

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська політехніка»

Андрєєв О.В., Дубина О.Ф., Топольницький П.П.

Радіонавігація та геоінформаційні системи

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»

Житомир

2024

УДК 55:528.8:629.05

A65

*Рекомендовано до друку вченою радою
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол №5 від 8 травня 2024 року).*

Рецензенти:

С.П. Фриз – професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки Житомирського військового інституту ім. С.П Корольова, д.т.н., професор;

П.В. Пивовар – керівник навчально-наукового центру космічних та геоінформаційних технологій Поліського національного університету, к.е.н., доцент;

О.Л. Герасимчук – завідувач кафедри наук про Землю Державного університету «Житомирська політехніка», канд. пед. наук, доцент.

Андреев О.В.

A65 Радіонавігація та геоінформаційні системи: навч. посібн. [електронне видання] / О.В. Андреев, О.Ф. Дубина, П.П. Топольницький. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2024. – 138 с.

ISBN 978-966-683-651-2

У навчальному посібнику розглянуті принципи визначення місцеположення об'єктів за сигналами радіонавігаційних систем та технологія отримання та обробки даних систем дистанційного зондування Землі. Навчальний посібник відповідає програмі навчальної дисципліни "Радіонавігація та геоінформаційні системи" підготовки бакалаврів за спеціальністю 172 "Електронні комунікації та радіотехніка". Також він може бути корисним для студентів, що навчаються за спеціальністю 103 "Науки про Землю" та займаються дешифруванням космічних знімків Землі.

УДК 55:528.8:629.05

Навчальне видання

АНДРЕЄВ Олександр Володимирович

ДУБИНА Олександр Федорович

ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ Павло Петрович

Навчальний посібник

Електронне видання

Комп'ютерний дизайн та верстка: Андреев О.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

© О.В. Андреев, 2024

© О.Ф. Дубина, 2024

© П.П. Топольницький, 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Загальна характеристика геоінформаційних систем.....	7
2. Основні характеристики датчиків ДЗЗ.....	16
2.1. Основні характеристики супутникових знімків.....	16
2.2. Апаратура ДЗЗ	21
2.3. Ресурси для отримання інформації ДЗЗ	29
3. Основні системи координат та проекції.....	33
3.1. Основні системи координат.....	33
3.2. Картографічні проекції	36
3.3. Параметри орбіт носіїв знімальної апаратури	38
4. Моделі даних та програмне забезпечення ГІС	46
5. Дешифрування та аналіз супутникових знімків.....	57
6. Бортові радіотехнічні пристрої космічних апаратів ДЗЗ.....	77
6.1. Принципи побудови РЛСБО із синтезованою апертурою антени.....	77
6.2. Принципи побудови радіометрів.....	83
7. Загальні принципи побудови радіонавігаційних систем.....	87
7.1. Класифікація та характеристика радіонавігаційних систем.....	87
7.2. Позиційні методи визначення місцезнаходження об'єктів.....	91
7.3. Похибка визначення лінії положення позиційними методами.....	95
7.3.1. Похибка визначення лінії положення далекомірним методом.....	95
7.3.2. Похибка визначення лінії положення кутомірним методом.....	96
7.3.3. Похибка визначення лінії положення різницево-далекомірним методом...96	96
7.4. Радіальна похибка визначення МЗ ОС позиційними методами.....	98
7.5. Робочі зони радіонавігаційних систем.....	99
7.5.1. Робоча зона далекомірної РНС.....	99
7.5.2. Робоча зона кутомірної та кутомірно–далекомірної РНС.....	100
7.5.3. Робоча зона різницево–далекомірної РНС.....	102
8. Особливості будови РНС ближньої навігації.....	105
8.1. Далекомірні РНС ближньої навігації.....	105
8.2. Кутомірно - далекомірні РНС ближньої навігації.....	105

9. Основні принципи побудови системи глобального позиціонування.....	111
Список скорочень	118
Предметний покажчик.....	119
Перелік використаних джерел.....	121
Додаток А. Приклади розв'язання тематичних завдань з використанням програмного комплексу ArcGIS Pro.....	123

Вступ

Який вигляд має земна поверхня з висоти пташиного польоту — питання, яке давно цікавить людство. З появою перших літальних апаратів надземна зйомка надала можливість значно підвищити точність карт, а робота картографів набула нових, прогресивних рис. Справжньою революцією у питанні аероспостереження став запуск штучного супутника Землі. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) — це одержання інформації про будь-який об'єкт чи процес без прямого контакту з ними [1]. ДЗЗ полягає в тематичному аналізі як власного, так і штучно створеного випромінювання земної поверхні в межах від ультрафіолетового до радіохвильового діапазонів.

Дистанційне зондування Землі дозволило підняти на новий рівень дослідження земної поверхні. Точність та інформаційна наповненість космічних знімків зростає з кожним роком. Удосконалюється механізм космічної зйомки: збільшується роздільна здатність космічного знімку, спектр зйомки може показати детальну інформацію про рівень вегетації рослин на певній ділянці, рівень зволоженості/посушливості території, рух атмосферних фронтів тощо. Поєднання дистанційного зондування Землі з геоінформаційними системами дозволило по-новому досліджувати нашу планету: бачити закриті для людського ока території, детально досліджувати ділянки, на яких науковець міг ніколи й не ступати ногою. Перевагами супутникового моніторингу є: об'єктивність і достовірність (супутникові знімки дозволяють відображати фактичну інформацію); оглядовість і детальність (можливе спостереження будь-якої території на Землі з детальністю до 30 см); актуальність, висока періодичність, оперативність (зйомка з космосу з мінімальним часом отримання даних користувачем); багатоспектральний характер спостережень (набір спектральних каналів в одному знімку); багатогалузевість (екологічний моніторинг, сільське, лісове, водне господарство, прогноз і контроль надзвичайних ситуацій, управління територіями та планування їх розвитку, інвентаризація та контроль використання земельних ресурсів, картографія, будівництво, транспорт, зв'язок тощо).

Огляд земної поверхні з аерокосмічних апаратів у оптичному і радіодіапазонах дозволяє вирішувати широке коло народногосподарських і наукових задач, а також задач військового характеру.

Зображення дистанційного зондування можна отримувати із супутників та аероносіїв. Розвиток геодезичних і картографічних знань та використання сучасних технологій позиціонування об'єктів зробили можливим прив'язати космічний знімок до конкретного місця земної поверхні, яку він відображає. Без наземних геодезичних спостережень, географічних проекцій та координат було б неможливо почати використовувати космічні знімки як джерело геоданих [2]. Розвиток радіоелектроніки і супутникової навігації також дозволив широко використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА). Космічні зображення зараз можуть мати практично такий самий масштаб та роздільну здатність, як і аерозображення. Однак аерознімання дає можливість оперативно отримувати дані високої роздільної здатності для конкретних невеликих територій [3].

Літакові радіолокаційні станції (РЛС) огляду Землі почали застосовуватися порівняно давно. Однак вони, забезпечуючи гарну роздільну здатність за дальністю, через застосування імпульсних сигналів мали погану роздільну здатність у напрямку, перпендикулярному напрямку зондування, який називають шляховою дальністю. Через це якість отриманих радіолокаційних зображень (РЛЗ) поверхні Землі істотно поступалась аерофотознімкам.

Роздільна здатність РЛС в азимутальному напрямку тим більша, чим більша довжина розкриву антени в цьому напрямку. Під час руху аерокосмічного носія антени опромінення кожного елемента поверхні Землі та прийом відбитого від цього елемента сигналу здійснюється на порівняно великій ділянці траєкторії руху носія. За певних умов, що розглядаються надалі, ця ділянка траєкторії може бути використана як штучний (синтезований) розкриття антени, що дозволяє істотно збільшити роздільну здатність РЛС в азимутальному напрямку. При цьому в РЛС ДЗЗ із синтезованою апертурою антени (РСА) виявилось можливим забезпечувати достатньо високу роздільну здатність не тільки за дальністю, але і за азимутом [4].

Якість РЛЗ земної поверхні наблизилась до якості аерофотознімків [5]. Разом з тим радіолокаційне зондування має істотні переваги порівняно із зондуванням у видимому діапазоні: можливість отримувати РЛЗ земної поверхні і розташованих на ній об'єктів незалежно від часу доби і погодних умов на великих дальностях і великих площах. При використанні цифрової обробки прийнятих відбитих сигналів забезпечується відтворення РЛЗ поверхні на борту носія РЛС у реальному масштабі часу.

Активні РЛС дистанційного зондування дають багато інформації про електрофізичні та геометричні характеристики поверхні. Визначену додаткову інформацію про ці характеристики дають також пасивні радіотехнічні системи дистанційного зондування.

Зображення, які отримані в радіохвильовому діапазоні, вдало доповнюють зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах, що дозволяє підвищити обсяг інформації, яка збирається, та її достовірність. З виходом радарних космічних систем на той же порядок просторового розділення, що й у систем видимого діапазону, можливості дистанційного зондування Землі з космосу багаторазово зростають. Поява ж орбітальних угруповань з декількох космічних апаратів (КА) значно підвищує оперативність зйомки.

Радарні знімки є надзвичайно зручним і ефективним джерелом одержання детальної, точної і всеосяжної інформації про рельєф місцевості – набагато більш могутнім, оперативним, достовірним й економічним, чим використання, приміром, космічних стереопар або аерофотознімків.

Методика опрацювання, візуалізації, дешифрування та аналізу космічних знімків, передбачає формування низки компетенцій, що допоможуть адаптуватися до застосування інформаційних технологій в дистанційних дослідженнях природних та антропогенних процесів.

1. Загальна характеристика геоінформаційних систем

Геоінформаційна система (ГІС) – це сукупність технічних, програмних і інформаційних засобів, які забезпечують збір, збереження, обробку, доступ, відображення й поширення просторових даних, математико-картографічне моделювання і образне інтегроване подання географічних і співвіднесених з ними атрибутивних даних для вирішення проблем територіального планування і управління [2].

Певна *сукупність дій (процес)*, спрямованих на досягнення поставленої *мети* з використанням програмно-технічних засобів і методів збору, оброблення і передавання даних (первинної інформації) отримала назву *геоінформаційні технології*.

Прикладами об'єктів територіального планування і управління є:

- підприємства з територіально розподіленими ресурсами (фінансовими, матеріальними, трудовими, інформаційними тощо) з необхідністю виконувати моніторинг та оптимізацію розміщення чи пересування ресурсів у просторі та часі;
- підприємства, що надають web-сервіси для широкого загалу користувачів, з необхідністю гнучкої координації використання сервісів у просторі та часі;
- підприємства оператори мобільного зв'язку з необхідністю оптимального розміщення трансляційних станцій на певній території;
- логістичні структури з необхідністю виконувати моніторинг матеріальних та фінансових потоків товарів чи вантажів у просторі та часі;
- маркетингові фірми з необхідністю управляти процесом сегментації ринку, розповсюдження та просування товарів чи послуг у просторі та часі;
- автотранспортні фірми з необхідністю оптимізувати управління рухом, забезпеченням паливом та іншими ресурсами;
- заклади охорони здоров'я з необхідністю виконувати моніторинг стану здоров'я населення та роботи медичних працівників лікувальних закладів;
- екологічні організації з необхідністю виконувати моніторинг та поліпшення стану оточення в просторі та часі;
- будівельні фірми з необхідністю виконувати пошук оптимальних місць для будівництва;
- навчальні заклади з дистанційною формою навчання та необхідністю відстежувати процес навчання в просторі та часі;
- туристичні фірми з необхідністю обирати та відслідковувати маршрути туристів;
- комунальні підприємства з необхідністю поліпшення управління всіма ресурсами побутового призначення;
- органи державного управління з дистанційною формою територіального управління та багато інших.

ГІС можуть бути класифіковані за такими ознаками [1]:

за призначенням - в залежності від характеру вирішуваних завдань:

багатоцільові; інформаційно-довідкові; моніторингові;

дослідні; прийняття рішень; навчальні; видавничі; ін.

за проблемно-тематичною орієнтацією - в залежності від області застосування:

екологічні та природокористування; соціально-економічні; земельно-кадастрові; геологічні; інженерних комунікацій і міського господарства; надзвичайних ситуацій; навігаційні; транспортні; торгово-маркетингові; археологічні; ін.

за територіальним охопленням - в залежності від масштабного ряду цифрових картографічних даних, що становлять базу даних ГІС:

глобальні; загальнонаціональні; регіональні; локальні; муніципальні.

за способом організації географічних даних - залежно від форматів введення, зберігання, обробки і подання картографічної інформації:

векторні; растрові; векторно-растрові; тривимірні.

У загальному вигляді ГІС повинні складатися з наступних *чотирьох підсистем* (рис.1): збору, підготовки і введення даних; зберігання, оновлення та управління даними; обробки, моделювання та аналізу даних; контролю, візуалізації і виведення даних. Основне завдання *підсистеми збору, підготовки і введення даних* - формування баз географічних і атрибутивних даних ГІС; *підсистеми зберігання, оновлення та управління даними* - організація зберігання даних, забезпечення процедур їх редагування і оновлення, обслуговування запитів на інформаційний пошук, що надходять в систему; *підсистеми обробки, моделювання та аналізу даних* - організація обробки даних, забезпечення процедур їх перетворення, математичного моделювання та аналізу; *підсистеми контролю, візуалізації і виведення даних* - генерація і оформлення результатів роботи системи у вигляді карт, графічних зображень, таблиць, текстів на твердих або магнітних носіях.

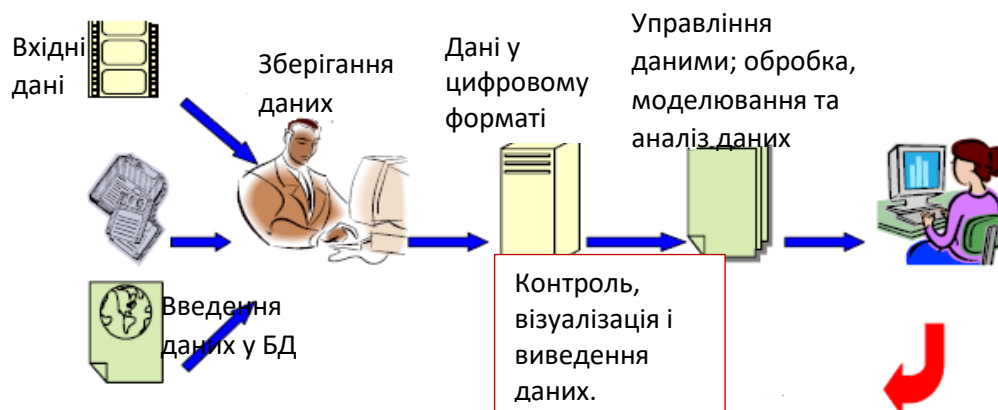


Рис. 1.1 – Організація роботи ГІС.

ГІС повинні виконувати такі *основні функції*: функції автоматизованого картографування; функції просторового аналізу (ПА); функції управління даними (УД).

Функції автоматизованого картографування (АК) повинні забезпечувати роботу з картографічними даними ГІС з метою їх відбору, відновлення і перетворення для виробництва високоякісних карт і малюнків. Функції АК повинні включати векторно-растрові перетворення, перетворення координатної системи, картографічних проєкцій і масштабів, "склеювання" окремих листів, здійснення картометричних вимірів (обчислення площ, відстаней), розміщення

атрибутивних даних (текстових написів і картографічних знаків), формування макета друку.

Функції просторового аналізу повинні забезпечувати спільне використання та обробку картографічних і атрибутивних даних в інтересах створення похідних картографічних даних. Функції ПА повинні включати аналіз географічної близькості, аналіз мереж, топологічне накладення полігонів, інтерполяцію та ізолінійне картографування полів, обчислення буферних зон.

Функції управління даними повинні забезпечувати роботу з атрибутивними даними ГІС з метою їх відбору, поновлення і перетворення для виробництва стандартних і робочих звітів. Функції УД повинні включати статистичні обчислення, логічні операції, підтримання інформаційної безпеки, стандартних форм запитів користувача та подання їх результатів.

Таким чином, *ГІС-технології* - технологічна основа створення географічних інформаційних систем, що дозволяє реалізувати їх функціональні можливості.

Геоінформаційний аналіз - аналіз розміщення, структури, взаємозв'язків об'єктів і явищ з використанням методів просторового аналізу і геомодельовання. *Функціональні можливості ГІС* - набір функцій географічних інформаційних систем і відповідних програмних засобів:

- введення даних шляхом імпорту з існуючих наборів цифрових даних або за допомогою оцифрування джерел;
- перетворення даних, включаючи конвертування даних з одного формату в інший, трансформацію картографічних проєкцій, зміну систем координат;
- зберігання, маніпулювання та управління даними у внутрішніх і зовнішніх базах даних;
- картометричні операції.

Дистанційне зондування Землі – спостереження за поверхнею Землі авіаційними і космічними засобами, оснащеними різноманітними видами знімальної апаратури, які вимірюють енергію, що випромінюється або відбивається земною поверхнею. Дистанційне зондування – це основне джерело для підтримки оперативності та актуальності ГІС. Одним із найсучасніших напрямів розвитку ГІС є поєднання ГІС-технологій та опрацювання даних дистанційного зондування [1,6].

Здійснення космічного знімання можливе завдяки здатності об'єктів випромінювати або відбивати електромагнітні хвилі. Дистанційні методи поділяються на активні та пасивні (рис.1.2). При використанні активних методів супутник посилає Землю сигнал власного джерела енергії (лазера, радіолокаційного передавача), реєструє його відбиток. Пасивні способи передбачають реєстрацію відбитої від поверхні об'єктів сонячної енергії чи теплового випромінювання Землі.

Світло — це електромагнітна хвиля у певному діапазоні електромагнітного спектра. Якщо зобразити світло в схематичному вигляді — то воно виглядатиме як графік електричного і магнітного поля, які коливаються перпендикулярно одне одному. Розподіл електромагнітних хвиль за різними частотами називають спектром.

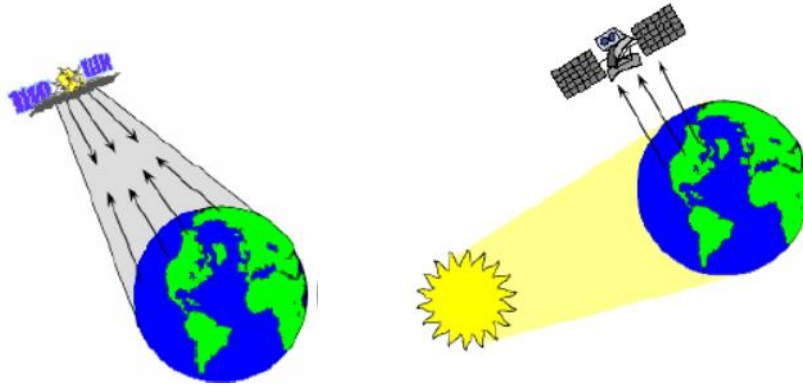


Рис. 1.2 – Методи ДЗ

Довжина хвилі — відстань між двома сусідніми гребнями, або западинами хвиль. За своєю суттю це відстань, яку проходить хвиля за проміжок часу, який дорівнює одному коливанню - період. Довжини хвиль дуже різноманітні (від нанометрів до десятків кілометрів). *Частота хвилі* — це кількість повних коливань, які здійснює хвиля за 1 секунду. Тобто, чим коротші хвилі, тим більша в них частота. Саме через зміну своїх довжин (частот) хвилі набувають специфічних властивостей та діляться на гамма-, бета-, альфа-, рентгенівське випромінювання, ультрафіолетове, видимі промені, інфрачервоне та радіохвилі. Явище розкладання білого світла на спектр було відоме досить давно (Декарт ще в 1629 році вияснив хід променів у призмі та склі різної форми), але пояснив його І. Ньютон в 1666 році, коли успішно провів дослід розкладення променя світла призмою [1]. Біле світло складається із суми простих кольорових променів, з яких найбільше заломлюються фіолетові, а найменше — червоні. Кожен колір спектра є монохроматичним, тобто однокольоровим, і кожному відповідає своя довжина і частота хвилі. Саме вони створюють електромагнітний спектр.

Дистанційні методи характеризуються значним віддаленням приладу, який здійснює знімання від досліджуваного об'єкта (відстань може сягати сотні та тисячі кілометрів). За дистанційних досліджень отримують інформацію про об'єкти у різних спектральних діапазонах: рентгенівському, ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному. Різні відбивні властивості досліджуваного об'єкта і стан навколишнього середовища впливають на характеристики випромінювання, їх фіксують приладами дистанційного зондування. У такий спосіб збирають і накопичують дистанційні дані, складові різних баз ГІС. На якісні характеристики матеріалів дистанційного зондування впливають форма, нахилення та висота орбіти, період обертання, позиція вмонтованої апаратури щодо Сонця тощо [1,4]. Важливою особливістю ДЗ є наявність між об'єктами і реєструючими пристроями проміжного середовища, атмосфери, яке впливає на випромінювання (рис 1.3). В атмосфері є так звані вікна прозорості, що пропускають електромагнітні хвилі, тому хвилі цих довжин вибирають для реєстрації [1].

Космічний знімок — це двовимірне зображення поверхні, отримане унаслідок дистанційної реєстрації технічними засобами власного або відбитого випромінювання, яке містить інформацію про електромагнітне випромінювання, відбите від різних типів земної поверхні. Космічні знімки є основним джерелом дистанційного дослідження нашої планети. Знімки містять дані, які одержані від

знімальних систем, розміщених на носіях апаратури - супутниках, літаках або вертольотах. Відповідно до цього розрізняють космічні знімки та аерознімки.

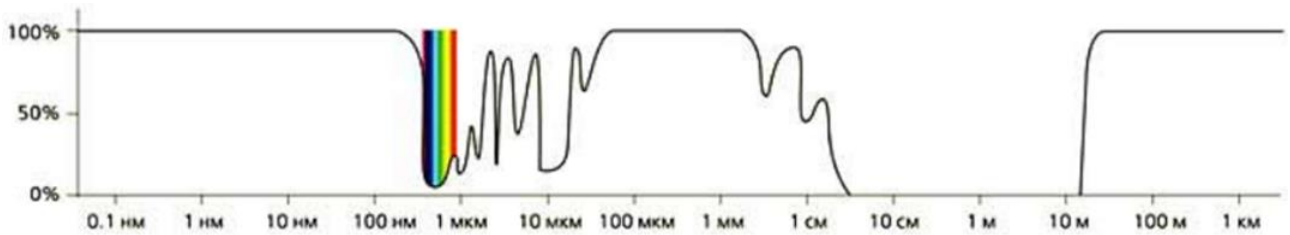


Рис. 1.3 – Прозорість атмосфери

ДЗЗ було і залишається одним з трьох пріоритетних напрямів науково-практичних досліджень (поряд з телекомунікаціями та навігацією), що здійснюються в космічній галузі України. В Україні завжди приділяли увагу розвитку ДЗЗ, завдяки чому воно сформувалось у важливу науково-технічну складову загальнонаціонального комплексу, зі своїми науково-дослідними установами, центрами прийому, оброблення та розповсюдження космічної інформації, об'єднаними у певну інфраструктуру. У лютому 1992 року було створене Національне космічне агентство України (з 2011 року — Державне космічне агентство України — ДКАУ) з метою реалізації державної політики в галузі космічної діяльності. До сфери управління ДКАУ входять понад тридцять промислових підприємств, науково-дослідних інститутів і конструкторських бюро. У серпні 1995 року українська ракета-носієв «Циклон-3» вивела на орбіту перший вітчизняний КА «Січ-1», призначений для ДЗЗ. Успішний запуск українського супутника продемонстрував високі можливості, які дозволили замкнути на національному рівні весь виробничий цикл космічної системи — від розробки й виготовлення до експлуатації й поширення отриманої супутникової інформації. Для розширення наукових і прикладних досліджень Землі рішеннями керівників Космічного агентства й Національної академії наук України було вжито необхідних організаційних заходів, зокрема створено кілька відомчих організацій для ведення науково-прикладних досліджень у сфері ДЗЗ: Центр аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) НАН України і Науково-виробничий центр «Природа» (Київ), Центр радіофізичного зондування Землі (Харків), підприємство «Дніпрокосмос».

Головне завдання Центру аерокосмічних досліджень Землі НАН України — проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень Землі дистанційними методами з метою одержання нових наукових знань і практичного впровадження цих знань в інтересах інноваційного розвитку України та задоволення економічних, соціальних та оборонних потреб.

ДНВЦ «Природа» — це державна установа, яка протягом понад 25 років забезпечує архівацію, обробку і передачу зацікавленим міністерствам, відомствам, установам (серед яких — Рада національної безпеки і оборони України, Міноборони, Мінекології, Мінагрополітики України, обласні державні адміністрації) даних космічного знімання та входить до наземного інформаційного комплексу Державного космічного агентства України.

Концепція Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021—2025 роки передбачає впровадження як першочергових проектів подальшого розвитку досліджень, так і створення нових технологій ДЗЗ для вирішення актуальних задач промисловості, сільського господарства, науки, національної безпеки і оборони. Огляд земної поверхні з КА у різних діапазонах дозволяє вирішувати широке коло завдань. Тому космічна програма передбачає 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. В останні роки приділялася увага розробленню нормативної та науково-методичної бази ДЗЗ, проведенню наукових досліджень. У 2002–2003 рр. НКАУ спільно з ДКБ «Південне», ЦАКДЗ та державне підприємство «Дніпрокосмос» розроблений перший український національний стандарт з ДЗЗ «Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять». Створено також Національний стандарт «Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення та інтерпретування даних». Відзначимо деякі визначення.

Карта - пласке, математично визначене, зменшене, умовно-знакове зображення поверхні Землі, що показує розміщення, властивості і зв'язок природних і соціально-економічних явищ. Карта розглядається як образно-знакова модель, що володіє високою інформативністю, просторово-часовою подібністю до оригіналу, метричністю, оглядовістю і наочністю.

Читання карти - сприйняття карти (візуальне, автоматичне), засноване на розпізнаванні картографічних образів, тлумаченні та розумінні їх змісту. Ефективність читання карти залежить від легкості і швидкості сприйняття окремих позначень, картографічних образів і всього зображення в цілому.

Цифрова карта - цифрова модель поверхні, сформована з урахуванням законів картографічної проекції у відповідній системі координат. По суті, термін "цифрова карта" означає саме цифрову модель, цифрові картографічні дані. Цифрова карта створюється з повним дотриманням нормативів і правил картографування, точності карт та системи умовних позначень. Цифрова карта є основою для виготовлення звичайних паперових, комп'ютерних, електронних карт, вона входить до складу картографічної бази даних, є одним з найважливіших елементів інформаційного забезпечення ГІС і одночасно може бути результатом функціонування ГІС.

Комп'ютерна карта - карта, що отримана на пристрої графічного виведення за допомогою засобів автоматизованого картографування (графопобудовників, принтерів і ін.) на папері, пластику, фотоплівці і інших матеріалах, або за допомогою ГІС.

Цифрове покриття (шар, тема) - сімейство однотипних просторових об'єктів, що відносяться до одного класу об'єктів в межах певної території та в системі координат загальної для набору шарів. За типом об'єктів розрізняють точкові, лінійні і полігональні цифрові покриття.

Просторовий об'єкт - цифрова модель місцевості, яка містить вказівки місцеположення і набір властивостей, характеристик і атрибутів.

ГІС націлена на спільну обробку інформації двох типів:

Географічна інформація - дані, що описують просторове розташування об'єктів (координати, елементи графічного оформлення), зберігаються в цифровій формі на "жорстких" дисках і служать для візуалізації картини в тій чи іншій моделі даних.

Атрибутивна інформація - це дані, що описують якісні або кількісні параметри просторово співвіднесених об'єктів.

Починаючи з 2004 року в Україні виконано великий об'єм наукових та науково-практичних досліджень з різних напрямків ДЗЗ, серед яких екологічний моніторинг довкілля; оперативний моніторинг повеней, підтоплень, лісових пожеж та інших природних катастроф; оцінка стану трубопроводів; пошуки корисних копалин; оцінка стану сільськогосподарських угідь та прогнозування врожаю; прогнозування змін земних систем та клімату з використанням космічної інформації тощо. Частина цих матеріалів опублікована в журналі «Космічні науки і технології» та фаховому електронному журналі «Український журнал дистанційного зондування Землі».

Нині багато супутників з різними інструментами дистанційного зондування контролюють поверхню Землі. Наприклад, місія CORONA була секретною програмою військової розвідки, яка триває до теперішнього часу за допомогою передових супутників Keyhole, а Landsat — це програма відкритих ресурсів Землі, яка також триває завдяки більш вдосконаленим програмам супутникового моніторингу. Поступово збільшується сумарна кількість діючих місій КА для отримання тематичної інформації. Збільшенню сумарної кількості КА на орбітах сприяє також той факт, що сучасні технології дозволяють створювати конструкції КА і бортові сенсори з більшими, ніж раніше, строками функціонування в космосі (до 10-ти і більше років). Одночасно розширюється коло країн, які запускають власні супутники для отримання тематичної космічної інформації високого просторового розрізнення. Детальність на місцевості, яку забезпечують космічні знімки в оптичному діапазоні, сьогодні вже наближена до межі, яка визначається фізичними законами. Наприклад, компанія GeoEye (США) розпочала у 2008 році створення КА GeoEye-2 третього покоління з бортовим оптико-електронним сенсором з просторовим розрізненням 30 см. Відзначимо, що суттєвий прорив в останні роки досягнуто у підвищенні просторової розрізненості космічних радіолокаційних знімків (до 1 м). Одна з вимог до ДЗЗ — постійне відстеження об'єктів в межах всіх досліджуваних територій, які іноді розташовані в різних географічних регіонах. Задовольнити цю вимогу на основі матеріалів знімання за допомогою літаків або одного орбітального апарата неможливо. Тому провідні країни світу йдуть на створення космічних угруповань, які дозволяють знімати будь-яку ділянку території земної кулі з необхідною періодичністю, до кількох разів на добу [4].

Успішно розвиваються та застосовуються багатоспектральні, гіперспектральні сенсори для вирішення галузевих задач (природо-ресурсних, екологічних, сільськогосподарських та ін.). Проте треба констатувати, що якщо на даний час багатоспектральні знімки широко і результативно застосовуються в ДЗЗ, то гіперспектральні знімки використовуються значно менше. Причина у тому, що просторова розрізненість гіперспектральних сенсорів суттєво відстає від просторової розрізненості багатоспектральних сенсорів.

Вимоги до параметрів космічної інформації, що висувуються в різних галузях науки, промисловості та сільського господарства, свідчать, що для вирішення значної частини тематичних задач ДЗЗ необхідні матеріали космічної зйомки з просторовою розрізненістю до 5.0 м, а більшість (65%) задач потребує використання даних ДЗЗ з розрізненістю менше 15 м [5,6].

Весною 2018 року, Україна підписала угоду про співробітництво з Європейським космічним агентством, ЄКА — це міжнародна організація, що займається здійсненням спільних космічних досліджень, а також практичним використанням штучних супутників. Була утворена в 1975 році на конференції у Парижі європейськими державами-членами Європейської конференції з космосу (Бельгія, Великобританія, Данія, Іспанія, Італія, Нідерланди, Франція, ФРН, Швейцарія, Швеція). Штаб-квартира ЄКА знаходиться в Парижі. Діяльність організації орієнтована на сприяння і розвиток співробітництва країн у галузі космічних досліджень, створення та практичне застосування космічної техніки і технологій в мирних цілях. В діяльності ЄКА наукові дослідження відіграють ключову роль, а фокусуються вони, перш за все, на технологіях для експлуатації космосу в галузях навігації (проект «Галілео»), глобального моніторингу за навколишнім середовищем і безпекою (система Copernicus) і супутникових телекомунікацій.

На Саміті спостережень за Землею у 2005 році в Брюсселі був прийнятий Десятирічний план роботи Глобальної системи спостереження за планетою Земля (GEOSS). Системи спостереження Землі складаються з приладів, що призначені для вимірювання, контролю та прогнозування фізичних, хімічних та біологічних показників. Метеостанції записують стан повітряних мас, температуру та тенденції кліматичних змін; буї, які плавають в океанах, відстежують температуру і солоність води; гідролокаційні та радіолокаційні системи оцінюють популяцію риб та птахів; станції сейсмічної та глобальної системи позиціонування (GPS) записують рухи земної кори та зміни рельєфу планети; високотехнологічні супутники сканують планету з космосу; потужні комп'ютеризовані моделі генерують симуляції та прогнози; а системи раннього попередження випускають попередження щодо можливості виникнення небезпечних ситуацій.

Всі ці системи, як правило, працюють окремо одна від одної. Проте останніми роками запуснено в роботу складні технології для збору великої кількості даних спостереження Землі високої роздільної здатності в режимі реального часу. У той же час вдосконалені моделі прогнозування та інструменти підтримки прийняття рішень дедалі більше дозволяють повною мірою

використовувати цей потік інформації. GEOSS підтримує принципи спільного використання даних, які мають на меті забезпечити повний та відкритий обмін даними у основних дев'яти сферах: катастрофи, охорона здоров'я, енергетика, клімат, вода, погода, екосистеми, сільське господарство та біорізноманіття.

ДЗЗ поділяється на наземне та аерокосмічне (за базуванням носія, за допомогою якого отримують матеріали). Під аерокосмічним ДЗЗ розуміють дистанційне зондування, коли носій базується в космічному просторі. Ефективність системи ДЗЗ великою мірою залежить від ефективності наземної інфраструктури керування супутником, прийому, обробки та розповсюдження даних (наземне ДЗЗ). Супутникова інформація для потреб користувачів приймається на розподілену мережу приймальних пунктів. В Україні це центр приймання та обробки спеціальної інформації і контролю навігаційного поля (м. Дунаївці), центр радіофізичного зондування Землі НАНУ-НКАУ (м. Харків) та ін.

Контрольні питання

1. Що таке геоінформаційна система?
2. Дайте коротку характеристику підсистем, що входять до складу ГІС.
3. Що таке наземне та аерокосмічне дистанційне зондування Землі?
4. Завдяки чому можливе здійснення космічного знімання поверхні Землі?
5. У чому сутність активних та пасивних методів ДЗЗ?
6. Які довжини хвиль вибирають для ДЗЗ?
7. Що являє собою космічний знімок поверхні Землі?
8. Що таке просторовий об'єкт?
9. Який опис просторового об'єкту надає географічна та атрибутивна інформація?

2. Основні характеристики датчиків ДЗЗ

2.1. Основні характеристики супутникових знімків

Космічні знімки використовують для виявлення якісного та кількісного вивчення об'єктів, явищ і процесів шляхом дешифрування, виміру і картографування [1,4].

Оглядовість – це площа охоплення території одним знімком. За цим параметром розрізняють знімки:

– глобальні, які охоплюють освітлену частину однієї півкулі, (отримують із міжпланетних космічних кораблів і геостаціонарних супутників). Їхнє територіальне охоплення становить десятки і навіть сотні мільйонів квадратних кілометрів;

– регіональні, на яких відображається частина материка або великий регіон, (отримують із метеорологічних і ресурсних супутників). Охоплення обчислюється мільйонами квадратних кілометрів, ширина зони охоплення змінюється від 500 до 3 000 км;

– локальні, на яких відображаються частини великих регіонів, (отримують із пілотованих кораблів, орбітальних станцій, ресурсних і картографічних супутників). Знімки можуть охоплювати декілька тисяч квадратних кілометрів.

Цифрове зображення – зображення, представлене у цифровому вигляді як растрові файли, одержані або безпосередньо по радіоканалах з повітряних чи космічних апаратів, або шляхом цифрування аналогових зображень за допомогою сканера, телевізійної чи відеокамери.

Растр – засіб цифрового представлення зображення у вигляді прямокутної матриці елементів зображення – пікселів (рис. 1. 1).

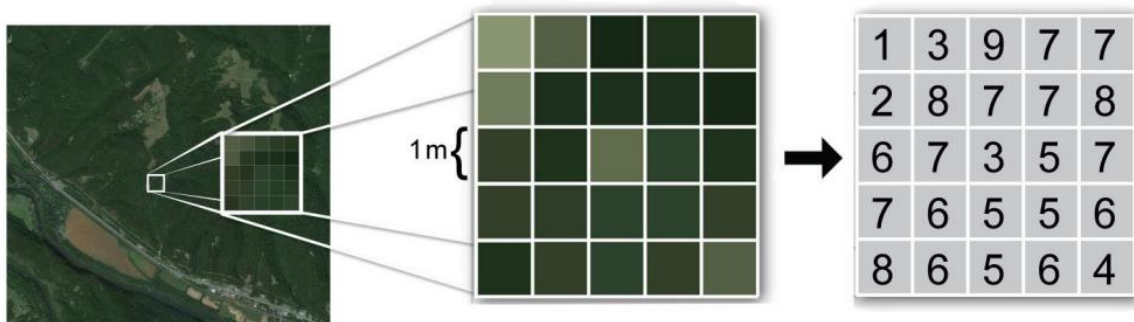


Рис. 2. 1 – Структура растра

Піксель – найменший елемент цифрового зображення, що характеризується квадратною формою і розмірами, які визначають просторову розрізненість знімка.

Вибираючи космічні зображення для свого дослідження, ви маєте знати основні характеристики сенсорних систем, які визначають придатність одержаних даних для вирішення того чи іншого завдання, це чотири типи розрізненості:

- спектральна;
- просторова;

- радіометрична;
- темпоральна (часова).

Спектральна розрізненість – це здатність сенсорної системи реєструвати електромагнітне випромінювання специфічного частотного діапазону, що визначається кількістю каналів супутника, тобто інтервалів довжин хвиль електромагнітного спектра, до яких чутливий сенсор.

Для отримання даних ДЗЗ використовують такі діапазони електромагнітного випромінювання, як оптичний, мікрохвильовий і радіодіапазон.

Оптичний діапазон хвиль (0,001–1000 мкм) поділяють на ультрафіолетовий (менше 0,4 мкм), видимий (0,4–0,8 мкм) та інфрачервоний.

Ультрафіолетовий діапазон (0,1–0,38 мкм) застосовують для оцінювання стану рослин і водойм, а також для визначення поширення малих доз газових домішок та озону в атмосфері.

Видимий діапазон, у якому око розрізняє відтінки кольору, поділяють на зони з позначенням кольору: фіолетовий (390–450 нм), синій (450–480 нм), блакитний (480–510 нм), зелений (510–550 нм), жовто-зелений (550–575 нм), жовтий (575–585 нм), жовтогарячий (585–620 нм) і червоний (620–740 нм). Інфрачервоний діапазон поділяють на: ближній (0,75–1,5 мкм), середній (1,5–3 мкм) і далекий, або тепловий (3–1000 мкм).

Ближній інфрачервоний та видимий діапазони широко використовують для знімання лісових масивів. Принцип отримання інформації полягає в тому, що під дією різних умов відбувається зміна спектральних характеристик об'єктів на земній поверхні. Наприклад, хлорофіл, що міститься в листі, поглинає червоні й сині промені, тоді як зелені в основному відбиває. У синій і червоній зонах видимої ділянки спектра здатність відбивання променів рослинами дуже низька. Зате в ближньому інфрачервоному діапазоні фіксуються максимальні значення коефіцієнтів відбиття. Тому при вивченні стану лісів ефективно використовуються знімки в «крайній червоній» зоні видимої ділянки спектра (довжина хвилі — 0,7–0,75 мкм) та в ближньому інфрачервоному діапазоні (0,78–0,88 та 0,9–1,05 мкм). Теплова зйомка може використовуватися для виявлення хворих, ушкоджених і сухостійних дерев, оскільки за температурною яскравістю вони різко відрізняються від здорової рослинності. Крім цього, теплова зйомка є одним з найкращих методів виявлення лісових пожеж.

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

Радіодіапазон (1 м — > 10 км) надає інформацію про підстиляючу поверхню. Для радарного знімання характерні глибокі тіні, які використовуються для виявлення об'єктів зі значними перепадами висот. Радіодіапазон надає можливість аналізувати рельєф території, виявляти небезпечні природні процеси, такі як селі, зсуви тощо. Радіолокаційне знімання може проводитися за будь-яких погодних умов і в будь-який час доби.

За спектральним діапазоном космічні знімки поділяють на три головні групи:

- знімки у видимому та ближньому інфрачервоному (світловому) діапазоні;
- знімки у тепловому інфрачервоному діапазоні;
- знімки у радіодіапазоні.

Залежно від спектральної розрізненості (кількості каналів, що відповідають певним ділянкам електромагнітного спектра) сенсорні системи поділяються на панхромні, багато-, мультиспектральні, гіперспектральні (рис. 2. 2). Зазвичай оптична зйомка ведеться або відразу у всьому видимому діапазоні (панхроматичний режим зйомки), або в декількох більш вузьких зонах спектра (багатозональна зйомка). Панхромні зображення займають практично весь видимий діапазон електромагнітного спектра (0,45–0,90 мкм) і мають зазвичай вищу просторову розрізненість, ніж мультиспектральні зображення, тому і використовуються для уточнення меж об'єктів, зокрема в топографії. Гіперспектральні сенсори на відміну від мультиспектральних ділять спектр на безліч вузьких діапазонів (сотні каналів), що допомагає точніше розрізняти об'єкти за їхнім фізико-хімічним складом, ідентифікувати видовий склад і стан рослинного покриву, визначати геологічну структуру, виявляти хімічний склад води і багато іншого.

Просторова розрізненість (Роздільна здатність) – розмір найменшого об'єкта земної поверхні, що розрізняється на знімку, тобто фактично – це розмір пікселя. Класифікація космічних знімків за просторовою розрізненістю:

- дуже низька – 10 000–1 000 м;
- низька – 30–1 000 м;
- середня – 10–30 м;
- висока – 1–10 м;
- дуже висока – 0,3–1 м.

Панхромні один широкий діапазон (переважно у видимій області спектра)	Багато-, мультиспектральні від 2 до 12 каналів (видимий, ІЧ, мікрохвильовий, радіодіапазони)	Гіперспектральні 13 каналів і більше (переважно у видимій і ближній ІЧ області спектра)
--------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

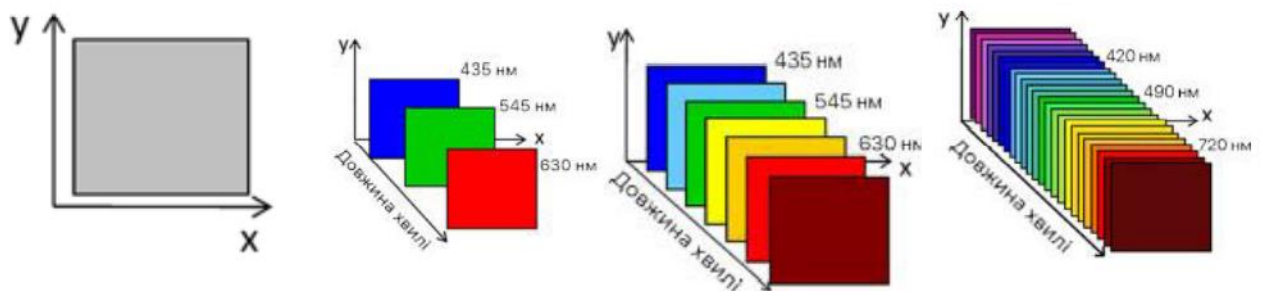


Рис. 2. 2 – Схема панхромних, мульти- та гіперспектральних космічних зображень

Наразі з комерційно доступних знімків найкращою вважають просторову розрізненість 30 см – супутник WorldView 3 (фрагмент наведено із сайту компанії Tvis (рис. 2. 3, в)).

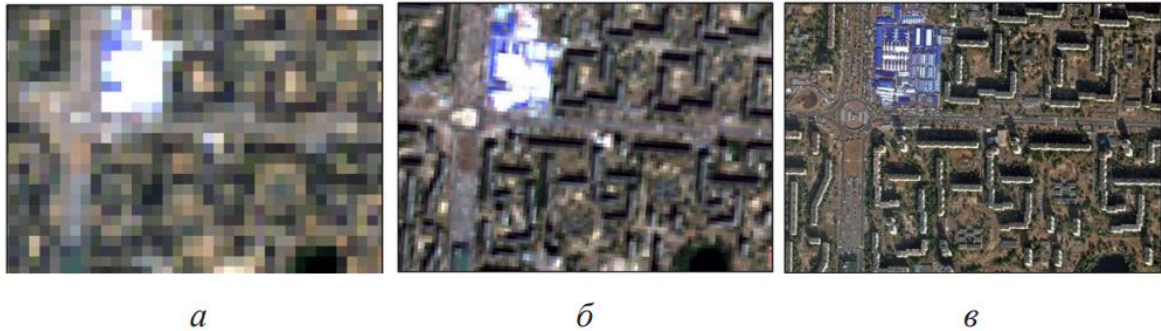


Рис. 2. 3 – Просторова розрізненість 30 м – Landsat 8 (а), 10 м – Sentinel2 (б), 1,24 м – WorldView 3 (в)

Радіометрична розрізненість – це число можливих кодованих значень спектральної яскравості у файлі даних для кожної зони спектра, що вказується числом біт. Визначається кількістю градацій значень кольору, відповідних переходів від яскравості абсолютно «чорного» до абсолютно «білого» і виражається в кількості біт на піксель зображення (рис. 2. 4). За допомогою одного байту можна закодувати 256 кольорів (наприклад, відтінків сірого).

Чорному відповідає код «0», а білому відповідає код «255». Це означає, що в разі радіометричної розрізненості 6 біт на піксель ми маємо всього 64 градації кольору ($2^6 = 64$); в разі 8 біт на піксель – 256 градацій ($2^8 = 256$), 16 біт на піксель – 65536 градацій ($2^{16} = 65536$).



Рис. 2. 4 – Приклад градації кольорів восьми бітного зображення

Раніше сенсори, встановлені на супутниках ДЗЗ, мали радіометричну розрізненість 8 біт на піксель (КЗ Landsat 5), але наразі майже всі нові супутники мають радіометричну розрізненість не менше 12 біт на піксель (наприклад, Landsat 8 має 12 біт/піксель, а Sentinel 2 – 16 біт/піксель), що відповідно впливає на збільшення фізичного розміру космічних знімків, які вже вимірюються не мега, а гігабайтами інформації. Своєю чергою підвищення радіометричної розрізненості сучасних сенсорів впливає на точність визначення коефіцієнтів спектрального відбиття і зниження рівня зашумленості космічних зображень (рис. 2. 5).

Темпоральна розрізненість – це проміжок часу, який минає між двома зйомками тієї самої території. Чим частіше супутник з'являється над об'єктом, тим вищою є темпоральна розрізненість. Для супутників ДЗЗ темпоральна розрізненість визначається параметрами супутникової орбіти, кількістю парних супутників, а також шириною смуги зйомки сенсору. Також слід зазначити, що

оператори здатні коригувати орбіту супутників для підвищення частоти повторюваності знімання (табл. 2. 1).

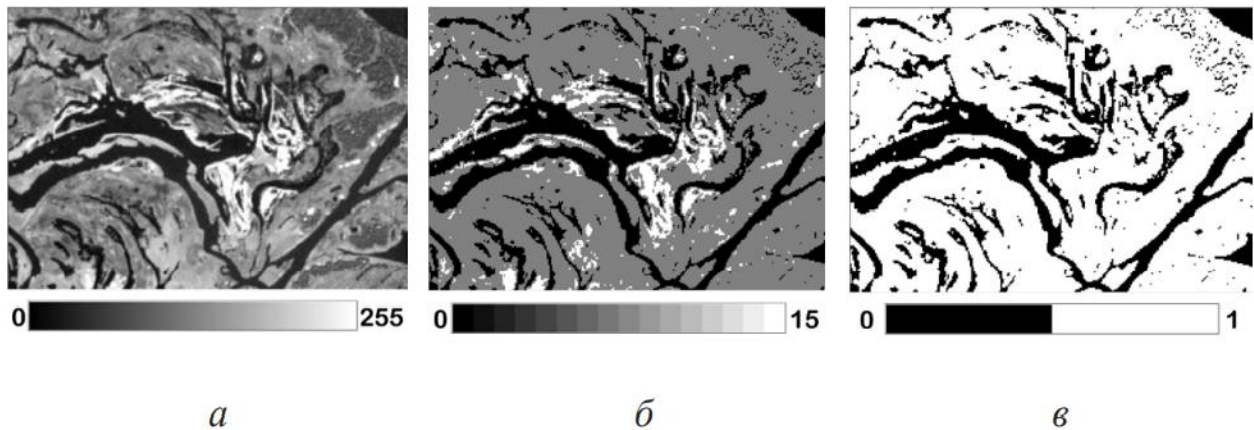


Рис. 2. 5 – Радіометрична розрізненість знімків: 8 біт (а), 4 біт (б), 1 біт (в)

При виборі космічних знімків, якщо ви хочете простежити динаміку якогось процесу в часі, необхідно враховувати такі форс-мажорні фактори, як погодні умови над територією дослідження. Оскільки пасивні космічні апарати реєструють лише відбите сонячне проміння від землі, яке не проходить через хмари, то у весняно-осінній сезон важко знайти «чистий безхмарний» знімок.

Таблиця 2. 1 – Приклади періодичності знімання різних супутників

Супутник	Час	Ширина смуги зйомки, км
NOAA	30 хв	2900
Aqua/MODIS	0,5 доби	2300
Landsat 8	16 діб	185
Sentinel 2A, 2B	5 діб	290
RapidEye	5 діб	77
PlanetScope	1 доба	24
WorldView-3	1 доба	13,1

Космічний моніторинг впевнено увійшов у повсякденне життя суспільства. Піонером в напрямі створення систем надвисокої роздільної здатності є США, передусім фірми GeoEye та DigitalGlobe. США, Франція, Індія, Китай, Ізраїль, Японія, Німеччина та Італія є учасниками спільних космічних міжнародних проектів і мають власні системи космічного базування.

Для забезпечення можливості здійснення зйомки в ДЗЗ, знімальна апаратура встановлюється на носій, який піднімає її на потрібну висоту, переміщує відносно земної поверхні і забезпечує певне орієнтування в просторі.

За типом носіїв, що використовуються для систем ДЗЗ, їх поділяють на дві основні групи:

- авіаційні – літаки, гелікоптери, планери, БПЛА, аеростати;
- космічні – штучні супутники Землі, орбітальні станції.

У знімальній системі повітряного базування є GPS-приймач зовнішнього орієнтування та інерційно-навігаційна система (реєстрація кутів нахилу знімальної камери). Ці технічні засоби постійно вдосконалюються, особливо це стосується такого параметра, як точність визначення кутів нахилу камери. БПЛА – це мобільний інструмент з високою деталізацією даних. Оскільки висота польоту БПЛА зазвичай знаходиться в рамках від 100 до 300 метрів над поверхнею землі, то можна отримати знімки з роздільною здатністю в сантиметрах на піксель. БПЛА дозволяють збирати величезну кількість інформації в найкоротші терміни. Особливістю їх є можливість використання спектральних камер, які дозволяють отримувати фотографії в ближньому інфрачервоному спектрі [3].

2.2. Апаратура ДЗЗ

Знімальні системи розділяють за технологією одержання знімків на фотографічні, телевізійні, скануючі та радіолокаційні [5,6].

Серед знімальних систем значно поширеними є системи оптичного діапазону, до яких належать фотоапарати, телевізійні апарати та сканери. Фотографічні системи забезпечують одномоментне одержання всього кадру (знімка) у центральній проекції. Ці системи характеризуються наявністю одного або декількох об'єктивів (зі світлофільтрами), фокусною відстанню від об'єктива і розміром одержуваного кадру. Формат кадру і фокусна відстань визначає кут огляду простору (кут поля зображення об'єктива (2ω) визначають як кут між напрямками на кути кадру), зі збільшенням якого збільшується територіальне охоплення зйомки, але одночасно погіршується якість зображення і рівномірність освітлення кадру (рис.2.6). Кут огляду і поле зору (при однаковій висоті польоту) зростають зі скороченням фокусної віддалі фотоапаратів. Світлофільтром називають середовище (зазвичай, додаткова скляна плоско паралельна пластина з певним забарвленням), що поглинає (відфільтровує) світлові промені певної довжини, а інші – пропускає. Шляхом підбору світлофільтрів можна отримати спеціальні ефекти, наприклад, фотографування у діапазоні хвиль певної довжини (спектрозональні фотографії). Космічні знімальні камери призначені для отримання знімків, які можуть використовувати для складання тематичних карт, чи фотопланів і виконання дешифрування знімків різного призначення. Зазвичай, ці знімальні камери мають великий діапазон фокусних відстаней ($f = 30\text{--}500$ мм) і великі розміри кадру. Основна частина телевізійної камери - передавальна електронна трубка. Основною частиною знімальних телевізійних камер є спеціальні світлочутливі пластини, які перетворюють спроектоване на них світло в електричний сигнал. Найпоширенішим різновидом знімально-передавальних пристроїв є відікон – чутливий елемент (детектор) передавальної телевізійної трубки. Світлочутливим екраном служать напівпровідникові і фотоелементи з внутрішнім фотоефектом.

Це плоска поверхня балона трубки, який є прозорим для потрібного спектрального діапазону частот і на який з одного боку напилено тонкий шар металу (десятки мільйонів зерен срібла чи золота) – фотомозаїка, а з другого – шар металевого провідника (сигнальна пластина). Кожне окреме зерно стосовно аноду трубки є мікроскопічним катодом, а щодо сигнальної пластини – обкладкою мікроскопічного конденсатора. Якщо спроектувати через об'єктив зображення на світлочутливу поверхню фотомозаїки, то окремі її часточки – елементарні фотокатоди, які є слабо освітленими, втратять мало електронів (малий фотострум) і виявлять малий заряд елементарних конденсаторів. Сильно освітлені фотокатоди втратять багато фотоелектронів і спричинять відповідний заряд елементарних конденсаторів. Унаслідок цього на поверхні фотомозаїки виникає своєрідний “рельєф” потенціальних зарядів – заряджених мікроконденсаторів, просторові особливості якого відповідають освітленості пластини. Для спрощення можна уявити собі пластину-матрицю, на всій поверхні якої стоять стовпчики діаграми, висота яких відповідає освітленості й електропотенціалу в кожному з пунктів стояння стовпчиків. Отже, оптичне зображення створює на світлочутливій пластині “електричне зображення” з позитивних зарядів, а в електрисхемі трубки виникає струм нерівномірної інтенсивності, промодульований дефіцитом зарядки мікроконденсаторів, який і є сигналом зображення – відеосигналом. Отже, об'єктив камери під час зйомки фіксує зображення на екрані трубки, а її електронний промінь сканує екран та формує електричний сигнал, передає його по каналах зв'язку або записує на магнітний запам'ятовуючий пристрій. На приймальних наземних станціях відеосигнал знову підсилюється і подається на катод приймальної електронно-променевої трубки (кінескопа телевізора чи монітора). Пучок електронів, промодульований відеосигналом, за допомогою своєї фокусуєчо-відхиляючої системи оббігає люмінесцентний екран кінескопа, який засвічується відповідно до сили відеосигналу і створює (розгортає) видиме зображення.

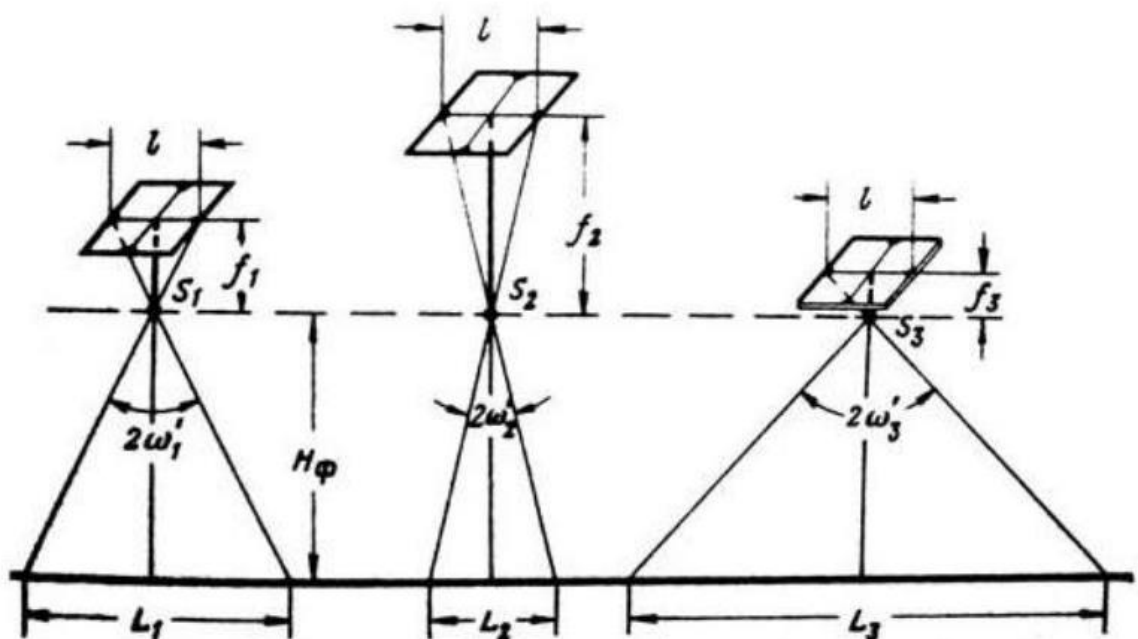


Рис. 2.6 – Формат кадру і фокусна відстань

Спектральна чутливість фотографічних і телевізійних камер, зазвичай охоплює видимий і ближній ІЧ-діапазони. Наприклад, КА Лендсат 1,2 мали на борту багатозональну знімальну систему (рис. 2.7) з трьох камер- відіконів (Return Deam Videkon- RDV). Кожною камерою з висоти польоту супутника 671 км охоплювалась площа близько 185×185 км. Ці три камери вмикались одночасно і знімали поверхню в трьох спектральних діапазонах (голубому-зеленому, жовтому-червоному і червоному-інфрачервоному). Окремі кадри знімальної системи могли бути суміщені і перетворені синтезованими кольорами. Просторове розрізнення (піксель-розмір) більшості телевізійних камер супутників "Лендсат" досягало близько 20 м, яка сьогодні постійно покращується.

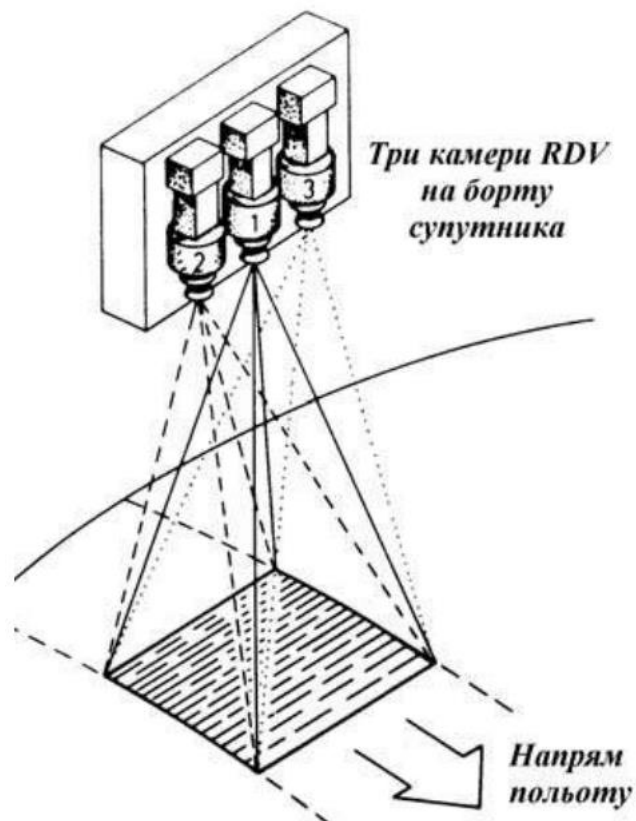


Рис. 2.7 – Багатозональна знімальна система

Скануюча система реєстрації даних ДЗЗ складається зі сканера з датчиками, які укомплектовані детекторами. Датчик – це пристрій, що збирає відбиту від Землі сонячну енергію (електромагнітне випромінювання) та перетворює її в електричний сигнал у формі коду, зручного для передачі по каналах зв'язку. Детектор – це пристрій у системі датчика, який реєструє електромагнітне випромінювання. Існує чотири типи скануючих систем. *Перша – оптико-механічна*, для якої датчик являє собою хитне перпендикулярно траєкторії руху носія дзеркало, яке уловлює відбиту від Землі сонячну енергію. Записаний сигнал характеризує інтегральне випромінювання ділянки на земній поверхні, що відповідає елементу зображення - пікселю (аббревіатура від "picture element"). Розмір такої ділянки визначає показник просторового розділення знімка. У межах елемента зображення (пікселя) відбувається усереднювання яскравості

об'єктів, і їхні деталі не розрізняють. Коливання дзеркала забезпечує реєстрацію рядків пікселів знімка, а рух носія - формування всього зображення. При цьому кожен рядок реєструється одним детектором.

Добре зарекомендований на практиці метод сканування застосовують для отримання зображення у всіх спектральних діапазонах. Він особливо ефективний для знімків у видимому та інфрачервоному діапазонах. Першим оптичним приймачем і сканувальним елементом системи є дзеркало, яке коливається в площині, поперечній до напрямку руху носія апаратури. На дзеркало в певний конкретний момент потрапляє зображення дуже маленької частинки земної поверхні. Від нього променистий потік подається в об'єктив, а далі через діафрагму, що вирізає на електро-фотоприймач (рис. 2.8), який перетворить його в електричний сигнал, створивши один піксель (крапку майбутнього зображення). Ця крапка відокремлюється від наступної механічною системою переривання потоку світла перед об'єктивом. Між крапками формується вузька смужка без світла. Наступна крапка буде сформована інтегральним світлом від наступної ділянки земної поверхні, бо дзеркало трохи змінило свій кут в процесі коливання. Це світло знову потрапляє на електро-фотоприймач, перетворюється на електричний сигнал (промодульований світлом електрострум), який створить новий піксель майбутнього зображення. Протягом коливання дзеркала в один бік створюється ціла лінійка з таких крапок-пікселів, водночас – відеосигнал лінійки – струм з перемінними характеристиками, що відповідають величині інтегрального освітлення кожного окремого пікселя в рядку.

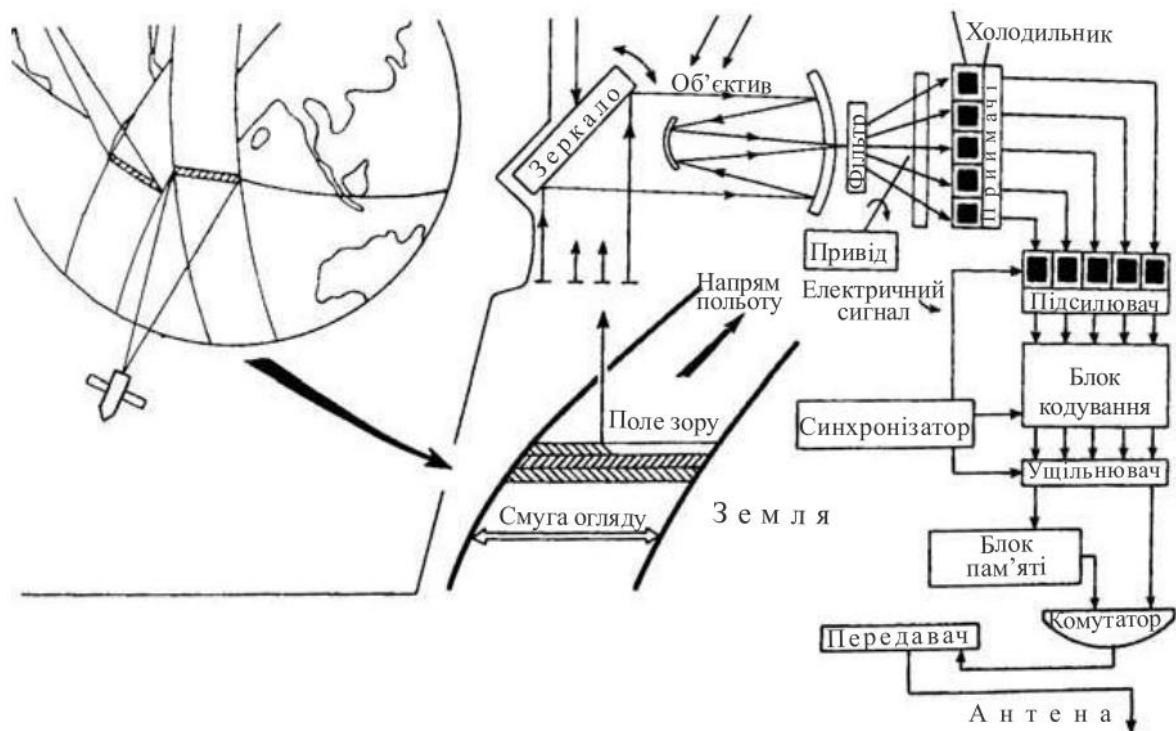


Рис. 2.8 – Принцип роботи багатозональної оптико-механічної сканувальної апаратури

Зміщення лінійок відбувається через рух супутника – носія апаратури, і “поглядання” підсупутникової смуги знімання відбуватиметься в наступній паралельній площині. Стабільна швидкість польоту і стабільне функціонування механічної системи переривання зображення забезпечують точне прилягання порядкових пікселів другого ряду до пікселів першого ряду. Так в процесі польоту супутника відбувається безперервне сканування земної поверхні, з якого, лінійка до лінійки можна сформуванати безперервно нарощувану сканами смугу зображення зі смуги поверхні планети вздовж траси польоту носія. Поширені зараз сканери, призначені для вимірювань випромінювання в декількох вузьких (0,1 мкм) спектральних зонах, сканувальні спектрометри працюють за багатоканальною схемою. Конструкція сканера доповнюється дисперговою системою (дифракційні ґратки, призми тощо), що розщеплюють світловий потік на спектральні складові, які подаються на різні приймачі.

Для зменшення частоти поглядання місцевості застосовують багаторядкове сканування, під час якого використовують не один, а кілька фотоприймачів, розміщених по прямій лінії. Отже *скануюча система другого типу* відрізняється тим, що в ній кілька детекторів об'єднані в лінійні масиви та розташовані в напрямку руху апарата. Це забезпечує паралельність скануючих рядків.

У *скануючій системі третього типу* немає рухомих частин, відбите випромінювання попадає на плоске дзеркало і потім проектується на об'єднанні в лінійку світлочутливі детектори, так звані прилади із зарядовим зв'язком – ППЗ, які здатні фіксувати електромагнітне випромінювання з високою геометричною і радіометричною точністю (рис. 2.9). Лінійка розташована поперек траси польоту, кількість детекторів може досягати декількох тисяч, така лінійка одночасно реєструє весь рядок знімка в кожній із зон спектра.

Скануючі системи четвертого типу використовують різні комбінації технології сканування, які спрямовані на значне збільшення кількості спектральних діапазонів. У них випромінювання сприймається спектрометрами і потім диспергується на безлічі детекторів, організованих у лінійні або матричні масиви. Такі системи називаються багатоелементними та використовуються в сучасних знімальних системах і забезпечують кращі геометричні та спектральні властивості знімків.

Важливими характеристиками сканера є кут сканування (огляду) і миттєвий (елементарний) кут зору, який визначає ширину смуги, що знімається і лінійну роздільну здатність на місцевості.

У різних сканерів ці кути вельми різні за величиною. У точних сканерів кут сканування зменшують до $\pm 2,5^\circ$, а в оглядових збільшують до $\pm 50^\circ$. Відповідно до цього і миттєву точку зору встановлюють від десятих доль дугової хвилини до декількох градусів. Кут сканування і миттєва точка зору, а отже поле огляду і роздільна здатність на місцевості, взаємозалежні величини. Чим вища роздільна здатність сканера, тим менша ширина смуги знімання. Наприклад, сканер AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometr) на американському супутнику NOAA при роздільній здатності 1 км охоплює смугу знімання 2 700 км; сканер МСУ-СК при роздільній здатності 150 м знімає смугу шириною 600 км, а сканер МСУ-Э, відповідно, 35 м і 45 км; сканер XS на французькому

супутнику “СПОТ” – 20 м і 60 км. Сканери так само, як і телевізійні камери, мають два основні режими роботи – режим запам’ятовування інформації і режим безпосередньої її передачі каналами космічного зв’язку.

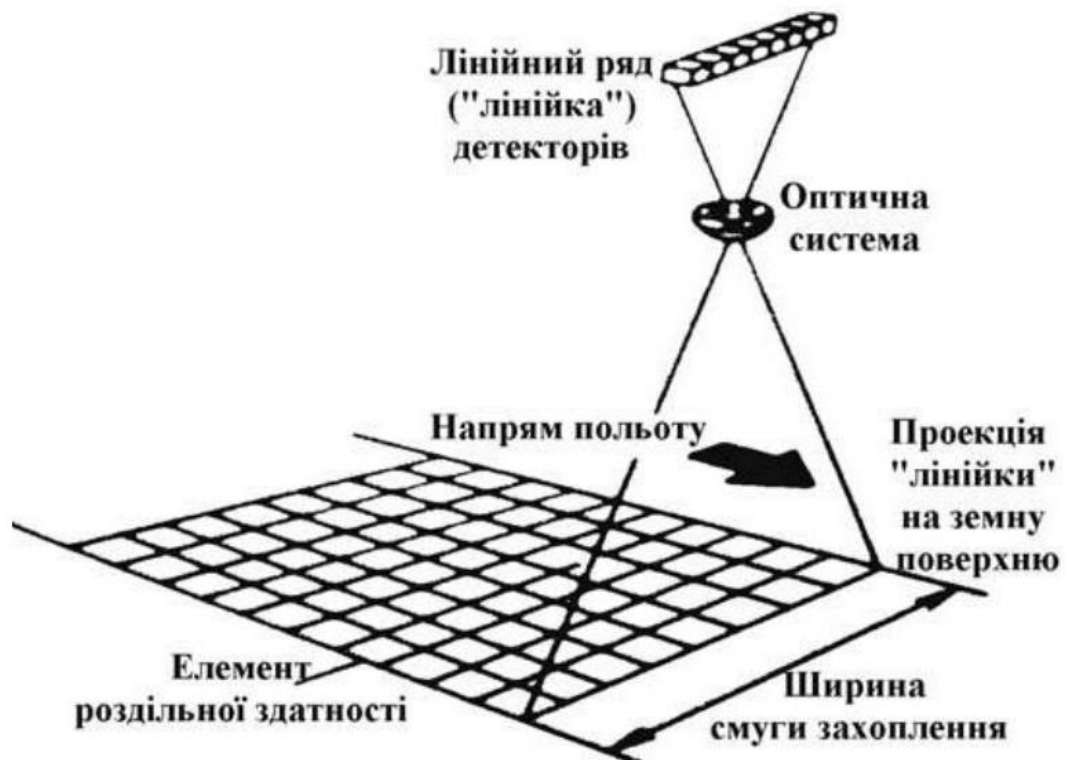


Рис. 2.9 – Знімання поверхні скануючою системою третього типу

Чим краща роздільна здатність сканера і ширша смуга огляду, тим більший обсяг інформації необхідно передати за одиницю часу каналами космічного зв’язку. При роздільній здатності 15 – 60 м і огляді 185 км цей обсяг досягає 150 Мбіт/с. Канали зв’язку повинні забезпечувати його передачу.

Особливостями сканерних зображень (особливо зі сканерів, встановлених на літаках) з великим кутом сканування ($90, \dots, 120^\circ$) є те, що сканувальне дзеркало захоплює (оглядає) земну поверхню під різними кутами до лінії надіра. Через це розмір елементів зображення на місцевості з віддаленням від пункту надіра збільшується. З огляду на це моментальне поле зору сканера в крайових частинах рядка є більшим, ніж в центральній частині. Відповідно, розтягнутість на кінцях смуги сканування є більшою, ніж в центральній частині. Це призводить до викривлення косих (стосовно напрямку польоту) лінійних об’єктів, які набувають S-подібного викривлення, а круги чи кола набувають форми асиметричних овалів. Спотворення місцевості на знімках можуть виникати також через нерівномірність руху сканувального дзеркала чи внаслідок зміни орієнтації носія апаратури в процесі польоту.

Поява ПЗЗ-лінійок з високою роздільною здатністю дозволила реалізувати космічні знімальні системи високої роздільної здатності (як приклад, система IKONOS). Електрооптичні сканери цих систем працюють в широкому діапазоні електромагнітного випромінювання і, як правило, одночасно в декількох

спектральних діапазонах, що дозволяє використовувати зображення для дешифрування й інтерпретації різних об'єктів та процесів. Потужні приймально-передавальні радіотехнічні комплекси, задіяні в системах, дозволяють оперативно отримувати відеодані та нагромаджувати їх у цифровій формі, придатній для подальшого комп'ютерного опрацювання.

Під час космічного радіолокаційного зондування природного середовища використовують такі основні типи приладів: висотоміри, скаттерометри і радіолокаційні системи бічного огляду з реальною і синтезованою апертурою, радіометри.

Радіолокаційні висотоміри застосовують для вимірювання висотного профілю земної поверхні з точністю 2~8 см і можуть бути використані для отримання інформації про рельєф місцевості, висоту хвиль, швидкість вітру, рівні приливів, швидкість поверхневих течій, льодовий покрив і неоднорідності його поверхні, а також про будь-які інші процеси, які приводять до змін середнього рівня або стану поверхні морів.

Принцип дії скаттерометрів (вимірювачів характеристик розсіяння) ґрунтується на залежності абсолютної величини питомої ефективної площі розсіяння морської поверхні в азимутній площині від швидкості і напрямку приповерхневого вітру. Головним завданням супутникових скаттерометрів є визначення синоптичного поля вітру, що принципово не потребує високої роздільної здатності по координатах.

Радіолокаційні системи (радари) використовують активний метод реєстрації зображень. Радіолокаційні системи бічного огляду (РЛСБО) належать до найбільш універсальних та інформативних давачів дистанційного зондування в мікрохвильовому діапазоні. Встановлений на носії передавач з антеною здійснює мікрохвильове випромінювання, а приймач отримує назад відбите поверхнею випромінювання. Оскільки об'єкти місцевості мають різні похилі дальності від носія, то відбиті сигнали потрапляють у приймач у різні моменти часу. Отже, геометричною підставою отримання радіолокаційних знімків є відстань між радіолокатором і об'єктом, яка вимірюється через визначення часу, протягом якого цю відстань проходить імпульс радіохвиль. Зображення формується по рядках (смузі) знімка, а уздовж кадру – за рахунок поступового переміщення носія (рис.2.10).

Роздільна здатність радіолокаційних знімків у напрямку лінії польоту і перпендикулярно до неї залежить також від форми діаграми спрямованості антени і від виду зондуючих імпульсів. Потужність відбитих сигналів залежить від електричних властивостей відбивних поверхонь та від орієнтації елементів нерівностей земної поверхні. Яскравість елемента розділення залежить від потужності радіосигналу, відбитого місцевими об'єктами. Роздільна здатність знімків уздовж лінії польоту тим вища, чим вужчий антенний промінь, тобто чим менша ширина діаграми спрямованості антени радіолокатора в горизонтальній площині, яка прямо пропорційна довжині хвилі і обернено пропорційна розміру антени. Тому для підвищення роздільної здатності доводиться робити якомога довші антени.

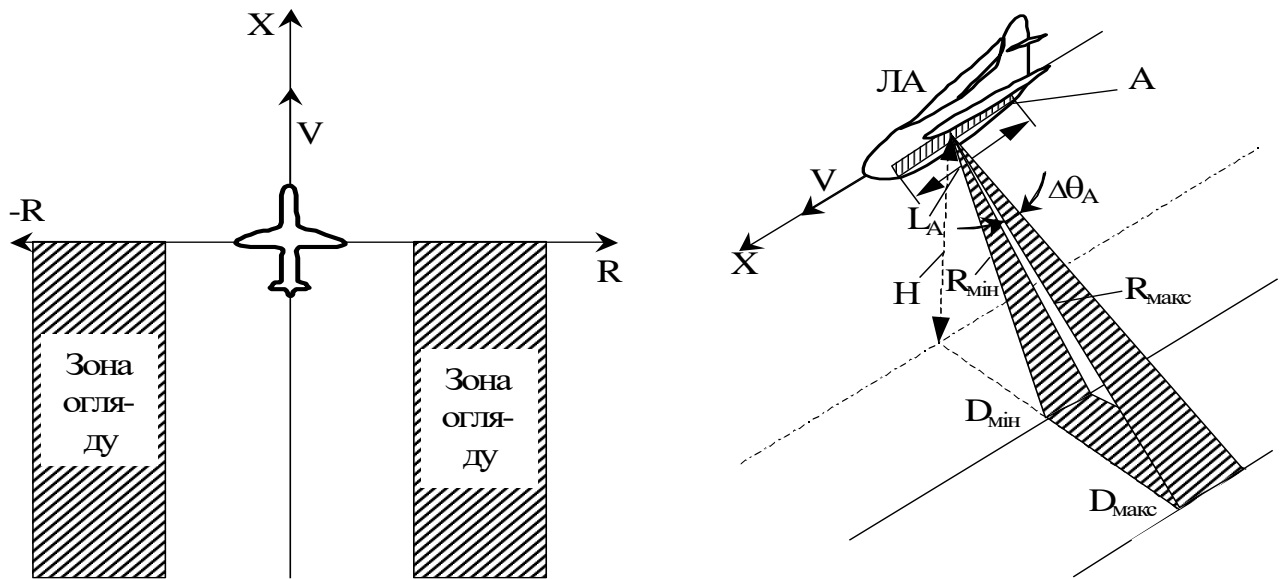


Рис. 2.10 – Принцип бокового огляду поверхні

Якщо траєкторія руху носія точно відома, наприклад, політ щодо Землі строго прямолінійний, то є змога штучно сформувати вузьку діаграму спрямованості завдяки переміщенню в просторі реальної антени. Такі радіолокатори отримали назву радіолокаторів з синтезованою антеною або зі штучним розкриванням антени.

Радіолокаційні системи мають ряд переваг порівняно з іншими типами знімальних систем, оскільки мікрохвилі радара можуть проникати через атмосферу вдень і вночі фактично при будь-яких погодних умовах, забезпечуючи отримання даних навіть під час туману, дощу, снігопаду, хмарності та ін. За деякими умовами такі хвилі можуть проникати через земну поверхню, що сприяє виявленню неоднорідності ґрунтів та заглиблених об'єктів. Сьогодні використовують також вид активного знімання за допомогою лазерного локатора (лідара), який використовує монохроматичне випромінювання ультрафіолетового і видимого діапазонів.

Радіометри. Наземні об'єкти, як і всі тіла, що мають температуру вищу від абсолютного нуля, мають власні випромінювання теплого та радіодіапазонів. Поширення цих випромінювань здійснюється за законами радіохвиль. Оскільки інтенсивність випромінювання невелика, а різниця між інтенсивністю випромінювання окремих об'єктів також незначна, то для вимірювання випромінювання об'єктів земної поверхні потрібна дуже чутлива апаратура. Кількість енергії, яку випромінюють різні поверхні, залежить не тільки від їхньої фізичної температури, але також і від їхнього хімічного складу, структури, шпаруватості тощо. Залежно від довжини хвилі, на яку налаштована антена радіометра, сприймається сигнал з інформацією саме цієї хвилі. Зокрема, найкоротші радіохвилі несуть інформацію, що визначається температурою поверхні випромінювача, довші радіохвилі несуть інформацію і про температуру і про вологість поверхневого шару випромінювача, а найдовші хвилі цього надвисокочастотного (НВЧ) діапазону майже повністю залежні від запасів

вологи в ґрунті, які визначають так звану діелектричну проникність ґрунту для радіохвиль. Для хвиль радіотеплового діапазону розроблено “інфрачервоні” – ІЧ-радіометри, а для хвиль сантиметрового та дециметрового діапазонів – “надвисокочастотні” – НВЧ – радіометри.

2.3. Ресурси для отримання інформації ДЗЗ

Ще десяток років тому доступ до даних із супутників був обмеженим, таку інформацію могли отримати лише військові, великі корпорації, владні структури та деякі наукові установи. Зараз же терабайти супутникових даних доступні для всіх. Кожного дня ми можемо бачити, як змінюється наша планета за допомогою космічних знімків. У ХХІ столітті є багато джерел безкоштовних супутникових даних, наприклад, за допомогою порталів Геологічної служби США, Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA)) та ЄКА можна завантажити безкоштовно знімки Landsat і Sentinel і використовувати їх у ГІС-програмах.

Космічні знімки це файли, які дуже великі за розміром. Отже, якщо ви хочете завантажити знімок, насамперед потрібно переконатися, що на вашому комп’ютері достатньо вільного місця. Тривалість завантаження залежить від швидкості інтернету і розміру файлу.

У грудні 1999 року NASA запустило супутник Terra з місією системного спостереження Землі. Супутник Terra містить п’ять інструментів, які здійснюють спостереження за атмосферою Землі, океаном, землею, снігом та льодом, а також енергетичним бюджетом. Взагалі, ці спостереження дають унікальну інформацію про те, як працює система Землі та як вона змінюється. Ці спостереження показують вплив людства на планету та надають важливі дані про природні небезпеки, такі як пожежі та вулкани.

Енергетичний бюджет Землі, або радіаційний баланс земної поверхні, — різниця між сумарною (прямою і розсіяною) сонячною радіацією, поглиненою земною поверхнею, та ефективним опроміненням цієї поверхні (може бути позитивним - удень, влітку і негативним - уночі, взимку).

Terra має на борту п’ять наступних дистанційних зондів для спостереження за навколишнім середовищем і змінами клімату:

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) використовується для створення карт температури поверхні Землі, випромінювальної здатності, відбивної здатності і висоти;

- CERES (Clouds and Earth’s Radiant Energy System) вимірює загальний обсяг радіаційного фону Землі та забезпечує оцінку властивостей хмар, що дозволяє вченим визначати роль хмар в радіаційному потоці від поверхні до вершини атмосфери;

- MISR (Multi-angle Imaging Spectroradiometer) пристосований для вимірювання сонячного випромінювання, що відбивається Землею (як поверхнею, так і атмосферою) в різних напрямках і діапазонах спектра;

- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) призначений для спостереження за глобальною динамікою планети Земля (зміни хмарності,

радіаційний баланс і процеси, що відбуваються в океанах, на суші і в нижніх шарах атмосфери);

- **MORITT** (Measurements of Pollution in the Troposphere), здійснює спостереження за характером забруднення атмосфери.

В Україні приймання даних MODIS здійснюється в м. Дунаївці Хмельницької області. **Сканер MODIS** є одним з ключових інструментів на борту американських супутників Terra і Aqua серії EOS та знімає земну поверхню за траєкторією польоту смугою завширшки 2300 км, практично з щоденним глобальним повторенням, працює в 36 спектральних каналах (гіперспектральна зйомка) в діапазоні електромагнітних хвиль від 0,4 до 14,4 мкм. У двох каналах видимого та ближнього інфрачервоного спектра отримують знімки з розрізненням 250 метрів, у п'яти каналах видимого, ближнього та середнього інфрачервоного спектра — з розрізненням 500 метрів, у решті — 1000 метрів [1,6].

На борту супутника Terra працює ще один багатозональний (гіперспектральний) сканер ASTER — має 14 спектральних каналів: три канали у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах з просторовим розрізненням 15 м (для стереозйомки), шість каналів у середньому інфрачервоному діапазоні з розрізненням 30 м та п'ять каналів у тепловому діапазоні з розрізненням 90 м. Смуга огляду ASTER становить 60 x 60 км.

Програма Landsat — найтриваліший проект з отримання супутникових фотознімків планети Земля. Перший з супутників у рамках цієї космічної програми був запущений в 1972 році; останній, на цей момент, Landsat — 8–11 лютого 2013 року. Знімки, отримані в США і на станціях отримання даних із супутників по всьому світу, є унікальним ресурсом для проведення безлічі наукових досліджень у галузі сільського господарства, картографії, геології, лісівництва, розвідки, освіти і національної безпеки. Наприклад, супутник Landsat 7 надає знімки у 8 спектральних діапазонах з просторовою роздільною здатністю від 15 до 60 метрів на точку; періодичність збору даних для всієї планети становить 16–18 діб.

Copernicus – це програма Європейського Союзу зі спостереження за земною поверхнею. Програма пропонує інформаційні послуги на основі супутникової системи спостереження Землі – Sentinel, яка охоплює п'ять сімейств супутників: Sentinel 1, призначений для отримання радіолокаційних даних, Sentinel 2 і Sentinel 3 – забезпечують моніторинг суші й океану, Sentinel 4 і Sentinel 5 – розроблені для метеорологічних і кліматичних досліджень. Розміщення каналів Sentinel-2А в порівнянні з каналами Landsat 8 і Landsat 7 можна побачити на рис. 2.13. Супутник Sentinel-2А має спектральні канали, подібні до Landsat 8 (за винятком теплового каналу термічного інфрачервоного датчика Landsat 8). Серед 11 діапазонів Landsat 8 тільки короткохвильові (1–4 і 8) відповідають видимому спектру, інші — чутливі до тих областей спектра, які людське око не розрізняє. Супутник Sentinel-2 веде зйомку в 12 спектральних каналах, канали RGB і NIR мають 10-м просторову роздільну здатність

Copernicus Open Access Hub -це веб-платформа для надання користувачам повного, відкритого та безкоштовного доступу до радарних знімків Sentinel 1,

оптичних мультиспектральних знімків Sentinel 2, а також даних про земну поверхню Sentinel 3.

EO browser – переглядач доступних онлайн знімків середньої і низької роздільної здатності від Європейського космічного агентства, який містить знімки із супутників: Sentinel 1, Sentinel 2, Sentinel 3, Sentinel 5P, Landsat, Envisat, Terra.

Earthdata Search – це веб-інструмент, який допомагає здійснювати пошук даних НАСА, а також партнерських агентств. Ресурс дає змогу користувачам шукати дані, переглядати та порівнювати їх, а також завантажувати.

NASA – Giovanni відображає наукові дані з різних приладів на супутниках НАСА в різних форматах: графіки, часові ряди, середні значення, анімації та числові дані тощо. Сайт забезпечує доступ до численних супутникових наборів даних, які здебільшого стосуються атмосферного складу, атмосферної динаміки, глобальних опадів, гідрології та сонячного випромінювання. Оподи, температура, вологість та концентрація газу – це лише деякі із запропонованих даних, які можна завантажити. Реєстрація на сайті Earthdata Search дає змогу отримати повний доступ до даних із сайту Giovanni [1,6].

Ресурси для комерційного використання. Крім безкоштовних ресурсів, є низка компаній, які надають доступ до зображень на платній основі. Вони мають розширений набір даних вищої просторової розрізненості, вже опрацьовані космічні знімки для конкретних цілей тощо. Знімки високої (1–10 м) і дуже високої (1 м і менше) просторової розрізненості доступні тільки платно.

1. DigitalGlobe – американська компанія, яка знімає поверхню Землі і дає доступ до зображень NASA, Google, Terraserver. Знайти супутникові знімки можна на офіційній сторінці www.digitalglobe.com/, а каталог знімків доступний за посиланням: <https://browse.digitalglobe.com>.

2. Компанія Tvis пропонує знімки з усіх доступних комерційних оптичних і радарних супутників з просторовою розрізненістю від 200 м до 30 см на піксель для вирішення низки практичних завдань (контроль ведення сільського господарства; моніторинг вирубки лісів; виявлення незаконного будівництва; відстеження змін берегових ліній водних об'єктів; моніторинг повеней та пожеж і т. д.). Крім супутникових даних, вони надають послуги зі створення ортофотопланів, векторних карт, цифрових моделей рельєфу, тривимірних моделей тощо. За посиланням <http://www.tvis.com.ua/products/satellite-imagery> можна ознайомитися зі зразками космічних знімків, які пропонує компанія, та прочитати загальну інформацію про супутники і їхні технічні характеристики. Заповнивши форму на головній сторінці сайту компанії, можна замовити знімок на певну територію або просто задля цікавості дізнатися, яка вартість такої інформації.

Також зображення, підготовлені на основі знімків високої і дуже високої просторової розрізненості, викладені на Google Maps та в програмі Google Earth Pro. Всі ці ресурси мають багато інструментів, які дають змогу користувачам створити свою карту на основі наявної базової карти зі знімків високої просторової розрізненості. Їх не можна використовувати для автоматизованого

аналізу і дешифрування, але їх доволі достатньо для створення найпростіших карт.

Контрольні питання

1. Як впливає фокусна відстань об'єктива камери, при фіксованій висоті носія, на територіальне охоплення зйомки та просторову розрізненість знімка?
2. На які типи поділяються космічні знімки за оглядовістю ?
3. Що таке просторова, спектральна та темпоральна розрізненість космічного знімку?
4. У чому різниця між панхроматичним, мультиспектральним та гіперспектральним режимом оптичної зйомки?
5. Дайте коротку характеристику скануючим системам оптичного діапазону.
6. Чим обмежена роздільна здатність за шляховою дальністю РЛС бокового огляду?
7. Дайте загальну характеристику ресурсів для отримання інформації ДЗЗ.

3. Основні системи координат та проекції

3.1. Основні системи координат

При вивченні руху КА застосовують ряд систем координат (СК). Їх різноманіття визначається різними факторами. Для опису будь-якої СК достатньо задати **початок відліку, опорну площину, напрямок осей** [7].

В залежності від місця положення початку відліку координат СК діляться на: **геліоцентричні** - з початком відліку координат у центрі мас Сонця; **геоцентричні** - з початком відліку координат у центрі мас Землі; **топоцентричні** - з початком відліку координат у пункті спостереження на поверхні Землі; **барицентричні** - з початком відліку координат у центрі мас КА; **планетоцентричні** - з початком відліку координат у центрі мас планет; **селеноцентричні** - з початком відліку координат у центрі мас Місяця.

В залежності від вибору опорної площини СК діляться на **екваторіальні** - опорна площина являє собою площину екватора; **екліптичні** - опорна площина - площина екліптики; **горизонтальні** - опорна площина - площина місцевого горизонту; **орбітальні** - опорна площина - площина орбіти.

В залежності від вибору напрямку осей систем відносно просторових орієнтирів СК діляться на: СК, **що обертаються**; **інерціальні** - що не обертаються; **рухомі**; **нерухомі**.

В залежності від форми СК діляться на **прямокутні**; **оскулюючі**; **криволінійні**.

Криволінійні СК діляться на **циліндричні**; **сферичні**; **еліпсоїдальні**; **параболоїдальні**.

Для геоцентричних і геліоцентричних СК необхідно зазначити момент часу, до якого віднесена прийнята СК.

Інформація в ГІС зберігається в географічній і атрибутивній базах даних.

Географічна інформація представляється у вигляді наборів географічних даних.

Земля стиснута у полюсів і має дещо неправильну форму, тому в практичній геодезії і картографії використовуються таке поняття, як сфероїд. Форму Землі вважають еліпсоїдом обертання або сфероїдом. Кулею або сферою, основою якої є круг, її можна вважати тільки для оглядових карт Землі і материків.

Сфероїд – тривимірне тіло, створене обертанням двовимірного еліпса навкруги малої осі. Велика напіввісь – це радіус від центру Землі до екватора ($a=6378245\text{м}$), мала напіввісь – це радіус від центру Землі до полюса ($b=6358863\text{ м}$). Форму Землі інакше називають *геоїдом*.

Існує два типи СК: географічна (геодезична) і система координат проекцій. *Географічна* система координат використовує широту і довготу *сферичної* моделі земної поверхні. У географічній системі Земля представлена кулею, радіус якої дорівнює $R_3=6371110\text{ м}$.

У *геодезичній* СК поверхня Землі апроксимується *еліпсоїдом* Красовського (геоїдом). Системи координат *проекцій* перетворюють значення широти і довготи, що описують положення на земній поверхні, в значення координат на площині.

Розглянемо СК, які найбільш часто використовуються при описанні руху КА. Такими СК є:

інерціальна геоцентрична прямокутна екваторіальна СК (часто називають просто інерціальною СК);

гринвіцька геоцентрична прямокутна екваторіальна СК;

геоцентрична сферична СК;

топоцентрична пунктова прямокутна СК;

топоцентрична пунктова сферична система координат.

Інерціальна геоцентрична прямокутна екваторіальна СК $Ox_iY_iZ_i$ представлена на рис.3.1. Її початок знаходиться в центрі Землі. Опорна площина - площина екватора Землі. Осі X_i і Y_i лежать в опорній площині, причому вісь X_i спрямована в точку весняного рівнодення (ТВР). Вісь Z_i - направлена вздовж осі обертання Землі в сторону Північного полюсу. Вісь Y_i доповнює систему до правої. Положення об'єкта, що рухається, в даній СК задається поточними значеннями його координат X_i , Y_i , Z_i і значеннями проекцій вектору лінійної швидкості V_{x_i} , V_{y_i} , V_{z_i} на координатні осі. Положення осей цієї СК практично не залежить від часу. Тому вона називається абсолютною або інерціальною.

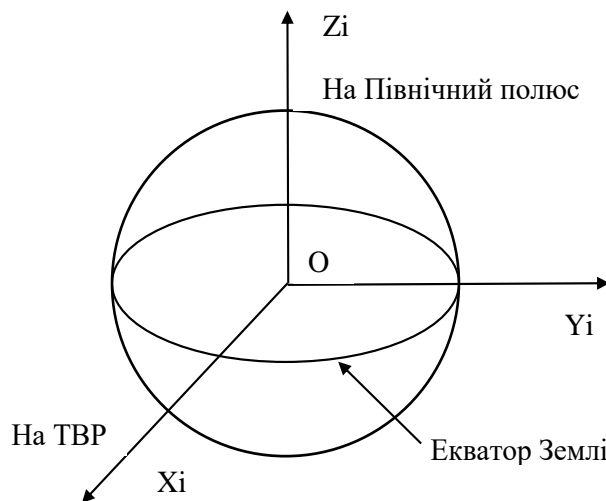


Рис.3.1 – Інерціальна геоцентрична прямокутна екваторіальна СК

Гринвіцька геоцентрична прямокутна екваторіальна СК $Ox_{г}Y_{г}Z_{г}$ обертається разом із Землею. Початок СК і опорна площина – такі, як і в інерціальній СК, а осі збігаються з однойменними осями цієї СК 1 раз на добу, коли Гринвіцький меридіан, з яким зв'язана вісь $X_{г}$, перетинає вісь X інерціальної СК –рис.3.2.

Геоцентрична сферична СК rBL також обертається разом із Землею. Положення КА в ній задається відстанню r від центру Землі до центру мас КА, географічною довготою L та широтою B проекції КА на поверхню Землі (рис.3.3).

Топоцентрична прямокутна пунктова СК позначається $Px_{т}Y_{т}Z_{т}$ та показана на рис.3.4. Її початок знаходиться в точці П стояння спостережного пункту на поверхні Землі. Координати точки П визначаються географічною довготою та широтою. Опорна площина - площина місцевого горизонту, тобто

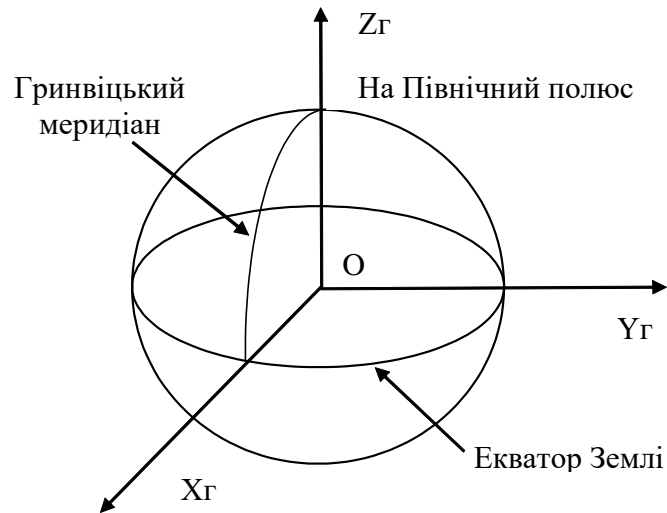


Рис.3.2 – Геоцентрична гринвіцька прямокутна екваторіальна СК

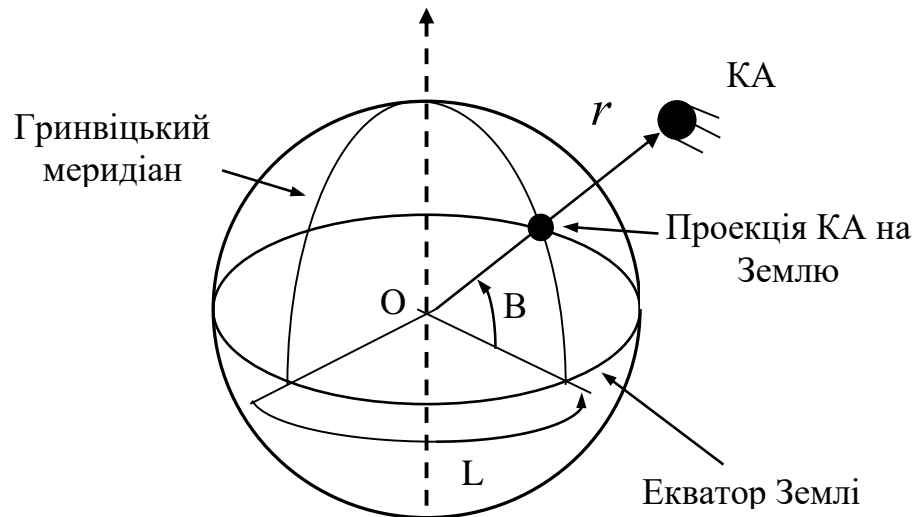


Рис.3.3 – Геоцентрична сферична СК

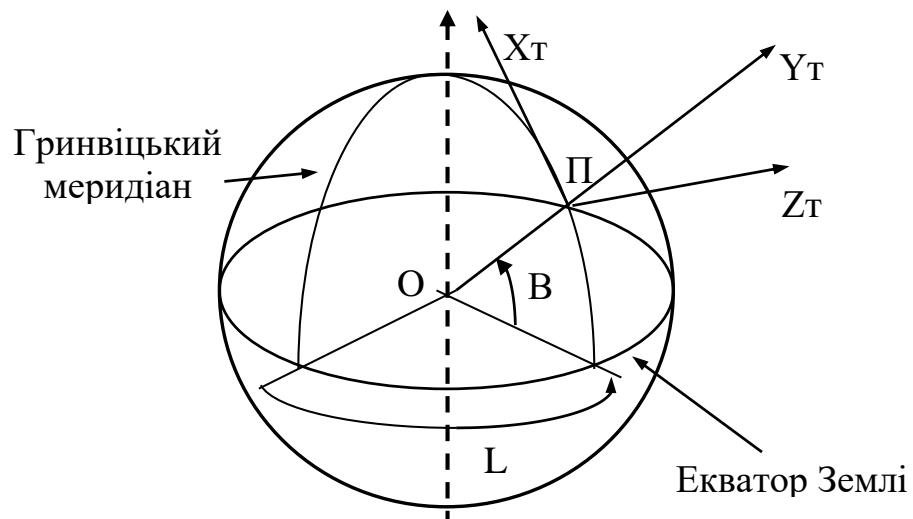


Рис.3.4 – Топоцентрична прямокутна пунктова СК

площина, яка дотична до поверхні Землі у точці П. Вісь X_T спрямована по дотичній до меридіану спостережного пункту у бік Північного полюса Землі, вісь Y_T - уздовж радіуса-вектора з центра Землі у точку П, вісь Z_T доповнює систему до правої. Положення об'єкта, що рухається, у даній СК задається поточними значеннями його координат X_T , Y_T , Z_T і значеннями проєкцій вектору лінійної швидкості V_{X_T} , V_{Y_T} , V_{Z_T} на координатні осі.

Топоцентрична пунктова сферична СК $P_{\alpha\beta D}$ показана на рис.3.5.

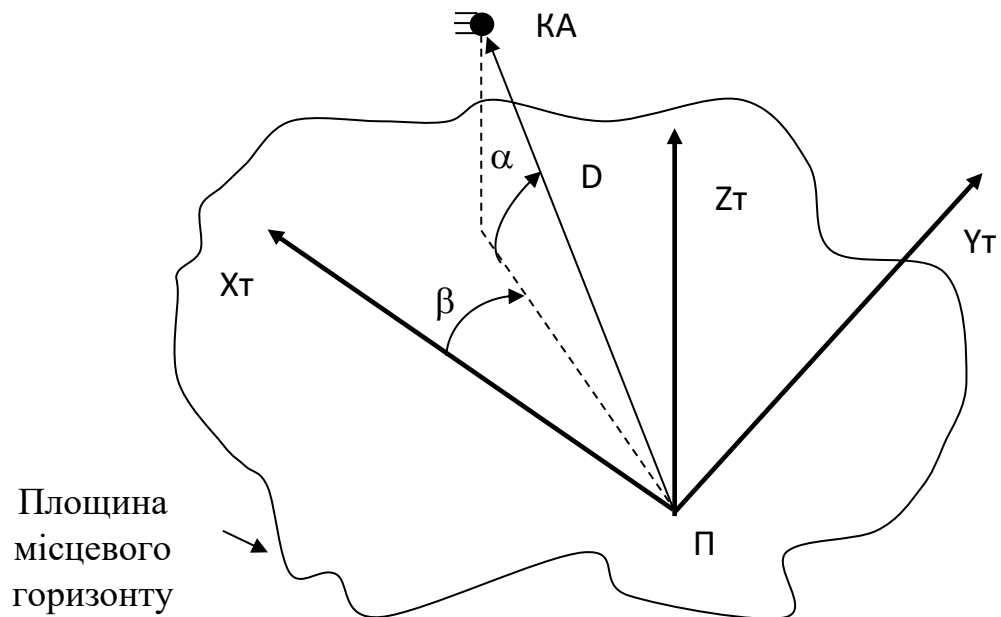


Рис.3.5 – Топоцентрична пунктова сферична СК

Початок СК знаходиться в точці П стояння спостережного пункту. Опорна площина - площина місцевого горизонту. Положення об'єкта, що рухається у цій СК, задається кутом місця α , азимутом β і похилою дальністю D .

Кутом місця називається плоский кут, який відраховується від проєкції похилої дальності на площину місцевого горизонту до напрямку на об'єкт спостереження. Кут місця змінюється в межах $0^\circ \div 90^\circ$.

Азимутом називається плоский кут, який лежить в площині місцевого горизонту та відраховується від напрямку на Північ до напрямку на проєкцію похилої дальності на площину місцевого горизонту по ходу годинникової стрілки. В багатьох випадках обраним орієнтиром являється напрямок на Північ. Значення азимута лежать в межах $0^\circ \div 360^\circ$.

Похила дальність - це найкоротша відстань від спостережного пункту до об'єкта. Для опису динаміки руху об'єкта в топоцентричній пунктовій сферичній СК часто використовуються перші похідні від кута місця, азимута та похилої дальності - α , β , D .

3.2. Картографічні проєкції

Картографічна проєкція – це математичний спосіб зображення земної кулі на площині поверхні при складанні карт. Це будь-які системи координат,

розроблені для пласкої поверхні, чи то паперова карта або комп'ютерний монітор. Спроекована система координат є похідною від географічної системи координат, заснованої на сфері або сфероїді. Сферичні поверхні не розгортаються на площині без складок і розривів, тому на картах неминучі *спотворення довжин, кутів і площ*. Лише в деяких проекціях зберігається рівність кутів, але через це значно спотворюються довжини і площі або зберігається рівність площ, але значно спотворюються кути і довжини [1,6].

У декартової 2D-системи координат (рис.3.6) дві осі: одна горизонтальна (x), що являє напрям зі сходу на захід, і одна вертикальна (y), що являє напрям з півночі на південь. Місцезнаходження географічних об'єктів описуються відносно початку координат, за допомогою системи позначень (x,y), де x позначає відстань уздовж горизонтальної осі, а y – уздовж вертикальної. Початкова точка описується як (0,0). Координати проекції можуть бути як двомірними (x,y), так і тривимірними (x,y,z), де вимірювання x і y представляють місце на земній поверхні, а z – висоту щодо середнього рівня моря (3D система координат). Одиниці вимірювання постійні і мають рівні інтервали у всьому діапазоні x і y. Знак координати x узгоджений із зміною довготи, яка змінюється від “-180°” при русі на захід від нульового меридіана і до “+180°”- при русі на схід. А координата y узгоджена із зміною знаку широти, яка змінюється в межах: “+90° ” – при русі на Північ, ”-90° ” – на Південь.

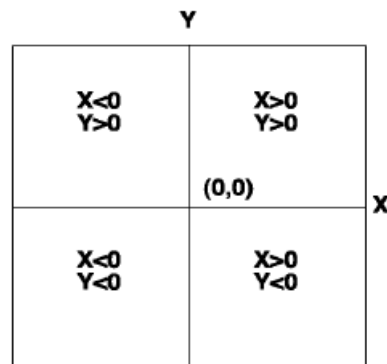


Рис.3.6 – Топоцентрична пунктова сферична СК

За способом нанесення ліній сітки на поверхню сфероїда розрізняють такі види проекцій.

Рівноплощадні або **рівновеликі** проекції зберігають *площі*. Внаслідок цього інші властивості: форма, кути, масштаб спотворюються. В деяких випадках, особливо на картах невеликих територій, спотворення форм не є очевидним і дуже важко відрізнити рівнокутну проекцію від рівновеликої. Багато тематичних карт використовують рівновеликі проекції. Проекція зазвичай використовуються для карт світу.

Проекції з рівними проміжками зберігають *відстані*. Правильний масштаб не зберігається ніякою проекцією на всій карті; проте можна зберегти відстані від однієї точки (або декількох точок) до всіх точок, або уздовж всіх меридіанів або всіх паралелей. При пошуку на карті об'єктів, що знаходяться в

межах заданої відстані від інших об'єктів, використовують проекції з рівними проміжками.

Рівнокутні проекції зберігають без спотворень малі локальні форми. Для збереження окремих кутів, що описують просторові відносини, рівнокутна проекція повинна також представляти лінії картографічної сітки, що перетинаються під кутом 90° на карті. Недолік полягає в тому, що площа, обмежена рядом кривих, у процесі перетворення значно спотворюється. Рівнокутні проекції використовуються в навігаційних картах і картах погоди.

Азимутальні проекції або проекції істинного напрямку зберігають напрям від однієї точки до всіх інших точок. Ця властивість може поєднуватися із збереженням площ, кутів або відстаней як, наприклад, в азимутальній рівновеликій проекції Ламберта.

Ці проекції використовуються для збереження деяких кривих, що описують великі кола, і додають правильні азимутальні напрями всім точкам на карті щодо центру. Усі проекції є тільки апроксимацією зображення поверхні Землі і об'єктів на ній, тому вони видозмінюються залежно від вирішуваних завдань. Кожна картографічна проекція розробляється для конкретної мети і по-різному спотворює дані.

З метою інтеграції України в світову та європейську економічні системи, запровадження сучасних систем навігації транспортних засобів, участі в міжнародних наукових дослідженнях глобальних екологічних і геодинамічних процесів, вивчення фігури Землі та картографування території України з використанням *супутникових технологій* Кабінет Міністрів України постановою № 2359 від 22 грудня 1999 р. запровадив для використання на території України Світову геодезичну систему координат WGS-84. Світова географічна система координат WGS-84 є геоцентричною, правосторонньою, ортогональною, початок якої суміщений з центром мас Землі. Окрім географічної існує також заснована на тому ж еліпсоїді проєктивна навігаційна система координат UTM (універсальна поперечно-циліндрова Меркатора), звана також проекцією Гауса – Боага.

Прилади навігаційної системи GPS можуть видавати координати як у вигляді географічних координат в різних форматах (градуси з частками, градуси і хвилини з частками, градуси, хвилини і секунди), так і у вигляді прямокутних координат Y і X у метрах. У будь-якому випадку вимагається виконувати перетворення цих координат у проекцію системи координат ГІС- проекту так, щоб виміряні координати показували істинне розміщення об'єктів, що картографуються [8].

3.3. Параметри орбіт носіїв знімальної апаратури

Параметри орбіт носіїв знімальної апаратури важливо знати через те, що вони залишаються майже (для певного періоду часу) незмінними, на відміну від авіаносіїв, які можуть у будь-який час змінювати свій маршрут. Деякі параметри орбіти публікуються вже під час запуску супутників і за поданими параметрами орбіти можна визначити можливості використання цього КА, зокрема, види матеріалів ДЗЗ, якщо він укомплектований певною знімальною апаратурою.

Супутник, який вже літає на орбіті, в першому приближенні можна вважати аналогічним тілу, що рухається за інерцією, на яке діє відцентрова сила, набута під час виведення його на орбіту ракетними двигунами, та гравітаційна сила Землі, а тому без додаткового включення коректувальних ракетних двигунів супутник не може змінити свою орбіту вгору чи вбік від завданого напрямку, але може піддаватися притяганню Землі і повільно знижувати свою орбіту. У разі досягнення небажаних параметрів зниження з метою продовження терміну роботи супутника його потрібно перевести на розрахункову чи вищу орбіту, якщо такі технічні можливості в ньому конструктивно закладені. Параметри орбіти залежать від параметрів пускового комплексу, конструкції ракети, точності (стосовно розрахунків) роботи її двигунів, роботи коректувальних двигунів, погодної ситуації в місці старту, стану атмосфери та багатьох інших чинників. Виведення супутника на орбіту виконують ракети належної потужності, якої вистарчає на здійснення старту (відриву від Землі), виконання розгону і набуття космічної швидкості, досягнення заданої висоти, нахилу, “вписування” та “лягання” в розрахункову орбіту. Корекційні двигуни виконують стабілізацію орієнтації супутника стосовно Землі. Електродвигуни забезпечують розкриття антен зв’язку, панелей сонячного електроживлення, підключення і тестування бортової апаратури і після цього – запуск робочої програми. Використання супутників для ДЗЗ передбачає знання закономірностей його руху. Шлях, який описує в просторі супутник, називаємо траєкторією. Рух супутника по навколосемній орбіті також складний: на нього діє сила тяжіння Землі, сили тяжіння інших космічних тіл (передусім Місяця, Сонця, Венери, Марса), магнітне поле Землі, тиск Сонячного вітру, а також опір атмосфери (хоч і дуже розрідженої), яка при космічних швидкостях польоту має гальмуючий вплив.

Для вирішення практичних завдань, пов’язаних з використанням штучних супутників Землі (ШСЗ), потрібно знати розташування супутника в просторі у будь-який момент часу. Цим піклуються центр планування польотів і центр управління польотом. Однак такі параметри, як площа, форма, нахил, зсув, висота орбіти, її апогей і перигей, період обертання супутника, дата і час, висота апарата в момент знімання тощо необхідні і для користувачів матеріалами ДЗЗ.

Площиною орбіти супутника Землі вважають таку уявну площину, яка є дотичною до всіх пунктів орбіти і перетинає Землю в її центрі. Для визначення елементів орбіти користуються поняттям небесної сфери, осі світу, небесного екватора та проекції орбіти на поверхню небесної сфери (рис. 3.7). Для оцінки кута нахилу площини орбіти використовують розмір кута i між площиною орбіти і площиною небесного екватора. Апогей (найдалший пункт орбіти) та перигей (найближчий пункт орбіти) визначають стосовно поверхні Землі, а в разі потреби – від центра Землі.

Орбіти ШСЗ за формою діляться на кругові та еліптичні. У кругових орбіт всі пункти орбіти рівновіддалені від Землі (в розрахунках від її центра – центра гравітаційного поля Землі) супутник має однакову кругову лінійну швидкість. Ці орбіти є найсприятливішими для географічних завдань, бо знімки з такого типу орбіт мають однаковий масштаб зображення земної поверхні і придатні для

порівняльних вимірювань. Зазначимо, що на низьких кругових орбітах супутники довго існувати не можуть. Мінімальна висота, на якій супутник на круговій орбіті може здійснити хоча б один обліт навколо Землі, дорівнює близько 160 км. Однак, під час теоретичних розрахунків за стандартну орбіту приймають орбіту з висотою 200 км, на якій кругова лінійна швидкість дорівнює 7,79 км/с [4,7].

Еліптичні орбіти мають добре виражені пункти перигею та апогею, тобто змінну висоту над поверхнею Землі, також змінну швидкість руху по орбіті, змінну лінійну та кутову швидкість і, що найважливіше – змінну тривалість перебування над певною стороною Землі. Ці орбіти менш придатні для просторових географічних досліджень, але вигідніші для радіозв'язку із Землею, забезпечення “радіо-“ і “телемостів”. Під час руху супутника по еліптичній орбіті його швидкість змінюється періодично: наростає з наближенням до Землі до пункту перигею і зменшується з віддаленням від Землі до пункту апогею.

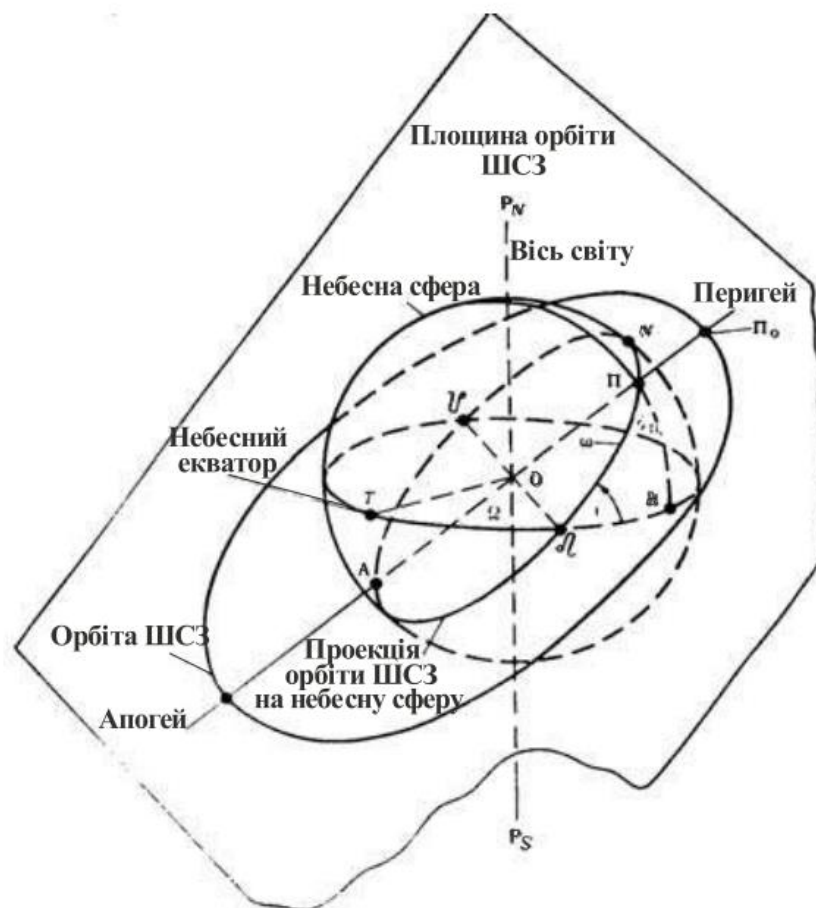


Рис. 3.7 – Елементи орбіти супутника з проекцією на небесну сферу

Період обертання супутника по орбіті обчислюють за часом, необхідним для завершення оберту в певному просторовому пункті – наприклад, під час проходження перигею. Такий період обертання називають *сидеричним*. Цей період не є постійним, бо залежить від параметрів орбіти, особливо від висоти перигею.

Час, протягом якого супутник літає на орбіті (до його руйнування в атмосфері), називають часом його існування. Час існування супутника залежить

також від його маси, розмірів, форми, початкової висоти орбіти та збурюючого впливу притягання Місяця та Сонця, інших чинників. Зміни часу існування супутника залежать від параметрів орбіти. При початковій висоті перигею 230 км і висоті апогею орбіти 700 км час існування супутника становитиме лише 50 діб. Збільшення висоти апогею до 1 000 км приведе до збільшення тривалості існування супутника в два рази. Приблизно таке саме збільшення часу існування супутника зумовить підвищення перигею всього на 30 км. Для кругових орбіт збільшення висоти орбіти з 300 до 400 км спричинює збільшення часу існування супутника у 8 разів. У разі збільшення висоти орбіти до кількох тисяч кілометрів, де атмосфера вже втрачає свій гальмівний вплив, час існування супутника майже необмежений – він стає постійним супутником Землі. За потреби збільшити час існування супутників на низьких орбітах мусить бути передбачена система двигунів повторного розгону і переведення його на вихідну вищу орбіту. Параметри орбіт можуть бути найрізноманітнішими, однак їх об'єднують у характерні типи за кількома ознаками. Залежно від кута нахилу орбіти стосовно площини екватора Землі виокремлюють екваторіальні, полярні та нахилені орбіти.

Екваторіальні орбіти вважають такими, коли супутники перебувають в площині екватора, або близько неї (субекваторіальні орбіти) (рис. 3.8). Така орбіта обмежує використання супутника для ДЗЗ приекваторіальним поясом, особливо, якщо вона низька і кругова.

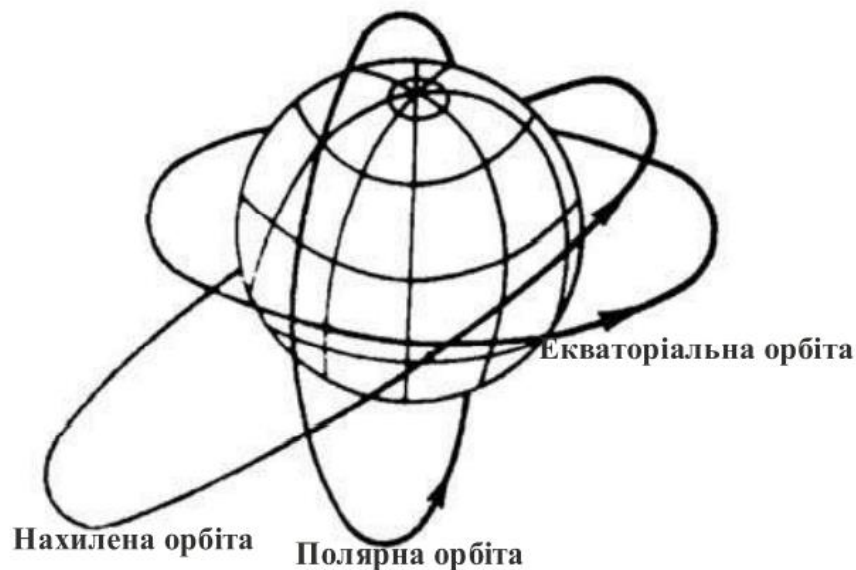


Рис. 3.8 – Орбіти ШСЗ

Проте цей тип орбіти є важливим для надійного телевізійного зв'язку, якщо його висота досягає 35810 км. За цієї умови період обертання супутника навколо Землі дорівнюватиме періоду обертання Землі навколо осі, тобто зрівняються кутові швидкості супутника і пункту на поверхні Землі, якщо напрямки їхнього обертання збігаються. Супутники на таких орбітах називають геостаціонарними, бо вони ніби постійно “висять” над певним пунктом Землі. Зазначимо, що саме з цих орбіт супутники забезпечують трансляції “супутникового телебачення”.

Кілька таких супутників, що рухаються один за одним з певним рівномірним інтервалом, можуть забезпечити цілодобове транслявання програм на майже всю земну кулю. Однак навіть з висоти геостаціонарної орбіти прямого їхнього бачення (умова стабільного прийняття сигналу) з полярних областей нема.

Полярними орбітами називають такі, коли супутники літають вздовж небесних (неземних географічних) меридіанів, тобто кут площини орбіти до площини екватора дорівнює 90° (див. рис. 3.6) або є близьким до цього (субполярні орбіти). Літаючи по такій орбіті як інерційне тіло, супутник зберігає свою площину обертання, але Земля в цьому “обручі” орбіти продовжує свої добові обертання навколо осі. Отже, при кожному новому оберті відбуватиметься зміщення проекції підсупутникової траси на Землю до заходу (Земля крутиться із заходу на схід). Потрібна доба, щоб супутник міг появитися над всіма регіонами планети. Залежно від висоти орбіти супутник з полярної орбіти може виконувати ДЗ поверхні Землі від полюса до полюса. За цих орбіт важливою є кратність кількості обертів навколо Землі до кількості її обертів навколо осі. Якщо супутник здійснює за один оберт Землі навколо осі скінченне число обертів, то такий супутник на наступну добу літатиме вздовж тих самих трас, що й у попередню добу. У цих випадках супутник і його орбіту називають **геліосинхронними**, тобто синхронними з сонячним часом (**сонячно-синхронна**), за яким живе Земля. По суті це означає, що коли супутник сьогодні з’явився на довготі Львова о 15 год, то і завтра він буде на цій довготі в той самий час. Ця умова дуже важлива для дослідження наземних об’єктів за однакових умов освітлення і протікання ритмічних процесів, що мають явно виражений добовий геліосинхронний режим. Однак з цієї орбіти, якщо вона низька, неможливо виконати знімання всієї поверхні планети (крім стабільних підсупутникових трас) [4-7].

За умови, що за один оберт Землі навколо своєї осі супутник на полярній орбіті здійснює неповне число обертів, то простежуватиметься зсув проекції підсупутникової траси – так званий міжобертний зсув, а на наступні доби – міждобові зсуви орбіти. Такий супутник з’являється над певними пунктами Землі завжди в інший час. Він може виконати (за певний період часу) знімання всієї поверхні Землі без смугових пропусків, але із часовим зміщенням на кілька діб.

Всі орбіти, які мають кути нахилу площин орбіт більші від субекваторіальних і менші від субполярних, належать до групи **орбіт нахилених**. Під час запуску супутників на такі орбіти завжди зазначають кут нахилу її площини. Від цього залежить можливість ДЗЗ у межах певних географічних широт, особливо, якщо це орбіти низькі. Зокрема, якщо супутник запущений на низьку орбіту з нахилом 60° до площини екватора, то він може виконувати знімання від близько 60° північної широти до 60° південної широти. На такі орбіти запускають супутники ті держави, які не мають “інтересу” за межами широт своєї країни.

Крім зазначених основних типів орбіт, **неполярні** орбіти можна кваліфікувати як **прямі і зворотні**. Прямими називають орбіти, по яких

супутники рухаються в напрямку обертання Землі навколо осі, тобто із заходу на схід. На зворотних орбітах супутники рухаються назустріч обертанню Землі. У них, відповідно, відбувається більший між обертовий зсув проекції орбіти на поверхню Землі.

За висотою орбіти поділяють на три групи: низькі, середні і високі. До перших належать орбіти з висотами до 500 км. На цих орбітах літають ШСЗ короткої “життєдіяльності” – космічні пілотовані кораблі, деякі супутники, що проводять високоточні знімання (наприклад, для складання топографічних карт і планів). До середньовисотних орбіт належать ті, що своїми апогеями і перигеями вкладаються в інтервал висот від 500 км до 2000 км. На цих висотах літають супутники метеорологічного, геодезичного, астрономічного призначення та ін. До третьої групи належать орбіти і їхні супутники із значною висотою орбіти – до 36 000 і більше кілометрів. Це супутники зв’язку (радіо і телевізійні), метеорологічні, моніторингові, дослідження космічного простору, тощо.

Sentinel-2 — космічна місія дистанційного зондування Землі, запущена Європейським космічним агентством (ESA) у рамках програми «Коперник» для здійснення дистанційного спостереження і підтримки таких сервісів, як моніторинг лісів, фіксування змін покриву Землі, відстеженням наслідків стихійних лих. Для забезпечення частотої відвідуваності і високої доступності в місії заплановано два ідентичні супутники Sentinel-2 (Sentinel-2A - 2015 р. і Sentinel-2B – 2017 р.), що працюють одночасно. Орбіта є сонячно-синхронною (апогей-780,84 км, перигей - 778,25 км, нахил - 98.5613° , період обертання - 100,45хв) 14,3 обертань на день, із низхідним вузлом орбіти 10:30 ранку. Цей місцевий час було обрано як компроміс мінімізуючи покриття хмарами і забезпечуючи достатнє освітлення Сонцем. Цей час близький до місцевого часу, використаним в Landsat (10:00) і відповідає супутникам SPOT, що дозволяє поєднувати дані Sentinel-2 із історичними знімками аби будувати довготривалі часові послідовності. Час активної експлуатації 7 років [1].

Sentinel-2 отримує мультиспектральні дані в 13 діапазонах спектра: видимому, близькому інфрачервоному і інфрачервоному короткохвильовому та забезпечує систематичне покриття поверхні Землі від 56° S до 84° N, прибережних вод, і всього Середземного моря. Проходить ті самі зони кожні 5 днів під однаковими кутами зору. Над високими широтами, проходи Sentinel-2 перекриваються, а деякі регіони будуть спостерігатися двічі або більше разів кожні 5 днів, але під різними кутами огляду. Роздільна здатність в 10 м, 20 м і 60м, 290 км поле зору.

Супутник **LandSat-7**, що перебуває на сонячно-синхронній орбіті може перетинати екватор п'ятнадцять разів на день, кожного разу о 10:00 місцевого часу. Для досягнення подібних характеристик параметри орбіти вибираються таким чином, щоб орбіта прецесувала в східному напрямку на 360 градусів за рік (приблизно на 1 градус на день), компенсуючи обертання Землі навколо Сонця. Прецесія відбувається за рахунок взаємодії супутника з некулястою Землею. Швидкість прецесії залежить від радіусу та нахилу орбіти. Потрібної швидкості прецесії можна досягти лише для певного діапазону висоти орбіт (як правило,

обираються значення 600—800 км, з періодами 96—100 хв.), необхідний нахил для згаданого діапазону висот становить близько 98°. Для орбіт із більшими висотами потрібні досить великі значення нахилу, через що в зону відвідувань супутника перестають потрапляти полярні райони [5].

Кінець XX – початок XXI ст. характеризується бурхливим розвитком носіїв космічної апаратури для отримання даних високого розрізнення – метри і сантиметри на місцевості. Перший з таких супутників, *Ikonos-2* (США), виведено на орбіту, висота якої 681 км, 24 вересня 1999 року. Замовникам пропонуються стандартні зображення розміром 11×11 км.

5 грудня 2000 р. був виведений ізраїльський супутник *EROS-A1*, який став другим супутником, що збирає інформацію про земну кулю з високою роздільною здатністю. Його запущено на сонячно-синхронну субполярну орбіту, висота якої 480 км. 250-кілограмовий супутник є найлегшим у світі супутником такого класу. На ньому розташовано сенсори, які виконують знімання поверхні Землі з розрізненням 1,8 м у панхроматичному режимі.

Менше ніж за рік американська корпорація Digital Globe успішно реалізувала проект запуску супутника з сенсорами субметрового розрізнення. Це поклало початок новій ері отримання космічних зображень з розрізненням, що становить десятки сантиметрів на місцевості. Такий супутник, *QuickBird* (США) виведено на орбіту, висота якої 450 км, 18 жовтня 2001 року. Високоякісна оптична система, унікальний блок приймачів, бортовий запам'ятовувальний пристрій великої ємкості і надзвичайна маневреність дають цьому супутникові змогу одержувати знімки з просторовим розрізненням 61 см.

WorldView-1, новітній супутник компанії DigitalGlobe забезпечує панхроматичне космічне знімання розрізненням 0,51 м в смузі поперечного захоплення 50 км. Функціонуючи на висоті 450 км, *WorldView-1* забезпечує період повторного спостереження 1,7 доби та огляд 750 000 км² на добу. Супутник також обладнано прецизійною апаратурою геолокації з можливостями стереознімання. Космічний апарат *WorldView-2* запущено 8 жовтня 2009 року. Космічний апарат *WorldView-2* розробляли паралельно зі створенням супутника *WorldView-1*. Головною особливістю цього апарату є наявність восьми каналного спектрометра високої роздільної здатності. Супутник *WorldView-2* виведено на сонячно-синхронну орбіту висотою 770 км, що забезпечує його проходження над будь-яким районом Землі кожні 1–2 дні (залежно від широти). Космічний апарат на момент створення цього каталогу є найкращим у світі за такими показниками, як ціна, геометрія, роздільна здатність (панхроматичний режим -0,46м, мультиспектральний – 1,46 м), якість зображення та легкість обробки.

GeoEye-1 був запущений у вересні 2008 року. Супутник обертається на полярній сонячно-синхронній орбіті висотою 684 км, забезпечує повторний огляд території через 1–3 дні (залежно від широти). Власником супутника є американська корпорація GeoEye Inc. Супутник призначений для отримання цифрових зображень земної поверхні з просторовим розрізненням 41 см в панхроматичному режимі та 1,65 м в мультиспектральному режимі. *GeoEye-1*

підтримує режим стереознімання, за допомогою якого можна побудувати цифрову модель рельєфу з точністю 1 м в плані та 3 м по висоті [6].

Україна належить до держав, в яких розвиток космічних досліджень і застосування їх на практиці займає одне з пріоритетних місць. Перший штучний супутник Землі *Січ-1* був виведений на орбіту (висота 659 км) у серпні 1995 року для проведення експериментів з дослідження іоносфери і магнітосфери. 24 грудня 2004 року були запуснені на орбіту ще 2 супутники: *Січ-1М* масою 2223 кг зі знімальною апаратурою з розрізненням 23 м для досліджень атмосфери, іоносфери і Світового океану, і малогабаритний супутник «Мікрон» масою 66 кг, який був оснащений магнітометром і малогабаритною бортовою телевізійною камерою з розрізненням 170 м. Супутники були розроблені у ДКБ «Південне» ім. М.К. Янгеля і виготовлені на ДП «Південний машинобудівний завод» [4].

У серпні 2011 р. був виведений на навколосезну орбіту супутник *Січ-2*, який давав змогу отримувати цифрові зображення Землі у панхроматичному і багатоспектральному діапазонах з розрізненням 8 м. Ці космічні зображення використовувались для різноманітних цілей у сільському та лісовому господарствах, для здійснення екологічного моніторингу, моніторингу надзвичайних ситуацій, розвідуванні корисних копалин, для виконання інфраструктурних проектів та інших цілей. У грудні 2012 р. зв'язок із супутником перервався. У січні 2022 р. був виведений на орбіту супутник оптико-електронного спостереження *Січ-2-30* (маса – 180 кг, висота польоту – 663-682 км, розділення багатоспектральних знімків – 7,8 м, смуга захоплення на місцевості – 46,6 км).

В даний час вченими ДКБ «Південне» ведуться цілий ряд наукових розробок, зокрема, супутник МС-2-8 з оптико-електронними приладами високого розрізнення і *Січ-3-0* (маса – 820 кг, висота польоту – 667 км, нахил орбіти – $98,0^\circ$, розділення в оптичному діапазоні – 1 м, ширина смуги огляду – 10,4 км, мультиспектральний режим), супутник радіолокаційного спостереження «*Січ-3-Р*» (маса - 650 кг, висота польоту - 626 км, нахил орбіти - $97,9^\circ$, оснащений радіолокатором з синтезованою апертурою антени з розрізненням 2x2 м у режимі смугової та кадрової зйомки, та 20x20 м у режимі оглядової зйомки) [1].

Контрольні питання

1. Дайте коротку характеристику системам координат, що використовуються у ГІС.
2. Які існують види картографічних проєкцій?
3. Що таке кут нахилення орбіти?
4. Які види орбіт використовують при ДЗЗ?
5. Який вид орбіти має ШСЗ Sentinel-2 і у чому її особливість?
6. Яка роздільна здатність та смуга захоплення сканера мікросупутника ДЗЗ «Січ-2-30» в оптичному діапазоні?

4. Моделі даних та програмне забезпечення ГІС

Для того щоб нанести інформацію на карту, вона має бути географічно прив'язаною (містити інформацію про довготу та широту розміщення об'єкта). Об'єкти, з яких складаються ГІС-проекти, організовано в шари. Наприклад, контури континентів та островів – це один шар, політико-адміністративний поділ – це другий, дороги – третій, споруди – четвертий і т. д. Картографічний шар є представленням просторових об'єктів однієї тематики на карті (річки, озера, населені пункти, шляхи сполучення). Тобто кожен шар має набір просторових об'єктів за певною темою й одним типом геометрії. При візуалізації кожний файл даних подається як окремий шар. Це схоже на торт, який складається з декількох коржів, де кожен корж несе інформацію про свій шар, а при їх накладанні утворюється карта. Таке представлення даних на карті дає змогу користувачу легко і гнучко відобразити ті тематичні шари, які потрібні в певний момент часу, налаштувати умовні позначення, підписи та видимість для кожного шару окремо тощо [1,2].

Векторні дані. За типом геометрії об'єктів розрізняють точкові (Point), лінійні (Polyline) і полігональні (Polygon) шари. Векторна модель даних заснована на координатах і представляє географічні об'єкти у вигляді крапок, ліній і полігонів (рис.4.1).

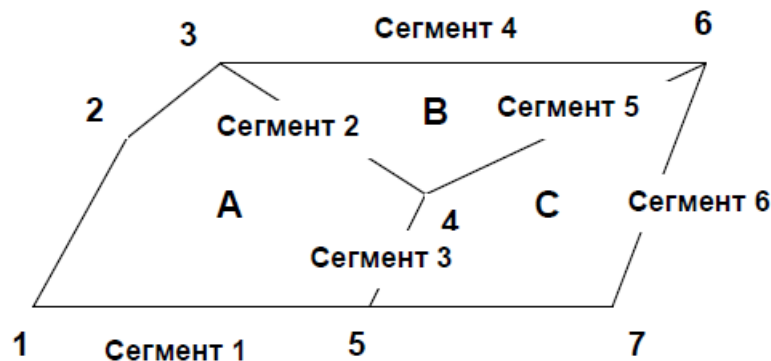


Рис.4.1 – Приклад використання векторної моделі для опису об'єктів

Кожний точковий об'єкт представляється однією парою координат (рис.4.2), а лінійні і полігональні об'єкти представляються впорядкованим списком вершин. З кожним просторовим об'єктом асоційовані атрибути (рис.4.3). Векторні моделі використовують для представлення дискретних об'єктів, таких як міста, будівлі, шляхи сполучень, водні об'єкти тощо. Векторна модель подання просторових даних ґрунтується на використанні набору елементарних графічних об'єктів .

Першим графічним елементом є *точка* – первинний графічний елемент з координатами (x, y) . *Другим* графічним елементом є *лінія* – відрізок прямої, що з'єднує дві точки з координатами (x_1, y_1) та (x_2, y_2) . *Дуга* або *сегмент* – послідовність ліній, що починається і закінчується вузловими точками. "*Вузлова точка*" – точка перетину трьох або більше ліній. *Третім* графічним елементом є *полігон* – замкнута послідовність ліній, яка відокремлює частину поверхні.

Координати опорних точок

Номери точок	Координата X	Координата Y
1	x_1	y_1
2	x_2	y_2
3	x_3	y_3
4	x_4	y_4
5	x_5	y_5
6	x_6	y_6
7	x_7	y_7

Рис.4.2 – Інформація про координати точок на карті

Таблиця сегментів

Номер сегмента	Початкова вузлова точка	Кінцева вузлова точка	Довжина, м
1	5	3	2 546
2	3	4	1 140
3	4	5	644
4	3	6	1 652
5	6	4	1 151
6	6	5	1 245

Таблиця полігонів

Полігон (ділянка)	Сегменти	Власник	Площа, га	Кадастровий номер
A	1,2,3	Новохатка І. С.	154,3	T-148442
B	2,4,5	Петренко С. П.	108,7	T-148443
C	3,5,6	Іваненко О. І.	210,8	T-446128

Рис.4.3 – Атрибутивна інформація про об'єкти.

Сукупність цих графічних об'єктів достатня для опису форми як лінійних, так і просторових картографічних об'єктів. У базі даних в цьому випадку зберігається інформація про координати точок на карті. У таблицях зберігається атрибутивна інформація про ці об'єкти.

Головні переваги векторного подання даних є компактність збереження (часто в десятки разів вища, ніж при растровому), висока точність позиціонування точкових об'єктів і зображення ліній.

Недоліки векторного подання даних – це складна система опису топологічної структури, унаслідок чого їх обробка вимагає виконання складних геометричних алгоритмів визначення положення вузлових точок, стискування сегментів (дуг), замикання полігонів.

Відомою **векторною полігональною** структурою є трикутна або триангуляційна нерегулярна мережа (Triangulated Irregular Network) або TIN-модель. Набори TIN-моделі використовуються для відображення і аналізу

поверхонь. Вони складаються з нерегулярно розташованих крапок з координатами (x, y) , які мають висотну позначку (значеннями координати z).

Модель будується шляхом об'єднання відомих точкових значень у серії трикутників та використовується для представлення поверхні у вигляді сукупності тривимірних (3D) трикутних граней, що не перекриваються, що необхідно для побудови цифрових моделей рельєфу (рис.4.4). Основний принцип алгоритму полягає в тому, щоб з наявного набору точок з відомими висотними позначками (значеннями координати z) побудувати трикутники, які всі разом будуть максимально близькими до рівносторонніх фігур. База даних TIN-моделі містить три набори записів: список вузлових точок, список покажчиків, список трикутників (рис.4.5).

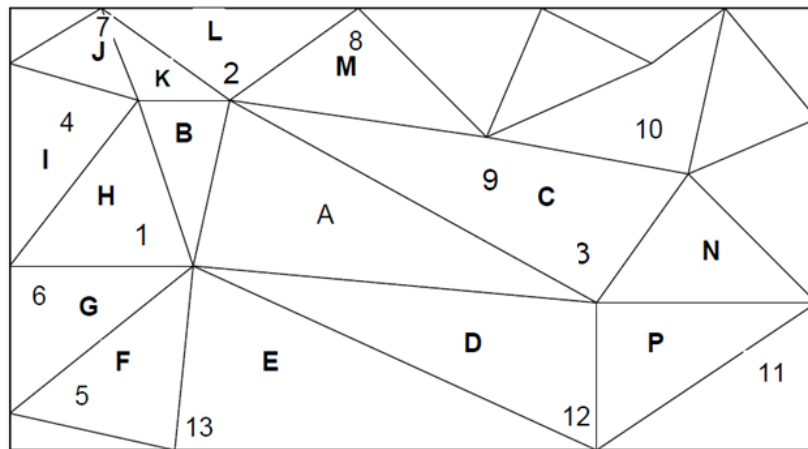


Рис.4.4 – Векторно - полігональна структура

Вузлові точки мережі

Номери вузлів	Координата X	Координата Y	Кількість сусідніх вузлів	Покажчики
1	x_1	y_1	7	2
2	x_2	y_2	6	8
3	x_3	y_3	5	10
...

Покажчики	Трикутники
Сусідні вузли	Трикутники
2	A
3	D
12	E
13	F
5	G
6	H
4	B
8	M
9	C
3	A
1	B
4	K
7	L
10	N
11	P
12	D
1	A
2	C

Рис.4.5 – База даних TIN-моделі

Показчики містять номери сусідніх вузлів та трикутників, що прилягають до відповідного вузла. Набори класів TIN використовуються як альтернатива растрам для представлення поверхонь.

Растрові дані. Растри – це набори даних, що складаються з пікселів (комірок), які мають безперервне покриття певної території на земній поверхні. Растрові дані зберігаються у вигляді наборів значень, тобто пікселів, які мають прямокутну форму, а також упорядковані у формі прямокутної сітки. У кожному пікселі зображення закодоване числове значення, яке виражає спектральну яскравість об'єкта, розташованого на земній поверхні в даній точці. Значення спектральної яскравості залежить від спектрального діапазону, який це зображення охоплює.

Растрова модель даних – це модель просторових даних, яка визначає простір як масив осередків однакового розміру, організованих у рядки і стовпці. Кожний осередок містить значення атрибута і координати місцезнаходження. Групи осередків з однаковим значенням представляють географічні об'єкти. Растри використовуються для представлення безперервних шарів: висот місцевості, схилів, рослинного покриву, кількості опадів, зон викидів і розливів забруднюючих речовин і т. д. Частіше за все у вигляді растрів зберігаються аерофотознімки і різні зображення. Растровий метод формалізації в найпростішому випадку полягає в зображенні просторових об'єктів у вигляді мозаїки, яка й називається растром. Кожен елемент растра називається чарункою (коміркою) растра або пікселем (від англійського pixel – picture element – елемент зображення). На рис. 4.6 наведено растрове представлення фрагмента поверхні Землі і його попіксельна апроксимація.

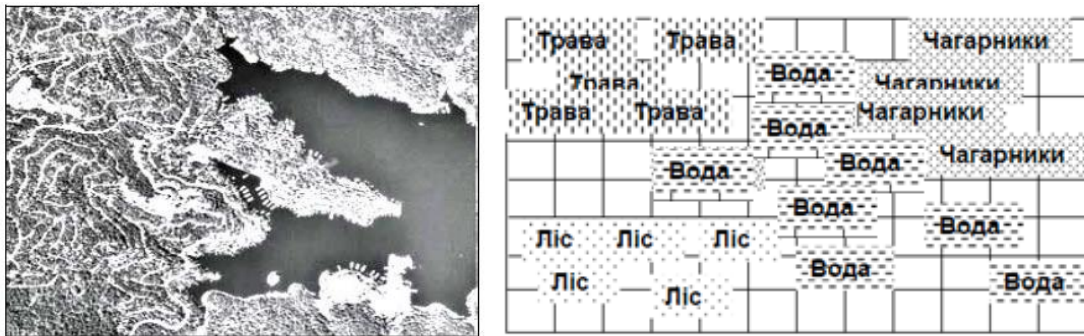


Рис. 4.6 – Растрове представлення фрагмента поверхні Землі

Відомі координати (x, y) як мінімум одного кута растра, чим визначено його положення в просторі. На рис. 4.7 подано схематичне зображення представлення растрової інформації про розміщення фрагмента поля, річки, лісу та відповідне подання масиву цифрових даних.

Окремий растр характеризується координатами, глибиною кольору (в кольорових растрах), градацією сірого кольору, чорного або білого кольору (рис.4.8). У растровій моделі інформація кодується у вигляді прямокутної матриці. За рядками і стовпцями її розмір відповідає розміру вихідного растра. Положення кожного елемента растра в просторі визначається номерами стовпця

і рядка, у яких розміщений елемент. Найчастіше використовують комірки квадратної форми, бувають комірки трикутної та шестикутної форми.

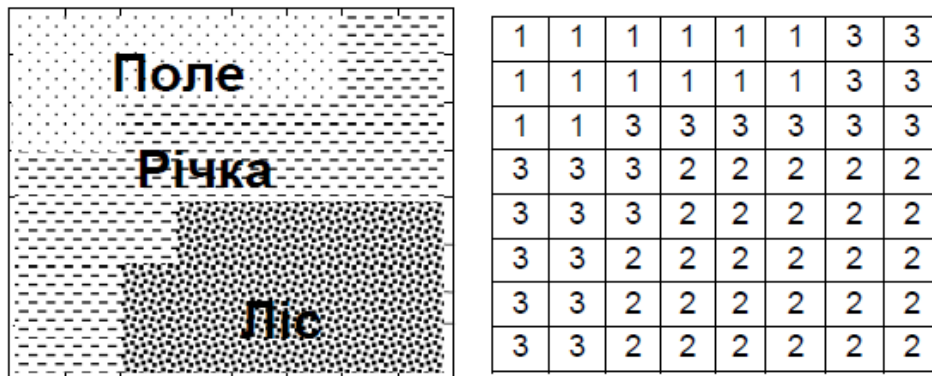


Рис. 4.7 – Схематичне зображення растрової інформації

У загальному випадку растрова картина - це звичайне фотозображення, яке отримано скануванням традиційної паперової карти або аерокосмічного фотографування ділянки земної поверхні. Растрове зображення можна охарактеризувати роздільною здатністю, яка вимірюється в одиницях dpi, що вказує, скільки пікселів розташовується в одному дюймі зображення. Чим вище розділення, тим якісніше та інформативніше зображення. Але не слід забувати, що зі збільшенням розділення збільшується і файл растрового зображення.

Елемент комірки	Властивість	Колір
1	Поле	Жовтий
2	Ліс	Зелений
3	Річка	Голубий

Рис. 4.8 – Таблиця з атрибутивними даними растра

У ГІС зазвичай використовуються растрові зображення з розділенням в діапазоні 200-600 dpi (винятком можуть бути тільки аеро і космічні знімки, розділення яких може досягати декількох тисяч dpi). Наприклад, стандартний знімок зі штучного супутника Землі, який охоплює близько 30 000 км² при розмірі пікселя 30x30 м, складається з 35 млн пікселів, що потребує приблизно 35 Мб пам'яті. Недоліком растрової моделі є великий об'єм даних. Тому існують моделі та алгоритми, які виконують "стиснення" растрової інформації. Переваги растрових структур – це злиття позиційної і семантичної інформації в єдиній матриці. Саме космічні знімки є прикладом растрових даних. Кілька зображень різних діапазонів можна синтезувати у кольорове зображення космічного знімка (рис. 4.9).

Кожен піксель знімка містить не лише дані про спектр об'єкта земної поверхні, а і закодовані геодані про його положення на Землі. Картографічна інформація в цифровому форматі відображена у вигляді *тематичних шарів*. Кожен шар являє собою набір об'єктів які мають спільну тематичну ознаку і тип даних (точки, полігони чи лінії), наприклад: шар сміттєзвалищ, шар вирубок, шар озер, шар парків тощо. Таке представлення даних на карті забезпечує можливість користувачам легко і гнучко відображати ті тематичні шари, які потрібні в певний момент часу, – налаштовувати умовні позначення, підписи та видимість

для кожного шару окремо тощо. Як відомо, за типом геометрії об'єктів розрізняють векторні точкові, лінійні, полігональні шари, а також растрові шари.



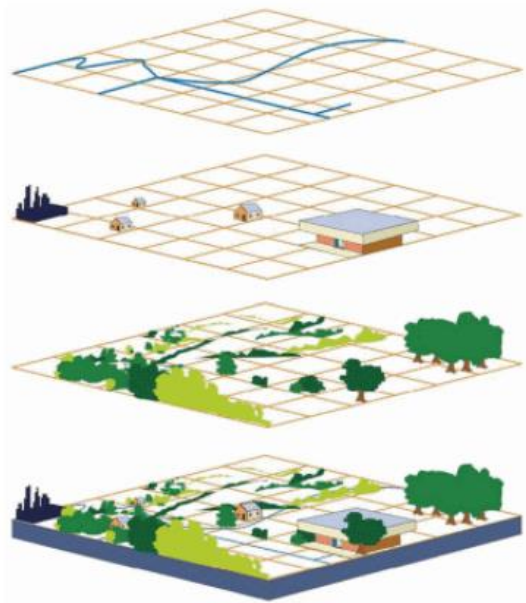
Рис. 4.9 – Космічний знімок Sentinel 2

Супутниковий знімок – це растровий шар, а виокремлені на основі дешифрування знімка об'єкти – це найчастіше векторні шари. Для більш візуального представлення кожного окремого шару використовують індивідуальні умовні позначення: символи, кольори і текст. Наприклад, один шар – транспортна інфраструктура (наприклад дороги), другий – це будинки, третій – лісові масиви чи парки тощо (рис. 4.10). Найчастіше в роботі з векторними географічними даними використовують формат Shapefile (шейп-файл). Вперше цей векторний формат запровадили 1990р. в ArcView GIS, і зараз він є дуже поширеним. Отже, шейп-файл – це не один файл, а чотири і більше файли з однаковим ім'ям, але різними розширеннями (це скорочення після крапки в назві файлу). Кожен з цих файлів містить свою специфічну інформацію, тож при копіюванні необхідно завжди переносити всі ці об'єкти (рис.4. 11). Важливою особливістю Shapefile є те, що в одному файлі можуть бути об'єкти лише одного типу (або тільки полігони, або тільки лінії, або тільки точки). У межах кожного шару для візуалізаційного представлення інформації використовуються індивідуальні умовні позначення: символи, кольори і текст.

Точки використовуються для позначення географічних об'єктів, для яких важливе розташування, а не їхня форма або розміри (наприклад, адреса будівлі, вершина гори). Точка має одну пару координат: широту і довготу. Лінії зображують лінійні об'єкти, що мають довжину, але не мають площі (річки, вулиці, державний кордон); полігони – це об'єкти, які характеризуються площею і периметром (рис. 4. 12).

На рис. 4.13 наведено приклад подання шару лісового покриву Житомирської області на основі шейп-файлу [9,10]. На рисунку виділений фрагмент лісової пожежі. Як видно з рис. 4.13, накладення шару лісового покриву Житомирської області на знімок з осередками пожежі дозволяє

отримати більше інформації про те, яка саме частина області охоплена займаннями і де саме знаходяться осередки відкритого вогню.



Лінії – дороги

Точки – будинки

Полігони – зелені насадження

Інтегровані дані векторних шарів – власне карта

Рис. 4.10 – Схема представлення векторних шарів електронної карти

c:\Users\visua\База\РН_ГИС\2022\Ліс.zip\Ліс*.*				
↑ [Авто] Имя	Тип	Размер	Дата	Атрибу
⌚ [..]		<Папка>	19.09.2022 23:02	----
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	cprg	5	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	dbf	136 022	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	prj	151	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	sbn	17 708	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	sbx	1 588	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	shp	4 961 828	24.02.2020 05:35	-a--
<input type="checkbox"/> ЛісЖитОбл	shx	14 212	24.02.2020 05:35	-a--

Рис. 4. 11 – Структура шейп-файлу



Рис. 4. 12 – Формати представлення географічних об'єктів: реальний світ (а), космічний знімок (растр) (б), вектор (точки, лінії, полігони) (в)

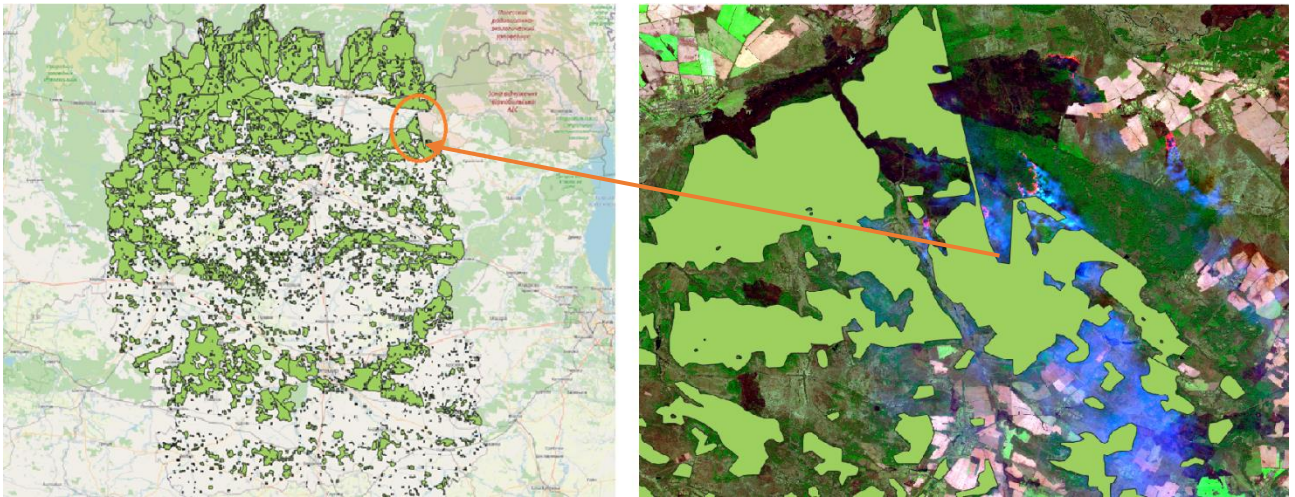


Рис. 4.13 – Фрагмент шару лісового покриття Житомирської області з ліською пожежею

Космічний знімок містить великий масив інформації, побачити та аналізувати яку можна через застосування низки інструментів спеціального програмного забезпечення (ПЗ) – ГІС. На сьогодні у світі налічується велика кількість ПЗ, що створено як на комерційній основі, так і з відкритим програмним кодом.

ArcView GIS (ArcGIS)- це комерційний продукт компанії ESRI (Environmental Systems Research Institute, що перекладається як «Інститут дослідження систем навколишнього середовища») для візуалізації, запиту і аналізу будь-якої просторової інформації. ArcGIS об'єднує векторні, растрові, табличні дані в єдину аналітичну систему. Великий спектр умовних знаків і додаткові можливості по створенню і використанню власних умовних знаків дозволяють оформляти карти відповідно до прийнятих в картографії правил і здійснювати високоякісний друк карт [1]. ArcGIS містить набір додатків, за допомогою яких можна вирішити низку геоінформаційних завдань: картографування, ввід даних, їх аналіз, а також отримати спільний доступ до просторової інформації. *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* – 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 карт (рис.4.14). Більш детальний опис цього ГІС- продукту наведений у додатку А [11,12].

Програма QGIS – це безкоштовна ГІС 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. Інтерфейс QGIS можна поділити на шість частин робочого вікна (рис.4.15):

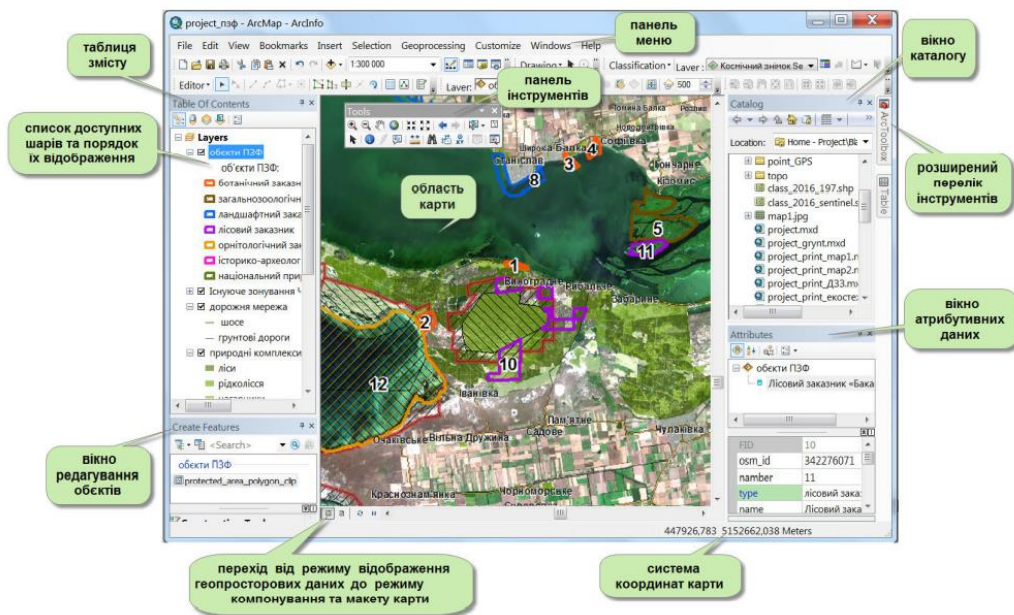


Рис. 4.14 – Інтерфейс робочого вікна проекту ArcMap

1. Головне меню – надає доступ до всіх можливостей QGIS у вигляді стандартного ієрархічного меню.
2. Панель інструментів – забезпечує доступ до більшості тих самих функцій, що і меню, а також містить додаткові інструменти для роботи з картою. Кожну панель інструментів можна додати або приховати за допомогою контекстного меню, яке викликається натисканням правої клавіші миші на панелі інструментів. Просторове розміщення їх в робочому вікні карти можна коригувати і змінювати, переміщати для вашої зручності.
3. Панель управління шарами – відповідає за додавання / створення / видалення растрових і векторних шарів.
4. Таблиця змісту – містить список всіх шарів проекту. Позначка в рядку біля кожного шару використовується для його відображення або приховування. Черговість їх розташування в легенді визначає порядок відображення на карті. При натисканні правою клавішею миші на шар, стає доступним контекстне меню. Воно розрізняється залежно від типу шару.
5. Область карти – карта, яка відображається в робочому вікні, залежить від того, які шари завантажені в QGIS. Якщо додаються дані в Таблицю змісту, то і саме відображення карти теж змінюється.
6. Рядок стану – найнижчий рядок у робочому вікні програми, у якому відображається поточна позиція курсора миші в координатах карти (наприклад, в метрах або десяткових градусах). Також тут вказується масштаб карти, і його можна змінювати, масштабуючи за допомогою миші (змінювати % наближення в рядку стану, можна вибирати в цьому ж рядку значення масштабу з випадного списку). Також в рядку стану є позначка «візуалізація», за допомогою якої можна тимчасово припинити відтворення шарів у вікні карти. Праворуч в рядку стану розташована кнопка поточної системи координат. Якщо натиснути на неї,

відкриється вікно властивостей поточного проєкту з вкладкою «Система координат» [1].

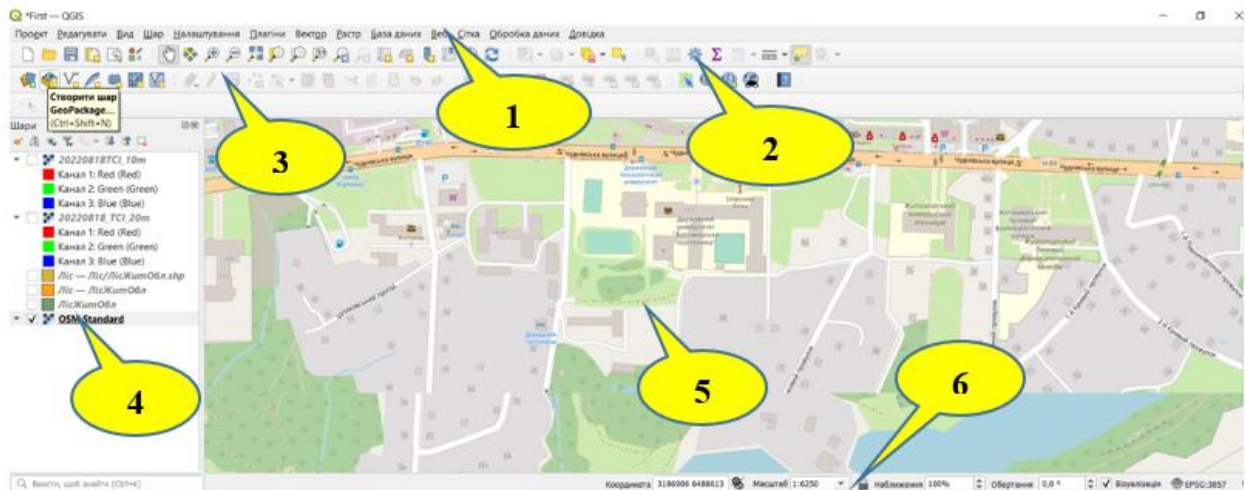


Рис. 4.15 – Інтерфейс робочого вікна проєкту QGIS

Google Earth це безкоштовна програма – «віртуальний глобус» компанії Google, за допомогою якої можна переглядати тривимірну модель Землі, Марса та Місяця з накладеними аеро- і космознімками високої просторової розрізненості та різноманітні тематичні шари даних, зокрема і докладні карти зоряного неба (рис.4.16).

Щоб вибрати програму для роботи з космічними знімками, потрібно слідувати наведеному алгоритму:

1. Якщо потрібно подивитися на об'єкти невеликої площі (наприклад, будинки, місцеві вирубки), зіставити знімки з іншими даними, візуально дешифрувати та оцифрувати об'єкти з чіткими межами, тоді вибирайте програму Google Earth Pro, яка надає безкоштовний доступ до візуалізації супутникових знімків з високою просторовою розрізненістю.

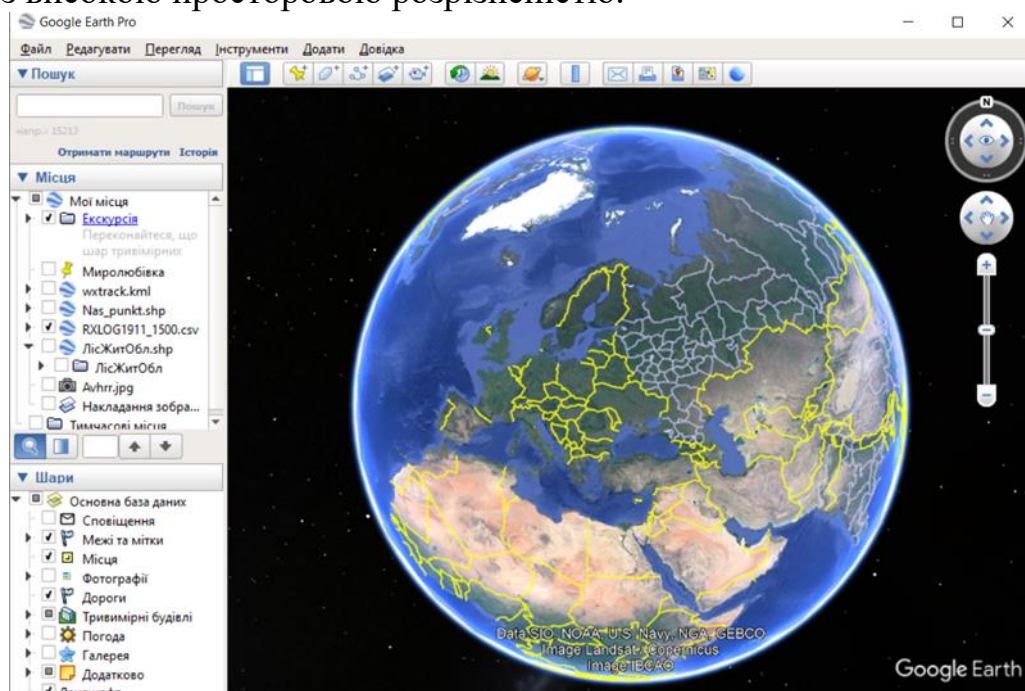


Рис. 4.16 – Інтерфейс робочого вікна Google Earth.

2. Якщо є необхідність працювати зі спектральними каналами, використовувати їх окремо, візуально дешифрувати об'єкти зі складними межами, створювати карти, зробити класифікацію (автоматизоване позначення об'єктів з чіткими межами), тоді працюйте в ArcGIS, QGIS, які дають змогу виконувати всі ці операції опрацювання знімків.

3. Також є ще професійний рівень роботи з даними ДЗЗ – це складна класифікація (автоматизоване позначення об'єктів з розмитими межами), застосування різних алгоритмів чи автоматизація процесів за допомогою програмного коду. Для цього потрібно вже опанувати такі програмні засоби і бібліотеки: GDAL, IDRISI, ENVI, R або Google Earth Engine.

Контрольні питання

1. Якими бувають цифрові покриття (шари) за типом об'єктів?
2. Який формат даних має шейп-файл?
3. Що таке растрова модель даних?
4. Що таке векторна модель даних?
5. Що таке векторно - полігональна модель даних?
6. До якого типу даних відносяться космічні знімки?
7. Дайте коротку характеристику завдань, що розв'язуються ГІС проектами ArcGIS, QGIS.

5. Дешифрування та аналіз супутникових знімків

Опрацювання даних ДЗЗ включає в себе велику кількість різних методів, але суть їх зводиться до отримання карти на основі космічного знімка. Створена карта має відображати інформацію про певні важливі для дослідника об'єкти і явища. Цей процес називається **дешифруванням знімка** [1,2].

Послідовність процедури дешифрування космічних знімків:

1. Визначення інформативних спектральних каналів супутникових 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.

Зазначені вище етапи обробки даних ДЗЗ можуть бути розділені на дві основні групи: попередня обробка космічних знімків та тематична обробка космічних знімків.

Попередня обробка — це комплекс операцій зі знімками, спрямований на усунення різних спотворень зображення. Спотворення можуть бути обумовлені: недосконалістю реєструючої апаратури; впливом атмосфери; перешкодами, пов'язаними з передачею зображень по каналах зв'язку; геометричними спотвореннями, пов'язаними з методом космічної зйомки; умовами освітлення підстильної поверхні; процесами аналого-цифрового перетворення зображень при роботі з матеріалами фотографічної зйомки.

Попередня обробка даних ДЗЗ включає в себе геометричну, радіометричну і атмосферну корекцію зображення.

Геометричне корегування — це усунення на зображенні геометричних викривлень) і географічну прив'язку знімка. Цей вид корекції на першому етапі може виконуватись автоматично за інформацією про параметри орбіти супутника.

Радіометричне корегування знімків — це калібрування значень вихідного сигналу знімального приладу і їх переведення в абсолютні значення яскравісної температури. Калібрування здійснюється з використанням даних телеметрії, що надходять з супутника разом із зображенням, і калібрувальних коефіцієнтів, які розраховуються для кожного знімального приладу за результатами наземних і льотних випробувань. Калібрування полягає в перетворенні безрозмірних даних, що отримуються з датчиків окремих спектральних зон, в нормалізовані значення відбитої або випромінюваної енергії.

Атмосферна корекція — поліпшення характеристик знімку шляхом усунення перешкод, що завдає атмосфера Землі.

Мозаїка зображення – це створення одного зображення з декількох сцен супутникової зйомки. Застосування цього інструменту дає змогу отримати суцільне зображення на територію дослідження (рис.5.1).

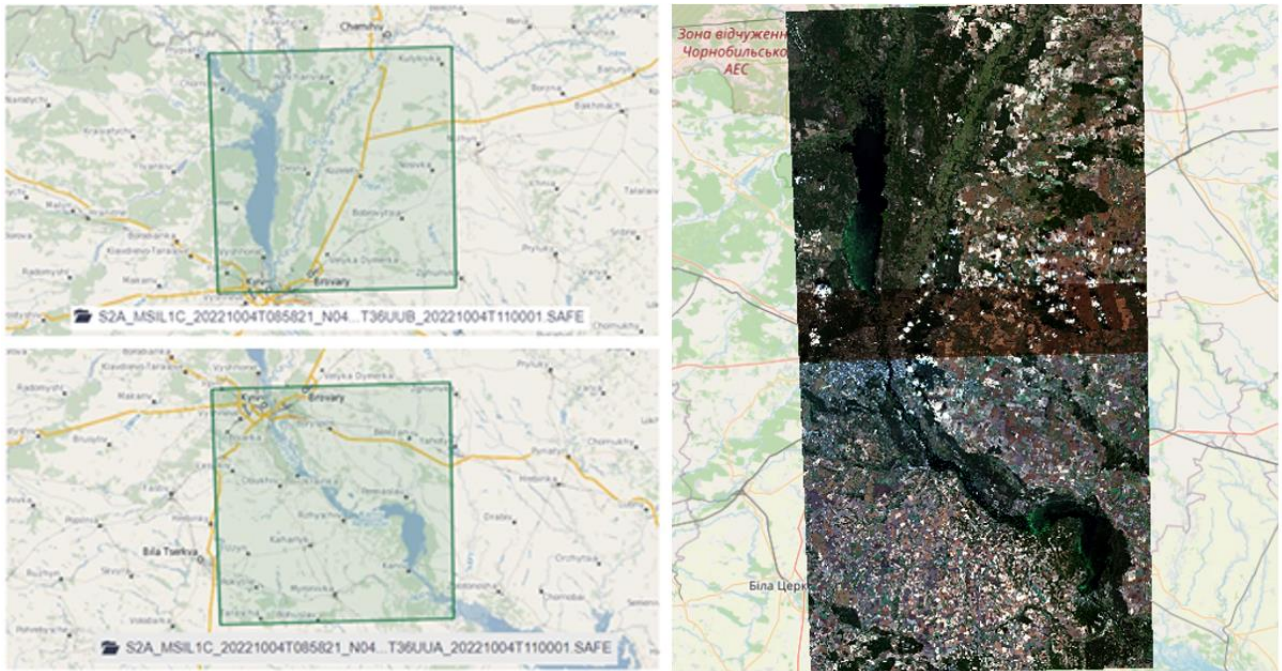


Рис. 5.1 – Мозаїка зображення

Обрізка знімка – виокремлення зі сцени супутникового знімка потрібної території дослідження. Це важливо як для кращого візуального представлення області інтересу, так і для того, щоб прискорити процеси опрацювання даних комп'ютером. Супутникові знімки великого розміру можуть займати багато ресурсів процесора, тому варто працювати лише з областю дослідження, а не з усією сценою супутника. Область вирізання знімка задається:

- контурами заданого прямокутника за допомогою мінімальних і максимальних координат x і y (тобто координат лівого верхнього і правого нижнього кутів прямокутника, який окреслює територію інтересу);
- областю робочого вікна (областю карти);
- контурами іншого растрового або векторного шару.

На рис. 5.2 легко розрізняються межі міста за щільною забудовою. Київ розташований на обох берегах Дніпра – річки, яку добре помітно в центрі зображення, та частково оточений лісами (темно-зелені зони на знімку). А у правому нижньому куті знімка видно злітно-посадкові смуги терміналів F та D аеропорту Бориспіль.

Корекція зображення. Іноді отримане зображення може бути темним на вигляд або навпаки – засвітленим. Це можна виправити за допомогою інструментів покращення яскравості та контрастності зображення, а також застосовуючи гістограмну корекцію у вікні налаштування властивостей шару. Функція корекції гістограми зображення аналізує набір значень пікселів усього зображення і налаштовує його відображення, наприклад у межах від мінімального до максимального значень пікселів.



Рис. 5.2 – Зображення, що обрізане по області робочого вікна

Тематична обробка космічних знімків — це розпізнавання об'єктів і явищ на космічних знімках на основі дешифрувальних ознак.

До основних методів тематичної обробки належать: комбінування каналів, класифікації, індексні зображення.

Метод комбінування каналів супутникових знімків полягає у визначенні спектральних діапазонів, важливих для відображення тих чи інших об'єктів та синтезу відповідних спектральних каналів супутникових знімків у 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 рис. 5.3. З наявних чорно-білих зображень (різних каналів) ми можемо вибрати будь-які три і відобразити їх відповідно синім, зеленим і червоним тоном – власне, ці три кольори при злитті створюють усю гаму кольорів. Так, синтез каналів видимої частини спектра формує зображення, близьке до звичайної фотографії або того, що можна побачити людським оком.

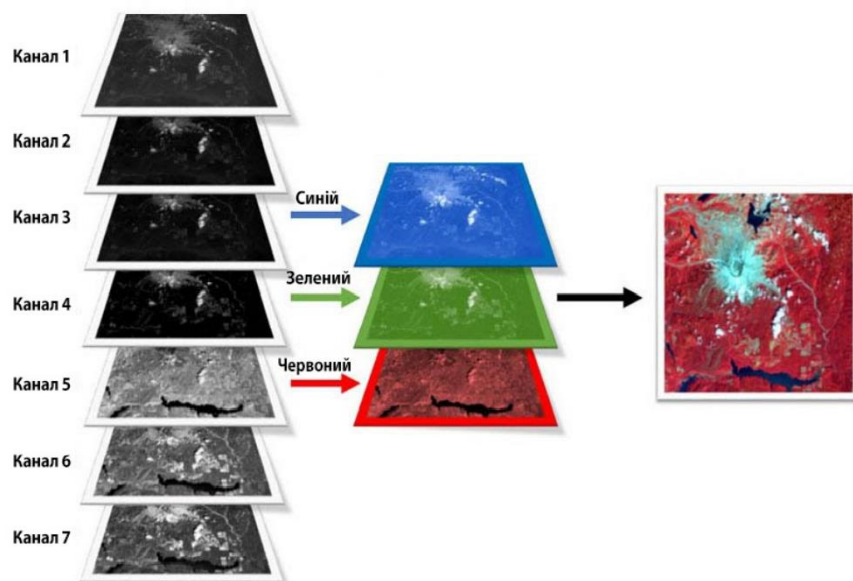


Рис. 5.3 – Синтез каналів супутника

Об'єкти дешифрування будуть мати звичний та зрозумілий колір і, відповідно, вигляд, що може суттєво полегшити процес ідентифікації об'єктів на знімках. Така комбінація каналів називається *природні кольори*. Однак значна частина інформації буде залишатися прихованою за такої комбінації каналів, тому для виявлення таких об'єктів чи їх властивостей варто використовувати комбінацію каналів із застосуванням ближніх, середніх чи дальніх інфрачервоних діапазонів. Як правило, ці канали поєднують з одним чи декількома каналами видимого діапазону. У результаті формується *псевдокольоровий знімок*.

Папка космознімка містить певну кількість файлів у вигляді чорно-білих зображень – різних каналів супутникового знімка. Кожен канал – це чорно-біле зображення, що відображає інтенсивність відбиття електромагнітного випромінювання наземними об'єктами у певному спектральному діапазоні. Назви файлів практично збігаються, за виключенням порядкового номера наприкінці назви після літери В (з англ. band – канал). Наприклад, В01 – це перший канал супутникового знімка. Кожен супутник має свою специфікацію каналів, тож вона може суттєво відрізнятись в різних супутниках.

Різні канали знімків можуть мати різну просторову розрізненість. Так, наприклад, просторова розрізненість каналу В02 (зелений – тобто канал, що відповідає зеленій частині спектра) супутникового знімка Landsat 5 становить 30 м, а от В06 (тепловий інфрачервоний) – 120 м, а якщо розглянути супутникові знімки Sentinel, то канал В03 має просторову розрізненість 10 м, а канал В01 – 60 м. Кожен канал знімка можна відкрити у ГІС-програмах (QGIS чи ArcGIS) окремо як чорно-біле зображення. Завантажені знімки вже мають визначену географічну проекцію, тому не потрібно робити прив'язку до географічних координат, тож їх можна накладати на інші картографічні дані. Знімки Sentinel 2, які поширює ЄКА для широкого кола користувачів, розбиті на **тайли** – комірки сітки розміром 100 x 100 км (рис. 5.4). Сітка тайлів створена для кожної орбіти на основі військової системи координат НАТО.

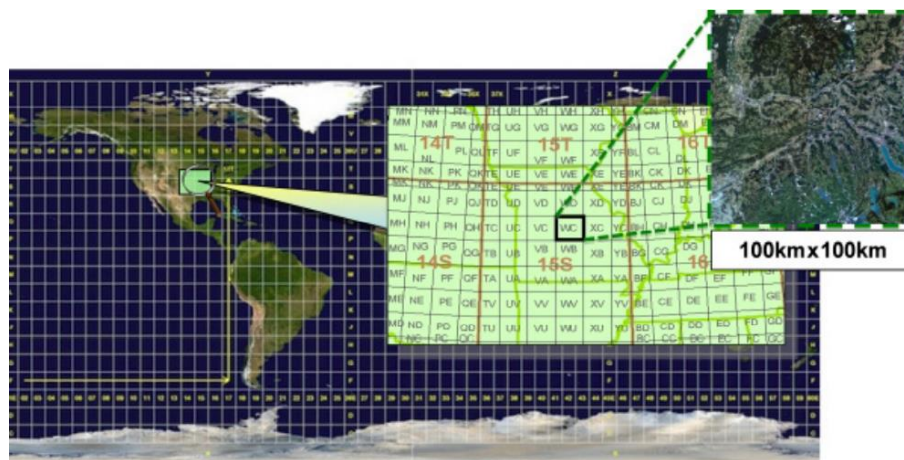


Рис. 5.4 – Схема поділки на тайли

Різні наземні об'єкти, наприклад ліс і вода, по-різному взаємодіють з електромагнітним випромінюванням у різному спектральному діапазоні (на

різній довжині хвиль), як це можна побачити на рис.5.5. Для того щоб зображення відображалось у природних кольорах потрібно для синтезу каналів вибрати саме ті три канали супутника, які реєструють електромагнітне випромінювання відповідно в червоному, зеленому і синьому діапазонах (видима для людського ока частина спектра). Для супутника Sentinel 2 такими каналами є V04, V03, V02 (рис. 5.6).

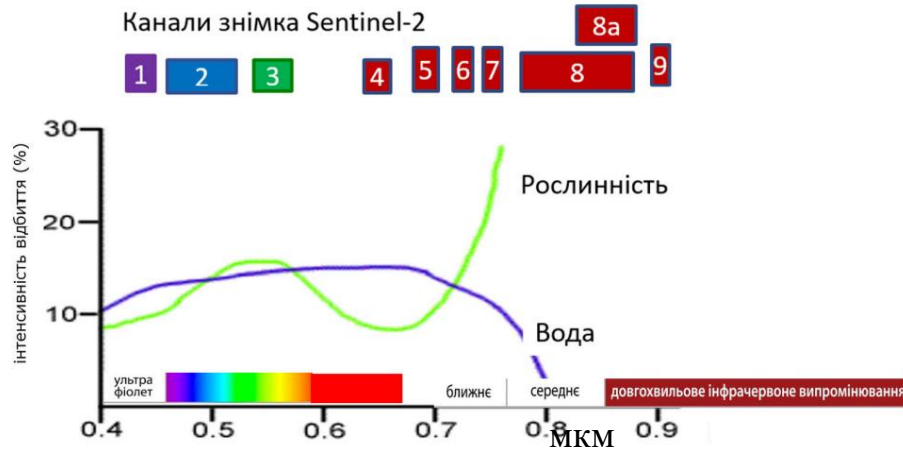


Рис. 5.5 – Схема каналів Sentinel 2 зі спектральними кривими води та рослинності

Sentinel 2								
Спектральні канали	Довжина хвилі (мкм)	Просторова розрізність, м	Спектральні канали	Довжина хвилі (мкм)	Просторова розрізність, м	Спектральні канали	Довжина хвилі (мкм)	Просторова розрізність, м
Канал 1 (Ultra Blue)	0,433–0,453	60	Канал 6 (Vegetation Red Edge)	0,733–0,747	20	Канал 9 (Water vapour)	0,935–0,955	60
Канал 2 (Blue)	0,458–0,522	10	Канал 7 (Vegetation Red Edge)	0,773–0,793	20	Канал 11 (SWIR1)	1,565–1,655	20
Канал 3 (Green)	0,543–0,577	10	Канал 8 (NIR)	0,784–0,899	10	Канал 10 (SWIR, Cirrus)	1,360–1,390	60
Канал 4 (Red)	0,650–0,680	10	Канал 8a (Vegetation Red Edge)	0,855–0,875	20	Канал 12 (SWIR2)	2,100–2,280	20
Канал 5 (Vegetation Red Edge)	0,698–0,712	20						

Рис. 5.6 – Спектральні канали Sentinel 2

Тут введені наступні терміни: Ultra Blue – ультрафіолетовий; Blue – синій; Green – зелений; Red – червоний; Vegetation Red Edge – червоний край, рослинність; NIR (Near Infrared) – ближній інфрачервоний; SWIR (Short Wavelength Infrared) – короткохвильовий інфрачервоний; Cirrus – перисті хмари; Water vapour – водяна пара.

V04, V03, V02 (рис.5.7) – комбінація «природні кольори». Оскільки в цій комбінації використовуються видимі канали, наземні об'єкти відображаються у звичних кольорах для людини: здорова рослинність – зелена, недавно очищені

поля – світлі, нездорова рослинність – коричнева і жовта, дороги – сірі, берегова лінія – біла.

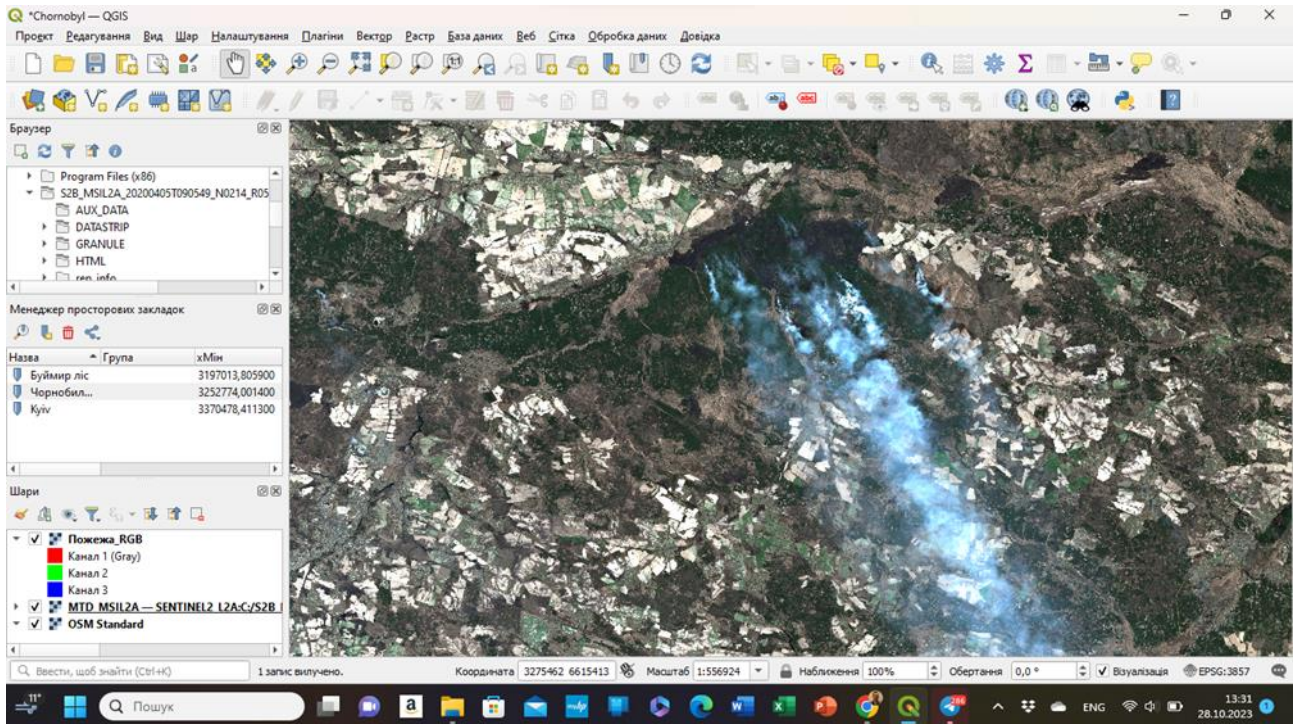


Рис. 5. 7 – Пожежа у зоні відчуження ЧАЕС на супутниковому знімку Sentinel 2 з комбінацією каналів B04, B03, B02

Однак водні об'єкти тут будуть надто темними через недостатнє проходження синього кольору крізь атмосферу, та можна аналізувати їх стан і оцінювати глибину за насиченістю тону. Ця комбінація також застосовується для вивчення антропогенних об'єктів.

B08, B04, B03 (NIR, Red, Green) - комбінація «штучні кольори» (рис.5.8).



Рис. 5. 8 – Район селища Озерне Житомирського району
Рослинність відображається у відтінках червоного, міська забудова – блакитна, а ґрунт варіюється від темних до світло-коричневих кольорів. Лід, сніг та хмари – білі або світло-блакитні. Це дуже популярна комбінація каналів, яка корисна

для вивчення рослинності, моніторингу ґрунту і різних стадій зростання сільськогосподарських культур. Як правило, глибокі червоні відтінки вказують на широколистяну і більш здорову рослинність, у той час як більш світлі червоні позначають луки або ділянки з рідкою рослинністю. Ця комбінація дає результати, аналогічні інфрачервоній аерофотозйомці.

B12, B11, B04 (SWIR2, SWIR1, Red) - ця комбінація (штучні кольори - урбо) також забезпечує «природне» зображення. Рослинність відображається у відтінках темно- та світло-зеленого протягом вегетаційного періоду, міська забудова – білий, сірий, блакитний або фіолетовий колір. Практично повне поглинання каналів середнього ІЧ у воді, льоду та снігу забезпечує чітко окреслені берегові лінії. Сніг і лід виглядають як сині, вода чорна або темно-синя. Гарячі поверхні, як-от лісові пожежі і кратери вулканів, насичують канали середнього ІЧ та показуються у відтінках червоного чи жовтого. Одним з конкретних застосувань цього поєднання є моніторинг лісових пожеж (рис.5.9).

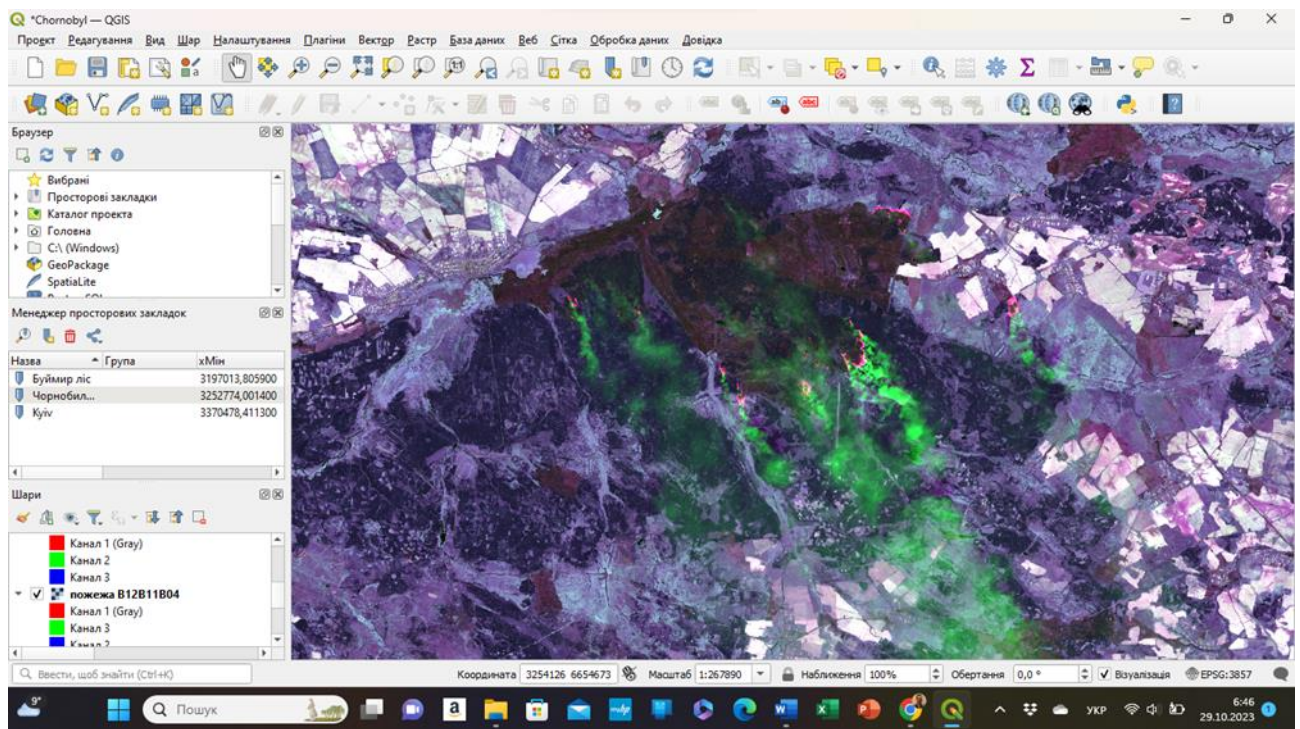


Рис. 5. 9 – Пожежа у зоні відчуження ЧАЕС на супутниковому знімку Sentinel 2 з комбінацією каналів B12, B11, B04

B11, B8A, B02 (SWIR1, Red8, Blue) - ця комбінація (агро) корисна для моніторингу сільськогосподарських культур. Яскраво-зелений колір представляє енергійну, здорову рослинність. Хвойні ліси на вигляд темно-зелені, а листяні – яскраво-зелені. Ділянки з рідкою рослинністю і голі ділянки відображаються коричневими і ліловими (рис.5.10).

B8A, B11, B02 (Red8, SWIR1, Blue) – «Здорова рослинність» відображається у відтінках червоного, коричневого, помаранчевого і жовтого кольорів. Ґрунти можуть бути зеленими і коричневими, міська забудова – біла, блакитна і сіра, червонуваті ділянки показують нову рослинність, ймовірно, рідкі луки.

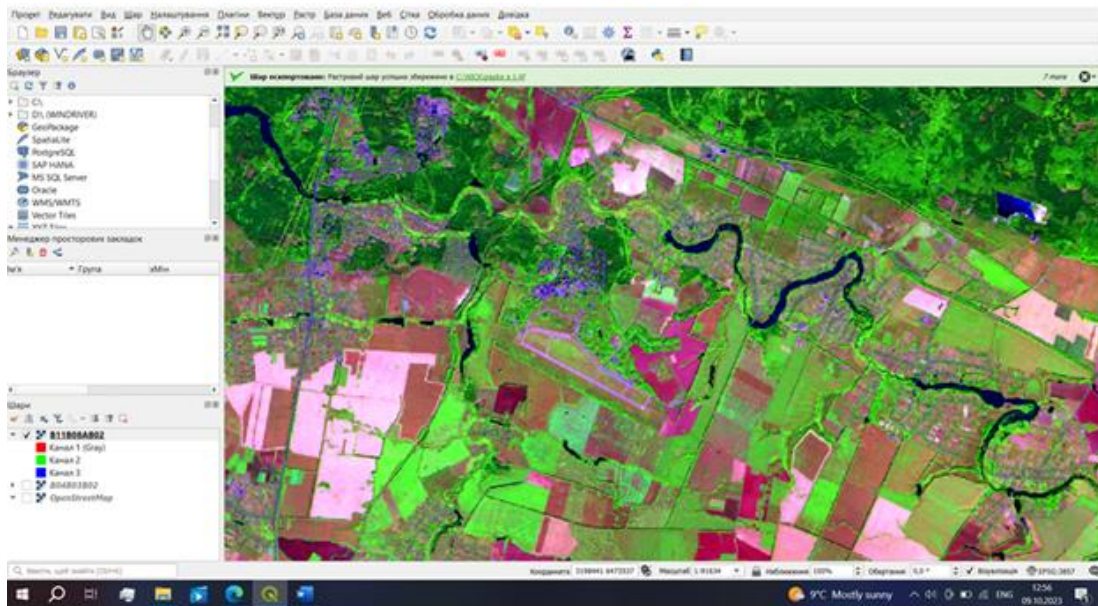


Рис. 5. 10 – Район селища Озерне Житомирського району

Чиста, глибока вода в цій комбінації буде дуже темною. Якщо вода мілка або містить відклади, вона буде мати вигляд, як відтінки світло-блакитного. Це не дуже хороша комбінація для вивчення антропогенних об'єктів, як-от дороги, злітно-посадкові смуги (рис. 5.11).

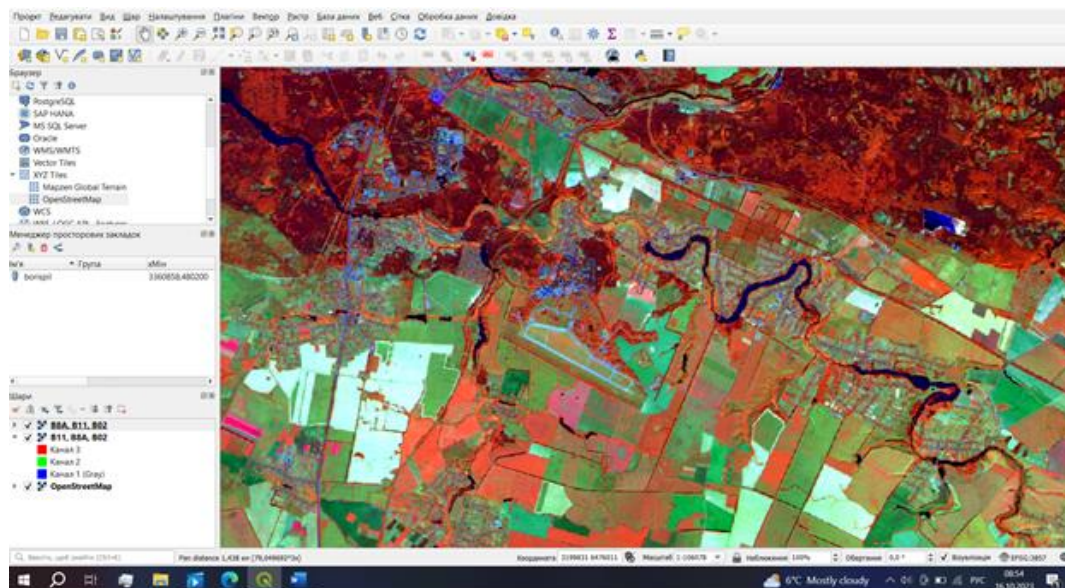


Рис. 5. 11 – Район селища Озерне Житомирського району

B11, B8A, B04 (SWIR1, Red8, Red) – «Вегетаційний аналіз». Ця комбінація надає користувачеві велику кількість інформації та колірних контрастів. Здорова рослинність – яскраво-зелена, а ґрунти – лілові. Вона корисна для вивчення рослинності і широко використовується в лісовому господарстві для виявлення ділянок дерев, які заражені шкідниками (рис. 5.12).

B12, B8A, B04 (SWIR2, Red8, Red) – «короткохвильовий інфрачервоний». Ця комбінація каналів дуже корисна для досліджень рослинності, оскільки тут відбивна здатність у SWIR обумовлена вмістом вологи в листі або ґрунті.

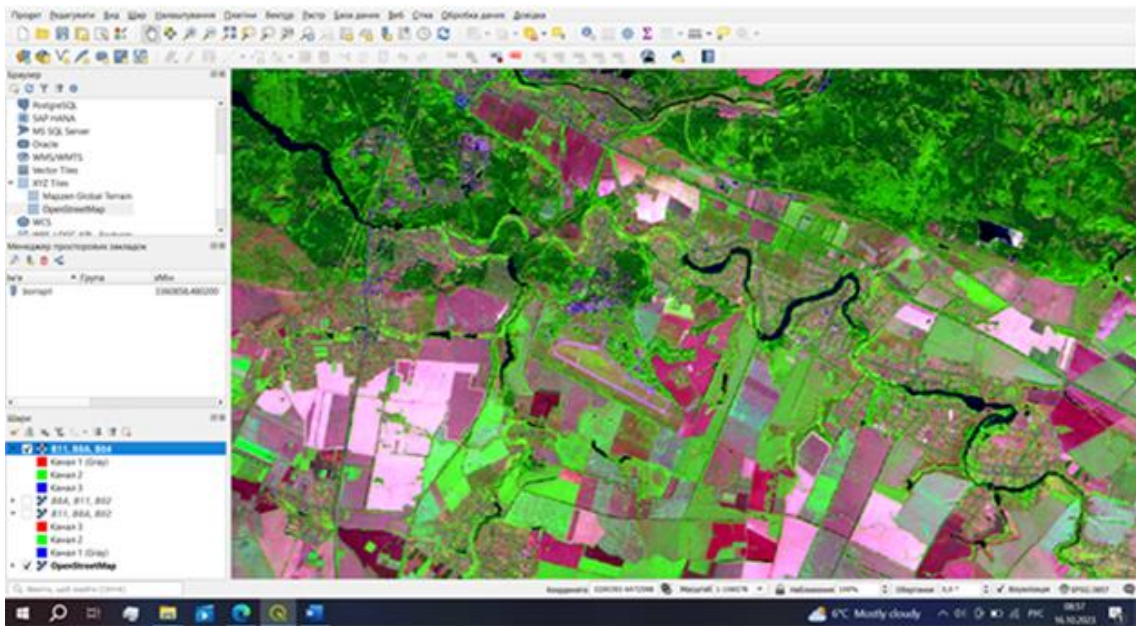


Рис. 5. 12 – Район селища Озерне Житомирського району

Отже, здорова рослинність із підвищеним вмістом вологи, а також прибережні райони відображаються яскраво-зеленим кольором, в той час як посушливі райони мають темно-зелений колір. Хвойний ліс глибокого зеленого, а листяний ліс – яскраво-зеленого кольорів. Ґрунти на вигляд коричневі і лілові. Ця комбінація каналів підходить для вивчення стану рослинності, виявлення порушення ґрунтів, типу ґрунту тощо (рис.5.13).

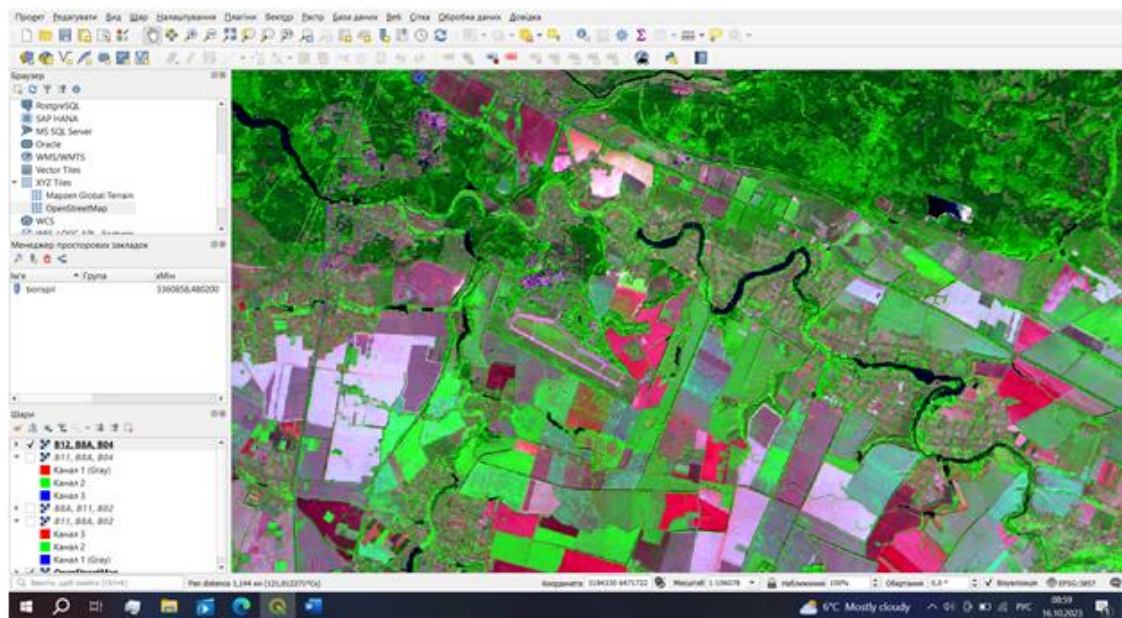


Рис. 5. 13 – Район селища Озерне Житомирського району

B12, B8A, B03 (SWIR2, Red8, Green)-«Усунення впливу атмосфери». Ця комбінація забезпечує «природну» передачу кольорів. Здорова рослинність буде яскраво-зеленою і може змінювати насичення в різні вегетаційні періоди, луки показуються зеленими, рожеві ділянки – це безплідний ґрунт. Суха рослинність

буде помаранчевою, а вода – синьою. Ця комбінація каналів забезпечує яскраві зображення для пустельних регіонів. Комбінація корисна для геологічних, сільськогосподарських і водно-болотних досліджень. Вогонь на вигляд червоний на знімках, і ця комбінація використовується для управління пожежами й аналізу згорілих лісових площ. Міська забудова відображається в різних відтінках пурпурного. Луки на вигляд світло-зелені. Світло-зелені плями всередині міста вказують на трав'янистий рослинний покрив – парки, кладовища, поля для гольфу. Оливково-зелені або яскраво-зелені відтінки зазвичай вказують на покриті хвойним лісом ділянки, а темно-зелені масиви – листяний ліс (рис. 5.14). **B02, B11, B12** (Blue, SWIR1, SWIR2) – «Сніг / Хмари». Ця комбінація добра для виявлення снігу і льоду, тому що вони відображаються у видимій частині спектра і дуже поглинаються в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні. Сніг і лід на вигляд яскраво-червоні. Чим більше льоду, тим сильніше поглинання в SWIR і тим більше насичений червоний колір. Товстий лід і сніг показуються яскраво-червоними (або червоно-помаранчевими).

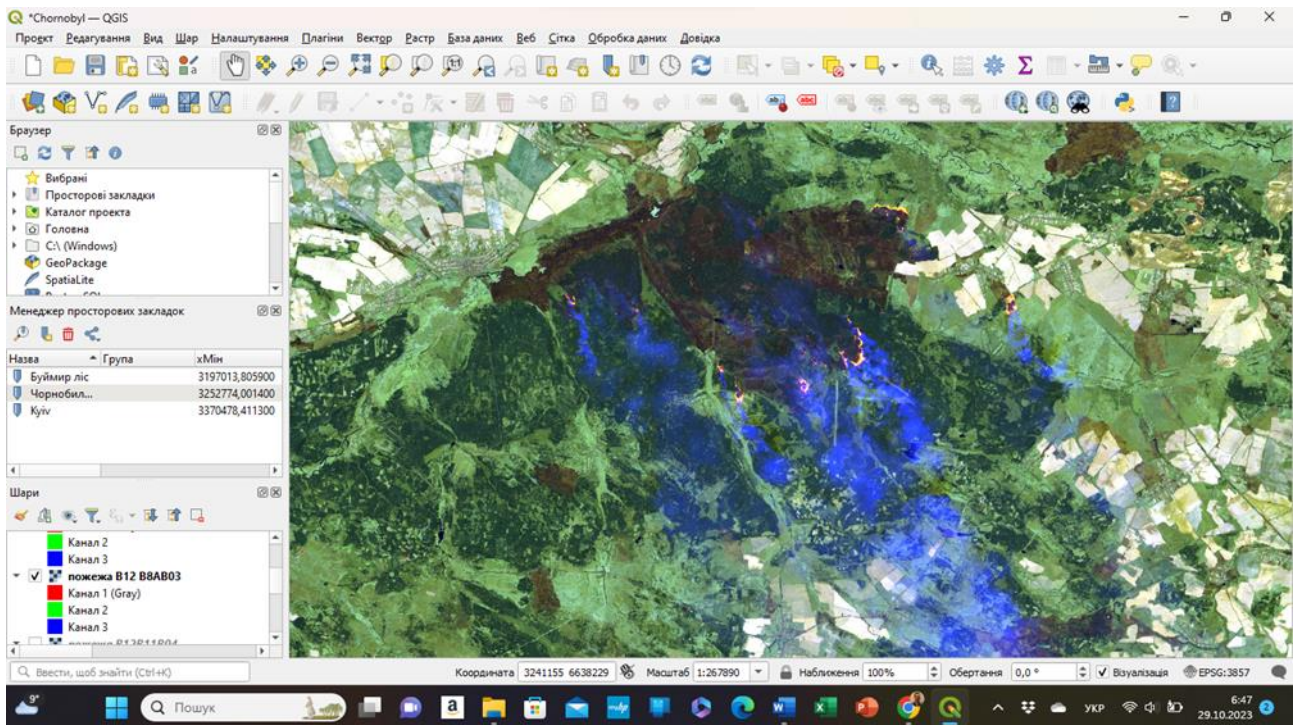


Рис. 5. 14 – Пожежа у зоні відчуження ЧАЕС на супутниковому знімку Sentinel 2 з комбінацією каналів B12, B8A, B03

Рослинність буде на вигляд зеленуватою в цій комбінації. Голий ґрунт – яскраво-блакитний. Вода буде дуже темною, оскільки вона поглинає червоний і SWIR, але невеликі краплі рідкої води в хмарах розсіюють світло рівною мірою як у видимому, так і на SWIR діапазонах, і тому будуть здаватися білими.

На рис. 5.15 показане синтезоване зображення лісової пожежі з комбінацією каналів B12, B08, B02, а на рис. 5.16 - з комбінацією каналів B02, B08, B12. Як видно з наведених синтезованих зображень, краще для виявлення ділянок відкритого вогню підходить псевдокольорове зображення, що отримане у результаті синтезу з використанням комбінації каналів інфрачервоного

діапазону NIR, SWIR1, SWIR2 у різних комбінаціях з видимими каналами. Також краще дешифруються осередки відкритого вогню та місця вже згаслої пожежі на відміну від комбінації у «природних кольорах». Пошкоджені дерева тут мають темно-червоно-фіолетові відтінки.

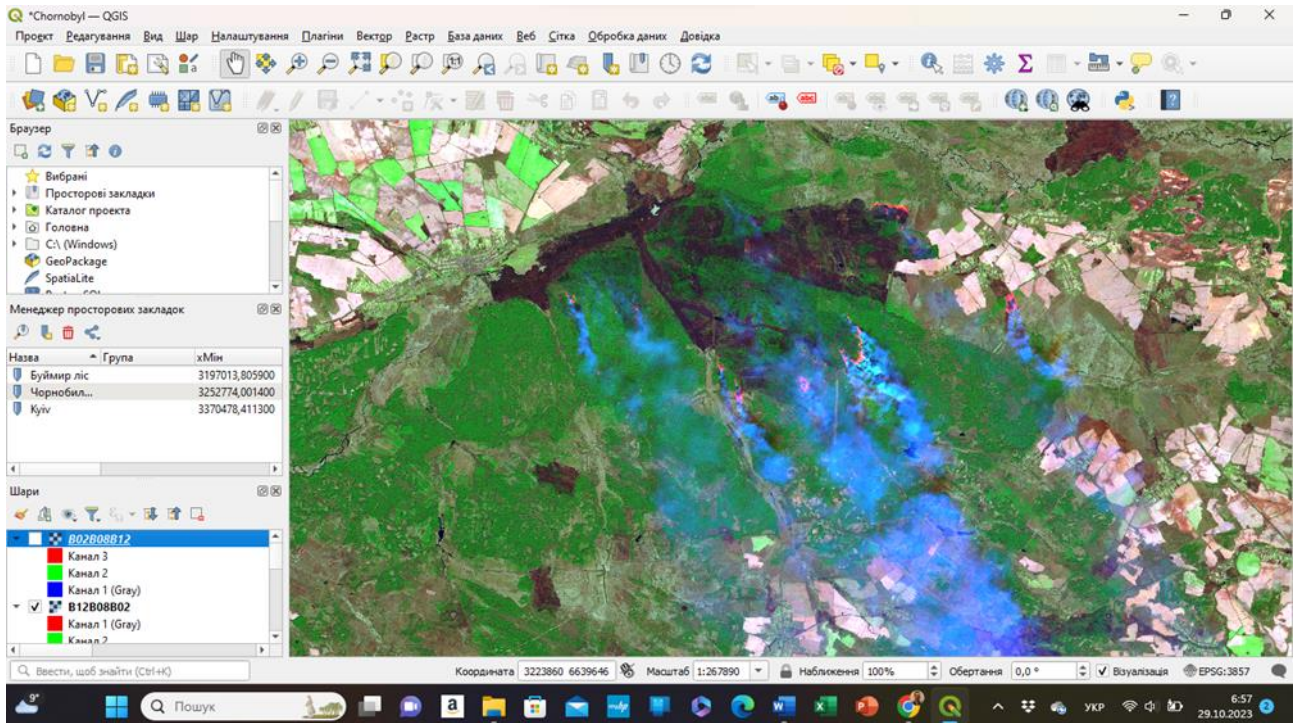


Рис. 5. 15 – Пожежа у зоні відчуження ЧАЕС на супутниковому знімку Sentinel 2 з комбінацією каналів B12, B08, B02

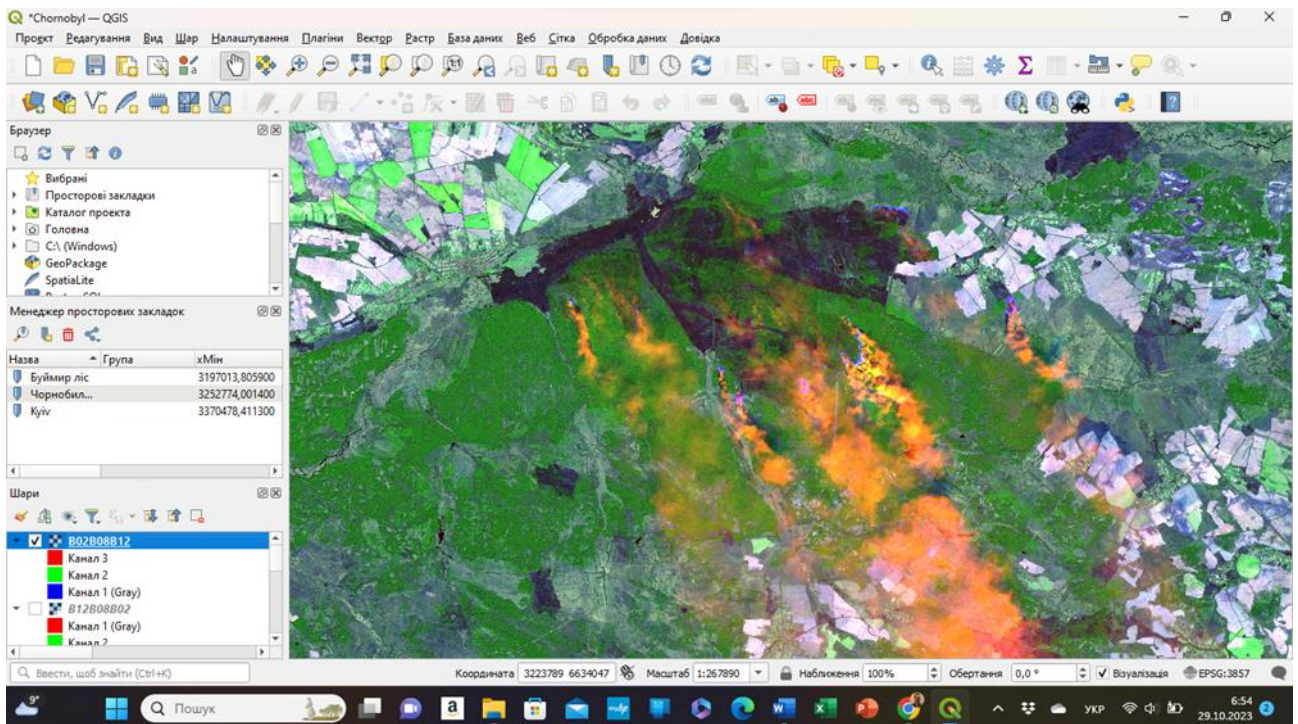


Рис. 5. 16 – Пожежа у зоні відчуження ЧАЕС на супутниковому знімку Sentinel 2 з комбінацією каналів B02, B08, B12

Космічні знімки є важливим джерелом отримання тематичної інформації про типи землекористування та наземного покриття на різних масштабних рівнях.

Процес отримання тематичної інформації на основі даних ДЗЗ із застосуванням автоматичних (комп'ютеризованих) методів обробки зображення називається **автоматичною тематичною класифікацією**.

Класифікація якраз і полягає в тому, щоб, проаналізувавши положення пікселя в просторі спектральних ознак, зіставити його з певним класом наземних об'єктів, тому іноді її називають розпізнаванням спектральних образів. З цієї точки зору важливо розрізняти:

- спектральні класи – групи пікселів, що демонструють подібність за своїм положенням у просторі спектральних ознак, характеризуючись близькими значеннями спектрального відбиття;
- тематичні класи – стосуються типів наземних об'єктів, які потрібно розпізнати на знімку (наприклад, хвойна та широколистяна рослинність, вода, відкритий ґрунт тощо) [1,6]. Отже, основне завдання класифікації полягає у встановленні зв'язку спектральних класів з тематичними.

Залежно від завдання і доступних даних застосовують автоматичне, напівавтоматичне та ручне дешифрування зображень. Для розпізнавання об'єктів необхідно володіти знаннями про особливості їх відображення на знімку. Найкраще, якщо аналіз космічних знімків підкріплений наземними дослідженнями, за допомогою яких можна перевірити дистанційні дані. Також може допомогти використання будь-якої довідкової інформації – відкритих даних Open Street Map, тематичних геопорталів, фотографій місцевості тощо. Дешифрування космічних знімків високої та середньої просторової розрізненості дещо відрізняється, адже воно напряду залежить від того, наскільки дрібні об'єкти на знімках ми можемо побачити та виокремити. Так, для початкового рівня освоєння ГІС-технології більше підходять знімки високої деталізації, які можна легко «читати» без підготовки. Такі знімки у вільному доступі розміщені на ресурсі Google Earth Pro. Перевага таких даних – це можливість визначати найменші зміни ландшафтів, побачити накопичення сміттєзвалищ, зсуви, захворювання лісів, забудову прибережної смуги тощо. Однак є і недоліки використання Google Earth Pro – ці знімки показують поверхню Землі лише у видимому діапазоні спектра в єдиній комбінації «природні кольори», тому більш ґрунтовні наукові дослідження виконуються на багатоканальних знімках середньої детальності і потребують володіння більш складними ГІС-програмами, як-от ArcGIS та QGIS.

Автоматична класифікація належить до автоматизованих способів дешифрування. У разі їх застосування користувачу не потрібно вручну обводити межі об'єктів, за нього це робить комп'ютерна програма. За ступенем участі користувача в процесі автоматизованого дешифрування алгоритми класифікації поділяють на некеровані та керовані.

Некерована класифікація, також відома як класифікація без навчання, полягає у розподілі всіх пікселів зображення у відносно однорідні класи, ґрунтуючись лише на близькості їх спектральних характеристик. Некеровану класифікацію застосовують за відсутності еталонних даних про наземні об'єкти, тобто коли їх спектральні властивості апріорно невідомі через нестачу наземної інформації або відсутність добре виражених ознак ландшафту на самому знімку.

Керована класифікація, також відома як класифікація з навчанням, передбачає віднесення кожного пікселя на знімку до відомого класу земних об'єктів, якому відповідає попередньо визначений спектральний образ. Для отримання цього спектрального образу застосовуються сигнатури – еталонні області знімка, які добре репрезентують визначені тематичні класи. Значення пікселів сигнатур застосовуються як навчальні вибірки для налаштування (навчання) алгоритму розпізнавання. У процесі розпізнавання кожен піксель знімка послідовно порівнюється з еталонами та відноситься до того чи іншого класу.

Під час аналізу окремих об'єктів, представлених на растровому зображенні, використовують набір дешифрувальних ознак. *Дешифрувальні ознаки* – це властивості об'єктів, їхніх взаємозв'язків та явищ, за допомогою яких їх можна розпізнати на знімку. Дешифрувальні ознаки поділяють на прямі та непрямі [1]. Прямими дешифрувальними ознаками називають ті властивості об'єктів, які безпосередньо видимі на знімках. До них відносять форму, розміри, колір, фототон, тіні, структуру зображення.

Форма – це ознака фотозображення об'єкта на знімку, яка передає його загальні обриси, об'єм і характер меж. Стійкість ознаки зберігається зі зміною масштабу зйомки. Розрізняють геометрично визначену та невизначену форми. Перша властива, зазвичай, різноманітним спорудам (будівлям, мостом тощо) і є надійною дешифрувальною ознакою. Друга характерна для багатьох природних об'єктів (ліс, луки), часто її неможливо використати як дешифрувальну ознаку. Також розрізняють компактну, лінійну (витягнуту), плоску та об'ємну форми. Для дешифрування важливо те, що витягнуту форму, на відміну від компактної, можна розпізнавати на знімках дрібнішого масштабу. Малюнок витягнутої (ізометричної) форми часто є важливою дешифрувальною ознакою (наприклад, за характером звивистості можна відрізнити дорогу від ріки). Отже, просторова форма об'єкта є важливою дешифрувальною ознакою для розпізнавання штучних і природних об'єктів.

Розмір – це довжина, ширина та стереоскопічна висота фотозображення об'єкта. Ознака змінюється зі зміною масштабу зображення. За цією ознакою об'єкт

можна вирізнити серед однорідних об'єктів шляхом зіставлення їхніх розмірів.

Фототон зображення на чорно-білих знімках – це важлива пряма дешифрувальна ознака, проте часто нестійка. Фототон залежить від багатьох чинників, насамперед від характеру поверхні, її відбиваючої здатності, від умов фотографування тощо.

На знімках вдається вирізнити до 25-ти градацій фототону [1]. На практиці ж застосовують шкалу із семи позицій: білий, майже білий, ясно-сірий, сірий, темно-сірий, майже чорний, чорний. Зазначимо, що фототон – не дуже надійна ознака і, що важливо, її використовують у поєднанні з іншими ознаками. Об'єкти місцевості зрідка мають однорідний тон, оскільки він властивий тільки гладким або дуже одноманітним поверхням, таким як вода, сніг. Здебільшого на загальному тлі однорідного тону трапляються темніші або світліші неоднорідності. Під час дешифрування варто враховувати важливу

закономірність зміни тону. Зазвичай об'єкти, які відображаються крайніми величинами шкали тональностей, є стійкішими, ніж ті, які відображаються середніми показниками.

Тінь розрізняють власну і падаючу (рис.5.17). Власною тінню називають тінь, яка вкриває не освітлену сонцем частину поверхні об'єкта. Вона підкреслює об'ємність і характер поверхні предмета (форма даху будівлі, звивистість гірського хребта). Падаючі тіні передають форму об'єктів, проектуючи їх на підстиляючу поверхню. Часто падаючі тіні слугують єдиною дешифрувальною ознакою, і доволі надійною для точного розпізнавання об'єктів (окремі дерева, труби тощо). На космічних знімках тіні відображаються слабо, чітко видно тільки тіні від хмар і предметів, що особливо виділяються над поверхнею. Деякі об'єкти, наприклад опори ліній електропередачі та зв'язку, антенні щогли, ракети на стартових позиціях, спостережні вишки та дротяні загорожі, найчастіше розпізнаються тільки за тінню.

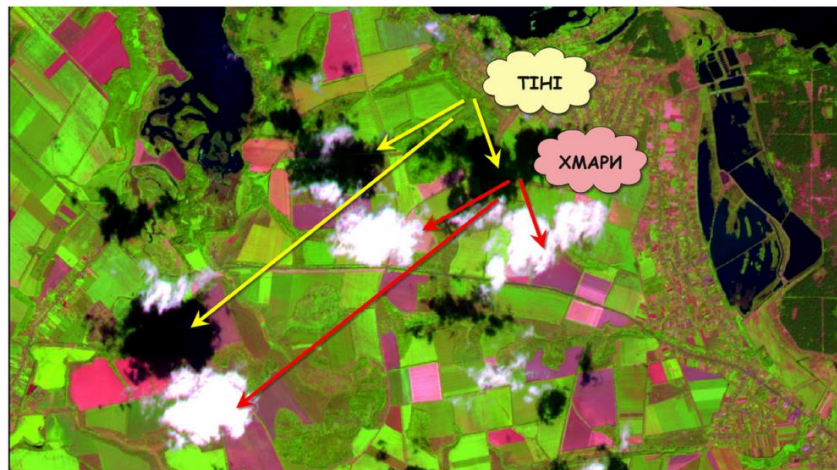


Рис. 5.17 – Визначення хмар та їхніх тіней на космічному знімку Sentinel 2

Колір об'єктів важлива дешифрувальна ознака для кольорових і спектрональних аерознімків. Зображення об'єктів у кольорі дає ширші можливості для дешифрування, аніж чорно-біле зображення. Так, на кольорових знімках літнього періоду можна розпізнати набагато більше елементів місцевості та їх деталей, ніж взимку, оскільки влітку місцевість має більшу кольорову гаму.

Структура відображення об'єкта на знімку є найстійкішою комплексною ознакою, яка практично не залежить від умов фотозйомки і відображає співвідношення площ і форм об'єктів, їхню кількість, розміри, фототони. Приклади структур: зерниста, смугаста, плямиста, плямисто-зерниста, сітчаста. Зернистий малюнок характерний для лісової і чагарникової рослинності, смугастий утворюється зі смуг, розташування яких є важливою дешифрувальною ознакою. Рівномірне і паралельне розташування смуг характерне для орних угідь. Звивисті смуги різного тону, які не мають чітких меж, вказують на наявність схилів. Тонка, звивиста смугастість притаманна еоловим утворенням. Структура також може бути однорідною, що характерне для водних і більшості антропогенних об'єктів.

Часто об'єкти або їхні характеристики не відображаються на знімку (наприклад, невеликі мости, пристані); або ж не мають чітких дешифрувальних ознак (наприклад, прямокутну форму може мати житловий будинок або прибудова). Тому у випадку, коли прямих дешифрувальних ознак часто недостатньо для розпізнавання об'єктів, водночас з ними використовують непрямі.

Непрямі ознаки відображають закономірності між об'єктами, які проявляються у вигляді певних взаємозв'язків між об'єктами, а також у зміні властивостей одних об'єктів унаслідок впливу на них інших об'єктів. Наприклад, у селах житлові будівлі розташовані ближче до вулиці, ніж нежитлові. Дороги або стежки, що підходять до річки, а потім продовжуються на іншому березі, вказують про наявність порома, човнового перевозу або броду.

Деякі об'єкти можуть бути закриті іншими об'єктами. Наприклад, дешифруючи верхній ярус відомої рослинної асоціації, можна визначити рослини, які заселяють нижні яруси.

Об'єкти, які тимчасово відсутні на момент зйомки (наприклад, пересихаючі влітку водойми можна дешифрувати за наявністю котловини подібних понижень). Також непрямою ознакою можна вважати певну діяльність або функціонування об'єкта. Здебільшого це стосується антропогенних об'єктів, таких як: різні розроблення, кар'єри, гідровузли тощо. Використання непрямих ознак для дешифрування об'єктів за відсутності прямих ознак можливе лише за умови детального вивчення території та врахування ймовірності появи тієї чи іншої ознаки. Так, наприклад, за рисунком степової дороги можна зробити висновки про ґрунти місцевості: на вологих ділянках дорога сильно розмита, має багато об'їздів; на піщаному ґрунті — межі дороги розмиті; на глинистому ґрунті контури дороги різко виражені, ніби врізані.

Комплексні дешифрувальні ознаки, які відображають структуру природно-територіальних комплексів, є надійнішими та стійкішими, ніж прямі ознаки їхніх елементів. Вони становлять основу ландшафтного методу дешифрування. Тональна структура зображення складається з таких компонентів, як форма, площа та тони.

Дешифрування гідрографічних об'єктів. Розпізнавання водойм і водотоків на знімках, зазвичай, не вимагає значних зусиль, оскільки їхні берегові лінії, здебільшого, мають доволі чіткі обриси, а відображення водної поверхні добре відрізняється від навколишніх ділянок суші. На тон фотозображення водних об'єктів впливають умови зйомки, глибина, колір дна, чистота, прозорість, колір та поверхня води, наявність водної рослинності. Тон зображення буде темнішим зі збільшенням глибини водойми, коли дно складене з мулу, глини або торфу. Дрібні ріки та озера з піщаним або кам'янистим дном мають на знімку переважно світлий тон. Мутна та спінена вода також надає зображенню світліший тон [1].

Важко дешифрувати невеликі ріки та струмки, сховані під пологом лісу і чагарником. Зазвичай при цьому можна використати таку непряму ознаку, як зміна фототону зображення крон дерев. Пересихаючі гідрографічні об'єкти характеризуються декількома смугами різного тону, що відповідають

поступовому падінню рівня води та появі ліній висихання. Найнижча смуга, яка є найтемнішою, відображає максимально зволожену ділянку водойми.

Дешифрування рельєфу. Об'єктами топографічного дешифрування рельєфу є такі форми, які мають різкі перегини, оголені та незадерновані схили. Також це може бути частина задернованих, проте невеликих за розмірами форм: наприклад, обриви, зсуви, осипи, скелі, гірські льодовики, яри.

Дешифрування лісів і чагарників. Ліси і чагарники мають на знімках зернистий рисунок. Розмір зерен залежить від величини крон дерев, отож зернистість зображення деревостою крупніша, ніж чагарників. У зображеннях на знімках деревостою чітко вирізняється неправильна зернистість, створювана чергуванням округлих крапок – проєкцій крон дерев і тіней, які відображаються у вигляді темних плям. Колір фотозображення, розмір цих округлих крапок, їхній розподіл всередині контуру визначає склад та вік деревостою. Також на структуру поверхні впливає склад порід: ялинники мають темніше зафарбування, змішані ліси – світліше, соснові ліси та діброви мають строкате зафарбування контурів через суттєву розрідженість їхніх деревостоїв.

Суцільні зарості чагарників характеризуються дрібною зернистістю, іноді – трохи змазаною структурою фотозображення. Характерна риса напівчагарникової рослинності – її розрідженість, між окремими особинами можна дешифрувати поверхню землі або трав'янистого покриття.

Рілля на знімках має чіткі межі, зазвичай, у вигляді чотирикутників. Для них характерний паралельний смугастий рисунок, який відповідає борознам оранки.

Різновидом ріллі є городи, які відрізняються невеликими розмірами та близькістю до будівель.

Дешифрування луків. Заливні луки характеризуються безструктурним або розріджено-точковим рисунком, їх визначають на основі контакту з лініями рік. Сінокісні залівні луки, крім перелічених вище ознак, мають зображення слідів сінокосіння (наприклад, стіг сіна у вигляді опуклих рисок, рядки скошеної трави – світлі зигзагоподібні лінії тощо). Суходільні луки дешифруються за контурами невизначеної форми, безструктурного рисунка та оточені, зазвичай, лісами або ріллею. Сінокісні суходільні луки дешифрують за ознаками сінокосіння.

Дешифрування боліт. Різні типи боліт на знімках виглядають по-різному, проте, здебільшого, вони вирізняються неправильною формою з округлими плавними обрисами. Зерниста структура вказує на залісненість боліт. За відсутності дерев зображення щільне, різної тональності та залежить від характеру рослинності.

Дешифрування населених пунктів не містить суттєвих труднощів. Будинки чітко відокремлюються від інших об'єктів більш-менш правильним розташуванням та характерною формою (різкість обрисів, вертикальність стін, наявність тіні тощо).

Дешифрування доріг. Залізниця відрізняється прямолінійністю з плавними та округлими поворотами. Відсутність крутих поворотів, а також велика кількість насипів та уступів дає змогу відрізнити на знімках залізницю від шосейних доріг. Природні ґрунтові дороги зображають у вигляді тонких,

здебільшого світлих ліній різної ширини. На відміну від доріг вищих класів, вони характеризуються більшою звивистістю та крутими поворотами.

Приклад ручного дешифрування вирубки лісу на основі синтезованого псевдо-кольорового зображення з комбінацією каналів B12, B08, B04 космічного знімку Sentinel 2 наведено на рис. 5.18. Райони вирубки лісу окреслені на знімку червоним кольором. Перевірку правильності зробленого дешифрування вирубок лісу було проведено з використанням допоміжної ознаки – наявності тіні. Розглядіти подібну ознаку можливо на зображеннях поверхні високої деталізації, які у вільному доступі розміщені на ресурсі Google Earth Pro. Для цього необхідно у програмі Google Earth Pro додати створений шейп – файл вирубок лісу. Тоді, розглядаючи більш детально зображення ділянки лісового масиву з накладеною на нього напівпрозорою картою вирубок, можливо візуально оцінити правильність дешифрування космічного знімку (рис. 5.19).



Рис. 5. 18 – Ручне дешифрування вирубки лісу

Але при цьому варто враховувати, що темпоральна розрізненість окремих ділянок поверхні високої деталізації гірша (проводиться набагато рідше) ніж знімання супутниками середнього розділення. Тому окремі ділянки оновлення виглядають на знімку вже не як свіжа вирубка, а окремі ділянки стиглого лісу являють собою свіжу вирубку.

На рис. 5.20 наведені результати класифікації за допомогою алгоритму «Spectral Angle Mapping» програми QGIS [13]. Вирубки виділені червоним кольором, стиглий ліс – темно зеленим, а оновлений – салативим. Фіолетовим кольором виділенні відкриті ділянки поверхні землі. Чорними кольором обведені контури вирубок, що були отримані за результатами ручної класифікації. Як видно практично всі ділянки червоного кольору, що відповідають свіжим вирубкам за результатом автоматичної класифікації співпали з результатами ручної класифікації. Решта ділянок ручної класифікації визначена алгоритмом як ділянки молодих насаджень, що оновлені після вирубок, або відкриті ділянки поверхні.



Рис. 5.19 – Накладання шейп – файлу вирубок лісу у програмі Google Earth Pro

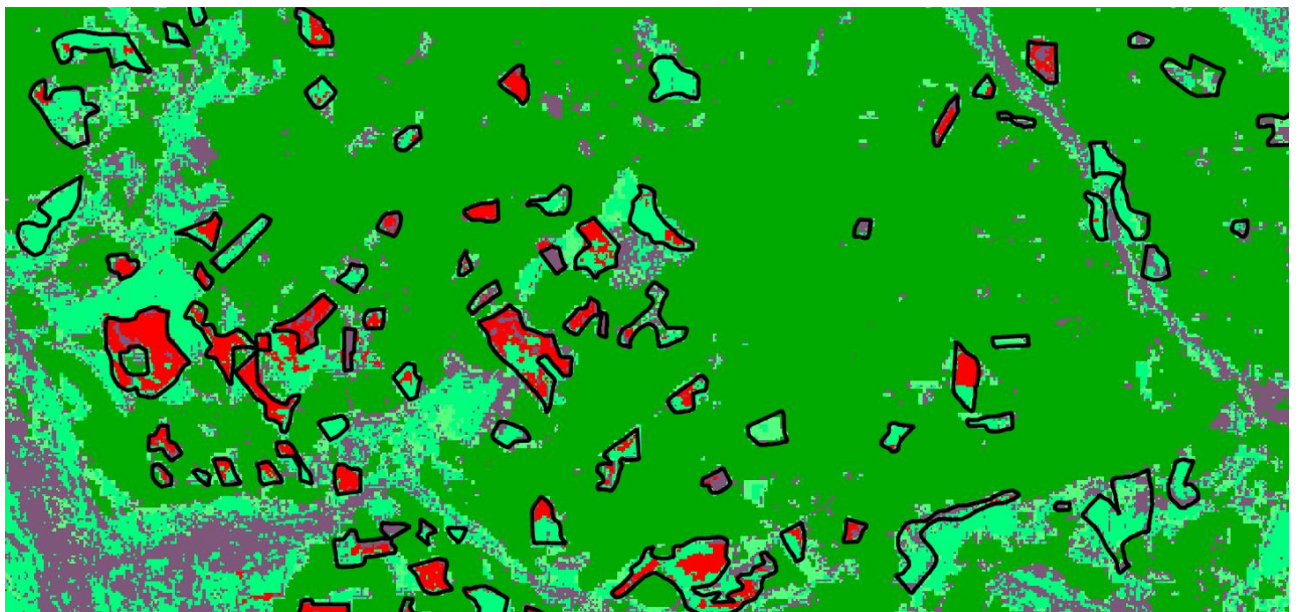


Рис. 5.20 – Результати класифікації

Метод створення індексних зображень — один із найпростіших та найпоширеніших методів дешифрування супутникових знімків, що також базується на спектральних особливостях об'єктів дослідження та фактично є математичною операцією з кількома спектральними каналами. Однак, на відміну від методу комбінування каналів, у результаті формується індексне зображення, піксель якого може набувати значення у певному визначеному діапазоні значень. Це дозволяє порівнювати між собою отримані у результаті індексні зображення на різні території чи зроблені у різні часові періоди. Одним з

найпоширеніших індексів є нормалізований вегетаційний індекс NDVI, а також нормалізований водний індекс NDWI [1,6].

Спектральні індекси – це показники, що характеризують співвідношення відбиття електромагнітного випромінення в різних каналах супутникової зйомки. Спочатку їх застосовували в дистанційному зондуванні для оцінки стану рослинності, тому їх називають *вегетаційними індексами*. Перетворення спектральних каналів застосовують, щоб отримати нормалізований діапазон значень, що дають таку інформацію, яка найбільше підходить для вивчення конкретного об'єкта, інакше кажучи, підкреслити необхідну і видалити зайву інформацію. Такий метод може поліпшити результати як візуального дешифрування, так і простих методів автоматизованої класифікації.

$NDVI = (B08 - B04) / (B08 + B04)$ - нормалізований диференційний індекс рослинності часто використовується для моніторингу посухи, для сільськогосподарського виробництва тощо. Поглинання хлорофілу у червоній смузі і відносно висока відбивна здатність рослинності в ближній інфрачервоній смузі використовуються для розрахунку NDVI. Зелені рослини в процесі фотосинтезу поглинають основну частину видимого світлового спектра і відбивають хвилі ближнього інфрачервоного (рис. 5.21). NDVI реагує на наявність хлорофілу в біомасі, відповідно, за цією логікою, найбільші значення NDVI має ліс, менші – чагарники, а найменші – трав'яниста рослинність, але на практиці ця залежність виконується дуже рідко. Наявність сільськогосподарських угідь, пожеж, активності шкідників, присутність заболоченої рослинності – все це порушує закономірний розподіл біомаси і, як наслідок, листяний ліс має таке саме значення NDVI, як і деякі с/г культури, а ліс, уражений шкідником, рівнозначний сухій траві. Варто зазначити, що крім рослинності цей спектральний індекс застосовують для дослідження водойм, ґрунтів, снігу, відділення меж суші від води, тощо.

$SIPI = (B08 - B02) / (B08 - B04)$ - дає змогу визначити початкову стадію хвороби рослин. Аналізується разом з NDVI SIPI є хорошим індикатором для використання в районах з високою мінливістю структури рослинності.



Рис. 5.21– Визначення стану рослинності за значеннями NDVI

$NBR = (B8A - B12) / (B8A + B12)$ - стандартизований індекс горіння використовує канали NIR і SWIR для виділення згорілих ділянок, приглушує різницю в освітленні та атмосферних умовах. Перед використанням цього

індексу ваші зображення мають бути скориговані з урахуванням значень відбиття.

$NDWI = (B03 - B08) / (B03 + B08)$ - нормалізований різницевий водний індекс використовує відбите ближнє інфрачервоне випромінювання і видиме зелене світло, щоб посилити присутність елементів ґрунту і наземної рослинності. NDWI дає змогу дослідникам оцінити каламутність водних об'єктів за допомогою космічних знімків.

У цьому розділі наведені приклади розв'язання тематичних задач із використанням програмного продукту QGIS. Перелік інструментів та приклади розв'язання тематичних задач за допомогою програмного продукту ArcGIS Pro наведені у додатку А [14].

Контрольні питання

1. Що таке тематична обробка космічних знімків?
2. Які операції виконуються на етапі попередньої обробки космічного знімку?
3. Що таке мозаїка зображення космічних знімків?
4. У чому полягає основне завдання класифікації космічного знімку?
5. Що таке спектральні та тематичні класи?
6. Що таке прямі та непрямі дешифрувальні ознаки?
7. Які основні методи застосовуються для тематичної обробки космічних знімків?

6. Бортові радіотехнічні пристрої космічних апаратів ДЗЗ

6.1. Принципи побудови РЛСБО із синтезованою апертурою антени

Переважна більшість систем ДЗЗ, що експлуатуються сьогодні у світі, відносяться до систем оптико-електронного спостереження. Однак радарні системи стають невід'ємним компонентом систем ДЗЗ, доповнюючи оптико-електронне спостереження, для забезпечення цілодобового та незалежного від погодних умов глобального моніторингу об'єктів на поверхні Землі. Провідні космічні держави прагнуть у найближчі роки ввести до складу національних космічних угруповань супутники, що оснащені радіолокаторами із синтезованою апертурою [4-6].

Система SAR-Lupe (Synthetic Aperture Radar), призначена для радіолокаційного зондування Землі з надвисокою роздільною здатністю (< 1 м у смугі 5 км) і передбачає розгортання орбітального угруповання з п'яти КА. Протягом доби КА SAR-Lupe дозволяють отримувати більше 30 знімків території, що цікавлять замовника, при цьому інтервал до отримання кінцевого продукту в середньому складає менше 11 годин. Канада запустила новий супутник Radarsat-2 з РСА більш високого розділення (3 м замість 8 м) із поляризаційними режимами зйомки. Космічне агентство Італії розробило систему подвійного призначення з чотирьох КА COSMO з радіолокаторами X-діапазону високого розділення (від 1 м до 100 м). Китай одночасно розробляє кілька проектів КА з РСА високого розділення з радіолокаційною апаратурою L-діапазону, що створені Китайською національною космічною адміністрацією CNSA для контролю надзвичайних ситуацій. Європейське космічне агентство здійснило запуск супутників ERS-1 і ERS-2 з радіолокаційними системами із синтезованою апертурою, що забезпечують отримання найбільшої кількості вичерпних радіолокаційних даних, які покривають багато віддалених областей земної кулі.

Принцип дії РСА заснований на використанні переміщення бортової антени РЛС для послідовного формування антенних решіток великих розмірів на траєкторії польоту. Бортова антена, як правило, при цьому має невеликі розміри і достатньо широку діаграму спрямованості. У кожній точці траєкторії польоту носія РСА формує цілком певну амплітудну і фазову інформацію про ділянки місцевості і об'єктів, що проглядаються, на ній, відповідну миттєвим значенням їх поточних координат відносно КА. Виділяється ця інформація з сукупності імпульсних радіосигналів, що приймаються, зазвичай за допомогою спеціальних фазових детекторів, а потім фіксується в тому або іншому пристрої пам'яті. За допомогою РСА отримують радіолокаційне зображення дуже високої якості. Використовуючи таке зображення місцевості, можна було б вирішувати широкий круг завдань безпосередньо на борту КА. Для цього потрібно обробляти сигнали РСА і формувати радіолокаційне зображення під час польоту. Саме в зв'язку з цим виникає необхідність розробки і впровадження цифрових способів обробки сигналів РСА і цифрових методів управління нею. При введенні цифрової обробки і цифрового управління до переваг РЛС з цифровим синтезуванням апертури антени (ЦРСА) додаються оперативність обробки і гнучкість в її управлінні. Реалізація цифрових алгоритмів обробки сигналів не пред'являє яких-небудь специфічних вимог до основних характеристик приймача-передавача і антенної системи ЦРСА (таких, як стабільність частоти

генераторів, потужність передавача, погрішність стабілізації і точність орієнтації антени в просторі, чутливість і смуга пропускання приймача і т. д.) в порівнянні з аналоговими способами обробки сигналів. У ЦРСА, так само як і в РСА з оптичною обробкою, можуть використовуватися всі новітні досягнення як в області НВЧ техніки, так і в області формування і обробки зондуючих радіосигналів складної форми. Перевагою ЦРСА є можливість обробки отриманих радіолокаційних зображень безпосередньо на борту, та передачі їх користувачу у необхідному вигляді.

Формування синтезованої апертури антени полягає у запам'ятовуванні відбитих від цілей сигналів на ділянці траєкторії польоту. Довжина ділянки дорівнює довжині антени, що синтезується. Наступна обробка зареєстрованих сигналів у бортовій або наземній апаратурі дозволяє отримувати радіолокаційне зображення з високим розділенням. Для формування синтезованої апертури антени використовується безпосередній рух носія.

Спочатку розглянемо принцип приймання сигналів реальною антенною. Безперервний розкриття реальної антени може бути замінений решіткою вібраторів. Сигнали, що приймаються вібраторами такої решітки, будуть мати однакові фази при паралельності фронту прийнятої хвилі осі решітки. Прийняті таким чином синфазні сигнали можна подавати на суматор, де формується результуючий сигнал (рис. 6.1). При цьому формується діаграма спрямованості (ДС) антени шириною θ_p , величина якої зворотно пропорційна довжині антени L .

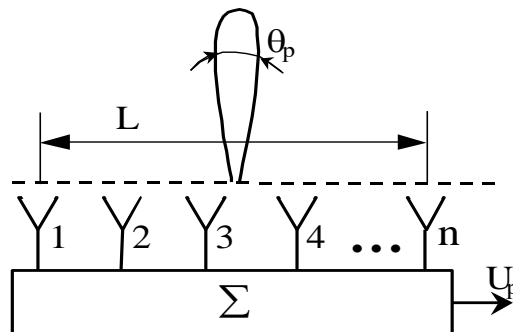


Рис. 6.1 - Формування ДС реальною антенною решіткою.

Принцип формування синтезованої антени (СА) носієм подано на рис. 6.2. При русі носія без маневру можливо вважати, що впродовж короткого часу його траєкторія прямолінійна. При збільшенні швидкості польоту довжина ділянок майже прямолінійної траєкторії досягає сотень та тисяч метрів. У момент, який відповідає крайньому лівому положенню носія його антена випромінює зондуючий сигнал, а потім приймає відбитий сигнал. Антена носія нерухома і її діаграма спрямованості перпендикулярна лінії шляху носія. Коли почне випромінюватися наступний сигнал, носій займе наступне положення (точка 2) і знов зафіксує відбиті сигнали. Кожне послідовне положення носія, де проводиться випромінювання та приймання сигналів, відповідає одному елементу СА. При польоті носія по прямій лінії формується штучна (синтезована) антенна решітка. За мірою руху носія відбиті сигнали запам'ятовуються і затримуються.

Після прольоту носієм ділянки $X=L$ прийняті сигнали когерентно (у фазі) додаються у момент часу $T_c=X/V$. В результаті сумування, отримується вузька ДС шириною $\theta_{ш}$, яка дорівнює ширині ДС антенної решітки з такими ж розмірами, як і СА.

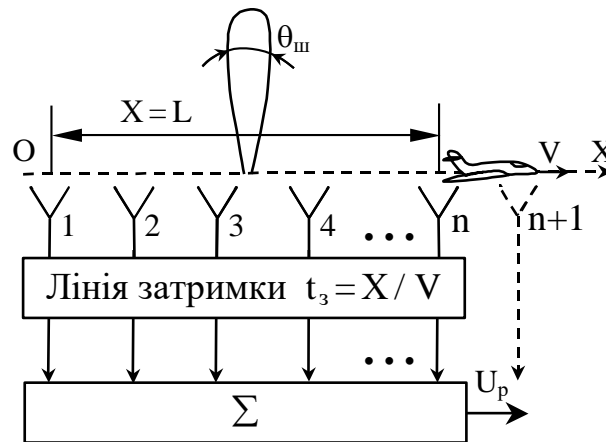


Рис. 6.2 - Формування ДС СА

Якщо ціль знаходиться на осі, яка перпендикулярна штучному розкритву X на відстані $R > 2X^2/\lambda$, то всі сигнали будуть мати однакову фазу і їх сума має максимальне значення. У інших напрямках з'являється зсув між прийнятими сигналами і їх сумарна амплітуда зменшується за значенням (U_p). Якщо у антени з СА один елемент (вібратор – одне положення носія) зліва забрати (1), а справа додати ($n + 1$), то штучний промінь зсується на відстань між двома елементами паралельно самому собі. Для вилучення пропуску цілей відстань між сусідніми положеннями штучного променя повинна бути меншою, ніж лінійна ширина цього променя в робочому діапазоні дальностей. Допустиме зменшення енергії сумарного сигналу буде спостерігатися, якщо фазовий зсув між крайніми елементами СА не буде перевищувати 90° , що відповідає граничній різниці фаз між центральним та крайнім елементом $\lambda/8$ (рис. 6.3).

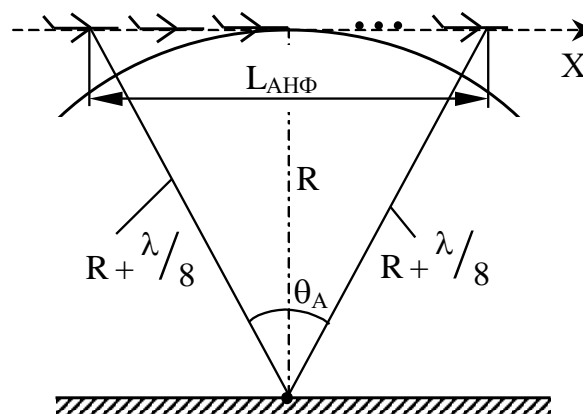


Рис. 6.3 - Пояснення набігу фази у несфокусованій СА

З використанням теореми Піфагора отримаємо рівняння

$$\left(R + \frac{\lambda}{8}\right)^2 = L_{АНФ}^2/4 + R^2. \quad (6.1)$$

Результат рішення (6.1) відносно $L_{АНФ}$ (при знехтуванні доданку $\lambda^2/16 \ll R$) має вигляд

$$L_{АНФ} \approx \sqrt{R\lambda}. \quad (6.2)$$

Ширина ДС визначається

$$\theta_{ш} = \frac{\lambda}{2L_{АНФ}}. \quad (6.3)$$

При підстановці виразу (6.3) у (6.2) отримуємо

$$\theta_{ш} = \sqrt{\frac{\lambda}{4R}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{R}}. \quad (6.4)$$

З урахуванням виразу (6.4) шляхова роздільна здатність на дальності R буде

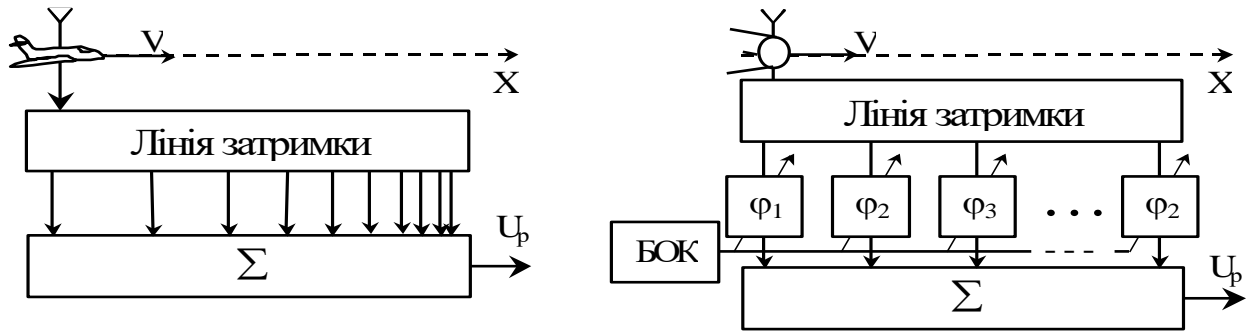
$$\delta_x^{НФ} = \theta_{ш} R = \frac{1}{2} \sqrt{R\lambda} = \frac{L_{АНФ}}{2}. \quad (6.5)$$

Аналіз виразу (6.5) показує, що шляхова роздільна здатність не залежить від розкриву реальної антени і може бути зменшена тільки скороченням довжини хвилі РЛС. Шляхова роздільна здатність погіршується із збільшенням дальності до цілі R , але повільніше, ніж у некогерентних РЛС, так як дальність знаходиться під квадратним коренем. Розглянута антена з СА, яка не компенсує набіги фаз прийнятих сигналів називається *несфокусованою*. РЛС, які використовують таку обробку мають обмежений розмір синтезованої антени ($L_{АНФ}$). Таке обмеження обумовлюється незкомпенсованістю набігів фази на краях антени. При використанні таких антен недостатньо повно використовується енергетичний потенціал РЛСБО. Це пояснюється тим, що когерентне накопичення сигналів здійснюється у межах частини променя реальної бортової антени (її ДС позначена на рис. 6.3 через θ_A).

Вказані обмеження усуваються в РЛС із *сфокусованою* СА. При цьому обробка прийнятих сигналів здійснюється з урахуванням зміни фази сигналів за розкритом у межах усієї ширини променя бортової антени. Створення такої антени спряжено з компенсацією часової затримки прийнятих відбитих сигналів, які надходять з різних дальностей. Крім того необхідно враховувати різницю фаз сигналів між центром та краями ДС антени за рахунок несферичності фронту прийнятої хвилі. Це приводить до використання ліній затримки з нерівномірними (рис. 6.4,а) або рівномірними (рис. 6.4,б) відгалужуваннями. При використанні першого варіанту нерівномірність відгалужувань лінії затримки відповідає нелінійному закону зміни часу затримки. Недоліком такої системи є фокусування тільки на одну дальність. Для того, щоб змінити цю дальність, необхідно змінювати закон створення відгалужувань.

У другому варіанті (рис. 6.4,б) у кожному з відгалужувань знаходиться фазообертач. Кожний з фазообертачів змінює фазу прийнятих сигналів за встановленим законом. Управління фазообертачами здійснюється бортовим обчислювальним комплексом (БОК), за допомогою якого змінюється фокусування антени. Крім внесення змін у фазу сигналів у відгалуженнях лінії

затримки ще можуть міститися вагові підсилювачі. Подана схема дозволяє здійснювати фокусування на конкретну дальність і необхідний елемент поверхневого розділення.



а)

б)

Рис. 6.4 - Структурні схеми формування СА: а – з нерівномірними відгалужуваннями; б – з рівномірними відгалужуваннями

Таким чином, носій рухається з постійною швидкістю V . Нерухомий об'єкт на поверхні Землі (т. О рис. 6.5) пересувається через ДС реальної антени $\Delta\theta_A$ у зворотному напрямку зі швидкістю $-V$.

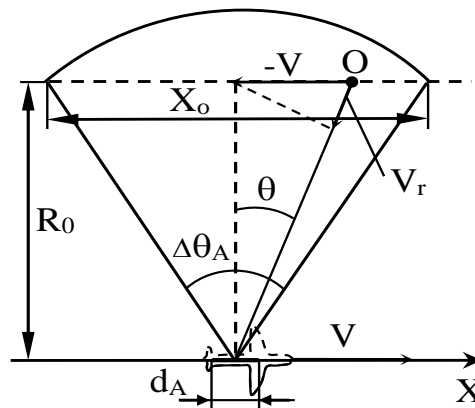


Рис. 6.5 - Пояснення зміни швидкості об'єкту у межах ДС носія

Даний об'єкт знаходиться на відстані R_o від лінії шляху носія. Шлях, який проходить об'єкт у межах ДС реальної антени дорівнює

$$X_o = \Delta\theta_A R = \frac{\lambda R_o}{d_A},$$

де d_A - лінійний розмір антени у горизонтальній площині.

Час опромінення об'єкту, тобто його знаходження у межах ДС, дорівнює

$$\tau_{opr} = \frac{X_o}{V} = \frac{\lambda R_o}{V d_A}.$$

Радіальна швидкість об'єкту з рис. 6.5 дорівнює $V = -V \sin \theta \approx -V \theta$, де θ – кут, що характеризує положення об'єкту всередині ДС реальної антени. Прийнятий сигнал буде мати доплерівське зміщення частоти

$$F_{\partial} = \frac{2V_r}{\lambda} = -\frac{2V\theta}{\lambda}.$$

Доплерівське зміщення частоти буде змінюватись в залежності від кута θ у межах від $-\Delta\theta_A/2$ до $+\Delta\theta_A/2$ за лінійним законом у межах (рис. 6.6 а, б)

$$-F_{\partial o} = F_{\partial \min} = -\frac{V \Delta\theta_A}{\lambda} \leq F_{\partial} \leq F_{\partial o} = F_{\partial \max} = \frac{V \Delta\theta_A}{\lambda}.$$

Це значить, що прийнятий від цілі імпульс тривалістю $\tau_o = \tau_{\text{опр}}$ стає лінійно-частотно модульованим (рис. 6.6 в, г) з шириною спектру

$$\Delta f_c = 2F_{\partial o} = \frac{2V \Delta\theta_A}{\lambda}.$$

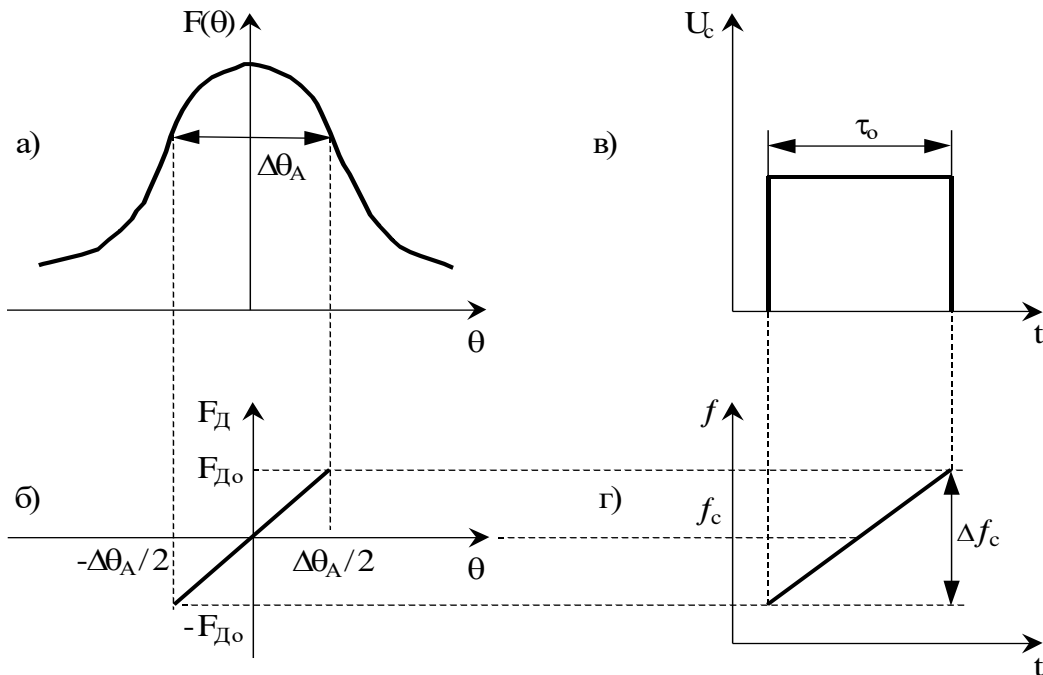


Рис. 6.6 - Зміна частоти зсуву сигналів РСА у межах ДС:
а – нормована ДС бортової антени; б – зміна частоти Доплера; в – імпульс опромінення цілі.

При оптимальній обробці такий сигнал стискається за часом до величини

$$\tau_{cm} = \frac{1}{\Delta f_c} = \frac{\lambda}{2V \Delta\theta_A},$$

а шляхова роздільна здатність РСА буде дорівнювати [4,5]:

$$\delta_X^\Phi = V\tau_{cm} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_A} = \frac{d_A}{2}. \quad (6.6)$$

З виразу (6.6) видно, що шляхова роздільна здатність РСА не залежить від дальності і дорівнює половині розміру реальної бортової антени. Ширину синтезованої апертури можна знайти з виразу

$$\theta_{ш} = \frac{\delta_X}{R_o} = \frac{d_A}{2R_o} = \frac{\lambda}{2R_o \Delta\theta_A} = \frac{\lambda}{2X_o}, \quad (6.7)$$

а розмір СА

$$L_{A\phi} = X_o = \lambda R_o / (2\delta_x). \quad (6.8)$$

Пояснення цього ефекту полягає у тому, що чим менший розмір антени (d_A), тим ширше її ДС $\theta_A = \lambda / d_A$, а значить і більше шлях X_o цілі у межах ДС. При цьому об'єкт довше знаходиться у межах ДС. Значить сумарна енергія сигналів, прийнятих від цього об'єкту, зростає. Це еквівалентно збільшенню коефіцієнта підсилення (звуженню ширини ДС) синтезованої антени за рахунок збільшення величини апертури, що і видно з виразів (6.7) та (6.8). Окрім того, для збільшення розміру СА необхідно розмір реальної бортової антени не збільшувати, а зменшувати. Однак, для несфокусованої антенної решітки збільшення довжини синтезованого розкриття обмежено допустимою розбіжністю фаз прийнятих сигналів. Тому при необхідності збільшити довжину синтезованої апертури необхідно переходити до сфокусованих антенних решіток з СА.

Питання синтезування апертури антени за сигналами зовнішніх джерел випромінювання та визначення їх місцезнаходження на поверхні Землі з космічного носія розглядаються, наприклад, у [15-17].

6.2. Принципи побудови радіометрів

Радіотеплове випромінювання площини S під кутом u до нормалі можна характеризувати щільністю потоку потужності P як [4,5]

$$P = dP / dS \cos u \text{ [Вт / м}^2\text{]}.$$

Спектр потужності радіотеплового випромінювання (суцільний та зазвичай нерівномірний) визначається спектральною щільністю потоку

$$P_f = dP / df \text{ [Вт / (м}^2 \cdot \text{Гц)]}.$$

Щоб уникнути залежності від відстані до точки спостереження, використовують яскравість – спектральну щільність потоку потужності випромінювання на одиницю тілесного кута

$$B_f = dP_f / d\Omega \text{ [Вт / (м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср)]}.$$

Інтенсивність випромінювання тіла залежить від його температури T_T . Для діапазону радіочастот яскравість випромінювання абсолютно чорного тіла, яке поглинає променеву енергію, що падає на нього та переводить її у тепло, описується за формулою Релея-Джинса

$$B_f = 2kT_T / \lambda_B^2,$$

де λ_B – довжина хвилі електромагнітних коливань, що випромінюється.

Цей вираз дозволяє при розрахунку енергетичних характеристик радіометрів використовувати температуру випромінюючого абсолютно чорного тіла T_T . У реальних тілах радіотеплове випромінювання, яке виникає усередині тіла, частково відбивається його поверхнею і неповністю досягає точки прийому. Отже, сигнал, що приймається, слабшає, температура тіла, що уявляється (яскравісна або радіояскравісна), зменшується порівняно з реальною (термодінамічною) температурою. **Яскравісна температура** джерела дорівнює температурі абсолютно чорного тіла з тією ж яскравістю у заданому

спектральному діапазоні, що і дане тіло. Згідно з законом Кірхгофа яскравісна температура $T_{\text{я}}$ пропорційна температурі тіла $T_{\text{Т}}$, тобто

$$T_{\text{я}} = \varepsilon T_{\text{Т}}.$$

Коефіцієнт пропорційності $\varepsilon < 1$ називається випромінювальною здатністю та може виражатися через інтегральний коефіцієнт відбиття за потужністю (p)

$$\varepsilon = 1 - p.$$

Повне випромінювання реального тіла складається з двох складових: власного випромінювання і відбиття електромагнітних коливань, що падають на тіло з навколишнього простору. Інтенсивність повного випромінювання характеризується ефективною яскравісною температурою

$$T_{\text{яеф}} = (1 - p)T_{\text{Т}} + pT_{\text{зв}},$$

де $T_{\text{зв}}$ – яскравісна температура зовнішніх випромінювачів.

Під час огляду земної поверхні, крім сигналів від об'єктів, що спостерігаються, приймається випромінювання неба після відбиття або розсіювання Землею.

Випромінювальна здатність атмосфери, як і будь-якого іншого середовища, відповідно до закону Кірхгофа, визначається через її поглинаючу здатність. Елементарний шар атмосфери товщиною $d\ell$ з коефіцієнтом поглинання $\alpha(\ell)$ та температурою $T_{\text{атм}}$ має яскравісну температуру $dT_{\text{яат}} = \alpha(\ell)T_{\text{атм}}d\ell$. Якщо цей шар віддалений від місця прийому на відстань ℓ , то створований ним сигнал зменшується на шляху поширення відповідно до множника послаблення

$$K(\ell) = \exp[-\Gamma(\ell)],$$

де $\Gamma(\ell) = -\int_0^{\ell} \alpha(\ell)d\ell$ - інтегральний коефіцієнт послаблення або оптична товщина шару ℓ [5].

Отже, яскравісна температура стовпа атмосфери довжиною $L_{\text{атм}}$ визначається за виразом

$$T_{\text{яат}} = \int_0^{L_{\text{атм}}} \alpha(\ell)K(\ell)T_{\text{атм}}(\ell)d\ell.$$

З розрахунків випливає, що середня температура приблизно на 30° нижча температури атмосфери $T_{0_{\text{атм}}}$ біля поверхні Землі. Отже, відповідно маємо [5]

$$T_{\text{яат}} = (T_{0_{\text{атм}}} - 30^\circ)[1 - K(\ell)].$$

Яскравісна температура мінімальна в zenіті, тобто тоді, коли мінімальна довжина атмосферного випромінюючого стовпа.

Яскравісна температури залежить від частоти та має максимум на межі 25 ГГц, що зумовлено парами води.

Температура неба, що пов'язана з космічними шумами, пропорційна

квадрату довжини хвилі λ_B і може бути описана залежністю

$$T_{\text{як}} = T_{0_{\text{атм}}} \lambda_B^2.$$

Тут спрощений розмірний коефіцієнт, який дорівнює одиниці, коли довжина хвилі вимірюється у метрах. У сантиметровому і більш короткохвильових діапазонах впливом космічних шумів можливо нехтувати, однак він може бути істотним вже на дециметрових хвилях. Унаслідок цього сумарна яскравісна температура неба, що зумовлена атмосферою та космічним випромінюванням, має мінімум у діапазоні 1,...,10 ГГц [5].

Можливість розрізнити тіла за інтенсивністю радіотеплового випромінювання залежить від різниці їх яскравісних температур $\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{я1}} - T_{\text{я2}}$. Температура усіх об'єктів земної поверхні, що спостерігаються, приблизно однакова. Тому розходження інтенсивності сигналів радіотеплового випромінювання тіл зумовлено, головним чином, розходженням їх випромінювальної здатності. Якщо відсутні зовнішні випромінювання, то температурний контраст пропорційний різниці випромінювальних здатностей $\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{Т}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$.

Основними вимогами до радіометрів, що визначають принципи їх побудови, є [4,5]:

1. Робота в діапазоні радіочастот, у якому яскравість по-верхні максимальна, а шуми джерел, що заважають, – мінімальні. Тому як робочий вибирають діапазон частот від 1 до 100 ГГц, для якого в даний час можливе створення малощумних приймачів і мінімальні перешкоди від космічного та інших видів паразитного випромінювання. Вибір конкретної робочої частоти визначається задачами радіометра.

2. Забезпечення високої просторової та поляризаційної селекції прийнятого випромінювання при широкому секторі огляду. Ця вимога визначає принципи побудови антенної системи радіометра. Вона повинна мати максимальну спрямованість, забезпечувати роздільний прийом горизонтально і вертикально поляризованого випромінювання, мати сканувальний пристрій для перекриття необхідної смуги огляду.

3. Висока чутливість і точність визначення як абсолютного значення $T_{\text{я}}$, так і контрасту температур $\Delta T_{\text{я}}$ різних ділянок по-верхні на фоні шумової температури.

Оптимальний прийом радіотеплового сигналу зводиться до фільтрації коливання за допомогою смугового підсилювача, квадратичного детектування та некогерентного накопичення за час тривалості сигналу [5]. На практиці найбільше застосування в радіометрах отримали супергетеродинні приймачі як більш надійні в роботі. Істотним недоліком супергетеродинного приймача є порівняно вузька смуга робочих частот, що зумовлена смугою пропускання підсилювача проміжної частоти (10,...,60 МГц).

Підсилювачі високої частоти дозволяють покращити шумові характеристики приймача та розширити його смугу пропускання за високою частотою. Для цього використовують лампи біжучої хвилі (ЛБХ), параметричні

підсилювачі та підсилювачі на тунельних діодах. Існуючі ЛБХ дециметрового та сантиметрового діапазонів забезпечують смугу пропускання 10...30% від несучої частоти при коефіцієнті підсилення за потужністю 20...30 дБ і шумовій температурі 1000...4000 К. Головні недоліки ЛБХ – значні габаритні розміри, маса і потужність, що споживається. Тому ЛБХ застосовують зазвичай лише в радіометрах, що встановлюють на літаках і вертольотах [5].

Останнім часом все частіше застосовують параметричні підсилювачі та підсилювачі на тунельних діодах, що мають величину власних шумів і габаритні розміри менші, ніж ЛБХ. Шумова температура параметричних підсилювачів трисантиметрового діапазону не перевищує 500 К, а коефіцієнт підсилення за потужністю складає 10...20 дБ. Смуга пропускання підсилювачів на тунельних діодах досягає 15% від несучої частоти при коефіцієнті підсилення за потужністю 10...20 дБ та шумовій температурі в кілька сотень градусів у діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль. Використання як тунельних діодів, так і параметричних пристроїв дозволяє реалізувати радіометричні приймачі з малими габаритними розмірами і масою, а також з незначним споживанням потужності джерел живлення, що важливо для бортової апаратури.

Особливістю приймального пристрою радіометра є те, що випадкові зміни його коефіцієнта підсилення можуть бути сприйняті, як зміна температури об'єкта, що спостерігається. Для зменшення цього шкідливого ефекту радіометри будують за модуляційною схемою (рис. 6.7). Модулятор підключає до входу приймача поперемінно сигнали від антени та шумового еталона. Отже, посилювана напруга модулюється з низькою частотою (від десятків герців до десятків кілогерців), глибина модуляції залежить від різниці прийнятого та еталонного сигналів. Ця низькочастотна модуляція сигналу зберігається і після детектування [5].



Рис. 6.7 – Структурна схема радіометра модуляційного типу

Період модуляції вибирають так, щоб коефіцієнт підсилення не мінявся за цей час. Оскільки фаза модуляції відома, то низькочастотний детектор роблять синхронним. Опорна напруга детектора формується синхронізатором, що керує роботою модулятора. На виході детектора виникає напруга, яка пропорційна різниці температур антени та еталона. Як інтегратор використовується фільтр низьких частот. Зміна коефіцієнта підсилення приймача впливає як на корисний сигнал, так і на еталонну шумову температуру. Тому вихідний ефект синхронного детектора слабо залежить від нестабільності посилення в приймальному тракті.

У сучасних модуляційних радіометрах як модулятори часто використовують феритові циркулятори, принцип дії яких заснований на ефекті Фарадея – на явищі повороту площини поляризації радіохвилі в подовжньому магнітному полі. Магнітне поле утворюється за допомогою котушки, намотаної на ділянці хвилеводу, усередині якого розташований феритовий стрижень. Переключення проводиться зміною напрямку струму в котушці. Елементи зв'язку з наступним високочастотним трактом розраховані на визначений вид поляризації хвилі, що передається.

Модуляційні схеми мають істотний недолік: половина енергії вхідного сигналу втрачається на проміжку часу, коли приймач підсилює шуми еталонного джерела, що при модуляції меандром удвічі знижує чутливість радіометра.

Для встановлення однозначної відповідності між показаннями вимірювального пристрою і антенною температурою здійснюють калібрування приймача та антени радіометра. У цьому випадку до входу приймача безпосередньо в процесі вимірів періодично підключають джерело із заздалегідь відомою температурою та фіксують відповідні вихідні сигнали. Як еталон температури застосовують вмонтовані в антенно-хвилевідний тракт узгоджені навантаження, газорозрядні шумові генератори або спрямований опорний рупор, що приймає космічне випромінювання.

Контрольні питання

1. Чим відрізняється принцип синтезування апертури антени у сфокусованій та несфокусованій РСА?
2. Чим визначається роздільна здатність за шляховою дальністю РСА з несфокусованою синтезованою апертурою антени?
3. Чим визначається потенційна роздільна здатність РСА із сфокусованою синтезованою апертурою за шляховою дальністю?
4. Який основний недолік схеми радіометра з модулятором по входу?
5. При якій умові тіла на земній поверхні розділяються радіометром?
6. Від чого залежить роздільна здатність радіометра за горизонтальною та шляховою дальністю?

7. Загальні принципи побудови радіонавігаційних систем

7.1. Класифікація та характеристика радіонавігаційних систем

Під *радіонавігацією* розуміють область науки та техніки, яка охоплює радіотехнічні методи та засоби отримання інформації про положення та рух, а також керування рухомими об'єктами [8].

Радіонавігаційні системи призначені для інформаційного забезпечення точного переміщення рухомого об'єкта за визначеною траєкторією та його точного виводу до заданого пункту в призначений час оптимальним для даних умов способом.

При вирішенні навігаційних задач переміщення об'єкта повинно виконуватись за визначеною траєкторією. Проекцію траєкторії польоту на земну поверхню називають *лінією шляху*. Траєкторія складається із сукупності точок, у яких послідовно повинен знаходитись об'єкт. Точку, у якій знаходиться рухомий об'єкт, називають його *місцезнаходженням (МЗ)* [18].

Геометричну величину або її похідну за часом, яка використовується для визначення МЗ та швидкості об'єктів, називають *радіонавігаційним параметром (РНП)*. Як РНП виступає відстань, сума чи різниця відстаней, кут чи швидкість. Геометричне місце точок, що відповідають одному й тому ж значенню РНП в просторі, називається *поверхнею*, а на площині – *лінією положення*.

Сукупність радіоелектронної апаратури, яка дозволяє визначити РНП, називають *радіонавігаційним пристроєм. Радіонавігаційною системою (РНС)* називається сукупність взаємозв'язаних бортових та наземних радіотехнічних засобів, яка призначена для здійснення самостійного виміру навігаційних параметрів при сумісній з наземними засобами роботи.

Методи визначення місцезнаходження об'єктів спостереження (ОС) можна поділити на *оглядно-порівняльні, позиційні та методи обчислення шляху. Оглядно-порівняльні методи* основані на визначенні структури будь-якого фізичного поля, характерного для даної місцевості, і порівнянні параметрів цього поля з параметрами, які були введені в бортовий запам'ятовуючий пристрій.

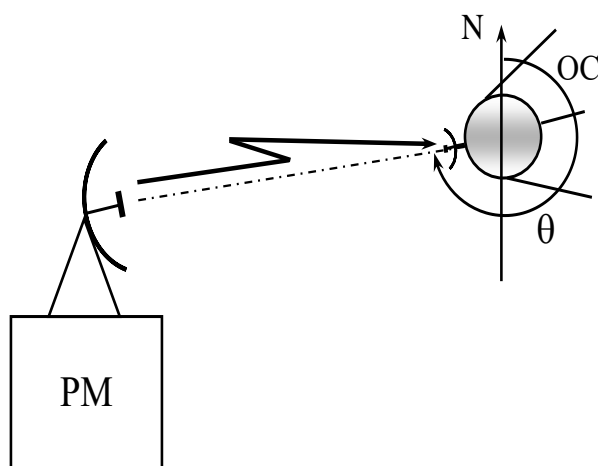


Рис. 7.1 - Кутомірна РНС

(порівняння телевізійних, радіолокаційних та інших зображень місцевості з відповідними картами). *Обчисленням шляху* називають метод визначення координат МЗ ОС, заснований на обчисленні шляху, який пройдено, відносно відомого початкового положення ОС. Апаратура РНС може розміщуватись в одному пункті або в декількох опорних точках, які називають *радіонавігаційними точками (РНТ)*. Апаратура може

знаходиться як на Землі, так і на борту ШСЗ. Відстань між РНТ називають *базою*. **Позиційні методи** засновані на визначенні МЗ ОС як точки перетину двох та більше ліній (поверхонь) положення відносно відомих РНТ. Розглянемо принципи побудови основних типів РНС.

На рис. 7.1 зображена *беззапитна* РНС, у якої РНТ (радіомаяк) знаходяться на поверхні Землі. При цьому визначення РНП здійснюється за сигналом, який випромінює радіомаяк (РМ). В тому випадку, коли РМ випромінює сигнал-відповідь (СВ) тільки при прийнятті сигналу-запиту (СЗ) від об'єкта, реалізується *РНС із запитом (запитно-відповідна)* (рис.7.2). Визначення параметрів здійснюється радіонавігаційною апаратурою, яка знаходиться на борту об'єкта (ОС на рис.7.1 та рис. 7.2). Беззапитні системи характерні для *кутомірних* РНС. При цьому відбувається визначення *пеленгу* об'єкта (кута θ між опорним напрямком та напрямком на ОС). На рис. 7.1 показано визначення пеленгу у точці знаходження ОС. У цьому випадку пеленг вважається *зворотним*. На рис. 7.2 показано визначення пеленгу ОС в точці знаходження РМ. Такий пеленг називається *істинним*. Відлік пеленгу проводиться відносно

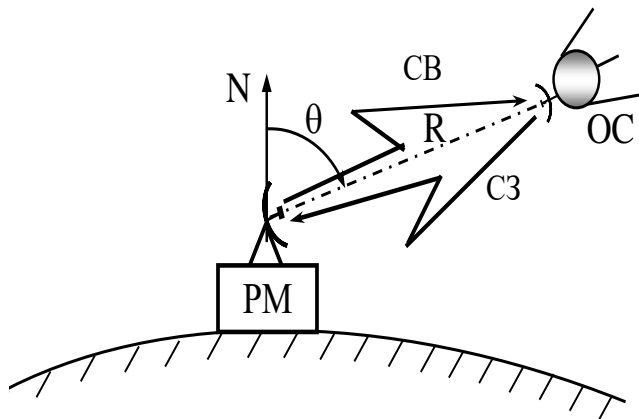


Рис. 7.2 - Запитно-відповідна РНС

обраного опорного напрямку. За такий напрямок звичайно обирають напрямок на північ (N).

Наявність активного сигналу відповідача характерна для *далекомірних* РНС. У таких РНС корисна інформація знаходиться в часі запізнення приходу СВ відносно часу його випромінення. Відповідач у цьому випадку ретранслює з визначеною затримкою прийнятий СЗ. В *кутомірно-далекомірних* РНС (рис. 7.2) відбувається

визначення пеленгу θ та дальності R . Така система найчастіше використовує запитно-відповідний принцип роботи для визначення дальності та беззапитний – кутової координати.

При реалізації *різницево – далекомірного* методу (рис. 7.3) як РНП виступає різниця дальностей, яка знаходиться за виміром різниць часів запізнення сигналів від двох РНТ. Геометричним місцем точок у таких системах є гіпербола на площині чи гіперболоїд обертання – для простору. На рис.7.3 показані дві гіперболи: $\Delta R_{12} = R_2 - R_1 = \text{const}$ та $\Delta R_{23} = R_2 - R_3 = \text{const}$. МЗ ОС визначається як точка перетину гіпербол чи трьох гіперболоїдів. На борту ОС визначають різницю часу приходу сигналів від передавачів станцій РНТ O_1 та O_2 . Ця різниця пропорційна часовому зсуву сигналів. Її визначення дозволяє знайти лише одну лінію положення чи поверхню. Якщо приймач ОС і станції O_1 та O_2 розміщені на поверхні Землі, то вимір дозволяє отримати лінію положення на земній поверхні $\Delta R_{12} = \text{const}$. Для знаходження МЗ ОС необхідна друга пара станцій O_2, O_3 , яка дозволяє отримати другу лінію положення $\Delta R_{23} = \text{const}$. База другої пари d_{23} повинна бути розташована під кутом до бази d_{12} першої пари. У системах

ближньої навігації використовується кутомірний, далекомірний та кутомірно -

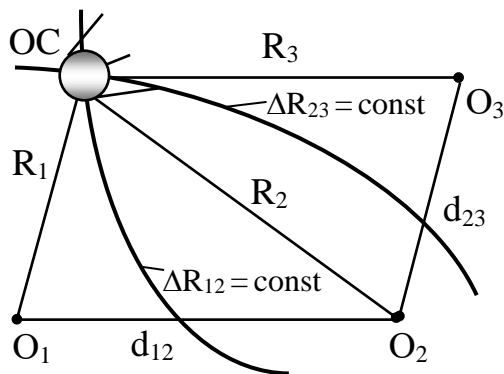


Рис. 7.3- Розташування РНТ у різницево-далекомірній РНС

далекомірний методи визначення координат об'єктів. Вони складаються з мережі РМ на Землі та бортового обладнання, що дозволяє виділити інформацію на борту ОС відносно РМ.

Особливістю будь-якої супутникової РНС (СРНС) є двоетапність її роботи. На першому етапі за даними траєкторних вимірів для фіксованого моменту часу визначаються початкові параметри орбіти навігаційного ШСЗ та

прогнозується його рух. На другому етапі за допомогою бортового обчислювача споживача визначається його МЗ та вектор швидкості (рис.7.4).

Вимірювання дальності та радіальної швидкості у сучасних супутникових РНС проводиться беззапитним методом. При цьому проводиться оцінка часу розповсюдження сигналу, що випромінюється ШСЗ, та доплерівського зсуву частоти сигналу, що приймають. Реалізація цих методів вимагає синхронізації бортових еталонів частоти і часу навігаційних ШСЗ між собою.

До складу сигналу, що випромінюється ШСЗ, входять дані про параметри руху навігаційного ШСЗ - ефемеридна інформація.

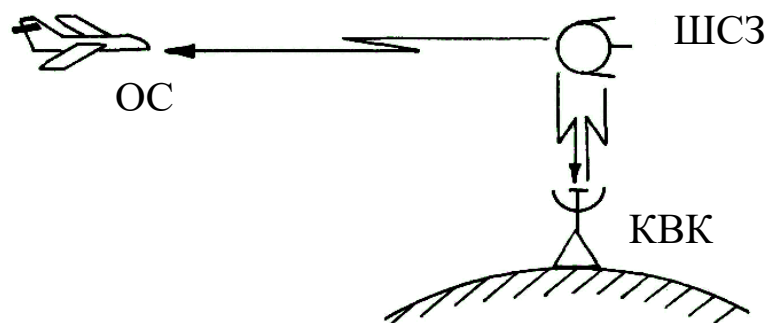


Рис. 7.4 - Супутникова РНС

Синхронізація бортового годинника та еталонів частоти навігаційних ШСЗ здійснюється наземним командно-вимірювальним комплексом (КВК). Отримані параметри траєкторії руху ШСЗ передаються за лініями зв'язку на його борт у запам'ятовувальний пристрій. Звідти дані у складі радіонавігаційного сигналу передаються споживачам. Радіонавігаційний пристрій ОС, який знаходиться в зоні прямої видимості ШСЗ, приймає радіонавігаційний сигнал, вимірює його параметри, виділяє ефемеридну інформацію та визначає своє МЗ.

7.2. Позиційні методи визначення місцезнаходження об'єктів

Далекомірний метод заснований на вимірюванні трьох дальностей R_i від ОС до трьох РНТ для простору та двох – для площини. У радіонавігації як третя

дальність може бути використана висота польоту ОС (рис. 7.5).

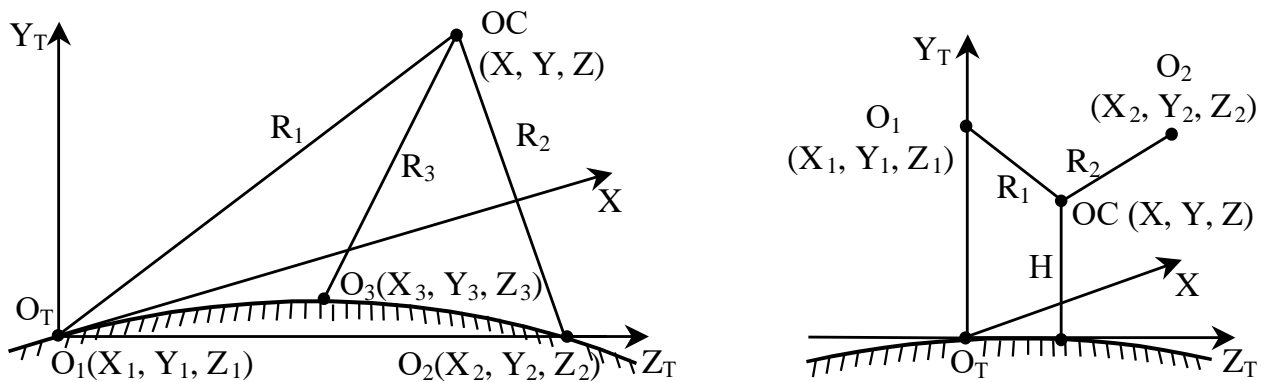


Рис. 7.5 - Визначення МЗ ОС далекомірним методом

Координати ОС у прямокутній СК визначаються як результат рішення системи з трьох рівнянь

$$R_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad i = \overline{1,3},$$

де X_i, Y_i, Z_i – відомі координати опорних точок.

Поверхні положення представляють собою сфери радіусом R_i з центрами у опорних точках O_i . Лінії положення на площині – кола (рис. 7.6). Як опорні точки використовуються РМ, які можуть знаходитися як на поверхні Землі, так і на ШСЗ [18,19].

Сутність радіотехнічного методу виміру відстані полягає у вимірі часу розповсюдження сигналу між РМ та ОС. За часом запізнення та відомій швидкості розповсюдження радіохвиль визначається невідома відстань.

Перевагами методу є висока точність визначення МЗ, яка не залежить від відстаней до опорних точок. Беззапитний метод виміру дальності у радіонавігації

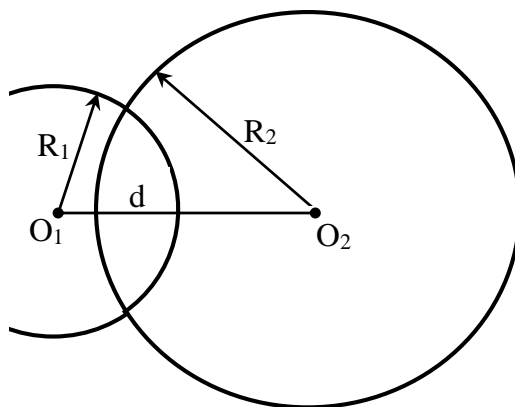


Рис. 7.6 - Лінії положення далекомірного методу визначення МЗ

характеризується високою скритністю, оскільки бортове обладнання ОС не працює на випромінення, а тільки на прийом сигналу від радіомаяка. При цьому спостерігається необмежена пропускна здатність системи. Потужність наземної станції може бути обрана досить великою, у зв'язку з чим досягається досить велика дальність дії РНС. До недоліків можна віднести зниження пропускної здатності системи при використанні запитно- відповідного методу виміру

дальності. При беззапитному методі похибка виміру дальності залежить від розбіжності частот наземного радіомаяка та бортового опорного генератора ОС. Тому для зменшення цієї помилки проводиться їх періодична синхронізація та пред'являються високі вимоги до опорних генераторів (відносна нестабільність

частоти повинна дорівнювати 10^{-9} - 10^{-10}). Одним з методів усунення цього недоліку є притягнення надлишкових вимірювань, які називають. При цьому, для виміру дальностей від РНТ до ОС складається система рівнянь, у якій окрім невідомих дальностей, з'являється ще й невідомий час розсинхронізації. Рішення цих рівнянь дозволяє визначити МЗ ОС за так званими *квзідальностями*. Такий підхід вимагає наявності додаткових РМ у зоні видимості ОС. З іншого боку таке рішення дозволяє усунути неоднозначність визначення МЗ ОС, яка виникає через те, що лінії положення перетинаються у двох точках (рис.7.6). При застосуванні запитного методу виміру дальності помилка виміру дальності визначається в основному тільки нестабільністю частоти бортового опорного генератора і не залежить від часу польоту ОС. Це дозволяє значно знизити вимоги до стабільності генератора (відносна нестабільність має порядок 10^{-5}).

Різницево-далекомірний метод використовує як РНП три різниці дальностей від ОС до РНТ. Просторові координати ОС можуть бути визначені за допомогою трьох вимірних різниць дальностей. Для цього достатньо мати три РНТ. Сигнали, які вони випромінюють, зсунуті один відносно одного на величину бази d (рис.7.7). На ОС знаходиться спеціальний пристрій, який здійснює прийом цих сигналів та вимірювання інтервалів часу їх взаємного запізнення. Вимірні різниці часів пропорційні різниці відстаней. Лініями положення у цьому методі є гіперболи з фокусами у точках розташування ОС, а поверхнею положення – гіперболоїд обертання. МЗ ОС на площині визначається як точка перетину гіпербол, або як точка перетину трьох просторових фігур – гіперболоїдів обертання.

Розглянемо порядок розрахунку площинних сферичних координат ОС $\beta_{oc} = \beta$ та $R_{oc} = R_2$ для випадку вимірювання різниць дальностей

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{12} &= R_1 - R_2; \\ \Delta R_{32} &= R_3 - R_2 \end{aligned} \right\}.$$

При використанні теореми косинусів отримаємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} R_1^2 &= d^2 + R_2^2 + 2dR_2 \cos \beta; \\ R_3^2 &= d^2 + R_2^2 - 2dR_2 \cos \beta \end{aligned} \right\}. \quad (7.1)$$

Щоб виразити через них сферичні координати, які треба знайти, перетворимо систему (7.1) до виду:

$$\left. \begin{aligned} R_1^2 + R_3^2 &= 2(d^2 + R_2^2); \\ R_1^2 - R_3^2 &= 4dR_2 \cos \beta \end{aligned} \right\}. \quad (7.2)$$

Рішення системи (7.2) відносно невідомих β_{oc} та R_{oc} буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} R_{oc} &= \frac{2d^2 - \Delta R_{12}^2 - \Delta R_{32}^2}{2(\Delta R_{12} + \Delta R_{32})}; \\ \beta_{oc} &= \arccos \frac{\Delta R_{12}(d^2 - \Delta R_{32}^2) - \Delta R_{32}(d^2 - \Delta R_{12}^2)}{d(2d^2 - \Delta R_{12}^2 - \Delta R_{32}^2)} \end{aligned} \right\}.$$

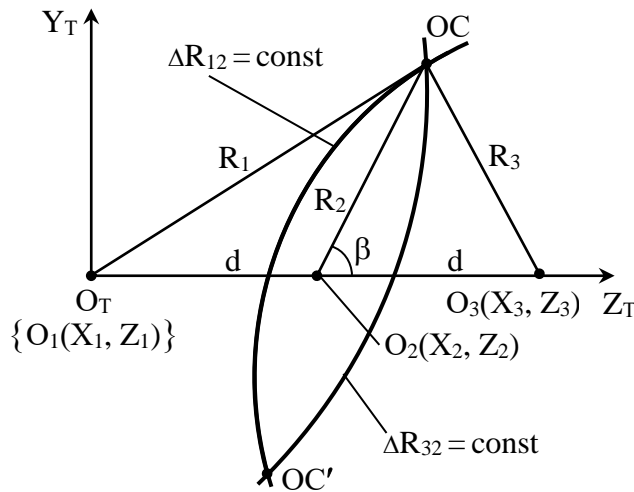


Рис. 7.7 - Визначення МЗ ОС гіперболічним методом

дозволяє наземним станціям обслуговувати необмежену кількість ОС, які знаходяться у межах дальності дії системи. При цьому забезпечується висока скритність ОС, що визначає своє МЗ, оскільки бортове обладнання ОС не працює на випромінення, а тільки на прийом сигналу від радіомаяка.

Недоліком методу є неоднозначність визначення МЗ ОС, яка виникає через наявність другої точки перетину ліній положення ОС' на рис.7.7. Усунення цієї неоднозначності полягає у накладенні умови розташування РНТ не на одній прямій та використанням додаткових РНТ.

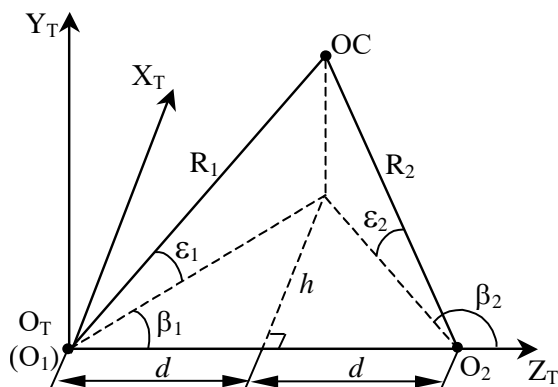


Рис. 7.8 - Визначення МЗ ОС кутомірним методом

Таким чином, у двовимірному випадку для визначення координат ОС необхідно не менш ніж три РНТ, які створюють дві бази. Для просторового випадку мінімальне число баз дорівнює трьом.

До переваг методу відносять можливість використання слабкоспрямованих антен, а також високу точність оцінки МЗ ОС, яка наближається до далекомірної системи і не залежить від часу польоту ОС. Великою перевагою методу є необмежена пропускна здатність. Пояснити це можна тим, що визначення МЗ проводиться на борту ОС беззапитним методом. Це

Кутомірний метод заснований на вимірюванні кутових напрямків на ОС з двох рознесених між собою опорних точок для площини і трьох – для простору. Зменшення числа опорних точок можливо за рахунок проведення у кожній вимірів декількох кутових координат. Так, для визначення просторових координат ОС достатньо виміряти азимуту β_1 та β_2 у двох площинах і кут місця ε – в одній (рис. 7.8). МЗ ОС може бути знайдено і при вимірі

двох кутів місця ε_1 та ε_2 у двох площинах і азимуту β – в одній. Лінією положення для кутів на площині є прямі, а у просторі для азимутів – площини та конуси – для кутів місця.

Знайдемо вирази для визначення МЗ ОС на площині у сферичній СК. Це буде можливо, якщо знайти вираз для визначення дальності ОС, оскільки кут відомий за результатами виміру. Для цього методу на площині справедливі наступні рівняння:

$$R_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 + R_2 \cos \varepsilon_2 \cos(180^\circ - \beta_2) = d_1 + d_2 = d,$$

$$h = R_1 \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 = R_2 \cos \varepsilon_2 \sin(180^\circ - \beta_2).$$

Якщо виразити $R_2 \cos \varepsilon_2$ через виміряні кути $\beta_1 = \beta_{oc}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{oc}$ та $R_1 = R_{oc}$, яку шукаємо, то отримаємо

$$R_{oc} = \frac{d}{\cos \varepsilon_1 (\cos \beta_1 - \sin \beta_1 \operatorname{ctg} \beta_2)}.$$

До недоліків даного методу відноситься те, що неодноразовість пеленгації може призвести до помилок вимірювання координат. Як правило, з найбільшою точністю вимірюється дальність, а кутові координати – значно гірше. Крім того, при збільшенні дальності до ОС лінійні помилки виміру кутової координати збільшуються. Тому точність визначення МЗ ОС значно гірше попередніх методів. Тому даний метод знайшов застосування, в основному, у системах ближньої радіонавігації, де невеликі дальності, а значить, і досить точні виміри координат.

Існує два варіанти побудови кутомірних систем: радіопеленгаторний та радіомаячний. У *радіопеленгаторній системі* спрямованою є антена приймача (радіопеленгатора), а передавач (радіомаяк) має неспрямовану антену. *Радіомаячна система* вимагає спрямовану антену на РМ та неспрямовану – на радіопеленгаторі, який знаходиться на ОС.

Кутомірно-різничево-далекомірний метод є комбінацією двох методів, які були розглянуті вище. При його використанні достатньо мати дві РНТ для визначення просторових координат $\beta_1 = \beta_{oc}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{oc}$ та $R_1 = R_{oc}$ (рис. 7.9).

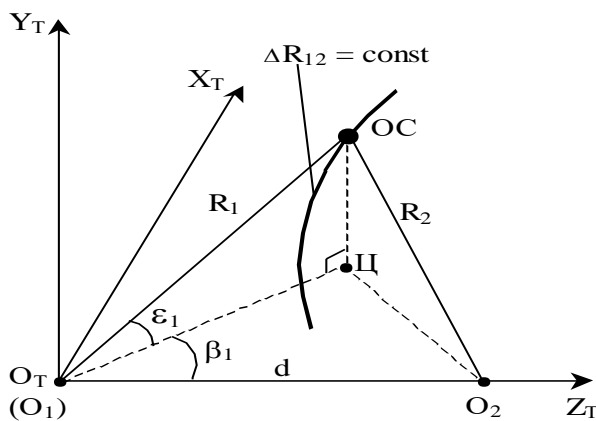


Рис. 7.9 - Кутомірно –різничево – далекомірний метод

В одній з РНТ використовується гостроспрямована антена (точка O_1), що дає змогу виміряти кутові координати ε_1 , β_1 ОС. На ОС вимірюється також різниця відстаней $\Delta R_{12} = R_1 - R_2$ і визначається третя координата $R_{oc} = R_1$ за виразом:

$$R_{oc} = \frac{\Delta R_{12}^2 - d^2}{2[\Delta R_{12} - d \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1]}.$$

У зв'язку з тим, що даний метод є комбінацією двох розглянутих, то його *перевагами* є мінімізація числа РНТ. Однак точність менша, ніж різницево-далекомірною методу, що і є *недоліком* цього методу. Тому цей метод знайшов застосування у системах ближньої навігації.

7.3. Похибка визначення лінії положення позиційними методами

МЗ ОС позиційним методом визначається як точка перетину двох чи більше ліній положення. Похибки, що з'являються при визначенні кожної лінії положення, приводять до того, що обчислене МЗ ОС відрізняється від справжнього. При цьому вважається, що випадкові похибки вимірювань мають гаусівський закон розподілу, а основною мірою точності є середньоквадратичне значення відхилення (СКВ) похибки вимірювання параметру.

Похибка визначення лінії положення будь-якого позиційного методу оцінюється відрізком нормалі ℓ між лініями (поверхнями) положення, що відповідають істинному та вимірюваному значенням РНП.

Рівняння РНП у прямокутній СК буде мати вигляд: $p = p(x, y, z)$ – в просторі і $p = p(x, z)$ – на площині. В межах робочих зон функція $p(x, y, z)$ неперервна і диференційована. Тому зміну параметра p зручно описати градієнтом, який є вектором, що показує напрямок його найшвидшого росту [18,19].

Для аналітично заданих функцій $p(x, y, z)$ ($p(x, y)$) модуль градієнта для поверхні положення

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2},$$

для ліній положення

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2}.$$

Модуль градієнта $g = |\text{grad } p| = |\partial p / \partial \ell|$ дозволяє зв'язати похибку вимірювання параметра Δp з похибкою фіксації поверхонь (ліній) положення $\Delta \ell$. Похибка виміру параметра Δp пов'язана з похибкою фіксації поверхні положення $\Delta \ell$ виразом

$$\Delta \ell = \frac{\Delta p}{g}.$$

Це рівняння показує, що з ростом точності вимірів і модуля градієнта збільшується точність визначення МЗ.

7.3.1. Похибка визначення лінії положення далекомірним методом

У далекомірних системах вимірюється час запізнення сигналу τ_3 , що зв'язаний з РНП – дальністю співвідношенням $R = c\tau_3$ або $R = c\tau_3/2$ – для беззапитних та запитно-відповідних систем, відповідно.

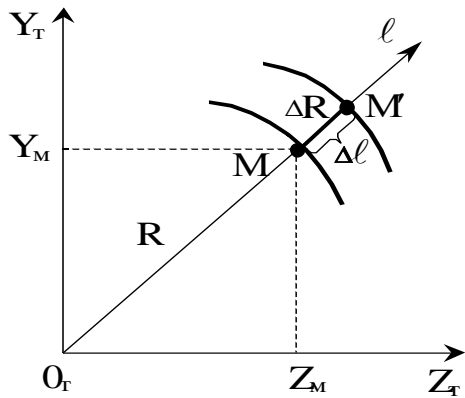


Рис. 7.10. - Похибка лінії положення далекомірного методу запитно-відповідної системи:

$$\sigma_{\ell} = \sigma_R = \frac{C\sigma_{\tau}}{2},$$

де σ_R – СКВ вимірювань дальності R ,
 σ_{τ} – СКВ часової затримки сигналу τ_3 ,
 C – швидкість розповсюдження радіохвиль.

7.3.2. Похибка визначення лінії положення кутомірним методом

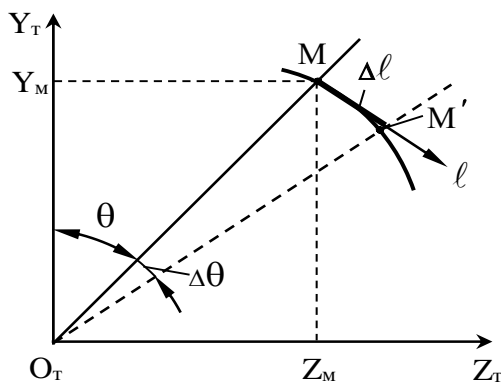


Рис. 7.11 - Похибка визначення лінії положення кутомірним методом

В кутомірних РНС вимірюваним параметром є кут θ (рис.7.11), а похибка його вимірювання $\Delta\theta$. Лінією положення буде пряма $O_T M$. Знайдемо СКВ визначення лінії положення σ_{ℓ} . При $R = \theta = \arctg(Z_M/Y_M)$, отримуємо

$$g_{\theta} = |\text{grad } \theta| = \frac{1}{\sqrt{Z_M^2 + Y_M^2}} = \frac{1}{R}.$$

Тоді

$$\Delta\ell = \frac{\Delta\theta}{g_{\theta}} = R \Delta\theta \text{ і, відповідно,}$$

$$\sigma_{\ell} = R\sigma_{\theta}.$$

Звідти випливає, що в кутомірній РНС СКВ σ_{ℓ} при постійному значенні σ_{θ} пропорційна дальності R до ОС.

7.3.3. Похибка визначення лінії положення різницево-далекомірним методом

Різницево - далекомірні РНС визначають РНП у вигляді різниці відстаней $p = R_A - R_B = R_p$ (рис. 7.12) від ОС до двох опорних точок А та В з базою між ними d .

Тут лінія положення – гіпербола, а Ψ – кут, під яким із точки M , у якій розташований ОС, помітна база. З рис. 7.12 отримаємо вираз

$$R_p = \underbrace{\sqrt{(Z_M + d/2)^2 + Y_M^2}}_{R_A} - \underbrace{\sqrt{(d/2 - Z_M)^2 + Y_M^2}}_{R_B}.$$

Тоді

$$|\text{grad } R_p| = \sqrt{2 \left(1 - \frac{Z_M^2 + Y_M^2 - d^2/4}{R_A R_B} \right)} = \sqrt{2 \left(1 - \frac{R_A^2 + R_B^2 - d^2}{2R_A R_B} \right)}. \quad (7.3)$$

З трикутника AMB за теоремою косинусів $R_A^2 + R_B^2 - d^2 = 2R_A R_B \cos \Psi$. Дане співвідношення підставимо у вираз (7.3) і отримаємо

$$|\text{grad } R_p| = \sqrt{2(1 - \cos \Psi)} = 2 \sin(0,5 \Psi).$$

Тоді лінійне зміщення лінії положення (гіперболи), що викликане похибкою вимірювання різниці відстаней R_p ,

$$\Delta \ell = \frac{\Delta R_p}{2 \sin \Psi/2}.$$

Тоді СКВ визначення лінії положення визначається співвідношенням

$$\sigma_\ell = \frac{\sigma_{R_p}}{2 \sin \Psi/2},$$

де σ_{R_p} – СКВ вимірювань ΔR_p . При врахуванні, що $\sigma_{R_p} = C \sigma_\tau$, отримаємо

$$\sigma_\ell = \frac{C \sigma_\tau}{2 \sin \Psi/2}. \quad (7.4)$$

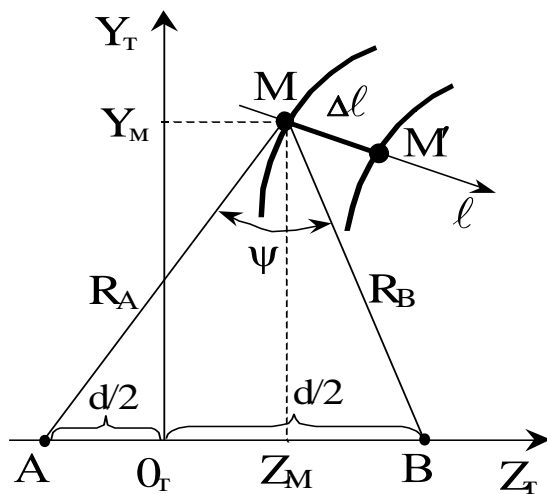


Рис. 7.12 - Похибка визначення лінії положення різницево-далекомірним методом

В різницево-далекомірних РНС СКВ лінійного зміщення σ_ℓ залежить від помилок вимірювання часу затримки σ_τ і кута Ψ . Максимальна точність досягається при $\Psi = \pi$ ($\sin \Psi/2 = 1$), тобто, коли ОС знаходиться безпосередньо над базою системи. При цьому $\sigma_\ell = C \sigma_\tau / 2$ мінімальна і дорівнює СКВ далекомірної системи. При віддаленні об'єкта від бази похибка зростає обернено пропорційно $\sin \Psi/2$. Для одного і того ж віддалення ОС від центра бази похибка σ_ℓ тим менше, чим більша база РНС (відбувається зростання кута Ψ). Отже, РНТ необхідно розміщувати таким чином, щоб у робочій зоні системи кут Ψ був за можливістю більший.

7.4. Радіальна похибка визначення МЗ ОС позиційними методами

Будемо вважати, що ОС знаходиться на значних відстанях від РНТ, відносно яких визначається лінія положення, а помилки визначення лінії положення набагато менше цих відстаней. Тоді сімейство ліній положення, які відповідають різним значенням параметрів, що вимірюються, біля ОС, можна замінити відрізками паралельних прямих незалежно від форми ліній положення.

Припустимо, що істинне значення положення ОС знаходиться в точці М перетину ліній положення АВ і CD (рис. 7.13). Прямі А'В' і С'Д' визначають лінії положення з урахуванням похибок вимірювань, М' – розраховане за результатами вимірів РНП МЗ ОС [19].

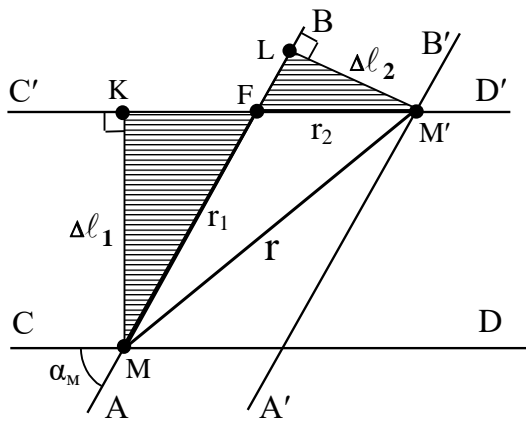


Рис. 7.13 - Радіальна похибка визначення МЗ ОС

Лінії положення АВ і CD перетинаються під кутом α_M . Точки М і М' зміщені одна відносно іншої на відстань r , яка називається **радіальною помилкою**. Це значить, що **радіальна помилка характеризує найкоротшу відстань між справжнім положенням ОС та тим, яке визначено за результатами вимірювань**. Різниця між справжнім та визначеним МЗ ОС виникає через наявність у вимірах помилок.

Якщо помилок не буде, то точки М та М' майже збіжаться. Отримаємо вираз для оцінки радіальної похибки МЗ ОС.

Величини Δl_1 і Δl_2 являють собою похибки визначення ліній положення АВ і CD.

Як випливає з рис. 7.13, $KM \perp C'D'$, $LM' \perp AB$. При позначенні $r_1 = M'F$ і $r_2 = MF$ маємо $r_1 = \frac{\Delta l_1}{\sin \alpha_M}$ і $r_2 = \frac{\Delta l_2}{\sin \alpha_M}$. З $\Delta MM'F$ за теоремою косинусів знаходимо, що

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2 \cos \alpha_M. \quad (7.5)$$

Тоді радіальна помилка визначення МЗ ОС для окремого виміру

$$r = \frac{\sqrt{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 + 2\Delta l_1 \Delta l_2 \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}. \quad (7.6)$$

Вираз (7.6) отримано з урахуванням рівняння $\angle \alpha_M = \angle KFM = \angle LFM'$, при використанні виразів для r_1, r_2 з формули (7.5). У зв'язку з випадковістю похибок Δl_1 і Δl_2 при переході до СКВ вираз для радіальної помилки визначення МЗ ОС буде мати вигляд

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{\ell_2}^2 + \sigma_{\ell_1}^2 + 2\sigma_{\ell_1}\sigma_{\ell_2}\rho \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}, \quad (7.7)$$

де ρ – коефіцієнт взаємної кореляції похибок визначення ліній положення АВ і CD; σ_{ℓ_1} і σ_{ℓ_2} – СКВ визначення відповідних ліній положення.

При незалежних вимірах ліній АВ і CD СКВ радіальної помилки можна визначити наступним чином:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{\ell_2}^2 + \sigma_{\ell_1}^2}}{\sin \alpha_M}. \quad (7.8)$$

Аналіз виразів (7.7) і (7.8) показує, що максимальна точність спостерігається при куті перетину ліній положення, який дорівнює $\alpha_M=90^\circ$.

7.5. Робочі зони радіонавігаційних систем

Для оцінки можливостей РНС і порівняння їх між собою використовують поняття робочої зони (РЗ). **Робоча зона** РНС обмежена площиною (об'ємом – для простору), у межах якої радіальна помилка із заданою ймовірністю не перевищує обраного значення. РЗ не може бути більшою, ніж дальність дії РНС. Розглянемо РЗ РНС, які використовують позиційні методи визначення МЗ ОС [18,19].

7.5.1. Робоча зона далекомірної РНС

Побудову робочої зони розглянемо для випадку далекомірної РНС, яка у своєму складі має бортовий запитник і два наземних відповідачі. Відповідачі розміщені на відстані d .

При однаковості далекомірів, які використовуються, та за умовою $\sigma_{\ell_1} = \sigma_{\ell_2} = \sigma_\ell$ згідно виразу (7.8) отримаємо

$$\sigma_{r_d} = \frac{\sigma_\ell \sqrt{2}}{\sin \alpha_M} = \frac{C\sigma_\tau \sqrt{2}}{2 \sin \alpha_M}. \quad (7.9)$$

Криву рівної точності, яка вимагається для побудови зовнішньої межі робочої зони, знайдемо з (7.9):

$$\sin \alpha_M = \frac{\sqrt{2}\sigma_R}{\sigma_{r_d}} = \text{const}.$$

Таким чином, криві рівної точності далекомірної РНС мають вигляд кіл, тобто ліній, в кожній точці яких кут між напрямками на відповідачі, що розташовані в т. А і В (рис.7.14), є величина постійна.

Відрізок d є хордою цих кіл. Центральний кут, що опирається на цю хорду, дорівнює $2\alpha_M$. З трикутника АОС вираз для радіуса цього кола буде мати вигляд

$$R_{\text{крт}} = \frac{d}{2 \sin \alpha_M}.$$

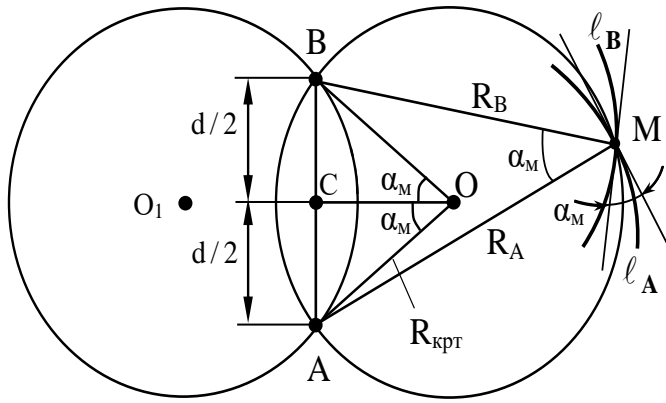


Рис. 7.14 - Пояснення до побудови РЗ далекомірної РНС

Через точки А і В можна провести друге коло рівної точності, яке обмежене максимальною дальністю дії відповідачів $R_{Вмакс}$ і $R_{Амакс}$. Площа, яка обмежена цими колами, і буде РЗ РНС, у межах якої похибка визначення МЗ ОС не перевищує допустиму $\sigma_{гд}$ (рис. 7.15). Робоча зона розташована по обидві сторони від бази обраних відповідачів. Аналіз виразу (7.9) показує, що допустима радіальна помилка $\sigma_{гд}$ досягає мінімального значення при $\alpha_M = \pi/2$ і набуває значення $\sigma_{гд\min} = \sqrt{2}\sigma_R$. Цьому випадку відповідає коло 1. При наближенні ($\alpha_M > \pi/2$) чи віддаленні ($\alpha_M < \pi/2$) від бази, які починаються з кола 1, помилка $\sigma_{гд}$ збільшується. На рис. 7.15 $\sigma_{гд} = 2\sigma_{гд\min}$ відповідає колам 2 і 3.

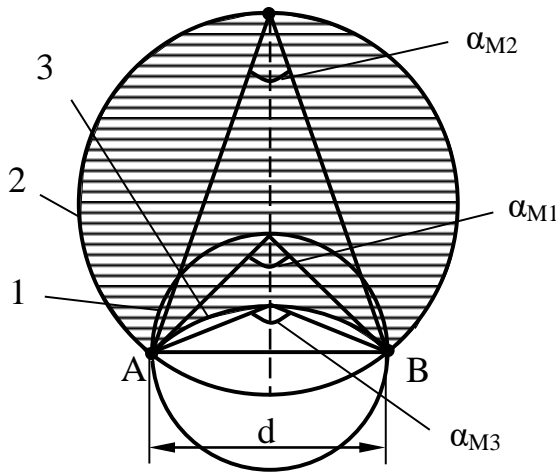


Рис. 7.15 - Робоча зона далекомірної РНС

Якщо задати $\sigma_{гд} = 2\sigma_{гд\min}$, то площа РЗ буде обмежена колами 2 і 3, яким відповідають кути: $\alpha_M = 30^\circ$; $\alpha_M = 150^\circ$. На великих відстанях, коли кут α_M стає дуже малим, похибка визначення МЗ далекомірною системою пропорційна відстані від радіомаяків до ОС ($\sin \alpha_M \approx \alpha_M = d/R$).

Для збільшення площі РЗ далекомірної РНС необхідно обирати максимальний розмір бази, який може бути обмежений тільки дальністю дії радіодалекомірів ОС. Підвищення вимог до точності визначення МЗ, при незмінній точності вимірів, скорочує розміри РЗ.

Для збільшення площі РЗ далекомірної РНС необхідно обирати максимальний розмір бази, який може бути обмежений тільки дальністю дії радіодалекомірів ОС. Підвищення вимог до точності визначення МЗ, при незмінній точності вимірів, скорочує розміри РЗ.

Для збільшення площі РЗ далекомірної РНС необхідно обирати максимальний розмір бази, який може бути обмежений тільки дальністю дії радіодалекомірів ОС. Підвищення вимог до точності визначення МЗ, при незмінній точності вимірів, скорочує розміри РЗ.

Для збільшення площі РЗ далекомірної РНС необхідно обирати максимальний розмір бази, який може бути обмежений тільки дальністю дії радіодалекомірів ОС. Підвищення вимог до точності визначення МЗ, при незмінній точності вимірів, скорочує розміри РЗ.

7.5.2. Робоча зона кутомірної та кутомірно-далекомірної РНС

Побудову робочої зони кутомірної РНС розглянемо на прикладі бортового радіопеленгатора, який працює з двома наземними радіомаяками А і В (рис. 7.16). РМ розташовані в РНТ, які рознесені на відстань d. На рис. 7.16 позначені: β_1, β_2 – істинні азимути ОС у РНТ; R_1, R_2 – дальності від ОС до РНТ А і В; α_M – кут, під яким лінії положення перетинаються; М – точка, у якій знаходиться ОС; ПН та ПД – північні та південні напрямки у місцях розташування РМ. При умові, що меридіани в точках М, А і В паралельні, та врахуванні, що $\sigma_{\ell_1} = R_1\sigma_{\beta_1}$; $\sigma_{\ell_2} = R_2\sigma_{\beta_2}$ та $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = \sigma_\theta$, згідно з виразом (7.8) отримаємо

$$\sigma_{r_k} = \frac{\sigma_\theta \sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{\sin \alpha_M}. \quad (7.10)$$

Виразу (7.10) можливо подати наступним чином:

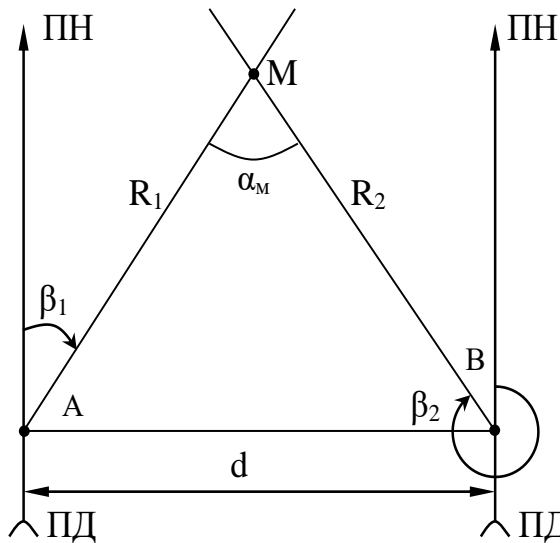


Рис. 7.16 - Геометричні співвідношення у однобазовій кутомірній РНС

$$\sigma_{r_k} = kd\sigma_\theta,$$

де $k = \frac{0,01745}{\sin \alpha_M} \sqrt{\left(\frac{R_1}{d}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{d}\right)^2}$ – коефіцієнт, для якого складаються спеціальні таблиці, σ_θ° – похибка виміру кутової координати в градусах.

При цьому крива рівної точності знаходиться за виразом

$$k = \frac{\sigma_{r_d}}{d\sigma_\theta}.$$

На рис. 7.17 показані криві рівної точності кутомірної РНС, для різних k . В точці C спостерігається мінімальне значення помилки $\sigma_{r_k} = 0,01605d \sigma_\theta$, а відрізок $OC = d/(2\sqrt{3})$.

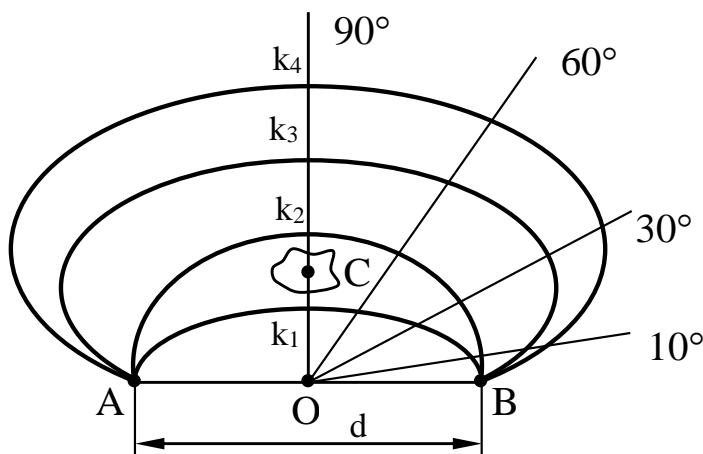


Рис. 7.17 - Робоча зона кутомірної РНС

Необхідно зазначити, що криві рівної точності кутомірної РНС мають складну форму і відрізняються від кіл, які спираються на базу як на хорду. На рис. 7.17 зображені половини РЗ кутомірної РНС. Другі половини є симетричними відносно лінії бази. До особливостей кутомірної РНС відноситься те, що площа обмежена лініями максимальної дальності, як правило, більша її РЗ. Тому для РЗ визначальною є нерівність $\sigma_{r_k} < \sigma_{r_d}$.

Якщо кутомірна система складається з трьох однакових радіопеленгаторів, які створюють дві бази, то точність системи регулюється підбором кута між базами. Однак загалом площа РЗ такої кутомірної системи у порівнянні з однобазовим варіантом підвищується приблизно у два рази. Найкращий кут між базами, при якому досягається мінімум помилки визначення МЗ ОС, досягає 60° .

Особливістю кутомірної–далекомірної системи є сполучення наземних станцій кутомірного та далекомірного каналів в одній точці і постійність кутів, під якими перетинаються лінії положення.

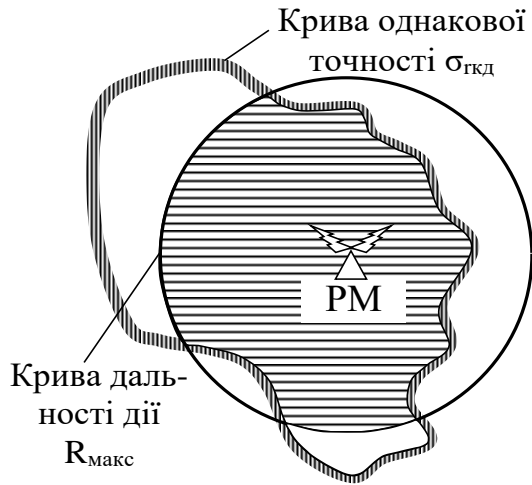


Рис. 7.18 - Робоча зона кутомірно – далекомірної РНС

При побудові кривих рівної точності враховується, що $\sigma_{\ell 1} = R\sigma_{\theta}$, $\sigma_{\ell 2} = \sigma_R$, $\alpha_M = 90^\circ$ і з врахуванням виразу (7.8) отримаємо

$$\sigma_{ГКД} = \sqrt{(R\sigma_{\theta})^2 + \sigma_R^2}.$$

РЗ кутомірно - далекомірної РНС (рис. 7.18) утворюється після нанесення на карту кривих, що відповідають максимальній дальності дії $R_{макс}$ і кривої однакової точності кутомірно-далекомірної системи, як перетин загальної частини площин, що охоплюється цими кривими.

7.5.3. Робоча зона різницево–далекомірної РНС

МЗ ОС з використанням різницево–далекомірних систем визначається як точка перетину ліній положення, кожна з яких представляє собою гіперболу, від двох пар наземних станцій. Дві бази утворюються трьома наземними радіостанціями, одна з яких називається ведучою, а решта – відомими. Таким чином, має місце два різницево – далекомірних пристрої з однаковими базами, які мають загальну опорну точку.

При незалежних похибках визначення ліній положення, згідно з виразом (7.4), з урахуванням (7.8), для радіальної помилки розрахунку МЗ ОС отримаємо СКВ різницево – далекомірної РНС у вигляді:

$$\sigma_{Грд} = \frac{c \sqrt{\sigma_{\tau 1}^2 \sin^2(\psi_1/2) + \sigma_{\tau 2}^2 \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin \alpha_M \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)}. \quad (7.11)$$

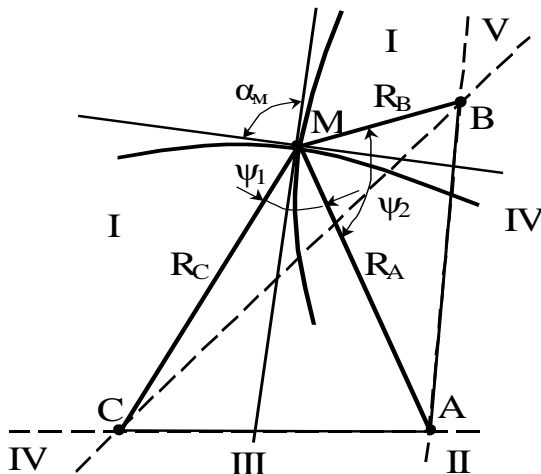


Рис. 7.19 – До пояснення визначення кута α_M

При однаковості вимірювачів і рівнянні $\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = \sigma_{\tau}$ вираз (7.11) перетворюється до вигляду

$$\sigma_{Грд} = \frac{c \sigma_{\tau} \sqrt{\sin^2(\psi_1/2) + \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin \alpha_M \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)}.$$

При використанні трьох станцій (рис. 7.19), які розташовані у точках А, В та С, кут α_M може бути виражений через кути ψ_1 та ψ_2 (з урахуванням, що гіперболи ділять кути ψ_1 та ψ_2 навпіл). При цьому для зон I та II:

$$\alpha_M = \frac{(\psi_1 + \psi_2)}{2};$$

для зон III та VI :

$$\alpha_M = (\psi_1 - \psi_2) / 2 ;$$

для зон IV та V :

$$\alpha_M = (\psi_2 - \psi_1) / 2 .$$

Для I та II зон, які є основними, можна вираз (7.11) записати як:

$$\sigma_{\Gamma_{\text{рд}}} = \frac{c\sigma_{\tau} \sqrt{\sin^2(\psi_1/2) + \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin((\psi_1 + \psi_2)/2) \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)} . \quad (7.12)$$

Якщо ввести у розгляд коефіцієнт

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sin^2(\psi_1/2) + \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin[(\psi_1 + \psi_2)/2] \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)} ,$$

то вираз (7.12) перетвориться до вигляду

$$\sigma_{\Gamma_{\text{рд}}} = K_{\Gamma} c\sigma_{\tau} , \quad (7.13)$$

де c - швидкість світла.

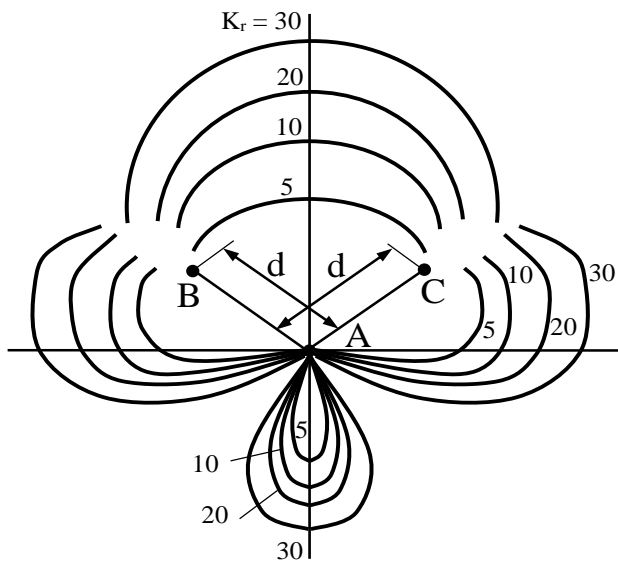


Рис. 7.20 - РЗ різницево-далекомірної РНС

З виразу (7.13) можна отримати рівняння для кривої рівної точності різницево-далекомірної системи

$$K_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma_{\text{рд}}}}{c\sigma_{\tau}} .$$

Як видно з рис. 7.20, для різних значень K_{Γ} , найбільша точність спостерігається на базах різницево-далекомірної системи. У зв'язку із низькою точністю ці системи не можуть застосовуватися для визначення МЗ ОС у напрямках, які є продовженням баз станцій, для яких ψ_1 та ψ_2 дорівнюють 0° або 360° .

При заданих $\sigma_{\tau 1}$ та $\sigma_{\tau 2}$ точність визначення МЗ ОС погіршується при

віддаленні від станції і зменшенням кута α_M . При побудові РЗ із площі, що обмежена кривою рівної точності, виключаються ділянки, які виходять за межі дальності дії наземних станцій.

Кут між базами пристроїв впливає на величину та конфігурацію РЗ. Якщо задана достатньо низька точність визначення МЗ, то для отримання найбільшої РЗ вигідно розташовувати бази під кутом 180° . Якщо ж треба реалізувати ще й найбільш можливу точність визначення МЗ, то оптимальні кути лежать у межах $60^\circ, \dots, 90^\circ$.

Якщо при побудові різницево-далекомірної системи використовується три бази, то станції розташовують за схемою “зірка” під кутами у 120° .

Контрольні питання

1. На чому базуються позиційні методи визначення місцеположення об'єкту?
2. Дайте визначення радіонавігаційного параметра та лінії положення.
3. Що таке радіальна помилка визначення місцезнаходження об'єктів позиційними методами?
4. Що таке робоча зона радіонавігаційної системи?
5. Що являє собою робоча зона далекомірної одно базової системи на площині?
6. При якому значенні кута перетину ліній положення досягається мінімальна помилка визначення місцезнаходження об'єктів позиційними методами?

8. Особливості будови РНС ближньої навігації

8.1. Далекомірні РНС ближньої навігації

До таких РНС відноситься далекомірна система DME, яка розроблена для цивільної авіації та прийнята як стандарт міжнародною організацією цивільної авіації ICAO [18]. Ця система забезпечує безперервну та точну індикацію на борту ОС даних про похилу дальність до наземного РМ (НРМ). Система DME складається з бортового запитувача (передавача) та НРМ (рис.8.1). Бортовий передавач працює в діапазоні частот 1025,...,1150 МГц (126 частотних каналів, які рознесені на 1 МГц один від одного). Існує два режими роботи РНС DME: пошук та слідкування. В режимі пошуку передавачем формується два гаусівських імпульси запиту, тривалість яких складає 2,5 та 3,5 мкс через 12 мкс. Частота випромінювання імпульсів 150 імпл/с . У режимі слідкування імпульси випромінюють через 36 мкс один від одного з частотою 24 імпл/с . Імпульсна потужність передавача досягає 2 кВт. НРМ приймає запитні імпульси і після затримки на час, що дорівнює $t_b = 30 \text{ мкс}$, випромінює імпульси відповіді. Потужність відповідача складає від 1 до 20 кВт.

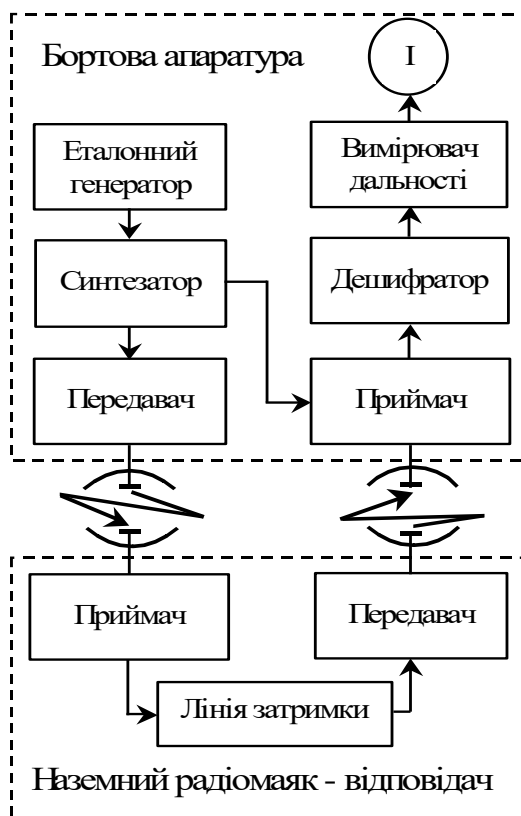


Рис. 8.1 - Структурна схема РНС DME

При прийманні запитних імпульсів формується сигнал відповіді у вигляді двох гаусівських імпульсів з періодом у 12 мкс. Сформовані імпульси випромінюються передавачем НРМ у смугах частот 962,...,1024 або 1151,...,1213 МГц. Вибір смуги здійснюється таким чином, щоб різниця частота між сигналами запиту та відповіді дорівнювала 63 МГц. Таким чином, утворюється 252 канали роботи. У сформованих сигналах знаходиться закодована інформація про номер НРМ та координати, яка витягується бортовим дешифратором.

Інформація про дальність визначається виміром часу між передаванням сигналу запиту та прийманням сигналу відповіді. Лініями положення системи DME є

концентричні кола з центрами у місцях розташування НРМ, точка перетину яких дає інформацію про МЗ ОС.

Для обчислення географічних координат слугує бортовий обчислювач, в який вводяться окрім вимірів дальності, координати НРМ та висота ОС (вона вимірюється бортовим висотоміром). Бортові запитувачі розраховані на максимальну дальність 370 км. Загальна похибка системи DME на дальностях

від $0 \div 370$ км не перевищує ± 925 м. При використанні трьох НРМ точність визначення МЗ досягає 150 м. Пропускна спроможність не перевищує 100 літаків.

8.2. Кутомірно - далекомірні РНС ближньої навігації

Часова кутомірно-далекомірна РНС “Такан” є основним засобом ближньої навігації літаків багатьох держав НАТО. Ця система дозволяє отримувати інформацію про азимут та дальність літака відносно наземного радіомаяка. Вона складається з двох частин: НРМ та бортового прийомо-передавача, які працюють в діапазоні 960, ..., 1215 МГц.

Запит із всіх літаків, які обслуговуються даним НРМ, здійснюється на

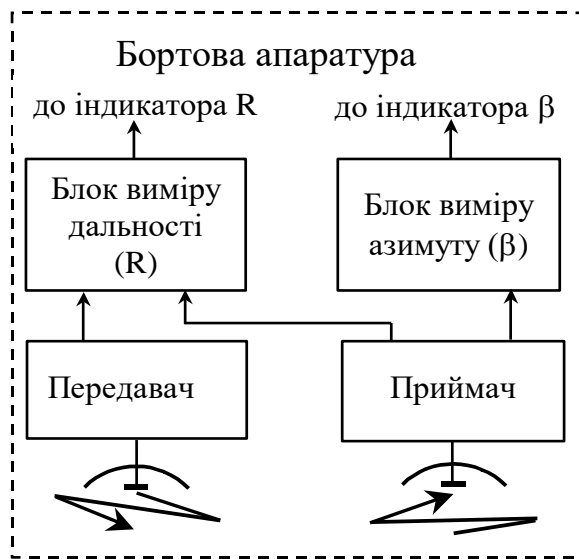


Рис. 8.2 - Структура бортового обладнання РНС “ТАКАН”

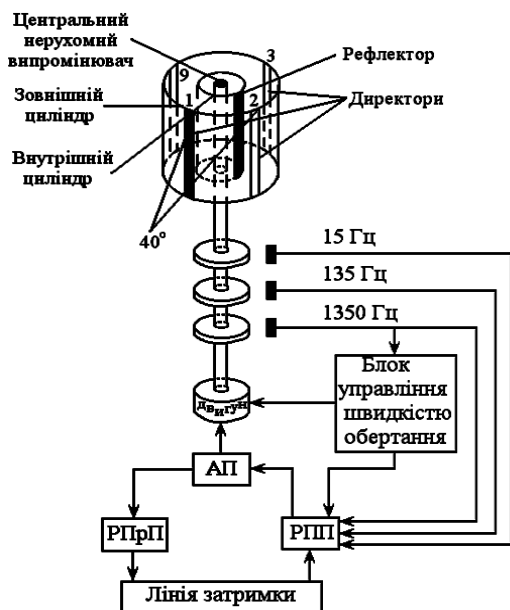


Рис. 8.3 - Структура апаратури НРМ

одній і тій самій несучій частоті в діапазоні 1025, ..., 1150 МГц. Таким чином, є можливість обрати частоту одного з 126 каналів, а потім за командою здійснювати перехід на інші частоти. Розніс між каналами за частотою 1 МГц. Усі сигнали НРМ випромінюються тільки на одній частоті, яка відрізняється від запиту на 63 МГц у діапазонах від 962, ..., 1024 та 1150, ..., 1213 МГц. Структура бортової апаратури запитувача подана на рис. 8.2. Блок виміру здійснює безперервний вимір поточної дальності від літака до НРМ. Блок виміру азимуту призначений для безперервного виміру азимуту при використанні двох шкал за частотою.

Система має два канали: далекомірний та кутомірний, які працюють в *одному частотному діапазоні*. Це дозволяє типізувати апаратуру для виміру обох РНП. Антенна система НРМ “Такан” складається з центрального випромінювача (антена типу “штир”) та двох радіопрозорих коаксіальних циліндрів (зовнішнього та внутрішнього), які обертаються з однаковою швидкістю $15 \text{ }^\circ/\text{с}$ (рис. 8.3). На внутрішньому циліндрі розташований один вібратор (рефлектор). На зовнішньому циліндрі розташовано 9 директорів,

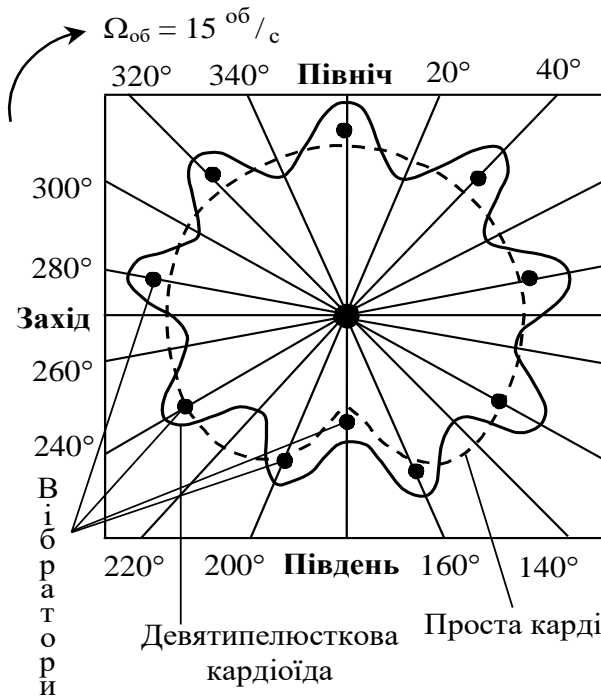


Рис. 8. 4 - ДС НРМ РНС "Такан"

які рознесені один від одного на кут у 40° за колом. Таким чином утворюється дві ДС, які з постійною швидкістю обертаються навколо однієї осі. Перша діаграма це – проста кардіоїда, яка має один мінімум та максимум. Друга ДС представляє дев'яти пелюсткову кардіоїду (рис. 8.4). Кожен раз, коли антена мінімумом простої кардіоїди спрямована на південь, а максимумом – на північ, випромінюються опорні імпульси. Їх створює датчик опорних імпульсів, який знаходиться у передавачі. Опорні імпульси представляють собою 12 пар імпульсів, тривалістю 3,5 мкс.

Наступне випромінювання імпульсів буде здійснено через один оберт антени. Через кожні 40° оберту дев'яти пелюсткової кардіоїди додатково випромінюється 6 пар допоміжних імпульсів. Між допоміжними та опорними сигналами передавач НРМ випромінює ретрансльовані імпульси, які відповідають запитним імпульсам передавача літака.

Азимут вимірюється двох шкальним фазовим методом. Відеоімпульси на вході лінійного амплітудного детектора бортового приймача поступають до блоку виміру азимуту. Послідовність цих відеоімпульсів промодульована за амплітудою з частотами 15 та 135 Гц (рис. 8.5). Вхідними пристроями цього блоку є піковий детектор та обмежувач.

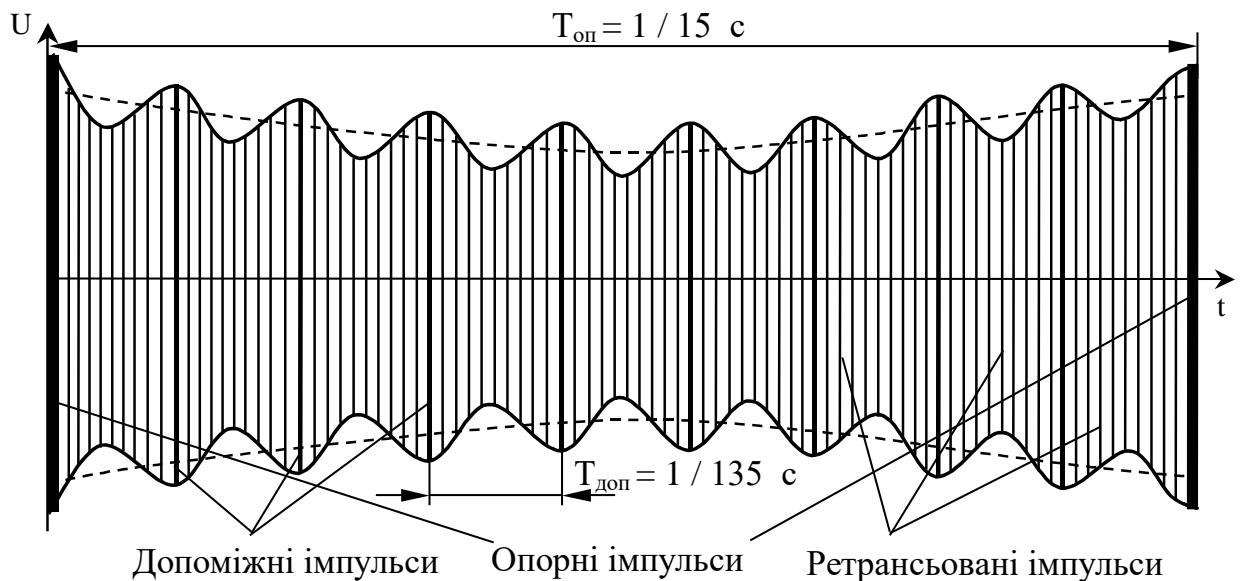


Рис. 8.5 - Напряга на вході вимірювача азимуту

На виході пікового детектора виділяється напруга, яка складається із сукупності двох гармонічних коливань з частотами 15 та 135 Гц. Фаза цих коливань залежить від азимуту об'єкту, що рухається. З виходу обмежувача послідовність відеоімпульсів поступає до каналів формування опорних сигналів з частотами 15 та 135 Гц, які необхідні для виміру азимуту. В режимі “пошук” вимірювач використовує коливання частоти 15 Гц для грубого визначення азимуту. При цьому усувається багатозначність відліку. У режимі “слідкування” виміряне значення азимуту уточнюється в межах обраного інтервалу. Таке уточнення здійснюється по розузгодженню між фазами опорного та азимутального сигналів частоти 135 Гц. Принцип виміру дальності аналогічний РНС DME.

Маяки системи “Такан” встановлюються на аеродромах базування тактичної авіації вздовж трас їх польотів та на авіаносцях. Дальність дії РНС “Такан”, при висоті польоту літака 15 км, досягає 550 км. Потужність передавача 6,...,7 кВт. Помилка визначення азимуту складає $\pm 1^\circ$, а помилка визначення дальності ± 180 м.

РСБН - вітчизняна кутомірно-далекомірна РНС ближньої навігації складається з НРМ та бортового обладнання [18]. Загальна структура типової системи РСБН подана на рис. 8.6. Наземне обладнання РСБН включає азимутально-далекомірний РМ та посадочну радіомаячну групу (ПРМГ). До складу останньої входить курсовий радіомаяк (КРМ), глісаний РМ (ГРМ) та радіодалекомір (РД). До складу бортового обладнання входить антенно-фідерна система (АФС), приймач (РПрП), передавач (РПП), вимірювачі азимуту та дальності. Виміряні значення азимуту відображаються у навігаційно-пілотажному (НПП), а дальність – у прямо показувальному приладі (ППД).

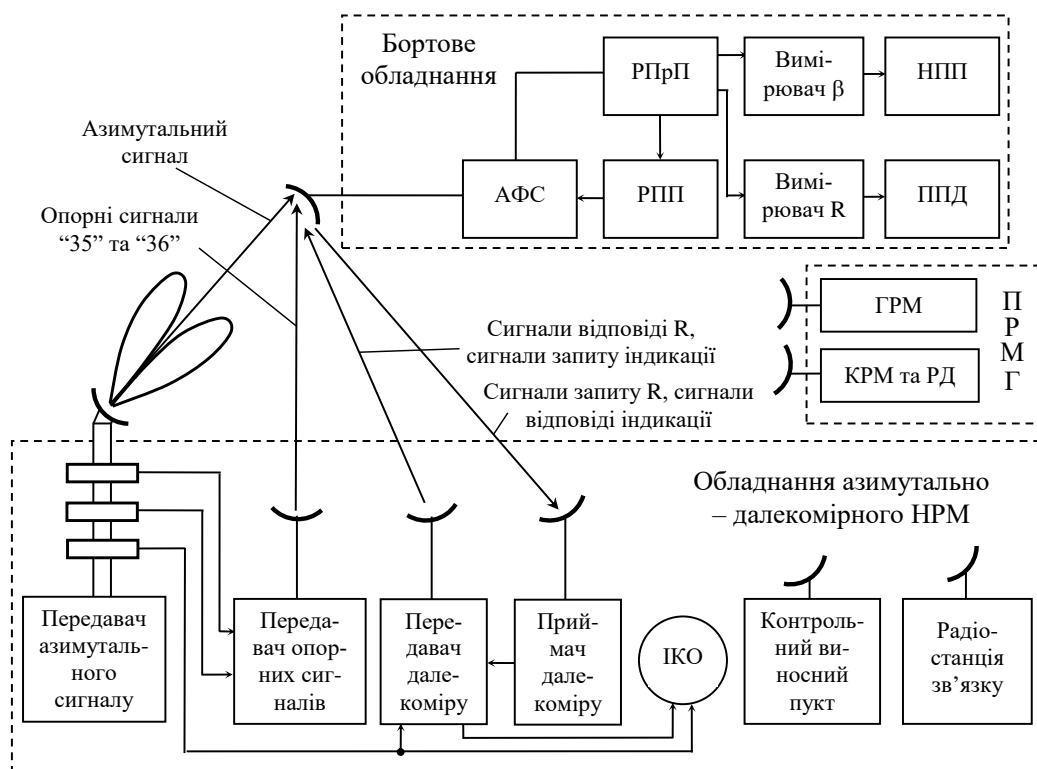


Рис.8.6 - Типова структура РСБН

РСБН забезпечує роботу в одному з двох основних режимів: “навігація” та “посадка, а також у допоміжному режимі ”індикація”. Останній режим призначений для спостереження на землі за повітряною обстановкою в радіусі дії НРМ.

У бортовій апаратурі РСБН вимір дальності здійснюється із застосуванням часового дискримінатора, а вимір азимуту беззапитним часовим методом. Використання цього методу ґрунтується на вимірі часового інтервалу між моментом прийому опорного сигналу (початок відліку) та моментом прийому азимутального сигналу. При цьому проводиться вимір зворотного пеленгу, тобто вимір азимуту відносно НРМ.

Азимутальний РМ має два передавачі, які випромінюють азимутальний та опорний сигнали. Передавач азимутальних сигналів генерує безперервні коливання, які випромінюються рухомою гостроспрямованою антеною з двох пелюстковою ДС $F_1(\beta)$ (рис.8.7). Азимутальна антена обертається з постійною швидкістю $\Omega_{об} = 100 \text{ }^\circ/\text{хв}$, що відповідає частоті $F_{об} = 1,66 \text{ Гц}$. Передавач опорного сигналу працює в імпульсному режимі випромінювання. Його навантаженням є неспрямована антена з ДС $F_2(\theta)$ (рис.8.7). Опорний сигнал складається з двох послідовностей радіоімпульсів. Кожна кодова посліжка складається з двох радіоімпульсів тривалістю 5,5 мкс. За кількістю кодових посліжок за час одного оберту антени T_a (рис. 8.8) ці послідовності називають опорними сигналами “35” та “36”.

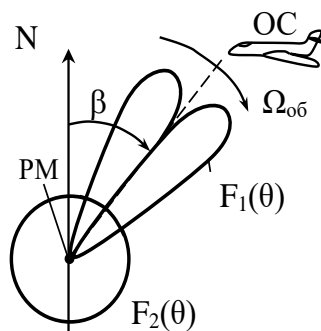


Рис. 8.7 - ДС НРМ

Опорні імпульси мають частоти слідування $F_{35} = 58,1 \text{ Гц}$ та $F_{36} = 59,76 \text{ Гц}$. Пристрій формування цих імпульсів синхронізується приводом азимутальної антени НРМ. У момент проходження ДС азимутальної антени північного напрямку N у точці розташування НРМ імпульси обох серій співпадають. Це співпадіння називають “північним”. Північне співпадіння опорних імпульсів $U_{35}(t)$ та $U_{36}(t)$ фіксується бортовою апаратурою і приймається за початок відліку азимуту t_c (рис. 8.8). Цей момент не залежить

від кутового положення літака відносно НРМ, тому що опорні імпульси випромінюються неспрямованою антеною.

Азимутальний сигнал на вході бортового приймального пристрою $U_{аз}(t)$ має дзвоноподібну обвідну з гострим мінімумом всередині. У момент, коли напрямок рухомої ДС збігається з напрямком на ОС, останній сприймає неперервне коливання і за методом мінімуму фіксує момент кінця відліку t_β . Азимут β знаходиться за часом запізнення азимутального сигналу по відношенню до опорного $\tau_\beta = t_\beta - t_c$ за виразом

$$\beta = \omega_{об} \tau_\beta,$$

де $\omega_{об}$ – кутова швидкість обертання азимутальної антени.

Часовий метод визначення кутових координат реалізується також в ПРМГ для виміру курсу та глісади літака.

Дальність дії РСБН, при висоті польоту літака 10 км, складає $R=400$ км і зменшується до 50 км при висоті польоту 250 м. Похибка виміру азимуту $\sigma_\beta = 0,125^\circ$, а дальності $\sigma_R \approx 0,1 R$ км.

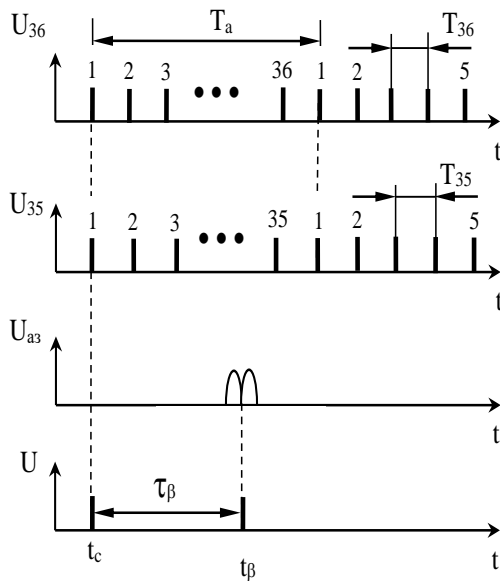


Рис. 8.8 - Вимір азимуту у РСБН

Азимутальний канал працює у діапазоні частот 873,6,..., 935,2 МГц. Далекомірний канал для випромінювання сигнал запиту використовує діапазон частот 772,...,812,8 МГц, а для випромінювання сигналу відповіді - 939,6,...,1000,5 МГц. Підвищення перешкодозахищеності роботи РСБН забезпечується використанням частотного та кодового розділення сусідніх каналів. Система налічує 88 частотно - кодових каналів в режимі навігації.

Кількість літаків, які одночасно обслуговуються НРМ за азимутальним каналом необмежена, а за далекомірним каналом не перевищує 100.

У режимі наземної індикації наземний передавач випромінює запитні сигнали у вигляді трьох імпульсної кодової послідовності, а бортовий передавач відповідає також трьох імпульсним кодом. Канал наземної індикації працює одночасно та незалежно від роботи далекомірного та азимутального каналів.

Контрольні питання

1. Який принцип виміру дальності до НРМ використовується у РНС DME?
2. Що являють собою лінії положення і як визначається місцезнаходження об'єктів у РНС DME?
3. Яка точність визначення місцезнаходження об'єктів досягається у РНС DME?
4. Яким методом вимірюється азимут у РНС Такан?
5. У чому полягає сутність часового методу визначення азимуту у РСБН?
5. З якою точністю вимірюється азимут та дальність у РНС Такан?
6. З якою точністю вимірюється азимут та дальність у РСБН?

9. Основні принципи побудови системи глобального позиціонування

Глобальну СРНС можна розглядати як високотехнологічну інформаційну систему, що складається з п'яти основних сегментів (див. рис. 9.1). СРНС являють собою всепогодні системи космічного базування, що дозволяють в глобальних масштабах вирішувати такі навігаційні завдання як визначення поточного місцеположення рухомих об'єктів, визначення швидкості рухомих об'єктів та точної координації часу. Принцип дії системи полягає в тому, що навігаційні супутники випромінюють спеціальні радіосигнали, які приймаються і певним чином обробляються апаратурою споживачів (АС), що розташована на об'єктах, що знаходяться на поверхні Землі або навколоземному просторі. При цьому обробка такого роду сигналів дозволяє отримати інформацію про положення і швидкість об'єкта [8,18,19].

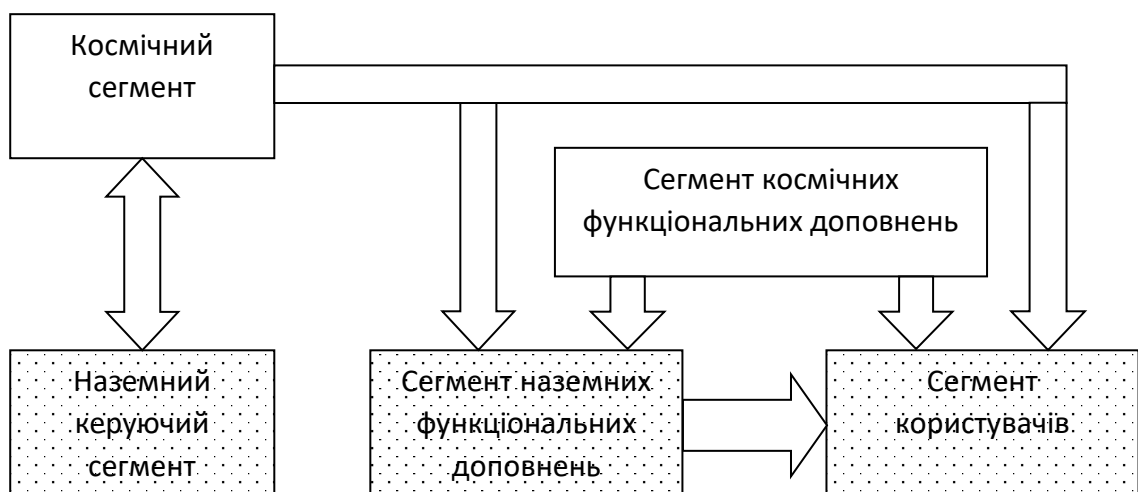


Рис. 9.1 – Основні сегменти СРНС

Наземний керуючий сегмент включає в себе центр управління космічним сегментом, станції стеження за навігаційними супутниками (радіолокаційні та оптичні), апаратуру контролю стану навігаційних супутників. Керуючий сегмент вирішує завдання визначення, прогнозування та уточнення параметрів руху навігаційних супутників, формування та передачі в бортову апаратуру супутників цифрової інформації, а також ряд контрольних і профілактичних функцій.

Космічний сегмент являє собою систему навігаційних супутників, що обертаються по орбітах навколо Землі. На будь-якій орбіті присутні кілька супутників. Навігаційний супутник містить на борту радіоелектронну апаратуру, що випромінює в напрямку Землі шумоподібні безперервні радіосигнали, які мають інформацію потрібну для проведення навігаційних визначень апаратурою споживача.

Завдяки достатній кількості навігаційних супутників і особливим характеристикам радіосигналів АС має можливість в будь-який час, при будь-яких кліматичних умовах приймати сигнали навігаційних супутників і визначати місце розташування, швидкість і час.

Сегмент користувачів потенційно складається з необмеженого числа навігаційних приймачів, які приймають сигнали навігаційних супутників і розраховують поточне розташування, швидкість і час з помилками, які визначаються супутниковою навігаційною системою і апаратурою споживача.

Сегменти наземних і космічних функціональних доповнень можуть і не використовуватись на всій поверхні Землі і являють собою апаратно-програмні комплекси, призначені для підвищення точності навігаційних визначень, цілісності, безперервності, доступності та експлуатаційної готовності системи. Завдяки даним сегментам можливий так званий *диференціальний режим* вимірювань навігаційних параметрів, що надає найбільш точні результати [8]. На відміну від глобальної СРНС, *супутникова РНС* містить три основні компоненти: космічний сегмент, сегмент користувачів і наземний керуючий сегмент.

Основними представниками середньовисотних супутникових РНС є дві системи “Навстар”, “Глонас”, “Бейдоу” та “Галілео”.

Рішення про створення СРНС “Навстар” (Navstar-Navigational Satellite Time and Ranging – навігаційний супутник часу та виміру дальності) було прийнято у 1973 році міністерством оборони США. Цю систему ще називають GPS (Global Positioning System). СРНС GPS призначена для глобального, всепогодного, пасивного, перешкодостійкого та високоточного навігаційно-часового забезпечення практично усіх військових споживачів. Така система забезпечує тривимірну навігацію (широта, довгота, висота) з точністю МЗ 5, ..., 10 метрів.

До складу космічної підсистеми GPS входить 28 ШСЗ (24 – робочі ШСЗ, 4 – запасні) на шести колових орбітах (по 4 на кожній) з висотою 20 183 км. Період обертання супутників складає 12 годин. Нахил орбіт складає 55° , рознесення за довготою 60° (див. рис.9.2).

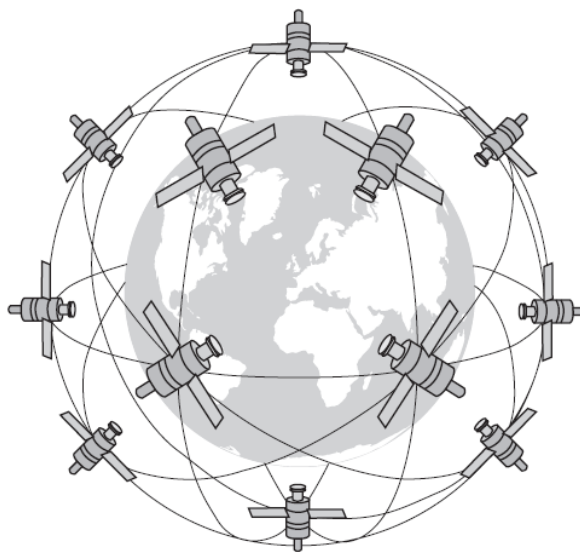


Рис.9.2 - Орбітальна структура системи GPS

В зоні радіовидимості користувача в будь-який момент може знаходитись від 4 до 11 ШСЗ, що забезпечує можливість неперервного визначення трьох

координат (довгота, широта, висота). СРНС має власний системний час, що виробляється одними з найважливіших елементів кожного ШСЗ, якими є рубідієві та цезієві стандарти частоти (стабільність $5 \cdot 10^{-13}$ та $2 \cdot 10^{-13}$ відповідно), по чотири модулі на кожному КА. Часові шкали всіх ШСЗ узгоджені між собою та синхронізуються системою єдиного часу. Похибка синхронізація бортового еталону часу не перевищує 15 нс.

Підсистема контролю та управління здійснює слідкування за ШСЗ та забезпечує супутники інформацією, необхідною для формування радіонавігаційних сигналів та навігаційних повідомлень. Крім генерації коливань точного часу, атомні стандарти частоти є джерелами опорної частоти 10,23 МГц для бортового передавача, який випромінює сигнали на двох частотах: $f_{L1} = 1575,42$ МГц та $f_{L2} = 1227,6$ МГц. Ці частоти є кратними опорній частоті. Причиною використання значень саме цих частот є малий вплив атмосфери на поширення електромагнітних хвиль. Вихідна потужність бортових передавачів в різних модифікаціях КА може бути регульована в межах 50,...,60 Вт.

Крім того до складу бортового устаткування входить синтезатор частот, блоки формування навігаційних сигналів, одна основна та дві резервних бортових електронно-обчислювальних машини, системи орієнтації та корекції орбіти, телеметрії, прийому сигналів наземного комплексу управління, терморегулювання та електроживлення.

Для передачі навігаційних сигналів застосовуються фазовані антенні решітки на основі спіральних випромінюючих елементів. В лінії обміну даними з наземним комплексом управління використовуються спірально-конічні антени. Слід відзначити, що електромагнітні коливання, які випромінюють спіральні антени мають *правосторонню колову поляризацію*. Це зроблено для зменшення впливу коливань відбитих від навколишніх предметів, розташованих на Землі, на процес місце визначення. Також це дозволяє зменшити вплив іоносфери, так як ефект Фарадея у даному випадку проявляється лише у зміні фази електромагнітних коливань, а не у повороті площини їх поляризації, як у випадку лінійної поляризації [20].

Використання антенної решітки на борту КА дає змогу формувати ДС спеціальної форми, яка приведена на рис. 9.3. Це в свою чергу дає змогу підвищити рівень сигналу на вході приймача користувачів, для яких даний ШСЗ знаходиться відносно низько по відношенню до лінії горизонту. При цьому рівень потужності на вході приймальної антени, при прольоті ШСЗ від лінії горизонту через зеніт над користувачем, приведено на рис. 9.4 [20].

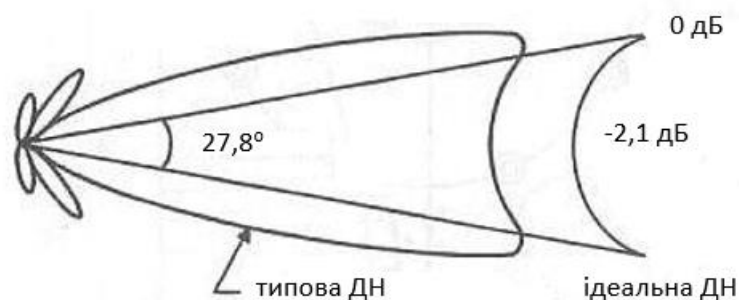


Рис. 9.3 – Форма ДС антени навігаційного ШСЗ

Окремим питанням теорії СРНС є формування складних сигналів, за допомогою яких здійснюється вимірювання псевдодальностей від фазового центру антени АС до фазового центру антени ШСЗ. Складна структура сигналів радіонавігаційних супутників обумовлена необхідністю енергетичної економії та використанням більшістю користувачів антен з дуже малою апертурою, порівняно, наприклад, з супутниковим телебаченням.

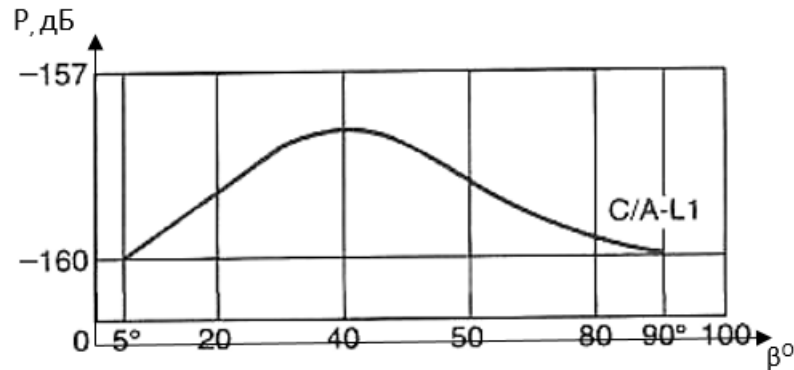


Рис. 9.4 – Рівень потужності сигналу від кута підняття ШСЗ над горизонтом

Щоб отримати високу точність вимірювань підвищеної завадостійкості в СРНС використовуються шумоподібні фазоманіпульовані сигнали, які є послідовностями радіоімпульсів із значеннями початкових фаз 0 та π . Щоб підвищити вірогідність правильного прийому символу коду використовують відносну фазову маніпуляцію.

У системі GPS інтерфейс між навігаційними супутниками та АС складається з двох радіоліній L-діапазону частот. При цьому використовується *кодове розділення* радіосигналів навігаційних супутників.

Бортова апаратура навігаційних супутників GPS генерує два типи кодів дальності (PRN-коди) [8,20]:

точний важко доступний P - код, який є основним кодом дальності. Він має тривалість 7 днів і передається зі швидкістю 10,23 Мбіт/с;

грубий легко доступний C/A - код, який доступний усім споживачам та використовується для виявлення P- коду. C/A-код застосовується для ідентифікації номера ШСЗ і являє код Голда, що формується на основі 10-розрядного регістру зсуву. Він має тривалість 1 мс і передається зі швидкістю 1,023 Мбіт/с. Послідовність C/A-коду є сумою за модулем 2 послідовностей G1 та послідовності G2i, яка формується затримкою на 5,...,950 символів відносно базової послідовності G2, за допомогою чого генерується набір 36 взаємовиключних C/A кодів. Спрощену схему формування радіонавігаційного сигналу супутника GPS зображено на рис. 9.5. Квадратурні складові несучої частоти L1 модулюються двійковими послідовностями P- та C/A-кодів (складова C/A коду зміщена по фазі відносно P-коду на 90°), до яких за модулем 2 додаються дані цифрової інформації навігаційного повідомлення. Кількість елементів C/A коду становить $N = 2^{10} - 1 = 1023$. Тривалість одного елемента приблизно дорівнює 1 мкс. Тривалість одного біта інформаційного повідомлення дорівнює 20мс. В даному випадку швидкість передачі інформації дуже мала, але

при цьому ймовірність помилки в таких повідомленнях практично виключена [8].

Несуча частота L2 модулюється двійковою послідовністю лише *P*-коду, до якої за модулем 2 додається цифрова інформація навігаційного повідомлення з тривалістю одного біта 20мс. Основою для формування названих компонентів сигналу є бортовий стандарт частоти. Для розрізнення *P*-коду та *C/A* – коду на одній несучій частоті вони передаються у квадратурі [8,18].

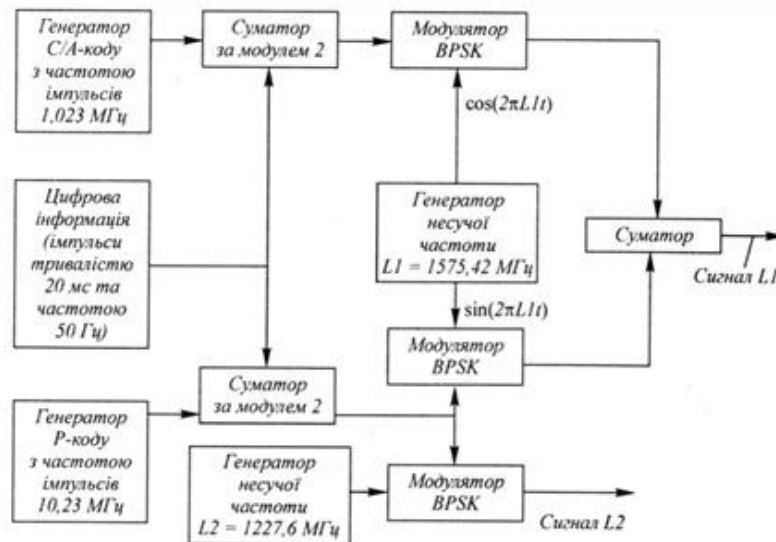


Рис.9.5 – Структурна схема формування радіонавігаційного сигналу.

В загальному випадку АС працює за схемою, що подана на рис. 9.6. Сигнали навігаційних супутників приймаються антеною, підсилюються та надходять на вхід приймача. У приймачі вони переносяться з несучої на проміжну частоту і за допомогою АЦП переводяться в цифрову форму [8,19].

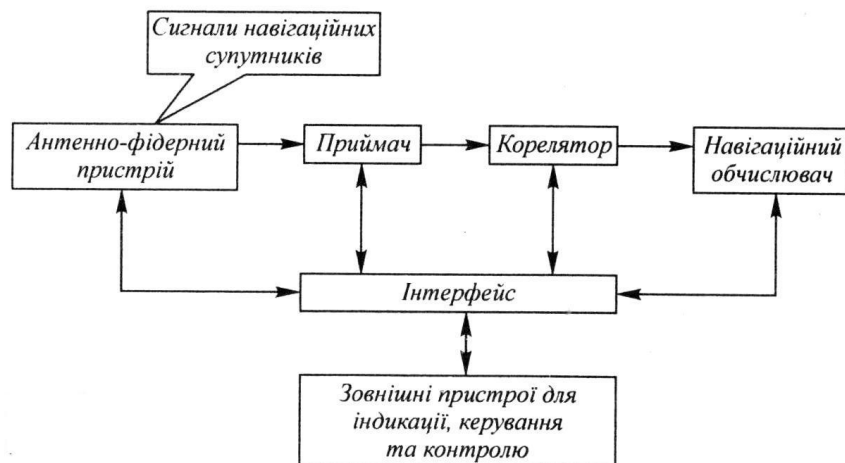


Рис. 9.6 – Узагальнена структурна схема АС

У кореляторі цифрові сигнали формуються у вигляді цифрових відліків, які є основою для реалізації алгоритмів пошуку сигналів за затримкою, частотою, спостереженням за супутниками та виділенням навігаційних повідомлень. Навігаційний обчислювач керує складовими апаратури споживача в цілому і

здійснює обчислювальні процедури для первинного та вторинного оброблення сигналів. Інтерфейс забезпечує взаємодію складових АС з зовнішніми пристроями та між собою. Основні технічні характеристики GPS і ГЛОНАСС наведені у табл.9.1 [8].

Таблиця 9.1 - Основні технічні характеристики GPS і ГЛОНАСС

Параметр	GPS	ГЛОНАСС
Помилка визначення МЗ у горизонтальній площині, м	100 - 95% часу; 300 - 99,99% часу	28 - 95% часу; 140 - 99,99% часу
Помилка у вертикальній площині, м	156 - 95% часу; 500 - 99,99% часу	60 - 95% часу; 585 - 99,99% часу
Помилки при передачі даних часу, нс	340 - 95% часу	700 - 95% часу
Спектр сигналу	± 12 МГц з центром на частоті L1 (1563,42,..., 1587,42 МГц)	$\pm 5,75$ МГц з центром на кожній частоті
Модуляція радіосигналу	Сигнал системи GPS, що передається на частоті L1 модулюється за допомогою двох позиційної фазової маніпуляції псевдо-випадковим шумоподібним C/A- кодом з тактовою частотою 1,023 МГц. Кодова послідовність повторюється кожену мс.	Кожен супутник ГЛОНАСС передає на своїй несучій частоті навігаційний радіосигнал, модульований двійковою послідовністю за допомогою двохпозиційної фазової маніпуляції з тактовою частотою 0,511 МГц. Кодова послідовність повторюється кожену мс.
Рівень потужності радіосигналу на виході лінійно поляризованої антени з коефіцієнтом посилення 3 дБі	-160дБВт до -155дБВт для будь-якої орієнтації антени, ортогональної до напрямку поширення при куті піднесення 5 градусів або більше.	-161дБВт до -155,2дБВт для будь-якої орієнтації антени, ортогональної до напрямку поширення при куті піднесення 5 градусів або більше.
Поляризація	Правостороння кругова поляризація (за годинниковою стрілкою в напрямку випромінювання)	
Навігаційна інформація	Навігаційна інформація, що передана супутником, включає необхідні дані, щоб визначити: час передачі, що прив'язується до шкали UTC; місце розташування супутника; стан супутника; параметри бортової шкали часу супутника; стан орбітального угруповання.	

Помилка виміру дальності до будь-якого супутника не перевищує 150 м, а помилка швидкості зміни дальності -2 м / с.

Існує три види апаратури споживачів. Апаратура *першого* класу призначена для швидких високоточних визначень МЗ та швидкості високодинамічних споживачів. Вона п'ятиканальна. Чотири перших канали здійснюють слідування за несучими частотами чотирьох ШСЗ одночасно. Для кожного з них формується індивідуальна ДС та виділяються блоки автоматичного підстроювання частоти та слідування за часовою затримкою сигналу. П'ятий канал забезпечує послідовне слідування за затримками сигналів на двох частотах випромінення для усіх чотирьох ШСЗ з метою усунення помилок за рахунок рефракції при розповсюдженні радіохвиль [20].

Низько динамічні споживачі використовують апаратуру *другого* класу. У такій апаратурі є два канали. Перший з них здійснює послідовне слідування за несучими частотами чотирьох ШСЗ. Другий канал, як і п'ятий у апаратурі першого класу, слідує за затримкою С/А чи Р-кодів. Така побудова спрощує апаратуру споживачів, але при цьому збільшується у 2-3 рази, у порівнянні з апаратурою першого класу, час першого навігаційного визначення. Помилка визначення МЗ споживача для апаратури першого та другого класу не перевищує 10 метрів.

Найменшу вартість та складність має апаратура *третього* класу. Вона приймає лише сигнали з С/А – кодом на частоті L_1 та також проводить виміри за чотирма ШСЗ. При такій побудові погіршується точність виміру квазідальності із-за збільшення тривалості сигналу за часом на виході системи оптимальної обробки, а також помилкою, що виникає за рахунок рефракції радіохвиль у атмосфері. При такій будові точність визначення МЗ споживача складає 100 – 200 метрів.

Контрольні питання

1. Що входить до складу супутникової РНС?
2. На якій частоті навігаційні супутники GPS випромінюють сигнали?
3. Яким чином здійснюється ідентифікація навігаційних супутників GPS?
4. Яка інформація міститься у радіосигналі кожного супутника GPS?
5. Яку помилку позиціонування в горизонтальній площині забезпечує СРНС GPS?
6. Які радіосигнали випромінює кожний супутник GPS?

Список скорочень

АС - апаратура споживача;
БПЛА - безпілотний літальний апарат;
ГІС - геоінформаційна система;
ДЗЗ - дистанційне зондування Землі;
ДС - діаграма спрямованості;
ЄКА - Європейське космічне агентство;
КА - космічний апарат;
МЗ – місцезнаходження;
НВЧ - надвисокочастотний
НРМ – наземний радіомаяк;
ОС - об'єкт спостереження;
ППЗ - прилад із зарядовим зв'язком;
РЗ - робоча зона;
РЛС - радіолокаційна станція;
РЛЗ - радіолокаційне зображення;
РЛСБО - РЛС бічного огляду;
РМ – радіомаяк;
РНП - радіонавігаційний параметр;
РНС - радіонавігаційна система;
РНТ - радіонавігаційна точка;
РСА - РЛС із синтезованою апертурою антени;
РСБН - РНС ближньої навігації;
СА - синтезована антена;
СВ – сигнал відповіді;
СЗ – сигнал запиту;
СК - система координат;
СКВ - середньоквадратичне відхилення;
СРНС - супутникова РНС;
ЦРСА – цифровий РСА;
ШСЗ - штучний супутник Землі;
NIR - Near Infrared;
SAR - Synthetic Aperture Radar;
SWIR - Short Wavelength Infrared;
TIN - Triangulated Irregular Network.

Предметний покажчик

А

Апаратура ДЗЗ - 21

Апаратура споживача -117

Атрибутивна інформація – 13,47

Б

Безпілотний літальний апарат -5, 21

В

Випромінювальна здатність - 84

Г

Геоінформаційна система - 7,9

Географічна інформація -13,33,122

Д

Дешифрувальні ознаки -69

комплексні -71

непрямі -71

прямі -69

Діаграма спрямованості -78

Діапазон хвиль - 17

Дистанційне зондування Землі – 5,9,11,13

Е

Ефект Фарадея -87

К

Карта -12

Картографічна проекція -36

азимутальна – 38

рівнокутна - 38

рівноплощадна - 37

з рівними проміжками - 37

Класифікація 18, 56, 128

керована -69

некерована- 68

Код дальності - 114

Корекція зображення -57

Космічний апарат -44

Космічний знімок - 10,53

Л

Лампа біжучої хвилі -85

М

Мозаїка зображення -58

Модель даних -46

векторна -46

векторно - полігональна -47

растрова -49

О

Орбіта - 38
екваторіальна -41
сонячно-синхронна -42

П

Піксель -16
Позиційні методи -89
Програмне забезпечення - 53
Просторова розрізненість -18
Похибка визначення лінії положення -95

Р

Радіолокаційне зображення -6
Радіолокаційні станції -6
бічного огляду - 27
із синтезованою апертурою антени – 77
Радіальна похибка -98
Радіомаяк- 89, 94, 108
Радіометр -28,83
Радіометрична розрізненість -19
Радіонавігаційна система - 88
Растр -16,49
Робоча зона -99

С

Скануюча система -25
Спектральні індекси -75
Спектральна розрізненість-17
Синтез каналів -59
Система координат - 33

Т

Тайл- 69
Темпоральна розрізненість -19

Ц

Цифрове синтезуванням апертури антени -77,78
сфокусоване, несфокусоване -80
Цифрове зображення -16

Ш

Штучний супутник Землі -39

Я

Яскравісна температура -83

Перелік використаних джерел

1. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування : навчальний посібник / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. — К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. —316 с.
2. Геоінформаційні технології в управлінні розвитком сільської економіки: кол. монографія / О.В. Скидан, П.В. Пивовар, Л.В. Тарасович, П.П. Топольницький та ін. – Житомир: Поліський національний університет, 2022. – 231 с.
3. Даник Ю.Г. Основи побудови безпілотних роботизованих систем спеціального призначення : навчальний посібник / Ю.Г. Даник, П. П. Топольницький, І. В. Пулеко, П. В. Поздняков, А. В. Родіонов, М. В. Бугайов. – Житомир: ЖВІ, 2016. – 306 с.
4. Манойлов В.П., Омельчук В.В., Опанюк В.В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 384с.
5. Пічугін М.Ф. Радіотехнічні системи дистанційного зондування./ М.Ф. Пічугін, О.В. Андреев, О.А. Горбуненко та ін.: Навчальний посібник. – Житомир: ЖВІРЕ, 2006. – 96 с.
6. Дистанційні дослідження Землі: Навчальний посібник / Галина Байрак, Богдан Муха. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – 712 с.
7. Фриз П.В. Основи побудови спеціальних комплексів космічної видової розвідки: підручник / П.В. Фриз. – Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2020. – 412 с.
8. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
9. Пивовар П.В., Топольницький П.П., Скидан О.В., Янчевський С.Л. Аналіз змін земного покриття на основі ГІС: приклад Житомирської області, Україна. Космічна наука і технологія. 2023 ;29(4):03-03. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.024>
10. Пивовар, П., Николюк, О., Топольницький, П. (2022). Аналіз земного покриття територіальних громад Житомирської області з використанням ГІС-технологій. Український журнал природничих наук, (2), 95-117. DOI 10.35433/naturaljournal.2.2023.95-117
11. Данкевич В. Є., Кравчук І. І., Топольницький П. П. Визначення екосистемних функцій лісового господарства України з використанням ГІС-технологій: виклики в умовах євроінтеграції. Modern Economics. 2023. № 40(2023). С. 29-37. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V40\(2023\)-04](https://doi.org/10.31521/modecon.V40(2023)-04).
12. Skydan, O., Pyvovar, P., Topolnytskyi, P., & Prysiazhna, T. (2022). Analysis of rural areas of Ukraine on the basis of ESA WorldCover 2020. Scientific Horizons, 25(5), 74-85.
13. Semi-Automatic Classification Plugin <http://semiautomaticclassificationmanual-v4.readthedocs.org/en/latest/Tutorials.html>
14. Геоінформаційні системи та технології. Практикум / Топольницький П. П., Пивовар П. В., Николюк О. М., Терещук В.І. – Житомир : Поліський нац. ун-т, 2021. – 147 с.

15. Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Puleko I. V. Detection of the signals of the terrestrial radar stations by spacecraft with a passive synthesis of the antenna aperture. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2023. № 2 (65). С. 13-19. – Режим доступу: [10.15588/1607-3274-2023-2-2](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-2)
16. Дубина О.Ф., Андреев О.В., Нікітчук Т.М., Пулеко І.В., Гаценко С.С., Клязника В.В. Синтезування апертури антени за сигналами наземних радіолокаційних станцій з космічного носія. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. 2022. Вип. 22. С. 69–78.
17. Андреев О.В., Топольницький П. П., Ципоренко В.В., Андреева Є.О. Визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання з аерокосмічного носія. *Житомир: ЖВІ.– 2017. Зб. наукових праць №14, С.85-90.*
18. Васильев В. М. Радіонавігаційні системи : підручник / В. М. Васильев. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 338 с.
19. Фриз С.П., Андреев О.В., Рихальський О.Р., Дубина О.Ф. Теорія і техніка радіолокації та радіонавігації: навчальний посібник. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – 178 с.
20. Parkinson, B. W., Spilker, J.J. Jr, *Global Positioning System: Theory and applications*, vols. 1 and 2, American institute of Aeronautics, 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC, 1996.

Додаток А. Приклади розв'язання тематичних завдань з використанням програмного комплексу ArcGIS Pro

1. Загальна характеристика ArcGIS Pro

Система, яка використовується для збору, управління та аналізу даних про характеристики Землі та інших географічних об'єктів для цілей обробки географічно прив'язаної інформації, як відомо, має назву географічна інформаційна система (ГІС). ГІС націлена на інтегровані знання, що надходять з різних джерел (наприклад, шари на карті), і створює комплексну середу для співпраці, тому досить часто її характеризують як одну з найпотужніших інформаційних технологій. Основне призначення ГІС це пов'язування баз даних з картами. Для більшості людей ГІС приваблива через свою інтуїтивну зрозумілість та наочність. У ній скомбіновані потужне середовище візуалізації з сильним аналітичним та моделюючим середовищем роботи.

Існує достатньо великий перелік ГІС але найбільш потужним та розповсюдженим є розроблений компанією ESRI програмний комплекс ArcGIS. Важливо, починаючи працювати з ArcGIS, розуміти фундаментальні основи ГІС і яким чином ArcGIS втілює їх у життя, коли ви використовуєте це програмне забезпечення. Розглянемо ключові аспекти ГІС і яким чином географічна інформація моделюється у низці ключових картографічних підходів.

Призначення та основні задачі в ArcGIS Pro. ArcGIS Pro - це потужний програмний комплекс для географічного аналізу, картографування та управління геопросторовою інформацією. Розглянемо основні завдання, які можна вирішити за допомогою ArcGIS Pro, і їх призначення.

1. Створення та редагування карт є основними функціями ArcGIS Pro, що дозволяють користувачам створювати нові картографічні продукти або редагувати існуючі з метою відображення геопросторових даних. Ця функція дозволяє користувачам додавати шари, символи, текст, маркери, лінії та полігональні об'єкти, створювати легенди та надавати карти необхідну графічну якість.

2. Аналіз геоданих в ArcGIS Pro включає в себе різноманітні інструменти та методи для отримання цінної інформації з географічних даних. Це може включати вимірювання відстаней та площ, проведення спеціальних аналітичних операцій, таких як виявлення зон впливу, теплові карти, виявлення тенденцій та інші.

3. Візуалізація та картографування в ArcGIS Pro дозволяє користувачам створювати привабливі та інформативні карти для подання географічної інформації. Це включає в себе вибір відповідних символів, кольорів, шкал, стилів, масштабування та інші атрибути для досягнення найкращого сприйняття та зрозуміння даних.

4. Аналіз просторових відносин дозволяє користувачам досліджувати географічні зв'язки та взаємодії між об'єктами на карті. Це може включати в себе виявлення зон перекриття, визначення взаємного розташування, обчислення відстаней та напрямків між об'єктами, а також аналіз топологічних властивостей.

5. Управління геоданими в ArcGIS Pro дозволяє користувачам ефективно організувати, зберігати та керувати географічною інформацією. Це може включати в себе створення та редагування баз даних, каталогів даних, організацію папок та файлової структури, а також керування правами доступу до даних.

6. Вирішення проблем геопросторової аналітики в ArcGIS Pro дозволяє користувачам застосовувати географічні методи та інструменти для аналізу, моделювання та прогнозування різних географічних явищ. Це може бути використано для прийняття рішень у різних галузях, таких як геологія, екологія, транспорт, містобудування та інші.

7. Публікація та обмін даними в ArcGIS Pro дозволяє користувачам розповсюджувати свої географічні дані та аналітичні результати через мережу або в межах організації. Це може бути використано для спільної роботи з колегами, співпраці з іншими організаціями або публічного оприлюднення даних для широкої аудиторії.

Прикладні програми, які входять до пакету ArcGIS можна поділити на наступні групи:

введення і верифікація даних;

зберігання та маніпулювання даними;

перетворення систем координат і картографічних проекцій;

аналізу і моделювання;

взаємодія з користувачем.

2. Основні характеристики інструментів ArcGIS Pro

1. Інструменти редагування карт дозволяють користувачам створювати, редагувати та модифікувати географічні об'єкти на картах. Вони включають інструменти для додавання нових об'єктів, редагування атрибутів, переміщення, об'єднання, розділення та видалення об'єктів.

Приклади інструментів: додавання точок, ліній та полігонів, редагування атрибутів об'єктів, переміщення та обертання об'єктів, створення буферних зон навколо об'єктів.

2. Інструменти аналізу геоданих дозволяють проводити різноманітний аналіз географічних даних для виявлення зв'язків, паттернів та тенденцій. Вони можуть включати в себе інструменти для вимірювання відстаней, розрахунку площ, класифікації об'єктів, пошуку найкоротшого шляху та багато іншого.

Приклади інструментів: вимірювання відстаней між точками, створення теплових карт, виявлення зон впливу, проведення аналізу територій та розрахунок статистичних показників.

3. Інструменти візуалізації та картографування дозволяють користувачам створювати привабливі та інформативні карти, вибираючи різні символи, кольори, стилі та масштаби. Вони також надають інструменти для додавання тексту, легенд, масштабних панелей та інших графічних елементів.

Приклади інструментів: вибір символів для об'єктів, зміна кольорів та прозорості, додавання текстової інформації на карту, створення легенд та масштабних панелей.

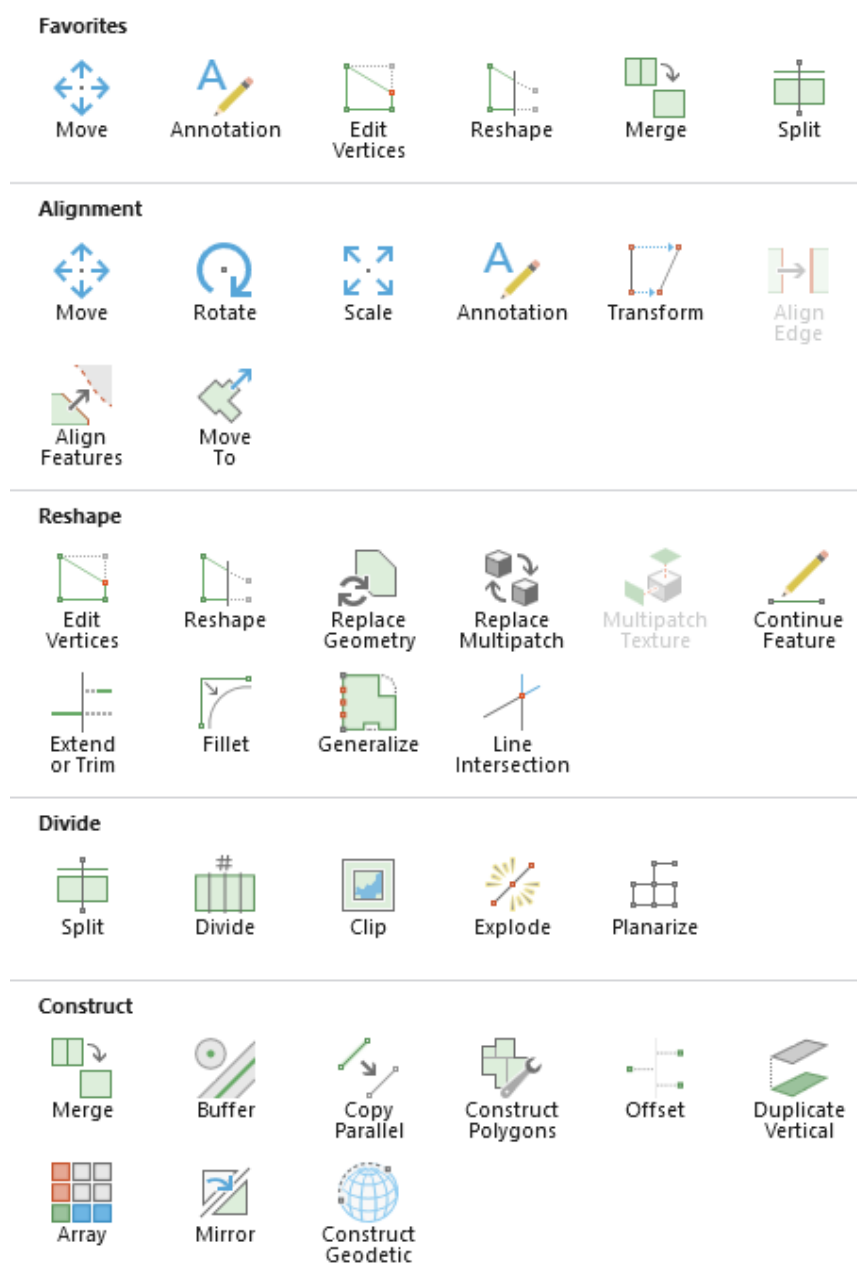


Рис. А.1 - Приклади інструментів редагування карт

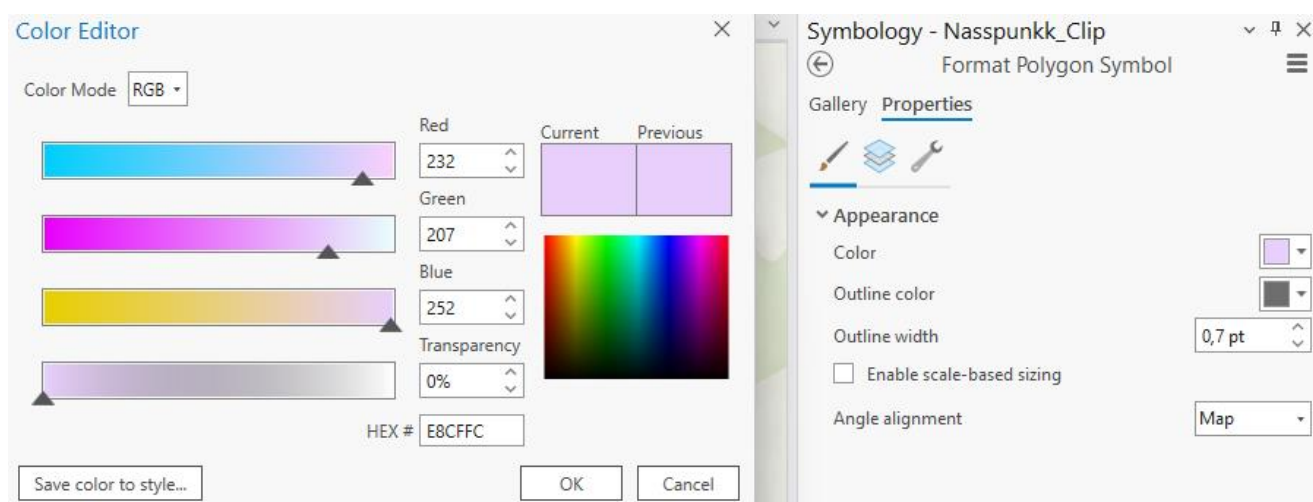


Рис. А.2 - Приклади інструментів візуалізації

Представлення інформації у вигляді зручному для подальшого використання споживачем є однією з важливих завдань будь-якої інформаційної системи до яких відносяться і геоінформаційні системи. Особливостями відображення просторово розподіленої інформації є необхідність забезпечення об'єднання картографічної, текстової та графічної інформації в обмеженому інформаційному просторі з максимальним дотриманням інформативності та естетичності створюваного документу.

Основними елементами, які зазвичай відображаються на ГІС-документі є:
карта або знімок фрагменту досліджуваної території;
виноски (збільшені фрагменти), для конкретизації окремих ділянок на зображенні;

анотації, для пояснення прийнятих в документі зображень, кольорів та діапазонів зміни параметрів, які відображаються;

масштабні лінійки та покажчики напрямку, для однозначної інтерпретації географічної інформації представленої в документі;

текстова інформація, для визначення типу документу та його складових;

умовні позначення;

графічна та інша додаткова інформація.



Рис. А.3 - Приклад оформлення звітного документу з використанням ArcGIS

Для забезпечення якісного та інформативного відображення картографічної та текстової інформації в ArcGIS існує великий набір інструментів та опцій.

4. Інструменти аналізу просторових відносин дозволяють аналізувати просторові взаємозв'язки та взаємодії між географічними об'єктами на карті. Вони допомагають виявляти зони перекриття, визначати взаємне розташування, обчислювати відстані та напрямки між об'єктами та інше.

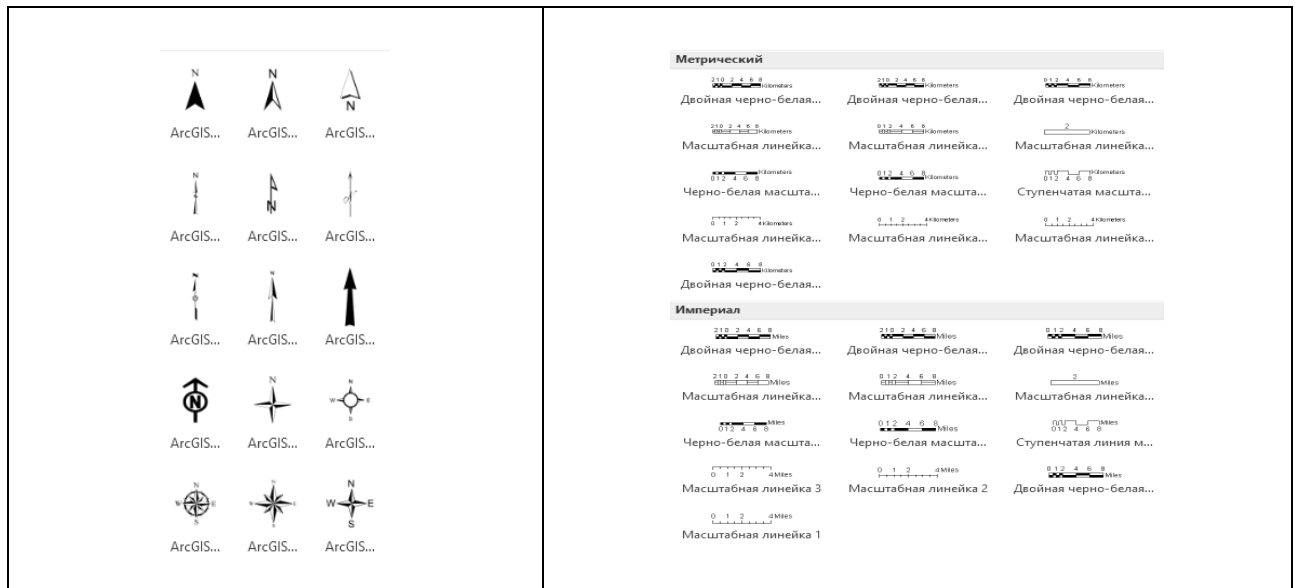
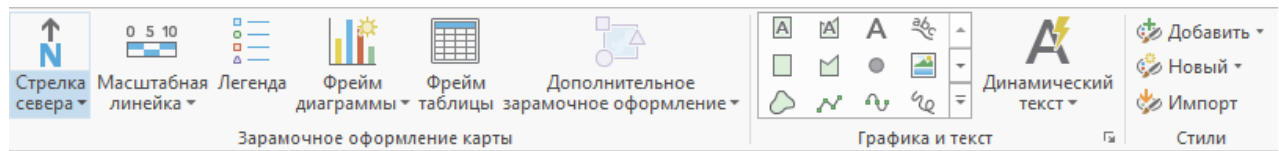


Рис. А.4 - Інструменти для відображення картографічної інформації

Метою геопросторового аналізу є отримання систематизованої нової інформації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Геоінформаційна система має у своєму складі багато аналітичних інструментів та операцій, які можна використовувати для вирішення широкого кола завдань.

Після отримання даних та розміщення їх у базі даних ГІС стає можливим вирішення багатьох задач з аналізу як самих об'єктів так і взаємозв'язків між просторовими даними. Розглянемо деякі приклади таких задач.

- Пошук об'єктів за певними критеріями.
- Визначення взаємного розташування об'єктів (чи пов'язані вони чи ні).
- Пошук об'єктів розташованих на певній території (наприклад, кількість міст о районі).
- Які об'єкти розташовані на певній відстані (наприклад, розташування закладів харчування на туристичному маршруті).
- Визначення висоті географічних об'єктів (наприклад, побудова басейнів річок для визначення наслідків весняного поводку).

Такі відносини на карті не завжди ясно представлені. Тому для вирішення розглянутих та ще великої кількості задач в ГІС передбачені повні процедури геопросторового аналізу.

Найбільш споживаними є вимірювальні операції. Точність проведення вимірів визначається видом даних (векторні або растрові) та точність використанні просторових даних (наприклад, просторове розрізнення для даних космічного знімання).

Можливе проведення вимірів (визначення) наступних величин: координат точок; відстаней між об'єктами; довжини ліній; периметр та площа полігону та інші.

Іншою важливою операцією геопросторового аналізу є операції вибору. Даний вид операцій дозволяє користувачеві обрати частину з загального обсягу даних за певним критерієм.

Можливі два варіанти реалізації даної процедури, а саме вибір об'єктів за місцем розташування або за атрибутами.

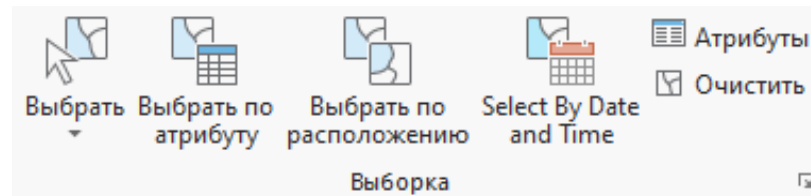


Рис. А.5 - Вікно визначення параметрів вибору

При реалізації вибору за розташуванням можливі такі варіанти пошуку як перетин, в межах відстані, містять, всередині, перетинаються межею та інші. Таке різноманіття варіантів дозволяє реалізувати широкий спектр можливих задач.

Вибір за атрибутами реалізується шляхом виконання арифметичних, логічних, просторових операторів та операцій обробки календарних дат. В якості аргументів вказаних операторів виступає певна частина інформації, яка міститься в таблиці атрибутів кожного з шарів. Необхідно підкреслити що операції вибору не реалізуються для растрових об'єктів.

Ще однією розповсюдженою групою просторового аналізу є операції, пов'язані з визначенням взаємного розташування об'єктів до таких операцій можна віднести буферізацію та аналіз близькості.

Операції буферізації дозволяє визначити об'єкти або аналізувати території, які розташовані на певній відстані від досліджуємих об'єктів. А операція аналіз близькості визначає, які об'єкти знаходяться на мінімальних відстанях від об'єкту, який досліджується. Дані операції можна виконувати для векторних об'єктів всіх типів (точкових, лінійних та полігональних).

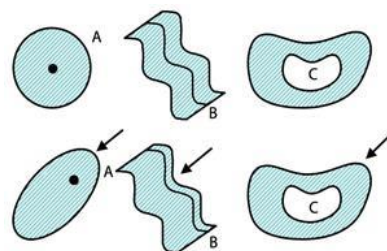


Рис. А.6 - Буферні зони для точкових (А), лінійних (В) та полігональних (С) об'єктів.

Дані процедури можна використовувати наприклад для аналізу кількості закладів освіти в межах територій де ви збираєтесь купляти житло.

Приклади інструментів: виявлення зон перекриття, обчислення відстаней між об'єктами, визначення напрямків руху, аналіз топологічних зв'язків.

5. Інструменти управління геоданими дозволяють ефективно організувати, зберігати та керувати географічною інформацією. Вони надають

інструменти для створення та редагування баз даних, каталогів даних, організації папок та файлової структури.

Приклади інструментів: створення та редагування геоданих, організація файлової структури, керування правами доступу до даних.

Це лише декілька прикладів інструментів, які надає ArcGIS Pro. Кожен з них має широкий спектр функцій та можливостей для аналізу та роботи з географічними даними.

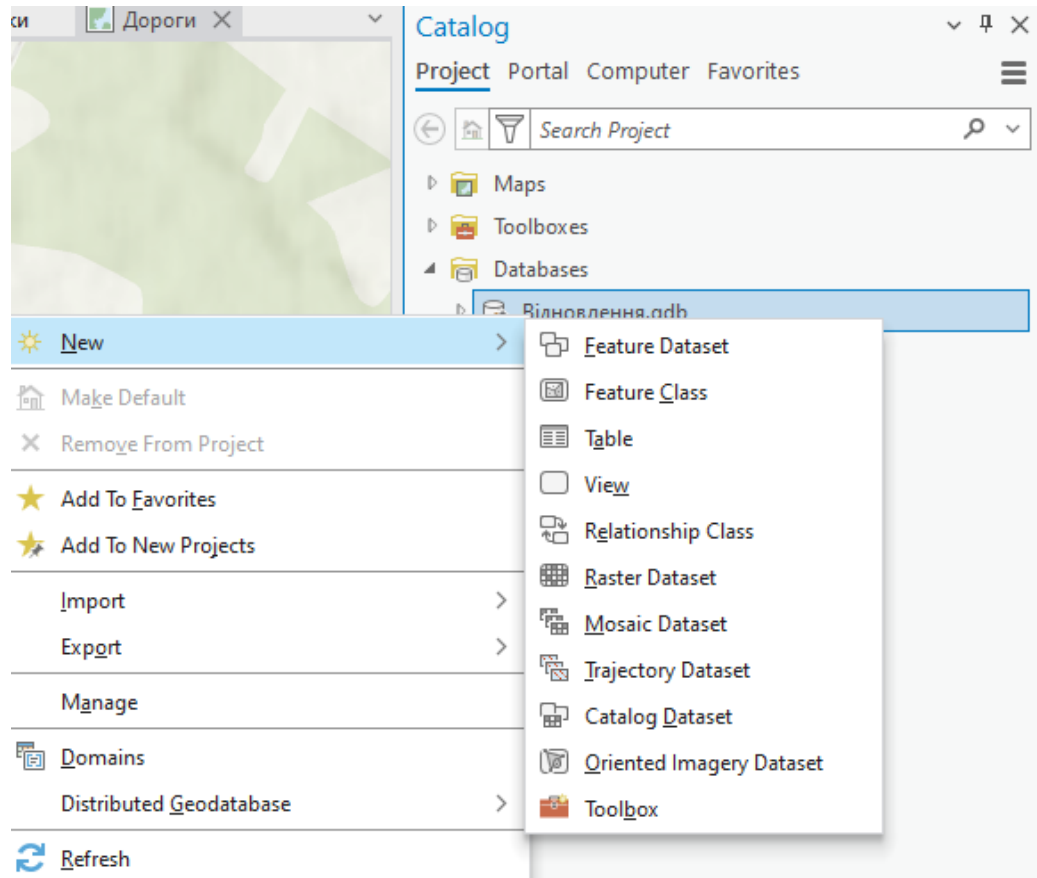


Рис. А.7 - Приклади інструментів створення геоданих

При необхідності виконувати повторювану послідовність дій в ArcGIS Pro існує можливість об'єднання певної сукупності операцій в модель для виконання просторового аналізу і автоматизації обробки даних.

Model Builder – це додаток, що використовується для створення, редагування і управління моделями. Моделі – це робочі процеси, які з'єднані один з одним у послідовності інструментів геообробки, подаючи вихід одного інструменту в інший інструмент в якості входу. Model Builder можна також розглядати як візуальну мову програмування для побудови робочих потоків.

6. Класифікація просторових об'єктів. Операції класифікації використовуються для растрових об'єктів з метою визначення належності кожного елементу області, яка досліджується до певного класу. Існує декілька видів процедур класифікації але всі вони вимагають наявності інформації про критерії за якими елементи вхідного зображення будуть віднесені до того або іншого класу. До початку класифікації створюється так звана навчаюча вибірка, в якій містяться фрагменти територій із заздалегідь відомими властивостями.

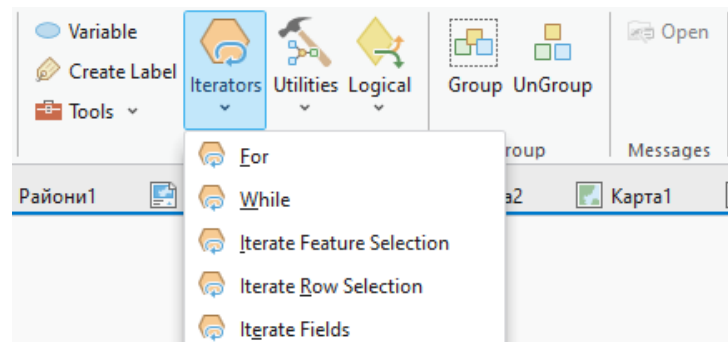


Рис. А.8 – Приклад інструментів Model Builder

Наприклад, відомо що на певній ділянці вирощується визначена сільгоспкультура, або певна територія використовується для будівництва, або це заліснена територія. Апарат класифікації виконує операцію пошуку ділянок на вхідному зображенні, властивості яких максимально відповідають за яскравісними та спектральними характеристиками повному класу навчаючій вибірці.

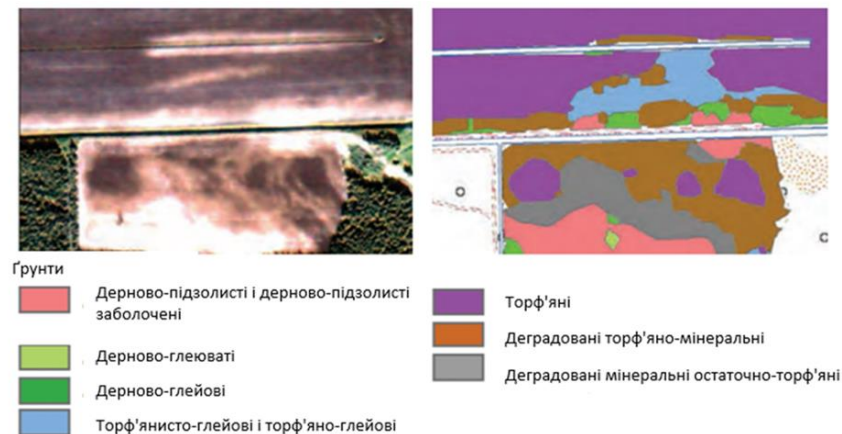


Рис. А.9 - Приклад класифікації ґрунтів за космічними знімками

Якість проведення класифікації залежить від інформативності вхідного зображення (просторове розрізнення, кількість спектральних каналів, якість проведення операції усунення радіометричних та геометричних спотворень), а також від повноти та точності визначення навчаючих вибірок. Слід підкреслити що якість виконання операцій класифікації суттєво покращується при використанні даних польових вимірів. В цьому випадку достовірно відомі властивості територій та легко з'ясувати, яким чином дані території відображаються на знімках. Також особливістю проведення класифікації на яку слід звертати увагу це те що в різних місцевостях та при різних умовах знімання (погода, пора доби, пора року) ті самі території можуть відображатись по різному. Тому слід адаптувати алгоритми класифікації для конкретної території та умов отримання первинних даних.

7. Мобільні ГІС-додатки. Стрімкий розвиток геоінформаційних систем проходив на фоні стрімкого розвитку мобільних засобів комунікації та GPS. Програмний комплекс ArcGIS Pro надає можливість працювати з мобільними пристроями та системами позиціонування створюючи на їх основі ГІС додатки, які

перетворюють створені карти та бази даних в інформаційні продукти доступні широкому колу споживачів.

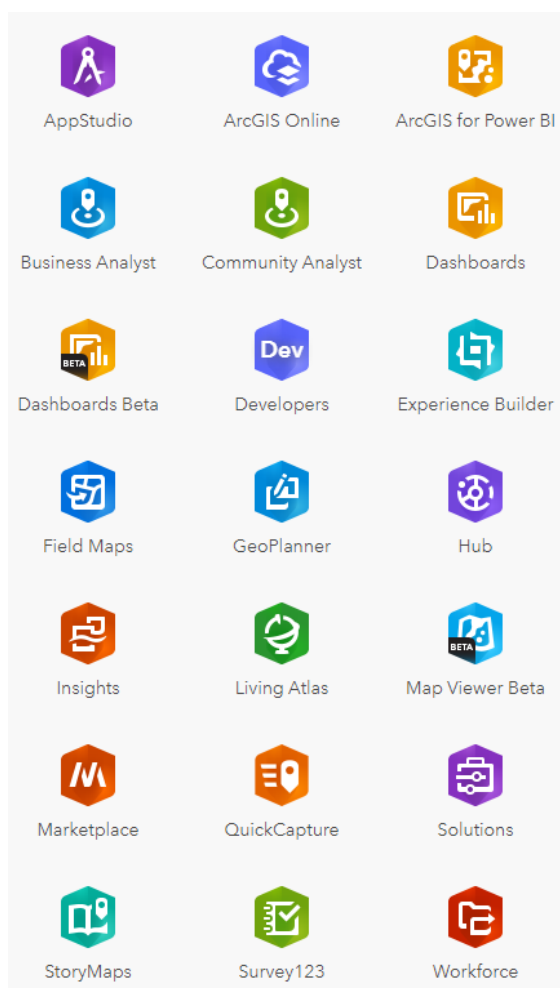


Рис. А.10 - ГІС додатки програмного середовища ArcGIS

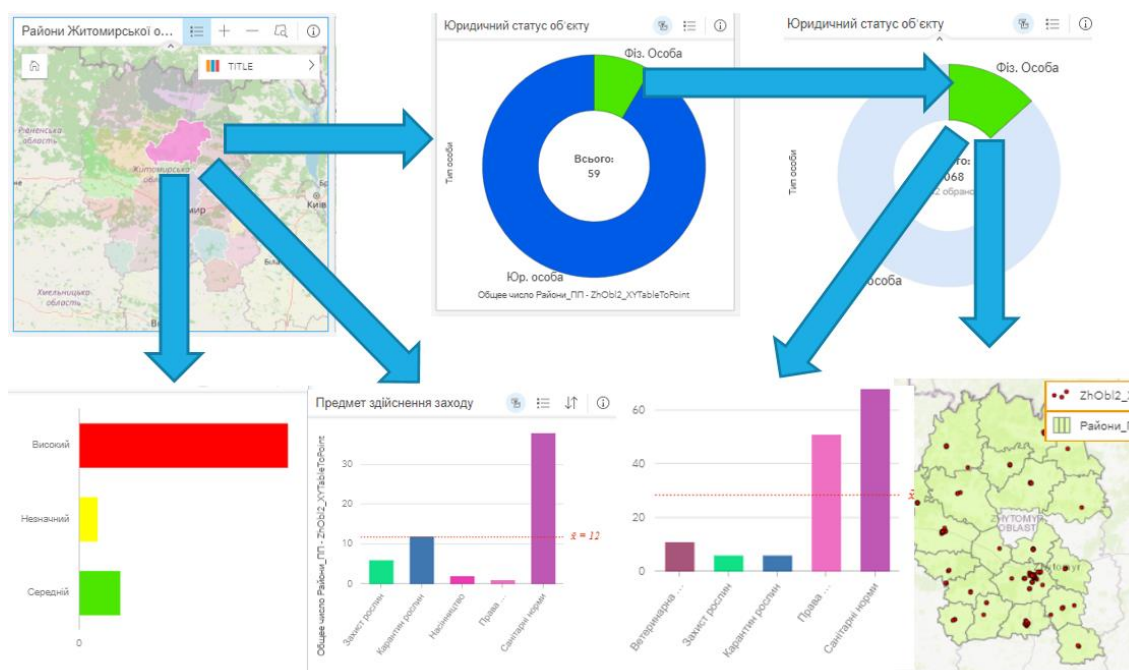


Рис. А.11 - Приклад створення порталу на основі ГІС-додатків ArcGIS Pro

Загалом ГІС додатки об'єднуючи картографічну та статистичну інформацію допомагають проаналізувати ефективність роботи підприємства або установи та своєчасно прийняти правильні управлінські рішення.

3. Приклади розв'язання тематичних задач в ArcGIS Pro

3.1. Використання матеріалів космічних зйомок для аналізу земного покриття

Для формування цифрової бази даних покриття землі України можна використовувати геоінформацію, зібрану з КА TERRA та AQUA прибором Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Спектрорадіометр встановлений на КА TERRA і AQUA дозволяє отримувати зображення роздільної здатності 500 м. Для проведення класифікації обраний тип покриття Землі (MCD12Q1) версії 6, який надає глобальні типи земельних покриттів з річними інтервалами (2001–2018 рр.), в шести різних схемах класифікації (в роботі використано LC_Type1, основні характеристики представлено в табл. А.1). Для отриманих зображень проведено контрольовану класифікацію та додаткову пост-обробку, яка використовує попередні знання та допоміжну інформацію для подальшого виділення конкретних класів. Продукт на виході обробляється п'ятьма різними системами класифікації, для прикладу було використано IGBP (Міжнародна програма геосфери-біосфери) систему63, яка на виході формує 17 класів земного покриття (табл. А.2).

Таблиця А.1 – Характеристика MCD12Q1 - LC_Type1

Ім'я SDS	LC_Type1
Опис	Тип покриття земельного покриття 1: щорічна класифікація IGBP
Одиниці	Клас
Тип даних	8-бітове ціле без знаку
Значення заповнення	255
Немає значення даних	Не застосовується
Дійсний діапазон	Від 1 до 17
Фактор масштабу	Не застосовується

Використовувалися растрові зображення, сформовані в результаті застосування алгоритму IGBP (рис. А.12), яке в подальшому в середовищі ArcGIS перетворювалось у векторний шар (рис. А.13).

Таблиця 1. 2 – Легенда та описи класів IGBP MCD12Q1

Назва класу	Тип	Опис
Вічнозелені ліси хвойні	1	Переважають вічнозелені хвойні дерева. Деревний покрив > 60%.
Вічнозелені широколисті ліси	2	Переважають вічнозелені широколисті дерева. Деревний покрив > 60%.
Листяні хвойні ліси	3	Переважають листяні хвойні дерева. Деревний покрив > 60%.
Листяні широколисті ліси	4	Переважають листяні широколистяні дерева. Деревний покрив > 60%.
Змішані ліси	5	Переважають листяні та вічнозелені. Деревний покрив > 60%.
Закриті чагарники	6	Переважають деревні багаторічники (висота 1–2 м) > 60% покриття.
Відкриті чагарники	7	Переважають деревні багаторічники (висота 1–2 м) 10–60% покриття.
Деревні луги	8	Покриття дерев 30–60% (крона > 2м).
Луги	9	Покриття дерев 10–30% (крона > 2м).
Пасовища	10	Переважають трав'янисті однорічні рослини (< 2м).
Постійні водно-болотні угіддя	11	Постійно затоплені землі з 30–60% водою покрив > 10% рослинного покриву.
СГ землі	12	Щонайменше 60% площі займають оброблювані посіви.
Міські та забудовані землі	13	Не менше 30% непроникної площі поверхні, включаючи забудовані землі, асфальт та транспортні сполучення.
Природні рослинні мозаїки	14	Мозаїки дрібного вирощування 40–60% деревного покриву, чагарник або трав'яниста рослинність.
Постійний сніг	15	Щонайменше 60% площі покрито снігом та льодом.
Безплідна земля	16	Щонайменше 60% площі є нерослими (пісок, скеля, ґрунт) ділянки з рослинністю менше 10%.
Водні об'єкти	17	Принаймні 60% площі покрито постійними водними об'єктами.

З метою формування панельної бази геопросторових даних розроблено модель обробки класифікованих зображень з використанням додатку Model Builder програмного комплексу ArcGIS Pro.

Вхідні параметри моделі такі:

– класифіковані растрові зображення території України (17 класів земного покриття за системою IGBP);

– межі областей України, представлені у вигляді шейп-файлу.

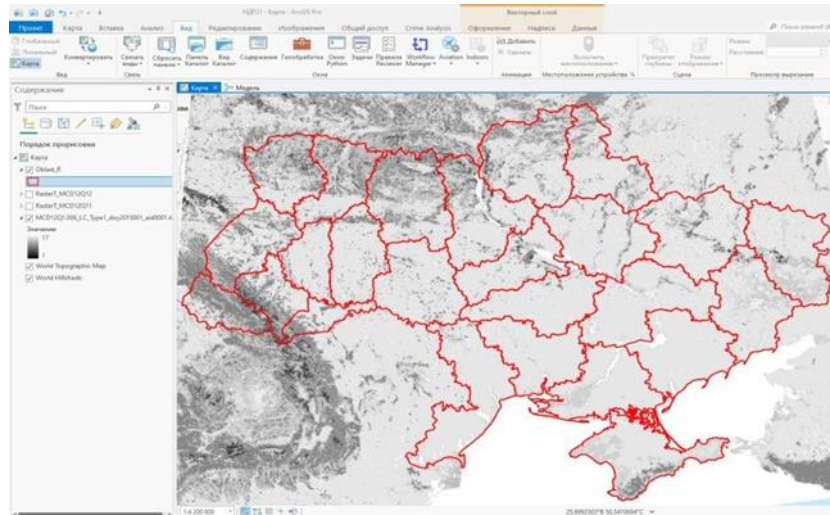


Рис. А.12 – Вхідне растрове зображення



Рис. А.13 – Результат трансформації растрового зображення у векторні шари

Для зображення за кожний рік спостереження проводиться наступна послідовність операцій:

1) Для зменшення обсягу інформації, що обробляється, та виключення з обробки частини полігональних об'єктів, які виходять за межі досліджуваної території, з використанням функції «Вирізати (Clip)» проводиться вирізання частини зображення, яке знаходиться у межах області.

Функція «Вирізати (Clip)» вирізає растр, використовуючи прямокутник, відповідно до визначених екстентів, або відрізує растр за формою вхідного класу полігональних об'єктів. За формою, що визначає вирізання, можна вирізати екстент растра або вирізати область в растрі.

Вхідними даними для цієї функції є вхідний растр і екстенти.

2) На другому етапі з використанням функції «Растр в полігони» проводиться перетворення растрового зображення в полігональні об'єкти відповідно до проведеної класифікації.

Функція «Растр в полігони» конвертує набір растрових даних у полігональні просторові об'єкти. Вхідний растр може мати будь-який розмір комірки і повинен бути коректним цілочисельним набором растрових даних. Параметр Поле дозволяє вибирати, яке атрибутивне поле вхідного набору растрових даних стане атрибутом у вихідному класі об'єктів.

3) За допомогою функції «Вибрати в шарі по атрибуту (Select Layer By Attribute)», здійснюється формування окремих файлів з полігонами для кожного класу земельного покриття та присвоєння йому унікального імені.

Функція «Вибрати в шарі по атрибуту (Select Layer By Attribute)» додає, оновлює або видаляє вибірку на шарі або поданні таблиці на основі атрибутивного запиту. Вхідними даними повинен бути векторний шар або подання таблиці. Вхідними даними не можуть бути клас просторових об'єктів або таблиця. Цей інструмент працює з шарами або представленнями таблиці в таблиці змісту ArcGIS, а також з шарами або представленнями таблиці, створеними в скриптах за допомогою інструментів «Створити векторний шар (Make Feature Layer)» або «Створити представлення таблиці (Make Table View)». Якщо задані параметри середовища екстену (Extent environment), або в параметрі Вхідний шар або Подання таблиці (Input Layer or Table View), є визначальний запит, будуть обрані тільки рядки або об'єкти, що знаходяться в межах екстену, або ті що визначаються запитом.

4) Далі до таблиці атрибутів кожного із сформованих файлів додається поле, в яке записується площа кожного полігону, обчислена в гектарах.

Для цього використовується функція «Додати поле», яка додає нове поле в таблицю або таблицю класу просторових об'єктів, векторний шар, каталог растрів і / або растри з атрибутивними таблицями. Додане поле завжди буде відображатися в кінці таблиці.

5) Для подальшої обробки даних формується файл, доступний для обробки табличним процесором Excel з використанням функції «Таблиця в Excel».

6) Дана процедура повторюється для зображення, отриманого в наступному році з використанням оператора «ітерувати значення поля». Оператор «ітерувати значення поля» виконує ітерації для кожного значення в полі. Цей інструмент призначений для використання в Model Builder. Вихідне значення інструменту – це змінна Значення (Value), яка містить значення поля. Цю змінну можна використовувати для підстановки вбудованої змінної (% Value %). В результаті обробки класифікованих зображень у програмному середовищі ArcGIS Pro формується значна кількість файлів, яка визначається добутком кількості років спостереження, числом рівнів класифікації зображень та кількістю адміністративно-територіальних одиниць (25 адміністративних одиниць*12 років* 17 класів = 5100 файлів Excel). З використанням функції rbind програмного середовища R, яка об'єднує вектор, матрицю або кадр даних за строками, проведено формування результуючого масиву, в якому зосереджені

дані за роками, районами та параметрами класифікації. Вказаний масив даних перетворюється в зведену таблицю з використанням табличного процесору Excel (рис. А.14).

Рис. А.14 – Зведена панель просторових даних

3.2. Класифікація зображень

Класифікація зображень - це процес призначення певного класу кожному пікселю або групі пікселів на зображенні на основі їхніх властивостей та характеристик. ArcGIS Pro має вбудовані інструменти для класифікації зображень, які дозволяють використовувати різні методи, такі як надавання атрибутів, піксельна та об'єктна класифікація, для отримання більш точних результатів. Ось детальний опис операцій класифікації зображень з використанням ArcGIS Pro:

1. Підготовка даних. Перш ніж почати класифікацію зображень, важливо підготувати дані. Це може включати в себе наступні кроки:

завантаження зображення: додавання зображення, яке необхідно класифікувати, у проект ArcGIS Pro;

перевірка якості: аналіз зображення, що воно має достатню роздільну здатність та якість для точної класифікації;

передобробка: виконання передобробки зображення, якщо потрібно, таку як підготовка даних, фільтрація шуму або видалення забруднень.

2. Вибір методу класифікації. ArcGIS Pro надає кілька методів класифікації, таких як:

Класифікація на основі атрибутів. Цей метод використовує статистичні властивості пікселів (наприклад, яскравість, кольори, текстура) для призначення класу кожному пікселю.

Піксельна класифікація. Кожному пікселю призначається клас на основі його значень яскравості або кольору.

Об'єктна класифікація. Групі пікселів, які утворюють об'єкти, призначається клас на основі їхніх групових властивостей.

3. Налаштування параметрів класифікації. Залежно від обраного методу, вам може знадобитися налаштувати деякі параметри. Наприклад:

для класифікації на основі атрибутів можна вказати кількість класів або метод визначення границь між класами;

при піксельній класифікації виберіть метод класифікації та задайте поріг для розділення класів;

для об'єктної класифікації визначте параметри, такі як розмір об'єктів та пороги схожості між ними.

4. Запуск класифікації. Після налаштування параметрів запусить процес класифікації. ArcGIS Pro обробить зображення та призначить клас кожному пікселю або групі пікселів залежно від обраних параметрів.

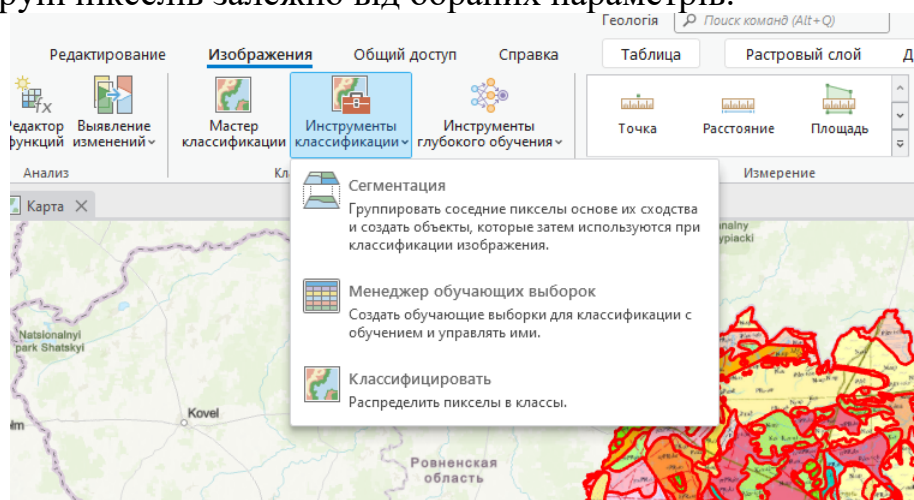


Рис. А.15 – Інструменти класифікації в ArcGIS Pro

5. Оцінка результатів. Після завершення класифікації оцінюють отримані результати. Необхідно використовувати різні метрики, такі як точність класифікації, матриця помилок або візуалізація класифікованого зображення, для оцінки якості результатів.

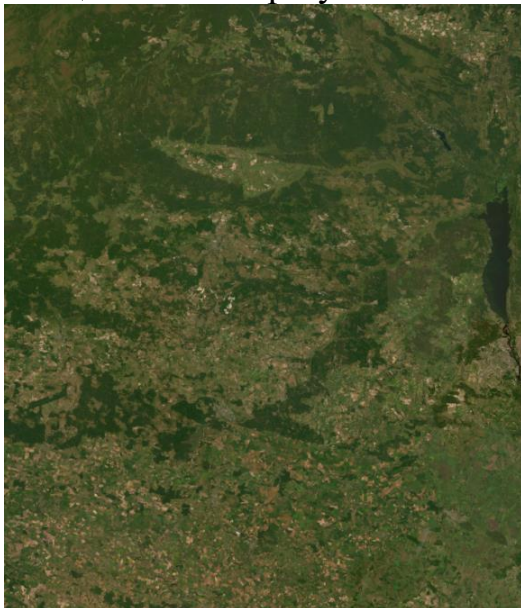


Рис. А.16 – Некласифіковане зображення

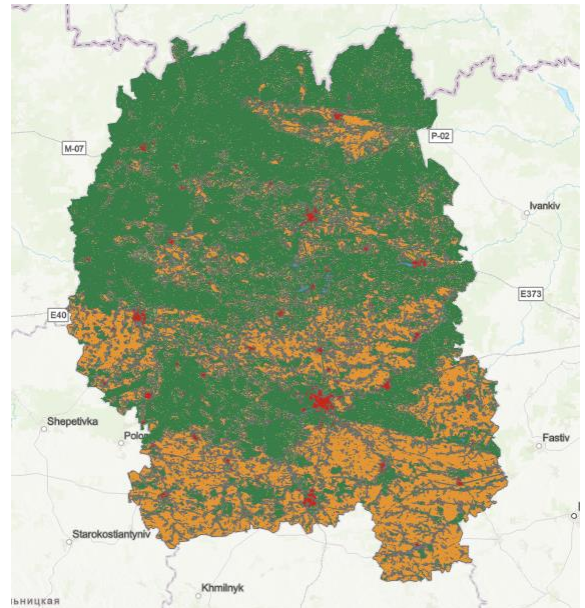


Рис. А.17 – Класифіковане зображення

6. Вдосконалення та підтримка результатів. Враховуючи оцінку результатів, можливо, знадобиться вдосконалення параметрів або використання додаткових методів для поліпшення класифікації. Також важливо зберегти дані та документацію для подальшого використання або обміну.

Це загальний опис процесу класифікації зображень з використанням ArcGIS Pro. Конкретні кроки та параметри можуть варіюватися в залежності від конкретної задачі та типу зображення.