

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Т. М. Плющ

**ОСНОВИ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

Конспект лекцій
для здобувачів першого (бакалаврського)
та другого (магістерського) рівнів вищої освіти
спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

Київ 2025

УДК 528.8
О-75

Рецензент О.В. Прохорчук, к-т техн. наук

*Затверджено на засіданні кафедри геоінформатики і
фотограмметрії, протокол № 2 від 28 серпня 2024 року.*

В авторській редакції

Плющ Т.М.

О-75 Основи дистанційного зондування [Електронний ресурс] :
конспект лекцій / Т.М. Плющ. – Київ : КНУБА, 2025. – 92 с

Розглянуто фізичні основи дистанційного зондування, засоби збору даних дистанційного зондування та принципи їх функціонування, методи дешифрування, попередньої обробки та автоматичної класифікації зображень, програмні засоби, для обробки даних.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій».

УДК 528.8

© Т.М. Плющ, 2025
© КНУБА, 2025

Зміст

ВСТУП	7
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	8
<i>Лекція 1. Поняття дистанційного зондування Землі. Коротка історія дистанційного зондування Землі.....</i>	8
1.1. Поняття дистанційного зондування Землі	8
1.2. Історичні етапи розвитку дистанційного зондування Землі	8
1.3. Стан та перспективи розвитку дистанційних методів дослідження Землі в Україні.....	10
<i>Лекція 2. Загальна модель дистанційного зондування Землі</i>	11
<i>Лекція 3. Фізичні основи дистанційного зондування.....</i>	13
3.1. Електромагнітне випромінювання	13
3.2. Електромагнітний спектр.....	14
3.3. Основні діапазони електромагнітного спектру	14
3.4. Закони випромінювання.....	16
3.5. Взаємодія з атмосферою. Розсіювання та поглинання	17
3.6. Взаємодія випромінювання з об'єктами на поверхні Землі	21
3.7. Дзеркальне та дифузне відбиття.....	22
3.8. Спектральна відбивна здатність матеріалів на поверхні землі... ..	23
3.8.1. Спектральне відбиття рослинності	24
3.8.2. Спектральне відбиття водних об'єктів.....	25
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ.....	27
<i>Лекція 4. Види дистанційного знімання</i>	27
4.1. Системи збору даних дистанційного зондування. Пасивні та активні системи	27
4.2. Кадрові системи	28
4.3. Скануючі оптико-електронні системи.....	28
4.4. Поперечний сканер (whisk broom)	29
4.5. Поздовжні сканери (pushbroom).....	30
4.6. Лінійні сканери.....	30
4.7. Панорамний лінійний сканер.....	31

4.8. Поперечний точковий сканер	32
4.9. Способи отримання стереозображень	32
4.10. Інфрачервоне (теплове) знімання.....	32
4.11. Система повітряного лазерного сканування	33
4.11.1. <i>Принципи діяльності LIDAR</i>	34
4.12. Використання даних повітряного лазерного сканування для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР)	36
4.13. Системи радіолокаційного знімання.....	37
4.13.1. <i>Принцип діяльності RADAR</i>	38
4.13.2. Радар бічного огляду (Side-Looking Airborne Radar, SLAR)..	38
4.13.3. <i>Радар з синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar, SAR)</i>	39
4.13.4. Поляризація випромінювання	40
4.13.5. <i>Спотворення радіолокаційного зображення</i>	41
4.14. Створення ЦМР за даними радіолокаційного знімання (інтерферометрична обробка).....	42
4.14.1. <i>Радарна інтерферометрія</i>	43
4.15. Створення ЦМР за даними радіолокаційного знімання (стерео обробка).....	45
4.16. Цифрова модель рельєфу SRTM	47
<i>Тема 5. Орбіти космічних носіїв та особливості дистанційного зондування</i>	47
5.1. Класифікація та параметри орбіт	47
5.2. Класифікації типів ШСЗ.....	51
5.3. Супутникові системи спостереження	52
5.4. Роздільна здатність систем ДЗ та частота збору даних	53
5.4.1. <i>Просторова роздільна здатність</i>	53
5.4.2. <i>Радіометрична роздільна здатність</i>	54
5.4.3. <i>Спектральна роздільна здатність</i>	55
5.4.4. <i>Темпоральна (часова) роздільна здатність</i>	55
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСНОВИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ	57
<i>Лекція 6. Суть дешифрування та інтерпретації знімків</i>	57

<i>Лекція 7. Попередня обробка космічних знімків</i>	59
7.1. Геометрична корекція космічних знімків	59
7.1.1. Геометричне трансформування зображень.....	61
7.1.2. Види трансформацій зображень.....	62
7.1.3. Методи ресемплінгу	63
7.1.4. Перетворення за допомогою раціональних поліномів.....	64
7.1.5. Оцінювання параметрів перетворення	66
7.1.6. Орторектифікація.....	68
7.2. Радіометрична корекція даних дистанційного зондування.....	68
7.2.1. Види радіометричної корекції.....	69
7.2.2. Радіометричне калібрування.	70
7.2.3. Атмосферна корекція знімків.....	70
7.2.4. Радіометрична нормалізація знімків	71
7.2.5. Топографічна корекція	72
7.3. Корекція помилок сенсору.....	73
7.4. Покращення зображення.....	73
7.4.1. Посилення контрасту знімків	74
7.4.2. Фільтрування зображень	75
7.5. Трансформація зображень	77
7.6. Аналіз головних компонент.....	78
<i>Лекція 8. Тематична обробка супутникових знімків</i>	79
8.1. Методи комбінування каналів	79
8.1.1. Панишарпенінг	82
8.2. Індексні зображення	82
8.3. Класифікація зображень.....	83
8.3.1. Методи класифікації	83
8.3.2. Оцінка точності класифікації.....	85
<i>Лекція 9. Програми для інтерпретації космічних знімків</i>	88
9.1. EO Browser.....	88
9.2. Google Earth Pro.....	88
9.3. Google Earth Engine.....	88
9.4. USGS Earth Explorer.....	89

9.5. Copernicus Data Space	89
9.6. QGIS	90
9.7. SNAP	90
9.8. Erdas Imagine	90
9.9. ArcGIS	91
9.10. ENVI.....	91
Список літератури.....	93

ВСТУП

Конспект лекцій підготовлено відповідно до розділів програми з навчальної дисципліни «Основи дистанційного зондування» освітньо-професійної програми КНУБА з підготовки здобувачів вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» та дисципліни «Дистанційне зондування Землі. Частина 1.» на другому (магістерському) рівні за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» спеціалізацій «Геоінформаційні системи і технології» та «Геодезія» для очної та заочної форм навчання.

Метою цього конспекту лекцій є поглиблення знань здобувачів з технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема теоретичних та фізичних основ функціонування цих методів, класифікації та принципу роботи систем збору даних, інтерпретації космічних знімків та розпізнаванню на них об'єктів місцевості, методів попередньої обробки зображень, класифікації та ознайомлення здобувачів з безкоштовним та комерційним програмним забезпеченням для обробки даних ДЗЗ.

Після вивчення даного курсу здобувач повинен вміти ефективно застосовувати теорії, принципи та технології ДЗЗ, здійснювати пошук необхідної інформації, обирати і застосовувати сучасні методи обробки, аналізу, оцінювання даних, обґрунтовувати вибір методів і технологій опрацювання даних ДЗЗ та їх використання.

До основних дисциплін, що сприятимуть засвоєнню матеріалів з курсу дистанційного зондування Землі, є фізика, інформатика та програмування, основи геодезії, основи картографії, основи фотограмметрії, технології цифрової фотограмметрії, технології фотограмметричних знімків.

Конспект складається з трьох змістових модулів, що містять дев'ять лекцій освітньої компоненти.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Лекція 1. Поняття дистанційного зондування Землі. Коротка історія дистанційного зондування Землі.

1.1. Поняття дистанційного зондування Землі

Дистанційне зондування (ДЗ) – це технологія, яка використовується для отримання інформації про об'єкти, ділянки поверхні або явища шляхом аналізу даних, що отримані на відстані без безпосереднього контакту з об'єктом.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це спостереження нашої планети за допомогою знімальних пристроїв, встановлених на космічних апаратах, що працюють на різних орбітах, та інших літальних об'єктах, яке дає змогу фіксувати зміни та визначати тенденції процесів, що відбуваються на поверхні Землі й над нею.

Об'єктом дослідження є різні типи об'єктів, кількісні та якісні характеристики, їх розподіл в просторі і часі, їх просторові та часові зв'язки.

ДЗЗ працює з електромагнітним випромінюванням природнім або штучним, яке фіксує від земної поверхні в межах від ультрафіолетового до радіохвильового діапазонів. Можливість прив'язати космічний знімок до конкретного місця земної поверхні, яку він відображає, у геодезичні проекцію та координати, зробила космічні знімки основним джерелом оперативних даних про поверхню Землі та застосовувати накопичені архіви знімків для аналізу змін місцевості у часі.

1.2. Історичні етапи розвитку дистанційного зондування Землі

Історія фотографії відраховує свій початок з появи поняття камери-обскура (лат. Camera obscura – «темна кімната»), яке згадується в працях Аристотеля (336-323 до н. е.), а в 90-х роках XV століття Леонардо да Вінчі дав детальний опис камери-обскури і застосовував її для замальовок з натури.

Дослідження Жозефа Нісефора Ньєпса і Луї Жака Манді Дагера 1827 – 1839 рр. привели до появи повноцінної фотографії.

1858р. – паризький фотограф Гаспар Фелікс Турнашон використав повітряну кулю для отримання зображення на висоті 80 м.

1859 р. Е. Лоссед розробив спосіб «розгортання» фотознімку, отриманого з повітряної кулі, в план. Він назвав цей спосіб метрофотографією, а в 1867 році термін набув свою теперішню назву «Фотограмметрія».

В 1907 році Ю. Нойброннер винайшов техніку аерофотознімання, яку називають голубина фотозйомка. Він сконструював для голуба алюмінієву нагрудну упряжку, до якої кріпиться мініатюрна фотокамера, що автоматично робила знімки через певні проміжки часу.

1900 рік став роком тріумфу братів Райт, в повітря піднявся їх перший в світі літак. Також Уілбер Райт вважається першою людиною, яка зробила фотографію з борта літака (1908 р.).

Значний розвиток аерофотозйомка отримала під час Першої світової війни 1914 – 1918 рр.

1919 році С. О. Хоффманом були зроблені перші повітряні знімки в інфрачервоному діапазоні.

По закінченню Першої світової війни, аерофотозйомка починає все більше використовуватися в цивільних цілях, зокрема в народному господарстві.

1934р. – початок використання військовими радарних систем.

1940р. – винахід кольорової фотографії. Використання невидимої частини спектру (головним чином інфрачервоної).

1945 р. був отриманий перший фотознімок земної поверхні з космосу. Зроблений він був за допомогою фотоапарата, встановленого на балістичну ракету Fau-2 (США, полігон White Sands).

4 жовтня 1957 року у СРСР був запущений «Супутник-1» – перший в світі штучний супутник Землі.

1958 р. запустили перший супутник Сполучених Штатів Америки Explorer-1.

1960 р. були отримані перші успішні фотографії з космосу за допомогою камер з плівковими кассетами, які скидалися на Землю в капсулах, а потім ловилися в повітряному просторі літаками.

1960-1970 р.р. – запуск метеорологічних супутників TIROS та Nimbus (США), Метеор (СРСР), Розроблення радіометру надвисокої роздільної здатності (VHRR).

1962р. – вперше використано термін дистанційне зондування «Remote sensing».

1972 р. – запуск супутника Landsat-1, початок неперервного архіву даних спостережень за поверхнею Землі.

1960-х і 1970-х роках почали переносити дистанційно-чутливі прилади з літаків на супутники. Супутники можуть покривати набагато більшу площу на земній поверхні, ніж літаки, і можуть регулярно контролювати зони зйомок.

Зображення стали цифровими, а не аналоговими. З'явилися датчики, які реєстрували поверхню Землі одночасно в декількох різних частинах електромагнітного спектра.

1986 р. запущений SPOT-1, перший із серії французьких багатоспектральних супутників.

1986р. – розроблення нового типу сенсорів – спектрометру.

1990-ті – Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) включає: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Галілео (Європа) і КОМПАСС (Китай).

Запуски шатлів в 1994 році, дозволили провести дослідження поверхні землі в розрізі екологічних, геологічних та інших наук, завдяки встановленій на них космічної радіолокаційної лабораторії.

1999 р. – супутник IKONOS перший супутник з роздільною здатністю 1м.

2007-2010 рр. зростає кількість запусків КА з радіолокаторами з високою роздільною здатністю;

1 грудня 2012 р. – запуск супутника Pleiades 1В, який дозволяє отримати знімки з роздільною здатністю до 0,5 м.

2013 р. – запуск Landsat-8;

2014 р. – Sentinel-1А нові можливості в області мікрохвильового випромінювання з повторним циклом в 12 днів.

2015-2017 рр. – Sentinel-2 зображення з середньою просторовою роздільною здатністю.

27 вересня 2021 р. – запуск супутника Landsat 9.

1.3. Стан та перспективи розвитку дистанційних методів дослідження Землі в Україні

У лютому 1992 року створено Національне космічне агентство України.

У серпні 1995 року українська ракета-носій «Циклон-3» вивела на орбіту перший вітчизняний КА «Січ-1», призначений для ДЗЗ.

Створено кілька відомчих організацій для ведення науково-прикладних досліджень у сфері ДЗЗ: Центр аерокосмічних досліджень Землі НАН України і Науково-виробничий центр «Природа» (Київ), Центр радіофізичного зондування Землі (Харків), підприємство «Дніпрокосмос» (Дніпро).

У 2002–2003 рр. НКАУ спільно з ДКБ «Південне», ЦАКДЗ та ДП «Дніпрокосмос» розроблений перший український національний стандарт з ДЗЗ «Дистанційне зондування Землі з космосу».

Протягом 2004–2010 років в Україні виконано великий об'єм наукових та науково-практичних досліджень з різних напрямків ДЗЗ.

Розроблена концепція Цільової науково-технічної космічної програми України на 2018–2022 роки: створення протягом десяти років власного угруповання апаратів ДЗЗ у складі 6–8 супутників різної роздільної здатності, які пролітають над територією в різний час доби з таким розрахунком, щоб можна було отримати оперативну, якісну та неупереджену інформацію. [1]

Лекція 2. Загальна модель дистанційного зондування Землі

Суть методу дистанційного зондування є інтерпретація результатів вимірів електромагнітного випромінювання, яке відбивається або випромінюється об'єктом та реєструється в деякій віддаленій від нього точці простору.

На рис. 1 зображено загальну схему роботи методів дистанційного зондування Землі.

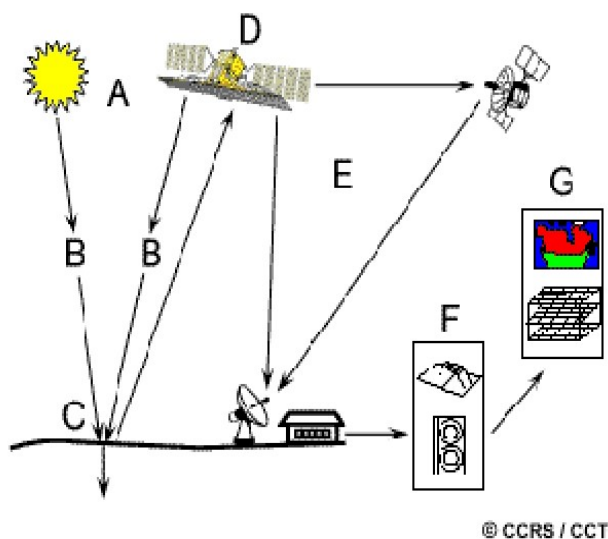


Рис.1. Схема процесу дистанційного зондування [15]

Електромагнітне випромінювання (A). Основна вимога до дистанційного зондування – мати джерело енергії, яке освітлює чи випромінює електромагнітну енергію до об'єкту інтересу.

Взаємодія з атмосферою (B). На шляху від джерела до об'єкту енергія контактує з атмосферою, через яку проходить. Ця взаємодія відбувається двічі поки енергія проходить від сенсора до об'єкту та назад.

Взаємодія з об'єктами (C). Випромінювання, яке не було поглинуте чи розсіяне атмосферою, може досягнути поверхні Землі та взаємодіяти з нею. Є три форми взаємодії: поглинання, передавання та відбиття.

Запис енергії сенсором (D). Щоб датчик збирав і записував енергію, відбиту або випромінювану від цілі або поверхні, він повинен знаходитися на стійкій платформі, віддаленій від цілі або поверхні, за якою спостерігають. Платформи для дистанційних датчиків можуть бути розташовані на землі, на літаку чи повітряній кулі (або іншій платформі в атмосфері Землі), або на космічному кораблі чи супутнику за межами атмосфери Землі.

Передача, прийом та оброблення (E). Енергія, записана сенсором передається до приймальної станції, де дані перетворюються у зображення. Існує три основних варіанти передачі даних, отриманих супутниками, на поверхню. Дані можуть бути безпосередньо передані на Землю, якщо наземна приймальна станція (НПС) знаходиться в зоні прямої видимості супутника. Якщо це не так, дані можуть бути записані на борту супутника для передачі на НПС пізніше. Дані також можна передавати в НПС через супутникову систему відстеження та передачі даних, яка складається з серії супутників зв'язку на геосинхронній орбіті. Дані передаються від одного супутника до іншого, поки не досягнуть відповідної НПС.

Інтерпретація та аналіз (F). Оброблені зображення інтерпретуються для отримання інформації про відзняті об'єкти на поверхні Землі.

Використання (застосування) (G). Використання даних для отримання інформації про об'єкти, кращого її розуміння, розв'язку конкретних завдань, тощо.

Дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) застосовуються у таких сферах: сільському господарстві, землекористуванні, геології, водних ресурсах, океанографії, вивченні навколишнього середовища та інше. [15]

Лекція 3. Фізичні основи дистанційного зондування

3.1. Електромагнітне випромінювання

Першою вимогою до дистанційного зондування (ДЗ) є наявність джерела енергії для освітлення об'єкта. Усе електромагнітне випромінювання (ЕВМ) має фундаментальні властивості та поводиться передбачувано відповідно до основ хвильової теорії.

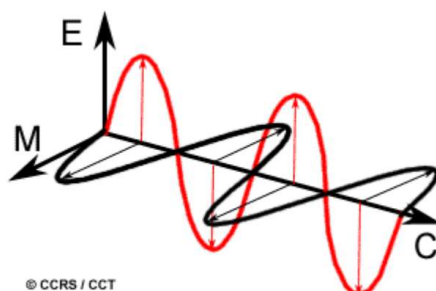


Рис. 2. Складові електромагнітного випромінювання [15]

Електромагнітне випромінювання складається з:

- електричного поля (E), що змінюється перпендикулярно до напрямку розповсюдження;
- магнітного поля (M), що орієнтоване праворуч до електричного поля.

Обидва поля розповсюджуються зі швидкістю світла (c).

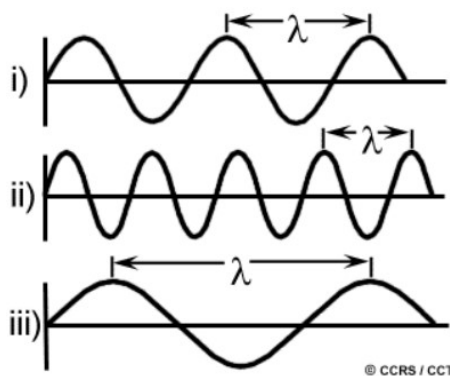


Рис. 3. Довжина електромагнітної хвилі [15]

Дві характеристики електромагнітного випромінювання є особливо важливими для розуміння властивостей ДЗ – це довжина хвилі і частота.

Довжина хвилі дорівнює одному циклу хвилі і вимірюється як відстань між двома піками хвилі. Одиницями вимірювання є: nm 10^{-9} (нанометри), μm 10^{-6} (мікрометри), cm 10^{-2} (сантиметри).

Частота відповідає кількості циклів або коливань хвилі в одиницю часу (Hz, Гц).

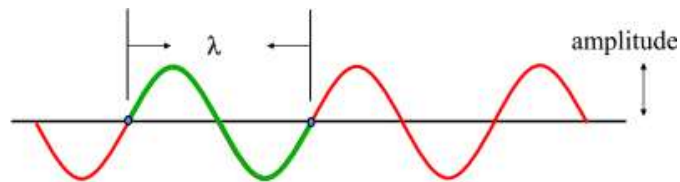


Рис. 4. Частота електромагнітної хвилі [19]

Відношення між швидкістю, частотою та довжиною хвилі випромінювання визначається за формулою:

$$c = \lambda \nu,$$

де c – швидкість світла, м/с; λ – довжина хвилі, м; ν – частота, Гц.

З формули випливає що чим коротша довжина хвилі, тим вища частота, чим більше довжина хвилі, тим нижча частота.

Розподіл електромагнітних хвиль за різними частотами називають спектром. [15]

3.2. Електромагнітний спектр

Електромагнітний спектр можна визначити як упорядковане випромінювання відповідно до довжини хвилі, частоти або енергії.

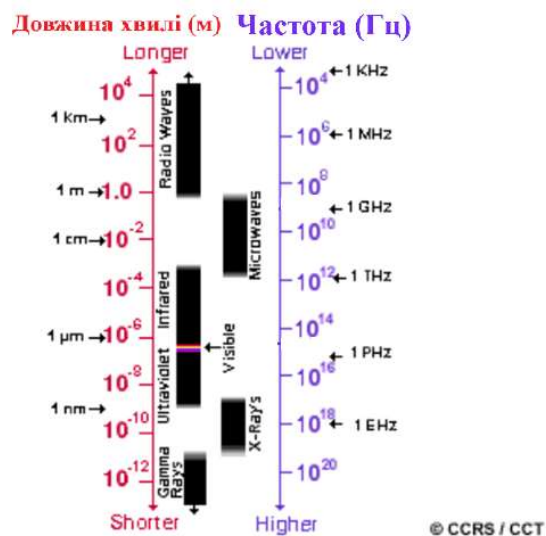


Рис. 5. Електромагнітний спектр [15]

3.3. Основні діапазони електромагнітного спектру

Радіо хвилі. Радіодіапазон (1м – > 10 км) надає інформацію про підстилаючу поверхню. Використовуються для передачі радіо та телесигналів.

Мікрохвилі. Діапазон довжини хвилі від 1мм до 300 см. Це випромінювання може проникати через хмари і тому є важливою

ділянкою спектру для ДЗ. Мікрохвилі випромінюються: поверхнею Землі, машинами, рослинами, атмосферою. Випромінення мікрохвиль залежить від температури об'єкта, але випромінювана енергія занадто мала для ДЗ високої роздільної здатності.

Активні мікрохвилі. Мікрохвильовий (1мм – 1м) – діапазон дає інформацію про топографічні характеристики територій та акваторій, запаси вологи в ґрунті й листках рослин, про впливи на рослини промислових викидів.

Для отримання даних з високою роздільною здатністю, використовуються активні системи ДЗ у мікрохвильовому діапазоні RADAR. Вони не фіксують інформацію про колір та температуру.

Інфрачервоний діапазон (ІЧ). Частина спектру, яка охоплює діапазон довжин хвиль приблизно від 0,7 μm до 100 μm – більш ніж у 100 разів ширший за видиму частину!

Інфрачервону область можна розділити на дві категорії – відбиту ІЧ та випромінювану або теплову ІЧ. Випромінювання у відбитій ІЧ-області використовується для цілей ДЗ у спосіб, дуже подібний до випромінювання у видимій частині. Відбите ІЧ-проміння охоплює довжини хвиль приблизно від 0,7 μm до 3,0 μm .

Теплова ІЧ-область суттєво відрізняється від видимої та відбитої ІЧ-часток, оскільки ця енергія є випромінюванням, яке випромінюється від поверхні Землі у вигляді тепла. Теплове ІЧ-випромінювання охоплює довжини хвиль приблизно від 3,0 μm до 100 μm .

Видимий діапазон. Діапазон довжин хвиль 0,4 μm до 0,7 μm .

Це єдиний діапазон спектру, який ми можемо пов'язати з поняттям кольорів. Він складається з синьої, зеленої та червоної частин електромагнітного спектра. Ця частина спектру сприймається людським оком і більшістю сенсорів.

Ультрафіолетовий діапазон. Діапазон довжин хвиль 0,01 μm – 0,4 μm . Застосовують для оцінювання стану рослин і водойм, а також для визначення поширення малих доз газових домішок та озону в атмосфері.

Цей діапазон не використовується в супутниковому ДЗ.

Рентгенівське випромінювання. Довжини хвиль у діапазоні 0,01 μm до 10^{-5} μm . Коротка довжина хвилі → високий вміст енергії → висока проникаюча дія.

Широко використовується в медичних цілях.

Гамма-промені. Довжина хвилі близько $3 \cdot 10^{-6}$ μm .

Мають більшу проникаюча здатність, ніж у рентгенівських променів. Вони генеруються радіоактивними атомами і ядерними вибухами. Гамма-випромінювання від радіоактивного матеріалу можуть бути записані з невеликих висот.

У зв'язку з розсіянням і поглинанням гамма-променів атмосферою, вони не можуть бути виявлені за допомогою супутникових сенсорів.

Вони використовуються в деяких медичних цілях. [19]

3.4. Закони випромінювання

Багато характеристик ЕМВ найлегше описуються хвильовою теорією, але інша теорія – теорія частинок – припускає, що ЕМВ складається з багатьох дискретних одиниць, які називаються фотонами або квантами.

Німецький фізик-теоретик Макс Планк у 1900 році зробив припущення що ЕМВ випромінюється у вигляді окремих порцій енергії (квантів), величина яких пов'язана з частотою випромінювання виразом:

$$E = h\nu \text{ (Дж)},$$

де $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; ν – частота.

$$\text{Оскільки } \nu = \frac{c}{\lambda}, \text{ то } E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Коротше хвиля – більше енергія, небезпечно для людини.

Сонце є найбільшим джерелом електромагнітного випромінювання для ДЗ. Проте вся матерія при температурах вище абсолютного нуля (0 К або 273 С) постійно випромінює електромагнітне випромінювання.

Скільки енергії випромінює будь-який об'єкт, серед інших, залежить від температури поверхні об'єкта. Ця властивість виражається законом Стефана-Больцмана. Це інтегральний закон випромінювання абсолютно чорного тіла, який стверджує, що енергія випромінювання з одиниці площі поверхні абсолютно чорного тіла за одиницю часу пропорційна четвертому степеню ефективної температури випромінювального тіла.

$$F = \sigma T^4,$$

де F – випромінювальна здатність поверхні Вт/м²;
 $\sigma = 5,674 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) стала Стефана-Больцмана.

Будь-яке тіло з температурою 0 K випромінює енергію, вона пропорційна T^4 , і тому енергія дуже швидко зростає зі збільшенням температури. Цей закон виражений для джерела енергії, яке поводить ся як чорне тіло.

Абсолютно чорне тіло – ідеальне тіло, яке повністю поглинає все падаюче на нього ЕМВ у всіх діапазонах і повністю випромінює.

Реальні об'єкти лише наближаються до цього ідеалу.

Для багатьох матеріалів ми можемо виміряти енергію випромінювання (F) і порівняти з випромінюванням чорного тіла:

$$E = \frac{F}{F_{\text{ч}}}$$

Третій закон – зміщення Віна, який пов'язує пік довжини хвилі випромінювання та температуру матеріалу:

$$\lambda_{\text{max}} = 2897,8/T$$

Цей закон пояснює чому при зниженні температури нагрітих тіл в їх спектрі починає переважати випромінювання на довгих хвилях.

Чим коротші хвилі (вища частота) світла, тим вища енергія фотонів, які може випромінювати об'єкт з високою температурою.

3.5. Взаємодія з атмосферою. Розсіювання та поглинання

Усе ЕМВ, виявлене дистанційним сенсором, має пройти через атмосферу двічі, до та після взаємодії з об'єктами на поверхні. Цей прохід змінює швидкість, частоту, інтенсивність, спектральний розподіл і напрямок випромінювання.

Атмосфера по різному впливає на ЕМВ в залежності від довжини хвилі і може бути джерелом збурювання, яке змінює сигнал та/або відбиту енергію. В результаті відбувається атмосферне розсіювання та поглинання.

Щільність елементів в атмосфері змінюється з температурою і просторовим розташуванням. Ці елементи несуть відповідальність за відбиття, розсіяння (дифузії), поглинання. Як наслідок це спричиняє зниження контрастності зображення та вносить радіометричні похибки.

Розсіювання – перенаправлення ЕМВ дрібними частинками у повітрі. Воно обумовлено взаємодією ЕМВ з наступними частинками в атмосфері:

- молекули газу (розмір 10-8 см);
- тверді аерозолі ($0,1\ \mu\text{m} < \text{розмір} < 1\ \mu\text{m}$);

- краплі води ($1 \mu\text{m} < \text{розмір} < 10 \mu\text{m}$)
- крижані кристали ($1 \mu\text{m} < \text{розмір} < 100 \mu\text{m}$);
- град (розміром до 10 см).



Рис. 6. Розсіювання ЕМВ частинками в атмосфері [19]

Розсіювання залежить від декількох факторів: довжини хвилі випромінювання, кількості частинок або газів та відстані, яку випромінювання проходить через атмосферу.

Існують наступні види розсіювання:

розсіювання Рейлі відбувається коли частинки дуже малі в порівнянні з довжиною хвилі випромінювання. Це можуть бути частинки пилу або молекули кисню. Дане розсіювання викликає сильне розсіювання для коротких хвиль в порівнянні з довгими, воно найбільш значне в верхніх шарах атмосфери.

Блакитні хвилі розсіюються сильніше тому ми бачимо небо блакитним. На заході Сонця хвилі йдуть довше і розсіюються повністю залишаються тільки довгі хвилі і ми бачимо небо у відтінках близьких до червоного.

Розсіювання Мі. Відбувається коли частинки мають один розмір з довжиною хвилі. Пил, дим, водяна пара є факторами що викликають розсіювання Мі, яке діє на більш довгі хвилі в порівнянні з розсіюванням Рейлі.

Розсіювання цього типу проявляється в декількох спектральних діапазонах: від ближнього ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного. Розсіювання Мі проявляється в нижніх шарах атмосфери де є надлишок крупних частинок.

Неселективне розсіювання. Відбувається коли частинки значно більші за довжину хвилі ЕМВ. Такий вид розсіювання викликають

краплини води та пил. Назва розсіювання пов'язана з тим, що всі хвилі відбиваються однаково.

Цей тип розсіювання викликає білі хмари на зображенні оскільки комбінація кольорів $R+G+B = \text{White}$. [15]

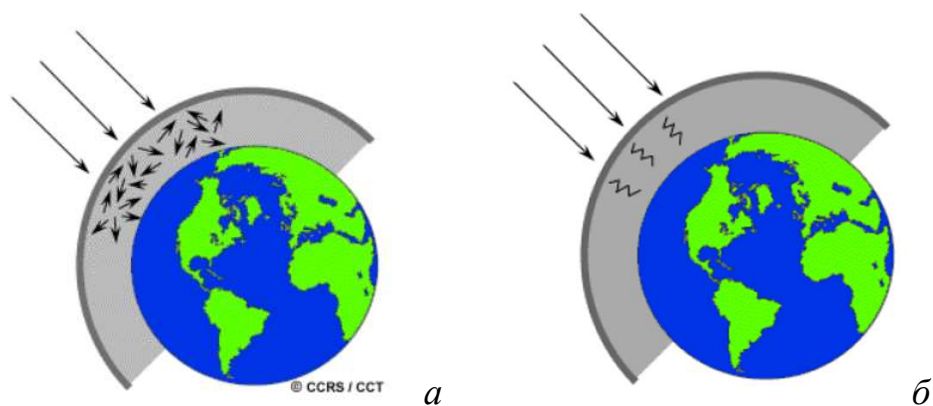


Рис. 7. Розсіювання ЕМВ атмосферою (а), поглинання ЕМВ атмосферою (б) [15]

Поглинання. Енергія випромінювання перетворюється в молекулярну енергію, що послаблює ЕМ випромінювання [15].

Поглинання відбувається в основному в таких ділянках спектру:

- видимий: O_3 (600 нм), H_2O (718 нм), O_2 (760 нм). Озон O_3 поглинає ультрафіолетове випромінювання;

- інфрачервоний: O_3 (9,6 μm), H_2O (1,45, 1,9, 2,7 – 3,7 і 6,3 μm), CO_2 (2,9 μm , 4,3 μm). Вуглекислий газ CO_2 поглинає випромінювання в дальній інфрачервоній частині спектра – це область, пов'язана з тепловим випромінюванням та утримує тепло всередині атмосфери (парниковий ефект);

- атмосфера непрозора для довжини хвиль від 22 μm до 1 μm ;

- мікрохвильовий: O_2 (2,5 і 5 мм), H_2O (1,6 і 13,5 мм). Водяна пара H_2O в атмосфері поглинає більшу частину довгохвильового інфрачервоного і мікрохвильового випромінювання (між 22 μm і 1 м);

- атмосфера прозора для довжин хвиль більших, ніж 3 см.

Ці гази поглинають електромагнітну енергію в конкретних областях спектру, які стають не придатними для цілей ДЗ.

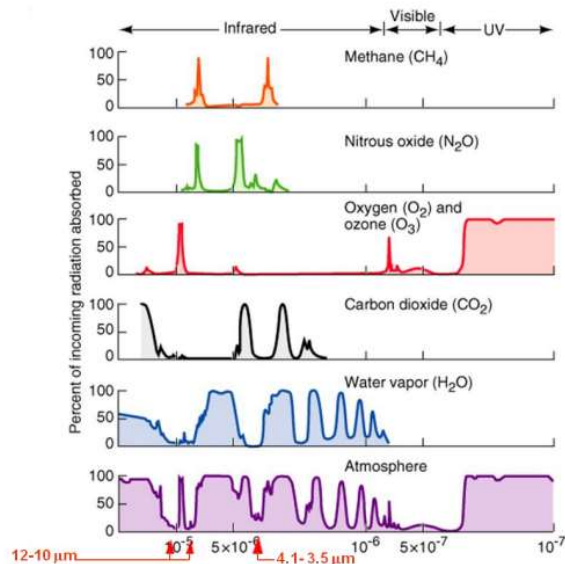


Рис. 8. Ділянки спектру, що поглинаються відповідними речовинами [20]

Порівнюючи характеристики двох найбільш поширених джерел випромінювання енергії (Сонця і Землі) з доступними для нас атмосферними вікнами, ми можемо визначити ті довжини хвиль, які можемо найбільш ефективно використовувати для ДЗ.

Видимій частині спектру відповідають атмосферне вікно та пікове значення енергії сонця.

Водяна пара, вуглекислий газ та озон поглинають частину спектру ЕМВ і ці області називаються *смугами поглинання*. Виконувати дистанційне зондування в смугах поглинання неможливо.

Інші частини у спектрі електромагнітного випромінювання, називаються *атмосферними вікнами*. Атмосферні вікна це ділянки спектру ЕМВ з низьким поглинанням або високою передачею [15].

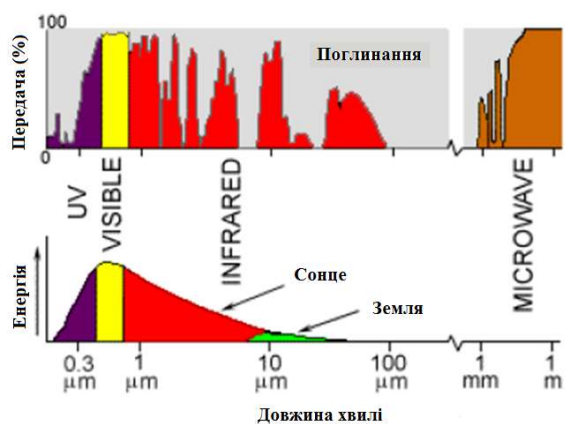


Рис. 9. Атмосферні вікна для різних довжин хвиль ЕМВ [15].

3.6. Взаємодія випромінювання з об'єктами на поверхні Землі

Електромагнітна енергія, яка потрапляє на матеріал, відбивається, проходить через матеріал або поглинається ним.

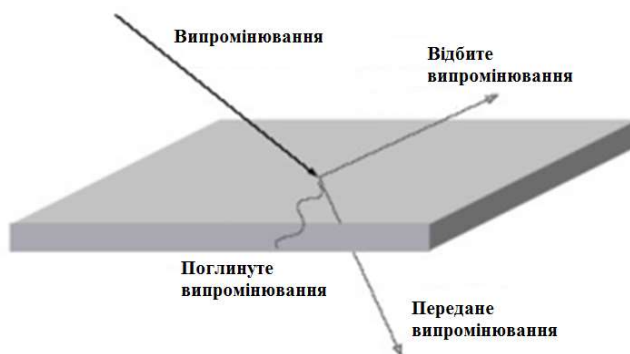


Рис. 10. Взаємодія ЕМВ з об'єктами [19]

Кожен об'єкт на поверхні Землі має такі характеристики:

$$\text{Відбивальна здатність} = \frac{\text{Відбиття}}{\text{Випромінювання}} = r$$

$$\text{Передавальна здатність} = \frac{\text{Передача}}{\text{Випромінювання}} = t$$

$$\text{Поглинальна здатність} = \frac{\text{Поглинання}}{\text{Випромінювання}} = a$$

Закон збереження енергії: $r + t + a = I$.

Застосовується принцип збереження енергії. Це є рівнянням енергетичного балансу, що виражає взаємозв'язок між механізмами відбивання, поглинання та передачі. [19]

У ДЗ нас цікавить відбита енергія, яка направляється вгору і взаємодіє з атмосферою. Частина відбитої енергії, яка потрапляє у поле зору сенсора реєструється та перетворюється в цифрові значення. Розмір і розподіл відбитої енергії використовується, щоб зробити висновок про характер відбиваючої поверхні, що і є головною метою дистанційного зондування.

Спектральна крива відбиття описує спектральний відгук від об'єкта. Для одного і того ж матеріалу, крива відбиття може залежати від часу (наприклад, стадії росту рослинності), орієнтації Сонця (азимут Сонця), висоти Сонця над горизонтом та напрямку спостереження сенсору відносно азимуту сонця (кут погляду).

3.7. Дзеркальне та дифузне відбиття

Поверхні класифікуються на грубі (шорсткі) та гладкі в залежності від довжини хвилі падаючого випромінювання.

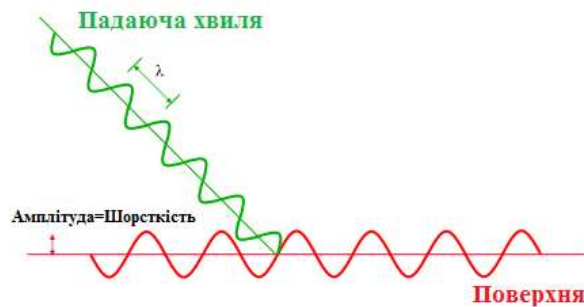


Рис. 11. Шорсткість поверхні [19]

Більшість елементів земної поверхні знаходяться десь між ідеально дзеркальними або ідеально дифузними відбивачами. Те, чи конкретний об'єкт відбиває дзеркально, чи дифузно, чи десь посередині, залежить від шорсткості поверхні елемента порівняно з довжиною хвилі вхідного випромінювання.

Відповідно існують два види відбиття, які можуть виникати на поверхні.

Дзеркальне відбиття: відбита енергія залишає відбивну поверхню без розсіювання, кут відбиття дорівнює куту падіння. Дзеркальне відбиття відбувається, коли поверхня є гладкою щодо довжини хвилі падаючої енергії, тобто шорсткість поверхні менше, ніж довжина хвилі падаючої енергії. У цьому випадку вся (або майже вся) енергія спрямована від поверхні в одному напрямку.

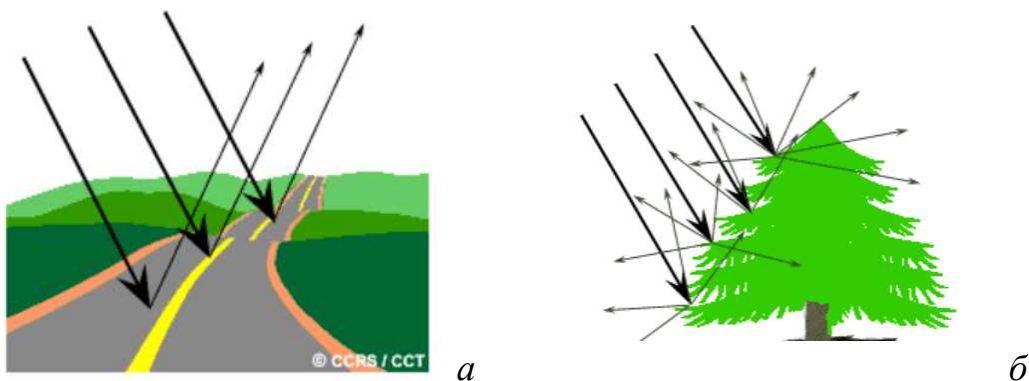


Рис. 12. Дзеркальне відбиття (а) та дифузне відбиття (б) ЕМВ поверхнею [15]

Дифузне відбиття відбувається, коли відбивна поверхня груба щодо довжини хвилі падаючої енергії. У цьому випадку падаюча енергія розсіюється у всіх напрямках [15].

У видимій частині ЕМ спектру всі наземні об'єкти є дифузними відбивачами, лише вода у стані спокою може виступати в якості дзеркального відбивача.

У мікрохвильовій частині ЕМ спектру деякі наземні об'єкти будуть виступати в якості дзеркального відбивача.

Дистанційні сенсори не помічають і не виявляють всю відбиту енергію від наземних об'єктів. Вони записують лише відбиту на певний кут енергію від наземних об'єктів.

3.8. Спектральна відбивна здатність матеріалів на поверхні землі

Пропорції відбитої, поглиненої та переданої енергії відрізнятимуться для різних об'єктів Землі залежно від типу та стану їх матеріалу. Ці відмінності дозволяють нам розрізняти різні елементи на зображенні.

У межах одного типу об'єктів частка відбитої, поглиненої та переданої енергії буде змінюватись на різних довжинах хвиль. Таким чином, два об'єкта можуть бути нерозрізненими в одному спектральному діапазоні та сильно відрізнятися в іншому діапазоні довжин хвиль.

У видимій частині спектру ці спектральні зміни призводять до візуального ефекту, який називається кольором. Наприклад, ми називаємо об'єкти «блакитними», коли вони відбивають сильніше в синій частині спектру, «зеленими», коли вони відбивають сильніше в зеленій області спектру, і так далі. Таким чином, око використовує спектральні варіації величини відбитої енергії для розрізнення різних об'єктів.

Оскільки багато систем ДЗ працюють у діапазонах довжин хвиль, у яких переважає відбита енергія, властивості відбиття земних елементів є дуже важливим. Тому використовують співвідношення енергетичного балансу, виражене рівнянням:

$$E_{\text{відбита}} = E_{\text{падаюча}} - (E_{\text{поглинена}} + E_{\text{передана}}).$$

Тобто відбита енергія дорівнює енергії, що падає на даний об'єкт, зменшеній на енергію, яка поглинається або передається цим об'єктом. Характеристики відбиття об'єктів земної поверхні можна кількісно визначити, вимірявши частку падаючої енергії, яка відбивається. Це вимірюється як функція довжини хвилі та називається спектральним коефіцієнтом відбиття, ρ . Математично визначається як:

$$\rho = \frac{E \text{ відбита}}{E \text{ падаюча}} = \frac{\text{енергія довжини хвилі, відбита від об'єкту}}{\text{енергія довжини хвилі, що падає на об'єкт}} \times 100\%.$$

Графік залежності спектрального коефіцієнта відбиття об'єкта від довжини хвилі називається *спектральною кривою відбиття*.

Конфігурація спектральних кривих відбиття дає нам уявлення про спектральні характеристики об'єкта та має сильний вплив на вибір діапазону довжини хвилі, у якому дані ДЗ отримуються для конкретного застосування.

Коефіцієнти відбиття відрізняються для різних типів об'єктів, наприклад, для зеленого світла і дерев однієї породи спектральний коефіцієнт відбиття не буде абсолютно однаковим.

Оскільки спектральні відгуки, виміряні дистанційними датчиками на різних об'єктах, часто дозволяють оцінити тип і/або стан об'єктів, ці відгуки називають *спектральними сигнатурами*.

Лінії на цьому малюнку представляють середні криві відбиття, складені шляхом вимірювання великої вибірки елементів.

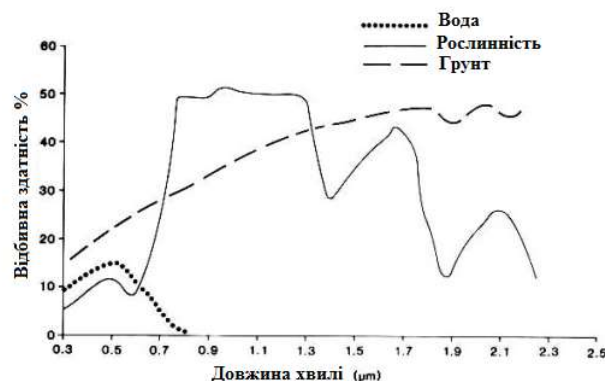


Рис. 13. Приклади відбивної здатності деяких об'єктів [19]

3.8.1. Спектральне відбиття рослинності

Хлорофіл, що міститься у рослинах, сильно поглинає випромінювання в червоному та синьому діапазонах, але відбиває зелене та ближнє інфрачервоне випромінювання.

Найбільш «зеленим» листя здається нам влітку, коли вміст хлорофілу максимальний. Восени в листі менше хлорофілу, тому менше поглинання і пропорційно більше відбиття червоних хвиль, через що листя виглядає червоним або жовтим (жовтий колір - це комбінація червоних і зелених довжин хвиль). З віком рослини рівень відбиття в ближній інфрачервоній частині спектру (0,75-1,35 μm) знижується. Зі

старінням рослини, відносний пік в зеленій частині зменшується по мірі втрати листям зелені [15].

Стрес в результаті засухи або присутність/відсутність конкретних мінералів у ґрунті може давати спектральний відгук, який схожий на старіння.

Вимірювання та моніторинг відбиття в ближньому ІЧ-діапазоні є одним із способів визначити, наскільки здоровою (чи нездоровою) може бути рослинність. Спектральні характеристики відбиття можуть бути використані для розрізнення різних видів рослин.



Рис. 14. Відмінності в спектральних яскравостях рослинності протягом вегетаційного періоду

3.8.2. Спектральне відбиття водних об'єктів

Випромінювання видимого та ближнього ІЧ з більшою довжиною хвилі поглинається водою більше, ніж хвилі видимого діапазону з короткою довжиною.

Таким чином, вода зазвичай виглядає блакитною або синьо-зеленою через сильніший коефіцієнт відбиття на цих коротких довжинах хвиль і темнішою, якщо дивитися на неї в червоному або близькому до інфрачервоного діапазону.

Хлорофіл у водоростях поглинає більшу частину синіх хвиль і відбиває зелені, завдяки чому вода виглядає більш зеленою, коли водорості є у воді.

На спектральне відбиття води впливають розчинені органічні та неорганічні матеріали, а також глибина водного об'єкта [15].

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення поняттям дистанційне зондування Землі, об'єкти та методи ДЗЗ.
2. Назвіть основні історичні етапи розвитку ДЗЗ та які дати мали найбільше значення?
3. Які особливості та порядок процесів у моделі роботи системи ДЗ?
4. Перерахуйте основні джерела електромагнітного випромінювання.
5. Які частини електромагнітного спектру не використовуються у ДЗЗ і чому?
6. Як атмосфера впливає на електромагнітне випромінювання?
7. Що таке атмосферні вікна та від чого вони залежать?
8. Назвіть всі варіанти взаємодії електромагнітного випромінювання з об'єктами на поверхні Землі.
9. У яких випадках відбувається дзеркальне відбиття електромагнітного випромінювання, а у яких дифузне?
10. Як будується спектральна крива відбиття?
11. Яким чином за спектральними характеристиками можна ідентифікувати об'єкти місцевості?
12. Як працює закон збереження енергії?
13. Чому для дослідження стану рослин використовується інфрачервоний діапазон?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Лекція 4. Види дистанційного знімання

4.1. Системи збору даних дистанційного зондування. Пасивні та активні системи

Системи збору даних ДЗ класифікують за видом ЕМВ, яке використовується:

- видимий діапазон;
- інфрачервоний діапазон;
- LIDAR систем;
- мікрохвильовий діапазон (RADAR).

Оптичні сенсори (принцип роботи – сканування):

- кадрові системи;
- лінійні сканери (з лінійною розгорткою);
- електромеханічні сканери.

Сонце є дуже зручним джерелом енергії для дистанційного зондування. Сонячна енергія або відбивається, як для довжин хвиль видимого діапазону, або поглинається, а потім повторно випромінюється, у вигляді теплових інфрачервоних хвиль.

Систем ДЗ, які вимірюють природню енергію називаються *пасивними сенсорами*. Пасивні системи можуть бути використані для виявлення природньої енергії, але це можливо тільки протягом часу, коли сонце освітлює Землю. Вночі немає відбитої енергії від сонця.

Енергія, яка випромінюється природно (наприклад, тепла інфрачервона) може бути виявлена вдень і вночі, якщо кількість енергії, досить велика, щоб бути записаною.

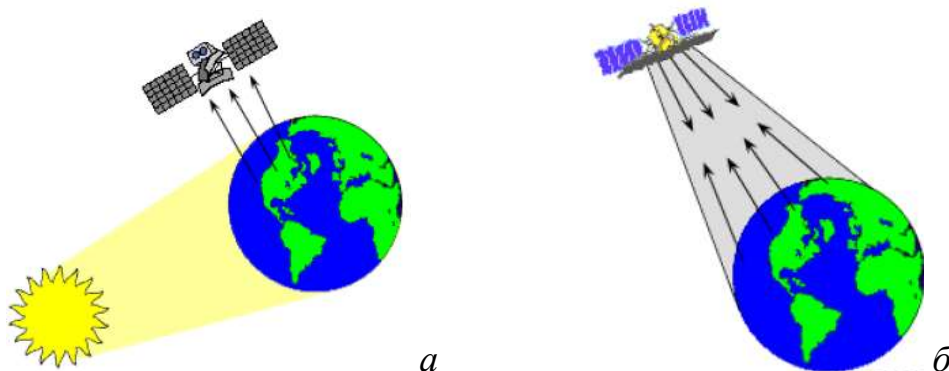


Рис. 15. Пасивні системи (а) та активні системи (б) збору даних [15]

Активні сенсори мають власне джерело енергії для опромінення. Сенсор генерує випромінювання, яке спрямоване в бік об'єкту, що досліджується, відбите від цього об'єкту випромінювання визначається і вимірюється сенсором.

Перевагою активних систем є можливість отримати вимірювання в будь-який час, незалежно від часу доби або сезону.

Активні системи вимагають досить велику кількість енергії, щоб адекватно висвітлювати об'єкти. Лідар та радар з синтезованою апертурою є прикладами активних сенсорів.

4.2. Кадрові системи

Фотоапарати є найпростішими і найдавніший із сенсорів, що використовуються для ДЗ земної поверхні.

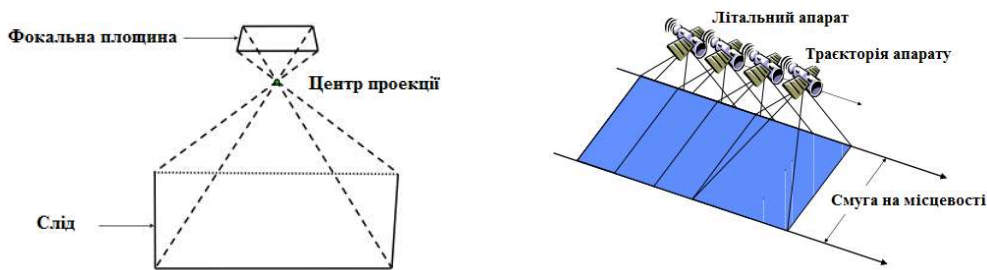


Рис. 16. Кадрові системи [19]

Кадрові системи – це пасивні оптичні сенсори, які використовують лінзу (або систему лінз, яку разом називають оптикою) для формування зображення у фокальній площині. Зображення сліду охоплює одну експозицію.

4.3. Скануючі оптико-електронні системи

Скануючі оптико-електронні системи з'явилися у 70-80-х роках, майже повністю витіснили фотографічні та телевізійні системи. Сьогодні вони є основним постачальником даних ДЗЗ.

Випромінювання потрапляє на відповідні датчики, що генерують електричний сигнал, який залежить від інтенсивності випромінювання. В якості одноелементних датчиків оптико-електронних систем є фотопомножувачі або фотодіоди. Щоб отримати зображення, необхідно об'єднати велику кількість одноелементних датчиків або сканувати об'єкт одним датчиком.

Пристрій такого типу називають приладом з зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Конструктивно ПЗЗ є матрицею із ідентичних фотодіодних елементів. ПЗЗ можуть бути лінійними та плоскими (планарними).

Такі системи сканування можуть використовуватися як на літаках, так і на супутникових платформах і мають, однакові принципи роботи.

Система сканування, яка використовується для збору даних у різних діапазонах довжин хвиль, називається *мультиспектральним сканером* (MSS) і є найпоширенішою системою сканування.

Існує два основних режими або методи сканування, які використовуються для отримання мультиспектральних даних зображення: сканування поперек доріжки та сканування вздовж доріжки.

4.4. Поперечний сканер (whisk broom)

Цей сканер сканує Землю серією ліній, які орієнтовані перпендикулярно до напрямку руху сенсорної платформи (тобто поперек смуги сканування).

Кожна лінія сканується від одного боку смуги до іншого за допомогою обертового дзеркала (A) (рис. 17, а). Платформа рухається вперед над Землею, послідовні сканування створюють двовимірне зображення поверхні Землі. Вхідне відбите або випущене випромінювання поділяється на кілька спектральних компонентів, які виявляються незалежно.

Видиме, інфрачервоне та теплове випромінювання розділяються на відповідні довжини хвиль.

Банк внутрішніх детекторів (B), кожен з яких чутливий до певного діапазону довжин хвиль, виявляє та вимірює енергію для кожної спектральної смуги, а потім, електричний сигнал, вони перетворюють на цифрові дані та записують для подальшої комп'ютерної обробки.

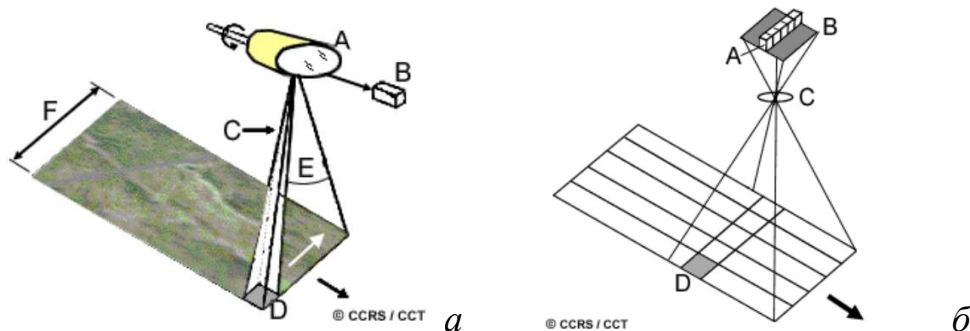


Рис. 17. Принцип роботи поперечного (а) та поздовжнього (б) сканерів [15]

4.5. Поздовжні сканери (pushbroom)

Поздовжні сканери також використовують рух платформи вперед для запису послідовних ліній сканування та створення двовимірного зображення, перпендикулярного напрямку польоту.

Однак замість скануючого дзеркала вони використовують лінійну матрицю детекторів (А) (рис. 17, б), розташовану у фокальній площині зображення (В), утворену системами лінз (С), які працюють вздовж напрямку траєкторії польоту. Ці системи також називаються pushbroom сканерами, оскільки рух масиву детекторів аналогічний щетині мітли, яку штовхають по підлозі.

Кожен окремий детектор вимірює енергію для однієї комірки наземної роздільної здатності (D) і, таким чином, розмір і миттєве поле зору детекторів визначають просторову роздільну здатність системи.

Для вимірювання кожної спектральної смуги або каналу потрібен окремий лінійний масив.

Для кожної лінії сканування енергія, виявлена кожним детектором кожної лінійної матриці, відображається в електронному вигляді та записується в цифровому форматі.

4.6. Лінійні сканери

Pushbroom сканери можуть мати один лінійний матричний детектор (рис. а), що складається з ряду детекторних елементів, або три лінії сенсора А, В, С (рис. б) розташованих у фокальній площині.

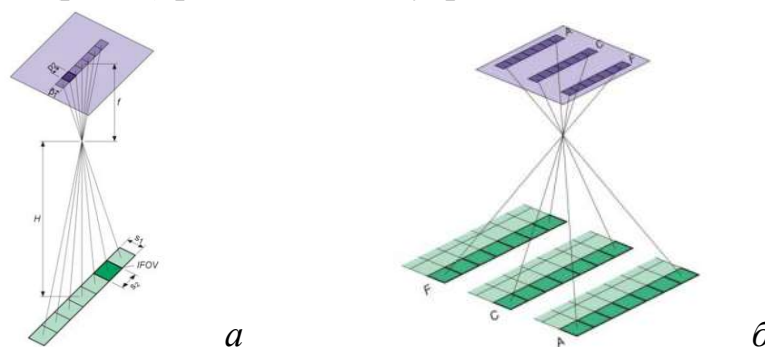


Рис. 18. Принцип окремої лінійки (а) та трьох-лінійного сканера (б) [19]

Під час польоту, ці лінійки А, В, С сканують місцевість у відповідності з принципом роботи поздовжнього сканера, одночасно синхронізуючи зображення з різних точок зору, отримуючи три смуги зображення з 100 % перекриттям.

В результаті отримують зображення з напрямками вперед, надир та назад.

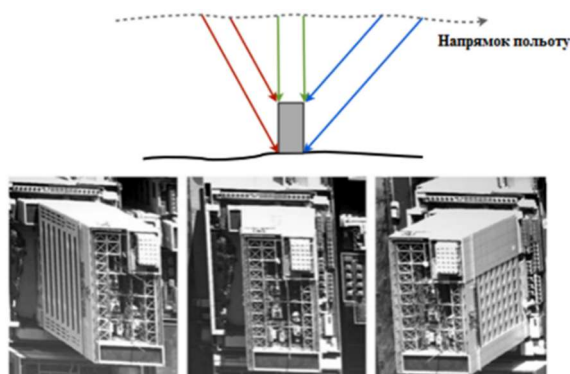


Рис. 19. Трьох-лінійні сканери, напрямки спостереження [19]

4.7. Панорамний лінійний сканер

Прикладом поперечного сканера (whisk broom) є панорамний лінійний сканер, що має одну лінійку сканування в площині зображення, яка обертається. Лінійний сенсор паралельний до напрямку польоту та обертається навколо центру проєкції на кут α_t (рис.). Кут повороту лінійки α_t , координати колонки сцени та параметри зовнішнього орієнтування кожного зображення залежать від часу.

Кожна сцена є комбінацією зображень, отриманих паралельно до лінії польоту. Покриття площі на землі відбувається завдяки повороту сенсору навколо лінії польоту.



Рис. 20. Принцип роботи та покриття сцени панорамного лінійного сканеру [19]

Зображення, отримані таким сканером, потребують додаткової обробки та компенсації руху платформи, оскільки перша та остання лінії сканування будуть зміщеними у просторі через постійний рух платформи, а масштаб зображення буде відрізнятися від країв до середини смуги сканування.

4.8. Поперечний точковий сканер

Ще одним прикладом whisk broom сканера є точковий сканер, який формує зображення за допомогою одного сенсора в момент часу. Піксель в кожній лінії сканування отримують при скануванні поперек напрямку руху. Нову лінію зображення отримують при переміщенні платформи.

Комбінація бік до боку і рух вперед створюють сцени даного сканера. Важливим елементом таких сканерів є механічне скануюче дзеркало.

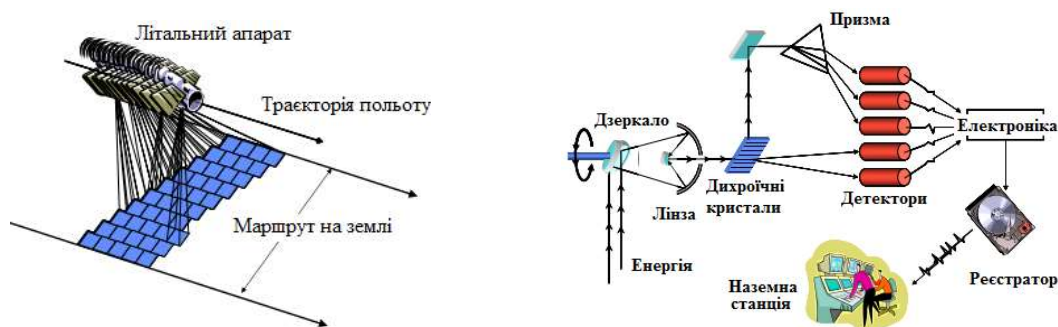


Рис. 21. Робота поперечного точкового сканера [19]

4.9. Способи отримання стереозображень

Використання будь-якого розглянутого способу отримання зображень дає можливість створити стереозображення. Способи отримання стереозображень:

- *кадрові системи* отримують стерео шляхом поздовжнього та поперечного перекриття між знімками (окремими сценами);
- *одно або трілінійні сканери* дозволяють отримати стереозображення двома способами: нахилом сенсору поперек напрямку польоту з двох різних орбіт та нахилом датчика вздовж напрямку польоту по тій же орбіті через короткий проміжок часу між послідовним фотографуванням (кілька секунд);
- *панорамними сканерами* стерео покриття може бути отримане перекриттям між послідовними сценами вздовж лінії польоту та поперечне перекриття між сценами вздовж суміжних смуг.

4.10. Інфрачервоне (теплове) знімання

Окрему увагу заслуговують мультиспектральні системи, які сприймають випромінювання в тепловому інфрачервоному діапазоні, а також у видимій і відбитій інфрачервоній частинах спектру.

Теплові сенсори використовують фотодетектори, чутливі до прямого контакту фотонів з їхньою поверхнею, для виявлення випромінюваного теплового випромінювання.

Тепловізори є поперечними сканерами, які виявляють випромінюване випромінювання лише в тепловій частині спектра. Теплові датчики використовують одну або кілька внутрішніх опорних температур для порівняння з виявленим випромінюванням, тому їх можна пов'язати з абсолютною температурою випромінювання.

Для аналізу зображення відносних температур випромінювання (термограма) зображується у відтінках сірого, де тепліші температури відображаються світлими тонами, а холодніші – темними.

Оскільки енергія зменшується зі збільшенням довжини хвилі, теплові датчики, мають великі кути огляду, щоб гарантувати, що достатньо енергії досягає детектора для її вимірювання. Тому просторова роздільна здатність теплових датчиків є досить грубою відносно можливої просторової роздільної здатності у видимому та відбитому ІЧ діапазоні.

Теплові зображення можна отримати вдень або вночі (оскільки випромінювання випромінюється, а не відбивається) і використовується для різноманітних застосувань, таких як військова розвідка, боротьба зі стихійними лихами (картографування лісових пожеж) і моніторинг втрат тепла. [15]

4.11. Система повітряного лазерного сканування

LIDAR – *Light Identification, Detection and Ranging* (світлове виявлення та визначення дальності).

Повітряне лазерне сканування (LIDAR) – це технологія, що дозволяє створити цифрову тривимірну модель об'єкту, представивши її набором точок з просторовими координатами.

Скануючий пристрій, встановлений на гелікоптері або літаку, генерує імпульси, які відбиваючись від об'єктів поверхні формують хмару даних. Просторове положення літального апарату та зібраних даних контролюється бортовим GPS пристроєм, інерціальною системою і базовими GPS станціями, розташованими на землі, що гарантує високу точність даних. Одночасно зі скануванням, відбувається цифрова фотозйомка на камеру високої роздільної здатності.

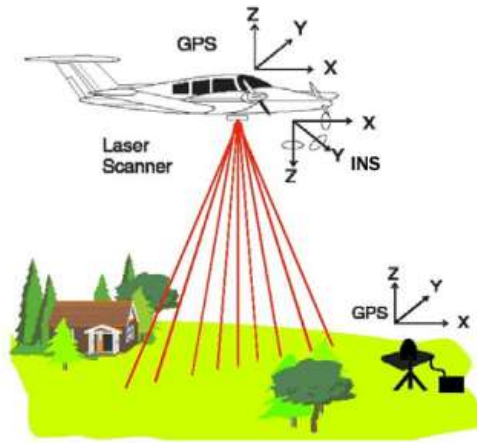


Рис. 22. Система повітряного лазерного сканування [22]

За даними лазерного сканера обчислюється відстань між випромінювачем і об'єктом відображення, а також кут в площині сканування, куди був направлений промінь в момент випромінювання.

Інерціальна система встановлена в одному блоці з лазерним сканером. За даними цієї системи обчислюються параметри орієнтації літального апарату (датчиків інерціальної системи, лазерного сканера і фотоапарата) щодо певної системи координат. Таким чином геодезична прив'язка фотографій здійснюється програмним способом автоматично, враховуючи траєкторію польоту і кутову орієнтацію фотоапарата і літального апарату в момент експозиції знімка. Тобто обчислюються лінійні – X , Y , Z і кутові елементи зовнішнього орієнтування знімка.

На основі даних GPS-приймача здійснюється синхронізація часу роботи всіх підсистем, а також запроваджується єдина система координат і розраховується траєкторія польоту літального апарата.

Дані від базової GPS-станції використовуються для обчислення диференціальних поправок при визначенні траєкторії літального апарату.

4.11.1. Принципи діяльності LIDAR

LIDAR випромінює світло до об'єктів. Частина цього світла відбивається/розсіюється назад до приладу, де воно аналізується. Зміна властивостей світла дозволяє визначити деякі властивості об'єктів. Час, за який світло проходить до об'єкту і назад використовується для визначення відстані до цілі.

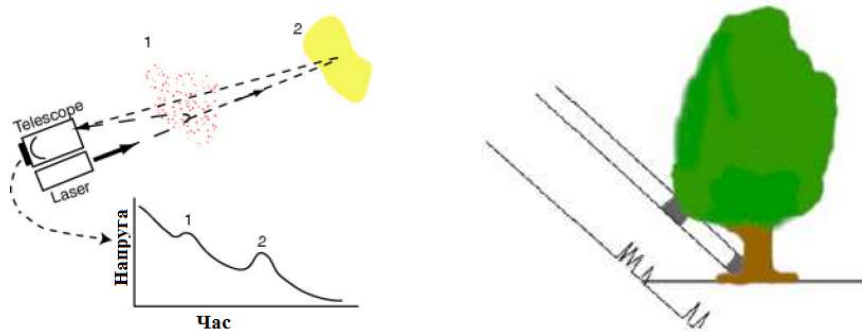


Рис. 23. Принципи діяльності LIDAR [19]

Кількість точок визначається регулярною сіткою (кількість рядків і кількість стовпчиків задаються користувачем) – так званою, матрицею сканування. Чим більша щільність матриці сканування, тим більша щільність точок на поверхні об'єкта.

Результатом роботи являється множина точок з відомими тривимірними координатами X , Y , Z . Такі набори точок прийнято називати *хмарами точок* або *сканами*. Кількість точок в одному скані може варіюватись від декількох десятків тисяч до десятків і сотень мільйонів.

Масив містить ідентифікатори точок (GPS-час), а також координати першого й останнього відбиття (останнє відбиття належить земній поверхні).

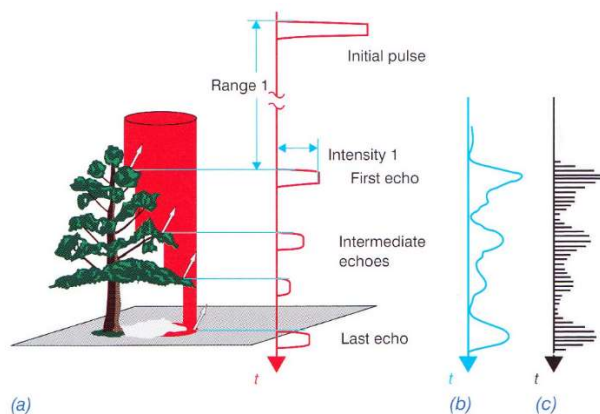


Рис. 24. Множинність відбиття сигналу:
a – значення амплітуди відбиття сигналу;
b – форма хвилі сигналу; *c* – оцифрований сигнал [22]

Збір даних про всі об'єкти здійснюється постійно по всій довжині маршруту. Щільність та точність сканування буде залежати від частоти імпульсу, висоти, швидкості та кута сканування.

Зібрані дані класифікуються за типовими ознаками: висота та інтенсивність відбиття імпульсу. Класифікація точок дозволяє класифікувати дані за об'єктами: будова, річка, дерева, стовп, кран і т.д.

4.12. Використання даних повітряного лазерного сканування для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР)

Для отримання даних, потрібних для побудови ЦМР необхідно провести процедуру класифікації – вибору з хмари точок лазерного сканування точок, відбитих від земної поверхні.

Існує два загальноприйнятих методи подання цифрової моделі рельєфу:

- у вигляді нерегулярної сітки – триангуляції (TIN-поверхні);
- у вигляді регулярної сітки (GRID-поверхні).

Якщо перший варіант дозволяє точніше описати будь-який елемент поверхні, то другий застосовують для обробки отриманої поверхні різними методами.

Цифрова модель рельєфу, заснована на TIN – моделі просторових даних, є сукупністю з'єднаних між собою плоских трикутників, що спираються на нерівномірно розміщену в просторі мережу точок з відомими відмітками топографічної поверхні.

У TIN – моделі може зберігатися інформація тільки про відмітки характерних точок поверхні, розміщених на структурних лініях рельєфу – вододілах, тальвегах, а також переломах поздовжнього і поперечного профілів схилів.

Для отримання моделі поверхні пари точок з'єднуються ребрами певним способом, названим триангуляцією Делоне.

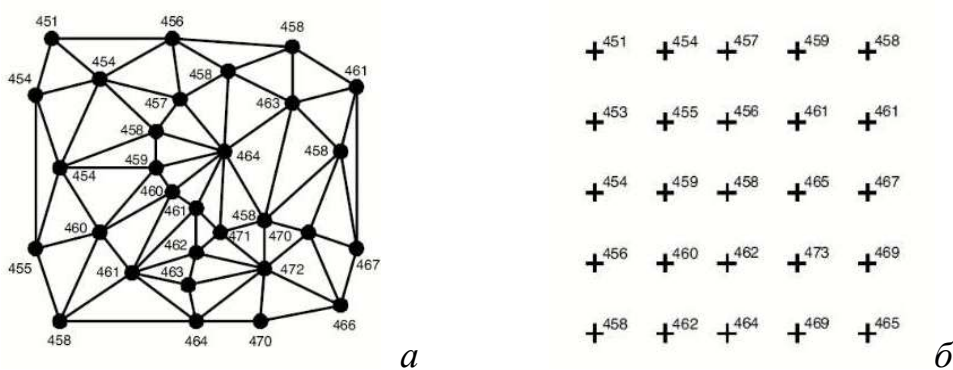


Рис. 25. TIN – модель (а), GRID – модель (б)

GRID – модель, яка представляє регулярну матрицю значень висот, отриману шляхом інтерполяції первинних даних. Для кожної комірки матриці, висота обчислюється на основі інтерполяції. Фактично це мережа висот, розміри якої задаються відповідно до вимог точності досліджень.

Окрім вище розглянутих типів ЦМР за даними лазерного сканування отримують такі види продуктів:

цифрова модель місцевості (Digital Surface Model, DSM) – це тривимірне представлення поверхні Землі, включаючи всі об'єкти, що присутні на ній;

цифрова модель поверхні (Digital Terrain Model, DTM) – це поверхня рельєфу, що представляє голу землю, по суті вона доповнює ЦМР;

нормована цифрова модель місцевості – це похідний добуток висоти, отриманий шляхом віднімання DTM від DSM

$$nDSM = DSM - DTM.$$

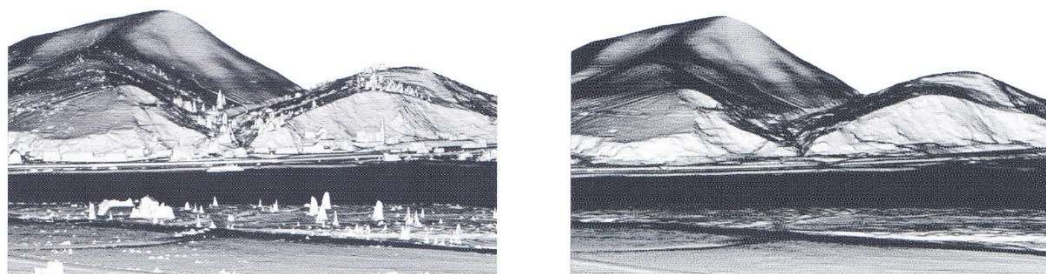


Рис. 26. Цифрова модель місцевості (DSM) та цифрова модель поверхні (DTM) [22]

4.13. Системи радіолокаційного знімання

Радарні методи (*RADAR – Radio Detection And Ranging*) використовують відбиті від земної поверхні хвилі у мікрохвильовому діапазоні (від 1 мм до 1 м). Ці методи швидко розвиваються і вважаються доволі перспективними для дистанційного зондування Землі, з таких об'єктивних причин:

- по-перше, теоретично положення об'єкта можна визначити з точністю довжини радіохвилі – а це може бути міліметрова точність;
- по-друге, поширенню радіопроменів не перешкоджає хмарність і в цьому велика перевага порівняно з цифровим аерозніманням.

Різні довжини хвиль, що використовуються у радіолокаційному зніманні, часто називають діапазонами з літерними позначеннями, такими як X, C, L і P. Довжина хвилі є важливою характеристикою, яку слід враховувати при роботі з радаром, оскільки вона визначає, як радіолокаційний сигнал взаємодіє з поверхнею і як далеко сигнал може проникати в середовище. X-діапазон є найкоротшими хвилями, що використовуються для отримання радіолокаційних зображень.

4.13.1. Принцип діяльності RADAR

Радар – прилад для вимірювання дальності або відстані. Він складається з передавача, приймача, антени та електронної системи для обробки та запису даних. Передавач генерує послідовні короткі спалахи або мікрохвильові імпульси (А) через рівні проміжки часу, які фокусується антеною в промінь (В). Промінь радара освітлює поверхню похило під прямим кутом до руху платформи. Антена отримує частину переданої енергії, відбитої (або розсіяної) від різних об'єктів в межах освітленого променя (С).

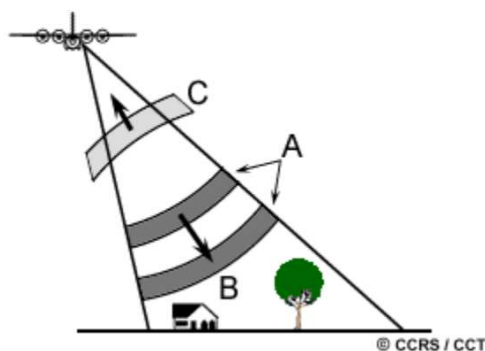


Рис. 27. Принцип діяльності радару [15]

Вимірюючи часову затримку між передачею імпульсу та прийомом зворотного розсіяного «відлуння» від різних об'єктів, можна визначити їхню відстань до радара і, таким чином, їх місцезнаходження. Приймаючи відбитий сигнал, радіолокатор фіксує потужність сигналу, час між моментами випромінювання та прийому, фазу, напрямок прийому. Зазвичай для передачі та прийому використовується одна антена.

Коли сенсорна платформа рухається вперед, запис і обробка розсіяних сигналів створює двовимірне зображення поверхні.

Існує два типи радіолокаторів для одержання зображень:

- радіолокатори бічного огляду;
- радіолокатори з синтезованою апертурою.

4.13.2. Радар бічного огляду (Side-Looking Airborne Radar, SLAR)

Антена передає віялоподібний пучок у напрямку, перпендикулярному напрямку польоту. Зворотні сигнали від об'єктів надходять послідовно, в залежності від їх відстані до антени.

Радар переміщається уздовж його лінії польоту, з кожним переданим імпульсом висвітлюються різні ділянки землі. Оскільки радар рухається безперервно, то утворює ряд сканів з перекриттям.

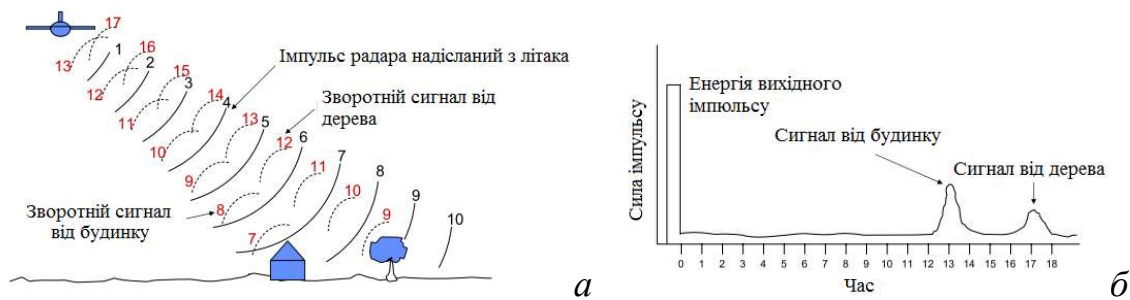


Рис. 28. Поширення одного імпульсу радару та його сигнал від об'єктів [19]

Антенa системи SLAR (і будь-якого іншого радіолокатора) спрямована від найнижчої точки під так званим кутом огляду таким чином, щоб вона освітлювала суцільну смугу на землі, коли носій рухається вперед. Під час польоту по трасі радіолокаційна система випромінює послідовність коротких мікрохвильових імпульсів, кожен з яких висвітлює миттєву область на землі, яку зазвичай називають зоною дії антени.

Щоб сформувати двовимірне зображення, відгук, отриманий від землі, сортується за часом приходу як за дальністю, так і за азимутом. У напрямку дальності відлуння від землі надходять поступово пізніше від ближнього до дальнього краю смуги. Об'єкти на різних відстанях можна розрізнити, якщо відстань між ними перевищує половину довжини переданого імпульсу. [15]

4.13.3. Радар з синтезованою апертурою (*Synthetic Aperture Radar, SAR*)

Цей тип радарів працюють подібно до бічного огляду. Але вони обробляють послідовності сигналів у пам'яті для того, щоб отримати апертуру, що у багато разів більше реального розміру антени.

Апертура – це плоска поверхня, розміщена близько до антени та перпендикулярна до її осі, через яку передається основна частина потужності випромінювання.

У SAR використовується рух самого супутника і встановленої на ньому антени з реальною апертурою. Сигнали, прийняті антеною, запам'ятовуються і далі підсумовуються (накопичуються) комп'ютером, так що сигнал від об'єкта P, прийнятий в точці R на момент часу t_i , складається з сигналом від цього ж об'єкта, який раніше приймався в момент t_m , коли супутник знаходився в точці R', як показано на рис.29 [7].

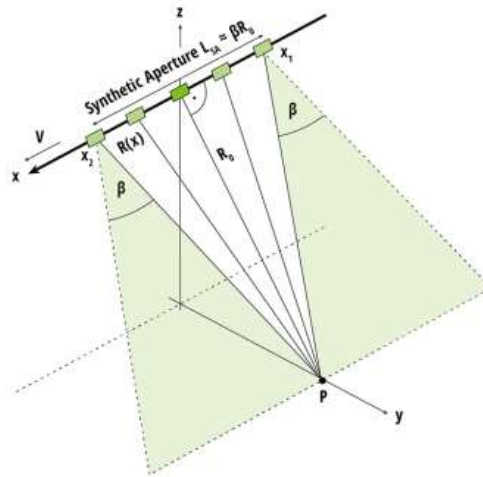


Рис. 29. Принцип утворення синтезованої апертури [7]

4.13.4. Поляризація випромінювання

Істотним інформаційним фактором в радіодіапазоні є поляризація відбитої хвилі. *Поляризація* – це орієнтація електричного (E) вектора в електромагнітній хвилі, «горизонтальна» (H) або «вертикальна» (V).

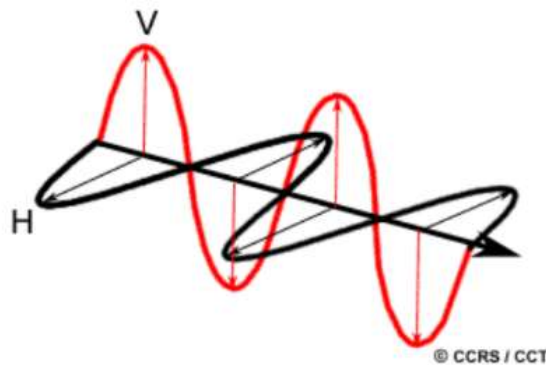


Рис. 30. Поляризація енергії [15]

Антену приймає або горизонтально, або вертикально поляризовану зворотно розсіяну енергію, а деякі радары можуть приймати обидва види. Таким чином, може бути чотири комбінації як поляризацій передачі, так і приймання:

HH – для горизонтальної передачі та горизонтального прийому;

VV – для вертикальної передачі та вертикального прийому;

HV – для горизонтальної передачі та вертикального прийому;

VH – для вертикальної передачі та горизонтального прийому.

Вивчення рівня сигналу від цих різних поляризацій несе інформацію про структуру зображеної поверхні, засновану на наступних типах розсіювання: шорсткість поверхні, об'єм і подвійне відбиття [15].

4.13.5. Спотворення радіолокаційного зображення

Як і в усіх системах ДЗ, геометрія огляду радара призводить до певних геометричних спотворень результуючого зображення.

Спотворення масштабу похилої відстані відбувається тому, що радар вимірює відстань до об'єктів у похилому напрямку, а не справжню горизонтальну відстань уздовж землі. Це призводить до змінного масштабу зображення від близького до дальнього діапазону.

Хоча об'єкти A1 і B1 (рис. 31) мають однаковий розмір на землі, їхні видимі розміри у нахилі (A2 і B2) відрізняються. Це призводить до того, що об'єкти на близькій відстані виглядають стиснутими відносно дальніх.

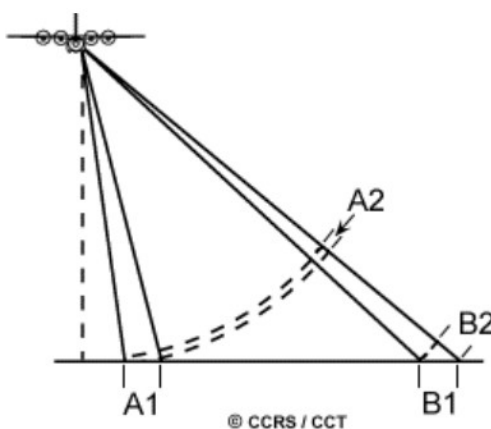


Рис. 31. Розміри об'єктів місцевості [15]

Використовуючи тригонометрію, відстань до землі можна обчислити на основі похилої відстані та висоти платформи для перетворення у правильний формат відстані до землі.

Також геометричні спотворення на радарних знімках спричиняють: зміщення рельєфу, ракурс огляду, накладання сигналів відгуку, тінь від об'єктів.

Яскравість елементів на радіолокаційному зображенні залежить від частки переданої енергії, яка повертається на радар від об'єктів на поверхні. Величина або інтенсивність цієї розсіяної енергії залежить від того, як енергія радара взаємодіє з поверхнею, що є функцією кількох змінних або параметрів.

Ці параметри включають характеристики радара (частота, поляризація, геометрія огляду тощо), а також поверхні (тип ландшафту, топографія, рельєф тощо). Характеристики, які контролюють взаємодію енергія/об'єкт: шорсткість поверхні об'єкту, взаємозв'язок огляду радара та геометрії поверхні, вміст вологи та електричні властивості об'єкту.

Для різних типів поверхні середній коефіцієнт зворотного розсіювання є різним, а значить, є різними й яскравості на зображенні. Наприклад, здатність супутникових радіолокаторів розрізнити затоплені території виявляється завдяки відбиттю водою поверхневих хвиль. Вода зменшує коефіцієнт зворотного розсіювання поверхні і відповідну інтенсивність відбитого сигналу. Таким чином, області можливих затоплень проявляються, як області з темним тоном, на тлі більш світлого тону навколишнього середовища.

Навіть для однакових поверхонь можуть виникнути розходження в яскравості пікселів. Вони створюють зернисту текстуру зображень. Цей ефект є наслідком технології одержання радарних знімків і називається *спеклом* (speckle). Для зменшення рівня шуму застосовуються різні методи фільтрації. Їхньою задачею є максимальне покращення роздільної здатності з мінімальною втратою інформативності.

Придатними до використання дані SAR стають після їхнього перетворення у картографічну проекцію. Така корекція називається орторектифікацією або геометричною корекцією і усуває на зображенні геометричні спотворення, викликані рельєфом.

На радіолокаційних зображеннях спотворення, обумовлені рельєфом, виявляються в зміні довжин схилів залежно від кута візування, що призводить до ефектів перспективного скорочення. [15]

4.14. Створення ЦМР за даними радіолокаційного знімання (інтерферометрична обробка)

Поява в 1980-х рр.. космічних апаратів, оснащених радіолокаторами з синтезованою апертурою, дало старт розвитку нової технології отримання цифрових моделей рельєфу – *радіолокаційної інтерферометрії* (англ. – InSAR).

Інтерферометрія базується на здатності вимірювати властивість електромагнітних хвиль, яка називається фазою. Припустимо, що у просторі поширюються дві хвилі з абсолютно однаковою довжиною хвилі та частотою, але початкова точка однієї трохи зміщена відносно іншої. Зсув між точками збігу на цих двох хвилях (A) називається різницею фаз (рис. 32, *a*).

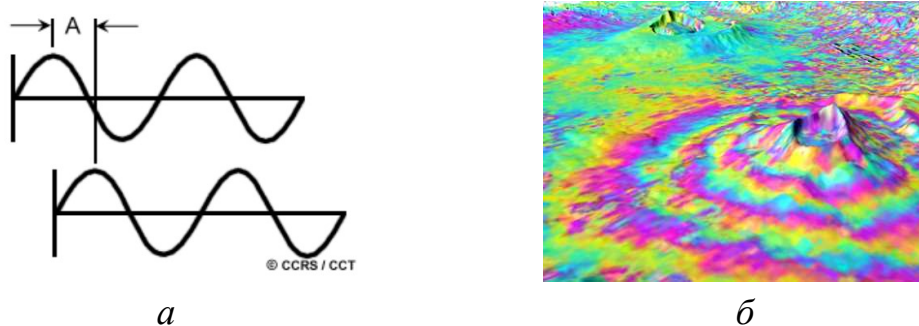


Рис. 32. Різниця фаз двох хвиль (а) [15], інтерферограма (б)

Активні радіолокаційні прилади опромінюють поверхню Землі когерентними радіоімпульсами, які характеризуються довжиною хвилі, амплітудою та фазою. Маючи значення фази для двох або декількох зображень, можна створити нове зображення, яке називається *інтерферограмою* (рис. 32, б). Якщо когерентність зображень є високою, то таке зображення буде складатися з інтерференційних смуг, що містять інформацію про відносний рівень місцевості.

В даний час побудова ЦМР стала одним з основних завдань, що вирішуються на основі обробки даних сучасних радіолокаційних систем ДЗЗ.

Метод космічної радіолокаційної інтерферометрії, суть якого полягає у спільній обробці фазових полів, отриманих зйомкою однієї і тієї ж ділянки місцевості одночасно двома антенними системами або однієї антеною на двох витках орбіти. Він поєднує високу точність фазового методу вимірювання дальності з високою роздільною здатністю космічних радіолокаторів з синтезованою апертурою.

4.14.1. Радарна інтерферометрія

Відбиті сигнали інтерферують з висланими (базовими) сигналами й утворюють інтерференційний образ із реєстрацією фаз і амплітуд сигналів. Різновидом цього підходу є диференціальна радарна інтерферометрія, основана на порівнянні двох різночасових інтерферограм. Це дає змогу з високою точністю визначити зміни об'єкта (зсуви, геодинамічні переміщення, деформації споруд чи земної поверхні тощо).

Велике значення має радарна інтерферометрія для визначення деформації земної поверхні. Таке зміщення визначають з надзвичайно високою точністю, навіть до сантиметра.

Вхідними даними для побудови рельєфу інтерферометричним методом є пара (або ланцюжок) радіолокаційних знімків земної поверхні, яка утворює інтерферометричному парі. Обмеженням для одержання інтерферометричної пари, а отже, можливості інтерферометричної обробки пари (або ланцюжка) радіолокаційних знімків, є просторова й часова бази.

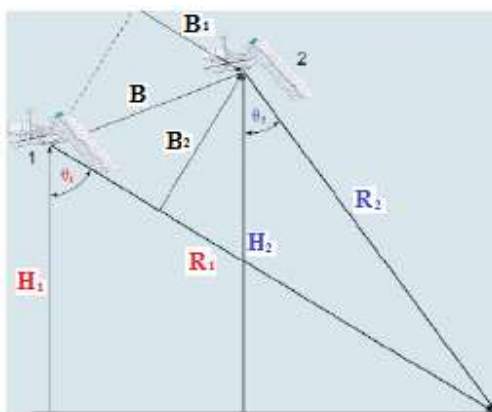


Рис. 33. Просторова та часова бази радарного знімання:

H_1 та H_2 – висота радіолокатора;

R_1 та R_2 – дальність (шлях зондуючої хвилі);

B_1 та B_2 – перпендикулярна та паралельна складові базової лінії B ;

θ_1 та θ_2 – кут між дальністю та висотою

Просторова база (або базова лінія B на рис. 33) являє собою відстань між орбітальними положеннями радіолокатора 1 і радіолокатора 2 при отриманні зображень, що утворюють інтерферометричну пару. Якість результатів інтерферометричної обробки (тобто, якість результуючої ЦМР) безпосередньо залежить від величини базової лінії і зростає з її збільшенням. Але при перевищенні деякого критичного значення довжини просторової бази інтерферометрична обробка стає неможливою, внаслідок просторової декореляції.

Часовою базою називають проміжок часу, що пройшов між часом отримання зображень радіолокаторомі 1 і 2. Поняття часової бази прямо пов'язане з такою важливою проблемою як часова декореляція, що виникає за рахунок змін рельєфу, рослинності, вологості і т. д., що відбулися в період між зйомками першим і другим радіолокаторами. У загальному випадку, ефект часової декореляції стає менш помітний із збільшенням довжини зондуючої радіолокаційної хвилі.

Кожне радіолокаційне зображення інтерферометричної пари (або ланцюжка) містить амплітудний і фазовий шар.

Амплітудний шар більш придатний для візуального аналізу.

Результуюча фаза Φ , отримана в ході інтерферометричної обробки фазових шарів зображень інтерферометричної пари, складається з таких компонентів:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_n ,$$

Φ_{topo} – фазовий набіг за рахунок огляду топографії під двома різними кутами;

Φ_{def} – фазовий набіг за рахунок зміщення поверхні в період між зйомками;

Φ_{atm} – фазовий набіг за рахунок відмінності довжин оптичних шляхів через заломлення в середовищі поширення сигналу ;

Φ_n – варіації фази в результаті електромагнітного шуму.

4.15. Створення ЦМР за даними радіолокаційного знімання (стерео обробка)

Стереоскопічна радіолокаційна зйомка з космосу відома досить давно, з початку 80-х років, коли були отримані стереопари з американського SAR SIR-B і по ним за допомогою тільки цифрової обробки відновлений рельєф поверхні.

Умовою отримання знімків, придатних для цифрової стереообробки, є зйомка з однойменних витків (висхідних або низхідних) з різницею кутів візування приблизно від 5 до 30 градусів.

При підборі стереопар бажано вибирати знімки, зроблені з меншим часовим інтервалом, щоб уникнути взаємної декореляції зображень за різних змін на поверхні за час між зйомками.

Точність вертикальної складової при цифровій стереообробці залежить практично тільки від просторової роздільної здатності радіолокатора. Це обумовлено тим, що цифровий кореляційний аналіз знімків стереопари може бути зроблено з точністю до величини елемента розрізнення.

Для того щоб отримати стереоскопічне зображення рельєфу за двома радіолокаційними знімкам, необхідно їх взаємне просторове перекриття. Крім того, повинні бути відповідними якість, освітлення об'єктів, фототон і структура обох зображень.

Необхідне для стереоінтерпретації перекриття радіолокаційних знімків однієї ділянки може бути досягнуто різними способами.

Зйомка поверхні з протилежних позицій створює труднощі при інтерпретації передусім гірських районів, оскільки одна і та ж ділянка при зйомці опромінюється в протилежних напрямках. Схили, затінені на одному знімку, будуть освітленими на іншому. Ці різні умови освітленості ускладнюють отримання стереозображення ділянки, що цікавить.

Для інтерпретації набагато краще, коли обидва радіолокаційних знімки з перекриттям отримані при однаковому напрямку спостереження (опромінення), з двох паралельних зальотів або з різних висот. У такому випадку орієнтування тіней на обох знімках однакова.

Найбільша кількість наявних до теперішнього часу дослідів здійснено за схемою, в якій одна і та ж ділянка знімається з двох паралельних зальотів з одним і тим же напрямком опромінення.

Умови зйомки вибираються таким чином, щоб забезпечити 60%-ве взаємне перекриття двох сусідніх смуг зйомки.

Для безперервного моноскопічного перекриття території сусідніми зальотами необхідно просторове перекриття в рівнинних районах від 10 до 20 %, а в гірських районах до 30%, з тим щоб компенсувати помилки аеронавігації і спотворення знімків.

Внаслідок більшого просторового перекриття стереозйомка вимагає меншої відстані між сусідніми зальотами.

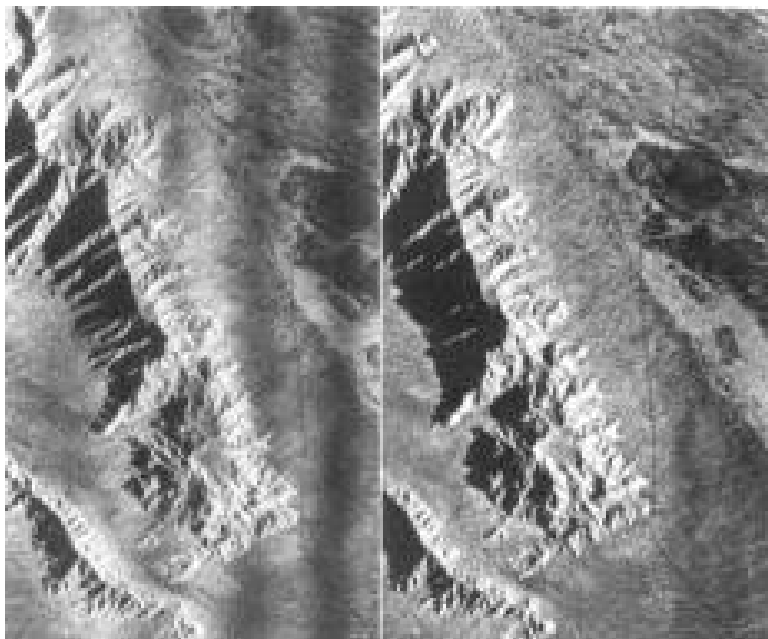


Рис. 34. Стереопара радіолокаційних знімків

4.16. Цифрова модель рельєфу SRTM

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – місія міжнародних зусиль США, Німеччини, Італії, щоб створити точну ЦМР майже всіх земних мас землі. Місія виконувалась 11 днів, лютого 2000 року на борту шатла Endeavor.

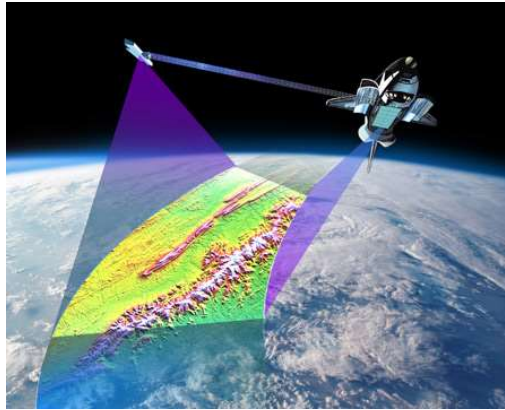


Рис. 35. Ілюстрація роботи шатлу у процесі збору даних [27]

Під час знімання використовувався радіолокаційний сенсор із синтезованою апертурою (SAR) та дві антени радара. Одна антена була розташована на шатлі, інша на кінці 60-метрової щогли, яка простягалася від вантажного відсіку шатлу.

В результаті такої роботи отримали ЦМР майже глобального масштабу від 56° пд.ш до 60° пн.ш. Дані ЦМР з С-діапазону мають крок 90 м, Х-діапазону 30 м.

Тема 5. Орбіти космічних носіїв та особливості дистанційного зондування

5.1. Класифікація та параметри орбіт

Всі штучні супутники Землі (ШСЗ) рухаються по еліпсах, в одному з фокусів яких знаходиться Земля. Відповідно, всі типи орбіт – еліптичні.

Основний розподіл орбіт робиться за величиною нахилу " i " орбіти і за значенням великої півосі орбіти " a ". Крім того, можна виділити поділ за величиною ексцентриситету " e " – малоеліптичні та високоеліптичні орбіти.

Наочне уявлення про зміну виду орбіти при різних значеннях ексцентриситету подано на рисунку 36.

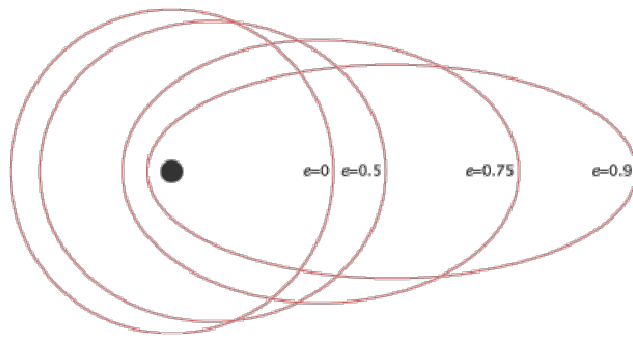


Рис. 36. Зміна виду еліптичної орбіти при різних значеннях ексцентриситету [14]

У загальному випадку нахил орбіти ШСЗ лежить в діапазоні $0^\circ < i < 90^\circ$.

Залежно від значення нахилу та висоти ШСЗ над поверхнею Землі, положення областей його видимості мають різні кордони широти, а в залежності від висоти над поверхнею і різний радіус цих областей. Чим більше нахил, тим на більш північних широтах може бути видно супутник, а чим він вищий – тим ширше область видимості.

Таким чином, нахил " i " і велика піввісь " a " визначають переміщення по поверхні Землі смуги видимості ШСЗ і її ширину.

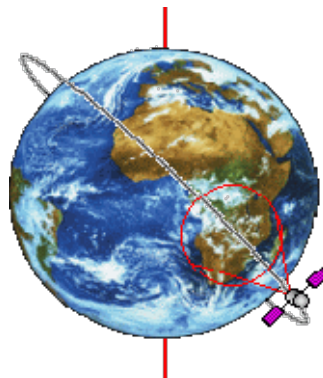


Рис. 37. Загальний випадок орбіти супутника з нахилом $0^\circ < i < 90^\circ$ [14]

Екваторіальна орбіта – крайній випадок орбіти, коли нахил " i " = 0° . Ширина смуги видимості супутника, яка розташована уздовж екватора, визначається його висотою над поверхнею Землі. Орбіти з малим нахилом " i " часто називають «близько екваторіальними».

Полярна орбіта – другий крайній випадок орбіти, коли нахил " i " = 90° . ШСЗ з полярною орбітою послідовно проходить над усіма ділянками поверхні Землі. Ширина смуги видимості супутника визначається його висотою над поверхнею Землі, але супутник рано чи пізно можна побачити з будь-якої точки. Орбіти з нахилом " i ", близьким до 90° , називають «приполярними».

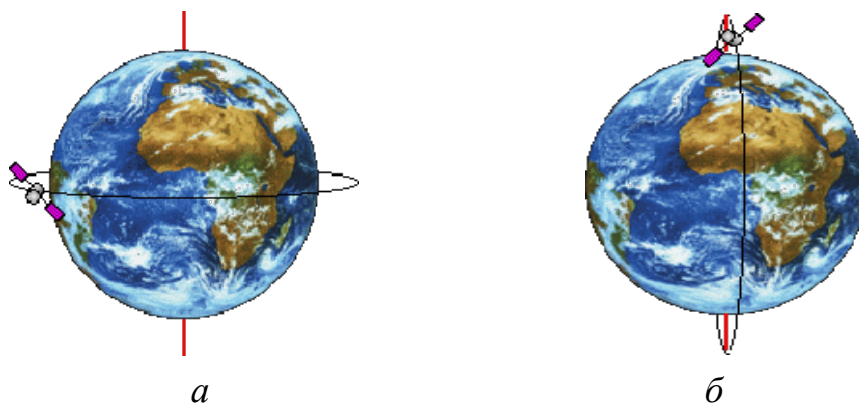


Рис. 38. Екваторіальна орбіта (а). Полярна орбіта (б) [14]

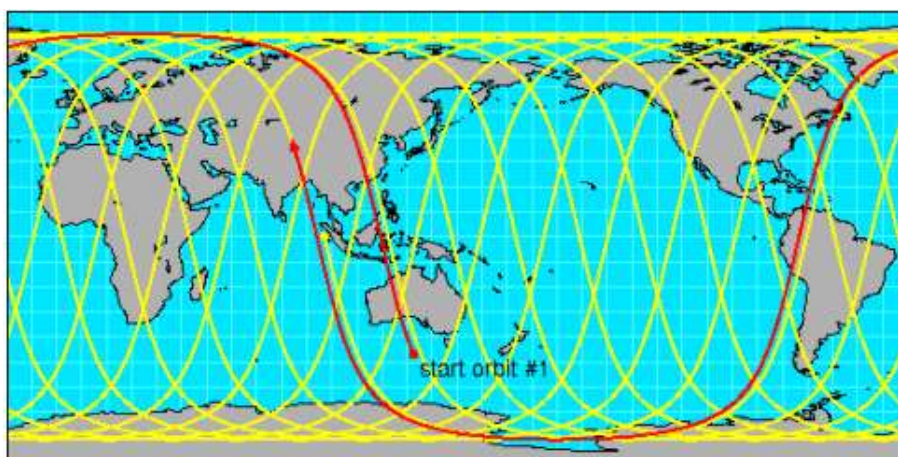


Рис. 39. Наземний шлях чисельних орбітальних обертів протягом одного дня для приполярного орбітального супутника [14]

Сонячно-синхронна орбіта (ССО). Це особливий вид орбіти, часто використовується супутникам, які виконують зйомку поверхні Землі. Являє собою орбіту з такими параметрами, що супутник проходить над будь-якою точкою земної поверхні приблизно в один і той же місцевий сонячний час.

Рух такого супутника синхронізовано з рухом лінії термінатора по поверхні Землі за рахунок чого супутник може летіти завжди над кордоном освітленої та неосвітленої сонцем території, або завжди в освітленій області, або навпаки – завжди в нічний, причому умови освітленості при прольоті над однією і тією ж точкою Землі завжди однакові.

Геостаціонарні ШСЗ (ГСС (укр.), або GSO – від англ. Geosynchronous Orbit) вважаються супутники, що мають період обертання навколо Землі рівний зоряній добі - 23ч 56м 4,09 с. Якщо нахил "i" орбіти нульовий, то такі орбіти називають геостаціонарними. Геостаціонарні ШСЗ літають на висоті 35786 км над поверхнею Землі.

Оскільки їх період обертання збігається з періодом обертання Землі навколо своєї осі, то такі ШСЗ "висять" у небі на одному місці. Якщо нахил "i" не дорівнює нулю, то такі ШСЗ називаються *геосинхронними*. У реальності багато геостаціонарних супутників мають невелике нахилення і піддаються збуренням з боку Місяця і Сонця, у зв'язку з чим вони описують на небі фігури у вигляді "вісімок", витягнутих у напрямку північ - південь.

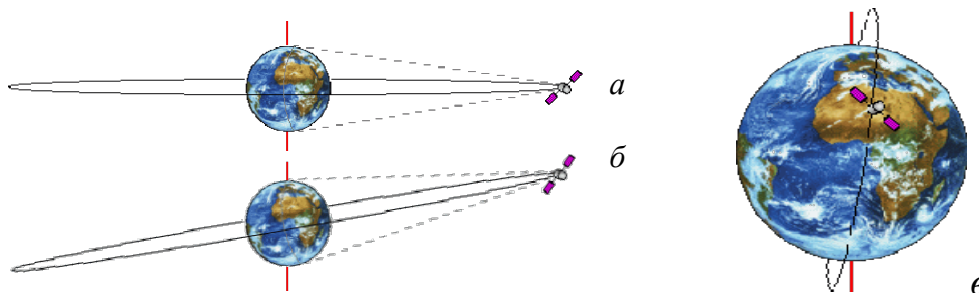


Рис. 40. Геостаціонарна (а), геосинхронна (б), сонячно-синхронна (в) орбіти [14]

Низькоорбітальні ШСЗ (НОС) зазвичай вважаються супутники з висотами від 160 км до 2000 км над поверхнею Землі. Такі орбіти (і супутники) в англійській літературі називають LEO (від англ. Low Earth Orbit). Орбіти LEO піддаються максимальним збуренням з боку гравітаційного поля Землі та її верхньої атмосфери.

Середньоорбітальні ШСЗ (СОС укр., або МЕО – від англ. Medium Earth Orbit) зазвичай вважаються супутники з висотами від 2000 км до 35786 км над поверхнею Землі. Нижня межа визначається обмеженням LEO, а верхня – орбітою геостаціонарних супутників. Цю зону в основному "заселяють" супутники навігації (ШСЗ NAVSTAR системи GPS літають на висоті 20200 км, ШСЗ системи ГЛОНАСС – на висоті 19100 км) і зв'язку, які покривають полюса Землі.

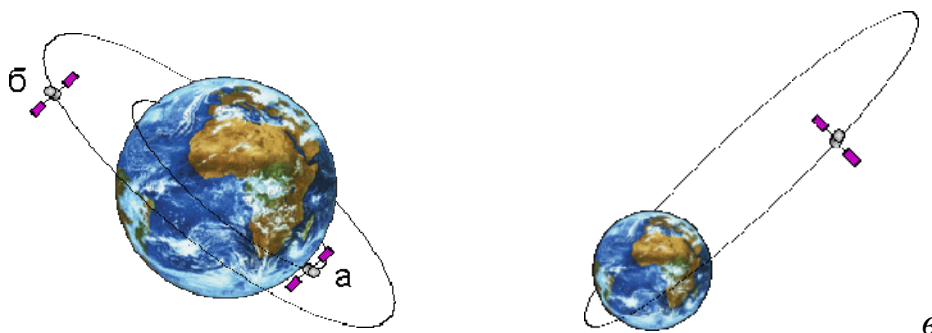


Рис. 41. Низькоорбітальні ШСЗ (а) та середньоорбітальні ШСЗ (б). Орбіта високоеліптичного супутника (в) [14]

Високоорбітальні ШСЗ (ВОС (укр.), або НЕО – від англ. High Earth Orbit) вважаються супутники, що досягають висот більше 35786 км над поверхнею Землі, тобто залітають вище геостаціонарних супутників. Орбіти можуть мати значний ексцентриситет - в цьому випадку вони називаються високоеліптичними (ВЕС), а також бути майже круговими.

Орбіти захоронення – окремий клас орбіт ШСЗ, спеціально призначений для відведення на них супутників, що вийшли з ладу для зменшення ймовірності зіткнення з працюючими супутниками і для звільнення місця новим ШСЗ.

Для ГСС орбітою поховання вважається орбіта, на 200 км вище самої орбіти ГСС. Низькоорбітальні супутники з ядерними реакторами на борту мають висоту орбіти поховання близько 1000 км, куди переводиться активна зона ядерного реактора після закінчення її роботи.

5.2. Класифікації типів ШСЗ

Дослідницькі супутники. Це супутники, призначені для дослідження планет, галактик та інших космічних об'єктів.

ШСЗ дистанційного зондування Землі. Ці супутники здійснюють дистанційне зондування Землі в різних спектральних діапазонах. Діапазон довжин хвиль, що приймаються знімальною апаратурою, становить від УФ до ІЧ та радіохвиль. Супутники служать для стеження за станом флори і фауни, клімату, морських і повітряних течій, розвідки корисних копалин і т.д.

Космічні кораблі. Пілотовані космічні апарати. Прикладами є російські кораблі серії «Союз» і американські човни «Space shuttle».

Космічні станції. Довготривалі космічні кораблі. В даний час на орбіті присутній тільки один такий об'єкт – «Міжнародна космічна станція» (МКС).

Метеорологічні супутники. Це супутники, призначені для передачі даних в цілях передбачення погоди, а також для спостереження клімату Землі.

Навігаційні супутники. Це супутники, що забезпечують рішення задачі навігації на Землі. В даний час глобальними системами навігації є GPS і ГЛОНАСС.

Розвідувальні супутники. Це супутник для спостереження Землі або супутник зв'язку, що застосовується для розвідки.

Супутники зв'язку. Штучний супутник Землі, спеціалізований для ретрансляції радіосигналу між точками на поверхні землі, що не мають прямої видимості.

Мікросупутники. Це малі космічні апарати (масою менше 500 кг), що розробляються університетами, приватними компаніями і навіть аматорами. На даному етапі стали досить затребуваними з причини своєї відносно низькій вартості і доступності. Багато університетів США, Європи, Японії запускають свої мікросупутники, які виконують завдання ДЗЗ, зв'язку між радіоаматорами, відпрацювання нових технологій.

5.3. Супутникові системи спостереження

Наразі навколоземну орбіту виведено велику кількість супутників, що містять апаратуру здатну виконувати знімання з різною просторовою роздільною здатністю, у різних частинах спектру або фіксувати стан навколишнього середовища.

Комерційні супутникові системи: Pleiades, Ikonos-2, SPOT-6 та SPOT-7 (Azersky), IRS (Indian Remote Sensing Satellites), QuickBird-2, WorldView Legion та інші.

Місії отримання мультиспектральних зображень *для моніторингу землі:* Landsat, Sentinel.

Знімальна система *Hyperion* відноситься до нового класу знімальної апаратури, призначеної для комплексного вивчення земної поверхні. Більше 200 спектральних каналів системи забезпечують зйомку земної поверхні з дуже високою роздільною здатністю. Таке збільшення кількості каналів зйомки викликано, насамперед, необхідністю вивчення і точної класифікації складних екологічних систем.

Метеорологічні супутники: TIROS, ATS, GOES, METSAT, DMSP тощо.

Радіометр AHVRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), зйомка у видимому й інфрачервоному діапазонах.

Багатоцільові супутники INSAT використовують в трьох різних областях: в теле-і радіомовленні, для забезпечення зв'язку і в інтересах служби погоди.

Океанологічні супутники: Nimbus, MOS, SeaStar.

5.4. Роздільна здатність систем ДЗ та частота збору даних

Роздільна здатність визначає максимальну вимірювальну точність системи. Поділяється на: спектральну, радіометричну, просторову і часову.

5.4.1. Просторова роздільна здатність

Просторова роздільна здатність – величина, що характеризує розмір найменших об'єктів, помітних на зображенні, тобто це розмір найменшого можливого об'єкта, який може бути виявлено.

Просторова роздільна здатність залежить від миттєвого поля зору сенсора (*Instantaneous Field of View (IFOV), A*), який є конусом кута видимості сенсора. Проекція IFOV на поверхню землі є розміром клітини (B). Просторова роздільна здатність в основному контролюється відстанню між сенсором та ціллю (C).

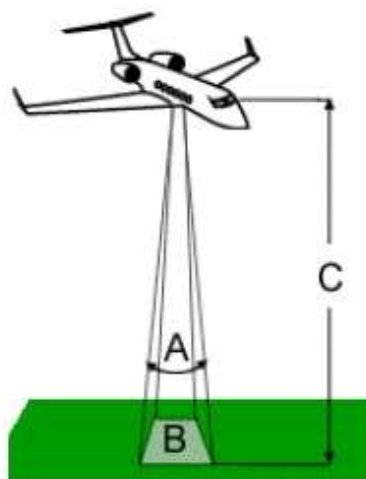


Рис. 42. Просторова роздільна здатність [15]

Усі знімки за просторовою роздільною здатністю класифікують на:

- знімки дуже низької роздільної здатності 10 000 – 100 000 м;
- знімки низької роздільної здатності 300 – 1 000 м;
- знімки середньої роздільної здатності 50 – 200 м;
- знімки високої роздільної здатності:
 - відносно високої 20 – 40 м;
 - високої 10 – 20 м;
 - дуже високої 1 – 10 м.;
 - знімки надвисокої роздільної здатності 0,3 – 0,9 м.

Приклади фрагментів космічних знімків з різною просторовою роздільною здатністю:

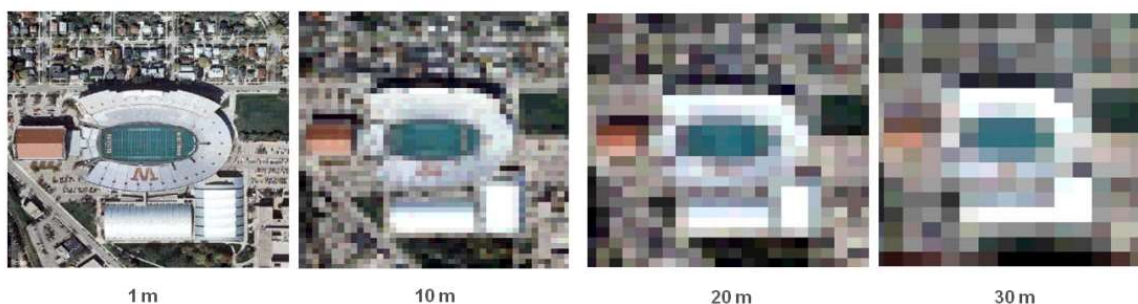


Рис. 43. Космічні знімки з різною просторовою роздільною здатністю [20]

5.4.2. Радіометрична роздільна здатність

Радіометрична роздільна здатність визначається кількістю градацій значень кольору, відповідних переходу від яскравості абсолютно «чорного» до абсолютно «білого», і виражається в кількості біт на піксель зображення. Вона описує здатність системи розрізняти дуже невеликі відмінності в записаній енергії. Чим більша радіометрична роздільна здатність сенсора, тим він чутливіший до виявлення невеликих відмінностей у відбитій або випроміненій енергії.

Це означає, що у разі радіометричної роздільної здатності 6 біт на піксель ми маємо всього 64 градації кольору ($2^6 = 64$); у випадку 8 біт на піксель – 256 градацій ($2^8 = 256$), 11 біт на піксель – 2048 градацій ($2^{11} = 2048$).

Для цифрового зображення, радіометрична роздільна здатність визначається кількістю бітів, використаних для кодування записаного значення сірого кольору. Порівнюючи 2-бітне зображення з 8-бітним зображенням, можна побачити, що є велика різниця у рівні помітних деталей.



8 біт на піксель



2 біта на піксель

Рис. 44. Приклади зображень з різною радіометричною роздільною здатністю [19]

5.4.3. Спектральна роздільна здатність

Спектральна роздільна здатність визначається характерними інтервалами довжин хвиль електромагнітного спектру, до яких чутливий сенсор. Чим більша спектральна роздільна здатність, тим більший діапазон довжин хвиль для конкретного каналу або групи.

Спектральні канали поєднуються в мультиспектральне зображення, яке дає більш повну картину поверхні Землі. Такі зображення можна використовувати в різноманітних сферах, таких як сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища та міське планування.

Багатоспектральні сенсори реєструють енергію у кількох окремих діапазонах довжин хвиль в різних спектральних діапазонах.

Удосконалені багатоспектральні датчики називають гіперспектральними сенсорами, вони виявляють сотні дуже вузьких спектральних смуг у всій видимій, ближній інфрачервоній та середній інфрачервоній частинах електромагнітного спектру.

5.4.4. Темпоральна (часова) роздільна здатність

Темпоральна роздільна здатність системи ДЗ вказує на частоту, з якою вона зображує одну і ту ж ділянку, тобто період повторного відвідування, час, що потрібен супутнику для повного обертання по орбіті.

Період повторного знімання супутником становить кілька днів. Таким чином, абсолютна часова роздільна здатність системи ДЗ для зображення точно такої самої області під тим самим кутом огляду вдруге дорівнює цьому періоду.

Можливість збирати зображення однієї і тієї ж ділянки земної поверхні в різні періоди часу є одним із найважливіших елементів для застосування даних ДЗ. Спектральні характеристики об'єктів можуть змінюватися з часом, і ці зміни можна виявити шляхом збору та порівняння різночасових зображень.

Частота збору – визначає наскільки часто виконується збір даних. Поділяється на спектральну, просторову і часову.

Комбінація роздільної здатності та частоти збору визначає можливості ДЗЗ.

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні характеристики, за якими класифікують системи дистанційного збору даних.
2. Чим відрізняються активні та пасивні системи збору даних?
3. Перерахуйте переваги активного методу збору даних.
4. Назвіть основні методи сканування систем ДЗ.
5. Яка перевага використання лінійного сканера з трьома лініями?
6. Який тип сканерів сканує місцевість паралельно до напрямку польоту?
7. Які пристрої та системи входять у комплект LIDAR?
8. В яких діапазонах довжин електромагнітного випромінювання працюють радары та як прийнято класифікувати їх канали?
9. Які є типи радіолокаторів для одержання зображень?
10. Що таке синтезована апертура? Як вона утворюється?
11. Які комбінації поляризації електромагнітного випромінювання використовуються радарями?
12. Перерахуйте методи подання цифрової моделі рельєфу.
13. З якою метою було створено місію SRTM?
14. Як утворюється інтерферометрія та її застосування?
15. Назвіть два крайні випадки орбіт штучних супутників Землі. В чому їх специфіка?
16. На яких видах орбіт супутники «висять» над однією ділянкою Землі та проходять її в один і той же місцевий час?
17. Назвіть супутникові системи, які використовуються для визначення місцеположення?
18. Як називається характеристика системи збору даних, що визначається у розмірі пікселя на місцевості?
19. Який вид роздільної здатності знімальних систем визначає в яких частинах спектру електромагнітного випромінювання вона працює?
20. Які знімки краще використовувати для дешифрування 8 бітні чи 16 біт? Чому?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСНОВИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Лекція 6. Суть дешифрування та інтерпретації знімків

Космічний знімок містить детальну інформацію про стан об'єктів земної поверхні в момент зйомки.

Дешифрування визначають як процес вивчення знімків з метою ідентифікації об'єктів і оцінки їх значимості та ґрунтується на певних фізичних характеристиках об'єктів і явищ, а його результати залежать від досвіду оператора, типу розпізнаваного об'єкта і якості знімка.

Повнота й достовірність дешифрування аерокосмічних знімків залежать від масштабу дистанційного зондування, якості отриманого зображення, його роздільної здатності. Чим більше масштаб, якісніше зображення і вище роздільна здатність, тим повнішими й достовірнішими будуть отримані дані.

Існує багато способів дешифрування знімків, але зупинимося на таких:

- візуальне дешифрування;
- автоматичне дешифрування.

Візуальне дешифрування – складний і кропіткий процес, що вимагає високого професіоналізму людини, яка здійснює аналіз знімків.

Дешифрування ґрунтується на аналізі дешифрувальних ознак, які дають уявлення про зміст і характер об'єктів та контурів місцевості.

Розрізняють прямі і непрямі ознаки дешифрування.

До *прямих ознак* відносяться: форма і розмір об'єкта, тон (колір), структура та текстура зображення, тінь, що відкидається об'єктом.

Непрямі ознаки ґрунтуються на закономірних зв'язках між об'єктами. До них відносяться тип місцевості та взаємозв'язки.

Перевага візуального методу: економічність, легкість і швидкість отримання просторової інформації (форми, розміри об'єктів, особливості їх розподілу), одночасне використання всіх дешифрувальних ознак (прямих і непрямих), застосування дешифрувальником логічного мислення та інтуїції.

Недолік візуального методу: суб'єктивізм (залежність від компетентності дешифрувальника), мала надійність, залежність від якості додаткових і знімальних матеріалів, якості та достовірності еталонів.

Автоматичне дешифрування. Цифрове зображення у формі растра представляє з себе матрицю чисел. Кожен елемент цієї матриці (піксель), відповідає певній характеристиці (відбивної здатності, температурі тощо) ділянки місцевості.

Методика автоматичного дешифрування аерокосмічних знімків базується на виборі найбільш значущих дешифрувальних ознак об'єктів та описі їх математично. В якості такої ознаки найчастіше використовується спектральний образ об'єкта.

Залежно від набору значень спектральної яскравості кожного пікселя знімку, спеціальні комп'ютерні програми визначають його приналежність до того чи іншого класу об'єктів, тобто виконують класифікацію об'єктів.

Класифікація об'єктів – це комп'ютерне дешифрування знімків або процес автоматизованого підрозділу всіх пікселів знімка на групи (класи), які відповідають різним об'єктам.

Перевага комп'ютерного методу дешифрування: можливість перетворення цифрових знімків для поліпшення їх сприйняття, застосування математичних операцій, можливість накладення зображень знімків (у тому числі різночасних).

Недолік методу: результати не завжди об'єктивні (достовірність всього 60 – 80 %), відсутня логіка та інтуїція дешифрувальника.

При дешифруванні виділяють такі окремі елементи: населені пункти, транспортну мережу, елементи рельєфу, водні поверхні, болотні ділянки, рослинний покрив, трав'яні та чагарникові угруповання, зображення ріллі та інших сільськогосподарських земель. Всі ці елементи мають свою специфіку відображення на космічних знімках та у різних діапазонах спектру. [5]

Послідовність процедури дешифрування (обробки) космічних знімків:

1. Визначення інформативних спектральних каналів знімків.
2. Корекція зображення (спектральна, геометрична, радіометрична).
3. Маскування хмар і втрачених даних на знімках у визначених каналах, атмосферна корекція.
4. Визначення локальних спектральних особливостей поверхні, візуальне дешифрування.
5. Напівавтоматичне чи автоматичне дешифрування.

6. Уточнення результатів дешифрування з урахуванням локальних особливостей, а також застосування комплексних правил дешифрування.
7. Оцінка точності дешифрування.
8. Отримання результатів дослідження. [3]

Лекція 7. Попередня обробка космічних знімків

Сирі дані ДЗ, отримані від сенсора, зазвичай містять спотворення та недоліки, усунення яких називається попередньою обробкою даних. Усі методи попередньої обробки розглядаються за трьома розділами, а саме:

- методи геометричної корекції;
- методи радіометричної корекції;
- методи атмосферної корекції.

7.1. Геометрична корекція космічних знімків

Геометричні спотворення знімків можуть бути спричинені двома видами помилок: внутрішніми та зовнішніми.

Внутрішні помилки в зображеннях ДЗ вносяться самими датчиками або в поєднанні з характеристиками обертання або кривизни землі.

Ці типи помилок виправляються за допомогою ефемерид передстартової або польотної платформи (тобто інформації про геометричні характеристики сенсорної системи та Землі на момент отримання даних).

Геометричні спотворення в зображеннях, які можна виправити за допомогою аналізу характеристик датчиків і даних ефемерид наведено на рис. 45.

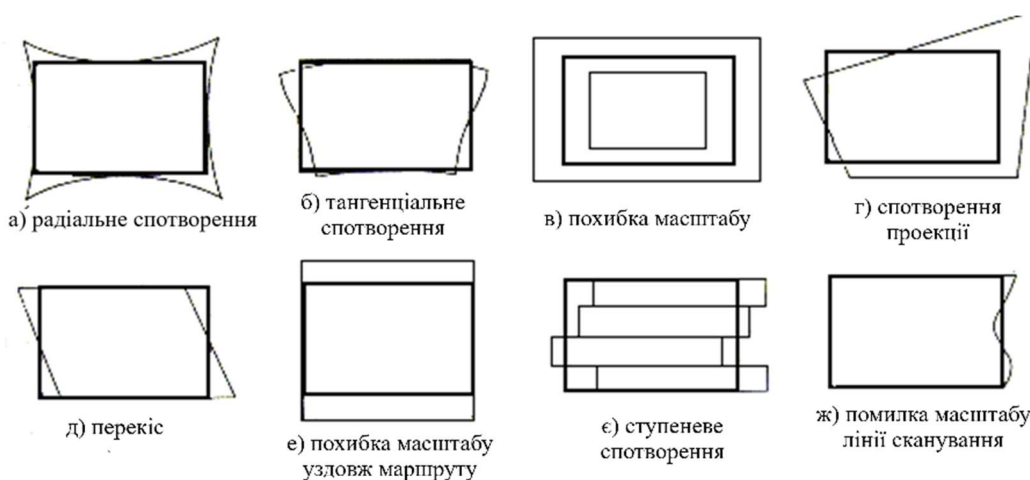


Рис. 45. Типи спотворень, які виникають за рахунок внутрішніх джерел [26]

Перекіс, спричинений обертанням Землі, з'являється через рух між фіксованою орбітальною траєкторією супутників і обертанням Землі навколо своєї осі, початок кожної лінії сканування знаходиться трохи на захід від її попередниці, що спричиняє загальний ефект викривленої геометрії на зображенні.

Тангенціальне спотворення масштабу системи сканування виникає через обертання самої системи сканування, тому що коли сканер сканує поперек кожної лінії сканування, відстань від сканера до землі збільшується далі від центру смуги землі. Хоча дзеркало сканування обертається з постійною швидкістю, але миттєве поле зору сканера рухається швидше та сканує більшу область, коли він наближається до країв, що спричиняє стиснення елементів зображення в точках, розташованих далеко від найнижчої точки.

Зовнішні помилки в зображеннях дистанційного зондування. Ці типи помилок викликані явищами, які змінюються за своєю природою в просторі та часі.

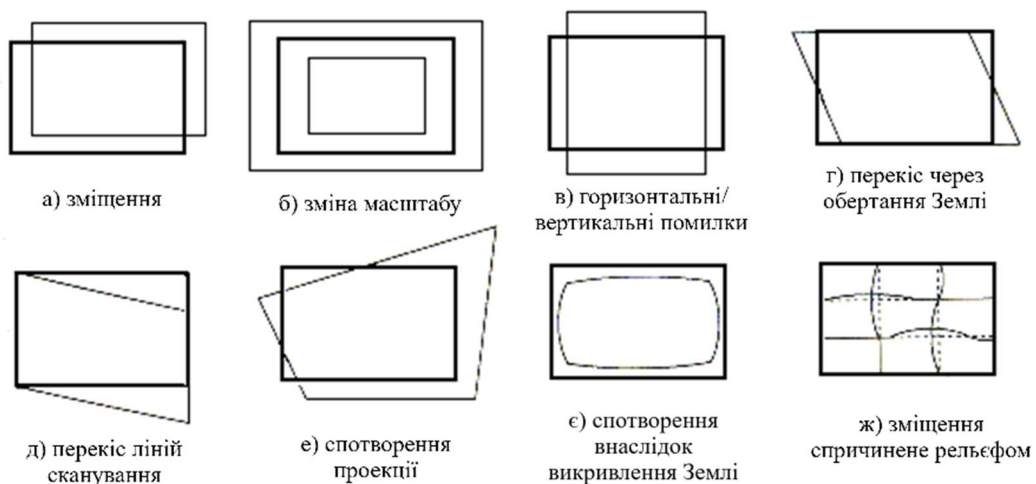


Рис. 46. Типи спотворень, які виникають за рахунок зовнішніх джерел [26]

Найважливішими зовнішніми змінними, які можуть спричинити геометричну помилку в даних дистанційного датчика, є випадкові рухи літака (або космічного корабля) у точний час збору даних, які зазвичай включають: зміни висоти, зміни положення (крен, тангаж і поворот).

Спотворення через зміну висоти. Збільшення висоти призведе до отримання зображень меншого масштабу, а зменшення висоти призведе до отримання зображень більшого масштабу. Цей тип помилки виникає, коли місцевість поступово збільшується або зменшується у висоті.

Спотворення через тангаж, крен і поворот. Супутникове ДЗ стабільніше порівняно з ДЗ із літака чи дрона, оскільки на нього не впливають атмосферна турбулентність чи вітер. У разі польоту повітряного судна на суборбітальних висотах, воно постійно стикається з атмосферними низхідними, висхідними потоками повітря, зустрічним, попутним вітром і бічним вітром під час збору даних дистанційного датчика.

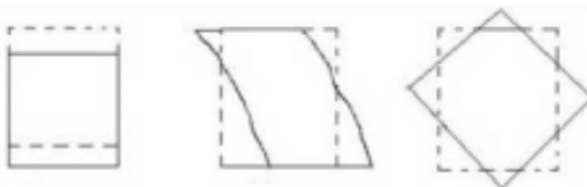


Рис. 47. Спотворення через тангаж, крен і поворот [12]

7.1.1. Геометричне трансформування зображень.

Растрові зображення в електронному вигляді, зокрема скановані карти, аерокосмознімки, не дають реальної уяви про місцезрештування, взаємне положення та розміри відображуваних ділянок. Отже, крім виправлення геометричних спотворень на знімку необхідно проводити геометричне трансформування зображення в задану систему координат картографічної проекції, що необхідно для прив'язування знімку до території чи карти. Розрізняють два види геометричного трансформування:

- ректифікація – зміна сітки рядків і стовпчиків піксельного зображення у відповідності з вибраною проекцією та системою координат;

- реєстрація – зміна сітки первинного зображення у відповідності з сіткою еталонного зображення.

Трансформування зображення – це процес перетворення зображення з метою приведення його до заданого масштабу та проекції з усуненням зміщень через нахил осі зйомки (аерознімки), рельєфу місцевості та кривизни поверхні Землі, а також з виключенням геометричних викривлень.

При виконанні прив'язки та трансформування зображення можна виділити чотири основних етапи:

- 1) вибір геометричної моделі трансформування;
- 2) задавання опорних точок;

3) перетворення координат зображення на основі обраної геометричної моделі;

4) трансформування растрового зображення у відповідності з перетвореними координатами (створення нової сітки пікселів).

Прив'язка зображення полягає в точній ідентифікації відображуваної ділянки місцевості земної поверхні та присвоєння кожній точці зображення реальних координат, які співпадають з координатами даної точки на місцевості.

Операцію виправлення геометричних спотворень виконують за допомогою опорних точок. На зображенні знаходять точки, які пов'язані з будь-якими об'єктами, координати яких відомі. Для отримання координат опорних точок можна використовувати топографічні карти, вже прив'язані знімки або глобальну систему позиціонування (ГЛОНАС, GPS). Чим більше точок, тим точніше прив'язування та трансформування зображення.

Процес прив'язки зображення до карти включає вибір піксельних координат опорних точок зображення (рядок і стовець) із відповідними координатами на карті.

У процесі прив'язки зображення до зображення вибирається піксель (тобто контрольна точка землі) на одному зображенні та ставиться його точна позиція на іншому зображенні.

Опорні точки обирають на перетині доріг, чіткі контури окремих будівель, геодезичні знаки тощо. Не слід використовувати точки мінливих явищ, таких як берегові лінії, конури рослинності і ін. Опорні точки повинні бути рівномірно розташованими на зображенні, що підвищить якість трансформування. [4]

7.1.2. Види трансформацій зображень

Перетворення координат зображення відбувається на основі обраної геометричної моделі: афінне перетворення, поліноміальна трансформація, тощо.

Афінне перетворення основний вид лінійних перетворень, таких як зсув, поворот, дзеркальне відображення. Застосовують для перетворення невеликих ділянок зображення. Афінні перетворення виконують поліномами першого порядку.

Поліноміальне перетворення. У якості геометричної моделі обирають поліноміальну геометричну модель, яка використовує для прив'язки та трансформування зображення.

Метод поліноміального перетворення засновано на обрахунку трансформаційної матриці коефіцієнтів, які використовуються для апроксимації координат опорних точок поліномами різних порядків і визначення положення всіх точок зображення.

Основна мета поліноміального перетворення полягає у визначенні такого апроксимуючого полінома, який би забезпечив найменше відхилення координат опорних точок зображення від заданих.

Частіше використовують поліноми першого та другого порядків.

Поліном *першого* порядку дозволяє здійснювати перетворення координат і працювати з зображеннями, що описують невеликі ділянки (без врахування кривизни земної поверхні).

Поліном *другого* порядку дозволяє трансформувати проєкції зображень з систем довгота/широта в топографічні та навпаки, і працювати з більшими ділянками земної поверхні (з врахуванням кривизни).

Поліном *третього* порядку може бути застосований для значно спотворених зображень. Поліноми третього порядку використовують для дефектних знімків, сканованих карт із дефектами і для поліпшення радарних зображень.

Поліноми *четвертого* порядку використовують рідко, у разі дуже спотворених зображень.

Чим вищий порядок полінома, тим точніше оброблення зображення, але тим більше необхідно опорних точок.

Мінімальна кількість точок при апроксимації поліномом першого порядку – 4, поліномом другого порядку – 6, поліномом третього порядку – 10. Для забезпечення достатнього рівня точності необхідна кількість точок, що дорівнює подвоєній мінімальній кількості. [4]

7.1.3. Методи ресемплінгу

Наступним етапом в трансформуванні зображення є *ресемплінг* – перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат та створення нового файлу, зі збереженням яскравісної структури вихідного зображення.

Необхідність перевизначення яскравості пікселів у новій системі координат пов'язана з не співпадінням сіток первинного зображення та еталонного, і як наслідок не співпадіння розташування пікселів на трансформованому зображенні по відношенню до первинного.

Тобто ділянки рівні за площею (на місцевості) описуються різною кількістю пікселів на вихідному і трансформованому зображенні. Виникає ситуація коли точка центру пікселя на вихідному зображенні на трансформованому виникає на краю пікселя або на його границі, що ускладнює передавання яскравісних значень пікселів.

Для надання відповідних значень яскравості трансформованим пікселям в програмах оброблення зображень застосовують наступні методи інтерполяції:

- метод найближчого сусіда;
- метод білінійної інтерполяції;
- метод кубічної інтерполяції [4].

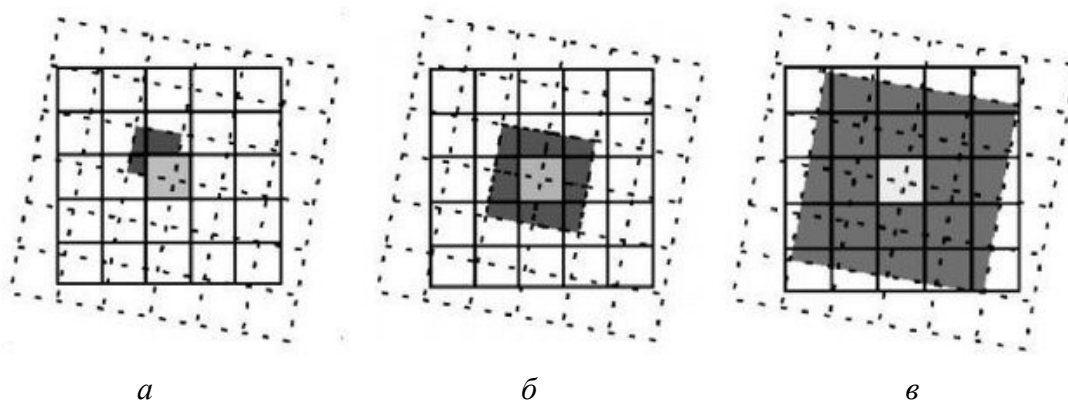


Рис. 48. Методи інтерполяції:
a – найближчий сусід; *б* – білінійна інтерполяція; *в* – кубічна інтерполяція [25]

7.1.4. Перетворення за допомогою раціональних поліномів

Для точного трансформування зображення необхідно знати фізичну модель датчика, яка представляє реальний процес формування зображення (параметри орбіти, ефемеридні дані сенсорної платформи, зміщення рельєфу, кривизну Землі, атмосферну рефракцію, спотворення лінз тощо).

Більшість супутникових зображень ДЗ складається з груп ліній сканування, отриманих під час руху супутника вперед по орбіті. У результаті різні частини одного зображення отримуються з різних позицій

датчика. Щоб чітко описати перетворення координат зображення в координати поверхні Землі, математична модель датчика, яка включає всі фізичні елементи системи зображення, може бути надзвичайно довгою та складною.

Моделі супутникових датчиків *Rational Polynomial Coefficients (RPC)* є простішими емпіричними математичними моделями, які зв'язують координати зображення (положення рядка та стовпця) з широтою та довготою з використанням висоти поверхні місцевості.

Назва «Раціональний поліном» походить від того, що модель виражається як відношення двох виразів кубічного полінома. Насправді одне зображення містить два таких раціональних поліноміальних виразу, один для обчислення позиції рядка, а інший для позиції стовпця.

Коефіцієнти цих двох раціональних поліномів обчислюються супутниковою компанією на основі орбітального положення та орієнтації супутника і точної фізичної моделі датчика. Таким чином ці коефіцієнти забезпечують компактне представлення геометрії від землі до зображення.

Модель RPC з'єднує координату зображення (r, c) з відповідною координатою землі (P, L, H) враховуючи помилки зміщення рельєфу для будь-якого супутникового зображення у вигляді поліноміального відношення.

Створення RPC різне для різних виробників, але більшість дотримується версії нелінійного методу найменших квадратів щоб відповідати поліномам. Дані для уточнення генеруються фізичною моделлю датчика, отриманою під час зйомки.

Наприклад, якщо Kompsat знімав Делі, він матиме певну траєкторію орбіти та орієнтацію. Використовуючи це, генерується вектор погляду і для кожної лінії зображення та кожного пікселя лінії визначається, на яку точку на землі дивиться супутник. Виконується співвідношення $(r, c) - (P, L, H)$.

Модель RPC визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} r &= N_S(P, L, H) / D_S(P, L, H) \\ c &= N_L(P, L, H) / D_L(P, L, H) \end{aligned} \quad ,$$

де

$$N_S(P, L, H) = a_0 + a_1L + a_2P + a_3H + a_4LP + a_5LH + a_6PH + a_7L^2 + a_8P^2 + a_9H^2 + a_{10}LPH + a_{11}L^3 + a_{12}LP^2 + a_{13}LH^3 + a_{14}L^2P + a_{15}P^3 + a_{16}PH^2 + a_{17}L^2H + a_{18}P^2H + a_{19}H^3$$

$$D_S(P, L, H) = b_0 + b_1L + b_2P + b_3H + b_4LP + b_5LH + b_6PH + b_7L^2 + b_8P^2 + b_9H^2 + b_{10}LPH + b_{11}L^3 + b_{12}LP^2 + b_{13}LH^3 + b_{14}L^2P + b_{15}P^3 + b_{16}PH^2 + b_{17}L^2H + b_{18}P^2H + b_{19}H^3$$

$$N_L(P, L, H) = c_0 + c_1L + c_2P + c_3H + c_4LP + c_5LH + c_6PH + c_7L^2 + c_8P^2 + c_9H^2 + c_{10}LPH + c_{11}L^3 + c_{12}LP^2 + c_{13}LH^3 + c_{14}L^2P + c_{15}P^3 + c_{16}PH^2 + c_{17}L^2H + c_{18}P^2H + c_{19}H^3$$

$$D_L(P, L, H) = d_0 + d_1L + d_2P + d_3H + d_4LP + d_5LH + d_6PH + d_7L^2 + d_8P^2 + d_9H^2 + d_{10}LPH + d_{11}L^3 + d_{12}LP^2 + d_{13}LH^3 + d_{14}L^2P + d_{15}P^3 + d_{16}PH^2 + d_{17}L^2H + d_{18}P^2H + d_{19}H^3$$

Модель RPC, якими забезпечене супутникове зображення може бути вдосконалена за допомогою опорних точок. [13]

7.1.5. Оцінювання параметрів перетворення

Після ідентифікації опорних точок наступним кроком є перетворення координат рядків і стовпців кожного пікселя в координати еталонної картографічної проекції. Це досягається за допомогою матриці перетворення, отриманої з GCP (Ground Control Point). Матриця перетворення містить коефіцієнти, обчислені з поліноміального рівняння.

Ці коефіцієнти можуть бути використані для геометричної корекції зображення, отриманого дистанційним зондуванням, до стандартного датуму і картографічної проекції.

Кожна опорна точка містить координати рядок-стовпець чітко визначеної точки на зображенні та її відповідне розташування в широті-довготі або метрах із посиланням на деяку точку відліку на карті.

Помилки для окремих точок розраховуються як різниця між вихідним і розрахунковим значеннями. Загальна похибка – це середньоквадратична похибка для всіх точок у наборі (розраховується окремо для опорних і контрольних точок). Різниця між опорними та контрольними точками фактично полягає в тому, що GCP є своєрідними опорами, що прив'язують знімок до реального світу, а контрольні точки – як маяки, що висвітлюють будь-які невідповідності, що залишилися.

Процес геометричної корекції виправляє значну частину геометричних помилок, наявних у вихідному зображенні, але не всі помилки. Перш ніж створювати вихідне виправлене зображення, важливо перевірити якість відповідності між двома системами координат на основі коефіцієнтів, необхідно оцінити точність перетворення полінома.

Кожна опорна точка впливає на значення коефіцієнта в матриці перетворення і деякі опорні точки створюють велику кількість помилок. Метод, який найчастіше використовується для обчислення загальної похибки, передбачає обчислення середньоквадратичної похибки (RMSE або RMS_{error}) для кожної опорної точки.

RMS_{error} – це відстань між початковим положенням GCP і перетвореними координатами. Він обчислюється за теоремою Піфагора як:

$$RMS_{error} = \sqrt{(x' - x_{orig})^2 + (y' - y_{orig})^2},$$

де x_{orig} і y_{orig} – вихідні координати рядків і стовпців опорної точки на зображенні, а x' і y' – обчислені або оцінені повторно перетворені координати на вихідному зображенні.

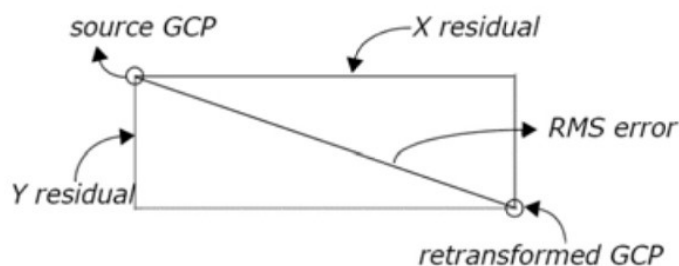


Рис. 49. Середньоквадратична помилка положення точки на зображенні [19]

Квадратний корінь із квадратів відхилень являє собою міру точності кожної опорної точки. Обчислюючи RMS_{error} для всіх GCP, можна побачити, які GCP вносять найбільшу помилку та сумувати всі RMS_{error} .

Значення залишкових і середньоквадратичних помилок може бути занадто високим, що може бути спричинено неточними координатами опорної точки, неправильним розташуванням опорної точки на знімку або низькою якістю знімку.

Якщо значення СКП кожної точки в групі GCP низьке, сума середньоквадратичної помилки також буде низькою. Тобто результат прив'язки буде точнішим. Однак вам все одно потрібно перевірити, чи

немає надто високого залишку, і, можливо, вам доведеться видалити або скинути GCP, щоб отримати найкращу якість прив'язки.

Якщо є точки із високим значенням залишку, потрібно видалити їх та додайте нові GCP, щоб зменшити залишки та суму середньоквадратичних помилок кожної групи GCP для отримання кращого результату виправлення. [10]

7.1.6. Орторектифікація

Орторектифікація (ортотрансформування) – це геометричне перетворення космознімка, щоб отримати зображення місцевості в ортогональній проекції.

У процесі такого геометричного перетворення виправляються спотворення зображення, зумовлені нахилом площини знімка та рельєфом місцевості.

У результаті проведення орторектифікації знімок перетворюється в планіметричне зображення без геометричних спотворень, крім вище названих, усуваються також спотворення зумовлені орієнтацією камери, впливом кривизни Землі та похибками математичної моделі зображення.

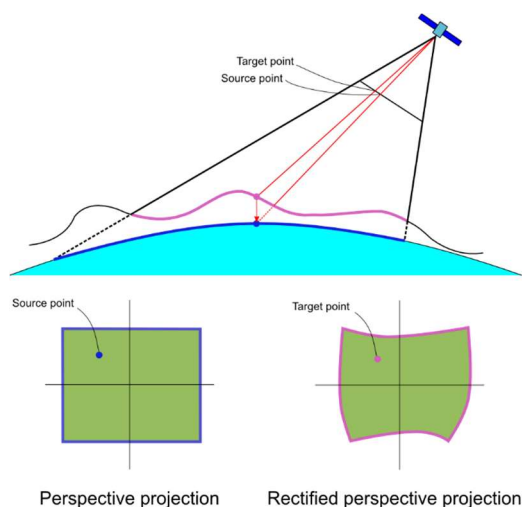


Рис. 50. Ортотрансформування знімків [24]

7.2. Радіометрична корекція даних дистанційного зондування.

Радіометрична корекція виконується для калібрування значень пікселів та/виправлення помилок у значеннях. Цей процес покращує інтерпретацію та якість даних ДЗ.

Радіометричне калібрування та виправлення особливо важливі під час порівняння кількох наборів даних за певний період часу. Енергія, яку реєструють датчики на літаках або супутниках, може відрізнятися від фактичної енергії, випромінюваної або відбитої від поверхні землі. Це пов'язано з азимутом і висотою сонця та атмосферними умовами, які можуть впливати на енергію, що записує датчик. Таким чином, для того, щоб отримати реальні або істинні значення освітленості або коефіцієнта відбиття землі, необхідно врахувати радіометричні похибки.

Майже на всю енергію, яку реєструють датчики, певною мірою впливає атмосфера. Атмосфера може розсіювати світло, додаючи його значення до випромінювання або яскравості, які виявляє датчик. Атмосфера може зменшити енергію, яка освітлює поверхню. Кількість ЕМВ змінюється залежно від пори року через сезонні відмінності у висоті Сонця та відстані між Землею і Сонцем. Вплив атмосфери також залежить від довжини хвилі. Наприклад, розсіювання Рейлі більш виражене на менших довжинах хвиль.

Таким чином значення, записане для кожного пікселя, включає не лише відбите або випромінене випромінювання від поверхні, а й випромінювання, розсіяне та випущене атмосферою. У більшості випадків нас цікавлять лише фактичні значення поверхні. Для досягнення цих значень необхідно застосувати процеси радіометричного калібрування та корекції. [17]

7.2.1. Види радіометричної корекції

Існує чотири основних типи радіометричної корекції:

радіометричне калібрування перетворює цифрові числа (DN) пікселів зображення у фізичні одиниці, такі як яскравість або коефіцієнт відбиття;

атмосферна корекція усуває або зменшує ефекти атмосферного розсіювання, поглинання та туману на зображенні;

топографічна корекція регулює зображення відповідно до коливань освітлення та відбиття, спричинених рельєфом місцевості;

нормалізація датчиків гармонізує зображення від різних датчиків або дат, усуваючи відмінності в радіометричних характеристиках [17].

7.2.2. Радіометричне калібрування

Датчик записує інтенсивність електромагнітного випромінювання для кожного пікселя у вигляді цифрового числа (DN). Для багатьох датчиків ці цифрові числа можна перетворити на більш значущі реальні одиниці, такі як яскравість, коефіцієнт відбиття або температура яскравості. Для виконання цього процесу калібрування потрібна інформація про датчик.

У випадку даних Landsat необхідну інформацію містить файл метаданих. Більшість пакетів програмного забезпечення для обробки зображень мають засоби радіометричного калібрування.

7.2.3. Атмосферна корекція знімків

Атмосферна корекція – це процес усунення впливу атмосфери для отримання значень коефіцієнта відбиття поверхні. Атмосферна корекція може значно покращити інтерпретацію та використання зображення. В ідеалі цей процес вимагає знання атмосферних умов і властивостей аерозолію на момент отримання зображення.

Моделі атмосферної корекції. Для точного застосування атмосферної корекції потрібна низка параметрів, у тому числі такі властивості, як кількість водяної пари, розподіл аерозолів. Іноді ці дані можна зібрати за допомогою польових приладів, які вимірюють атмосферні гази та аерозолі, але це часто дорого та вимагає багато часу. Інші супутникові дані також можна використовувати для оцінки кількості та розподілу атмосферних аерозолів.

Багато програмних пакетів включають спеціальні модулі атмосферної корекції, які використовують моделі переносу атмосферного випромінювання для отримання оцінки справжнього коефіцієнта відбиття поверхні.

Ці методи поділяються на два типи: методи корекції атмосфери за знімком та методи на основі моделі. Найпопулярнішими методами є:

- алгоритм DOS (Dark Object Subtraction);
- метод ACOLITE (Atmospheric Correction for OLI ‘lite’);
- метод QUAC (Quick Atmospheric Correction);
- FLAASH (Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes);
- Sen2Cor процесор для обробки даних Sentinel-2 до рівня 2A.

7.2.4. *Радіометрична нормалізація знімків*

Радіометрична нормалізація – це процес налаштування яскравості та контрастності зображень ДЗ, зроблених у різний час або в різних місцях, щоб їх можна було порівнювати точніше та послідовніше.

Різні фактори можуть ускладнити порівняння зображень, зроблених у різний час або в різних місцях, оскільки вони можуть маскувати або перебільшувати фактичні зміни в елементах поверхні.

Радіометрична нормалізація має на меті зменшити або усунути ці фактори шляхом застосування математичного перетворення до значень пікселів одного чи кількох зображень, щоб вони відповідали еталонному зображенню або стандартним умовам.

Існує два основних види радіометричного нормування: відносне та абсолютне.

Відносна нормалізація регулює значення пікселів одного зображення відповідно до значень іншого зображення, зробленого в тому самому місці, але в інший час. Це корисно для виявлення часових змін в тій самій області, таких як вирубка лісів, урбанізація або зростання врожаю.

Абсолютна нормалізація регулює значення пікселів одного чи кількох зображень відповідно до стандартних умов, таких як чисте небо, однорідна поверхня або радіометрично відкалібрована ціль. Це корисно для порівняння зображень, зроблених у різних місцях або за різних атмосферних умов, таких як хмарний покрив, серпанок або пил.

Радіометрична нормалізація має багато методів, кожен зі своїми перевагами та обмеженнями.

Зіставлення гістограми – це популярний метод, який регулює значення пікселів відповідно до статистичного розподілу іншого зображення. Це включає середнє значення, стандартне відхилення або процентиль. Він простий і швидкий, але не враховує просторовий розподіл або спектральні характеристики.

Методи на основі регресії використовують модель лінійної або нелінійної регресії для встановлення зв'язку між двома зображеннями на основі вибірки пікселів з обох зображень. Це є більш точним і гнучким, ніж зіставлення гістограми, але вимагає хорошого вибору та представлення вибіркового пікселів.

Радіометрична нормалізація є необхідним кроком для часового та просторового порівняння зображень ДЗ. Щоб досягти цього, доступні різноманітні інструменти, такі як QGIS, ENVI та R (це безкоштовна мова програмування з відкритим кодом і середовище для статистичних обчислень і графіки, яке містить пакети та функції для операцій із растровими зображеннями). [18]

7.2.5. Топографічна корекція

У гірських місцевостях рельєф сильно впливає на сигнали, що реєструються супутниковими датчиками. Таким чином, топографічну корекцію необхідно проводити, щоб усунути або зменшити топографічні впливи під час визначення відбивної здатності земної поверхні на пересіченій місцевості.

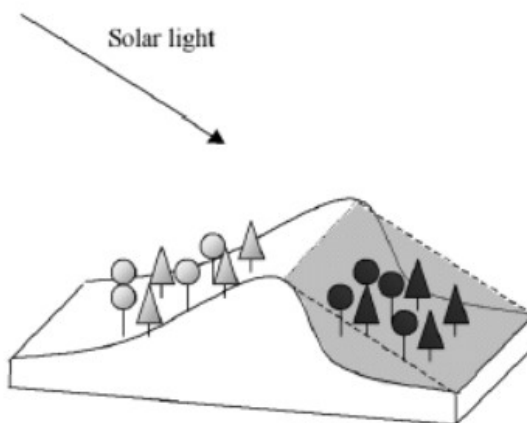


Рис. 51. Вплив рельєфу на освітлення поверхні у гірській місцевості [23]

Використання даних ДЗ з гірських регіонів зазвичай вимагає додаткової попередньої обробки, включаючи поправки на зміщення рельєфу та різницю сонячного освітлення. Зокрема, варіації в освітленні впливають на розрізнення ґрунтового покриття, оскільки той самий ґрунтовий покрив матиме різні спектральні реакції серед затінених і незатінених областей

Було розроблено ряд методологій топографічної корекції для врахування топографічних впливів, таких як поправка на косинус (Косинусна корекція – це математична модель, яка передбачає інтенсивність світла під різними кутами падіння), поправка Minnaert, поправка С, корекція датчика сонця (Sun-Canopy-Sensor, SCS), SCS + С поправка і корекція Shepherd. [18]

7.3. Корекція помилок сенсору

Шум на зображенні може бути наслідком нерівностей або помилок, які виникають через датчик та/або записі й передачі даних.

Поширені форми шуму включають систематичні смуги або смуги та пропущені лінії. Обидва ці ефекти слід виправити перед подальшою обробкою або класифікацією.

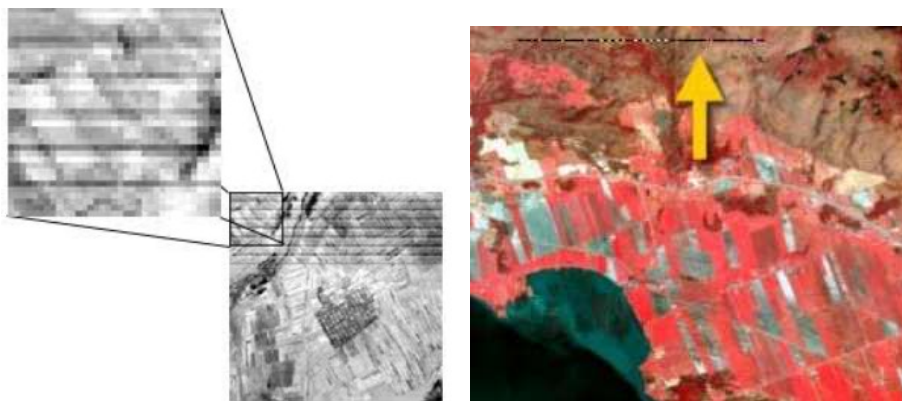


Рис. 52. Приклади помилок сенсору [15]

Смуги були поширені в ранніх даних Landsat MSS через варіації та зміщення відгуку за часом шести детекторів MSS. Зміщення було різним для кожного з шести детекторів, через що однакова яскравість по-різному представлялася кожним детектором. Таким чином, загальний вигляд мав «смугасти» ефект. Процес коригування робив відносну корекцію серед шести датчиків, щоб узгодити їхні видимі значення одне з одним.

Пропущені рядки виникають, коли є системні помилки, які призводять до відсутності або пошкодження даних уздовж рядка сканування. Пропущені лінії зазвичай «виправляються», замінюючи рядок зі значеннями пікселів у рядку вище або нижче, або середнім значенням двох [15].

7.4. Покращення зображення

Покращення використовуються для полегшення візуальної інтерпретації та розуміння зображень. Перевага цифрових зображень полягає в тому, що вони дозволяють маніпулювати значеннями цифрових пікселів у зображенні.

Хоча радіометричні поправки для освітлення, атмосферних впливів і характеристик датчика можуть бути зроблені до розповсюдження даних користувачеві, зображення все одно може бути не оптимізоване для візуальної інтерпретації.

З великими варіаціями спектрального відгуку від різноманітних об'єктів (наприклад, лісу, пустелі, снігових полів, води тощо) жодна загальна радіометрична корекція не може оптимально врахувати та відобразити оптимальний діапазон яскравості та контрастності для всіх об'єктів. Таким чином, для кожної програми та кожного зображення необхідне власне налаштування діапазону та розподілу значень яскравості [15].

7.4.1. Посилення контрасту знімків

У необроблених зображеннях корисні дані часто заповнюють лише невелику частину доступного діапазону цифрових значень (зазвичай 8 біт або 256 рівнів). Підвищення контрасту передбачає зміну вихідних значень таким чином, щоб використовувати більшу частину доступного діапазону, тим самим збільшуючи контраст між об'єктами та їхнім фоном.

Покращення контрастності передбачає внесення змін у гістограму зображення. Маніпулюючи діапазоном цифрових значень у зображенні, графічно представленою його гістограмою, ми можемо застосувати різні покращення до даних.

Найпростішим типом посилення є *лінійне розтягнення контрасту*. Це передбачає визначення нижньої та верхньої меж гістограми (зазвичай мінімального та максимального значень яскравості на зображенні) і застосування трансформації, щоб розтягнути цей діапазон на всю гістограму.

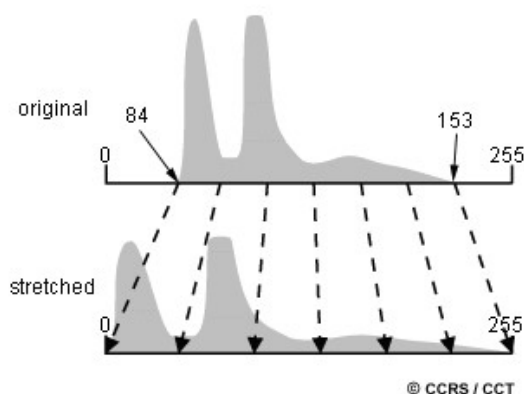


Рис. 53. Лінійне розтягнення контрасту [15]

У даному прикладі мінімальне значення (зайняте фактичними даними) на гістограмі становить 84, а максимальне значення – 153. Ці 70 рівнів займають менше однієї третини від повних 256 доступних рівнів.

Лінійне розтягування рівномірно розширює цей невеликий діапазон, щоб охопити весь діапазон значень від 0 до 255. Це покращує контрастність зображення: світлі тоновані ділянки виглядають світлішими, а темні — темнішими, що значно полегшує візуальну інтерпретацію.

Рівномірний розподіл вхідного діапазону значень у всьому діапазоні не завжди може бути відповідним покращенням, особливо якщо вхідний діапазон не розподілений рівномірно.

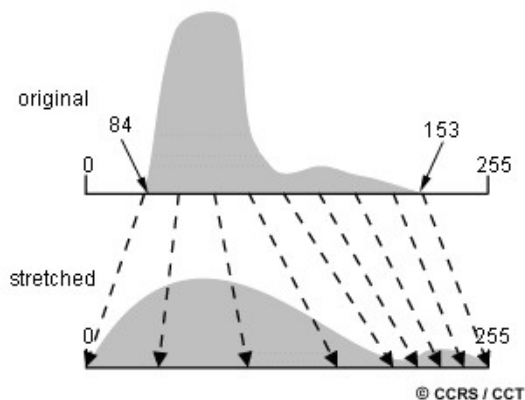


Рис. 54. Розтягнення, вирівняне за гистограмою [15]

У цьому випадку розтягнення, вирівняне за гистограмою, може бути кращим. Це розтягування призначає більше відображуваних значень (діапазону) частинам гистограми, які часто зустрічаються. Таким чином, деталізація в цих областях буде покращена порівняно з тими областями вихідної гистограми, де значення зустрічаються рідше. В інших випадках може знадобитися посилити контрастність лише певної частини гистограми. [15]

7.4.2. Фільтрування зображень

Просторова фільтрація охоплює інший набір функцій цифрової обробки, які використовуються для покращення зовнішнього вигляду зображення.

Просторові фільтри призначені для виділення або придушення певних особливостей зображення на основі їх просторової частоти.

Просторова частота пов'язана з концепцією текстури зображення. Це стосується частоти змін тону, які з'являються на зображенні.

«Грубі» текстуровані ділянки зображення, де різкі зміни тону на невеликій ділянці, мають високі просторові частоти, тоді як «згладжені»

ділянки з невеликою варіацією тону на кількох пікселях мають низькі просторові частоти.

Звичайна процедура фільтрації передбачає переміщення «вікна» розміром у кілька пікселів (наприклад, 3x3, 5x5 тощо) над кожним пікселем зображення, застосування математичних розрахунків із використанням значень пікселів у цьому вікні та заміну центрального пікселя на нове значення.

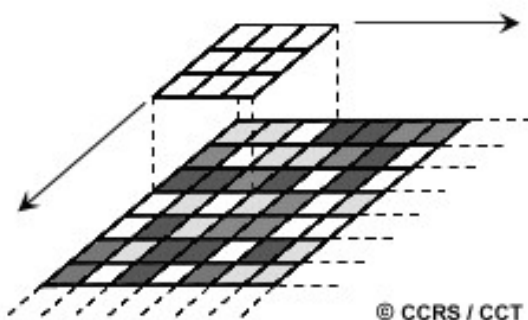


Рис. 55. Процес фільтрування зображення [15]

Вікно переміщується по рядках та стовпцях по одному пікселю за раз, і обчислення повторюється, доки все зображення не буде відфільтровано та не буде створено «нове» зображення.

Змінюючи виконані обчислення та вагові коефіцієнти окремих пікселів у вікні фільтра, фільтри можна спроектувати для посилення або придушення різних типів функцій.

Фільтр низьких частот призначений для підкреслення більших однорідних областей подібного тону та зменшення дрібних деталей зображення. Таким чином, фільтри низьких частот зазвичай служать для згладження зовнішнього вигляду зображення.

Високочастотні фільтри діють протилежно й служать для посилення дрібних деталей на зображенні. Одна реалізація фільтра високих частот спочатку застосовує фільтр низьких частот до зображення, а потім віднімає результат від оригіналу, залишаючи лише інформацію про високу просторову частоту.

Спрямовані фільтри або фільтри визначення країв призначені для виділення лінійних об'єктів, таких як дороги чи межі поля. Ці фільтри також можуть бути розроблені для покращення функцій, орієнтованих у певних напрямках. Ці фільтри корисні в таких додатках, як геологія, для виявлення лінійних геологічних структур [15].

7.5. Трансформація зображень

Трансформації зображень зазвичай передбачають маніпулювання декількома діапазонами даних, будь то з одного мультиспектрального зображення, з двох або більше зображень однієї області, отриманих у різний час (тобто багаточасові дані зображення).

У будь-якому випадку перетворення зображень генерують «нові» зображення з двох або більше джерел, які підкреслюють певні особливості чи властивості, що цікавлять, краще, ніж оригінальні вхідні зображення.

Основні перетворення зображення застосовують прості арифметичні операції до даних зображення. Віднімання зображень часто використовується для визначення змін, які відбулися між зображеннями, зібраними в різні дати. Як правило, у двох зображеннях, які були геометрично зареєстровані, від значення пікселів (яскравості) в одному зображенні (1) віднімаються значення пікселів в іншому (2).

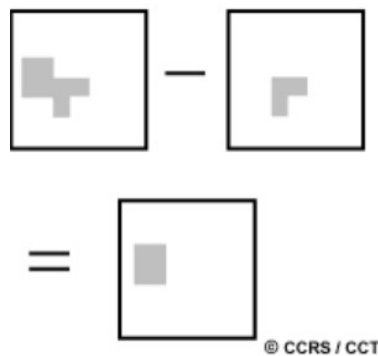


Рис. 56. Трансформація зображень [15]

Масштабування результуючого зображення (3) шляхом додавання константи (у цьому випадку 127) до вихідних значень призведе до відповідного зображення «різниці».

У такому зображенні області, де відбулася незначна зміна (А) між оригінальними зображеннями, матимуть кінцеві значення яскравості близько 127 (середні тони сірого), тоді як ті області, де відбулася значна зміна (В), матимуть значення вищий або нижчий за 127 — яскравіший або темніший залежно від «напрямку» зміни коефіцієнта відбиття між двома зображеннями.

Цей тип перетворення зображення може бути корисним для картографування змін у міському розвитку навколо міст і для визначення територій, де відбувається вирубка лісів, як у цьому прикладі. [15]

7.6. Аналіз головних компонент

Одне з таких перетворень називається *аналізом головних компонент*. Мета цього перетворення полягає в тому, щоб зменшити розмірність (тобто кількість каналів) у даних і стиснути якомога більше інформації в оригінальних каналах у меншу кількість каналів.

«Нові» канали, отримані в результаті цієї статистичної процедури, називаються *компонентами*.

Цей процес намагається максимізувати (статистично) кількість інформації (або відхилення) від вихідних даних до найменшої кількості нових компонентів.

Як приклад використання аналізу головних компонентів, семиканальний набір даних Thematic Mapper (TM) може бути перетворений таким чином, щоб перші три головні компоненти містили понад 90 відсотків інформації у вихідних семи каналах. Інтерпретація та аналіз цих трьох діапазонів даних, поєднуючи їх візуально чи цифрово, є простішим і ефективнішим, ніж спроба використати всі вихідні сім каналів. Аналіз основних компонентів та інші складні перетворення можна використовувати або як техніку для покращення візуальної інтерпретації, або для зменшення кількості каналів, які будуть використовуватися як вхідні дані для процедур цифрової класифікації [15].

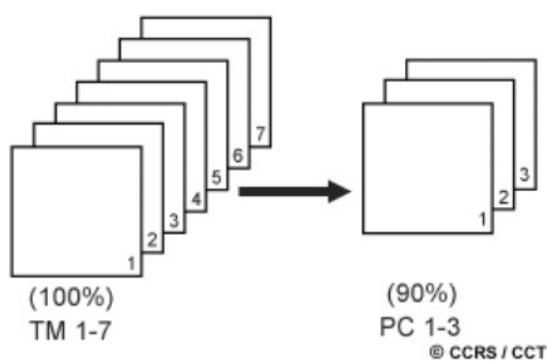


Рис. 57. Метод аналізу головних компонент [15]

Лекція 8. Тематична обробка супутникових знімків

8.1. Методи комбінування каналів

Для кращого візуального сприйняття знімків ДЗ використовують синтез знімків у різних діапазонах.

Синтез знімків – це об'єднання каналів супутникового знімка в одне кольорове зображення. Будь-яке кольорове зображення формується з трьох каналів: червоного (Red), зеленого (Green) та синього (Blue), тому таке зображення також називають зображенням RGB – цей принцип зображено на рисунку.

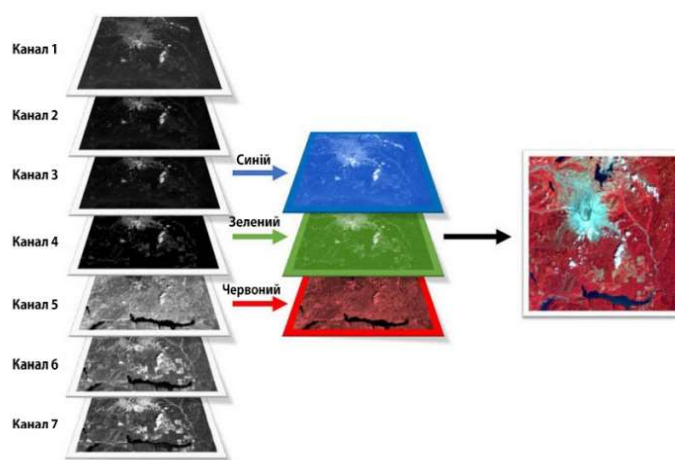


Рис. 58. Синтез каналів супутникового зображення [21]

З наявних чорно-білих зображень каналів супутника можна вибрати будь-які три і відобразити їх відповідно синім, зеленим і червоним кольором – власне, ці три кольори при злитті створюють усю гаму кольорів. Така комбінація називається кольоровий композит та корисна для візуальної інтерпретації.

Кольорові композити можуть бути описані наступним виразом:

$$R G B = B_r B_g B_b,$$

- де:
- R відповідає Червоному;
 - G відповідає Зеленому;
 - B відповідає Синьому;
 - B_r це номер каналу, що асоціюється з червоним кольором;
 - B_g це номер каналу, що асоціюється з зеленим кольором;
 - B_b це номер каналу, що асоціюється з синім кольором.

Розглянемо приклад комбінації каналів для двох супутників Sentinel-2 та Landsat-8. Їхні сенсори мають різну кількість каналів та

працюють у різних довжинах хвиль, але деякі композити кольорів для них є спільними, хоча при цьому використовуються різні номери каналів.

Таблиця 1

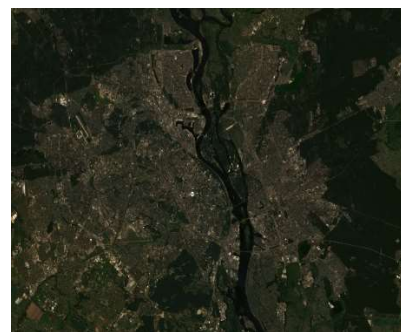
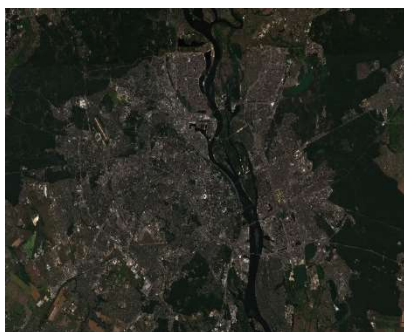
Комбінації каналів супутників Sentinel-2 та Landsat-8

Комбінація каналів

Sentinel-2

Landsat-8

Натуральний колір
(4, 3, 2)



У природній комбінації кольорів використовуються червоний (4), зелений (3) і синій (2) канали. Його мета – відобразити зображення так само, як наші очі бачать світ. Як ми бачимо, здорова рослинність зелена. Далі міські риси часто виглядають біло-сірими. Вода має темно-синій відтінок залежно від того, наскільки вона чиста.

Інфрачервоний

Sentinel-2 - (8, 4, 3)

Landsat-8 - (5, 4, 3)



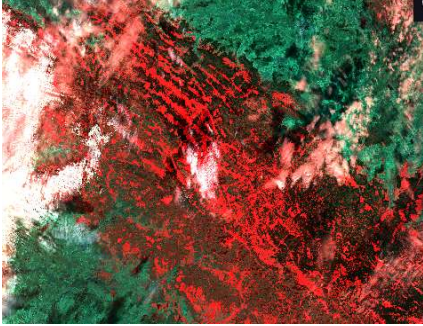
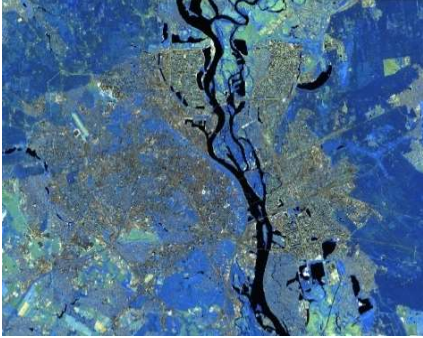
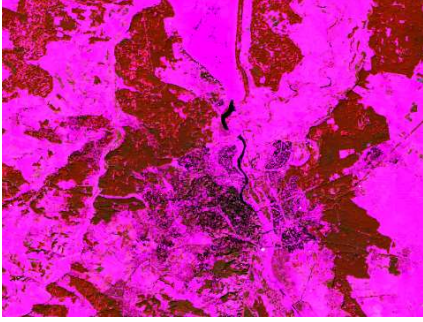
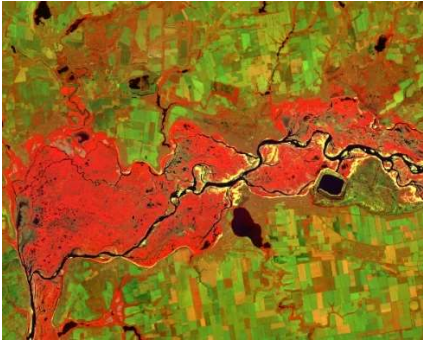
Комбінація інфрачервоних каналів покликана підкреслити здорову та нездорову рослинність завдяки використанню ближнього інфрачервоного діапазону, який особливо добре відбиває хлорофіл. Ось чому на кольоровому інфрачервоному зображенні більш густа рослинність має червоний колір. Темні зони – це вода, а міські – білі.

Використання псевдо кольору при різних комбінаціях каналів є унікальним інструментом для виявлення інформації, недоступної людському оку. При візуалізації певних комбінацій каналів супутника можна чітко побачити об'єкти, які раніше були не помітними на знімку.

Через різну кількість каналів та довжини хвиль, в яких працюють сенсори, для Sentinel-2 та Landsat-8 є спільні варіанти візуалізації і зовсім відмінні, притаманні тільки конкретній знімальній системі.

Кілька унікальних композитів для кожного супутника наведено у таблиці нижче.

Приклади кольорових композитів супутникових знімків

Комбінація каналів	Інформація, яку можна отримати внаслідок синтезування	Знімок
<i>Sentinel-2</i>		
02, 11, 12	Товстий лід і сніг виглядають яскраво-червоними або червоно-помаранчевими. На зображенні рослинність буде виглядати зеленуватою, а ґрунт – яскраво-блакитним. Хмари здаються білими, тому ця комбінація смуг особливо корисна для відмінності хмар від снігу.	
12, 11, 8A	Ця комбінація не містить видимих каналів і забезпечує найкраще проникнення крізь атмосферу. Рослинність виглядає в блакитних кольорах, голий ґрунт у відтінках коричневого та жовтого. Вода виглядає в дуже темних відтінках або чорною, тому берегові лінії та береги чітко виражені.	
<i>Landsat-8</i>		
5, 6, 4	Підходить для виділення землі від води. На цьому псевдо кольоровому зображенні земля виглядає у відтінках помаранчевого та зеленого, лід виділяється яскравим пурпуровим кольором, а вода виглядає у відтінках синього.	
5, 7, 1	У цій комбінації каналів використовуються діапазони NIR, SWIR2 і Coastal Aerosol. Діапазон Coastal Aerosol є унікальним для Landsat 8 і використовується в основному для відстеження дрібних часток, таких як пил і дим, а також для спостереження за мілководдям. У такому поєднанні кольорів рослинність виглядає помаранчевою.	

8.1.1. Паншарпенінг

Панхроматичне підвищення різкості (pan-sharpening) – це техніка, яка поєднує деталі високої роздільної здатності з панхроматичного каналу з кольоровою інформацією з нижчою роздільною здатністю інших каналів (зазвичай лише видимого діапазону).

Панхроматичне злиття є радіометричною трансформацією. Ряд компаній-постачальників пропонують багатоканальні знімки з низькою роздільною здатністю разом з панхроматичними зображеннями з високою роздільною здатністю однієї і тієї ж сцени.

Цей процес використовується для збільшення просторової роздільної здатності та покращення візуалізації багатоканального зображення з одноканальним зображенням за допомогою високої роздільності.

8.2. Індексні зображення

У багатьох випадках недостатньо аналізу спектральної відбивної здатності в окремих зонах спектру. Більш інформативними бувають відношення або різниці відбиття сонячного випромінювання у різних зонах спектру.

Показники, що характеризують співвідношення відбиття в різних каналах супутникової зйомки і є спектральними індексами.

Оскільки дані ДЗ є цифровими числами їх можна додавати, віднімати, ділити, тощо, щоб створювати нові зображення, покращуючи деякі об'єкти. Ще одна перевага спектрального співвідношення полягає в тому, що оскільки ми розглядаємо відносні значення (тобто співвідношення) замість абсолютних значень яскравості, варіації освітленості сцени в результаті топографічних ефектів зменшуються.

Таким чином, хоча абсолютні коефіцієнти відбиття для вкритих лісом схилів можуть змінюватися залежно від їх орієнтації відносно сонячного освітлення, співвідношення їх коефіцієнтів відбиття між двома каналами завжди повинно бути дуже подібним.

Існує велика кількість індексів, які використовують у сільському, лісовому, водному господарствах, геологія, ґрунтознавстві, дослідження наслідків пожеж, тощо.

Перший вегетаційний індекс RVI (Ratio Vegetation Index) був розроблений у 1969 році С.Ф. Jordan. А в 1973 році J.W. Rouse та його

співавтори створили вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI – це найвідоміший та найпопулярніший вегетаційний індекс, що рахується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}.$$

Створити індексне зображення для будь-якого індексу та сенсору можна у всіх програмних продуктах, що працюють з даними ДЗЗ. Більшість індексів вже є прописаними у внутрішні бібліотеки програмного забезпечення, а якщо потрібного вам індексу чи сенсора немає у переліку, то можна прописати формулу вручну.

8.3. Класифікація зображень

Класифікація цифрових зображень – це процес розпізнавання образів елементів зображення (пікселів), кожний з яких в загальному випадку описується n -мірним вектором ознак (атрибутами) $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, на кінцеве число класів об'єктів (областей зображення). [2]

Її метою є автоматично класифікувати всі пікселі на цифровому зображенні. Перед початком процесу класифікації потрібно визначитися з інформаційними та спектральними класами, що є на зображенні.

Інформаційні класи – це всі категорії об'єктів, що представляють інтерес для користувачів даних, наприклад, житлові, промислові, лісові, водні об'єкти тощо.

Спектральні класи – це класи/кластери, яким відповідають окремі групи з аналогічними цифровими номерами (спектральними кривими відбиття).

При класифікації зображення використовується припущення що однакові об'єкти мають подібні спектральні характеристики, а спектральний відгук певного об'єкту є унікальним в порівнянні з іншими об'єктами інтересу. Використовуючи значення спектрального відгуку відомого об'єкту, ми можемо знайти всі приклади цього об'єкту на зображенні. [19]

8.3.1. Методи класифікації

Автоматична класифікація зображень буває двох видів: керована (контрольована) і некерована.

Керована класифікація зображення використовує зразки об'єктів, які точно ідентифіковано (тобто призначено пікселі до інформаційних класів), алгоритм класифікує пікселі, що ще не ідентифіковані.

Процедура починається з вибору та збору користувачем областей на зображенні, які відповідають класам інтересу, тобто інформаційним класам. Потім, алгоритм класифікації знайде інші подібні ділянки на зображенні.

Процедура виконання керованої класифікації зображень складається з таких етапів:

- відобразити зображення з одного каналу або комбінації трьох каналів;

- зібрати навчальні вибірки, що є підмножинами зображень, які містять спектральний клас, пов'язаний з певним інформаційним класом. Для кращого результату класифікації потрібно мати більше одного спектрального класу для даного інформаційного класу;

- вибрати тип класифікатора;
- виконати класифікацію;
- уточнити навчальні вибірки;
- оцінити точність класифікації.

Контрольована класифікація зображень відбувається у вигляді ітераційний (наближень).

Типи класифікаторів керованої класифікації зображень: правило паралелепіпеда, мінімальна відстань, максимальна правдоподібність, метод спектрального кута, відстань Махаланобіса, бінарне кодування.

У процесі *некерованої* класифікації зображення автоматично розділяється на спектральні класи, що відповідають природнім групам об'єктів в даних без задавання їх зразків.

У процедурі класифікації користувач вводить деякі параметри: необхідну кількість класів, кількість ітерацій, поріг сходимості.

Процес некерованої класифікації зображення складається з таких етапів:

- класифікація зображення;
- виявлення кластерів;
- оцінка точності.

Основною умовою є припущення що спектральні значення в межах даного типу покриття близькі один до одного, в той час як дані в різних класах порівняно добре розділені. Алгоритм знаходить пікселі зі схожими

спектральними властивостями. Після класифікації, користувач дає назви кожному класу, тобто користувач відносить спектральні класи до відповідних інформаційних класів.

Переваги:

- немає необхідності мати точні попередні знання про регіон;
- можливість виникнення людських помилок зведена до мінімуму;
- унікальні класи визнаються як окремі підрозділи;
- навчання не потрібне.

Недоліком є проблеми при підборі визначених спектральних класів в потрібну категорію інформації, оскільки визначені класи є «спектральними класами» не відповідають типу покриття або інформаційним класам.

Методи класифікації: К-середніх, ISODATA.

Як правило, для процесу класифікації використовуються два або більше каналів. Робота з більш ніж з одним каналом розширює можливості для унікальної ідентифікації інформаційних класів.

Робота з перетвореними каналами (наприклад, коефіцієнтами) може поліпшити точність класифікації. Наприклад, співвідношення між інфрачервоними та видимими каналами використовуються для ідентифікації рослинності. Розмірність простору класифікації залежить від кількості розглянутих каналів. [19]

8.3.2. Оцінка точності класифікації

Помилки класифікації виникають, коли піксель (або об'єкт), що належить до одного класу, призначається до іншого класу. Помилки пропуску виникають, коли об'єкт не входить до класу, що оцінюється. Помилки призначення виникають, коли об'єкт неправильно включений в категорію, що оцінюється. Наприклад, помилки пропуску – це помилки віднесення неродючої землі на місцевості до категорії сільськогосподарських угідь на карті. Це спричинило видалення з карти ділянки справжньої безплідної землі. Так само помилками призначення буде віднесення площі сільськогосподарських угідь на місцевості до неродючої землі на карті. Отже, помилка пропуску в одному класі буде зарахована як помилка призначення в іншому класі.

Після проведення класифікації необхідно визначити ступінь помилки в кінцевому продукті. Помилки є результатом неправильного

призначення пікселів для класів. Найпоширенішим методом представлення точності класифікації є створення матриці $k \times k$, де k представляє кількість класів.

	W	S	F	U	C	H	Row Total
W	480	0	5	0	0	0	485
S	0	52	0	20	0	0	72
F	0	0	313	40	0	0	353
U	0	16	0	126	0	0	142
C	0	0	0	38	342	79	459
H	0	0	38	24	60	359	481
Column total	480	68	356	248	402	438	1992

Рис. 59. Матриця помилок класифікації зображення [19]

Наприклад, у матриці ліва частина позначає класи класифікованого зображення. Верхня сторона містить ті ж еталонні класи даних, які потрібно оцінити. Значення в матриці вказують на кількість пікселів.

Матриця помилок корисна для визначення загальних помилок для кожного класу та неправильно класифікованих за категоріями. Ця матриця не тільки визначає джерело помилок класифікації, але й їх кількість.

- рядки відповідають класам у результаті класифікації;
- стовпці відповідають класам на місцевості або тестовому наборі;
- елементи по діагональні в матриці представляють кількість правильно класифікованих пікселів кожного класу, тобто кількість правильно класифікованих пікселів з певною назвою класу, які фактично отримали таку саму назву класу під час класифікації;
- елементи не по діагональні представляють неправильно класифіковані пікселі або помилки класифікації, тобто кількість правильно класифікованих пікселів, які потрапили в інший клас під час класифікації;

а) недіагональні елементи рядку представляють правильно класифіковані пікселі певного класу, які були виключені з цього класу під час класифікації. Такі помилки також відомі як помилки пропуску або виключення. Наприклад, 40 пікселів були виключені з класу F у класифікації та опинилися у класі U;

б) недіагональні елементи стовпців представляють правильно класифіковані пікселі інших класів, які були включені в певний клас класифікації. Такі помилки також відомі як помилки призначення або

включення. Наприклад, 38 пікселів класу Н були включені до класу F за результатами класифікації;

- числа в стовпці unclassified представляють правильно класифіковані пікселі, які були виявлені некласифікованими на зображенні.[10]

Оптимальна методика класифікації це приведення до нуля елементів не на діагоналі матриці.

Загальна точність класифікації обчислює частку правильно класифікованих пікселів і розраховується за формулою:

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum \text{Diagonal Elements}}{\text{Total Number of Samples}}$$

За даним прикладом точність класифікації буде:
 $(480+52+313+126+342+359)/(480+68+356+248+402+438) = 0,84$ або 84%

Це вказує на те, що загальна точність класифікації, наведеної в прикладі, становить 84%.

Для кожного класу можна порахувати точність виконавця: коли (U) присутні в даних, було правильно класифіковано 51% ($126/248=51\%$) та помилки пропуску: коли (U) присутні в даних було помилково класифіковані 49%.

		Reference						Row Total
		W	S	F	U	C	H	
Classified	W	480	0	5	0	0	0	485
	S	0	52	0	20	0	0	72
	F	0	0	313	40	0	0	353
	U	0	16	0	126	0	0	142
	C	0	0	0	38	342	79	459
	H	0	0	38	24	60	359	481
Column total		480	68	356	248	402	438	1992

Рис. 60. Розрахунок точності виконавця [19]

А також точність користувача: коли пікселі класифікуються як (U), було правильно класифіковано 89% ($126/142= 89\%$) та помилки призначення: коли пікселі класифікуються як (U), було помилково класифіковано 11%.

		Reference						Row Total
		W	S	F	U	C	H	
Classified	W	480	0	5	0	0	0	485
	S	0	52	0	20	0	0	72
	F	0	0	313	40	0	0	353
	U	0	16	0	126	0	0	142
	C	0	0	0	38	342	79	459
	H	0	0	38	24	60	359	481
Column total		480	68	356	248	402	438	1992

Рис. 61. Розрахунок точності користувача [19]

Лекція 9. Програми для інтерпретації космічних знімків

На сьогоднішній день існує багато комерційного професійного програмного забезпечення для обробки даних ДЗ, але для більш доступного широкого використання є безкоштовні програми та веб-браузери, у яких користувачі мають змогу опрацьовувати дані.

9.1. EO Browser



EO Browser – безкоштовний хмарний інструмент для візуалізації та завантаження доступних знімків середньої і низької роздільної здатності з супутників: Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P, Landsat, Envisat Meris, MODIS, Proba-V, GIBS.

EO Browser поєднує в собі безліч функцій: порівняння даних, різні автоматичні параметри візуалізації (природні та штучні кольори, NDVI і т. д.), синтез каналів, вимірювання площ, отримання статистичних даних у вигляді графіків і навіть деякі алгоритми обробки даних та скрипти.

Цей переглядач надає можливість створити свою бібліотеку знімків. Зареєстровані користувачі мають можливість експортувати результати обробки даних у файли з географічною прив'язкою і зберігати алгоритми обробки знімків.

9.2. Google Earth Pro



Google Earth Pro (офіційна назва українською мовою: Google Планета Земля Про) – це безкоштовна, вільно-завантажувана програма компанії Google що відображає віртуальний глобус. В рамках цього проєкту в мережу Інтернет було викладено аерофотознімки та космічні знімки більшої частини Землі. Для деяких регіонів ці знімки сягають дуже високої якості.

Програма поширюється під двома різними ліцензіями: Google Earth, безкоштовна версія з обмеженою функціональністю; та Google Earth Pro, що пропонується для комерційного використання.



9.3. Google Earth Engine

Google Earth Engine є відкритою хмарною платформою, що дозволяє здійснювати аналіз і візуалізацію геопросторових наборів даних великого обсягу для наукових, освітніх, громадських, державних і комерційних організацій. Вона надає інструментальні програмні засоби з

відкритим кодом для геопросторового аналізу, а також доступ до публічного каталогу растрових і векторних даних, який включає супутникові зображення, дані метеорологічних, геофізичних спостережень, тощо.

Обчислення на платформі виконуються на серверах Google, це звільняє користувача від необхідності задіяти власні обчислювальні потужності для обробки даних, що дозволяє багаторазово скоротити час та витрати на їхню обробку. Earth Engine доступний для комерційного використання та залишається безкоштовним для академічного та дослідницького використання.



9.4. USGS Earth Explorer

Портал даних *USGS Earth Explorer* – це місце для отримання наборів геопросторових даних із великих колекцій.

Користувачі можуть переміщатися за допомогою інтерактивної карти або текстового пошуку, щоб отримати супутникові зображення Landsat, радіолокаційні дані, дані UAS, дані цифрової моделі рельєфу, аерофотознімки, супутникові дані деяких комерційних супутників, включаючи IKONOS і OrbView3, дані про земний покрив, дані цифрової карти з Національної карти та багато інших наборів даних.

Користувачі можуть здійснювати пошук за точним розташуванням на інтерактивній карті або вводити конкретні координати, щоб переглянути доступні типи даних.



9.5. Copernicus Data Space

Copernicus Data Space Ecosystem – це новий портал Європейського космічного агентства (ESA) для спрощеного доступу до супутникових даних Copernicus.

Портал поєднує в собі функції пошуку та завантаження, що забезпечується функціями, подібними до ЕО браузера, і простим доступом до API, що забезпечується сімейством API, включаючи Sentinel Hub.

Екосистему було запущено на початку 2023 року, а в наступні місяці було додано нові функції та оновлення.

Доступні набори даних включають повний архів і нещодавно зібрані зображення з Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 і Sentinel-5P. Крім

того, також доступні додаткові набори даних, такі як цифрова модель рельєфу Коперника та безхмарні мозаїки WorldCover.



9.6. QGIS

Програма **QGIS** – це безкоштовна геоінформаційна система з відкритим програмним кодом і гнучкою системою функціональних модулів, яка підтримується і активно вдосконалюється групою добровольців-розробників.

Ця програма дає змогу візуалізувати, редагувати, аналізувати дані, оформлювати карту до друку тощо.

Більшість функцій в QGIS реалізовані як основні або зовнішні модулі:

- основні модулі розробляються командою розробників QGIS і автоматично входять до кожного нового релізу програми;
- зовнішні модулі перебувають у зовнішніх репозиторіях і підтримуються авторами-волонтерами. Якщо модуль користується популярністю у користувачів, його можуть додати в набір основних модулів QGIS.



9.7. SNAP

The Sentinel Application Platform (SNAP) є відкритим програмним забезпеченням, що вільно розповсюджується. Програмне забезпечення розроблено Brockmann Consult, Skywatch, Sensor і C-S.

SNAP та окремі панелі інструментів Sentinel підтримують численні сенсори, крім сенсорів Sentinel. Програмний пакет SNAP ESA призначений для обробки даних дистанційного зондування, одержаних супутниковими місіями ESA із супутників Sentinel 2 A-B, Sentinel 3, Sentinel 5, Envisat, SMOS, PROBA V.

Він дозволяє проводити радіометричне калібрування даних ДЗЗ, атмосферну та радіометричну корекцію, розрахунок індексних показників, сегментацію зображень, а також класифікацію з навчанням та без навчання.



9.8. Erdas Imagine

ERDAS IMAGINE – це зручне у використанні програмне забезпечення, спеціально призначене для отримання інформації з растрових зображень, таких як космічні знімки від апаратів ДЗЗ.

Воно побудовано по модульно-ієрархічному принципі, що дозволяє користувачеві придбати тільки необхідні модулі, та складається із трьох базових наборів програм: IMAGINE Essentials, IMAGINE Advantage і IMAGINE Professional (для починаючих, підготовлених і професійних користувачів), кожний з яких містить у собі й розширює функціональні можливості попереднього набору.



9.9. ArcGIS

ArcGIS *ArcGIS* – це платна ГІС-програма американської компанії ESRI (Environmental Systems Research Institute – Інститут дослідження систем навколишнього середовища).

ArcGIS for Desktop – це декілька взаємопов’язаних базових програм, основними з яких є ArcMap та ArcCatalog. ArcCatalog керує збереженням просторових даних, структурою баз даних, а також записом і переглядом метаданих.

ArcMap – використовується для створення і редагування карт, а також для картографічного аналізу. У структурі ArcMap міститься ArcToolbox, який застосовується для перетворення даних і геообробки. ArcMap – основний додаток ArcGIS, в якому можна створювати і редагувати карти. З його допомогою можна наносити умовні позначення, підготувати карту до друку і публікації. ArcMap представляє географічну інформацію як набір шарів, а також й інших елементів карти.



9.10. ENVI

ENVI *ENVI* – програмна система (the ENvironment for Visualizing Images – середовище візуалізації зображень) – забезпечує всебічну візуалізацію даних і аналіз зображень будь-якого розміру й будь-якого типу.

ENVI написаний мовою IDL (Interactive Data Language – інтерактивна мова даних), ще являє собою мову структурного програмування, і забезпечує інтегровану обробку зображень.

Однією з основних переваг ENVI є його унікальний підхід до відображення процесу обробки, у якому комбінуються файлові й багатоканальні методи з інтерактивними функціями.

Запитання для самоконтролю

1. Дайте визначення процесу дешифрування знімків.
2. Які є види дешифрувальних ознак?
3. Назвіть переваги та недоліки автоматичного методу дешифрування знімків.
4. Причини спотворень космічних знімків та методи їх усунення.
5. Основні види геометричних спотворень на знімках.
6. Назвіть геометричні моделі перетворення координат зображень.
7. Яка роль точок з відомими координатами на місцевості у процесі корекції знімків?
8. Дайте визначення процесу ресемплінгу зображення та які його методи існують?
9. З якою метою виробниками знімків створюються моделі раціональних поліномів?
10. Які спотворення на знімках усуває процес орторектифікації?
11. Назвіть види радіометричної корекції знімків.
12. Який процес відповідає за налаштування яскравості та контрастності зображень, зроблених у різний час або в різних місцях?
13. Який процес усуває різницю сонячного освітлення місцевості на знімку?
14. Перерахуйте методи покращення зображень?
15. Які методи трансформації зображень існують та яку інформацію можна отримати застосувавши їх?
16. Як утворюються синтезовані знімки? Яку інформацію можна отримати з кольорових композитів супутникових знімків?
17. Що таке паншарпенінг знімків та які дані необхідні для цього процесу?
18. Як створюються індексні зображення? Наведіть приклади найпопулярніших індексів.
19. Дайте визначення процесу класифікації знімків та які методи класифікації існують?
20. Вкажіть на основні відмінності між методами автоматичної класифікації зображень.
21. Як зробити оцінку точності виконаного процесу класифікації знімку?

Список літератури

1. Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах: навч.-метод. посіб. / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма та ін. – Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 268 с
2. Квартич Т. М. Аналіз методів автоматизованої класифікації цифрових зображень дистанційного зондування землі // наук.-техн. зб. Інженерна геодезія : – Київ : КНУБА, 2014. – Вип. 60. – С. 110-117.
3. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування : навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук та ін. – Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 315 с.
4. Цифрове оброблення та дешифрування знімків: конспект лекцій / Т. М. Курач. – Київ : [б.в.], 2021 – 50 с.
5. Холошин І.В. Х-73 Педагогічна геоінформатика. Ч.1. Дистанційне зондування Землі: навч. посіб. – Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2013. – 224 с.
6. Image Processing and GIS for Remote Sensing: techniques and applications/ Jian Guo Liu, Philippa J. Mason// Chichester, Wiley. – 2016.
7. Franz Meyer. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques / Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook // Preface by Juliann Aukema & Sylvia Wilson Foreword by Daniel Irwin, 2019. – 21-40 P
8. Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems, Second edition/ Gottfried Konecny// CRC Press, Taylor and Francis Group. – 2014. – 472 p.
9. Physical principles of remote sensing. / W. G. Rees// Cambridge University Press. 2nd edition – 2001. – 372 P.
10. Processing and Classification of Remotely Sensed Images/ Anupam Anand; Krishna Mohan, B. Indira //Gandhi National Open University, 2012.

11. Remote sensing, GIS and land use planning/ Ram Niwas, M.S. Grewal, M.L. Khichar// Published by Department of Agricultural Meteorology, CCS HAU Hisar. – 2015. – 124 p.

12. S. Devika, S.S.Ramakrishnan, A.S.R.K.V. Murali Mohan and B.Sadasiva Rao. Development and implementation of rational polynomial coefficient algorithms for georeferencing CARTOSAT-1 data. ISPRS Archives – Volume XXXVI Part 4, 2006

13. Wang, L., Wang, T., Zhang, Y. and Zhang, K. (2020) Accuracy and Efficiency: The Comparison of Different RPC Parameters Solving Methods. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 117-126.

14. Глава 2: Какие орбиты и ИСЗ бывают? URL: <https://www.sat.belastro.net/glava2/glava2.php> (дата звернения: 20.10.2018).

15. Fundamentals of Remote Sensing Tutorial/ Canada Centre for Remote Sensing - 258 P. URL: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf (дата звернения: 15.12.2024).

16. Geometric Corrections in Remote Sensed Image. 2022. URL: <https://geolearn.in/geometric-corrections-in-remote-sensing-images/> (дата звернения: 10.11.2024)

17. Radiometric Calibration and Corrections. Humboldt State University. URL: https://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/online/lesson7/radiometric.html (дата звернения: 15.11.2024).

18. Radiometric Correction Methods for Remote Sensing Images. URL: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-combine-radiometric-correction-geometric> (дата звернения: 15.12.2024).

19. Remote Sensing /Ayman F. Habib. URL: <https://www.coursehero.com/file/208239243/435-CH1/> (дата звернения: 15.12.2024).

20. Remote Sensing Tutorial By: Francisco Eugenio González Marcello Javier Ruiz Ferran Marqués Acosta. URL: <https://pdfcoffee.com/remote-sensing-pdf-pdf-free.html> (дата звернения: 13.09.2024).

21. Natural and False Color Composites. URL: https://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/composites.html (дата звернення: 10.09.2021).
22. Vosselman G., Maas H.-G. (Eds.). Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing. – 2010. – 336 p.
23. Topographic correction methods for Landsat images. URL: <https://www.weihangli.com/about-8> (дата звернення: 20.09.2024).
24. Rectification. URL: https://dev.luciad.com/portal/productDocumentation/LuciadFusion/docs/articles/guide/geodesy/rectification.html?subcategory=lls_geodesy (дата звернення: 08.10.2024).
25. Beshoy Nady. Road network extraction from satellite images in Egypt. Thesis. – 2020. DOI:10.13140/RG.2.2.16038.27207
26. Bhatta, B. (2008). Remote sensing and GIS. Oxford University Press, USA. ISBN: 019569239X, 9780195692396.
27. Benfit R. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). URL: <https://storymaps.arcgis.com/stories/011a9efe78804f18bd002efe90956994> (дата звернення: 08.10.2022).

Корисні сайти:

1. <https://earthengine.google.com/>
2. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
3. <https://dataspace.copernicus.eu/>
4. <https://scihub.copernicus.eu/>
5. <https://www.usgs.gov>
6. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
7. <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
8. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
9. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
10. <https://www.qgis.org>
11. <https://www.google.com/intl/uk/earth/about/versions/>
12. <https://www.arcgis.com/index.html>
13. <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Products/ENVI>
14. <https://hexagon.com/products/erdas-imagine>

Навчальне видання

ПЛЮЩ Тетяна Миколаївна

**ОСНОВИ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

Конспект лекцій

Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Ум. друк. арк. 5,58. Обл.-вид. арк. 6,0
Електронний документ. Вид № 10/V-25.

Виконавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03680

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р