та дисперсію 1. Абсолютне значення  
віднімається для отримання експоненціального розподілу.
```

Застосовуємо спекл-шум до початкового зображення:

```
I_s = I .* spec_noise;
```

Та виводимо зображення з доданим спекл-шумом:

```
figure;  
imagesc(I_s);  
colormap('gray');  
colorbar;  
title('РСА-зображення зі спекл-шумом');  
xlabel('X координата');  
ylabel('Дальність');
```

Результат:

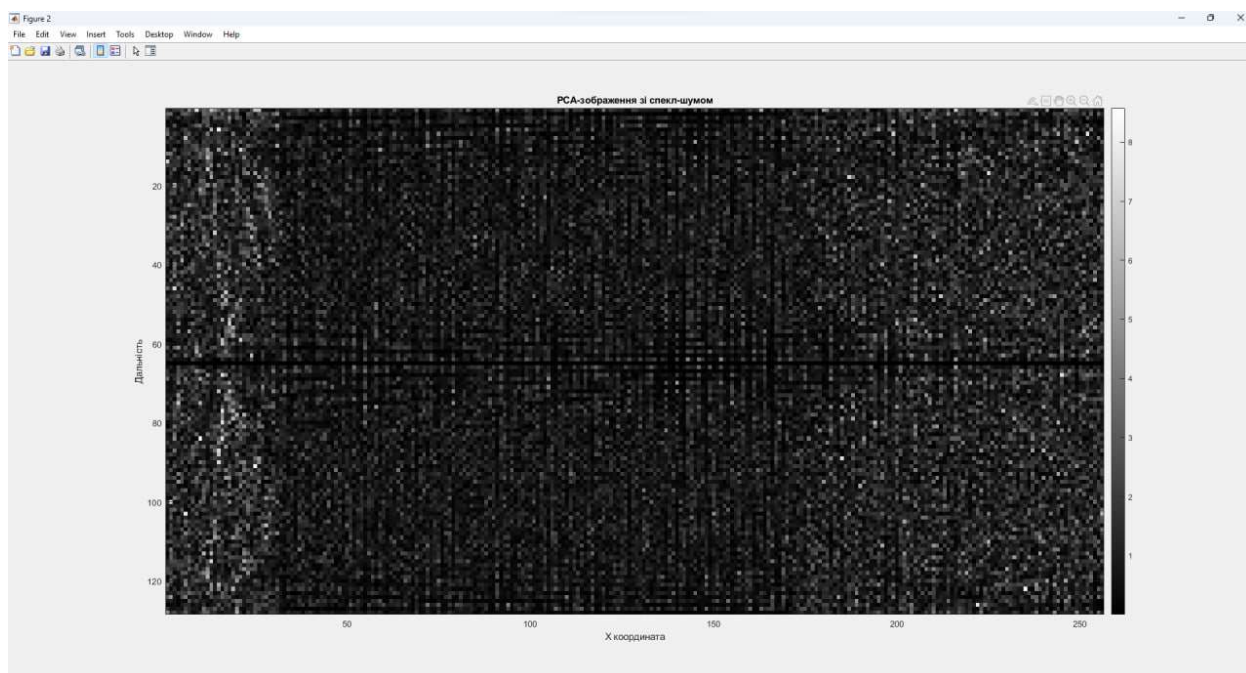


Рисунок 5.1 – РСА-зображення з застосуванням спекл шуму.

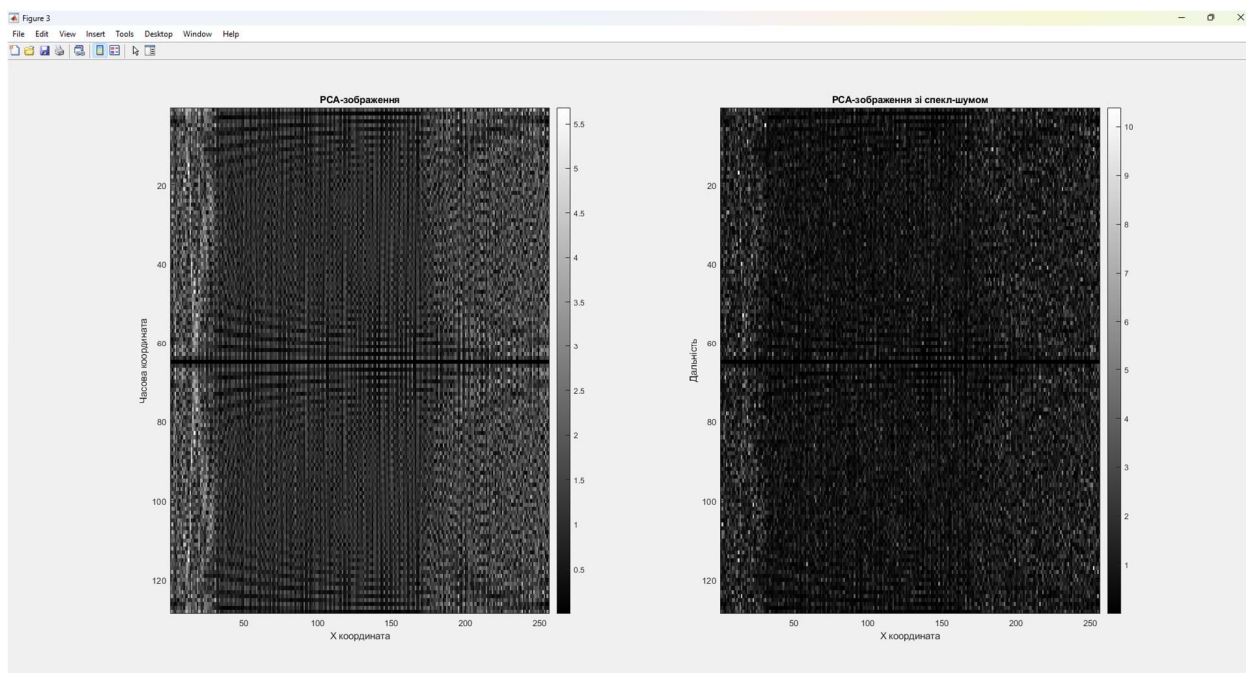


Рисунок 5.2 – Порівняння РСА-зображення без спекл-шуму та з шумом.

6 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ СПЕКЛ-ШУМУ

Існує декілька методів придушення спекл-шуму. Кожен з них має свої плюси та мінуси. До прикладу з найбільш поширених методів [18]:

- 1) Фільтрація в просторі зображень
- 2) Адаптивна фільтрація
- 3) Вейвлетна обробка
- 4) Non-Local Means(NLM).

Більш детально про кожен з них:

6.1 Фільтрація в просторі зображень

Дані методи засновані на прямій обробці пікселів зображення в просторі зображення.

- **Медіанний фільтр.** Використовує ковзаюче вікно , яке обчислює медіану значень пікселів у цьому вікні, та добре підходить для зменшення імпульсних шумів.

З переваг у даного фільтра являється проста реалізація та ефективне видалення імпульсного шуму. Але інколи може розмивати краї та деталі зображення.

Математичний вираз [19]:

$$I_s(x, y) = \text{median}\{I(x + i, y + j), (i, j) \in W\}$$

де W - вікно фільтрації, $\text{median}\{\}$ - медіанна функція.

- **Гауссів фільтр.** Використовує ковзаюче вікно з вагами, що мають гауссів розподіл та плавно зменшує шум, зберігаючи більш детальну структуру.

З переваг у даного фільтра це збереження більшої частини структури зображення порівняно з медіанним фільтром. Але він може залишати деякий шум.

Математичний вираз [20]:

$$I_s(x, y) = \sum_{(i,j) \in W} \omega(i, j) \cdot I(x + i, y + j)$$

де $\omega(i, j)$ - гауссова функція

$$\omega(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right)$$

6.2 Адаптивна фільтрація

Адаптивні методи змінюють свої параметри безпосередньо від локальних характеристик зображення.

- **Адаптивний фільтр Вінера.** Використовує локальну статистику пікселів для визначення оптимальних коефіцієнтів фільтрації та працює краще в областях з різними рівнями шуму.

З переваг: враховує локальні властивості зображення та ефективний для широкого діапазону рівнів шумів. Але в порівнянні з фільтрами в просторі зображень має складнішу реалізацію.

Математичний вираз [21]:

$$I_s(x, y) = I_c(x, y) + \frac{\sigma_I^2(x, y) - \sigma_n^2}{\sigma_I^2(x, y)} \cdot (I(x, y) - I_c(x, y))$$

де $I_c(x, y)$ - середнє значення вікна навколо пікселя (x, y) ,

$\sigma_I^2(x, y)$ - дисперсія вікна навколо пікселя (x, y) ,

σ_n^2 - дисперсія шуму.

6.3 Вейвлетна обробка

Цей метод використовує багатомасштабні представлення для зменшення шуму [22].

- **Вейвлетна декомпозиція та порогова обробка.** Зображення декомпонується на вейвлетні коефіцієнти. Низькі вейвлетні коефіцієнти, які ймовірно є шумом, обнулюються або зменшуються.

На рахунок переваг, це ефективне видалення шуму при збереженні важливих деталей зображення. Але параметри порогової обробки можуть бути складними для налаштування.

Математичний вираз:

1) Вейвлетна декомпозиція [23]:

$$f(x) = \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} c_{m,n}(f) \psi_{m,n}(x)$$

2) Порогова обробка

3) Відновлення зображення:

$$I_s = \sum_k c_k^\circ \psi_k$$

де c_k° - порогово оброблений коефіцієнт.

6.4 Non-Local Means(NLM)

Кожен піксель фільтрується з використанням зваженого середнього значення схожих пікселів у великій області.

На рахунок переваг: досить добре зберігає структуру та деталі зображення та ефективно знижує рівень шуму. Але має досить високу обчислювану складність ∴.

Математичний вираз [24]:

$$I_s(x, y) = \frac{1}{Z(x, y)} \sum_{(i, j)} \omega((x, y), (i, j)) \cdot I(i, j)$$

де $\omega((x, y), (i, j))$ - вагова функція, яка визначає схожість між пікселями (x, y) та (i, j)

$$\omega((x, y), (i, j)) = \exp\left(-\frac{\|I_P(x, y) - I_P(i, j)\|^2}{h^2}\right)$$

де $I_P(x, y)$ та $I_P(i, j)$ - області навколо пікселів (x, y) та (i, j)

h - параметр згладжування

$Z(x, y)$ - нормувальний фактор

$$Z(x, y) = \sum_{(i, j)} \omega((x, y), (i, j))$$

7 МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Для подальшого аналізу було обрано 2 методи (3 фільтри), які використовуються для придушення спекл-шуму, а саме: фільтрація в просторі зображень (медіанний фільтр та Гауссів фільтр), та адаптивна фільтрація (адаптивний фільтр Вінера).

Реалізація цих методів в Матлабі:

Використовую те ж саме зображення зі спекл-шумом з попереднього прикладу.

Використовуємо медіанний фільтр:

```
I_s_median = medfilt2(abs(I_s), [5 5]); % Застосовуємо  
медіанний фільтр до кожного пікселя зображення.
```

Далі Гауссів фільтр:

```
h = fspecial('gaussian', [5 5], 1); % Створюємо Гауссів фільтр  
з стандартним відхиленням Гауссівського розподілу 1.
```

```
I_s_gaussian = imfilter(abs(I_s), h); % Застосовуємо створений  
фільтр до амплітудного зображення.
```

Та адаптивний фільтр Вінера:

```
I_s_wiener = wiener2(abs(I_s), [5 5]); % Застосовуємо  
адаптивний фільтр Вінера до зображення.
```

Та візуалізуємо кожен з методів:

```
% Медіанний фільтр
```

```
figure;
```

```
imagesc(I_s_median);
```

```
colormap('gray');
```

```
colorbar;  
title('Після медіанного фільтра');  
  
% Гауссів фільтр  
figure;  
imagesc(I_s_gaussian);  
colormap('gray');  
colorbar;  
title('Після гауссового фільтра');  
  
% Фільтр Вінера  
figure;  
imagesc(I_s_wiener);  
colormap('gray');  
colorbar;  
title('Після фільтра Вінера');
```

Отримуємо результат придушення спекл-шуму медіанним, гауссовим фільтром та фільтром Вінера відповідно.(рис.7.1, 7.2, 7.3)

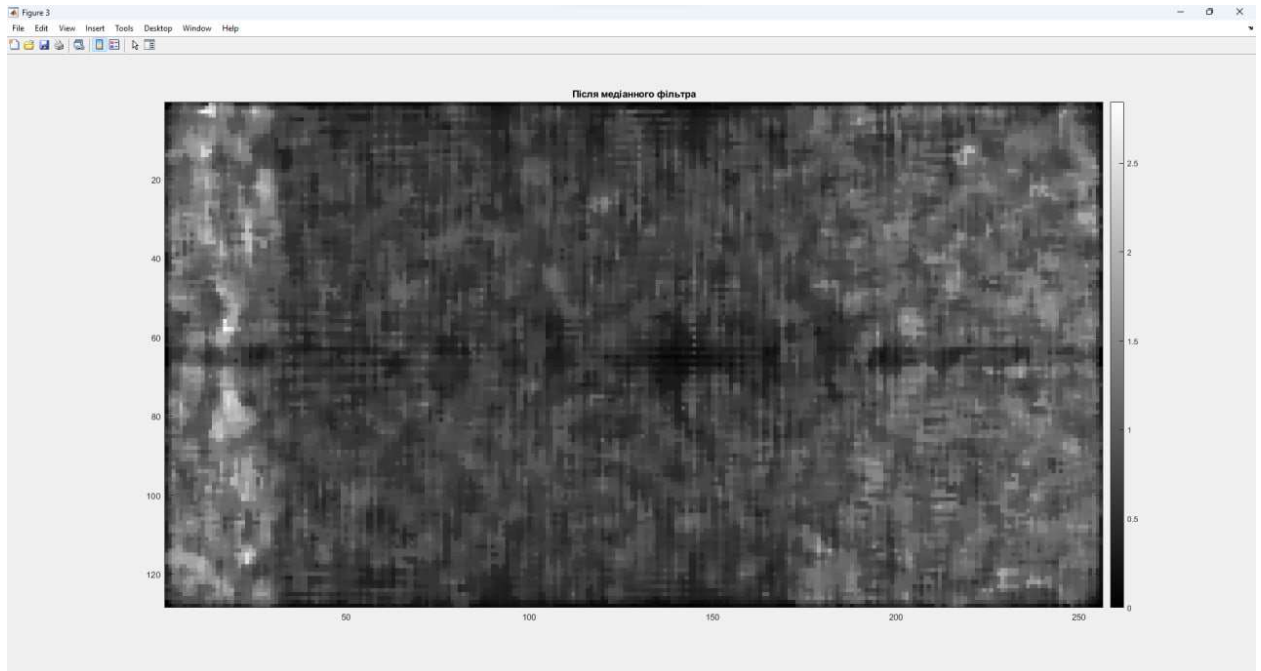


Рисунок 7.1 – РСА-зображення зі спекл-шумом після застосування медіанного фільтра.

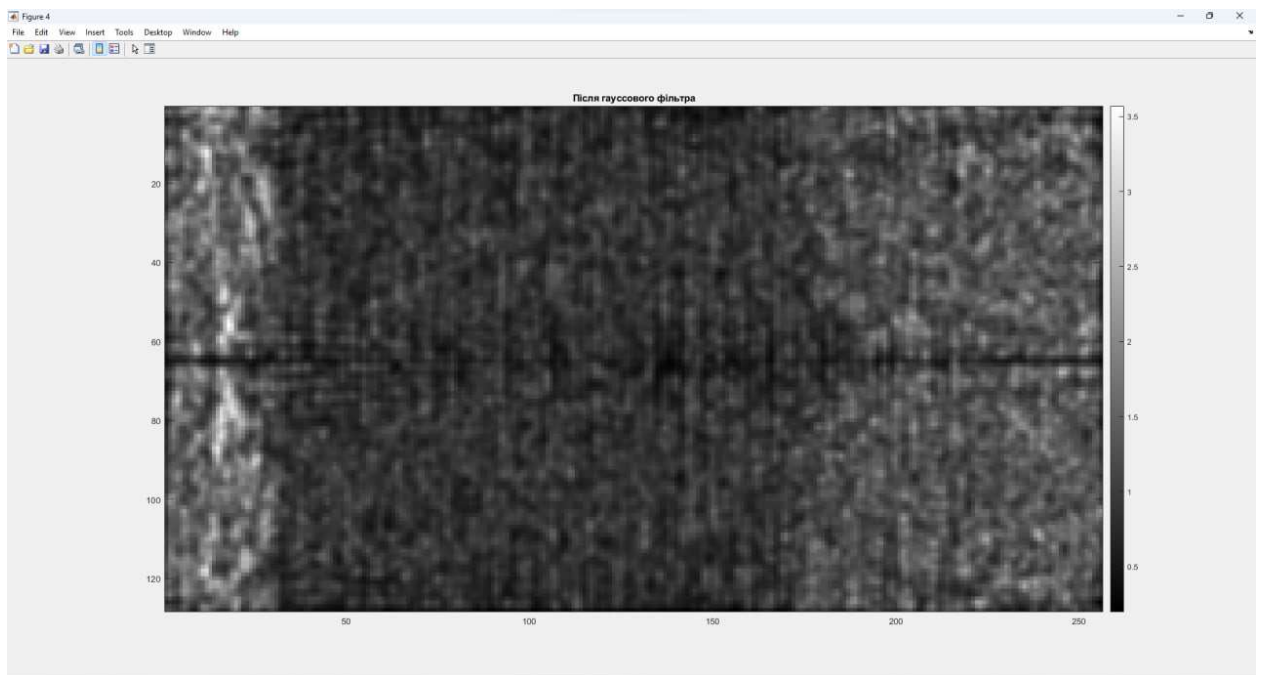


Рисунок 7.2 – РСА-зображення зі спекл-шумом після застосування гауссового фільтра.

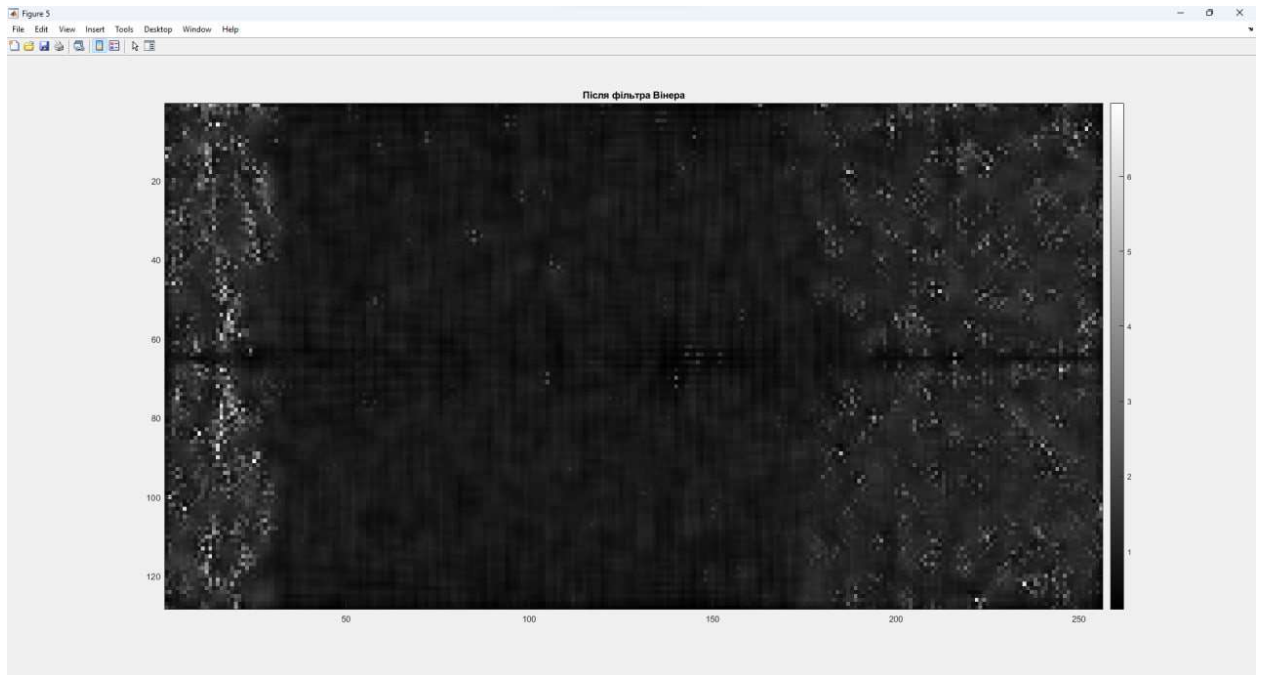


Рисунок 7.3 – PCA-зображення зі спекл-шумом після застосування фільтра Вінера.

Для оцінки ефективності фільтрації обраними методами, використовуємо значення середньоквадратичної похибки (MSE) та пікове відношення сигнал/шум (PSNR).

Середньоквадратична похибка (MSE).

Середньоквадратична похибка (Mean Squared Error) – це показник середньої похибки між двома зображеннями: вихідним зображенням і відфільтрованим. MSE розраховується за такою формулою:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - K(i,j)]^2$$

де:

- $I(i,j)$ – інтенсивність пікселя на позиції (i,j) в оригінальному зображенні.
- $K(i,j)$ – інтенсивність пікселя на позиції (i,j) в фільтрованому зображенні.
- M і N – розміри зображення.

MSE вимірює середню величину квадрату різниці між відповідними пікселями двох зображень. Нижче значення MSE свідчить про меншу кількість спотворень, тобто кращу якість фільтрації.

Пікове відношення сигнал/шум (PSNR)

PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) – це міра якості відновленого зображення в порівнянні з вихідним. PSNR розраховується за такою формулою:

$$PSNR = 10 * \log_{10}(\frac{MAX^2}{MSE})$$

де:

- MAX – максимальне можливе значення пікселя зображення.
- MSE – середньоквадратична похибка.

PSNR вимірює відношення між максимальною можливою потужністю сигналу і потужністю спотворюючого шуму. Вищі значення PSNR свідчать про кращу якість фільтрації, тобто менше шуму і спотворень.

Реалізація оцінок MSE та PSNR для трьох фільтрів:

% Оцінка ефективності фільтрації за допомогою MSE

```
median_mse = immse(abs(I), I_s_median); % Обчислюємо  
середньоквадратичну похибку між оригінальним зображенням  
abs(I) та зображенням після медіанного фільтрування  
I_s_median.
```

```
gaussian_mse = immse(abs(I), I_s_gaussian); % Те саме, але для  
зображення після Гауссівського фільтрування I_s_gaussian.
```

```
wiener_mse = immse(abs(I), I_s_wiener); % Те саме, але для  
зображення після фільтру Вінера I_s_wiener.
```

% Оцінка ефективності фільтрації за допомогою PSNR

```
median_psnr = psnr(abs(I), I_s_median); % Обчислюємо пікове  
відношення сигнал/шум між оригінальним зображенням abs(I) та  
зображенням після медіанного фільтрування I_s_median.  
gaussian_psnr = psnr(abs(I), I_s_gaussian); % Те саме, але для  
зображення після Гауссівського фільтрування I_s_gaussian.  
wiener_psnr = psnr(abs(I), I_s_wiener); % Те саме, але для  
зображення після фільтру Вінера I_s_wiener.
```

% Виведення значення MSE і PSNR для кожного з фільтрів у консоль.

```
disp(['Медіанний фільтр має значення: MSE = ',  
num2str(median_mse), ', PSNR = ', num2str(median_psnr)]);  
disp(['Гаусівський фільтр має значення: MSE = ',  
num2str(gaussian_mse), ', PSNR = ',  
num2str(gaussian_psnr)]);  
disp(['Фільтр Вінера має значення: MSE = ',  
num2str(wiener_mse), ', PSNR = ', num2str(wiener_psnr)]);
```

Результати виведені в консоль:

```
Медіанний фільтр має значення: MSE = 0.61852, PSNR = 2.0864  
Гаусівський фільтр має значення: MSE = 0.4092, PSNR = 3.8806  
Фільтр Вінера має значення: MSE = 0.41416, PSNR = 3.8283
```

Після оцінки бачимо результат: Гауссів фільтр має найменше значення середньоквадратичної похибки (0.4092), та найбільше пікове відношення сигнал/шум (3,8806) серед інших фільтрів, тому являється оптимальним фільтром серед обраних для подавлення спекл-шуму на PCA-зображенні.

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі:

Показана актуальність та необхідність використання РСА-зображення в різних сферах, та переваги використання даного виду зображень при різних умовах.

Розглянуто фізичні основи появи спекл-шуму на РСА-зображенні та приведено приклади реальних зображень які отримуються в системах дистанційного зондування земної поверхні за допомогою супутників та інших літальних апаратів. Наведені сфери практичного застосування РСА-зображень та виділені переваги та недоліки порівняно із оптичним зображенням.

Виконана математична модель представлення РСА-зображення та за допомогою даної моделі виконано синтезування даного зображення в середовищі Matlab. В тому числі виконано моделювання математичної моделі спотворення зображення спекл-шумом.

Проведено аналіз методів які застосовуються для придушення спекл-шуму. Обрано 3 фільтри для подальшого аналізу шляхом проведення моделювання та надано математичні вирази, які описують відповідні алгоритми фільтрації.

Виконано моделювання та проведено дослідження фільтрації цими методами. Таким чином обрано кращий фільтр серед виділених, який допомагає боротись з спекл-шумом на РСА-зображенні, що являється досить актуальною задачею для багатьох країн світу в різних сферах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Перспективні сфери застосування технології SAR [Електронний ресурс] : <https://dragonflyaerospace.com/seven-applications-of-sar/>
2. Демістифікація супутникових даних SAR в ArcGIS Pro: Sentinel-1 [Електронний ресурс] : <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/imagery/demystifying-sar-satellite-data-in-arcgis-pro-sentinel-1/>
3. Фото та характеристики супутника Sentinel-1 [Електронний ресурс]: <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/sentinel-1/>
4. Зображення трьох типів розсіювання (дзеркальне відбиття, подвійне відбиття та дифузне розсіювання) [Електронний ресурс]: <https://gisgeography.com/synthetic-aperture-radar-examples/>
5. Зразок зображення гранули. Частина гори Синього хребта у Вірджинії 2008 року. [Електронний ресурс]: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/how-to-view-and-geocode-ceos-data-in-asf-mapready/>
6. Ця серія зображень із спектро радіометра середньої роздільної здатності (MODIS) на супутнику NASA Terra [Електронний ресурс]: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/AralSea>
7. Берингів льодовик на Алясці. Різке потемніння та освітлення відбуваються протягом сезонів залежно від вологості поверхні льодовика. [Електронний ресурс]: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-tools/data-tools/#mapready>
8. Частина хребта Аляска в національному парку Деналі [Електронний ресурс]: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/how-to-view-radiometrically-terrain-corrected-rtc-images-in-qgis/>
9. Кількість світла, випромінюваного центром міста Антак'я та навколишніми громадами до та після землетрусу [Електронний ресурс]: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151029/dark-nights-in-antakya>

10. Goodison, B. et al. 2007 State and fate of the polar cryosphere, including variability of the Arctic hydrologic cycle. WMO Bulletin; Jezek, K.C., Farness, K. & Drinkwater, M. 2007 Global Interagency IPY Polar Snapshot Year: Goals and Accomplishments. In: EGU Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 01444, Vienna p. 7 [Електронний ресурс]: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/SRT_IPY-Drinkwater_Jezek_Key.pdf
11. Оптичний знімок з супутника високої роздільної здатності [Електронний ресурс]: [https://worldview.earthdata.nasa.gov/?v=-225.4714181321778,-56.818805840145124,78.39116543888683,92.73855951123824&l=Reference_Labels_15m\(hidden\),Reference_Features_15m\(hidden\),Coastlines_15m\(hidden\),VIIRS_NOAA20_CorrectedReflectance_TrueColor,VIIRS_SNPP_CorrectedReflectance_TrueColor\(hidden\),MODIS_Aqua_CorrectedReflectance_TrueColor\(hidden\),MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor\(hidden\)&lg=false&t=2020-07-11-T16%3A36%3A51Z](https://worldview.earthdata.nasa.gov/?v=-225.4714181321778,-56.818805840145124,78.39116543888683,92.73855951123824&l=Reference_Labels_15m(hidden),Reference_Features_15m(hidden),Coastlines_15m(hidden),VIIRS_NOAA20_CorrectedReflectance_TrueColor,VIIRS_SNPP_CorrectedReflectance_TrueColor(hidden),MODIS_Aqua_CorrectedReflectance_TrueColor(hidden),MODIS_Terra_CorrectedReflectance_TrueColor(hidden)&lg=false&t=2020-07-11-T16%3A36%3A51Z)
12. Розлив нафти на узбережжі Мексиканської затоки в 2010 році [Електронний ресурс]: <https://appliedsciences.nasa.gov/our-impact/story/seeing-deepwater-horizon-oil-spill-space#:~:text=When%20the%20Deepwater%20Horizon%20drilling,towards%20the%20northern%20Gulf%20Coast.>
13. Periodic-Filtering Method for Low-SNR Vibration Radar Signal. By Yun Lin, Linghan Zhang, Yang Li and Yanping Wang.[Електронний ресурс] <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/14/3461>
14. Periodic-Filtering Method for Low-SNR Vibration Radar Signal. By Yun Lin, Linghan Zhang, Yang Li and Yanping Wang.[Електронний ресурс] <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/14/3461>
15. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation, Ian G. Cumming and Frank H. Wong. Range Processing p. 205 https://www.researchgate.net/profile/Ahmed-Azouz/post/Could_anyone_suggest_good_and_simple_reference_for_synthetic

[aperture_radar_SAR/attachment/623282a9d411a95e64e84e40/AS%3A1134416655056897%401647477415675/download/Digital+Processing+of+Synthetic+Aperture+Radar+Data_+Algorithms+and+Implementation-Artech+House+%282005%29.pdf](https://www.researchgate.net/publication/312061215_Speckle_noise_Modelling_and_implementation)

16. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation, Ian G. Cumming and Frank H. Wong. Azimuth Processing p. 208

https://www.researchgate.net/profile/Ahmed-Azouz/post/Could_anyone_suggest_good_and_simple_reference_for_synthetic_aperture_radar_SAR/attachment/623282a9d411a95e64e84e40/AS%3A1134416655056897%401647477415675/download/Digital+Processing+of+Synthetic+Aperture+Radar+Data_+Algorithms+and+Implementation-Artech+House+%282005%29.pdf

17. Speckle Noise: Modelling and Implementation. International Science Press. p. 8718. Formula 5

https://www.researchgate.net/publication/312061215_Speckle_noise_Modelling_and_implementation

18. Методи придушення спекл-шуму [Електронний ресурс]:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/4766994>

19. Digital Image Processing Rafael C. Gonzalez та Richard E. Woods. P.330 formula (5-27).

<https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>

20. Digital Image Processing Rafael C. Gonzalez та Richard E. Woods. P.167

<https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>

21. Rafael C. Gonzalez University of Tennessee Richard E. Woods Interapptics, 330 Hudson Street, New York, NY 10013, Digital Image Processing p. 358

<https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>

22. Ян, Ф.; Ю, З.; Ли, К. Адаптивний алгоритм зменшення спеків зображення SAR, заснований на непроріджуваному вейвлет-перетворенні, Пекін, Китай, 10–15 липня 2016 г. – С . 1030–1033.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7729261>
23. Wavelets: Mathematics and Applications. John J. Benedetto, Michael W. Frazier. P. 11
https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=tBVO3Fas_mYC&oi=fnd&pg=PP9&dq=wavelet+decomposition+mathematical+expression&ots=v52_alabnw&sig=QU9KLWH6d1_DwF4MCiR2mn_z6Ws&redir_esc=y#v=onepage&q=wavelet%20decomposition%20mathematical%20expression&f=false
24. Advances in Computer Science and Information Technology, Натараян Меганатан, В.К. Kaushik p. 291 formula (1).
https://www.google.com.ua/books/edition/Advances_in_Computer_Science_and_Informa/d8AaeYeLVK8C?hl=ru&gbpv=1&dq=Non-Local+Means+algorithm&pg=PA290&printsec=frontcover