

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

КАФЕДРА АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

д-р. техн. наук, проф.

_____ В. Ю. Ларін

«__» _____ 2021 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ

«БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ»

**Тема: Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою
безпілотного авіаційного комплексу**

Виконав: _____ **І.Л. Додатчук**

Керівник: д-р техн. наук, проф. _____ **В.Ю. Ларін**

Нормоконтролер д-р техн. наук, проф _____ **Т.Ф. Шмельова**

Київ - 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Аеронавігації, Електроніки та Телекомунікацій

Кафедра Аеронавігаційних Систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ларін В.Ю.

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Додатчук Ілона Леонідівна

1. Тема дипломної роботи «Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою безпілотного авіаційного комплексу» затверджена наказом ректора від 22.10.2021 р. № 2339/ст.
2. Термін виконання роботи: з 22.10.2021 по 27.12.2021.
3. Вихідні дані до роботи: дані організацій:
4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз методології авіаційних дистанційних досліджень, аналіз апаратури для виконання оптичних та магнітометричних дистанційних досліджень авіаційного базування, методологічне забезпечення обраних видів дистанційних досліджень, обґрунтування конфігурації безпілотних авіаційних платформ для виконання досліджень; обґрунтування та вибір апаратури корисного навантаження для реалізації дистанційних досліджень за допомогою БАК.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Календарний план-графік

| № | Завдання | Термін виконання | Відмітка про виконання |
|---|---|---------------------|------------------------|
| 1 | Підготовка та написання розділу 1 «Аналіз методів та інструментарію авіаційних дистанційних досліджень покладів корисних копалин» | 22.10.21-11.11.21 | Виконав |
| 2 | Підготовка та написання розділу 2 «Технічне завдання» | 12.11.21-13.11.21 | Виконав |
| 3 | Підготовка та написання розділу 3 «Теоретичні відомості та моделі» | 04.11.21-16.11.21 | Виконав |
| 4 | Підготовка та написання розділу 4 «Обґрунтування конфігурацій авіаційних платформ» | 17.11.21-03.12.21 | Виконав |
| 5 | Підготовка та написання висновків до дипломної роботи | 14.12.21 - 16.12.21 | Виконав |
| 6 | Оформлення роботи згідно вимог нормоконтролю | 07.12.21 - 18.12.21 | Виконав |
| 7 | Підготовка презентації та доповіді | 15.12.21-24.12.21 | Виконав |

7. Дата видачі завдання: « 01 » жовтня 2021 р.

Керівник дипломної роботи

(підпис керівника)

Ларін Віталій Юрійович

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

(підпис студента)

Додатчук Ілона Леонідівна

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою безпілотного авіаційного комплексу»: 92 сторінки, 5 таблиць, 33 рисунка, 38 використаних джерела.

Об'єкт дослідження – дистанційні дослідження покладів корисних копалин

Предмет дослідження – реалізація дистанційних досліджень земної поверхні на основі дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів.

Мета дослідження: дослідити особливості геологорозвідувальних вишукувань корисних копалин за допомогою дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів дистанційних досліджень.

В дипломній роботі виконано аналіз та обґрунтування конфігурацій безпілотних авіаційних комплексів для виконання дистанційних вишукувань покладів корисних копалин на основі сканування сигналів досліджуваної ділянки земної поверхні за допомогою пристроїв корисного навантаження які функціонують на основі термографічного аналізу відбитих теплових сигналів та вимірювання магнітних аномалій мінералів, надані рекомендації по організації польотних місій вказаних безпілотних авіаційних комплексів з урахуванням специфіки функціонування дослідницької апаратури корисного навантаження

ДПЛА, ДПАС, ОПТИЧНІ МЕТОДИ, МАГНІТОМЕТРІЯ, ДИСТАНЦІЙНА ГЕОЛОГОРОЗВІДКА, ПОКЛАДИ КОРИСНИХ КОПАЛЕНЬ

АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Вступ..... | 8 |
| Перелік умовних позначень, скорочень, термінів | 9 |
| Розділ 1.. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЮ АВІАЦІЙНИХ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКЛАДІВ КОРИСНИХ КОПАЛЕНЬ ... | 11 |
| 1.1. Предмет дистанційних досліджень земної поверхні..... | 11 |
| 1.2. Застосування інструментарію дистанційно-пилотованих авіаційних систем та безпілотних авіаційних комплексів для виконання дистанційних досліджень..... | 13 |
| 1.3. Бортові системи для оптичних досліджень земної поверхні авіаційного базування при виконанні геологорозвідувальних вишукувань..... | 20 |
| 1.3.1 Система AVIRIS | 21 |
| 1.3.2 Система НуМар | 31 |
| 1.3.3 Систем SEBASS | 35 |
| 1.4. Метод магнітометричних досліджень земної поверхні при виконанні геологорозвідувальних вишукувань..... | 44 |
| Висновки до розділу 1 | 48 |
| Розділ 2.ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ | 49 |
| 2.1 Найменування дипломної роботи | 49 |
| 2.2 Підстава для проведення дипломної роботи | 49 |
| 2.3 Мета і призначення роботи | 49 |
| 2.3.1 Мета роботи..... | 49 |
| 2.3.2 Призначення роботи | 49 |
| 2.4 Вихідні дані для проведення роботи | 50 |
| 2.5 Очікувані наукові результати і порядок їхньої реалізації | 50 |
| 2.5.1 Очікувані наукові результати і порядок їхньої реалізації | 50 |
| 2.5.2 Порядок реалізації наукових результатів | 50 |
| 2.6 Очікувані наукові результати і порядок їхньої реалізації | 51 |
| 2.7 Етапи роботи і терміни їх виконання..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Розділ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА ДЛЯ ВИКОНАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКЛАДІВ КОРИСНИХ КОПАЛЕНЬ | 53 |
| 3.1 Характеристика термометричного дистанційного методу геологічних досліджень..... | 53 |
| 3.2 Обґрунтування вибору сенсора TIR- інфрачервоного діапазону для дистанційних досліджень для безпілотного авіаційного комплексу | 57 |
| 3.3 Обґрунтування пристрою для магнітометричних авіаційних досліджень.. | 61 |
| Висновки до розділу 3 | 68 |
| Розділ 4. ОБґРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ БЕЗПІЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ МІСЦІ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 69 |
| 4.1. Обґрунтування авіаційної платформи безпілотного авіаційного комплексу | 69 |
| 4.2. Конструкції ДПЛА для встановлення квантових магнітометричних пристроїв | 70 |
| 4.3. Немагнітні конструкції ДПЛА..... | 72 |
| 4.3.1. Конструкція фюзеляжу з немагнітних матеріалів | 72 |
| 4.3.2. Конструкція немагнітної безпілотної платформи типу “літаюче крило” ... | 73 |
| 4.4. Особливості виконання авіаційних магнітометричних досліджень з ДПЛА вертикального зльоту-посадки VTOL..... | 76 |
| 4.5. Розміщення модуля корисного навантаження ДПЛА для термографічного дослідження покладів корисних копалин | 79 |
| 4.6. Організація польотного завдання безпілотних авіаційних комплексів дистанційного зондування покладів корисних копалин..... | 81 |
| Висновки до розділу 4 | 84 |
| Висновки до дипломної роботи | 85 |
| Список використаних джерел | 89 |

ВСТУП

На сьогодні дистанційно-пілотовані авіаційні системи (ДПАС) застосовуються в багатьох сферах економічної діяльності: виконанні традиційних транспортних функцій; виконання аерофото- та відеозйомки для картографування та топографії місцевості для отримання точних даних про рельєф і уточнення карт; моніторинг об'єктів інфраструктури енергетичного і нафтогазового комплексу; моніторинг лісних масивів; виконання пасивної (спостережувальної) та активної (виконавчої) функції в процесах сільськогосподарських технологій (точне рільництво); виконання пасивної (моніторинг) та активної (виконавчої) функції при запобіганні та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Розвідка родовищ корисних копалин - складне і комплексне завдання, для ефективного вирішення якого фахівець потребує максимально можливої кількості актуальної інформації про об'єкт чи ділянку, що досліджується. Дистанційне зондування земної поверхні це сукупність різноманітних методів та інструментів, які дозволяють отримувати візуальну, спектральну та іншу корисну інформацію. На основі аналізу отриманих даних складають оцінку певної ділянки земної поверхні на можливу наявність родовища корисних копалин. Дистанційне дослідження це цінний інструмент геологорозвідника, що надає інформацію та дозволяє зекономити час та ресурси. Хоча дистанційне дослідження не може точно вказати на місце розташування великої покладини корисних копалин, але отримані за допомогою нього дані, можуть бути використані для проведення вишукувань на більш дрібних ділянках. Також застосування методів та інструментів дистанційного дослідження скорочує ризик реалізації розвідувального проєкту, допомагаючи встановлювати черговість розвідки різних ділянок за їх перспективами.

Дистанційне дослідження земної поверхні почало швидко розвиватися лише останнім часом на тлі розвитку сучасних цифрових технологій. Спочатку основною сферою застосування методів дистанційного зондування були порівняльні дослідження. Так, якщо у певному районі знаходили родовище

якоїсь цінної породи, аерофотознімки цієї ділянки порівнювали зі знімками інших районів для пошуку загальних геологічних особливостей, які можуть бути вказівкою на наявність запасів цінної сировини. У комбінації з традиційними методами (геологічними, геофізичними, геохімічними), методи дистанційного дослідження земної поверхні дозволяють підвищити об'єктивність геологічних знань про ефективність розвідки родовищ, структуру літосфери, прояви геологічних процесів, аналізу техногенного впливу на навколишнє середовище.

Існує достатньо прикладів систем авіаційного базування для дистанційної розвідки покладів корисних копалин. Як носій апаратури дистанційного дослідження, яка може бути дуже різною за розмірами та вагою, раніше використовували пілотовані легкі літаки. Зараз для розташування приладів дистанційного зондування вже достатньо часто використовують дистанційно-пілотовані повітряні судна або безпілотні літальні апарати, в яких запрограмоване польотне завдання, що дозволяє виконувати політ над певною обмеженою територією після узгодження з органами управління повітряним рухом у випадку, якщо такий політ відбувається на висотах в контрольованому повітряному просторі. Обрання конкретної авіаційної платформи залежить від принципу дії приладу дистанційного зондування та алгоритмів його виконання.

Можна впевнено стверджувати, що поєднання сучасних методів та засобів дистанційних геологічних вишукувань і дистанційно-пілотованих авіаційних систем відкриває нові можливості в геологорозвідці.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

AVIRIS - Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer

AGL - Above Ground Level

ICAO - International Civil Aviation Organisation

Ifov - Instantaneous Field of View

FIR - Far InfraRed

FOV - Field of View

HyMap - Hyperspectral Mapper

NIR - Near InfraRed

MIR - Mead range InfraRed

TIR - Thermal InfraRed

SEBASS - Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System

SWIR - Short Wave InfraRed

UAV – unmanned aerial vehicle

UAS - unmanned aircraft systems

VIS - Visible optics

БАК – безпілотний авіаційний комплекс

БАС - безпілотна авіаційна система

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БПС – безпілотне повітряне судно

ДПАС - дистанційно-пілотована авіаційна система

ДПЛА - дистанційно-пілотований літальний апарат

ДПАС - дистанційно-пілотована авіаційна система

ОПР – обслуговування повітряного руху

ПС – повітряне судно

СК ДПЛА - станція управління дистанційно-пілотованим літальним апаратом

УПР - управління повітряним рухом

Розділ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЮ АВІАЦІЙНИХ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКЛАДІВ КОРИСНИХ КОПАЛЕНЬ

1.1 Предмет дистанційних досліджень земної поверхні

Дистанційне дослідження земної поверхні - це процес отримання інформації про поверхню Землі та об'єкти на ній, а також інформації про верхній шар земної кори за допомогою безконтактних методів, коли вимірювальний прилад віддалений від об'єкта досліджень на значну відстань. Основою методів дистанційного зондування є інтерпретація та реєстрація результатів вимірювання електромагнітного випромінювання, відбитого від об'єкта або власного випромінювання об'єкта в деякій віддаленій від цього об'єкта точці простору. За допомогою дистанційних досліджень можна вивчати фізичні та хімічні властивості об'єктів. До методів дистанційного зондування відносять і фотографічну зйомку, суттєвим обмеженням якої є те, що емульсійний шар фотоплівки чутливий тільки до випромінювання у видимій або близькій до неї частині електромагнітного спектра [1].

Предмет дистанційного дослідження як наукової дисципліни вивчає просторово-часові властивості та відносини об'єктів, що виявляються прямо чи опосередковано у власному чи відображеному випромінюванні, що дистанційно реєструється з космосу або з атмосфери у вигляді двовимірного зображення – знімка. Ця частина дистанційних досліджень названа аерокосмічним зондуванням (АКЗ). Метод аерокосмічного зондування заснований на використанні знімків, які, як свідчить практика, мають найбільші можливості для комплексного вивчення земної поверхні. Методи аерокосмічного зондування засновані на використанні датчиків, які розміщують на космічних апаратах і реєструють електромагнітне випромінювання у форматах, пристосованих для цифрової обробки, і значно більш широкому діапазоні електромагнітного спектра. Більшість методів АКЗ використовують

інфрачервоний діапазон відбитого випромінювання, тепловий інфрачервоний та радіодіапазон електромагнітного спектру.

Протягом останнього десятиріччя у всьому світі можна спостерігати значне збільшення частини аерогеофізичних робіт у загальній структурі геологорозвідувальних вишукувань. Аерогеофізичні технології відрізняються від інших геологічних технологій тим що мають повільний темп обстеження територій, особливо важкодоступних, знижену, по зрівнянню з іншими собівартість, можливістю комплексувати дані від різних методів дистанційних досліджень і також високим значенням статистичної достовірності отримуваних даних.

Виконання традиційних авіаційних геофізичних робіт створює необхідність вирішувати певні проблеми, а саме - значна собівартість експлуатації авіаційних пілотованих носіїв геофізичних платформ - і літаків і гвинтокрилів, необхідність використання коштовної авіаційної інфраструктури (служб аеропортів/аеродромів, служб обслуговування повітряного руху), наявність підготовлених злітно-посадкових смуг в районах виконання досліджень. Внаслідок вказаних факторів широке коло фахівців не має можливості отримати доступ для виконання повноцінних досліджень. Застосування безпілотних авіаційних комплексів для виконання аерогеофізичних робіт дозволить у значній мірі усунути вказані проблеми при вирішенні завдань геологічної розвідки покладів корисних копалин.

Згідно з рядом публікації у закордонних періодичних виданнях, пов'язаних з проблемами дистанційних досліджень навколишнього середовища в журналах відображають зростаючий попит виконання дистанційних досліджень за допомогою ДПАС та БАК, як відповідної платформи для отримання якісних даних для різних застосувань, таких як відображення пожеж [2,3], спостереження за арктичною льодовою ситуацією, атмосферними дослідженнями [4], картографування [5 - 7], виконання гідрологічних та прибережні дистанційних спостережень [8-10] а також при виконанні функцій спостереження за вегетацією сільськогосподарських рослинних культур.

Вважають, що дистанційні дослідження не можуть із гарантованою точністю вказати на координати розташування покладин. Але навіть при відсутності точних даних дистанційного дослідження, його результати можуть бути використані для уточнених вишукувань на більш локальних ділянках. Крім того результати дистанційного дослідження дозволяють скоротити ризик геологорозвідки, шляхом встановлення черговості обстеження ділянок місцевості відповідно до їх пріоритету з точки зору їх перспективності, після чого на обраних ділянках виконують свердловинні роботи.

Потрібно вказати, що в цілому усі методи дистанційних досліджень мають один загальний недолік - а саме невелику глибину дослідження, яка доходить до значень одиниць сантиметрів при дослідженні в мікрохвильовій частині спектру. Внаслідок такого обмеження дуже важливу роль відіграє застосування мультиспектральних та гіперспектральних методів, які дозволяють оцінити мінеарологію досліджуваної ділянки. Також важливим є синтез загальної картини з використанням даних різних типів дистанційного дослідження - космічного базування, авіаційного базування (на пілотованих літаках) та авіаційного базування за допомогою безпілотних авіаційних комплексів. Саме застосування БАК вважають дуже перспективним завдяки гнучкості і можливості організувати складні траєкторії польоту на різних висотах.

1.2 Застосування інструментарію дистанційно-пілотованих авіаційних систем та безпілотних авіаційних комплексів для виконання дистанційних досліджень

Потрібно внести роз'яснення щодо визначення безпілотних платформ. На сьогодні офіційним терміном який надають міжнародні авіаційні структури є - документ ІСАО 10019 [11] який чітко визначає такий повітряний агрегат як дистанційно-пілотована авіаційна система. Таке визначення дають і нещодавно прийняті поправки до Повітряного кодексу України. С точки зору безпеки польотів таке тлумачення є безумовно вірним, тому що будь яке повітряне

судно не може знаходитися в повітряному просторі без постійного контролю з боку його пілота або оператора.

Термін “Безпілотний авіаційний комплекс” дає натяк на те, що такий повітряний агрегат, по-перше, певний час виконує політ в повітряному просторі в автоматичному режимі - тобто без втручання оператора, а по друге - що такий пристрій виконує певні функції, які виходять за межі виконання традиційних транспортних функцій повітряних суден. Також, враховуючи особливості проведення геологічних вишукувань, які досить часто проводять в незаселених або дуже мало заселених районах земної кулі, на віддалені від повітряних трас, можна припустити, що при виконанні польоту повітряного сегменту БАК, який відбувається в зоні низьких висот та є таким, що виконується за циклічним алгоритмом та передбачає багаторазовий проліт однієї і тій траєкторії, можливо підключення автоматичного польоту протягом певного часу [12].

Тому ми, враховуючи предмет дипломного дослідження можемо використовувати обидва терміни, та більш коректним для даного дослідження підходить термін безпілотний авіаційний комплекс.

Дистанційні дослідження на базі авіаційних платформ взагалі і зокрема на базі безпілотних авіаційних комплексів можна умовно розділити на два типи. Перший тип, це дистанційні дослідження активного типу - коли на повітряний сегмент встановлено джерело зондуючого сигналу. Перший тип досліджень також можна віднести до радіолокаційних досліджень. Другий тип, який у свою чергу можна розділити також на дві схеми - це дистанційні дослідження пасивного типу, коли на БАК в комплекті корисного навантаження використовують лише приймачі сигналів, які відбиваються від земної поверхні від джерела природного випромінювання (Сонця) - це фактично сигнали які відносять до широкосмугових сигналів оптичного спектру, та сигнали, які генерують складові земної кори - магнітні та гравітаційні сигнали, що сприймають магнітометри та гравіметри. На рис. 1.1 наведена загальна схема умовного поділення дистанційних досліджень на базі авіаційних платформ [12].

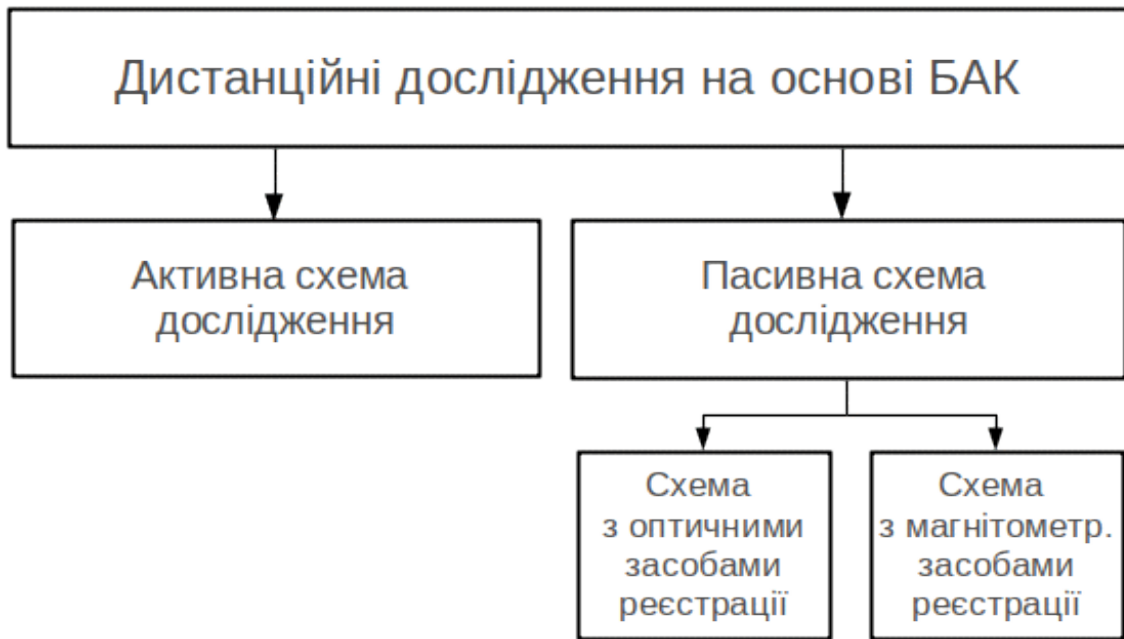


Рисунок 1.1 - Поділення схем дистанційних досліджень на основі БАК [12]

На рис. 1.2. наведено схему активних дистанційних досліджень з джерелом випромінювання зондуючого сигналу. На рис. 1.3. наведено схему пасивних дистанційних досліджень з використанням оптичних засобів реєстрації даних, а на рис. 1.4. наведено схему пасивних дистанційних досліджень з використанням магнітометричних та/або гравіметричних засобів реєстрації даних. Надамо розшифрування скорочень, які використані на вказаних рисунках [12]:

БАК (ПС) - безпілотний авіаційний комплекс (повітряний сегмент);

БАК (НС) - безпілотний авіаційний комплекс (наземний сегмент);

БД - база даних;

ДВ - джерело випромінювання;

ДЗС - джерело зондуючого сигналу;

ГІС - геоінформаційна система;

КНДД - комплекс корисного навантаження дистанційного дослідження.

Сцена дослідження - це ділянка земної поверхні, сигнали від якої в визначений момент часу приймає і перетворює бортовий первинний перетворювач (сенсор). Тобто сцена дослідження проявляє себе у певному фізичному полі (або в декількох полях), яке може бути виміряне.

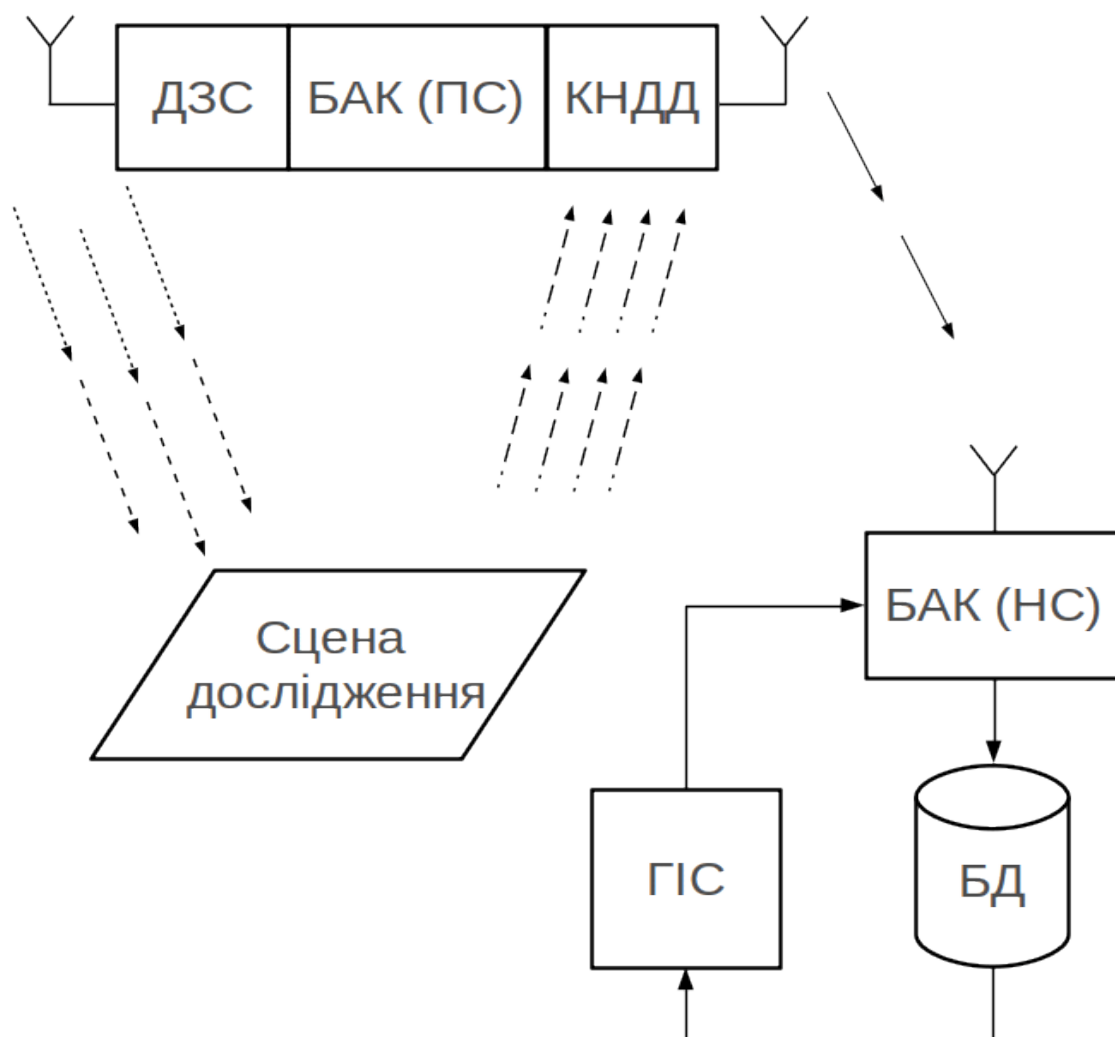


Рисунок 1.2 - Схема активних дистанційних досліджень з джерелом випромінювання зонduючого сигналу [12]

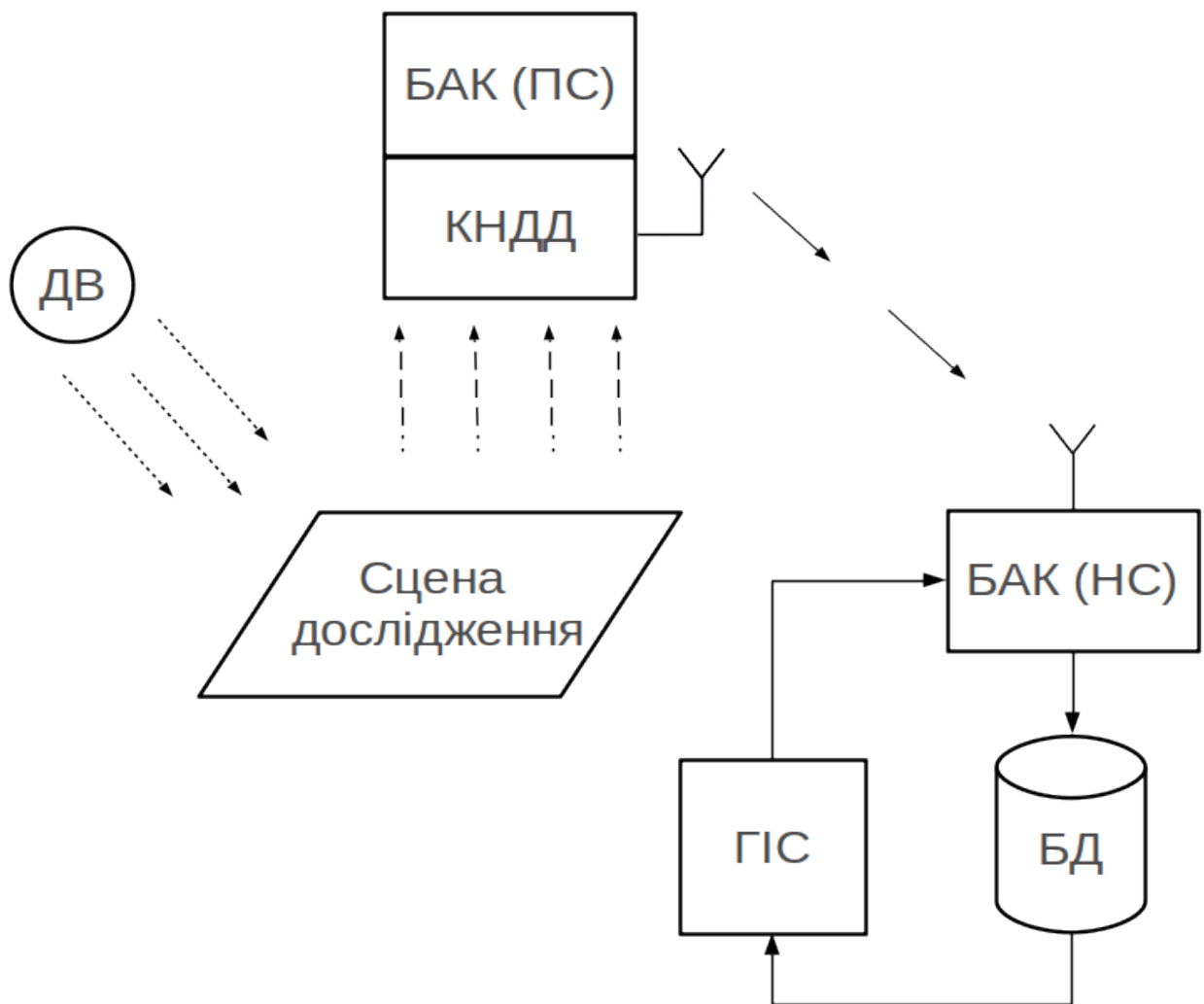


Рисунок 1.3 - Пасивна схема дистанційних досліджень з використанням оптичних засобів реєстрації даних [12]

Коротко опишемо загальні риси та особливості функціонування кожної схеми. Схема активних дистанційних досліджень функціонує по типу радіолокаційної станції (рис.1.2). ДЗС через передавальну антену випромінює електромагнітний сигнал - зазвичай у вигляді імпульсної послідовності. Сигнал відбивається від досліджуваного об'єкту - рельєфу земної поверхні, або навіть неглибоких підґрунтових шарів та його відбита складова повертається до точки випромінювання - до приймальної антени КНДД [12]. В апаратурі КНДД сигнал перетворюється у зручну для трансляції форму та передається по каналу зв'язку корисного навантаження до БАС (НС). Далі, в апаратурі наземної станції цей сигнал аналізується та опрацьовується за допомогою відповідного методу математичного та алгоритмічного

забезпечення, після цього передається у БД, та потім до ГІС, оскільки результатом опрацювання зазвичай є отримання певної карти досліджуваної земної поверхні [12].

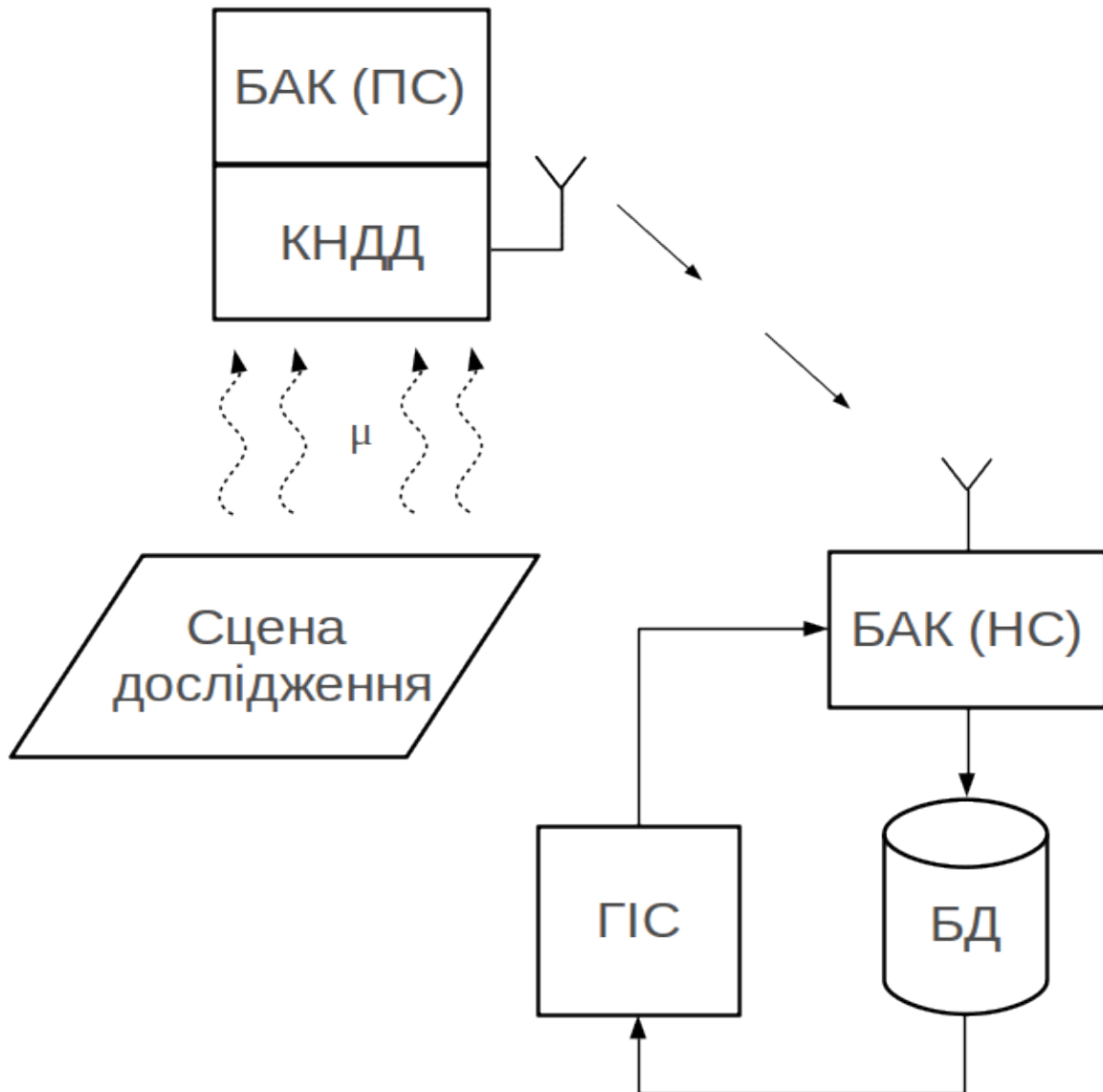


Рисунок 1.4 - Пасивна схема дистанційних досліджень з використанням магнітометричних (гравіметричних) засобів реєстрації даних [12]

Як правило, всі алгоритми опрацювання передбачають ітераційний процес оновлення інформації, тому на схемах показано ланцюг обміну інформацією: БАК (НС) - БД - ГІС [12].

В пасивній схемі дослідження на основі оптичного методу і відповідно оптичних засобів реєстрації даних (рис.1.3) в якості джерела зондуючого

сигналу використовують природний сигнал всесвіту - сонячне сяйво. Далі схема здається такою ж самою як і на рис.1.2. При цьому приймачем сигналу в апаратурі КНДД є не антена, а широкопугова або іншого типу оптична камера, або часто декілька камер різного типу. При використанні оптичного методу необхідно враховувати геометричні фактори взаєморозташування авіаційної платформи та джерела світла - Сонця. Крім того є ряд інших факторів, які впливають на якість отриманого відеосигналу. Після перетворення в КНДД сигнал транслюють до БАК (НС) і далі інформація повторює шлях до БД, ГІС та знову до БАК (НС). Зрозуміло, що алгоритми опрацювання отриманих відеоданих будуть відрізнятися як від методів в активній схемі дослідження, так і в залежності від того, яку смугу оптичного спектру сигналу приймає камера в КНДД [12].

В пасивній схемі дослідження на основі магнітометричного методу або на основі гравіметричних досліджень і відповідних засобів реєстрації даних (рис.1.4) не потрібно джерело зондуючого сигналу - ані штучне, ані природне. Тому що вказані методи сприймають сигнали, які генерує досліджуваній об'єкт - сигнали магнітного поля Землі, які трансформуються у поверхневих шарах земної кори внаслідок проходження через певні породи або їх комбінації. Перевага цього методу полягає як раз у відсутності залежності від джерела зовнішнього сигналу. В якості приймача досліджуваного сигналу в КНДД використовують магнітометричні прилади, які можуть бути побудовані за різними магнітними ефектами - наприклад ферозондові магнітометри [12].

Якщо казати про гравіметричні дослідження, то об'єктом таких досліджень є аномалії іншого поля Землі - гравітаційного. При реалізації такого виду дослідження також не потрібно джерело зовнішнього сигналу. Приймачем досліджуваного сигналу в КНДД є бортовий гравіметр. Гравіметри також будують на основі різних фізичних принципів - наприклад існують гіроскопічні гравіметри.

1.3. Бортові системи для оптичних досліджень земної поверхні авіаційного базування при виконанні геологорозвідувальних вишукувань

В оптичних дослідженнях застосовують методи мультиспектрального та гіперспектрального сканування досліджуваного об'єкту. Мультиспектральне сканування дозволяє отримати зображення в певних діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектру. Хвилі різної довжини розділяють за допомогою фільтрів. Хвилі можна визначити за допомогою інструментів, чутливих до конкретних довжин спектру. Мультиспектральні методи дозволяють вимірювати світло в невеликій кількості, зазвичай це значення знаходиться в межах від 3 до 15 смуг. Гіперспектральні методи значно розширюють візуалізацію спектру - до декілька сотень спектральних смуг.

Наведемо орієнтовні довжини хвиль, які досліджують при оптичних методах досліджень:

- 450–515 нм, довжина хвилі, що відповідає синьому кольору - використовують для отримання зображень атмосфери та водних ділянок глибиною до 50 м;
- 520–590 нм, довжина хвилі, що відповідає зеленому кольору - використовують для отримання зображень рослинності та водних ділянок глибиною до 30 м;
- 600–680 нм, довжина хвилі, що відповідає червоному кольору - використовують для отримання зображень штучних об'єктів у воді на глибині до 9м., а також у ґрунті та рослинності;
- 750– 900 нм, довжина хвилі, що відповідає близькому інфрачервоному діапазону (NIR - Near InfraRed), використовують для візуалізації рослинності;
- 1550–1750 нм, довжина хвилі, що відповідає середньому інфрачервоному діапазону (MIR - Mead range InfraRed) використовують для візуалізації рослинності, вологості ґрунту та візуалізації лісових пожеж;

- 2080–2350 нм, довжина хвилі, що відповідає дальньому інфрачервоному діапазону (FIR - Far InfraRed), використовують для отримання зображень ґрунту, вологості, геологічних рельєфів, візуалізації сілікатів, глин та ідентифікації пожеж,
- 10400-12500 нм, довжина хвилі, що відповідає тепловому інфрачервоному діапазону (TIR - Thermal InfraRed), при цьому способі чутливий елемент сприймає теплове випромінювання, яке не є відбитою версією зондуючого сигналу, використовують для отримання зображень геологічних структур, різниці температур у водних масивах, всередині пожеж.

Довші хвилі використовують вже при радіолокаційних методах дистанційних досліджень, які також застосовують при дистанційних дослідженнях, їх використовують з метою картографування а також для виявлення певних об'єктів.

Далі розглянемо існуючі, найбільш поширені системи оптичних досліджень авіаційного базування.

1.3.1 Система AVIRIS

Система AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer) - бортовий спектрометр видимого інфрачервоного зображення. Основою системи AVIRIS є оптичний датчик, який забезпечує відкалібровані зображення спектрального випромінювання в 224 суміжних спектральних каналах з довжиною хвилі від 360 до 2500 нанометрів (нм). AVIRIS випробовували на чотирьох типах літаків: реактивному літаку NASA ER-2, турбогвинтовому Twin Otter International, Proteus від Scaled Composites і WB-57 від NASA. ER-2 літає приблизно на 20 км над рівнем моря зі швидкістю близько 730 км/год. Літак Twin Otter летить на висоті 4 км над рівнем землі зі швидкістю 130 км/год. AVIRIS випробували у США, а також в Канаді та деяких країнах Європи [13]. Основною метою проекту AVIRIS є ідентифікація, вимірювання та моніторинг складових земної поверхні та атмосфери на основі сигнатур молекулярного

поглинання та розсіювання частинок. Дослідження з даними AVIRIS переважно зосереджені на розумінні процесів, пов'язаних із глобальним навколишнім середовищем та зміною клімату.

AVIRIS є пристроєм розробленим в NASA/JPL, яким керує NASA/JPL і літає на борту різних типів літаків. Прилад вимірює передану, відбиту та розсіяну сонячну енергію від поверхні Землі та атмосфери по 224 каналах у великих областях із високими просторовими та спектральними роздільними можливостями. AVIRIS вважається першим оперативним гіперспектральним приладом. Спектри випромінювання AVIRIS використовуються для ідентифікації, вимірювання та моніторингу складових поверхні та атмосфери Землі на основі молекулярного поглинання та сигнатур розсіювання частинок. Сфери досліджень дуже широка - екологія, океанографія, геологія, снігова гідрологія, дослідження хмар та атмосфери. Дані AVIRIS також використовуються для калібрування супутників, моделювання, розробки алгоритмів та перевірки. Дослідження з AVIRIS переважно спрямовані на розуміння процесів, пов'язаних із глобальним навколишнім середовищем та зміною клімату [14].

Розробка AVIRIS почалась в середині 1980-х командою розробників на чолі з Олександром Ф. Х. Гетцем. Метою було впровадження нової технології твердотільного детектора для програми дистанційного зондування та отримання детальних вимірювань (у багатьох паралельних смугових каналах) видимого та SWIR-NIR (короткохвильового інфрачервоного) спектру. AVIRIS встановили на авіаційну платформу та вперше здійснили політ у 1986 році (перші зображення в повітрі). Остаточний пристрій був повністю працездатним з 1989 року. AVIRIS використовує скануючу оптику та групу з чотирьох спектрометрів для одночасного зображення шириною смуги 677 пікселів у 224 суміжних спектральних смугах. Просторове зображення створюється за допомогою руху сканера, який визначає лінію зображення шириною 677 пікселів, перпендикулярну до напрямку літака, і через рух літака, який визначає довжину кадру зображення. Датчик: оптико-механічний поперечний сканер з

лопаткою (12 Гц), який використовує лінійні масиви детекторів для зображення смуги шириною 677 пікселів у 224 безперервних смугах (чотири решітчасті спектрометри). Спектральний діапазон: 360 - 2500 нм із загальною кількістю 224 смуг. AVIRIS має надійне радіометричне та спектральне калібрування. AVIRIS зазвичай отримує зображення з розміром пікселя 20 м з літака NASA ER-2 з висоти 20 км. Ширина смуги на землі приблизно 12 км. AVIRIS також може отримувати зображення з маловисотного літака з просторовою роздільною здатністю 1-4 м із зменшеною шириною смуги. Функціональна схема AVIRIS наведена на рис.1.5.

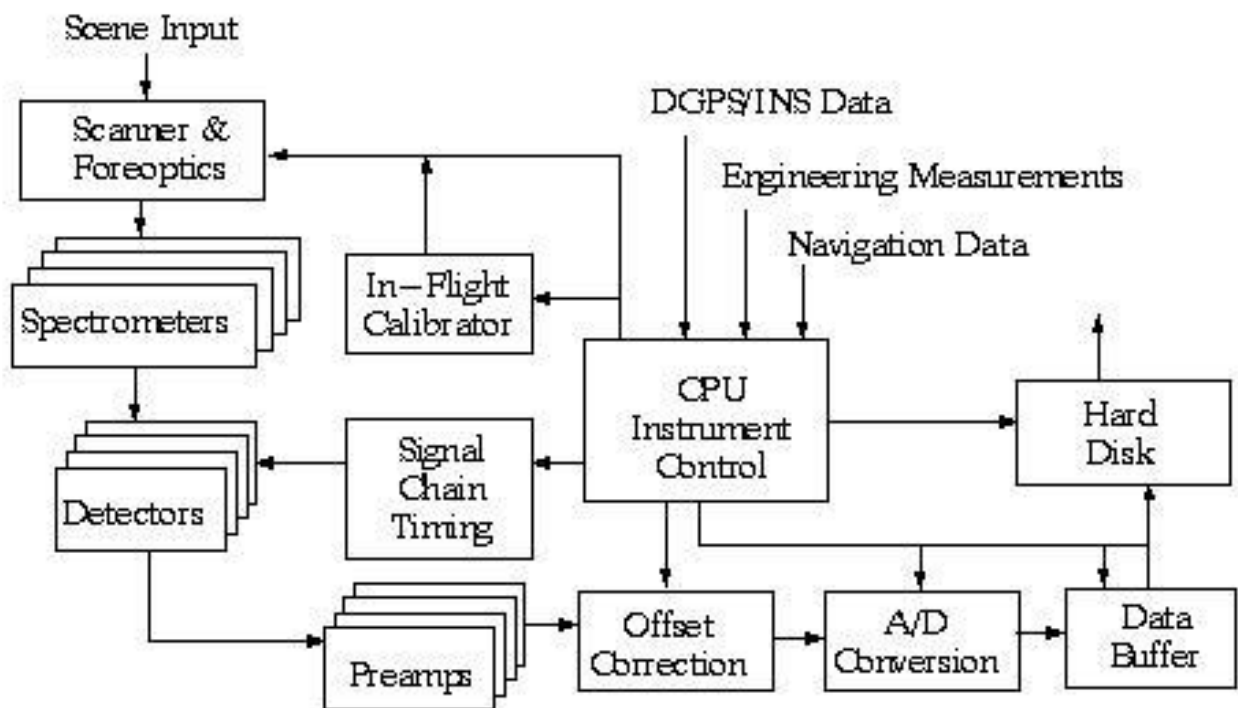


Рисунок 1.5 - Функціональна схема AVIRIS [14]

В таблиці 1.1 наведені характеристики системи AVIRIS. AVIRIS має модульну конструкцію, що складається з шести оптичних підсистем і п'яти електричних підсистем. Оптичні підсистеми (поперечний сканер, чотири спектрометри та калібрувальне джерело) з'єднані разом за допомогою оптичних волокон.

Таблиця 1.1 - Характеристики системи AVIRIS [14]

| Компонент AVIRIS | Значення | Компонент AVIRIS | Значення |
|--|---|---|---|
| Спектрометр А спектральний діапазон кількість смуг смуга пропускання решітка | 360 - 670 нм 32 9.7 нм (FWHM) 117.65 ліній/мм | Детектор спектрометра А - Тип - кількість елементів - матеріал - час інтегрування | Линійний масив 32 Silicon 87.5 мкс |
| Спектрометр В спектральний діапазон кількість смуг смуга пропускання решітка | 660 - 1280 нм 64 9.5 нм (FWHM) 128.2 ліній/мм | Детектор спектрометра В - Тип - кількість елементів - матеріал - час інтегрування | Линійний масив 64 Silicon+ In GaAs 87.5 мкс |
| Спектрометр С спектральний діапазон кількість смуг смуга пропускання решітка | 1260 - 1880 nm 64 10.0 nm (FWHM) 124.2 ліній/мм | Детектор спектрометра С - Тип - кількість елементів - матеріал - час інтегрування | Линійний масив 64 Антимонід індія 87.5 мкс |
| Спектрометр D спектральний діапазон кількість смуг смуга пропускання решітка | 1880 - 2500 нм 64 10.0 нм (FWHM) 128.6 ліній/мм | Детектор спектрометра D - Тип - кількість елементів - матеріал - час інтегрування | Линійний масив 64 Антимонід індія 87.5 мкс |
| Передня оптика - FOV - IFOV - ефективна фокусна відстань | Діаметр зіниці =200 mm 34° 1 мрад 19.76 см | Оптичне волокно - матеріал - цифрова апертура - діаметр (дзеркал) | Silica (A і B); Фтористе скло(C і D) 0.45 200 mm |
| Ширина захвату | 12 км (при висоті 20 км) | Просторове розділення | 20 m x 20 m |
| Швидкість сканера | 12 кадрів/с | Пікселів/лінію сканування | 677 |
| Квантування | 16 біт (на 2005р.) | Швидкість передачі даних | 4.5 МБ/с |
| Жорсткий диск | 73 ГБ | SNR (@ 490 nm) | 100:1 |
| Маса пристрою | 340 кг | напруга живлення струм споживання | 28 VDC 4 А |
| Висоти польоту | 3.8 to 20 km | Швидкість наземної колії | 145 - 760 km/h |
| Швидкість / висота | 38 1/hr | | |

Фото системи AVIRIS наведено на рис.1.6. Як можна це бачити з рис.1.6 система має значні розміри і вагу (див. Табл.1.1), тому інстальовати її на відомі конструкції ДПЛА навіть класу HALE не є можливим.

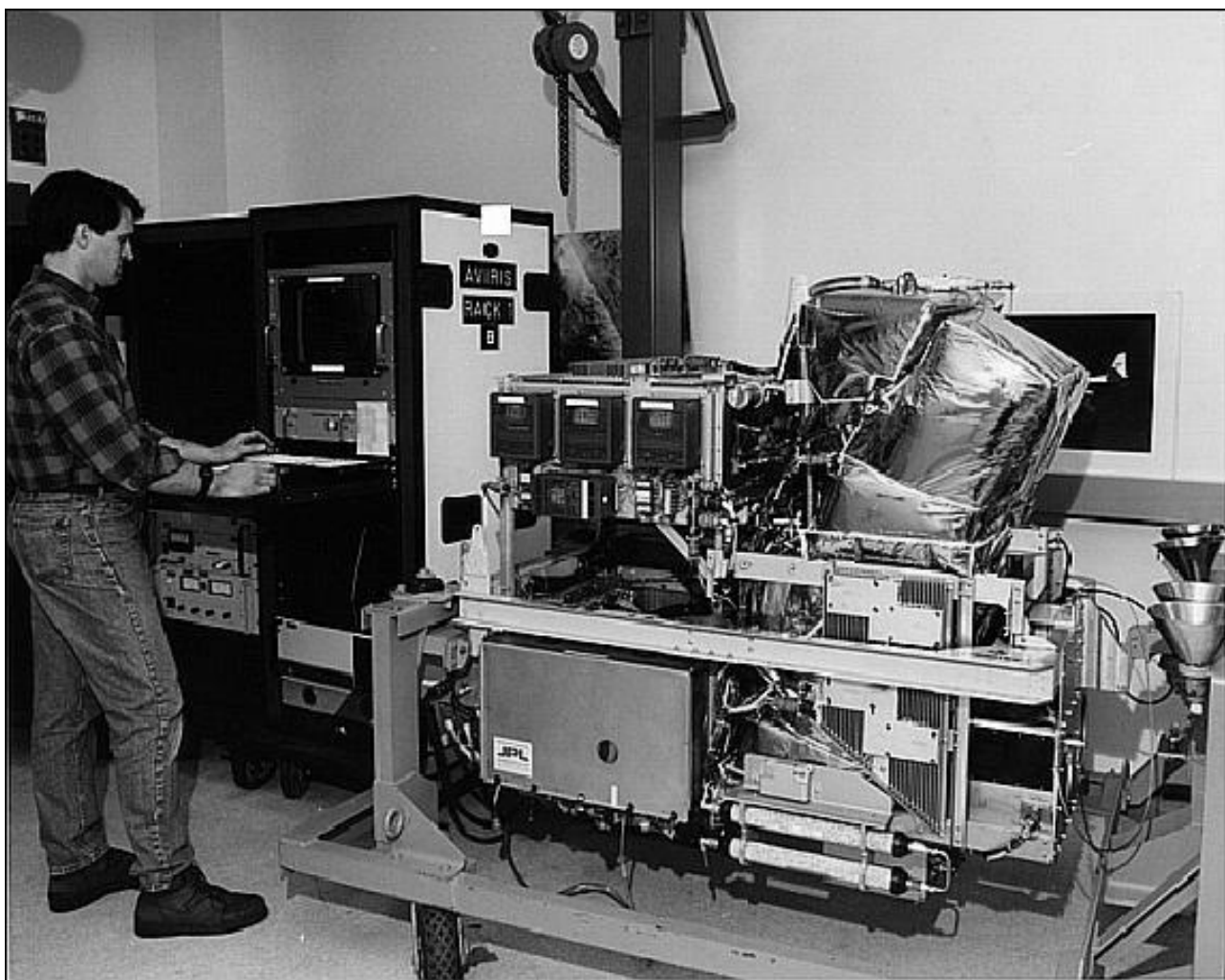


Рисунок 1.6 - Система в лабораторії калібрування

Система AVIRIS за такий солідний час роботи безумовно була декілька разів модернізована. Нові спектральні калібрувальні фільтри Ліо були встановлені в калібратор AVIRIS навесні 1994 року (покращене спектральне калібрування). До кінця 1994 року були встановлені нові фокальні площини з удвічі меншим шумом, ніж поточні з можливістю 12-розрядної оцифровки; у 2005 році відбулося ще одне оновлення до 16 біт. Подальші оновлення AVIRIS: у 1999 році AVIRIS був оснащений спеціальною системою приймача INS/GPS, встановленого на передній оптиці, що дозволяє передавати геовиправлені дані AVIRIS. Крім того, базовий шумовий еквівалент дельта-випромінювання (сигнал-шум) був значно покращений для спектральних областей від 650 до 1300 нм і від 1900 до 2500 нм. Крім того, у 2004 році було встановлено нову передню оптику з вдвічі більшою пропускною здатністю.

На рис. 1.7 показано результати вимірювань відбитого від сонячних промінів спектру ділянки атмосфери.

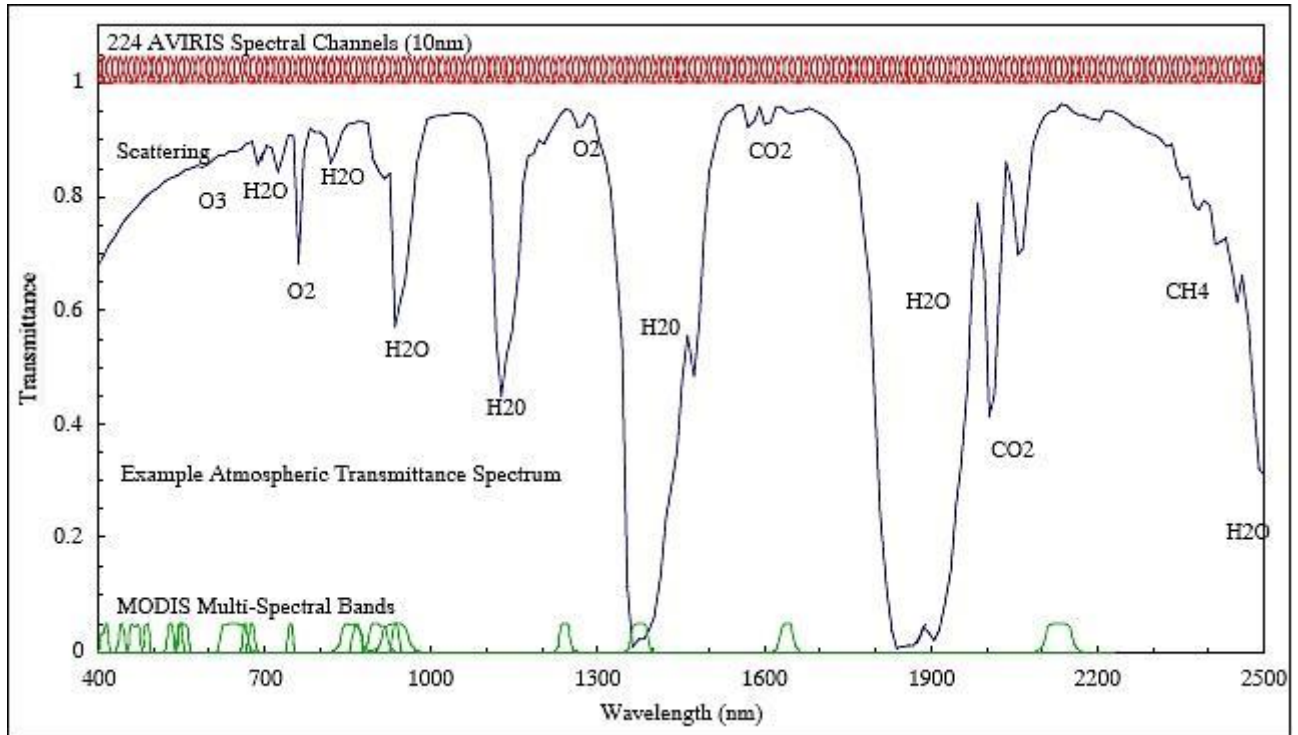


Рисунок 1.7 - Спектр атмосфери відбитий від сонячних промінів [14]

Станом на 2008 рік інструмент AVIRIS вже 20 років використовувався в різних кампаніях у різних частинах світу. Діапазон дослідницьких застосувань охоплює дослідження таких об'єктів або сценаріїв :

- Атмосфера: водяна пара, властивості хмар, аерозолі, поглинаючі гази
- Екологія: хлорофіл, листкова вода, лігнін, целюлоза, пігменти, нефотосинтетичні компоненти
- Геологія та ґрунти: мінералогія, тип ґрунту
- Прибережні та внутрішні води: хлорофіл, планктон, розчинена органіка, відкладення, склад дна, батиметрія
- Гідрологія снігу та льоду: фракція снігового покриву, розмір зерен, домішки, танення
- Горіння біомаси: субпіксельні температури та ступінь, дим, продукти горіння
- Небезпека для довкілля: прямо і опосередковано забруднювачі, геологічний субстрат

- Калібрування: датчики літаків і супутників, моделювання датчиків, стандартна перевірка
- Моделювання: перевірка та обмеження моделі переносу випромінювання
- Комерційні: розвідка корисних копалин, сільське господарство та стан лісів
- Алгоритми: автономна атмосферна корекція, випередження виведення спектрів.

Протягом 2010-2011 року система AVIRIS приймала участь в екологічних дослідженнях суші. Виміряні спектри забезпечують основу для розуміння навколишнього середовища з віддаленої точки зору на основі фізики, хімії та біології, виявлених спектральними сигнатурами. Зображення отримуються одночасно у багатьох суміжних спектральних смугах, які за своєю суттю реєструються. Зображення просторової області повторюється k -раз у спектральній області, утворюючи «куб зображення» (рис 1.8) зі значним обсягом даних. Куб зображення визначає всі дані для певної сцени. Кожен піксель має характерний спектр і представляє коефіцієнт відбиття у вузькій спектральній смузі.

На рис. 1.9 показано результат спектрометрії мінералів та рослинності, виміряного у спектрі відбитого сонячного світла в діапазонах від 400 до 2500 нм. NPV відповідає нефотосинтетичній рослинності. Ці матеріали ілюструють широке розмаїття сигнатур поглинання і розсіювання композиції в природі.

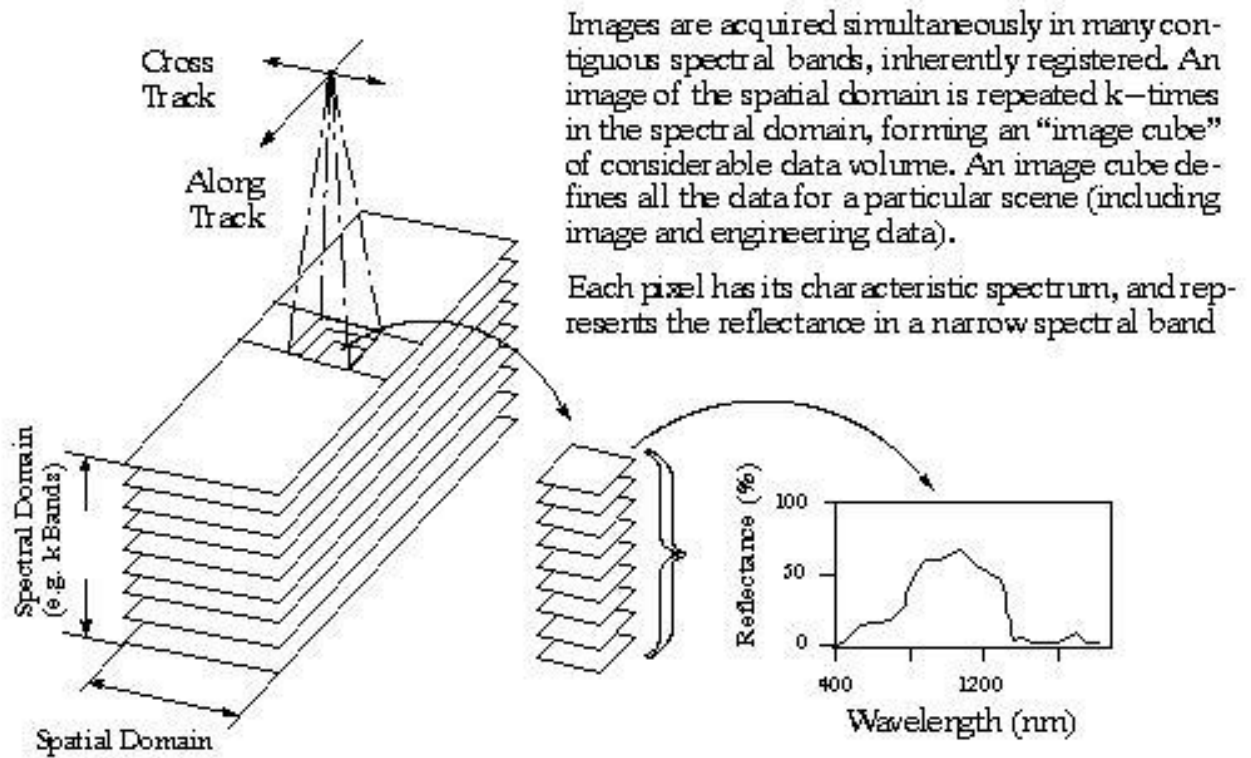


Рисунок 1.8 - Схема отримання гіперспектрального куба даних, отриманого за допомогою спектрометрії зображення [14]

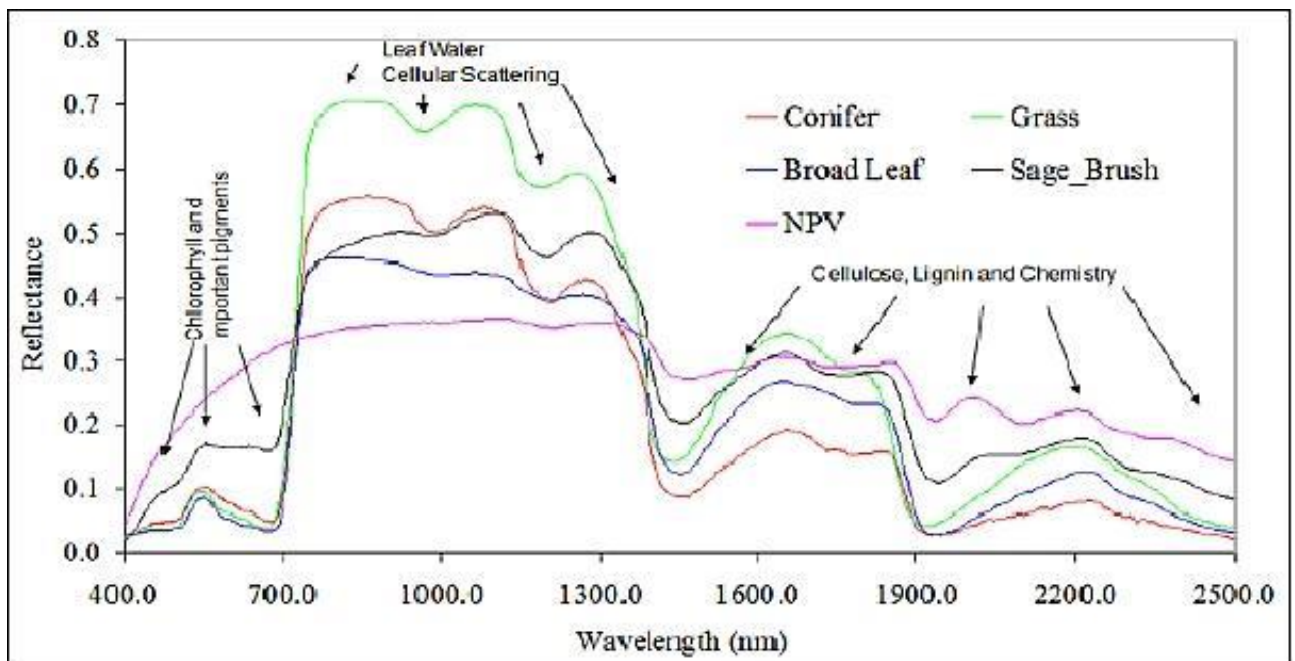


Рисунок 1.9 - Результат спектрометрії мінералів, та рослинності [14].

Рис. 1.10 демонструє можливості мультиспектрального зображення в діапазоні від 400 до 2500 нм [14]. Як видно, дискретних вимірів недостатньо для відтворення відповідних хімічних та біологічних видів.

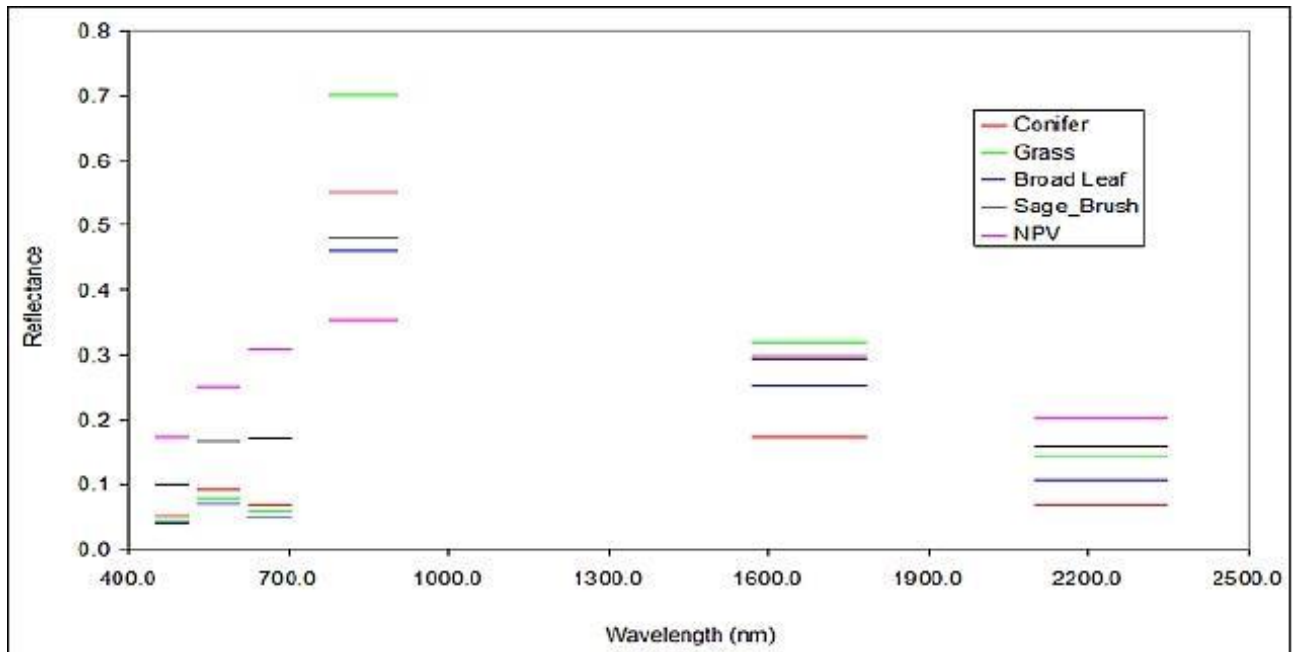


Рисунок 1.10 - Можливості мультиспектрального зображення системи AVIRIS

Як виглядає гіперспектральний куб даних на прикладі сканування району Перл-Харбор показано на рис. 1.11. Як було вже зазначено вище, встановлення системи AVIRIS на борту будь-якого відомого на сьогодні ДПЛА не є можливим внаслідок великих розмірів системи. Для реалізації встановлення AVIRIS на безпілотну авіаційну платформу потрібно розробити та виготовити ДПЛА оригінальної конструкції з розрахунковою масою корисного навантаження не менш 500 кг, та розміром фюзеляжу що дозволить розмістити всередині систему AVIRIS, що само по собі є складним технологічним і конструктивним завданням.

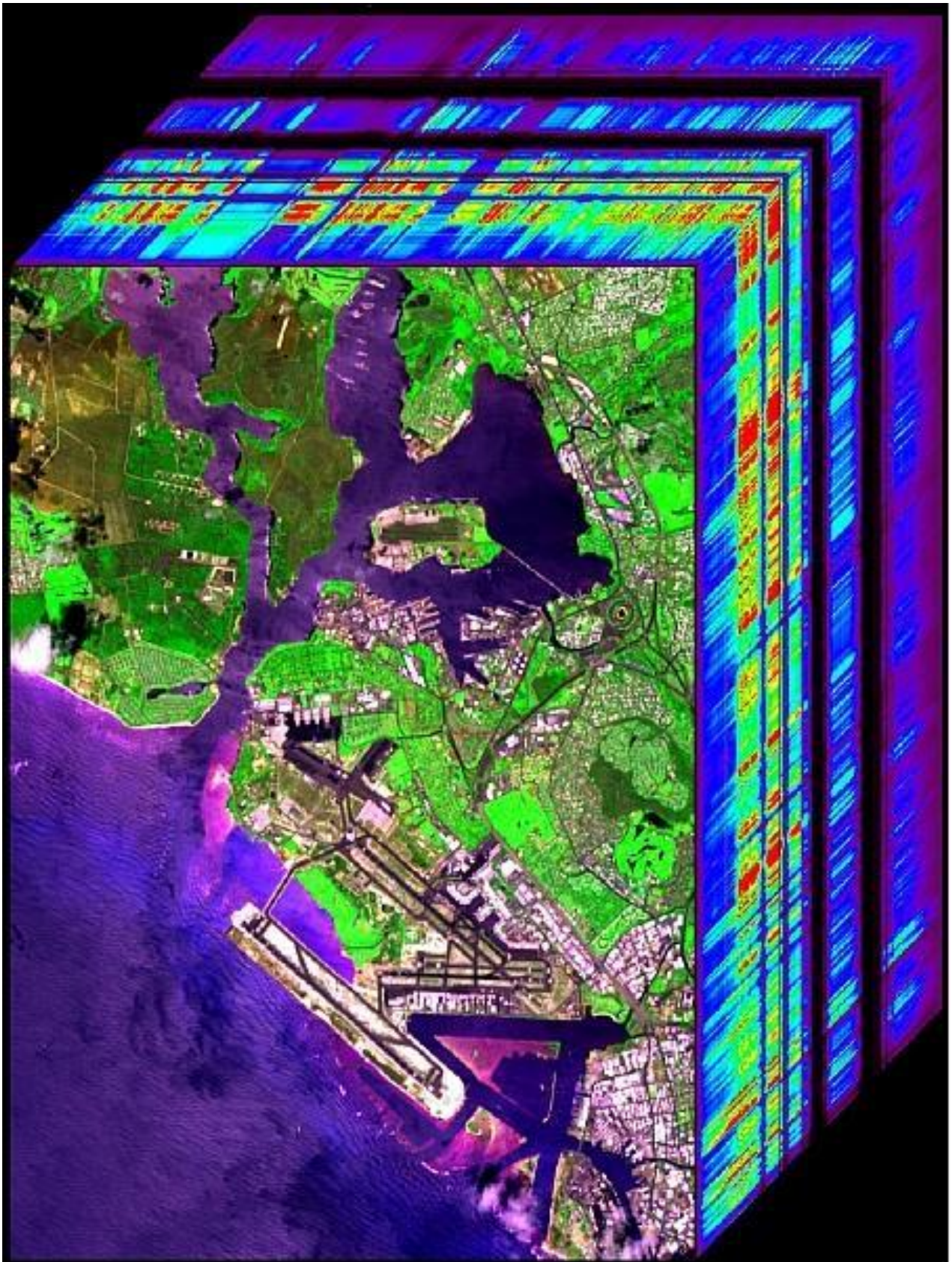


Рисунок 1.11 - Приклад зображення куба даних [14]

1.3.2 Система НуМар

Система НуМар (Hyperspectral Mapper) - удосконалений гіперспектральний пристрій, розроблений компанією Integrated Spectronics (Австралія), для виконання гіперспектрального дистанційного зондування авіаційного базування. Пристрій дозволяє сканувати область спектру в діапазоні 0,45–2,5 мкм у 126 спектральних смугах шириною приблизно 15 нм із просторовою роздільною здатністю 3–10 м і співвідношенням сигнал/шум 500–1000 або вище. Конструкція пристрою в основному модульна, і це дає можливість налаштувати спектральні та просторові характеристики відповідно до конкретних вимог замовника. Однак висока продуктивність, досягнута поточним поколінням датчиків НуМар, частково є результатом оптимізації системи для певного робочого діапазону [15].

Перший датчик серії НуМар був поставлений у вигляді 96-канального приладу, що працює в діапазоні довжин хвиль 0,55 – 2,5 мкм. Цей датчик був дуже оптимізований для завдань розвідки корисних копалин, які вимагають дуже високого співвідношення сигнал/шум (SNR) у спектральній області 2 – 2,5 мкм. Наступні датчики НуМар поставлялися у 128-ми діапазонному виконанні, що дозволяє охоплювати спектральну область 0,44 – 2,5 мкм, і з двома тепловими діапазонами (одна смуга в атмосферному вікні 3 – 5 мкм, а інша в діапазоні 8 – 10 мкм). Цей тип конфігурації набуває значення для вирішення таких завдань, як моніторинг забруднення навколишнього середовища, сільське та лісове господарство, картографування ґрунтів та оцінка природної та інтродукованої рослинності [16].

Висока продуктивність, досягнута поточним поколінням датчиків НуМар, частково є результатом оптимізації системи для певного робочого діапазону. В табл. 1.2 наведено конфігурацію та робочих обмежень поточних датчиків НуМар.

Таблиця 1.2 - Конфігурація та робочі обмеження датчиків НуМар [16]

| | |
|---|---------------------------|
| Спектральні діапазони | VIS, NIR, SWIR, MWIR, TIR |
| Кількість каналів | 100 - 200 |
| Спектральні смуги | 10 – 20 нм |
| Просторова роздільна здатність | 2 – 10 м |
| Ширина захвату | 60 – 70 градусів |
| Відношення сигнал-шум (30 градусів SZA, 50% відбиття) | >500:1 |
| Робоча висота | 2000 – 5000 м AGL |

Структура всього бортового обладнання включаючи оптико-механічну підсистему, підсистему живлення, підсистему управління та збору даних та підсистему навігації показана на схемі на рис.1.12.

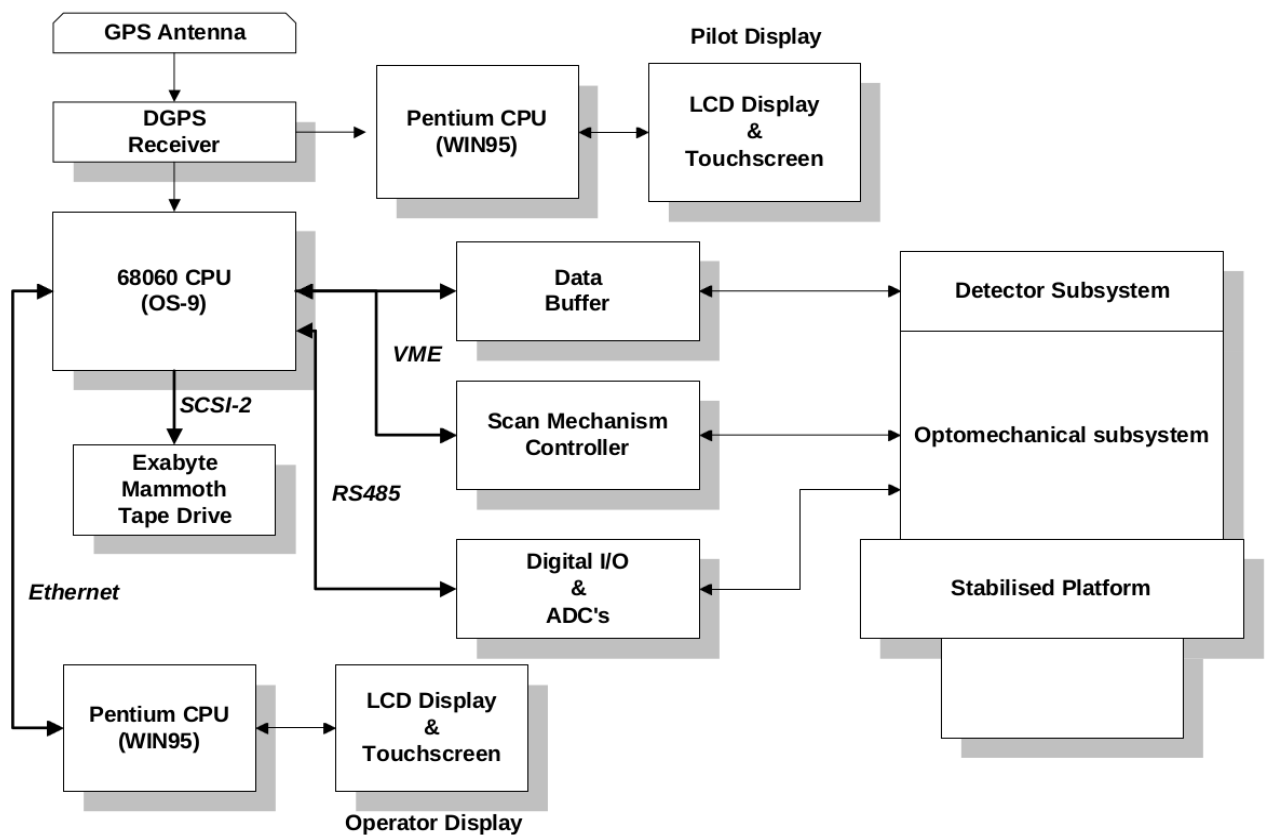


Рисунок 1.12 - Структура НуМар [16]

Стабілізована платформа Zeiss-Jena SM2000 має гідравлічний привід і забезпечує ± 5 градусів корекції нахилу та крену. Рискання може бути зміщено

на ± 20 градусів з ± 8 градусами стабілізації. Зміщення або зсув на даний момент встановлюється оператором вручну. Платформа забезпечує залишкову похибку в надирі менш ніж 1 градус і зменшує вплив руху літака в діапазоні від 10:1 до 30:1. Дані записуються на стрічкові накопичувачі Exabyte Mammoth, два з яких встановлені для забезпечення оперативної пам'яті до 80 ГБ. Зараз датчики НуМар генерують дані зі швидкістю приблизно 2,5 МБ в секунду, що цілком в межах можливостей одного накопичувача Exabyte Mammoth [16].

Система НуМар, встановлена на борту легкого літака типу Cessna 402, виглядає як на рис. 1.13.



Рисунок 1.13 - Зовнішній вид НуМар на борту літака [15]

Спектральну конфігурацію оптичних датчиків наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Спектральні параметри оптичних датчиків НуМар [15]

| Діапазон датчика | Спектральний діапазон | Смуга пропускання | Середній спектральний інтервал дискретизації |
|------------------|-----------------------|-------------------|--|
| VIS | 0,45-0,89 мкм | 15-16 нм | 15 нм |
| NIR | 0,89-1,35 мкм | 15-16 нм | 15 нм |
| SWIR1 | 1,40-1,80 мкм | 15-16 нм | 13 нм |
| SWIR2 | 1,95-2,48 мкм | 18-20 нм | 17 нм |

В табл.1.4 наведені типові вимоги до параметрів авіаційної платформи. В табл.1.5 додаткові параметри просторової конфігурації оптичних датчиків.

Таблиця 1.4 - Вимоги до параметрів авіаційної платформи

| | |
|---|-----------------------------|
| Тип авіаційної платформи | Легкий літак, як Cessna 404 |
| Діапазон робочих висот | 2000 - 5000 м AGL |
| Швидкість літака по відношенню до землі | 110 - 180 kts |

Таблиця 1.5 - Параметри просторової конфігурації

| | |
|---------------------------|---|
| I FOV (миттєве поле зору) | 2,5 повздовж траси; 2,0 поперек траси |
| FOV (кут поля зору) | 60 градусів (512 пікселів) |
| Ширина ряду | 2,3 км при значенні I FOV = 5м повздовж траси; 4,6 км при значенні I FOV = 10м повздовж траси; |

Результати сканування місцевості при виконанні геологорозвідувальних місій за допомогою НуМар наведені на зображеннях рис.1.4 а,б. На обох зображеннях наведені результати оптичного сканування гірної місцевості Suprite в штаті Невада, США. На рис. 1.14.а зображення виконано в природній кольоровій гаммі при просторовому розділенні 3м, на рис. 1.14,б - зображення виконано також в природній кольоровій гаммі але із підвищеною насиченістю кольорів і при значенні просторовому розділенні 5м.

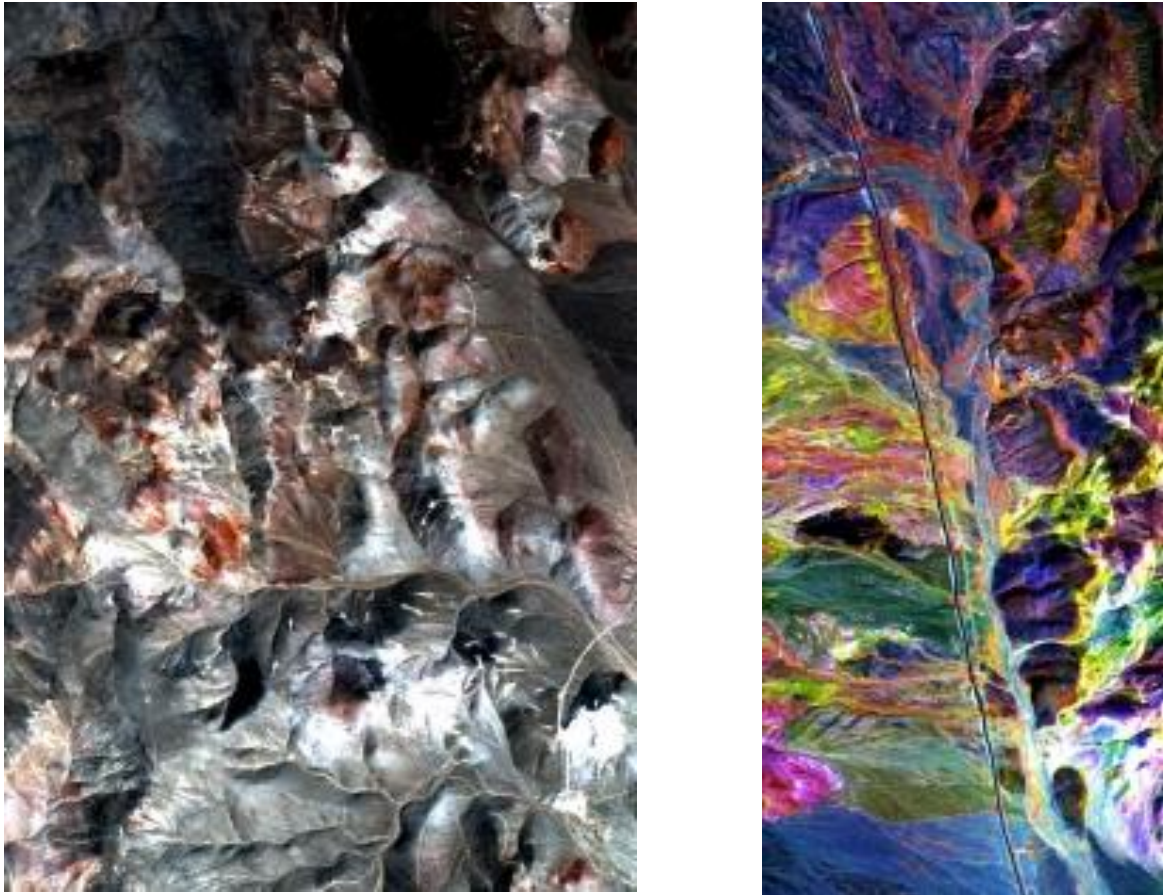


Рисунок 1.14 - Результати сканування місцевості при виконанні геологорозвідувальних місій за допомогою НуМар

На жаль нам не вдалось відшукати дані про вагу та розміри бортової системи НуМар, тому щодо розмірів ми можемо лише скористуватися фото системи, наведене на рис. 1.13.

У порівнянні з розмірами системи AVIRIS - розміри системи НуМар є достатньо меншими, що можна стверджувати, внаслідок того, що візуальна висота пристрою є такою, що пристрій трохи не досягає нижнього краю вікна легкого літака Cessna 402. Вагу пристрою звісно з фото оцінити не можливо, можливо лише зробити припущення, що вага НуМар не перевищує вагу системи AVIRIS, оскільки обидві системи розроблялись приблизно в однаковий річний проміжок часу.

1.3.3 Систем SEBASS

Система SEBASS (Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System) - просторова розширена широкосмугова спектрографічна система вимірює

відбите та випромінене випромінювання в області довжини хвилі 2,5 – 5,3 мкм із 128 смугами та випромінюване випромінювання з 128 смугами в області довжини хвилі 7,5 – 13,5 мкм з полем зору 1,1 мілірадіана (1 мрад FOV) на піксель [17,18].

Даний пристрій дистанційних досліджень розробили с ознаками універсальності його конструкції для різних варіантів його встановлення - на авіаційну платформу та на наземну платформу. Тому SEBASS побудовано як лінійний сканер (див. рис. 1.15). Зображення вхідної щілини розсіюється на двовимірний масив так, що один вимір масиву дає одну спектральну інформацію, інший – другу. Тривимірний гіперспектральний куб даних створюється шляхом сканування через “щілини” сканера досліджуваної сцени за допомогою руху літака або обертової платформи. Таким чином, SEBASS може працювати в режимі «мітла» з літака або використовувати рухоме кріплення для сканування сцени з наземної платформи. Оскільки інструмент призначений як дослідницький інструмент для дослідження можливого використання інфрачервоних гіперспектральних методів, зусилля при розробці були зосереджені на створенні найбільш чутливого приладу з найменшим еквівалентом шуму спектрального випромінювання (noise-equivalent spectral radiance, NESR). Щоб повністю дослідити все «вікно» атмосферної передачі LWIR (Long-Wave InfraRed, спектральний діапазон 8,0-12,0 мкм), ми вимагали покриття довжини хвилі не менше 13,5 тм. Крім того, щоб бути корисним як бортовий сканер, система повинна підтримувати частоту кадрів не менше 100 Гц. Щоб задовольнити ці вимоги, в якості детекторів обрано 128x128 пікселів решітки фокальної площини «Blocked Impurity Band» (виробництво Rockwell International). Ці масиви, які поєднують низький рівень шуму з високою квантовою ефективністю та довжиною хвилі відсікання більше 25 мкм, були створені як частина зусиль NASA SIRTf. Їх основним недоліком є те, що вони повинні працювати при температурі 10 K, що вимагає охолодження приладу за допомогою рідкого гелію [19].

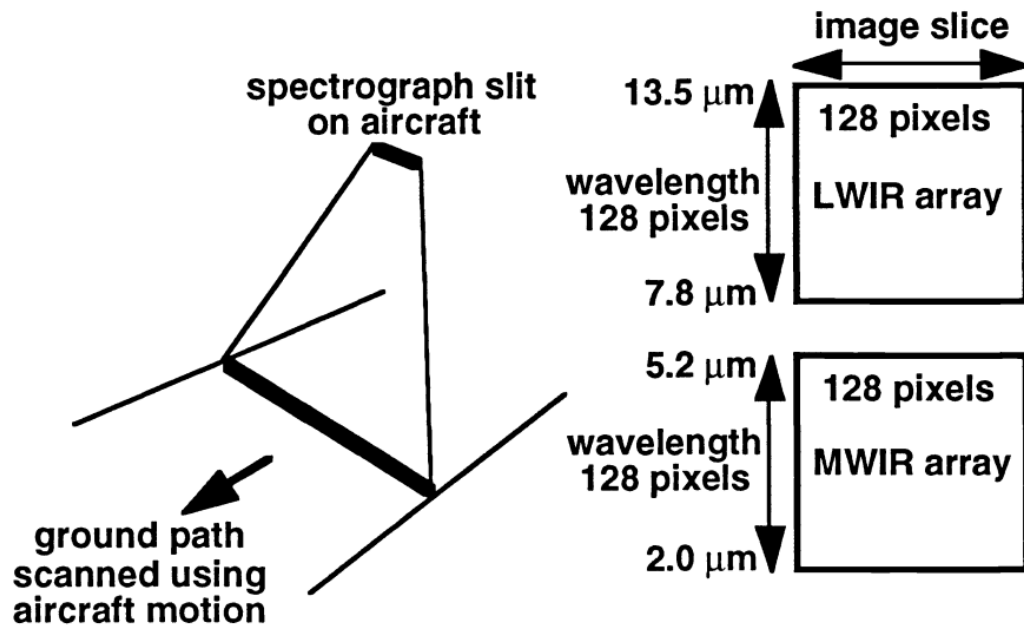


Рисунок 1.15 - Схема функціонування SEBASS як лінійного сканера

Попередній досвід показав, що роздільна здатність ($\lambda/\Delta\lambda$) 200 розв'язує будь-які спектральні характеристики, які можна побачити на твердій або рідкій поверхні. Таке значення роздільної здатності досягають шляхом диспергування спектрального інтервалу діапазону атмосферного вікна MWIR (Mid-Wave InfraRed спектральний діапазон 3,0-5,0 мкм) або LWIR на 128-піксельну матрицю фокальної площини. Відомо з літературних джерел, що роздільна здатність 200 дозволяє розрізняти всі інфрачервоні смуги для більшості багатоатомних газів і парів, невелика частина газів має лінії, які не повністю розрізняються, поки роздільна здатність не перевищить 1000. Розробники пристрою вирішили допустити невелике зниження продуктивності на користь повного спектрального покриття за допомогою доступних на той момент часу решіток фокальної площини 128x128 пікселів. Кутова роздільна здатність приладу була встановлена вимогою щодо відстані від землі до зразка від 0,5 до 3 метрів для літаків на висоті від 1500 футів до 10 000 футів над рівнем землі. Це встановлює кутову роздільну здатність 1 мілірадіан на піксель із загальним полем зору 128 мілірадіан (приблизно 7,3 градуса) [19].

На рис.1.16 наведено структурну схему SEBASS.

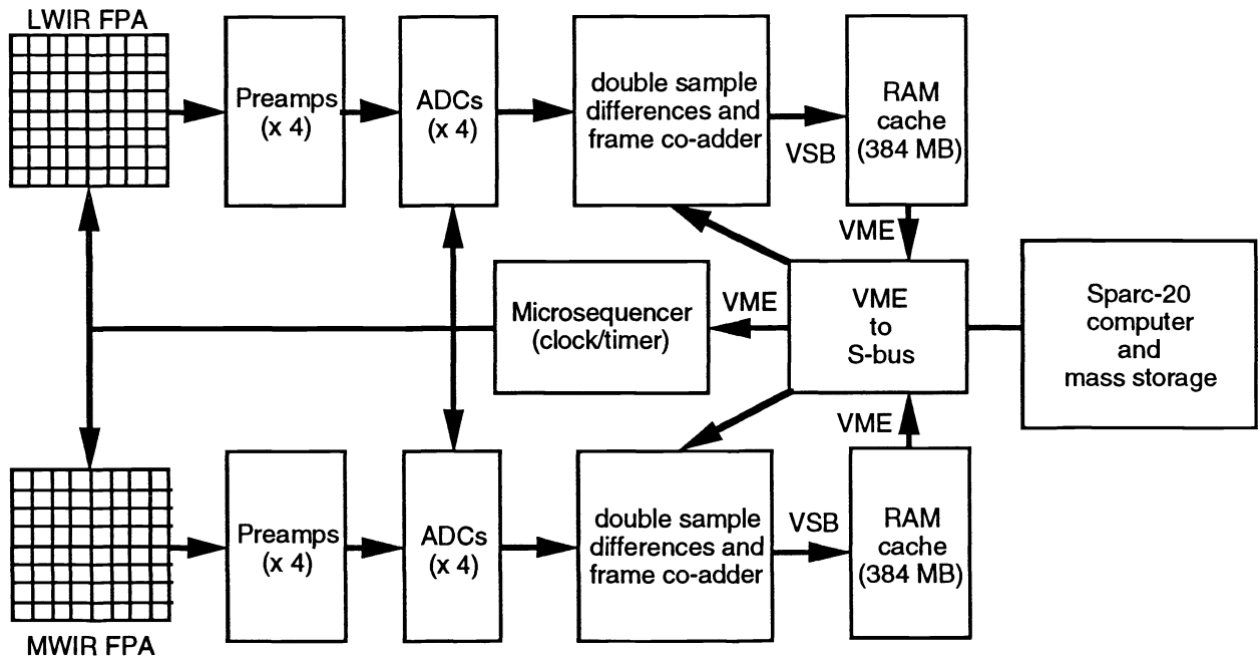


Рисунок 1.16 - Структурна схема SEBASS

Мультиплексор фокальної площини та аналого-цифровий перетворювач регулюються програмованим мікросеквенсором. Аналогові сигнали від попередніх підсилювачів оцифровуються набором високошвидкісних 14-розрядних аналого-цифрових перетворювачів, які надсилають дані на плату спеціального призначення, яка обчислює різницю між напругою кінця інтеграції та напругою скидання для кожен піксель. Ця плата також додає попередньо встановлену кількість кадрів за допомогою 24-розрядного суматора. Вихідні дані суматора зберігаються у високошвидкісній кеш-пам'яті, яка може вмістити до 6000 кадрів даних. Після завершення збору даних цифрова інформація передається на головний комп'ютер для зберігання на засобах масової інформації [19].

Оптична конструкція заснована на попередніх призматичних спектрографах, які працюють в інфрачервоній та ультрафіолетовій областях спектру. У приладі SEBASS використовується додаткова апланатична лінза, яка покращує оптичні характеристики спектрографа в двовимірному полі та забезпечує зменшення зображення щілини у фокальній площині. Світло від досліджуваної сцени проектується на вхідну щілину спектрографа за допомогою тридзеркального анастигматного телескопа, відношення $f/7,2$. Світло, що виходить із щілини, розщеплюється дихроїчним фільтром, який відбиває

довжини хвилі коротше 6,5 мкм і пропускає довші хвилі. Використання дихроїчного фільтра гарантує, що обидва канали спектрографа переглядають ту саму сцену одночасно. Довгохвильове світло розсіюється комбінацією призми/конічного дзеркала зі сферичною гранню і відображається на решітку фокальної площини через лінзу селеніду цинку. Цей об'єктив збільшує остаточне відношення f/ratio світла до $f/3,0$ у фокальній площині та зменшує зображення щілини в 2,4 рази. Таким чином, геометричне зображення вхідної щілини шириною 180 мкм відповідає ширині одного 75 мкм пікселя у фокальній площині. Поєднання відносно повільного коефіцієнта діафрагми $f/7,2$ і ширини щілини 180 штфтів робить виготовлення високопродуктивної щілини за допомогою хімічного фрезерування відносно простим. Середньохвильове інфрачервоне світло, яке відбивається дихроїчним світлоподільником, розсіюється спектрографом, який за своєю конструкцією подібний до каналу LWIR, але використовує призму з фторидом літію. Канал LWIR має роздільну здатність приблизно 0,05 мкм на піксель; канал MWIR має роздільну здатність приблизно 0,025 мкм на піксель. На рис. 1.17 зображено оптичну частину SEBASS з встановленим телескопом і каналом LWIR [19].

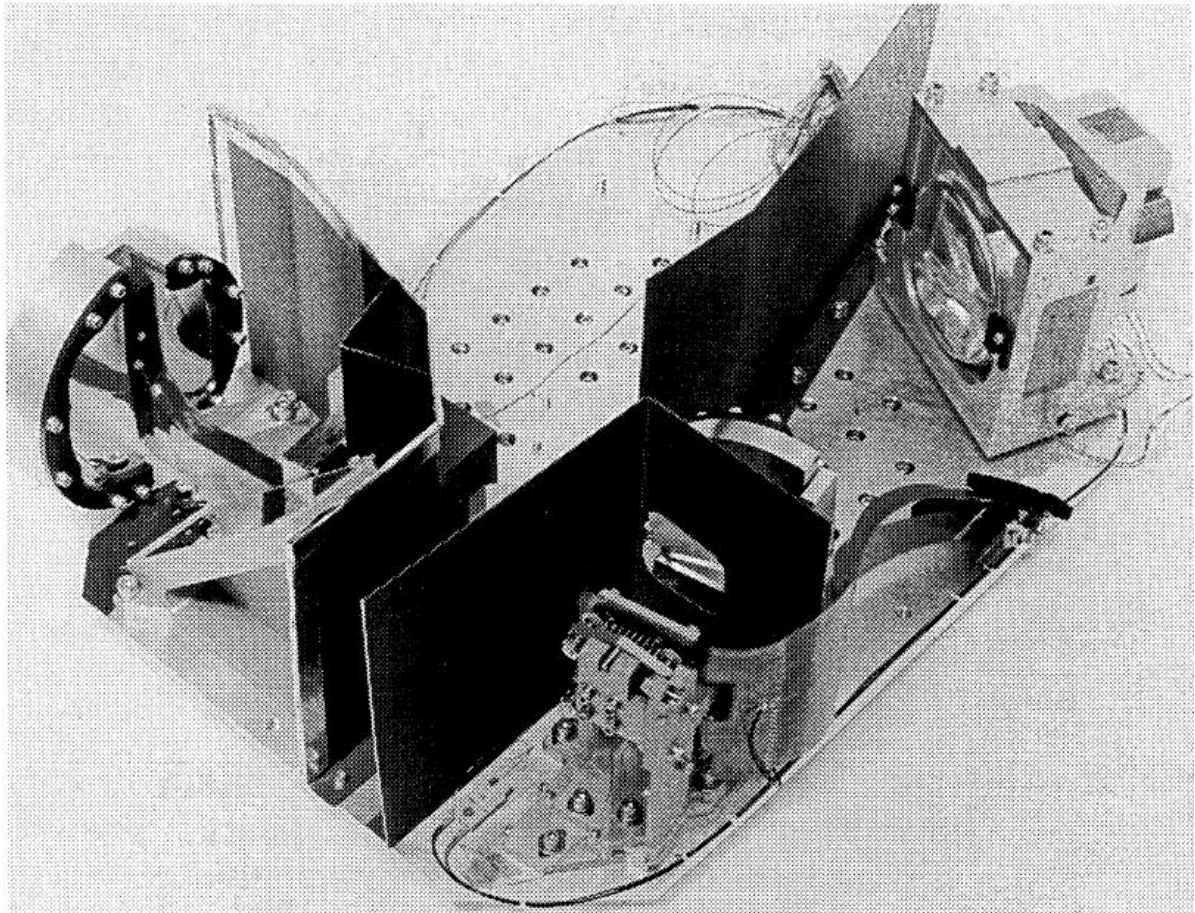


Рисунок 1.17 - Оптичний блок SEBASS з встановленим телескопом і каналом LWIR [19]

Система обробки даних, побудована навколо стандарту шини VME, яка керується комп'ютером Sun Sparc-20. Усі тактові сигнали, які керують роботою мультиплексорів фокальної площини, і синхронізуючих сигналів для аналого-цифрових перетворювачів генеруються програмованим мікросеквенсором, контроль часу якого можна регулювати з кроком 67 наносекунд. Аналогові сигнали від масивів перетворюються в цифрові дані за допомогою високошвидкісних 14-розрядних аналого-цифрових перетворювачів. Кожен масив має чотири незалежні виходи. Цифрові дані передаються безпосередньо на плату «співсуматора» спеціального призначення, яка обчислює різницю між значеннями сигналу та значеннями скидання та додає дані з послідовних кадрів. Хоча система здатна приймати дані без розбіжностей, вона зазвичай працює в режимі, коли сигнал обчислюється як різниця між напругою в кінці інтеграції та напругою, коли мультиплексор скидається. Цей підхід зменшує синфазний шум

за рахунок невеликого збільшення випадкового шуму, оскільки два свідчення напруги з шумом відрізняються [19].

Диференціація також дозволяє уникнути проблем із дрейфами в попередніх підсилювачах, які можуть вносити систематичні помилки в вимірюваний сигнал. Кожен кадр даних може бути доданий цифровим способом до суми вибраної кількості попередніх кадрів за допомогою 24-розрядного суматора.

Ця функція дозволяє зберігати дані кадру з нижчою швидкістю, ніж частота кадрів у фокальній площині. Наприклад, довгохвильова інфрачервона матриця працює зі швидкістю 244 кадри в секунду. При нижчій частоті кадрів підсумовувальний конденсатор мультиплексора насичується до закінчення часу інтегрування. «співсуматор» ефективно дозволяє інтегрувати інфрачервоний сигнал від мультиплексора без втрат сигналу, він також дозволяє вихідній частоті кадрів відповідати швидкості, з якою зображення рухається по землі. Наприклад, літак Twin Otter, на який було встановлено пристрій має типову швидкість 60 метрів на секунду, таким чином, щоб досягти відстані від землі до зразка 1 метр, додають чотири послідовні кадри даних разом, щоб отримати ефективну швидкість вихідних даних 61 кадр в секунду. Дані з «співсуматора» надсилаються в кеш-пам'ять, яка має ємність 128 Мбайт (2048 кадрів); наразі він оновлюється до 384 Мбайт (6144 кадри). В кінці кожного збору даних дані з кеш-пам'яті передаються через шину VME на хост-комп'ютер Sparc-20 для зберігання на диск і стрічку. Для наземних зборів даних, де швидкість передачі даних від співсуматора нижча, шина VME має достатню пропускну здатність для передачі всіх даних на Sparc-20 в режимі реального часу. У цьому випадку розмір кеш-пам'яті не обмежує кількість даних, які можна взяти за одне спостереження. Це обмеження встановлюється лише найбільшим файлом, який можна записати на диск. На рис.1.18 показана система SEBASS яка встановлена в салоні літака Twin Otter.



Рисунок 1.18 - Система SEBASS в салоні літака Twin Otter [19]

Тепловий інфрачервоний діапазон спектру вже давно використовують для геологічних досліджень для мапування матеріалів поверхні на основі відмінностей у спектральних характеристиках, що залежать від довжини хвилі. Дослідження що виконувались на протязі десятків років дозволили розробити основу для аналізу та обробки зображень, калібрування на місцях та підтвердження наборів даних, а також встановили номінальний діапазон довжин хвилі для виявлення мінералів на поверхні.

Результатом сканування ділянок земної поверхні за допомогою SEBASS є кольорові карти місцевості. При геологорозвідувальних вишукуваннях такі карти можуть мати вигляд як на рис.1.19.

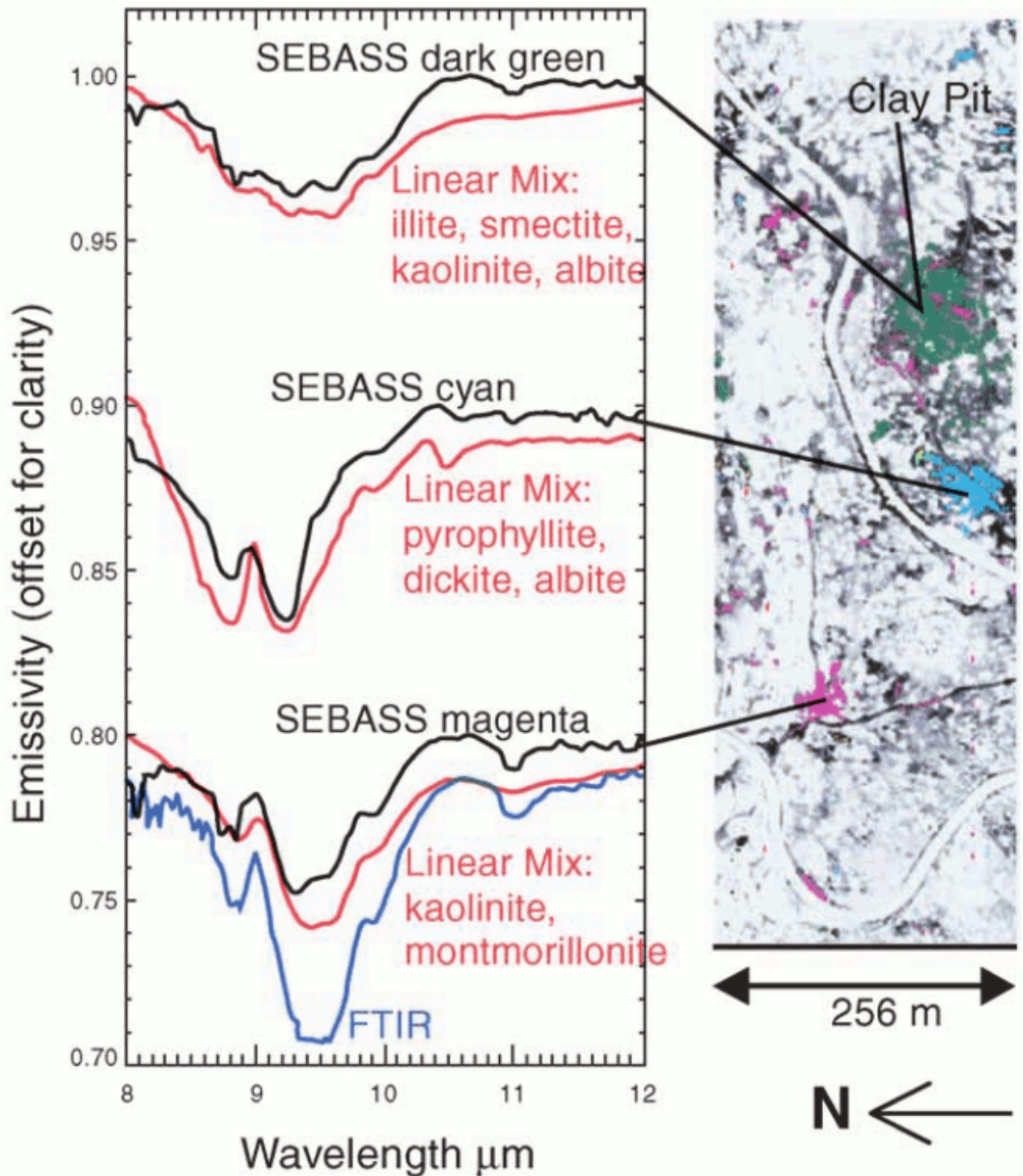


Рисунок 1.19 - Результат сканування ділянки LWIR датчиком системи SEBASS [20]

Зліва показано графік залежності випромінювальної здатності від довжини хвилі. Зміщення графіків виконано навмисно для спрощення візуального сприйняття.

1.4. Метод магнітометричних досліджень земної поверхні при виконанні геологорозвідувальних вишукувань

Одним з перспективних методів, який на сьогодні не є широко вживаним у практику дистанційних геологічних досліджень є магнітометричний метод. Магнітометрична розвідка - це геофізичний метод розв'язання геологічних завдань, заснований на вивченні магнітного поля Землі. Магнітометрична розвідка має найвищу ефективність порівняно з іншими геофізичними методами досліджень. Можливість застосування такого методу обумовлена вмістом у рудах як домішок мінералів, що володіють феромагнітними властивостями. Крім того самі руди часто мають підвищену магнітну сприйнятливість. Основне завдання магнітометричної розвідки це визначення параметрів магнітного поля родовищ корисних копалин та виявлення магнітних аномалій за такими характеристиками, як форма, глибина залягання, магнітна сприйнятливість.

Магнітометричну розвідку можна застосовувати на висотах як декілька десятків сантиметрів від поверхні землі, так і на висотах десятків, сотень та навіть тисяч метрів. Для виконання висотної магнітометричної розвідки використовують літальні апарати - як пілотовані так і безпілотні. І останнім часом застосування ДПАС-БАК при виконанні такого виду геологічних вишукувань стає дедалі частішим. Можна сказати що застосування безпілотних авіаційних платформ розкриває нові можливості магнітометричних дистанційних досліджень. Позитивним аспектом магнітометричної розвідки можна вважати ідентифікацію родовищ корисних копалин в важкодоступних для людей районах і особливо в районах, в яких поверхня землі схована під шаром водного середовища (болота) та де застосування оптичних методів буде або малоефективно або зовсім неефективно.

Магнітометричну розвідку виконують за допомогою магнітометрів, які розрізняють за принципом дії - ферозондові, протонні, квантові. На пілотованих авіаційних платформах зазвичай використовують квантові магнітометри.

Основою конструкції первинного перетворювача феррозондового магнітометра є електрична котушка, намотана на стрижень з ферромагнетика, який має малу коерцитивну силу і велику магнітну проникність у слабких магнітних полях (наприклад, зі сплаву заліза, нікелю і молібдену). При відсутності зовнішнього магнітного поля при пропусканні через первинну котушку змінного електричного струму з частотою f і амплітудою, достатньою для створення поля збудження, що перевищує рівень насичення сердечника, у вимірювальній вторинній котушці виникає ЕРС подвоєної частоти, тобто $2f$. За наявності зовнішнього постійного магнітного поля, що становить уздовж осі стрижня відмінна від нуля, у наведеній ЕРС переважає частота, що збігається з частотою поля збудження f . Для вимірювання зовнішнього магнітного поля (його складової, спрямованої вздовж осі стрижнів) зазвичай використовують компенсаційний метод, що полягає у компенсації постійного магнітного поля Землі полем постійного струму, що регулюється. За величиною струму компенсації судять про напруженість магнітного поля Землі вздовж осі феррозонду. До таких пристроїв відноситься аеромагнітометр АМФ-21. За рахунок похибки в орієнтуванні феррозонду похибка зйомки таким магнітометром досягає десятків нТл при вимірі Z і до $\pm 4,0$ нТл при вимірюванні ΔT [21].

Принцип дії протонних, або ядерних, магнітометрів ґрунтується на явищі вільної прецесії протонів у земному магнітному полі. Після певного електромагнітного впливу на протонівмісний датчик (з водою, спиртом, бензолом та ін.) магнітні моменти протонів прецесують навколо напрямку вектора земного магнітного поля з кутовою швидкістю (ω), пропорційної повної напруженості магнітного поля Землі T : $\omega = aT$, де a - коефіцієнт пропорційності, що дорівнює гіромагнітному відношенню ядра (відношенню магнітного моменту ядра до механічного). В залежності від протонівмісної речовини та точності визначення частоти прецесії робочий цикл (час одного виміру) становить від десятків до сотень мілісекунд. В цьому випадку при невеликій швидкості руху носія магнітометра (наземний або морський

варіанти) дані про магнітне поле Землі (T) отримують практично безперервно. При великій швидкості, наприклад, повітряного судна (350 км/год), відстань між вимірами може становити 300 м. При використанні металевих носіїв магнітометрів (кораблів, літаків, вертольотів), що володіють власним магнітним полем, датчик магнітометра буксирують на кабелі, довжина якого повинна в кілька разів перевищувати поздовжні розміри носія. За допомогою протонного магнітометра вимірюють абсолютне модульне значення геомагнітного поля з похибкою від $\pm(0,01-2)$ нТл за низької чутливості ($\pm 45^\circ$) до орієнтації осі датчика щодо перпендикуляра до вектора напруженості магнітного поля Землі та практичної відсутності зміщення нуля приладу. Протонні магнітометри використовують при повітряних зйомках - це АМ-5, ММС-214 [21].

Квантові магнітометри, призначених для вимірювання абсолютних значень модуля напруженості магнітного поля, побудовані на основі ефект Зеемана. В електронній структурі атомів, які мають магнітний момент, при потраплянні в магнітне поле відбувається зміна, що призводить до розщеплення енергетичних рівнів на підрівні, з різницею енергії i , відповідно, частотою випромінювання, пропорційною модулю повного вектора магнітної індукції в точці спостереження. Чутливим елементом магнітометра є судина, в якій знаходяться пари цезію, рубідію або гелію. Внаслідок впливу спеціально відфільтрованого монохроматичного світла (метод оптичного накачування) електрони випаровування рідини в судині переходять з одного енергетичного підрівня на інший. Повернення електронів на попередній рівень після закінчення накачування супроводжується випромінюванням енергії з частотою, пропорційною величині магнітного поля. За допомогою квантових магнітометрів вимірювання T проводять з похибкою $\pm(0,1-1,0)$ нТл за слабкої чутливості до орієнтації датчика по відношенню до силових ліній магнітного поля Землі, високої швидкодії та стабільності показань (незначне зміщення нуля) у часі. Прикладами квантових магнітометрів є прилади наземні (переносні) М-33 та ММП-303, аеромагнітометр КАМ-28 [21].

Недоліком аеромагнітної геологорозвідки є дуже широкий погляд на досліджувану територію. При використанні наземного та авіаційного способів магнітометричної розвідки використовуються однотипні магнітометри із максимальним темпом вимірювання: 20 разів на секунду. В цьому у випадку відстань між точками вимірювання в стільки ж разів більша, у скільки разів швидкість переміщення датчика літаком більше швидкості пересування пішого дослідника. Вимірюючи магнітні поля з висоти приблизно 100-200 метрів, геологи стикаються із проблемою накладання магнітних полів від усіх тіл один на одного. Тому в результаті таких вимірювань мапа магнітного поля відображає тільки великі об'єкти, має низьку чіткість і виглядає «розмазаною». Тому виходить так що чим вище висота аеромагнітної зйомки, тим менше буде деталізація карти магнітного поля. На рис.1.20 наведено результати магнітної зйомки однієї сцени дослідження виконаної - наземним способом (ручне перенесення магнітометра) (зображення зліва); магнітної зйомки з безпілотного літального апарату (зображення в центрі) та магнітної зйомки з пілотованого літального апарату (зображення справа). Висота польоту літальних апаратів, на жаль не зазначена авторами.

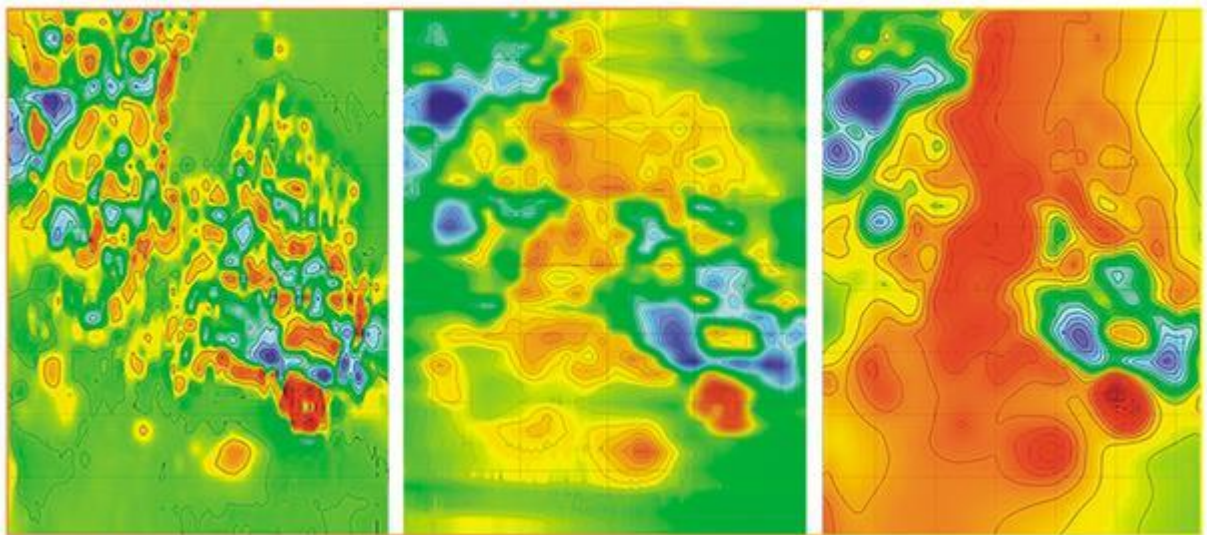


Рисунок 1.20 - Кольорова мапа ділянки місцевості для якої виконано магніторозвідку [22]

На практиці, за допомогою пілотованих літальних апаратів, які виконують магніторозвідку на висотах не менш одиниць тисяч метрів ведуть

пошук родовищ корисних копалин, а за допомогою безпілотної авіаційної магніторозвідки оцінюють об'єми цих родовищ.

Висновки до розділу 1

Аналіз літературних джерел дозволив виконати класифікацію методів дистанційних досліджень земної поверхні на базі рухомих платформ авіаційного базування. Пасивні схеми виконання цих досліджень є більш привабливими з точки зору зменшення складу апаратури корисного навантаження, оскільки не потребують встановлення на борту ДПАС-БАК джерела зонduючого сигналу. Відповідно до чого, при реалізації пасивної схеми досліджень вага і габаритні розміри дослідницької апаратури будуть меншими.

За принципом дії методи дистанційних досліджень поділено на оптичні та магнітометричні. Існуючі відомі оптичні системи авіаційного базування, які реалізують гіперспектральне сканування досліджуваної поверхні за масою та переважно за габаритами не дозволяють встановити їх на жодну відому конструкцію дистанційно-пілотованого повітряного судна серійного виробництва, тому потребують розробки нового типу дистанційно-пілотованого літака, або обрання складу дослідницької апаратури що дозволить встановити її на існуючі типи конструкції ДПЛА. Магнітометричні методи дистанційних досліджень є досить інформативними, особливо щодо розвідки родовищ корисних копалин, коли досліджувана речовина має певні магнітні властивості, крім того апаратура для проведення магнітометричної розвідки має значно менші габарити та вагу і з цієї точки зору є більш привабливими для реалізації магнітометричної розвідки покладів корисних копалин на основі безпілотної авіаційної платформи.

Розділ 2. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

2.1 Найменування дипломної роботи

Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою безпілотного авіаційного комплексу

2.2 Підстава для проведення дипломної роботи

Навчальний план освітнього ступеня “Магістр” за спеціальністю 272 “Авіаційний транспорт”, освітньо-професійною програмою “Безпілотні авіаційні комплекси” № НМ-272-3/21.

Наказ ректора про затвердження тем та керівників дипломних робіт No 2339/ст. від 22.10.2021 р.

2.3 Мета і призначення роботи

2.3.1 Мета роботи

Мета роботи – дослідити особливості геологорозвідувальних вишукувань корисних копалин за допомогою дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів дистанційних досліджень.

2.3.2 Призначення роботи

Дипломна робота призначена для створення методик технічної реалізації дистанційних досліджень земної поверхні для виконання геологорозвідувальних робіт щодо визначення родовищ корисних копалин за допомогою дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів, обґрунтування складу апаратури для виконання вказаних досліджень.

2.4 Вихідні дані для проведення роботи

Дана дипломна робота виконується уперше . Під час виконання роботи слід використати напрацьований науковий і технічний досвід:

1. Christensen, P. R., M. D., Piatek, J. L., Ruff, S. W., & Stefanov, W. L. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals. / Journal of Geophysical Research. -2000. - 105(E4). - pp. 9735 – 9739.
2. Sterligov B, Cherkasov S. Reducing Magnetic Noise of an Unmanned Aerial Vehicle for High-Quality Magnetic Surveys / International Journal of Geophysics Volume. - Hindawi Publishing Corporation. - 2016. - 7p. - dx.doi.org/10.1155/2016/4098275.
3. Parshin A. V., Morozov V. A., Blinov A. V., and others. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey / Geo-spatial Information Science. - Wuhan University: Taylor & Francis Group. - 2018. - DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508

2.5. Очікувані наукові результати і порядок їхньої реалізації

2.5.1 Очікувані наукові результати

Внаслідок виконання дипломної роботи мають бути отримані такі результати:

- обґрунтовано конфігурацію та склад безпілотного авіаційного комплексу для виконання дистанційного магнітометричного дослідження ділянки ;
- обґрунтовано конфігурацію та склад безпілотного авіаційного комплексу для виконання термографічного дистанційного дослідження .

2.5.2 Порядок реалізації наукових результатів

Отримані наукові результати повинні бути придатними до використання:

- в процесі виконання дистанційних аеромагнітних геологорозвідувальних робіт на основі БАК;

- в процесі виконання дистанційних термографічних геологорозвідувальних робіт на основі БАК.

За результатами дипломної роботи буде:

- зроблено доповідь на науково-практичній конференції;
- підготовлено статтю для публікації в періодичному виданні.

2.6 Вимоги до виконання роботи

Дипломна робота повинна виконуватися у відповідності до методичних рекомендацій до виконання магістерських дипломних робіт для студентів напряму підготовки 6.070102 “Аеронавігація та ДСТУ 3973-2000 “СРППВ. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення”.

Пояснювальна записка оформлюється у відповідності до вимог ДСТУ 3008 - 95 “Документація. Звіти у сфері науки і техніки”.

2.7 Етапи роботи і терміни їх виконання

| Етапи роботи | Зміст етапу | Терміни | | Форма звітності (розділ дипломної роботи) |
|--|---|------------|------------|--|
| | | Початок | Закінчення | |
| Аналіз методів дистанційних досліджень авіаційного базування | Предмет дистанційних досліджень земної поверхні. | 22.10.2021 | 23.10.2021 | Підрозділ 1.1 |
| | Аналіз інструментарію дистанційно-пілотованих авіаційних систем та безпілотних авіаційних комплексів для виконання дистанційних досліджень. | 24.10.2021 | 25.10.2021 | Підрозділ 1.2 |
| | Аналіз системи AVIRIS | 25.10.2021 | 27.10.2021 | Підрозділ 1.3.1 |
| | Аналіз системи НуМар | 28.10.2021 | 31.10.2021 | Підрозділ 1.3.2 |
| | Аналіз системи SEBASS | 02.11.2021 | 04.11.2021 | Підрозділ 1.3.3 |
| | Аналіз магнітометричних методів досліджень | 05.11.2021 | 07.11.2021 | Підрозділ 1.4 |
| | Формулювання висновків до розділу 1 | 09.11.2021 | 10.11.2021 | Висновки до розділу 1 |

| | | | | |
|--|---|------------|------------|---------------|
| Технічне завдання | Розробка пунктів технічного завдання на дипломну роботу | 12.11.2021 | 13.11.2021 | Розділ 2 |
| Теоретичне підґрунтя дослідження. | Характеристика термометричного дистанційного методу геологічних досліджень Обґрунтування вибору сенсора ТІR- інфрачервоного діапазону для дистанційних досліджень для безпілотного авіаційного комплексу Обґрунтування пристрою для магнітометричних авіаційних досліджень Висновки до розділу 3 | 14.11.2021 | 16.11.2021 | Підрозділ 3.1 |
| | | 17.11.2021 | 19.11.2021 | Підрозділ 3.2 |
| | | 20.11.2021 | 23.11.2021 | Підрозділ 3.3 |
| | | 22.11.2021 | 22.11.2021 | |
| Авіаційна платформи та обладнання корисного навантаження БАК | Обґрунтування авіаційної платформи безпілотного авіаційного комплексу Конструкції ДПЛА для встановлення квантових магнітометричних пристроїв Немагнітні конструкції ДПЛА Конструкція фюзеляжу з немагнітних матеріалів Конструкція немагнітної безпілотної платформи типу “літаюче крило” Особливості виконання авіаційних магнітометричних досліджень з ДПЛА вертикального зльоту-посадки VTOL Розміщення модуля корисного навантаження ДПЛА для термографічного дослідження покладів корисних копалин Організація польотного завдання безпілотних авіаційних комплексів дистанційного зондування покладів корисних копалин Висновки до розділу 4 Висновки до диплому | 23.12.2021 | 25.11.2021 | Підрозділ 4.1 |
| | | 26.11.2021 | 29.11.2021 | Підрозділ 4.2 |
| | | 30.11.2021 | 03.12.2021 | Підрозділ 4.3 |
| | | 04.12.2021 | 06.12.2021 | |
| | | 07.12.2021 | 09.12.2021 | |
| | | 10.12.2021 | 11.12.2021 | Підрозділ 4.4 |
| | | 12.12.2021 | 14.12.2021 | Підрозділ 4.5 |
| | | 15.12.2021 | 17.12.2021 | Підрозділ 4.6 |
| | | 18.12.2021 | 18.12.2021 | |
| | | 20.12.2021 | 21.12.2021 | |

Розділ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА ДЛЯ ВИКОНАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКЛАДІВ КОРИСНИХ КОПАЛЕНЬ

Як це було з'ясовано в розділі 1 для виконання саме дистанційних геологорозвідувальних вишукувань за допомогою оптичних методів використовують оптичні датчики, які сприймають ділянки спектру інфрачервоного діапазону. Тому потрібно розглянути принцип дії таких оптичних датчиків та проаналізувати дані досліджень цих пристроїв.

Для розширення можливостей дистанційних досліджень на базі авіаційних платформ потрібно також додати авіаційні магнітометричні дослідження. Як це було показано в підрозділі 1.4. для виконання цього типу вимірювань використовують різні за принципом дії магнітометричні датчики а також коротко вказати на теоретичне підґрунтя магнітометричних досліджень.

3.1 Характеристика термометричного дистанційного методу геологічних досліджень

Загальні породоутворюючі мінерали мають довжину хвилі залежні спектральні характеристики по всьому інфрачервоному діапазону: NIR (0,4 – 1,0 мкм), SWIR (1,0 – 2,5 мкм) і TIR (5 – 25 мкм) довжин хвиль. У зоні атмосферного вікна TIR з 8 до 12 мкм, мінеральні групи, такі як силікати, карбонати, сульфати і фосфати мають спектральні особливості, пов'язані з основними частотами коливань їх міжатомних зв'язків. Ці ознаки, відомі як смуги рестстралена (остаточна радіація), є діагностичними та демонструють вимірні варіації, такі як зсув смуг поглинання із заміщенням катіонів, що дозволяє ідентифікувати види мінералів.

Інфрачервоні спектральні властивості багатьох гірських порід і мінералів були виміряні в лабораторії і є емпіричною основою для застосування інфрачервоного дистанційного зондування для картографування поверхні [23].

На рис.3.1 наведено спектри випромінювання для поширених мінералів в районі Steamboat Springs поблизу Вірджинія-Сіті. Для кожного мінералу зазначається джерело. На рис позначені спектральні бібліотеки дослідницьких центрів з яких взяті ці узагальнені дані : ASU (Arizona State University); JPL (Jet Propulsion Laboratory); JHU (Johns Hopkins University); USGS (U.S. Geological Survey).

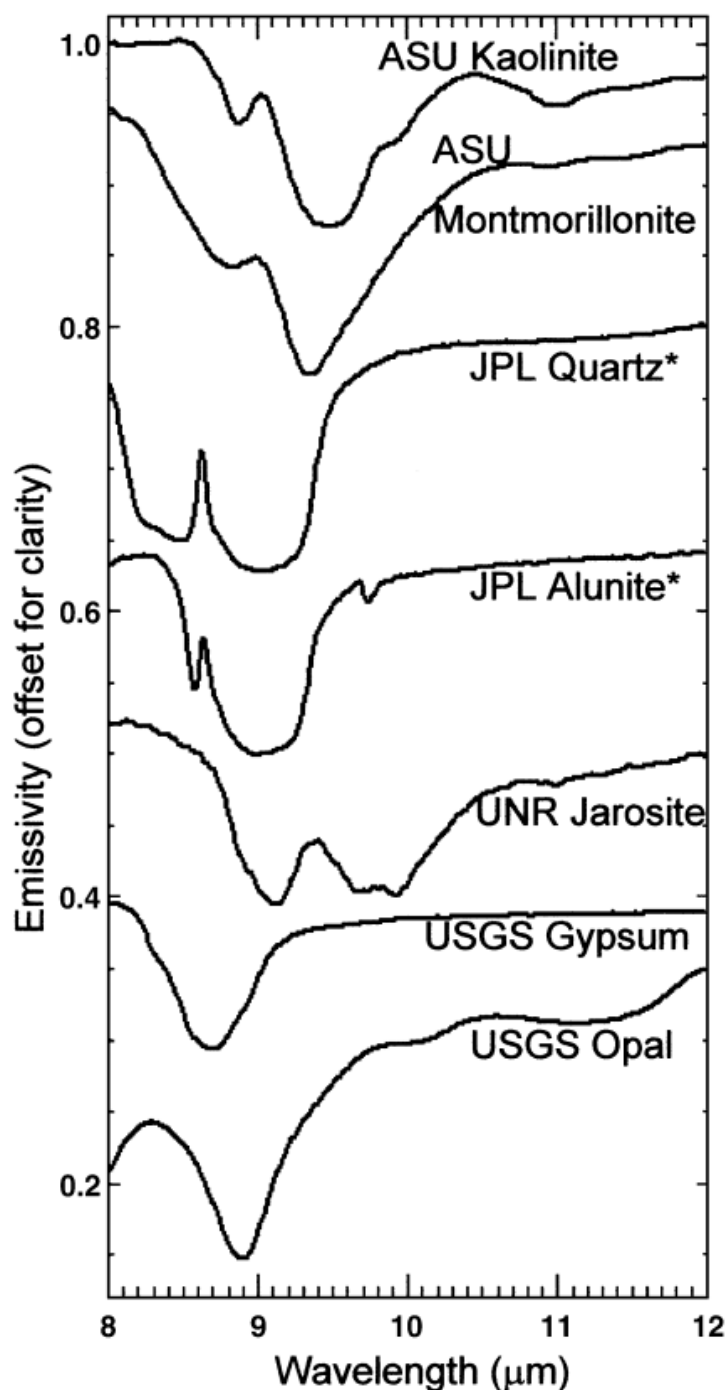


Рисунок 3.1 - Спектри випромінювання для поширених мінералів

Зв'язок між коефіцієнтом випромінювання (ε) та коефіцієнтом відбиття (r), визначеним законом Кірхгофа ($\varepsilon = 1 - r$), можна використовувати для розрахунку випромінювальної здатності на основі даних вимірювань в TIR-діапазоні.

$$L_{obs}(\lambda, i) = \tau(\lambda)\{\varepsilon(\lambda, i)B(\lambda, T_i) + [1 - \varepsilon(\lambda, i)]L_d(\lambda)\} + L_u(\lambda) \quad (3.1)$$

де $\tau(\lambda)$ - коефіцієнт пропускання атмосфери, функція довжини хвилі, але передбачається незалежність від пікселя; $\varepsilon(\lambda, i)$ - поверхнева спектральна випромінювальна здатність, функція довжини хвилі та пікселя; $B(\lambda, T_i)$ - функція випромінювання Планка для температури i -го пікселя; $L_d(\lambda)$ - атмосферне сяйво, відбите поверхнею; $L_u(\lambda)$ - атмосферне сяйво апвеллінгу. Останні параметри атмосфери - це випромінювання, що випромінюється самою атмосферою, або відбивається поверхнею, або випромінюється безпосередньо в прилад, і всі атмосферні параметри (τ , L_d , L_u) вважаються однорідними на зображенні (незалежно від розташування пікселя). При виведенні алгоритму атмосферної компенсації сцени (алгоритм ISAC) [24] припущення $\varepsilon = 1$ робиться так, що рівняння. (3.1) зводиться до рівняння (3.2)

$$L_{obs}(\lambda, i) = \tau(\lambda)B(\lambda, T_i) + L_u(\lambda) \quad (3.2)$$

Для кожної довжини хвилі існує чіткий лінійний зв'язок між спостережуваним випромінюванням і функцією Планка, нахил якої пов'язаний з пропусканням атмосфери τ , і зміщенням якої є випромінювання атмосфери, що піднімається L_u на цій довжині хвилі. Для алгоритму ISAC передбачається, що деякі пікселі сцени є чорними тілами, але ні розташування, ні температура цих пікселів не відомі. Щоб визначити ймовірні пікселі чорного тіла, виконуються такі дії:

1) Спектр випромінювання кожного пікселя перетворюють на температуру яскравості (проста інверсія функції Планка).

2) У кожному спектрі здійснюють пошук довжини хвилі його максимальної температури яскравості T_B , і розраховують графік гистограми довжини хвилі в залежності від кількості разів, коли він вибирається для максимального T_B (T_{Bmax}). Довжина хвилі з найбільшою кількістю попадань для T_{Bmax} , λ_{ref} , використовується як маркер. Пікселі, T_{Bmax} яких відбувається на λ_{ref} , вибираються як пікселі «чорного тіла».

3) Для кожної довжини хвилі, λ_n , складають графік розсіювання для спостережуваної яскравості від температури яскравості для пікселів чорного тіла. Лінія підходить до верхнього краю розподілу розсіювання, а нахил і зміщення цієї лінії приймаються як поправки τ і L_u для цієї довжини хвилі.

Метод найбільших попадань має вибрати ті пікселі, $\epsilon=1$ на λ_{ref} . На діаграмах розсіювання на одній довжині хвилі розкид у даних пояснюється випромінювальною здатністю, що не дорівнює одиниці, і шумом приладу, а підгонка верхнього краю лінійної хмари зменшує вплив цих внесків на τ і L_u . Таким чином, алгоритм повинен вибрати для $\epsilon=1$ при кожному λ_n .

На рис. 3.2 а,б (а–f) показано дію алгоритму корекції ISAC.

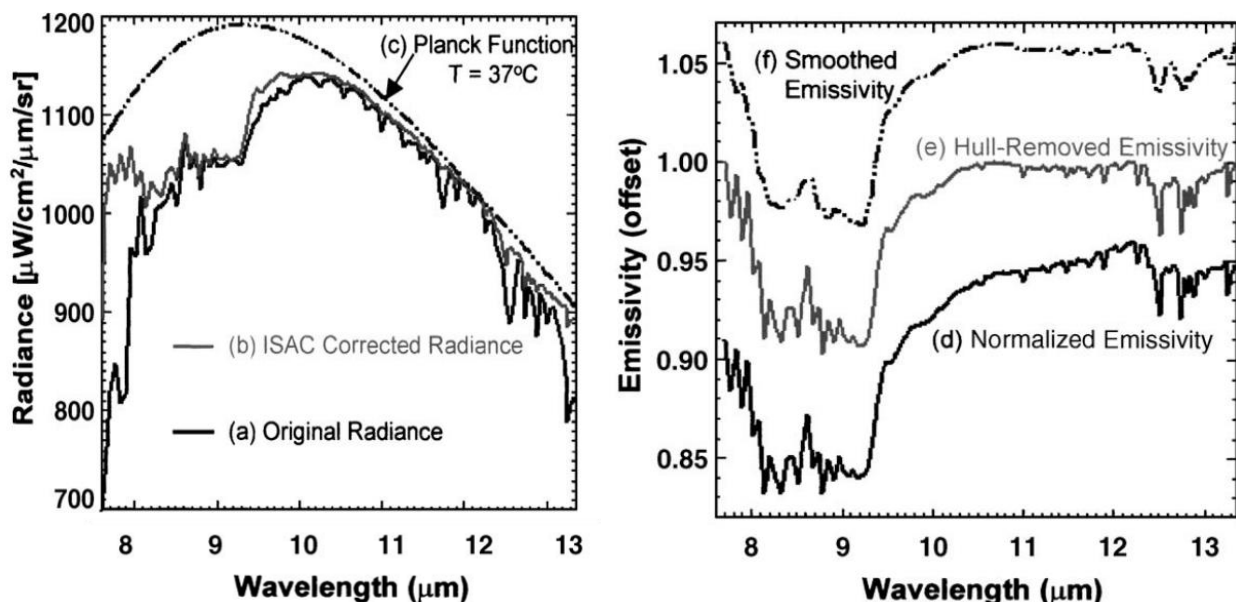


Рисунок 3.2 - Результат застосування алгоритму атмосферної корекції сцени

На рис. 3.2а літерою (а) позначено отриману від датчика характеристику випромінювання, літерою (b) позначено скореговану за алгоритмом характеристику випромінювання, літерою (c) позначено графік функції Планка, як нормуючого елементу. На рис. 3.2б літерою (d) позначено нормовану

випромінювальну здатність, літерою (e) означено випромінювальну здатність при знятому корпусі і літерою (f) позначено графік згладженої випромінювальної здатності.

3.2 Обґрунтування вибору сенсора TIR- інфрачервоного діапазону для дистанційних досліджень для безпілотного авіаційного комплексу

Для виконання сканування земної поверхні з метою геологорозвідувальних вишукувань потрібно обрати надійний оптичний інструмент, якій дозволив би виконати дослідження в інфрачервоному спектрі. Як було зазначено вище, для геологічних вишукувань у широкому діапазоні пошуку родовищ корисних копалин потрібен весь спектр інфрачервоного випромінювання - тобто від 1 мкм, який знаходиться ближче до видимої частини спектру до 25 мкм, який ближче до радіолокаційного діапазону. В такому випадку ми потребуємо оптичних сенсорів усього інфрачервоного спектру - NIR, SWIR, MIR, FIR і звісно TIR. На сьогодні гіперспектральної камери в такому діапазоні не існує. Як ми це переконались при аналізі системи SEBASS, яка на наш погляд, є найбільш вдалим технічним рішенням для вирішення завдань дистанційних досліджень авіаційного базування, габаритні розміри такої системи є досить значними, щоб бути встановленими на легких ДПЛА, які зазвичай використовують в геологорозвідці.

Одним з варіантів вирішення цього завдання може бути використання набору декількох портативних, невеликих за розмірами, легких оптичних датчиків, які за рахунок їх досить вузького спектрального діапазону, дозволять реалізувати, так би мовити “гіперспектральне” сканування. При реалізації такого проекту ми потребуємо п'ять сенсорів - по одному на кожний з вказаних інфрачервоних діапазонів. Проблемою, яка виникне при реалізації цього проекту буде необхідність окремої обробки інформації від кожного сенсора, тому що опрацювання результатів зондування в кожному діапазоні має свої “вузькі місця” - необхідність фільтрації специфічних шумів, усунення

завад, похибок як методичного так і інструментального характеру. Тобто ми також потребуємо п'яти каналів програмного оброблення інформації. При цьому потрібно буде врахувати економічну складову даного проекту, адже вартість високоточного оптичного приладу для кожного з діапазонів буде досить значною, крім того програмування блоку опрацювання інформації потребує залучення вузьких спеціалістів з програмного оброблення інформації. Тому варто зупинитися на якомусь одному, оптимальному варіанті. В якості критерію оптимальності обраного оптичного каналу ми оберемо найбільш широкий охоплювальний діапазон інфрачервоного спектру, доступний для одного оптичного сенсора. Виходячи з цього критерію ми обираємо TIR-інфрачервоний діапазон, який охоплює його верхню частину - тобто хвилі від 8 до 12 мкм.

Пошук компактних вимірювальних пристроїв з автономним живленням серед інфрачервоних камер вимагає дотримання декількох факторів:

- вимірювальний діапазон інфрачервоного спектру від 8 до 12 мкм;
- якомога менше значення габаритних розмірів;
- невелика вага самого пристрою та надійність його приєднувальних елементів;
- можливість сканування об'єктів на значній відстані - бажано до сотень метрів;
- можливість підключення автономного живлення;
- якомога менше значення енергоспоживання;
- стійкість до вібрацій, прискорень;
- ударозахищеність приладу;
- якомога менше значення експлуатаційної готовності;
- значний робочий температурний діапазон;
- наявність заводозахищеної конструкції корпусу, або наявність екрануючих елементів в конструкції приладу;
- стандартні протоколи обміну інформації;
- наявність інтерфейсу з ПК.

Перелік вимог може здатися значно завищеним, але ми повинні врахувати, що пристрій обирають для авіаційного базування, який буде експлуатуватися зовсім не в лабораторних умовах.

Після формулювання вимог до приладу ми здійснили компонентний пошук серед інфрачервоних камер TIR- діапазону і знайшли камеру OPTRIS Pi450 (рис.3.3) виробництва OPTRIS Infrared Measurements (Німеччина), яка після ознайомлення із її специфікацією була обрана нами для застосування в комплексі геологічної авіарозвідки на базі БАК.



Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд інфрачервоної камери OPTRIS Pi450ш [25]

Ознайомимося із основними характеристиками обраного пристрою (табл. 3.1.).

Таблиця 3.1 - Характеристики інфрачервоної камери OPTRIS Pi450i

| Параметр | Значення |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| Вимірювальний температурний діапазон | -20 to 900 °C |
| Інфрачервоний спектр, що вимірюється | 8 - 14 мкм |
| Частота кадрів | 80 Hz |
| Виконання | Відповідає стандарту IP67 (NEMA-4) |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Робоча температура | 0...70 °C |
| Відносна вологість | 10...95 %, не конденсовані |
| Розміри | 46 x 56 x 68 - 77 mm |
| Вага | 237-251 g |
| Допустимі вібрації | Відповідає стандарту IEC 60068-2-6 (синусоподібна) та стандарту IEC 60068-2-64 (для широкосмугово шуму) |
| Допустиме ударне прискорення | Відповідає стандарту IEC 60068-2-27 (25 G та 50 G) |
| Напруга живлення | 5 VDC |
| Струм споживання | Макс. 500 mA |
| Цифровий інтерфейс | USB 2.0 |
| Стандартні вимірювальні температури | -20...100 °C; 0...250 °C; (20) 150...900 °C; |
| Тип оптичного детектора | UFPA, 382 x 288 pixel @ 80 Hz |
| Абсолютна точність | ±2°C або ±2 % |
| Температурний коефіцієнт | ± 0,05 %/K |
| Експлуатаційна готовність | 10 хв. |
| Випромінювальна здатність | 0.100...1.100 |
| Власне ПЗ | PIX Connect / IRmobile |

Відстань до вимірювального об'єкту при якій роздільна здатність даної камери не погіршується згідно таблиці 2 специфікації досягає 100 метрів, що достатньо для реалізації дистанційних досліджень на базі безпілотної авіаційної платформи. На такій відстані миттєве поле зору (IFOV) складає 133,0 мм.

3.3 Обґрунтування пристрою для магнітометричних авіаційних досліджень

За принципом використовуваного фізичного явища або ефекту, датчики та прилади поділяють на два основні класи та проміжну групу [26]. До першого класу відносяться механічні та квантові датчики. Протікають у них процеси засновані на силовій взаємодії тіл або частинок з вимірюваним полем, що володіють магнітним моментом, тобто, підпорядковані закону Ампера.

Механічні датчики містять як чутливі елементи магніти або контури зі струмом. Датчики (відповідно та прилади) діляться на пасивні та активні. Пасивні датчики у вигляді магнітних стрілок, що вільно повертаються, використовуються для визначення вектора \mathbf{B} , або для оцінок його складових за методом врівноваження механічного моменту стрілки \mathbf{P} відомим моментом \mathbf{P}_k . Функціонування активного чутливого елемента засновано на вільних хитання стрілки у вимірюваному полі і дозволяють оцінити значення тієї чи іншої складової вектора \mathbf{B} за періодом або частотою гойдання. Відмінна риса магнітомеханічних датчиків полягає у їхній великій інерційності, що обмежує частотний діапазон тесламетрів значенням порядку одиниць герц. Тому магнітомеханічні тесламетри змінних полів використовуються головним чином як варіометри – прилади для реєстрації варіацій елементів магнітного поля Землі: відмінювання, горизонтальної, східної, північної та вертикальної складових, що змінюються з періодом від одиниць до кількох тисяч секунд. Максимальна чутливість механічних тесламетрів становить 0,1 нТл. Зазначимо, що у зв'язку з розвитком робіт з отримання феромагнітних рідин представляється перспективним використання їх як чутливих елементів магнітомеханічних тесламетрів [26].

Квантові магнітометри містять як чутливий елемент робочу речовину, що поглинає або випромінює електроенергію на деякій частоті, яка залежить від значення вимірюваного параметра магнітного поля. Розрізняють протонні магнітометри, гелієві магнітометри, магнітометри на основі ефекту Оверхаузера, атомні магнітометри на лужних металах з оптичним накачуванням, СКВІД-магнітометри та SERF-магнітометри. Про вимірюване значення $B=|\mathbf{B}|$ зазвичай судять за частотою прецесії вектора \mathbf{M} (де $\mathbf{M}=\sum m_i$ - сумарний магнітний момент речовини, m_i - магнітний момент одної частинки) навколо вектора \mathbf{B} (так звана ларморівська частота; саме вона вимірюється в більшості магнітометричних схем), тобто за виразом

$$\omega=\gamma B$$

де γ - гіромагнітне відношення частинки.

Залежно від природи частинок, що утворюють єдиний прецесуючий ансамбль, розрізняють електронно-, ядерно-і атомно-прецесуючі датчики. У кожному конкретному у разі використовується відповідне значення гіромагнітного відношення: γ_e , γ_a або $\square\gamma_a$ [26].

Магнітометри, що використовують явища ядерного та електронного магнітного резонансу, здатні реєструвати середні та сильні поля (від 10^{-5} до 25 Тл). Вони знаходять широке застосування щодо визначення властивостей речовини. Прилади, засновані на «оптичному накачуванні» атомів у магнітному полі (ефект Зеемана), мають чутливість 0,002 – 0,02 нТл при діапазоні вимірювань $(0,02 \div 0,8) \cdot 10^{-4}$ Тл і дуже високою швидкістю до 3 МГц. Вони застосовуються на космічних апаратах. Швидкодія таких тесламетрів дозволяє використовувати їх для досліджень швидкозмінних магнітних полів та для вимірювання слабкої змінної магнітної індукції [26]. На рис. 3.4 наведено зовнішній вид первинного перетворювача та модуля опрацювання даних і індикації магнітометра, які функціонує на основі ефекту Оверхаузера GSM-19Т.



Рисунок 3.4 - Квантовий магнітометр на основі ефекту Оверхаузера [27]

Єдиний підхід до розгляду процесів у механічних та квантових датчиках дозволяє виявити їх загальні властивості: 1) у них завжди здійснюється частотна модуляція; 2) інформативний параметр вихідного сигналу несе відомості про модуль вектора магнітного поля.

До другого класу відносяться індукційні, фероіндукційні та надпровідникові датчики. Процеси, які у цих датчиках, однак пов'язані із законом електромагнітної індукції.

Індукційний датчик містить чутливий елемент - котушку індуктивності. Вихідним пропорційно похідної сигналом датчика є ерс, яка дорівнює dV/dt . Якщо ж поле, що вимірюється є постійним, то ерс виникає за рахунок зміни в часі ефективної площі контуру S і пропорційна dS/dt [27]. У фероіндукційних датчиках (феррозонд) чутливим елементом є феромагнітне осердя. Вихідна ерс у ньому (при $V_0 = \text{const}$) виникає за рахунок зміни в часі магнітної проникності осердя μ , тобто пропорційна $d\mu/dt$. Зміну μ можна викликати за допомогою механічного, теплового або магнітного збудження осердя. Ферозонди характеризуються високою чутливістю і малими розмірами і тому мають широку сферу застосування (від вимірювання геомагнітних полів Землі та їх варіацій до вивчення магнітних полів у космосі) [27].

Надпровідникові магнітометри (на ефекті Джозефсона) є на сьогодні найчутливішими приладами (поріг чутливості $2 \cdot 10^{-15}$ Тл·Гц^{-1/2}) і знаходять широке застосування у різних галузях: від фізичних та геофізичних досліджень до біології та медицини. Їх дія заснована на перетворенні надпровідного струму, який наводиться в охолодженому нижче критичної температури замкнутому контурі при розміщенні його в магнітне поле, що вимірюється, в осцилюючу напругу, що з'являється на джозефсонівських переходах [27]. Характерними властивостями всіх датчиків другого класу є таке: 1) у них майже завжди здійснюється амплітудна модуляція; 2) вихідний сигнал цих датчиків несе інформацію про складову вимірюваного поля - проекції вектора на якусь вісь, звану магнітною віссю датчика. Проміжну групу утворюють гальваномагнітні, магнетронні та деякі інші датчики. Датчики Холла, наприклад принцип дії яких заснований на використанні однойменного фізичного явища, мають малі розміри (розмір робочої області аж до $0,025 \times 0,025$ мм²) і тому застосовуються для вивчення докладної топології сильних магнітних полів. Для подібних завдань також дуже добре підходять магнітоопори – речовини, що змінюють внутрішній опір в магнітному полі внаслідок зміни рухливості носіїв заряду [27]. Крім того, існують магнітооптичні прилади на ефектах Фарадея та Керра. Тесламетри, засновані на магнітооптичному ефекті Фарадея, мають ряд переваг: відсутня механічна зв'язок між чутливим елементом та іншою частиною приладу, виключно широкий діапазон робочих температур (від "гелієвих" до кімнатних і вище), висока лінійність кривої. Ці обставини разом із іншими технічними характеристиками визначили область застосування магнітооптичних тесламетрів – вимір магнітної індукції сильних магнітних полів (полів у надпровідних системах; полів, створюваних провідниками зі струмом, що знаходяться під високим потенціалом, з метою вимірювання цих струмів тощо).

Роботи по виконанню магніторозвідки для геологорозвідувальних робіт на основі безпілотних авіаційних комплексів виконують в різних країнах на протязі останнього десятиріччя. Так в [28] описана безпілотна авіаційна

платформа типу моноплана, на кінцях крил якого встановлені два квантових магнітометри на відстані 4,27м. Ще один мікромеханічний магнітометр був встановлений всередині планера. Частота вимірювання складала 10Гц, при цьому рівень власних шумів прилада не перевищував 0.1 нТл. Слід зауважити що квантові магнітометри споживають не менш 25 Вт потужності. Швидкість руху безпілотного повітряного судна складала від 111 до 185 км/год, висота польоту - 150 м. Рівень шумів при виконанні вимірювань в польоті склав до 48 нТл. Подальші роботи дозволили знизити рівень шумів до 0,55 нТл за рахунок застосування фільтру зворотного гофрування, а потім нелінійного фільтру низьких частот Науді [29]. Далі структуру комплексу було удосконалено - квантові магнітометри із цезієм було замінено на калійеві GSMP-35 та задля їх орієнтації встановлено мікромеханічний магнітометр TFM-65VQS.

Застосування квантових магнітометрів і авіаційних магнітометричних завданнях має певні недоліки: виконується вимірювання лише модуля вектору магнітної індукції магнітного поля Землі; низька частота вимірювань; необхідність додаткової орієнтації датчиків відносно вектора індукції магнітного поля Землі - потрібна наявність певного кута між віссю комірки та вектором магнітного поля Землі; достатньо велике значення споживаної потужності; велика вартість приладу.

Вимірюване значення модуля індукції магнітного поля Землі при виконанні квантової магнітометрії усереднюють за певний часовий проміжок, відповідно результатом вимірювання є середнє значення поля, що призводить до зменшенню величин максимумів аномальних значень і відповідно розмиттю просторового положення границь магнітних аномалій, які обумовлені при контакті порід, що мають різні магнітні властивості.

Магнітомодуляційні перетворювачі, переважно ферозондові (рис. 3.5) також використовують для проведення авіаційної магнітометрії на безпілотних авіаційних комплексах.



Рисунок 3.5 - Ферозондовий магнітометр FGM3D [30]

Характеристики ферозондового магнітометра наведені в таблиці 3.2. В дослідженні [31] ферозондовий магнітометр було встановлено на ДПЛА вертикального зльоту-посадки (квадрокоптер).

Діапазон вимірювань складав 100000 нТл, чутливість перетворювача - 0,07 нТл, роздільна здатність 1 нТл, споживана потужність - 2,7 Вт, максимальна частота вимірювань - 125 Гц. За допомогою комплексної навігаційної системи безпілотного літального апарату (поєднання БІНС та СНС) виконували відстеження траєкторії і напрямку руху, положення магнітометра в просторі та його орієнтацію. Перед виконанням кожної місії магнітометр калібрували у спеціально екранованому приміщенні. Швидкість руху складала не більш 2 м/с. При цьому корегування показань о висоті польоту не виконувалось.

С точки зору точності вимірювань квантові магнітометри, якщо судити з вказаних характеристик, є більш ефективними ніж магнітомодуляційні. При цьому потрібно враховувати досвід попередніх досліджень, який рекомендує використовувати пару квантових пристроїв і при цьому потрібно виконувати корекцію їх орієнтації для підвищення точності, а для усунення надмірного впливу шумів прилади повинні бути розташовані на значній відстані один від одного та звісно знаходиться зовні фюзеляжу повітряного судна. Такі умови ускладнюють конструкцію безпілотного авіаційного комплексу, ускладнюють польотне завдання і відповідно підвищують його вартість

Таблиця 3.2 - Характеристики ферозондового магнітометра FGM3D

| Параметр | Значення |
|-----------------------------|------------------------------|
| Вимірювальний діапазон | Від 4000 нТл до 1000000 нТл |
| Чутливість | менш 150 нТл |
| Температурний дрейф | -0,3 нТл /°К |
| Відносна похибка вимірювань | -0,1 % |
| Напруга живлення | Від 12В до 15В |
| Струм споживання | 26мА |
| Вихідний імпеданс | 1 Ом |
| Вага пристрою | 112 г |
| Смуга пропускання | 2 кГц (стандартне виконання) |
| Розміри | Залежать від виконання |
| Інтерфейс | USB |

Висновки до розділу 3

Для виконання геологічних вишукувань покладів корисних копалин на базі аналізу існуючих методів та пристроїв запропоновано обрати пасивні методи вимірювань - тобто такі які не потребують джерела зондуючого сигналу.

Серед оптичних методів обрано дистанційні вимірювання в тепловому спектрі (TIR) інфрачервоного діапазону, які дозволяють виконувати дистанційну ідентифікацію порід, які містять корисні речовини. В якості конкретного вимірювального приладу для дистанційних досліджень обрано вимірювальну тепловізійну камеру OPTRIS Pi 450, яка має потрібний робочий діапазон довжини хвилі, є стійкою до значних вібраційних та ударних впливів, має розширений діапазон робочих температур, і невеликі габаритні розміри і вагу. Останні фактори мають не останнє значення при побудові конструкції корисного навантаження для цього пристрою - можливість використовувати стандартні кріплення для модулів корисного навантаження (камер).

Магнітометричні методи дистанційного дослідження є додатковим інструментом виконання геологічних вишукувань, але таким що останнім часом зазнає інтенсивного розвитку, особливо з урахуванням їх застосування в аерогеофізичному методі дослідження із використанням безпілотних авіаційних комплексів. Різні за принципом дії магнітометричні прилади можуть бути використані для побудови на їх основі корисного навантаження безпілотного авіаційного комплексу аеромагнітної розвідки. С точки зору зниження собівартості гелогорозвідувальних робіт варто застосовувати ферозондові магнітометри. В якості вимірювального приладу, якій може бути використаним для подібних досліджень є ферозондовий магнітометр FGM3D, якій має задовільні точностні характеристики та потрібні показники надійності та завадостійкості. Використання магнітометрів потребує розроблення додаткової схеми побудови безпілотного авіаційного комплексу.

Розділ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ БЕЗПІЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ МІСІЇ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1.Обґрунтування авіаційної платформи безпілотного авіаційного комплексу

Заставою успішного виконання будь якої місії безпілотного авіаційного комплексу є перш за все обрання потрібної конструкції дистанційно-пілотованого літального апарату. В контексті виконання дистанційних досліджень з розвідки покладів корисних копалин можна сформулювати деякі вимоги до його конструкції [12]:

- ДПЛА повинен бути здатен нести корисне навантаження не менш 500 г;
- аеродинамічні властивості ДПЛА та система управління повинні забезпечувати траєкторію польоту потрібну для якісного виконання дистанційного дослідження;
- ДПЛА повинен бути здатен виконувати політ на малій швидкості на дуже низьких висотах порядку декількох метрів;
- елементи конструкції ДПЛА не повинні вносити завади в процес вимірювання інформаційних параметрів досліджуваної території.

Виходячи з цих вимог, а також з аналізу принципу дії обраних вимірювальних засобів потрібно вказати, що ми не можемо використовувати лише один ДПЛА для виконання двох типів досліджень - аеромагнітної розвідки і термографічного сканування. Внаслідок цього нам потрібно запропонувати конструкції ДПЛА в залежності від типу вимірювального засобу. Для встановлення протонного магнітометричного пристрою ми розглянемо ДПЛА горизонтального зльоту-посадки НТОЛ за традиційною схемою та ДПЛА за схемою “літаюче крило” (flying wing). Для встановлення інфрачервоної камери ТІR-діапазону розглянемо ДПЛА горизонтального зльоту-посадки НТОЛ за традиційною схемою. Та для встановлення ферозондового магнітометричного пристрою розглянемо ДПЛА

вертикального зльоту-посадки VTOL мультикоптерного типу. Окремо потрібно обґрунтувати особливості встановлення вказаних вимірювальних засобів та розробити планування місії БАК [12].

4.2 Конструкції ДПЛА для встановлення квантових магнітометричних пристроїв

Оскільки традиційна конструкція - особливо її внутрішні компоненти для будь-якого ДПЛА є джерелом різної інтенсивності магнітних полів, одним з шляхів подолання проблеми є модифікації, щоб видалити феромагнітні матеріали поблизу магнітометрів, які часто встановлюються на штангах поза межами крил (рис 4.1).



Рисунок 4.1 - ДПЛА горизонтального зльоту-посадки НТОЛ з встановленими на краях крил цезієвими магнітометрами [32]

Слід зазначити що використання двох квантових протонних магнітометри із бортовим мікрокомп'ютером для опрацювання інформації, джерелом живлення та вторинних сенсорів потребує загальної ваги корисного

навантаження більш 8 кг (8,28кг), що є дуже значним. Розмах крил складає 4,95м - це відстань від одного магнітометра до іншого. Швидкість досягає 100 км/год, що є дуже великим значенням для магнітометричних досліджень, оскільки ми зазначили раніше про бажані швидкості біля одиниць метрів. До того ця конструкція потребує для зльоту смугу рівної поверхні ґрунту довжиною 150 метрів. Особливо ця вимога накладає великі обмеження щодо застосування ДПЛА наведеного на рис.4.1, тому що дистанційні вишукування дуже часто проводять в незаселених частинах континентів, із складним рельєфом земної поверхні. В тому же науковому творі зазначено про випробування ДПЛА мультикоптерного типу для того ж типу протонних магнітометрів. Для усунення впливу магнітних завад від електромеханічних компонентів ДПЛА до нього закріпили спеціальну довгу штангу на кінці якої закріпили вимірювальні пристрої. Подібну штангу показано на рис.4.2

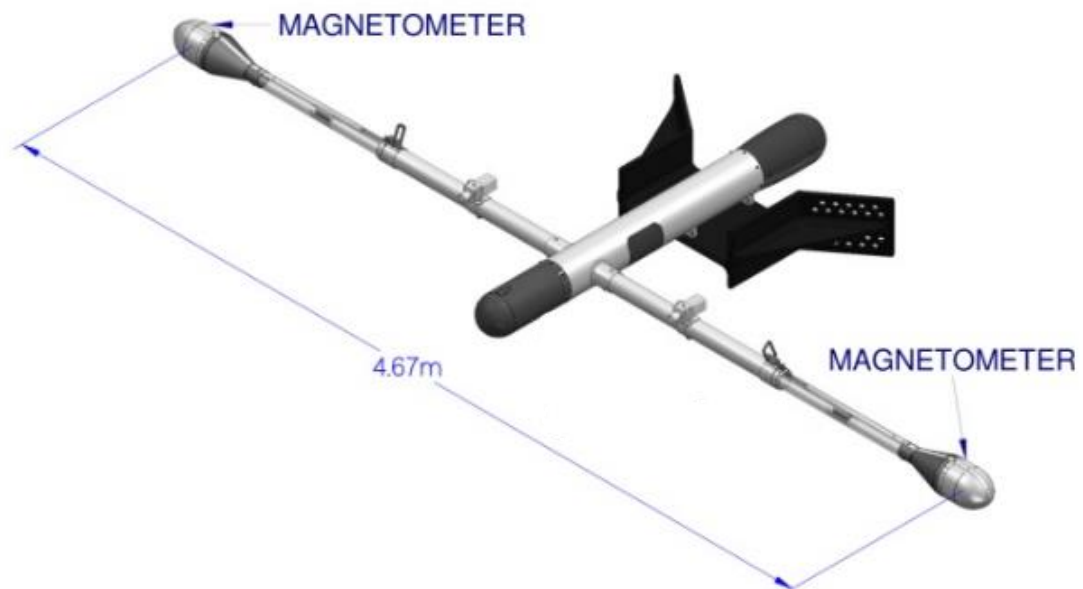


Рисунок 4.2 - Конструкція для закріплення магнітометрів на ДПЛА VTOL-типу

ДПЛА мультикоптерного типу, внаслідок своєї конструкції має переваги, оскільки не потребує зльотно-посадкової смуги. Але в таких ДПЛА виникають інші проблеми. Мова йде про потенційно-невелике значення маси корисного навантаження, яке така конструкція може нести. Крім того дальність польоту такого ДПЛА обмежена внаслідок швидкого споживання електродвигунами

потужності акумуляторних батарей. Тому тривалість польоту для таких ДПЛА обмежена у середньому 20-40 минутами. В якості переваг, крім вказаної вже, можна зазначити невелику швидкість, високу керованість та маневровість.

4.3. Немагнітні конструкції ДПЛА

4.3.1. Конструкція фюзеляжу з немагнітних матеріалів

Одним з шляхів побудови спеціалізованих ДПЛА для магнітометричних досліджень є створення конструкцій ДПЛА із зниженими магнітними властивостями фюзеляжу. В якості матеріалу використовують вуглецево-епоксидні композити. Вони були розроблені з використанням різновиди методу виробництва, який називають вакуумним формуванням з перенесенням смоли [33]. Цей метод використовує вакуум для витягування полімерної смоли, у даному випадку епоксидної, через ламіновані пресформи з сухого волокна в односторонній формі. Компоненти, виготовлені за допомогою цього процесу, мають дуже хорошу міцність, повторюваність і малу вагу з обробкою поверхні за методом Air Data Boom.

Крім того, де можливо, механічні компоненти та кріплення виготовляють з композитних матеріалів або з кольорових матеріалів (латунь, аустенітна нержавіюча сталь, титан). Ескіз такого фюзеляжу наведено на рис. 4.3.

Попре це, такі компоненти, як двигун і сервоприводи для системи керування польотом, містять чорні матеріали і створюють магнітні поля. Тому потрібні заходи, щоб максимізувати відстань між магнітометрами та такими компонентами. Крім того, магнітну сигнатуру різних компонентів, а також всього повітряного транспортного засобу вимірюватимуть у магнітно «чистому» приміщенні в спеціалізованих лабораторіях для дослідження їх магнітного шуму.

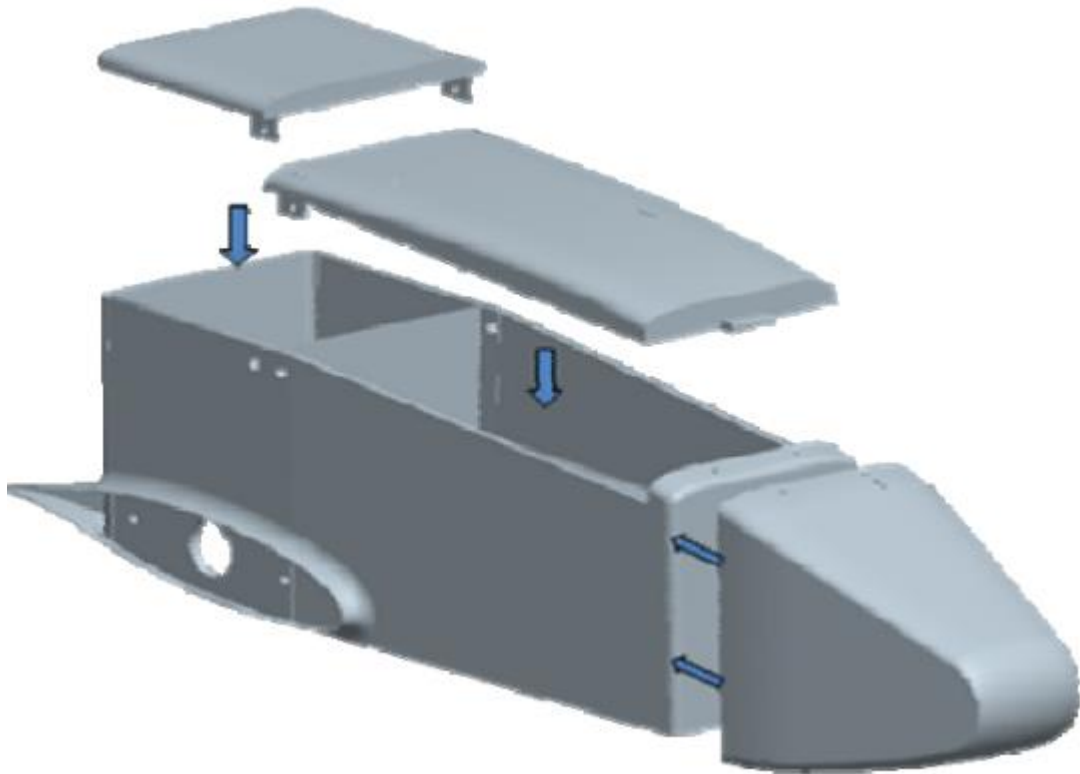


Рисунок 4.3 - Структура немагнітного фюзеляжу [34]

Для усунення впливу електромеханічних компонентів БПЛА автори конструкції пропонували виконати ДПЛА у вигляді планера, якій транспортують до місця магніторозвідки за допомогою гелікоптера або іншого, дистанційно-пілотованого літального апарату, на місці магніторозвідки ведучій ДПЛА переміщується на значній висоті, а немагнітний планер - відомий, здійснює політ на потрібних для магніторозвідки висотах. Ми досить скептично відносимося до такої схеми, по-перше з точки зору безпеки польоту такої складної конструкції, а по-друге враховуючи схеми дистанційно-пілотованої магніторозвідки, які ми розглянемо нижче.

4.3.2. Конструкція немагнітної безпілотної платформи типу “літаюче крило”

Для з'ясування розподілу градієнту магнітного поля в конструкції ДПЛА “літаюче крило” відомої конструкції із розмахом крил 2,3 м та довжиною 1,2 м,

який має електричний двигун Hurricane моделі Z4035-14 було проведено вимірювання магнітного поля при різній орієнтації вісі літака по сторонах світу. На рис. 4.4 наведено графічні результати вимірювання

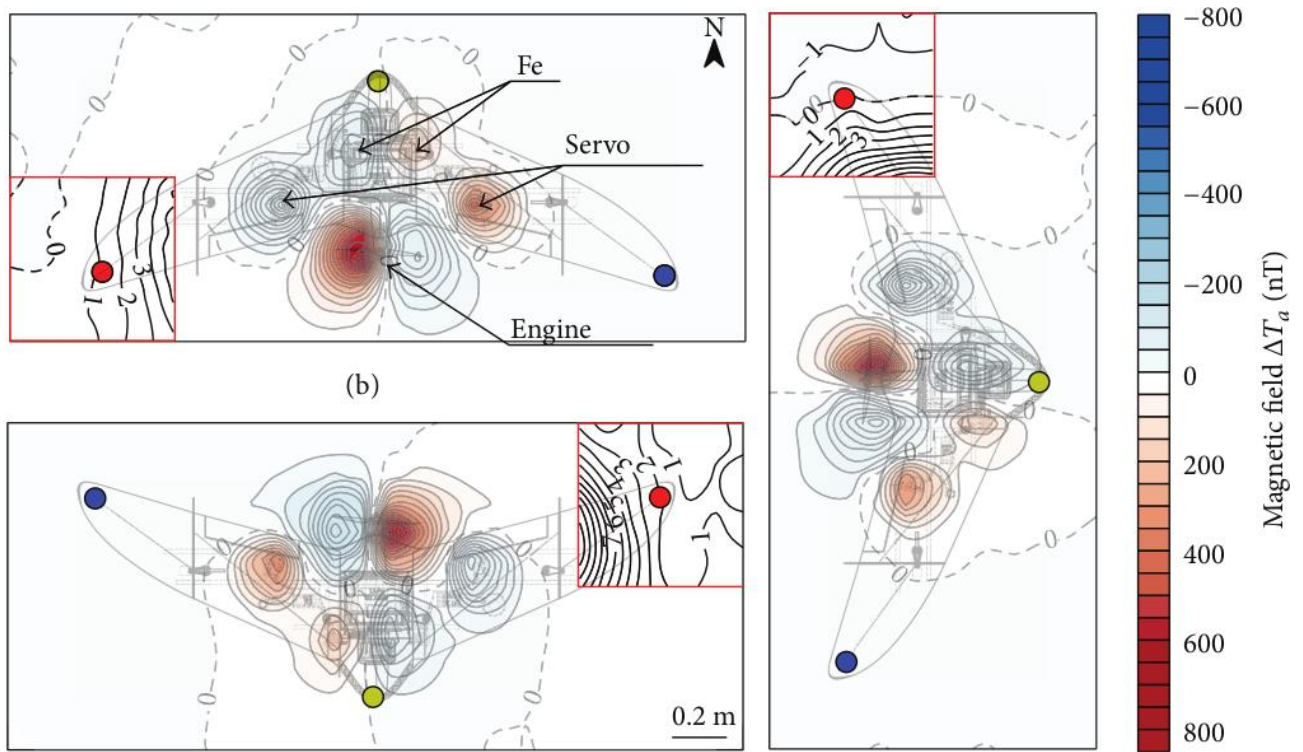


Рисунок 4.4 - Результати вимірювання розподілу магнітних полів в ДПЛА конструкції “літаюче крило” [35]

Як це видно з рис.4.4 найменше значення градієнту магнітного поля, що генерують компоненти БПЛА на кінця обох крил в межах 3нТл, до того ж він є залежним від розташування вісі літака відносно сторін світу, тобто є нестабільним, що ускладнює розмагнічувальні заходи.

В цієї роботі також було визначено рівні магнітного поля, що генерують різні частини ДПЛА. Так електродвигун генерує поле потужністю 800 нТл; два сервоприводи на крилах генерують поле до 600 нТл; феромагнітні елементи розташовані в передній частині ДПЛА - до 300 нТл.

Враховуючи результати дослідження автори роблять висновок про неможливість використання конструкції існуючого типу для магнітометричних авіаційних вимірювань, навіть при оснащенні конструкції двигуном внутрішнього згорання, якій має значно нижчі показники магнітних аномалій.

В той же час автори провели моделювання розподілу градієнтів магнітного поля і за відомими виразами отримали значення магнітних моментів джерел генерації магнітних аномалій в ДПЛА. Отримані дані, а також бажані значення розташування нульових параметрів магнітного поля були введені в програму XLFR5 для автоматичного проектування профілів крил та конструкції планера та отримали бажані параметри конструкції ДПЛА “літаюче крило” які дозволили отримати такі вхідні параметри для проекту оптимальної конструкції такого типу для виконання магніторозвідки: маса літака - 8кг; крейсерська швидкість - 20м/с; розташування центру мас на відстані 900-925 мм від переднього краю та значення оптимального куту атаки 5 градусів. В якості джерела тяги обрано двигун внутрішнього згоряння який дозволить збільшити тривалість польоту до 5 годин на висоті в висотному коридорі від 20 до 50 метрів. На основі отриманих даних технічного завдання було розроблено ескізний проект оптимального для виконання авіаційних магнітометричних досліджень ДПЛА типу “літаюче крило”. Такий ескіз наведено на рис.4.5. Такий літак, за ствердженням авторів, має також додаткові переваги за рахунок усунення необхідності виконувати складні алгоритми пост-оброблення вимірювальної інформації, дозволяє усунути корегувальний ферозондовий магнітометр, не має обмежень польотів за різними азимутами. Старт ДПЛА відбувається за допомогою катапульти.

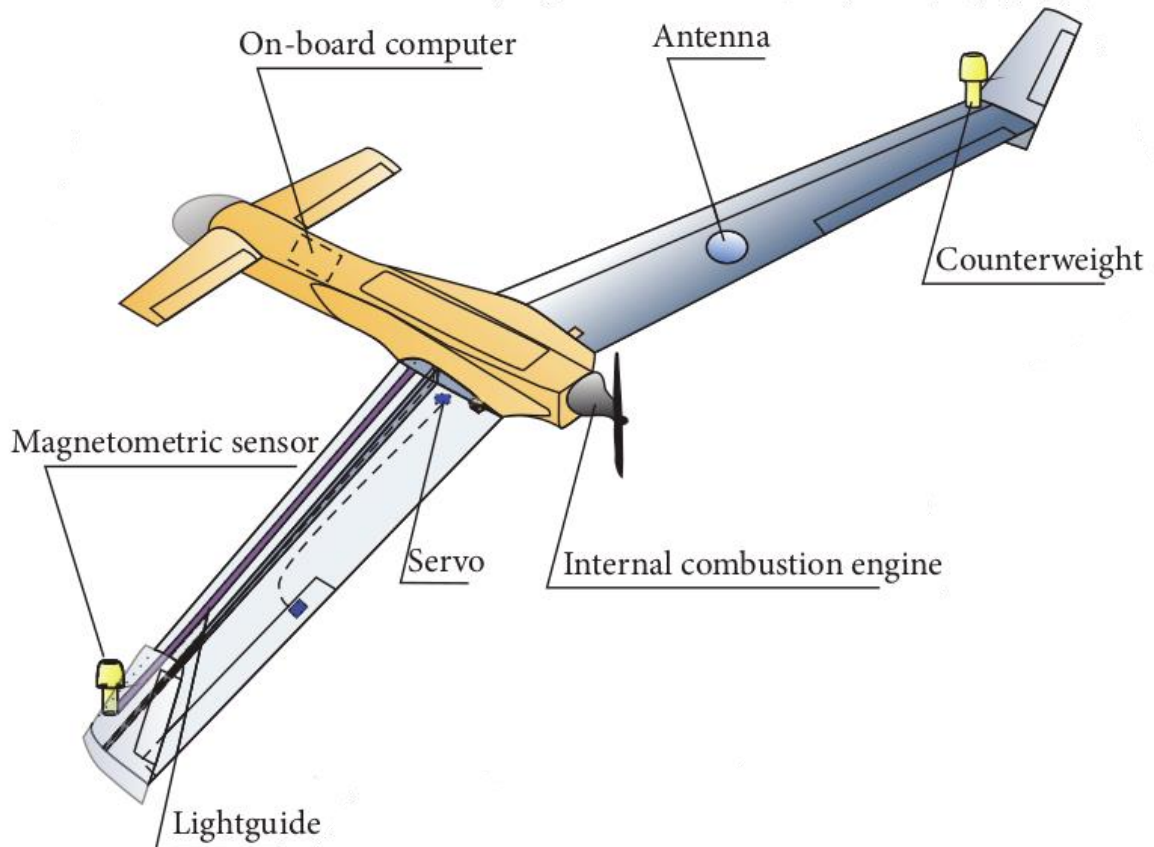


Рисунок 4.5 - Ескізний проект конструкції ДПЛА оптимальної для виконання авіаційних магнітометричних досліджень [35]

Така конструкція, на наш погляд є оптимальним рішенням виконання авіаційної магніторозвідки. Єдиним недоліком - є саме тип конструкції “літаюче крило”, оскільки, за думкою багатьох фахівців з аеродинаміки, сама така конструкція має певні обмеження з точки зору маневровісті.

4.4. Особливості виконання авіаційних магнітометричних досліджень з ДПЛА вертикального зльоту-посадки VTOL

На рис. 4.2. наведено конструкцію штанги для закріплення магнітометричного пристрою - переважно квантового магнітометра. Але при застосуванні ДПЛА вертикального зльоту-посадки VTOL мультикоптерного типу для виконання магнітометричних досліджень можливо використання магнітомодуляційних магнітометрів, наприклад ферозондових. Ряд дослідників

у своїх роботах досягли значних успіхів при застосуванні саме такої безпілотної платформи для магнітометричної розвідки.

Ферозондовий магнітометр має меншу вагу по зрівнянню із квантовими, є більш надійним та дешевшим. Крім того, за рахунок організації польотного завдання можливо отримати не менш точні дані про досліджуваний об'єкт, як і при застосуванні квантових магнітометрів. Характеристики ферозондового магнітометра наведено в табл. 3.2.

Особливості конструкції ферозондового магнітометра обумовлюють схему його встановлення, як модуля корисного навантаження, на безпілотний літальний апарат. Для реалізації саме геологічних магнітометричних вишукувань за допомогою цього приладу його чутливий елемент за допомогою кабелю довжиною декілька метрів, або телескопічної антени підвішують до нижньої частини фюзеляжу ДПЛА вертикального зльоту та посадки мультикоптерного типу. На рис. 4.6. наведено схему магнітометричних геологорозвідувальних досліджень на базі ДПЛА VTOL із ферозондовим магнітометром. Разом із чутливим елементом магнітометра розташовують приймач сигналів ГНСС, що дозволяє одночасно реєструвати траєкторію руху, положення і орієнтацію чутливого елемента ферозондового магнітометра в просторі в поточний момент часу з точністю до 30 мм, при диференційному режимі роботи приймача ГНСС сигналів [36]. Також для підвищення точності вимірювання потрібно із високою точністю визначати істинну висоту польоту, оскільки магніторозвідувальний ДПЛА виконує траєкторію польоту подібну до “повітряного сканування” рельєфу досліджуваної ділянки земної поверхні. Така траєкторія дозволяє максимально точно визначати екстремуми магнітних аномалій підземних структур в даній місцевості [12]. Оскільки політ при такій аеромобільній схемі магнітометричного дослідження виконують на дуже низьких висотах - порядку декілька метрів, то в якості вимірювача висоти доречно використовувати лазерний висотомір, якій є аналогом висотоміру малих висот і зазвичай використовують на ДПЛА для контролю торкання землі при посадці. Лазерний висотомір має дуже високі метрологічні характеристики.

При цьому корегування висоту виконують за даними значень кутів крену і тангажу, які отримують з БІНС ДПЛА.



Рисунок 4.6 - Схема дистанційного дослідження магнітних аномалій на основі ферозондового магнітометра на борту ДПЛА мультикоптерного типу [36]

Швидкість польоту при виконанні такої схеми магнітометричних дистанційних досліджень може складати лише 2 м/с, що дозволяє, одночасно з метровими значеннями висоти польоту, з високою точністю отримати дрібні ексцеси аномалій магнітного поля досліджуваної ділянки земної поверхні.

При реалізації магнітометричних дистанційних досліджень на ДПЛА мультикоптерного типу цілком можливим є використання і протонних магнітометрів, чутливість яких більш точною ніж у будь-якого векторного. Використання квантових (наприклад заснованих на ефекті Оверхаузера) магнітометрів буде необхідним при необхідності реєстрації магнітних аномалій

не більш $\pm 2-4$ нТл. Тоді, як вже вказувалося вище, необхідно обов'язково встановлювати векторний магнітометр для визначення кута МПЗ.

4.5 Розміщення модуля корисного навантаження ДПЛА для термографічного дослідження покладів корисних копалинь

Розміщення тепловізійної камери TIR-інфрачервоного спектрального діапазону, яку було обрано для сканування земної поверхні в підрозділі 3.2 не потребує виконання особливих дослідницьких або конструктивних вишукувань, тому що будь-які оптичні реєструючі пристрої є стандартним набором корисного навантаження ДПЛА.

Перший варіант встановлення TIR-камери - безпосередньо на борту ДПЛА літакового типу показано на рис. 4.7. Точка встановлення для такої камери позначена на рисунку як мультиспектральна камера.

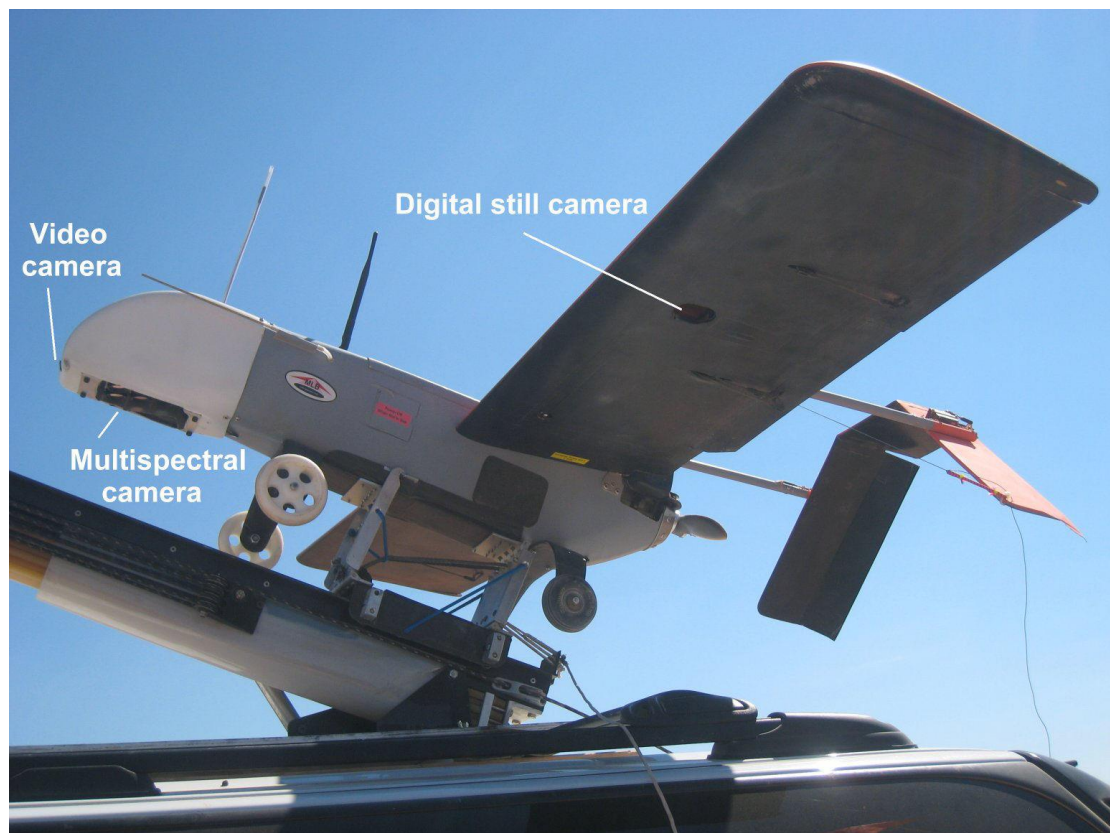


Рисунок 4.7 - Розташування декількох оптичних реєструвальних пристроїв на спеціалізованому БАК [37]

Схема аеромобільного дослідження, наведена на рис. 4.7 дозволяє побудувати універсальний безпілотний авіаційний комплекс для виконання оптичних методів дистанційних вишукувань покладів корисних копалин, оскільки є можливість встановлення декількох камер на одну платформу. При виконанні польотного завдання ДПЛА виконує політ на постійній заданій висоті, що дозволяє виконувати термографічне сканування підстилаючої поверхні без необхідності компенсації кутової складової систематичної похибки вимірювань. Необхідні навігаційні дані щодо орієнтації та положення камери отримують з навігаційного модуля автопілота.

Реалізація оптичних методів дистанційних досліджень при виконання геологорозвідувальних робіт можливо також і для ДПЛА вертикального зльоту та посадки VTOL мультикоптерного типу. На сьогодні розроблені і є у продажу стандартизовані конструкції корисного навантаження для різних типів камер відео- та інших оптичних діапазонів. Обрану стандартну конструкцію приєднують до рами ДПЛА і встановлюють потрібну камеру (або декілька камер). Потім виконують її орієнтацію під потрібним для конкретного завдання кутом. Також при побудові корисного навантаження комплексів для оптичних досліджень потрібно забезпечити процес тематичного дешифрування отримуваної оптичної інформації. Реалізація цього завдання можлива двома шляхами: перший шлях - це встановлення на борту модуля опрацювання і зберігання інформації, із наступним її перезаписом після завершення місії; другий шлях - реалізація радіоканалу зв'язку із наземною станцією для трансляції необроблених даних корисного навантаження (так звані Raw Data) з їх наступним опрацюванням за допомогою більш потужнішої наземної обчислювальної апаратури.

4.6 Організація польотного завдання безпілотних авіаційних комплексів дистанційного зондування покладів корисних копалин

Особливого значення при виконанні дистанційних досліджень покладів корисних копалин, особливо за допомогою магнітометричних вимірювань набуває організація польотного завдання.

Внаслідок необхідності реалізації техніки “повітряного сканування” рельєфу досліджуваної ділянки земної поверхні на дуже низькій висоті потребує дуже ретельного дотримання вимог польоту “по точках” практично в трьохмірній системі координат. Дистанційній пілот, навіть досвідчений, не зможе виконати таку складну траєкторію польоту. При цьому додатковим фактором, що ускладнює завдання є те, що потрібно буде враховувати не тільки ГІС модель земного рельєфу, но і додаткову геоінформацію, пов'язану, наприклад з попередніми результатами магніторозвідки, яку виконали за допомогою пілотованого літального апарату або за наземною магнітометрією. Тому реалізація багатоточкової траєкторії польоту БАК можливо лише за умови використання режиму автопілотування.

Зрозуміло, що зазвичай використовувані в таких випадках дані Google Мар або інших популярних ГІС-платформ не матимуть всіх даних. Таким чином потрібно спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє одночасно враховувати дані оцифрованих мап досліджуваних ділянок земної поверхні, які надають ГІС системи і інших джерел геопросторових даних. Таке програмне забезпечення здатне генерувати польотну місію і конвертацію її кодів в форматах найбільш популярних автопілотів БПЛА.

Розроблено програмний модуль SibGIS Flight Planner, який формує польотну місію у вигляді масиву точок “довгота-широта-висота”, який знаходиться над цифровою мапою ділянки земної поверхні. Цифрову модель рельєфу створюють попередньо за допомогою даних супутникових систем, наприклад Intermap Nextmap [38]. Програмне забезпечення SibGIS Flight Planner має графічний інтерфейс користувача (рис.4.8).

Дана розробка дозволяє обрати напрям досліджуваного профілю, виконати розбиття мережі пікетів із заданим кроком між профілями та пікетами; вилучення значень висот з цифрової моделі рельєфу, визначити конфігурацію польотної місії БПЛА. Виконання вказаних операцій доступно за допомогою дружнього графічного інтерфейсу, що дозволить використовувати таку програму нефахівцям з програмування систем, а наприклад дистанційним пілотам, які не дуже добре володіють навичками кодування за спеціальними командами, але чудово розуміють навігаційну та організаційне складову польоту та ГІС-інформацію. Ймовірно польотні завдання за допомогою SibGIS Flight Planner можливо створювати для різних типів безпілотних авіаційних платформ, оскільки програма створює польотне завдання у форматі вказаного автопілота. Потрібно лише орієнтуватися на допустимі значення швидкості польоту і мінімальне значення висот, які зможе відпрацювати конкретна авіаційна платформа - це потрібно буде визначити фахівцю з БАС. На нашу думку подібне розглянутому програмне забезпечення буде корисне не тільки для аеромагнітної розвідки покладів корисних копалин, но і при планування завдань оптичного дослідження місцевості, хоча такий вид дистанційного дослідження не потребує створення складної польотної траєкторії. Як було вказано с точки зору комплексного характеру дистанційних досліджень варто використовувати різні екземпляри дистанційно-пілотованих літальних апаратів, тому що принцип дій обраних вимірювальних пристроїв не дозволяє організувати одночасне вимірювання і оптичних і магнітних сигналів від досліджуваного рельєфу. Це виходить, перш за все, з різної конфігурації траєкторій польоту БАК. Також при плануванні польоту дистанційно-пілотованої платформи для дистанційного досліджування потрібно враховувати різні умови оточуючого середовища, які сприяють успішному виконанню кожної місії. Економію коштів на проведення дистанційних вишукувань можна отримати при застосуванні, наприклад конструкції ДПЛА мультироторного типу вертикального зльоту-посадки, оскільки їх собівартість зазвичай є меншою, ніж собівартість будь-якої конструкції ДПЛА горизонтального

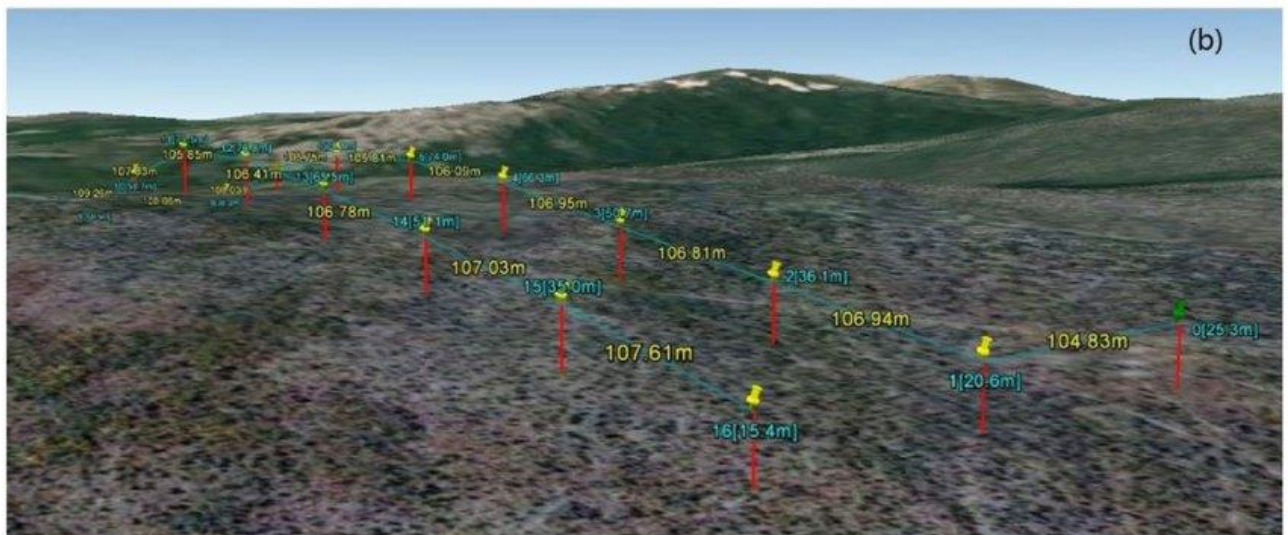
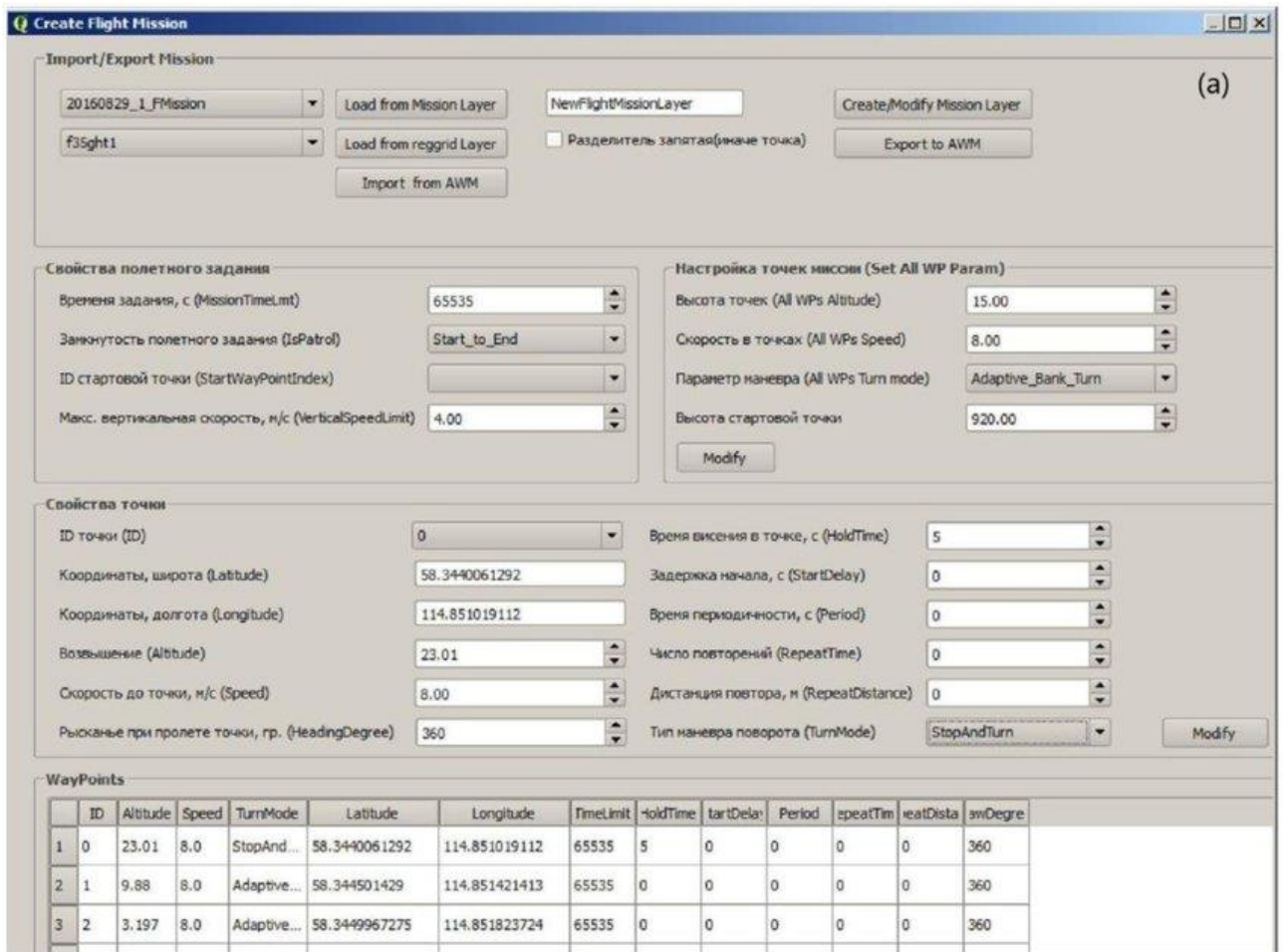


Рисунок 4.8 - Экранний інтерфейс програмного середовища SibGIS Flight Planner [39]

зльоту-посадки. До того ж слід враховувати складні умови рельєфу для організації зльотної смуги. При застосуванні ДПЛА мультироторного типу виникає потреба у періодичній заміні розрядженого блока акумуляторних батарей, що в ряді випадків значно збільшить час на виконання дослідження.

Тому порадою може бути виконати декілька варіантів економічного розрахунку затрат на виконання геологорозвідувальної місії для визначення оптимального співвідношення - собівартість дослідження - якість дослідження.

Висновки до розділу 4

Четвертий розділ присвячено вирішенню питань архітектури БАК для дистанційного дослідження покладів корисних копалин. Враховуючи різні методи дистанційних досліджень, які були обрані як базові в даній роботі, особливі вимоги які пред'являють до конструкції безпілотного літака, який буде задіяний для дистанційних магнітометричних досліджень. На основі даних досліджень, виконаних попередніми дослідженнями, з'ясовано діапазони магнітного шуму, який генерують різні компоненти авіоники БПЛА. Внаслідок цього, розташування вимірювальних пристроїв (магнітометрів) має бути на такій відстані від цих джерел, щоб рівень магнітного шуму від них цих точках не перевищував 2 нТл. Автори цього дослідження запропонували та сконструювали БПЛА типу “літаюче крило”, конструкція якого, на їх думку є оптимальною для виконання саме магнітометричних авіаційних вимірювань при виконанні геологорозвідувальних вишукувань.

Організація потрібної відстані для гарантованого шумопридушення можлива при реалізації дистанційної магніторозвідки при застосуванні ферозондового магнітометра при його встановленні на БПЛА вертикального зльоту-посадки мультикоптерного типу за рахунок схеми “підвішування” чутливого елемента магнітометра під рамою БПЛА, що дозволяє в режимі польоту чутливому елементу за допомогою гнучкого троса знаходитися на відстані декількох метрів знизу корпусу коптера.

Також надані рекомендації по плануванню місії дистанційних авіаційних досліджень та підготовки польотного завдання за допомогою спеціального програмного забезпечення.

ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

В дипломній роботі визначено предмет дистанційних досліджень, окремо висвітлено методи та засоби дистанційного зондування земної поверхні за допомогою авіаційних платформ. Виконано класифікацію методів дистанційних досліджень, які поділені на активні та пасивні, в залежності від необхідності генерування зондуючого сигналу. Пасивні методи визнано більш привабливими для виконання саме авіаційних досліджень на базі безпілотних авіаційних комплексів. Найбільш широкий клас методів дистанційних досліджень належить до оптичних методів які проводять за допомогою камер в широкому діапазоні оптичного спектру. Шляхом аналізу існуючих дистанційних оптичних платформ авіаційного базування з'ясовано, що попри їх достатню ефективність, вони погано пристосовані для їх інсталяції на дистанційно-пілотовані літальні апарати, внаслідок їх значних габаритів, ваги та споживаної потужності. Для виконання геологічних вишукувань покладів корисних копалин найбільш придатними є оптичні пристрої, які функціонують в межах інфрачервоної частини спектру, переважно в діапазоні теплової частини інфрачервоної смуги цього спектру.

Також методом, що набуває за останнє десятиріччя значного розвитку, є магнітометричний метод дистанційних досліджень аномалій магнітного поля Землі в місцях залягання ряду корисних копалин. Такий метод особливо набуває широкого застосування в дистанційних дослідженнях саме за допомогою побудови аеромагнітометричних безпілотних авіаційних комплексів, які дозволяє реалізувати прецизійні вимірювання.

На основі аналізу стану проблеми розроблено технічне завдання на виконання дипломної роботи.

Виконано детальний розгляд особливостей виконання термографічного сканування поверхні за допомогою інфрачервоних камер. Розглянуті спектрограми деяких мінералів, які були отримані попередніми дослідженнями за допомогою термографічного сканування ділянки рельєфу. Обґрунтовано вибір оптичного вимірювального засобу TIR-інфрачервоного діапазону, який за

масо-габаритними, експлуатаційними характеристиками може бути застосований в якості апаратури корисного навантаження безпілотного авіаційного комплексу для виконання дистанційних геологічних вишукувань. Це пристрій - TIR-камера OPTRIS Pi 450, яка має потрібний робочий діапазон довжини хвилі, є стійкою до значних вібраційних та ударних впливів, має розширений діапазон робочих температур, і невеликі габаритні розміри і вагу.

Також обґрунтовано магнітометричний вимірювальний пристрій для побудови аеромагнітометричного безпілотного комплексу. Потрібно зауважити, що різні за принципом дії магнітометри можуть бути застосовані для виконання дистанційних досліджень безпілотного авіаційного базування. Більш переважним на нашу думку є ферозондові магнітометри, серед яких обрано магнітометр FGM3D, який також має оптимальні точностні та масо-габаритні характеристики.

Серед безпілотних авіаційних платформ найбільш оптимальними, з точки зору тривалості виконання польотної місії, для виконання магнітометричних досліджень за допомогою магнітометрів різного класу є конструкції планерів типу “літаюче крило” із розмахом крил не менш 4 м, оскільки квантові магнітометри встановлюють на краях цих крил, і така відстань обумовлена мінімізацією впливу власних магнітних компонентів БПЛА. Для встановлення ферозондового магнітометра доцільніше використовувати БПЛА вертикального зльоту-посадки мультикоптерного типу, оскільки потрібно забезпечити вертикальне розташування чутливого елемента магнітометра під рамою БПЛА.

Крім того, на коптерний БПЛА можна, за допомогою нескладної конструкції штанги, встановити також і квантові магнітометри. Окремо підкреслено необхідність конструювання фюзеляжу БПЛА “літаюче крило” (або конструкцію рами коптера) максимально із застосуванням немагнітних матеріалів і використання авіоніки з мінімальним власним рівнем магнітного шуму — для досягнення мінімізації магнітної сигнатури літака.

Для виконання теплографічного сканування поверхні ділянки земної поверхні за допомогою авіаційних безпілотних платформ немає особливих

вимог до конструкції самої платформи. Обрану ТІР-камеру можна встановити як на БПЛА горизонтального зльоту-посадки, так і на мультикоптерному БПЛА.

При проведенні планування і організації місії БАК для виконання магнітометричних авіаційних досліджень рекомендованого застосовувати автоматичний режим пілотування на стадії режиму сканування ділянки, оскільки потрібно дотримуватися техніки “повітряного сканування” поверхні, що вкрай важко досягти за допомогою ручного пілотування. Побудову маршруту рекомендовано виконувати за допомогою спеціального програмного забезпечення на кшталт SibGIS Flight Planner, або подібних йому.

За результатами дослідження було підготовлено тези доповіді, які наведені в [17] та підготовлено матеріали публікації у закордонному періодичному виданні [12], які прийняти до друку.

Список використаних джерел

1. Воробьева А.А. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ [Электронный ресурс]. - СПб УИТМО. 2012 - 168 с. - Режим доступа <https://staff.tiiame.uz/storage/users/153/books/HZCp5NlcFRJJcCnPYyd0yjrg3LdkztNVggrvFHJt.pdf>
2. Ambrosia, V.G.; Wegener, S.; Zajkowski, and others. The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: From concept to reality (2006–2010) / Geocarto Int.- 26. - 2011. - pp. 85-101.
3. Hinkley, E.A.; Zajkowski, T. USDA Forest Service-NASA: Unmanned aerial systems demonstrations - pushing the leading edge in fire mapping / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.103-111.
4. Fladeland, M., Sumich, M., Lobitz, B. and others. The NASA SIERRA science demonstration programme and the role of small-medium unmanned aircraft for earth science investigations. / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.157-163.
5. Breckenridge, R.P.; Dakins, M.E. Evaluation of bare ground on rangelands using unmanned aerial vehicles./ GISci. Remote Sens. - 2011.- 48.- pp.74-85.
6. Laliberte, A.S.; Winters, C.; Rango, A. UAS remote sensing missions for rangeland applications. / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.141-156.
7. Laliberte, A.S.; Rango, A. Image processing and classification procedures for analysis of sub-decimeter imagery acquired with an unmanned aircraft over arid rangelands./ GISci. Remote Sens. - 48.- 2011. - pp.4-23.
8. Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H. and others. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform./ Earth Surf. Proc. Land. - 32. - 2007.- pp. 1705-1725.
9. Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest./ Int. J. Remote Sens. - 30. - 2009. - pp. 4915-4935.
10. Hervouet, A., Dunford, R., Piegay, H. and others. Analysis of post-flood recruitment patterns in braided channel rivers at multiple scales based on an

- image series collected by unmanned aerial vehicles, Ultralight aerial vehicles, and satellites/ *GISci. Remote Sens.* - 48.- 2011- pp. 50-73.
11. International Civil Aviation Organization. Doc.10019, Manual on Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). - 2015.
 12. Dodatchuk I.L., Larin V.J. Aspects of distanse sensing of passive type of mineral deposits on the unmanned aerial complex / *Acta Avionica-December.* - Volume XXIV, 45 – No. 2 - 2021 (in press).
 13. Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer [Електронний ресурс] / Jet Propulsion Laboratory, 2021. Режим доступу: <https://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris.overview.html> (доступ - 16 листопада, 2021)
 14. AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) [Електронний ресурс] / EASA Earth on-line, 2021. Режим доступу: <https://earth.esa.int/web/eoportal/airborne-sensors/content/-/article/aviris> (доступ - 17 листопада, 2021)
 15. Kruse, J. W., Boardman, A. B., Lefkoff A. B. and others. HYMAP : AN AUSTRALIAN HYPERSPECTRAL SENSOR SOLVING GLOBAL PROBLEMS – RESULTS FROM USA HYMAP DATA ACQUISITIONS / *Proceeding of the 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Adelaide, Australia, 21-25 August.* - 2000 - Causal Productions. - pp. 1-17.
 16. Cocks T., Jenssen R., Stewart A., Wilson I. and Shields T. THE HYMAP AIRBORNE HYPERSPECTRAL SENSOR: THE SYSTEM, CALIBRATION AND PERFORMANCE / *Proceeding of the 1 st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich, October 1998.* - Paris: European Association of Remote Sensing Laboratories.
 17. Ларін В. Ю., Додатчук І.Л. Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою безпілотного авіаційного комплексу / **СТАЛІЙ РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, НАВІГАЦІЇ, СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯНОГО РУХУ CNS/ATM:**

- тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції, 22-25 листоп. – К. : НАУ, 2021. – С.31-33.
18. Riley, D., Cudahy, T., Hewson, R., Jansing, D., Hackwell, J. SEBASS imaging for Copper Porphyry and Skarn Deposits, Yerington, NV / Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit. - 2007. - p. 1151-1157.
 19. Hackwell J.A., Warren D.W., Bongiovi R.P., and other. LWIRIMWIR Imaging Hyperspectral Sensor for Airborne and Ground-Based Remote Sensing / Proc. SPIE, Imaging Spectrometry II. - vol. 2819. - 1996 - pp.102-17
 20. R. Greg Vaughan, Wendy M. Calvin, James V. Taranik SEBASS hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping / Remote Sensing of Environment - 85 - 2003- pp.48–63.
 21. Никитский В.Е., Глебовский Ю.С. (ред.) Магниторазведка: Справочник геофизика - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1990. - 470 с.
 22. М.И. Эпов, И.Н. Злыгостев. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке [Электронный ресурс] / Интерэкспо ГеоСибирь- No3. - 2012. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-bespilotnyhletatelnyh-apparatov-v-aerogeofizicheskoy-razvedke> (Доступ 03.12.2021)
 23. Christensen, P. R., M. D., Piatek, J. L., Ruff, S. W., & Stefanov, W. L. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals. / Journal of Geophysical Research. - 2000. - 105(E4). - pp. 9735 – 9739.
 24. Johnson, B. R. In scene atmospheric compensation: Application to SEBASS data collected at the ARM site. Part I./ Aerospace Corporation technical report. - 1998- ATR-99 (8407).

25. Infrared camera optris PI 400i / PI 450i [Электронный ресурс] / OPTRIS Infrared Measurements. - 2021 - Режим доступа: <https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-400i-pi-450i> - (доступ 03.12.2021).
26. Великанов Д.А. Высокочувствительные методы исследования магнитных свойств кристаллических и плёночных магнитных систем / Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. - Красноярск. - 2017. - 436с.
27. GEM GSM-19 Cost Effective and High Precision Overhauser Magnetometer [Электронный ресурс] / GEM Systems - Режим доступа: <https://www.gemsys.ca/rugged-overhauser-magnetometer/> - (доступ 09.12.2021).
28. Samson, C., Straznicky, P., Laliberte, J., and others. Designing and building an unmanned aircraft system for aeromagnetic surveying / 80th Annual meeting of the Society of Exploration Geophysicists. - 29. - Denver, USA. - 2010. - pp. 1167-1171.
29. Samson, C., Cunningham, M., Wood, A. and others. Magnetic surveying using an unmanned system for geological mapping / Unmanned Systems Canada Conference. Montreal: 4-6 November. - 2014.
30. FGM3D [Электронный ресурс] /SENSYS : Magnetometers& Survey solutions . - Режим доступа: <https://sensysmagnetometer.com/products/fgm3d/> - (доступ - 10.12.2021).
31. Tezkan B., Stoll J.B., Bergers R., Großbach H. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys / First Break. - Vol 29. - No 4. -2011. - pp.103 – 105.
32. Cunningham M. Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems // A thesis of Master of Science Diss. - Carleton University, Canada, Ontario. - 2016. - 144 p.
33. Maley J.A. An investigation into low-cost manufacturing of carbon epoxy composites and a novel “mouldless” technique using the Vacuum Assisted Resin

- Transfer Moulding (VARTM) method / M.A.Sc. Thesis. - Carleton University. - 2008.- 126p.
34. Samson C., Straznicky P., Laliberte J. and others. Designing and building an unmanned aircraftsystem for aeromagnetic surveying / Proceedings of the SEG 80th Annual International Meeting Denver, Colorado. - SEG Expanded Abstracts, USA. - 2010. - pp. 1167–1171.
35. Sterligov B, Cherkasov S. Reducing Magnetic Noise of an Unmanned Aerial Vehicle for High-Quality Magnetic Surveys / International Journal of Geophysics Volume. - Hindawi Publishing Corporation. - 2016. - 7p. - [dx.doi.org/10.1155/2016/4098275](https://doi.org/10.1155/2016/4098275).
36. Злыгостев И.Н., Савлук А.В. Аерогеофизический комплекс для измерения вектора магнитного поля земли с высокой пространственной плотностью: тенденция развития, результаты разработок / Сборник научно-технической конференции “Научное приборостроение: современное состояние и перспективы развития”, Москва, 15-16 ноября. - 2016. - с.71-74
37. Laliberte A.S., Goforth M.A, Steele C.M., Rango A. Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments / Remote Sensing - 2011 - 3(11)- pp.2529-2551. <https://doi.org/10.3390/rs3112529>
38. Parshin A. V., Morozov V. A., Blinov A. V., and others. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey / Geo-spatial Information Science. - Wuhan University: Taylor & Francis Group. - 2018. - DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508