

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДИСТАНЦІЙНЕ ЛАЗЕРНЕ ЗОНДУВАННЯ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи ФТОІм-23-1
Донцов Д.Є.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Донцову Денису Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дистанційне лазерне зондування

затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Загальні відомості про лазери; інформація стосовно технологій визначення відстані до цілі; відомості про техніки спектроскопії та гіперспектральної візуалізації; графіки спектрів комбінаційного розсіювання; оптичні схеми дистанційного лазерного зондування.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Розглянути базову інформацію стосовно технологій дистанційного лазерного зондування.

2 Розглянути конструкцію систем далекомірів, спектроскопії та гіперспектральної візуалізації.

3 Провести огляд сфер застосування систем дистанційного лазерного зондування.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 14 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел стосовно спектроскопії	02.09.24–30.09.24	Виконано
2	Дослідження фізичних явищ, які використовуються в абсорбційній спектроскопії	01.10.23–14.10.23	Виконано
3	Огляд спектральних властивостей розповсюджених парникових газів та методів абсорбційної спектроскопії для їх детектування	16.10.23–30.11.23	Виконано
4	Проведення розрахунків оптичної потужності та амплітуд гармонік	05.12.23–15.12.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	17.12.23–03.01.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	04.01.24–16.01.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	18.01.24–19.01.24	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.01.24–21.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.25–29.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Курський Ю.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 67 с., 27 рис., 3 табл., 1 додаток, 12 джерел.

ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, ДАЛЕКОМЕТРІЯ, ЛАЗЕРНЕ ЗОНДУВАННЯ, МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ, СПЕКТРОСКОПІЯ.

Об'єкт дослідження – системи дистанційного лазерного зондування.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження фізичних основ, будови та сфер застосування систем дистанційного лазерного зондування, а саме далекометрії, спектроскопії та гіперспектральної візуалізації.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Провести теоретичний огляд засад лазерного дистанційного зондування;
2. Дослідити конструкцію систем для лазерного дистанційного зондування.
3. Розглянути області прикладного застосування систем лазерного дистанційного зондування.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 67 pp., 27 figures, 3 tables, 1 appendice, 12 sources.

ENVIRONMENTAL MONITORING, HYPERSPECTRAL IMAGING,
LASER SENSING, RANGEFINDING, SPECTROSCOPY.

The object of research is remote laser sensing systems.

The research method is theoretical.

The purpose of the qualification work is to study the physical foundations, structure and applications of remote laser sensing systems, namely, rangefinding, spectroscopy and hyperspectral imaging.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. Conduct a theoretical review of the principles of laser remote sensing;
2. Study the design of systems for laser remote sensing
3. Consider the areas of application of laser remote sensing systems.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Системи далекометрії	9
1.1 Рівняння далекометрії.....	9
1.2 Загальна схема імпульсного лідару	11
1.2.1 Випромінювач	12
1.2.2 Сканер.....	15
1.2.3 Приймач світлового потоку	16
1.3 Класифікація лідарних систем	22
2 Лазерна спектроскопія.....	27
2.1 Переваги використання лазерів в спектроскопії.....	28
2.2 Різновиди лазерної спектроскопії.....	30
2.2.1 Методи спектроскопії для вивчення стаціонарних взаємодій	30
2.2.2 Методи спектроскопії для динамічного аналізу	32
2.2.3 Лазерна Раманівська спектроскопія.....	34
2.3 Теоретичне підґрунтя Раманівської спектроскопії.....	36
2.4 Застосування лазерної Раманівської спектроскопії.....	43
2.4.1 Аналіз земних ресурсів.....	43
2.4.2 Детектування небезпечних речовин.....	46
3 Лазерна гіперспектральна візуалізація	50
3.1 Взаємозв'язок між спектроскопією, візуалізацією та гіперспектральною візуалізацією	50
3.2 Принцип роботи систем гіперспектральної візуалізації	51
3.3 Конфігурація системи гіперспектральної візуалізації.....	53
3.3.1 Режими зйомки.....	53
3.3.2 Конструкція системи гіперспектральної візуалізації	55
3.4 Застосування систем лазерної гіперспектральної візуалізації для дистанційного зондування	58
3.4.1 Аналіз динаміки ландшафту	58
3.4.2 Виявлення та ідентифікація пластику в морі	60
Висновки	64
Перелік джерел посилання	66
Додаток А Демонстраційний матеріал	68

ВСТУП

Технологія дистанційного зондування лазерного, яка з'явилася в 1960-х роках, являє собою значний прогрес у сфері безконтактного виявлення об'єктів і явищ. Ця технологія використовує як пасивні, так і активні методи для уловлювання електромагнітних хвиль, які відбиваються, розсіюються або випромінюються віддаленими цілями. Аналізуючи електромагнітні сигнали, дистанційне зондування може виявляти та ідентифікувати об'єкти без необхідності фізичного контакту. Ця особливість робить її безцінною у широкому спектрі застосувань, включаючи моніторинг атмосфери, океанографічні дослідження, управління природними ресурсами, сільське і лісове господарство та військові операції.

Розвиток технології дистанційного зондування тісно пов'язаний з суспільним розвитком, забезпечуючи критично важливі інструменти для управління навколишнім середовищем, моніторингу катастроф і оборони.

Технології дистанційного лазерного зондування, такі як дальнометрія, спектроскопія і гіперспектральна візуалізація, є життєво важливими для точного, безконтактного збору даних у різних сферах. Здатність лідарних систем вимірювати відстані з високою точністю робить його незамінним у таких сферах, як моніторинг довкілля, ліквідація наслідків стихійних лих і планування інфраструктури.

Спектроскопія є ключовою технологією для дистанційного аналізу хімічного складу і спектральних властивостей матеріалів. Вона дозволяє ідентифікувати специфічні речовини за їх унікальними спектральними характеристиками, забезпечуючи високу точність і чутливість. Цей метод широко застосовується для моніторингу стану довкілля, контролю якості матеріалів і виявлення забруднюючих речовин у різних середовищах.

Гіперспектральна візуалізація представляє собою комплексну технологію, що об'єднує можливості дальнометрії, тривимірного сканування та спектроскопії. Завдяки збору даних у широкому діапазоні довжин хвиль, ця

технологія дозволяє не лише аналізувати спектральні властивості матеріалів, але й створювати просторово-спектральні моделі досліджуваних об'єктів. Гіперспектральна візуалізація особливо ефективна у таких галузях, як сільське господарство, де вона використовується для оцінки стану рослинності, і розвідка корисних копалин, де її можливості дозволяють визначати мінеральний склад з високою деталізацією.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження фізико-математичних засад лазерного дистанційного зондування, його різновидів, сфер застосування та перспектив розвитку.

1 СИСТЕМИ ДАЛЕКОМЕТРІЇ

Лазерні далекоміри або лідари представляють собою оптичні системи для вимірювання дистанції за допомогою штучного джерела світла, яке походить від лазера, що випромінює в оптичному спектрі від 0,25 мкм до 11 мкм.

У даному розділі розглядаються гібридні системи, що поєднують у собі технології лазерної далекометрії та спектроскопії з системами машинного зору. Такі системи здатні не лише точно визначати просторове розташування об'єктів, але й аналізувати їх спектральні характеристики для ідентифікації матеріалів. Це дозволяє адаптувати системи під різні завдання та умови роботи.

1.1 Рівняння далекометрії

Рівняння далекометрії – це фундаментальне рівняння в галузі лазерного дистанційного зондування, яке пов'язує кількість отриманих фотонів (або потужність світла) з кількістю переданих лазерних фотонів (або потужністю лазера), проходженням світла в атмосфері або середовищі, фізичною взаємодією між світлом і об'єктами, ймовірністю отримання фотонів, ефективністю і геометрією лідарної системи тощо [1].

Рівняння далекоміру базується на фізичній картині лідарного дистанційного зондування і виводиться за двох припущень: незалежного та однократного розсіювання.

Незалежне розсіювання означає, що частинки розділені адекватно і рухаються випадковим чином, так що внесок у загальну розсіяну енергію багатьох частинок не має фазової залежності. Таким чином, повна інтенсивність є просто сумою інтенсивностей, розсіяних від кожної частинки.

Принцип роботи системи лідар показано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Принцип роботи системи лідар

Однократне розсіювання означає, що фотон розсіюється лише один раз. Багаторазове розсіювання в нашому розгляді виключається.

Фундаментальне рівняння лідару представлено нижче і може видозмінюватися в залежності від конструкції та призначення скануючої системи:

$$N_S(\lambda, R) = N_L(\lambda) \cdot [\beta(\lambda, \lambda_L, \theta, R) \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot [T(\lambda_L, R) T(\lambda, R)] \times [\eta(\lambda, \lambda_L) G(R)] + N_B, \quad (1.1)$$

де $N_S(\lambda, R)$ – кількість сигнальних фотонів, отриманих на довжині хвилі λ і відстані R ;

$N_L(\lambda_L)$ – кількість фотонів, випромінюваних лазером на довжині хвилі лазера λ_L ;

θ – кут розсіювання;

$\beta(\lambda, \lambda_L, \theta, R)$ – об'ємний коефіцієнт зворотного розсіювання, який описує кількість світла, що розсіюється назад до детектора від одиниці об'єму на відстані R ;

ΔR – роздільна здатність, що представляє товщину зрізу атмосфери або об'єкта, що сканується;

A – ефективна площа апертури приймача;

$T(\lambda_L, R) \cdot T(\lambda, R)$ – коефіцієнт передачі в атмосфері для випущеного та прийнятого випромінювання;

$\eta(\lambda, \lambda_L)$ – загальна ефективність системи, яка включає в себе ефективність детектора та оптичної системи;

$G(R)$ – коефіцієнт підсилення приймача, що залежить від відстані;

N_B – фоновий шум.

1.2 Загальна схема імпульсного лідару

За принципом роботи лідари поділяються на імпульсні, фазові та імпульсно-фазові системи [2]. Далі будуть розглядатися тільки імпульсні системи, оскільки вони забезпечують найбільшу дальність сканування об'єктів.

Елементи, що складають оптико-електронну архітектуру лідару, показані на рисунку 1.2 разом зі схемою відповідного функціонального ланцюга. Імпульс випромінюється лазерним джерелом для кожного вимірювання. Після того, як лазерний промінь сформований (розширений і колімований), він проходить через скануючу оптику і рухається в просторі до цільового середовища розсіювання. Після взаємодії з мішенню відлуння цього імпульсу розсіюється назад до лідару. Оптичний потік збирається оптичною системою візуалізації, часто великих розмірів, наприклад, телескопом. Паразитний потік відокремлюється від сигналу за допомогою просторової фільтрації у фокальній площині зображення, а також спектральної фільтрації. Перша обмежує поле зору простором, який пройшов лазерний імпульс, тоді як друга використовується для зменшення спектральної смуги пропускання оптичної системи навколо випромінюваної довжини хвилі. Зауважте, що селекція довжини хвилі вимагає, щоб промінь був колімований перед оптичним елементом спектральної фільтрації. В кінці оптичного ланцюга фотоприймач

перетворює виявлений потік фотонів в електричний сигнал, який, в свою чергу, оцифровується перед його записом і обробкою.

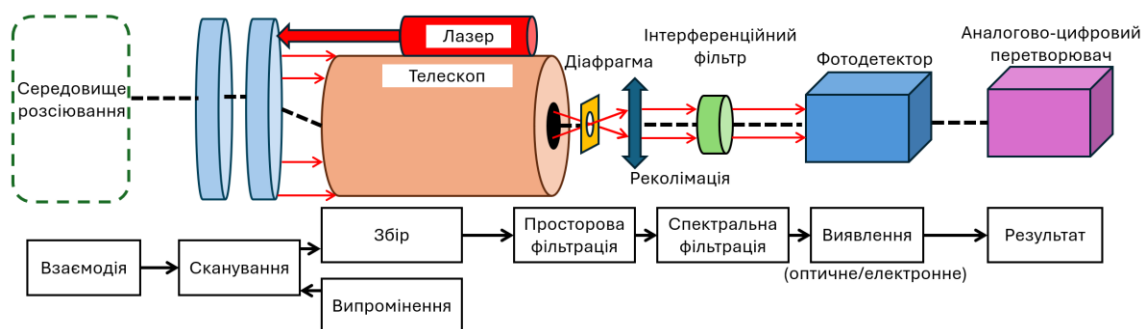


Рисунок 1.2 – Традиційна архітектура (вгорі) та функціональна схема (внизу) лідару прямого виявлення

1.2.1 Випромінювач

Передача відбувається від імпульсного лазерного джерела, що випромінює в ближньому інфрачервоному (ІЧ, довжина хвилі від 780 нм до 3000 нм), видимому (від 390 нм до 780 нм) або ближньому ультрафіолетовому діапазоні (УФ, від 200 нм до 390 нм). Широке розмаїття лазерних джерел побудовано на підсилювальних середовищах, якими можуть бути газові елементи, кристали, діоди або волокна. У випадку космічних або повітряних лідарів для лісового господарства, вибір довжини випромінюваної хвилі обумовлений пропусканням атмосфери і віддзеркаленням рослинності. Необхідно також враховувати інші вимоги щодо компактності, стабільності та випромінюваної енергії, особливо у випадку тривалості імпульсів порядку декількох наносекунд (необхідних у випадку вертикальної роздільної здатності нижче 1 м), а також високої частоти повторення. Ці різноманітні обмеження обмежують вибір до низки основних джерел, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Приклади лазерів, що можуть бути застосовані в системах лідар

Технологія	Довжина хвилі, нм	Потужність, мкДж	Частота	Тривалість імпульса, нс
Імпульсний лазерний діод	404– 550	< 10	1–10 КГц	30–200
Er волоконний лазер	1550	< 400	10–100 КГц	5–100
Yb волоконний лазер	1064	< 200	10–100 КГц	5–100
Твердотільний лазер з діодним накачуванням	1064, 532, 355	< 60, 30, 10	< 100 Гц	5–10

Лазерні діоди, найбільш надійні і компактні джерела лазерного випромінювання, можна знайти в імпульсному режимі в ближньому ІЧ-діапазоні. Найпоширеніша і найсприятливіша довжина хвилі з точки зору енергії – 905 нм, хоча можуть використовуватися і інші довжини хвилі, в залежності від сфери використання. Ці діоди стали характерною особливістю лазерних далекомірів і лідарів для контролю швидкості. Однак їхня енергія залишається обмеженою (кілька мікроджоулів), що обмежує дальність дії системи до кількох сотень метрів. Також у ближньому ІЧ-діапазоні волоконні лазери на 1064 нм (ітербій) і 1550 нм (ербій) є досить компактними і випромінюють імпульси енергії в кілька сотень мікроджоулів.

Випромінювання з перемиканням добротності і квазібезперервне накачування кристалів Nd:YAG дозволяють отримувати потужні і короткі імпульси, що найкраще підходять для прямого виявлення на великих відстанях. Основна частота випромінювання відповідає довжині хвилі 1064 нм. Її можна подвоїти або потроїти, щоб досягти довжини хвилі 532 нм або 355 нм, за ціною поділу енергії, що передається. Ці системи також мають більші розміри і не можуть обійтися без активного охолодження. Твердотільні лазери з діодним накачуванням більш компактні і надійні, але менш потужні, ніж лазери з накачуванням від спалаху лампи. Тим не менш, вони забезпечують енергію імпульсу, якої цілком достатньо для дослідження лісового пологую [3].

На виході лазера промінь, як правило, трохи відхиляється, а його діаметр збільшується, щоб відповідати критеріям, що стосуються безпеки для очей. Якщо лазерний промінь не є безпечним для очей при випромінюванні, метою є зменшення номінальної небезпечної для очей відстані нижче висоти польоту або значень, передбачених авіаційними специфікаціями (кілька сотень метрів). Розбіжність променя також регулюється в залежності від обраного методу вимірювання: невелика зона дії (приблизно сантиметрова) у випадку дискретного ехолокатора або скануючого лідару, або велика зона дії у випадку системи з повною формою хвилі. Афокальна оптична система здійснює формування променя [3]. Вона складається з двох лінз або дзеркал зі зведеними фокусними точками і результируючим збільшенням, що перевищує 1, і представлена на рисунку 1.3.

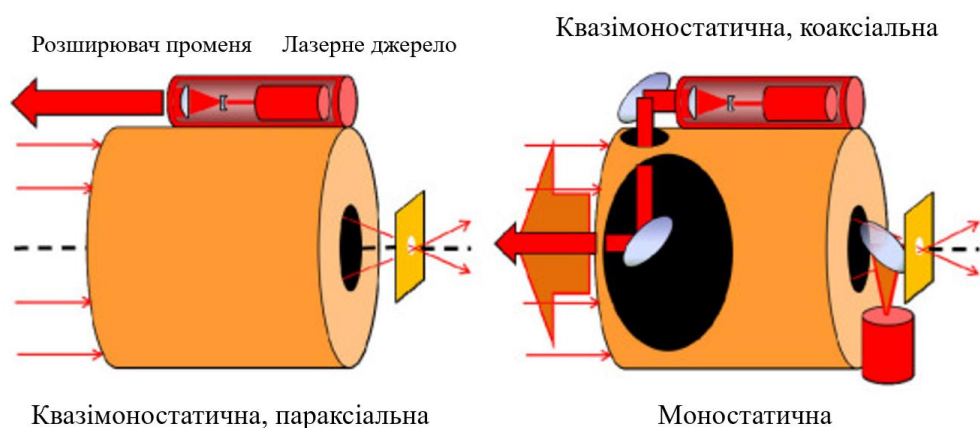


Рисунок 1.3 – Можливі конфігурації випромінювача

Конфігурація лідару визначається розташуванням випромінювального та приймального трактів. Якщо два компоненти оптико-електронної системи мають одну оптичну вісь, така система називається моностаціона, тоді як якщо осі різні і просторово розділені, вона називається бістаціона. У даному випадку близькість між випромінювачем і приймачем призводить до того, що сенсор лідару називається квазімоностаціона системою, що є проміжним випадком. Системи, що застосовуються на поверхні, можуть мати так звану параксіальну конфігурацію, показану праворуч. Проте, щоб забезпечити

перекриття випромінювання і прийому на більшій відстані, можна віддати перевагу коаксіальній або повністю моностатичній конфігурації, як показано на малюнку зліва. Остання конфігурація також полегшує проходження випромінювального і приймального трактів через одну і ту ж скануючу оптику.

1.2.2 Сканер

Для реалізації скануючої системи, здатної швидко сканувати великі поверхні, використовуються різні мобільні оптичні елементи. Чотири таких рішення проілюстровані на рисунку 1.4 разом з відповідними схемами сканування [3]. Послідовне розташування лазерних слідів на цих траєкторіях обумовлене частотою повторення імпульсів. З цих діаграм можна зробити висновок, що рівномірно розподілена вибірка не може бути досягнута за допомогою базової обертової оптики. Іншим серйозним обмеженням, пов'язаним із реалізацією скануючої системи, є те, що остання повинна забезпечувати як випромінювальний, так і приймальний тракти, з мінімальним рівнем перехресних перешкод. Однак найшвидші системи, здатні забезпечити рівномірне сканування, мають малі зіниці. Це призводить до зменшення розмірів датчика і, відповідно, обмежує рівень отримуваної потужності.

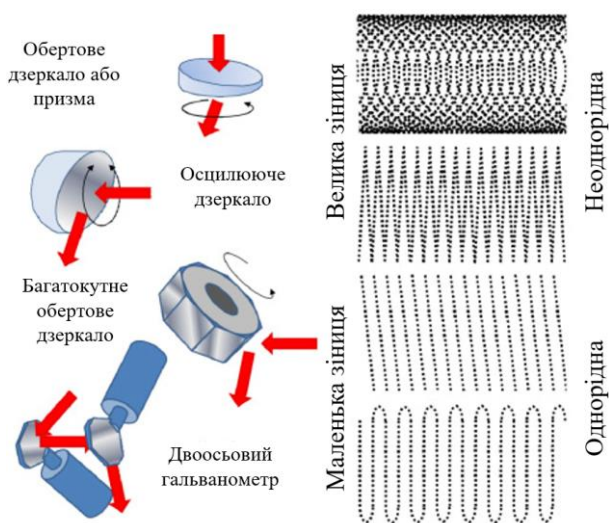


Рисунок 1.4 – Пристрої сканування та відповідні шаблони з рухомого носія

1.2.3 Приймач світлового потоку

Для того, щоб зібрати потік розсіяного назад світла, для створення зображення сцени використовується оптична система. Її поле зору обмежується польовою діафрагмою, розташованою у фокальній площині зображення. Залежно від застосування використовуються різні приймальні оптичні системи. Слід зазначити, що роздільна здатність зображень, як правило, є низькою у випадку пристрою, що збирає світловий потік, такого як лідар. Відповідні обмеження щодо оптичної якості є слабкими, за винятком випадку космічної системи; навпаки, вимоги до компактності і стабільності залишаються високими у випадку бортового приладу [3].

На рисунку 1.5 наведено різновиди оптичних систем збору:

– катоптричні та катадіоптричні системи містять дзеркала і частіше називаються рефлекторними телескопами. Це системи великого діаметру, які не страждають від хроматичної аберації, що знижує роздільну здатність, коли спостереження проводяться в широкому спектрі. Частина зіниці закрита вторинним дзеркалом, за винятком позаосьових або волоконно-оптичних систем. Ця перешкода призводить до втрати пропускну здатності, але полегшує коаксіальне випромінювання (з-за вторинного дзеркала). Щоб забезпечити хорошу оптичну якість, апертура (співвідношення між діаметром D і фокусною відстанню f телескопа) і поле зору найпростіших готових телескопів (конструкція Ньютона) є низькими ($D = f/10$ і поле зору близько 1°). Це означає велику фокусну відстань, небажану у випадку короткофокусної системи, і значні габаритні розміри. Тим не менш, обмеження, що накладаються на якість зображення, значною мірою послаблюються на рівні лідару, особливо якщо використовуються більш розвинені системи, такі як варіації конструкції телескопа Кассегрена;

– діоптрійні системи (рефракційні телескопи або рефрактори), що складаються виключно з лінз, рідко можуть мати такий самий діаметр, як і рефлекторні телескопи, без додаткових витрат або неприйнятної ваги і

габаритів. У випадку монохроматичних лідарів і розумних значень діаметру, ці системи все ще можуть забезпечити покращену компактність і пропускну здатність. Ще однією важливою перевагою є їхня висока стійкість до вібрацій.

Після того, як світловий потік зібрано, він може бути інжектований в оптичне волокно, розміщене у фокусній точці системи прийому, щоб відокремити виявлення від оптичної головки. Це також дозволяє обмежити перешкоди телескопа, розмістивши волокно у фокусі головного дзеркала, або об'єднати потік з декількох телескопів, що призводить до зниження витрат у порівнянні з одним великим телескопом. Оптичне волокно складається з серцевини і оболонки з діоксиду кремнію з дещо різними показниками заломлення, що дозволяє збірці спрямовувати світло. Його діаметр обмежений кількома сотнями мікрон, щоб зберегти гнучкість. При використанні вона стає польовою діафрагмою приймальної системи і значно зменшує поле зору скануючої системи. Поле зору можна розширити за допомогою пучка волокон і польової лінзи, але це призводить до втрат, які можуть становити до 60 % падаючого світла.

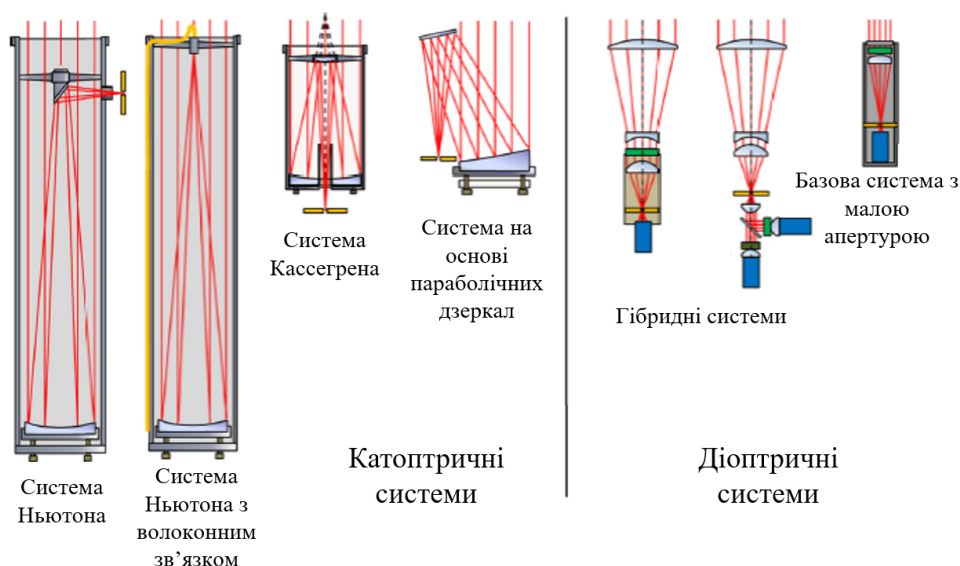


Рисунок 1.5 – Приймальні оптичні системи (жовтий: польова діафрагма; зелений: спектральний фільтр; синій: детектор)

У випадку якісної оптичної системи, добре відрегульованої за фокусною відстанню, єдиними розмірними параметрами приймача є його поле зору і його ефективна площа A_{ef} , яка пов'язана з його дійсною площею A і виражається як:

$$A_{ef} = \underbrace{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2}_{A} \cdot (1 - O) \cdot T_{\text{прийм}}(\lambda), \quad (1.2)$$

де D – діаметр зіниці оптичної системи;

O – коефіцієнт перешкод;

$T_{\text{прийм}}(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання приймача для довжини хвилі лазера λ .

Через високу яскравість денного середовища від ближнього ультрафіолету до ближнього інфрачервоного діапазону, необхідно фільтрувати вхідний світловий потік як у просторовому, так і в спектральному відношенні. Цей процес проілюстровано на рисунку 1.6. У фокальній площині зображення польова діафрагма обмежує поле зору системи точно до простору, пройденого лазерним променем. Оптимальна польова діафрагма є прямокутною у випадку параксіальної конфігурації, як показано на рисунку 1.5.

Наслідком цього обмеження поля є існування мінімальної відстані вимірювання, знаючи, що:

– у випадку немоностатичних конфігурацій промінь може входити в поле тільки поступально;

– оскільки світлові промені, розсіяні в ближньому полі, фокусуються за фокальною площиною зображення, значна частина з них затуляється діафрагмою.

У площині зіниці (наприклад, на реколімованому промені після першого фокусування) розміщується фільтр з великою спектральною тонкістю і з центром на довжині випромінюваної хвилі, щоб значно зменшити смугу пропускання системи лідару. При ширині спектра випромінювання менше нанометра, за винятком лазерних діодів, можна використовувати

інтерференційний фільтр, що характеризується шириною від 0,5 нм до 10 нм. Такий оптичний компонент будується з використанням тонкоплівкових шаруватих структур типу Брегга і Фабрі-Перо, щоб гасити широкий спектр і пропускати вузьку лінію.

Такий фільтр призначений для ідеально колімованого променя, при нормальному падінні на фільтр. Якщо кут падіння θ не є нульовим, центральна довжина хвилі стає $\lambda_{цент,0}(\theta_i) = \lambda_{цент,0} \cos(\theta_i)$. Для прийнятого потоку на довжині хвилі лазера ефект полягає в тому, що фільтр має обмежений кут приймання з шириною $\Delta\theta_i = 2(\Delta\lambda/\lambda_{цент})^{1/2}$, якщо $\Delta\lambda$ представляє спектральну ширину фільтра. Таким чином, для фільтра шириною 1 нм цей кут пропускання становить лише $\pm 1,5^\circ$ в ближньому ІЧ-діапазоні (1064 нм) або 0,3 нм в УФ-діапазоні (355 нм). Крім того, це також встановлює мінімальну відстань вимірювання для лідару з великою глибиною різкості, враховуючи той факт, що зазначений допуск обмежує поле зору так само, як і польова діафрагма.

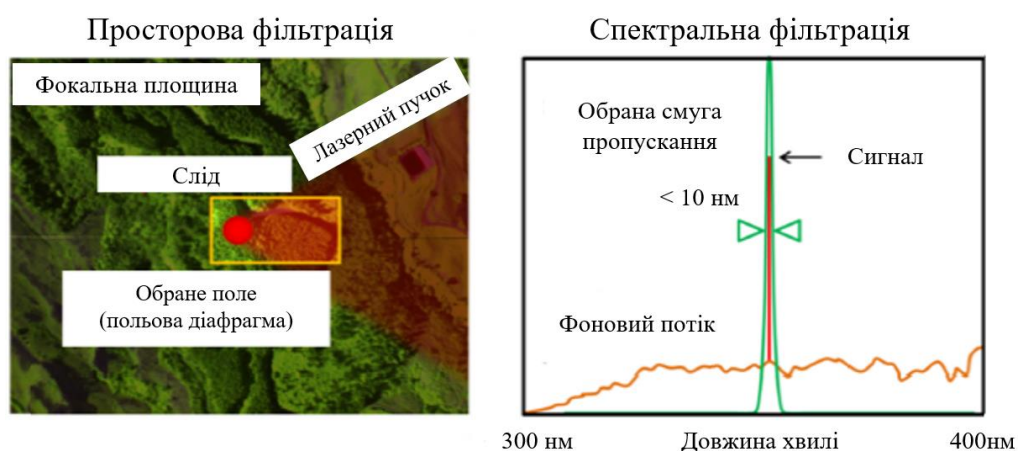


Рисунок 1.6 – Просторова та спектральна фільтрації вхідного потоку у фокальній та зіничній площині відповідно

Перетворення сигналу оптичного потоку у вимірювану електричну напругу виконує фотодетектор, який перетворює кожен фотон на фотоелектрон (з ймовірністю, що фіксується його квантовою ефективністю), що розряджається в резисторі навантаження. Швидкі і високочутливі детектори,

що використовуються в системі, будь то лавинні фотодіоди (ближній інфрачервоний діапазон) або фотопомножувачі (видимий і ультрафіолетовий діапазони), забезпечують велику кількість фотоелектронів (від 10 до 10 000) на кожен падаючий фотон за рахунок явища внутрішнього підсилення. Тим не менш, ці два типи детекторів мають дуже різні характеристики з точки зору чутливості, шуму або електричної ємності (остання обмежує часову роздільну здатність). Ці явища мають значний вплив на потужність отриманого сигналу, зокрема, як функція довжини хвилі, обраної для лідару. Конфігурації електронного детектування і спектральні діапазони різних детекторів показані на рисунку 1.7. У таблиці 1.2 наведено характеристики цих різних фотоприймачів з внутрішнім підсиленням і більш традиційних фотодіодів. Вони можуть використовуватися в аналоговому режимі та режимі підрахунку фотонів.

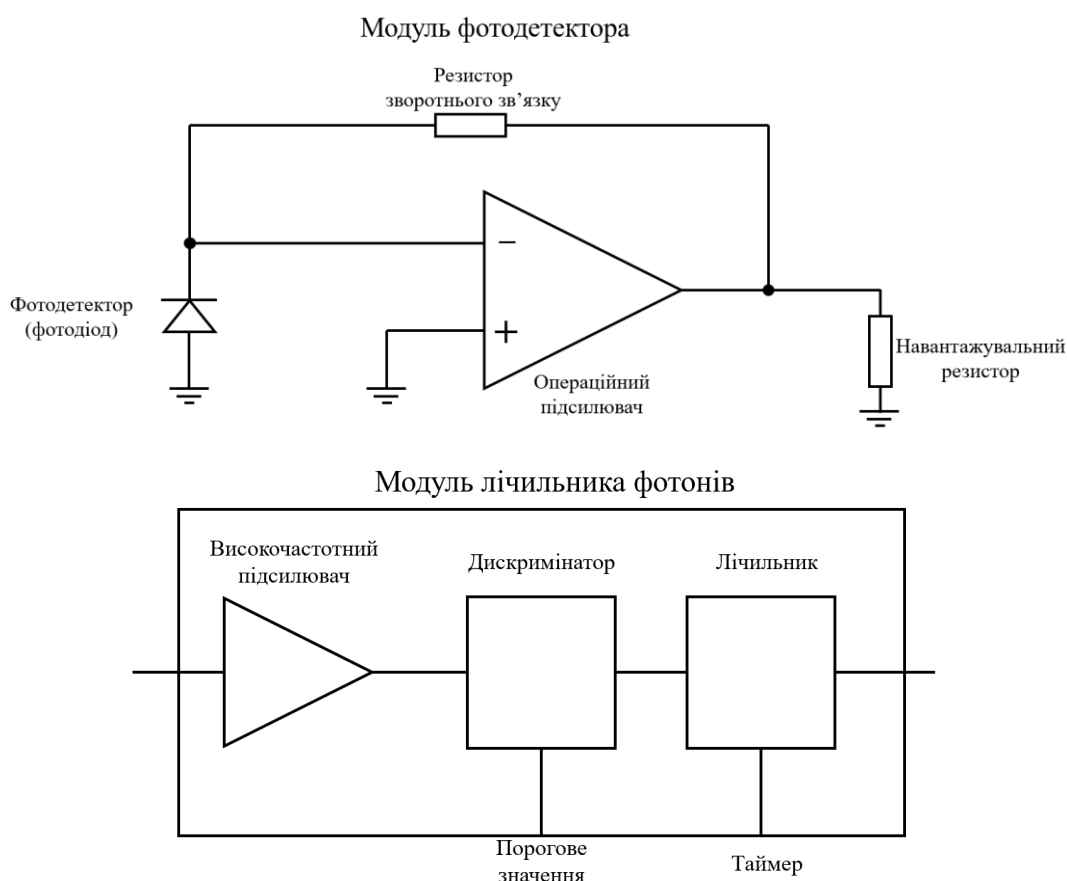


Рисунок 1.7 – Конфігурація фотодетектору та модуль оцифрування фотоструму, підсиленого імпедансом

Таблиця 1.2 – Типові характеристики фотодетекторів та порядок величини оптичних потоків, еквівалентних шуму виявлення та електронному шуму

Тип	Спектральний діапазон, мкм	Квантова ефективність	Чутливість, А/Вт	Ємність, пФ	Потужність датчика в шумовому еквіваленті, фВт/Гц ^{1/2}
Si фотодіод	0,2–1,1	60 %	0,1–0,8	6,0	10 ⁻⁷
InGaAs фотодіод	0,9–1,7	60–75 %	0,7–0,95	5,0	10 ⁻⁸
Фотопомножувач і	0,3–0,6	15–40 %	10 ⁴ –10 ⁵	1,0	10 ⁻¹³
Si лавинний фотодіод	0,5–1,0	60– 5 %	60	1,5	10 ⁻¹⁰
InGaAs лавинний фотодіод	1,0–1,6	80 %	10	1,5	10 ⁻⁹

Виявлення за допомогою лічильника фотонів полегшують детектори з високим внутрішнім коефіцієнтом підсилення і достатньою пропускну здатністю. Швидка електронна схема підраховує падаючі фотони як електричні імпульси, що перевищують заданий поріг, після підсилення; вона видає дискретний сигнал для кожного часового інтервалу, на який не впливають ні детектор, ні електронні шуми. Таким чином, лавинні фотодіоди в ближньому ІЧ-діапазоні досягають тих же рівнів продуктивності в режимі підрахунку фотонів, що і фотопомножувачі в УФ-діапазоні. Основним недоліком лічби фотонів є обмежена динаміка: вона стає насиченою, коли сигнал перевищує кілька фотонів на часовий затвор. Тому його важко реалізувати у випадку сильного фонового потоку, зумовленого сонячним опроміненням. Це насичення можна компенсувати, розділивши потік між кількома або секторованими детекторами – метод, який часто використовується космічними лідар.

1.3 Класифікація лідарних систем

Системи лідару можна класифікувати за (рис. 1.8):

- фізичним принципом, що використовується при скануванні;
- платформою, на яку монтується система;
- областю застосування;
- типом сигналу;
- за об'єктом, що досліджується.

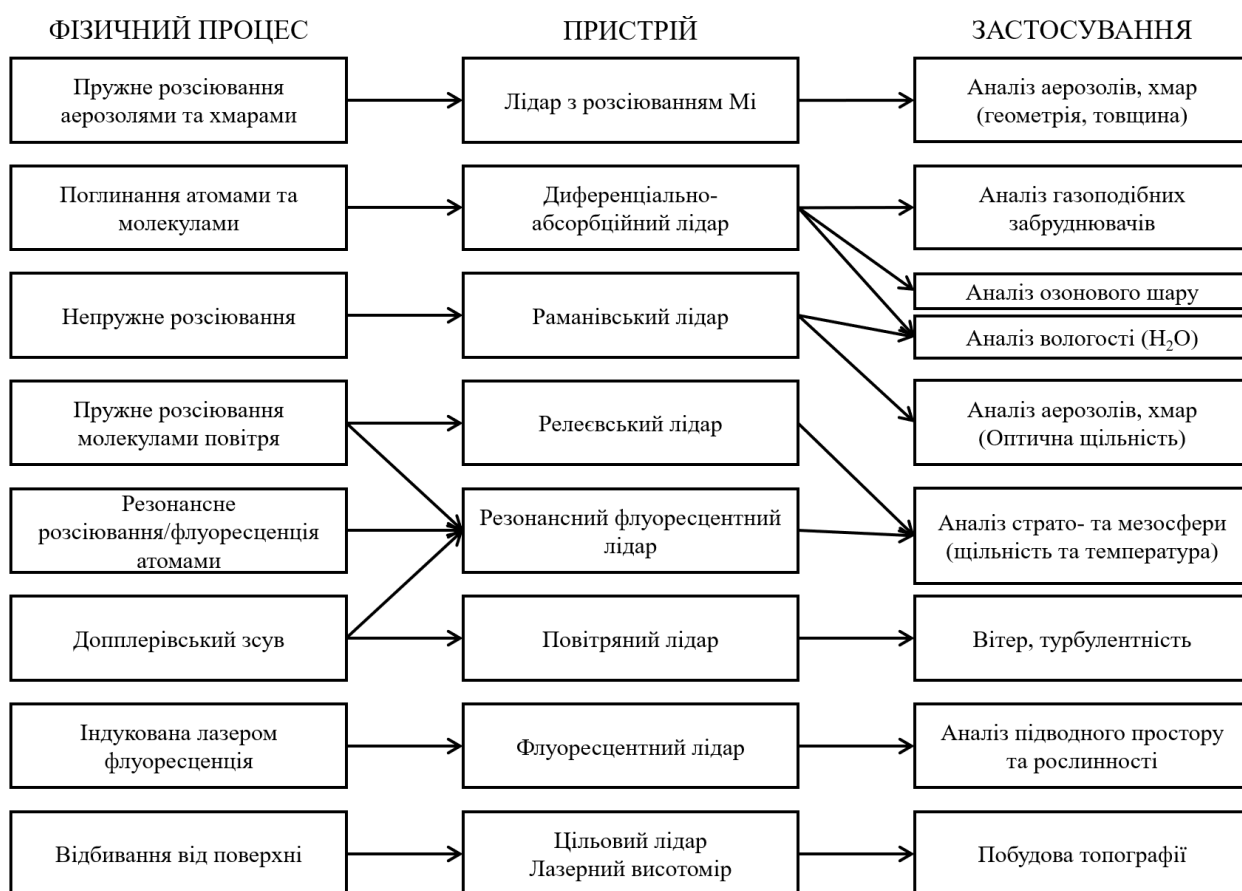


Рисунок 1.8 – Класифікація лідарних систем

Лідарні системи можна класифікувати на основі фізичних принципів, які вони використовують, і кожна з них підходить для різних досліджень навколишнього середовища і атмосфери:

– лідар з розсіюванням Мі: цей тип лідарів ґрунтується на розсіюванні Мі, коли частинки, такі як аерозолі та краплі хмар, відбивають лазерне світло назад до датчика. Лідар Мі відіграє важливу роль у вимірюванні атмосферних частинок, допомагаючи вченим контролювати рівень забруднення, оцінювати властивості хмар і вивчати просторовий розподіл аерозолів;

– релеєвський лідар: використовуючи релеєвське розсіювання, яке відбувається з молекулами повітря, лідарні системи Релея ефективні для профілювання атмосфери. Вони вимірюють температуру і густину в нижніх і середніх шарах атмосфери, де густина частинок досить низька, щоб домінувало молекулярне розсіювання;

– диференціально-абсорбційний лідар: дані системи вимірюють концентрацію газу, посилаючи два лазерні імпульси з дещо різною довжиною хвилі: один поглинається газом, що цікавить, а інший не впливає на нього. Ця різниця в поглинанні допомагає ідентифікувати і кількісно оцінити такі гази, як озон, вуглекислий газ і метан, що робить даний тип сканерів цінним для моніторингу забруднення і досліджень парникових газів;

– раманівський лідар: цей тип лідарів використовує непружне комбінаційне розсіювання, коли фотони втрачають енергію при взаємодії з молекулами. Раманівський лідар зазвичай використовується для вимірювання водяної пари та інших мікроелементів, які є життєво важливими для розуміння вологості та погодних умов;

– резонансний флуоресцентний лідар: збуджуючи атоми або молекули і реєструючи випромінювану флуоресценцію, резонансний флуоресцентний лідар дозволяє детально вивчати певні компоненти атмосфери. Він особливо корисний для вивчення металів у мезосфері, таких як натрій і калій, які розкривають склад і динаміку атмосфери;

– доплерівський лідар: доплерівський лідар вимірює зміну частоти зворотного розсіяного світла, спричинену рухомими частинками або повітряними масами. Цей зсув частоти дозволяє проводити точні вимірювання

швидкості та напрямку вітру, що є важливим для метеорологічних досліджень, оцінки турбулентності та вивчення клімату.

Лідарні системи можуть бути встановлені на різних платформах, кожна з яких підходить для унікальних оперативних завдань і зон покриття:

– космічний лідар: встановлений на супутниках або космічних станціях, космічний лідар забезпечує широке покриття поверхні Землі та атмосфери. Він ідеально підходить для глобальних досліджень клімату, картографування океану і суші та великомасштабного моніторингу атмосфери, оскільки може збирати узгоджені дані в часі у величезних регіонах;

– лідар повітряного базування: літакові лідари надають дані з високою роздільною здатністю над певними територіями, що робить їх безцінними для таких застосувань, як топографічне картографування, аналіз лісового покриву та боротьба зі стихійними лихами. Лідар може фіксувати деталі рельєфу і структуру рослинності з високою точністю;

– наземний лідар: зазвичай, використовується для локальних досліджень, наземні лідарні системи можуть бути стаціонарними або портативними. Вони часто використовуються в атмосферних обсерваторіях або в міському середовищі для моніторингу якості повітря, метеорологічних спостережень і картографування інфраструктури;

– корабельний і підводний лідар: корабельні лідарні системи, встановлені на криголамах або дослідницьких суднах, корисні для вивчення морського і прибережного середовища, наприклад, товщини льоду, якості води і берегової ерозії. Підводні лідари використовуються для картографування підводного рельєфу і можуть працювати на обмежених глибинах через поглинання світла у воді.

Аналіз за допомогою лідару може бути спрямований на конкретні регіони в системі Землі, забезпечуючи розуміння різних елементів навколишнього середовища:

– атмосферний лідар: переважно використовується для вимірювання атмосферних параметрів, таких як висота хмар, концентрація частинок і профілі

вологості. Цей тип лідарів допомагає у моделюванні клімату, відстеженні забруднення та метеорологічних дослідженнях, охоплюючи шари від тропосфери до стратосфери;

– гідросферний лідар: ця технологія, відома як батиметричний лідар, призначена для картографування підводної топографії та аналізу водних об'єктів. Гідросферний лідар застосовується для вивчення дна океану, прибережних регіонів і русел річок, допомагаючи у вирішенні таких завдань, як оцінка морського середовища проживання і моніторинг берегової ерозії;

– твердотільний лідар: використовується для високоточного картографування земної поверхні, лідар наземного базування, як правило, розгортається з повітряних або наземних платформ. Він необхідний для створення цифрових моделей рельєфу, моніторингу геологічних змін, вивчення зсувів і проведення археологічних досліджень.

Лідарні системи різняться залежно від типів сигналів, яким вони надають перевагу, що впливає на якість даних та їхню інтерпретацію:

– лідар для вимірювання дальності/профілювання: цей тип лідарів зосереджений на вимірюванні часової затримки між випромінюваним лазерним імпульсом і сигналом, що повертається. Даний тип систем використовується для вимірювання відстані, картографування, профілювання місцевості;

– лідар розсіювання: на додаток до даних про час польоту, лідар розсіювання підкреслює силу і спектральні характеристики зворотного розсіяного сигналу.

Залежно від конкретних параметрів навколишнього середовища або атмосфери, лідарні системи пристосовані для вимірювання певних елементів:

– аерозольний/хмарний лідар: вимірює атмосферні частинки, такі як пил, забруднювачі та властивості хмар. Допомагає оцінити якість повітря, вивчити структуру хмар і зрозуміти вплив аерозолів на клімат;

– складовий лідар: зосереджується на виявленні та кількісному визначенні газоподібних компонентів, таких як водяна пара, озон і парникові

гази. Лідар складових має вирішальне значення для моніторингу забруднення, дослідження клімату та атмосферної хімії;

температурний лідар: призначений для профілювання температури, ці лідарні системи допомагають вченим вивчати стабільність атмосфери, турбулентність і теплові градієнти, які є ключовими для прогнозування погоди і моделювання клімату;

– вітровий лідар: вимірює швидкість і напрямок вітру за допомогою аналізу доплерівського зсуву. Вітровий лідар підтримує метеорологічні дослідження, авіаційну безпеку та планування відновлюваної енергетики, надаючи уявлення про динаміку атмосфери;

– цільовий лідар: використовується для високоточного картографування поверхні, застосування цільового лідара включає моніторинг міської інфраструктури, аналіз рослинності та археологію. Він допомагає створювати 3D-моделі будівель, лісів та інших споруд з надзвичайною точністю.

2 ЛАЗЕРНА СПЕКТРОСКОПІЯ

Спектроскопія – це метод аналізу довжин хвиль випромінювання, що випускається або поглинається матеріалом, з метою визначення складу зразка. Він включає в себе виявлення типів присутніх атомів, їх відносну кількість, тип атомного або молекулярного зв'язку, а також стан іонізації, якщо такий є.

Основна відмінність лазерної спектроскопії від традиційних методів спектроскопії полягає в джерелі світла і пов'язаних з ним властивостях, які суттєво впливають на чутливість, роздільну здатність і діапазон застосування. «Традиційна» спектроскопія використовує некогерентні джерела світла широкого спектру, такі як лампи, які випромінюють в широкому діапазоні довжин хвиль з меншою інтенсивністю.

В свою чергу, лазерна спектроскопія використовує когерентне, монохроматичне і висококолімоване світло від лазерів з надзвичайно високою спектральною щільністю потужності (рис. 2.1) [4].

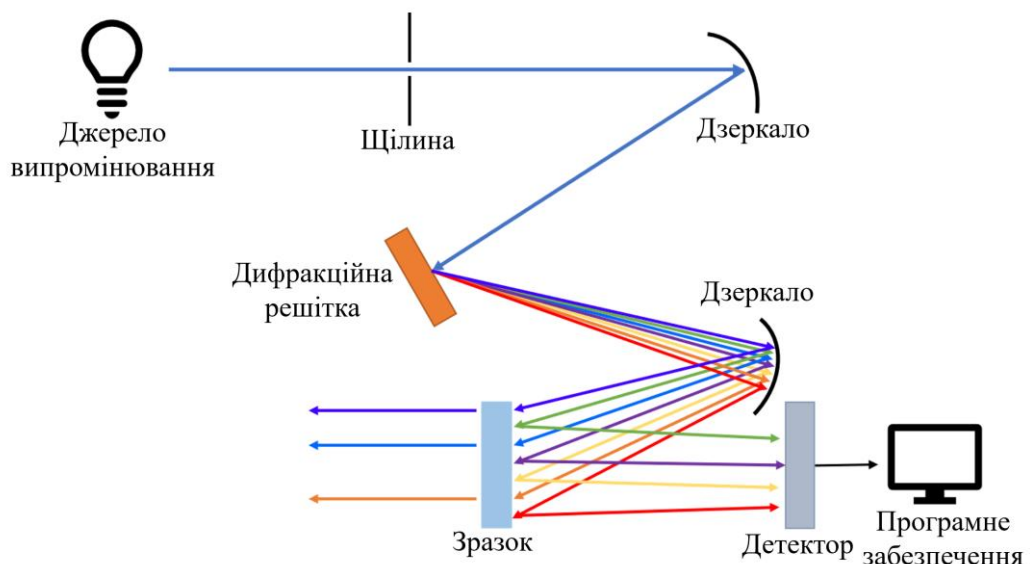


Рисунок 2.1 – Діаграма спектрометра

2.1 Переваги використання лазерів в спектроскопії

Переваги лазерів у спектроскопії насамперед пов'язані з кращими спектральними властивостями порівняно зі звичайними некогерентними джерелами світла. Традиційна абсорбційна спектроскопія часто покладається на джерела широкого спектра, такі як ртутні або ксенонові лампи високого тиску, і вимагає дисперсійних інструментів, таких як спектрометри, для виділення потрібних довжин хвиль. Такий підхід обмежений спектральною роздільною здатністю цих приладів і схильний до значних шумів детектора і флуктуацій інтенсивності джерела, що може знизити чутливість [5]. Спектр поглинання в традиційній спектроскопії виражається як:

$$P_A(\lambda) = a[P_0(\lambda) - P_T(\lambda)] = a[bP_R(\lambda) - P_T(\lambda)], \quad (2.1)$$

де $P_a(\lambda)$ – поглинута потужність;

$P_0(\lambda)$ – початкова потужність;

$P_T(\lambda)$ – передана потужність;

$P_R(\lambda)$ – потужність опорного променя;

a, b – втрати, що не залежать від довжини хвилі.

З іншого боку, лазери пропонують значні переваги. Вони випромінюють когерентне світло з вузькою смугою пропускання і високою спектральною щільністю потужності, що робить їх ідеальними для застосування в ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному діапазонах. Дані властивості дозволяють проводити прямі вимірювання коефіцієнтів поглинання без використання монохроматорів, оскільки роздільна здатність в першу чергу залежить від лінійної ширини лазера і характеристик поглинання середовища. Вдосконалені методи, такі як спектроскопія, що обмежена доплеровським розширенням, дозволяють досягти ще вищої роздільної здатності. Відносно ослаблення потужності в лазерній абсорбційній спектроскопії можна описати за допомогою:

$$\frac{\Delta P}{P} = \alpha \Delta x, \quad (2.2)$$

де $\Delta P/P$ – відносне згасання потужності;

α – коефіцієнт поглинання;

Δx – довжина шляху.

Для малих поглинань ослаблення стає пропорційним відношенню лінійної ширини поглинання $\delta\omega$ до смуги пропускання лазера $\Delta\omega$, за умови, що $\Delta\omega > \delta\omega$:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\delta\omega}{\Delta\omega}. \quad (2.3)$$

Ще однією важливою перевагою лазерів є їхнє високе співвідношення сигнал/шум. Висока спектральна щільність потужності, як правило, робить шум детектора незначним. Крім того, коливання потужності лазера, які можуть обмежувати чутливість виявлення, ефективно зменшуються завдяки методам стабілізації потужності, що ще більше підвищує чутливість, дозволяючи виявляти слабші сигнали поглинання.

Компактність і колімація лазерних променів полегшують використання довгих шляхів поглинання, посилюючи взаємодію між світлом і зразком. Використовуючи мультирефлекторні комірки, ефективну довжину шляху можна значно збільшити. Таким чином, лазерна спектроскопія досягає вищої чутливості і точності порівняно зі звичайними методами (рис. 2.2).

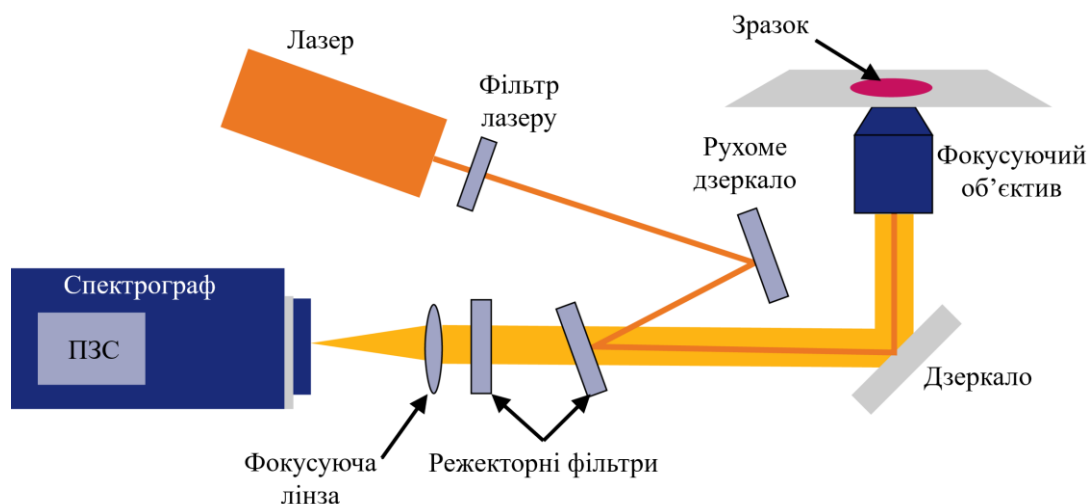


Рисунок 2.2 – Схема спектроскопії з використанням лазера

2.2 Різновиди лазерної спектроскопії

2.2.1 Методи спектроскопії для вивчення стаціонарних взаємодій

До методів спектроскопії для вивчення стаціонарних взаємодій належать спектроскопія, що обмежена доплерівським розширенням та нелінійна спектроскопія.

Спектроскопія, що обмежена доплерівським розширенням використовує лазери для досягнення точних вимірювань поглинання і флуоресценції атомів і молекул. Доплерівське розширення є фактором, що обмежує роздільну здатність лазерних методів спектроскопії. Воно виникає внаслідок теплового руху частинок, які спричиняють зсув спектральних ліній через ефект Доплера [5]:

$$\Delta \nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}, \quad (2.4)$$

де $\Delta \nu_D$ – доплерівська ширина лінії;

ν_0 – частота переходу;

k – стала Больцмана;

T – температура,

m – маса поглинутої частинки;

c – швидкість світла.

У цьому підході спектральна роздільна здатність обмежена доплерівською шириною молекулярних ліній поглинання, яка визначається тепловим рухом частинок. На відміну від традиційної абсорбційної спектроскопії, яка покладається на некогерентні джерела випромінювання, такі як дугові лампи або лампи-спалахи, лазерні методи використовують високомонохроматичні лазери з можливістю перенастроювання, які забезпечують вузьку спектральну смугу і високу спектральну щільність потужності. Це дозволяє проводити точні вимірювання без необхідності використання громіздких монохроматорів. Для підвищення чутливості зазвичай застосовують такі методи, як спектроскопія порожнинного кільцевого розсіювання і спектроскопія збудження флуоресценції. Висока інтенсивність лазерного випромінювання, вузька смуга пропускання і стабільний вихід дозволяють проводити вимірювання з кращою роздільною здатністю і вищим співвідношенням сигнал/шум.

Однак їхня корисність для дистанційного зондування обмежена вимогою точного вирівнювання лазерних променів і мішеней, а також чутливістю до змін навколишнього середовища, таких як атмосферна турбулентність і розсіювання. Крім того, відносно короткий ефективний діапазон цих методів ще більше обмежує їх застосування у віддалених сценаріях, де відстань до цілі може сягати кілометрів.

У свою чергу, нелінійна спектроскопія досліджує взаємодію між світлом і речовиною у високоінтенсивних лазерних полях, де реакція системи відхиляється від прямо пропорційної інтенсивності світла. Такі методи, як багатофотонне поглинання, спектроскопія насичення та поляризаційна спектроскопія, дозволяють детально вивчати молекулярні та атомні структури, недоступні для лінійних методів.

Одним з ключових нелінійних процесів є двофотонне поглинання, яке широко застосовується в спектроскопії високої роздільної здатності.

Інтенсивність сигналу залежить квадратично від інтенсивності лазерного випромінювання, що дозволяє підвищити чутливість вимірювань:

$$I = \sigma \cdot I_l^2, \quad (2.5)$$

де σ – коефіцієнт двофотонного поглинання;

I_l – інтенсивність лазерного випромінювання.

Нелінійні процеси, такі як двофотонне поглинання, дозволяють проводити бездоплерівські вимірювання, які усувають розширення ліній, спричинене тепловим рухом частинок. Це підвищує роздільну здатність спектральних ліній, виявляючи такі складні особливості, як надтонкі структури, ізотопні зсуви та динаміку зіткнень. Нелінійна спектроскопія особливо цінна для вивчення складних систем, зокрема кластерів і біомолекул, де потрібна висока точність і чутливість.

Даний різновид спектроскопії від високоінтенсивних лазерних джерел, які індукують нелінійні оптичні явища, що ускладнює його застосування в дистанційному зондуванні. Нелінійні ефекти за своєю природою чутливі до факторів навколишнього середовища, таких як температура і тиск, які можуть суттєво змінити цілісність сигналу в умовах відкритого поля. Крім того, точність вирівнювання і складність обладнання, необхідні для нелінійної спектроскопії, роблять її більш придатною для лабораторних досліджень, ніж для великомасштабних або дистанційних застосувань *in situ*.

2.2.2 Методи спектроскопії для динамічного аналізу

До методів спектроскопії для динамічного аналізу належать спектроскопія в молекулярних пучках, спектроскопія з часовою роздільною здатністю та раманівська спектроскопія.

Поєднання лазерної спектроскопії та молекулярних пучків дозволяє досягти виняткової спектральної роздільної здатності та спростити аналіз

завдяки мінімізації доплерівського розширення та охолодження внутрішніх ступенів свободи. У цій установці молекули розширюються у вакуумі, утворюючи надзвуковий пучок зі зниженою температурою обертання і коливань [5]. Це призводить до висококолімованого молекулярного потоку з обмеженими енергетичними станами, щільність якого описується наступним чином:

$$n(v, r, \theta) dv = C \frac{\cos \theta}{r^2} n v^2 e^{-(v/v_{ii})} dv, \quad (2.6)$$

де v – швидкість молекул;

v_{ii} – ймовірна швидкість молекулярного пучку при тепловій рівновазі;

θ – напрям молекулярного пучку;

r – відстань від джерела випромінювання.

Даний різновид спектроскопії застосовується для вивчення середовищ без зіткнень, кластерної динаміки і слабких міжмолекулярних сил, таких як ван-дер-ваальсова взаємодія. Нелінійні методи в молекулярних пучках, такі як спектроскопія насичення, ще більше покращують здатність розрізняти тонкі спектральні деталі. Цей підхід має важливе значення в таких галузях, як фізична хімія та молекулярна динаміка. Однак потреба в молекулярно-променевому апараті обмежує його застосування в дистанційному зондуванні, де неможливо досягти таких контрольованих умов зразка. Крім того, цей метод не призначений для аналізу великих або віддалених об'єктів, що робить його непрактичним для дистанційного моніторингу навколишнього середовища або атмосфери.

Лазерна спектроскопія з часовою роздільною здатністю досліджує динамічні процеси в атомах, молекулах і матеріалах, використовуючи надшвидкі лазерні імпульси для реєстрації подій, що відбуваються на пікосекундних, фемтосекундних і навіть аттосекундних часових масштабах. Поширеним методом є спектроскопія «насос – зонд», де початковий імпульс

збуджує систему (насос), а запізнілий імпульс досліджує відгук, виявляючи динаміку релаксації і механізми передачі енергії:

$$I(t) = I_0 e^{(-\alpha(t) \cdot l)}, \quad (2.7)$$

де I_0 – початкова інтенсивність зонду;

$\alpha(t)$ – залежний від часу коефіцієнт поглинання;

l – довжина шляху дискретизації.

Досягнення у формуванні імпульсів і частотній модуляції розширили сферу його застосування, включивши в неї моніторинг хімічних реакцій, молекулярних коливань і енергетичних переходів у реальному часі. Такі методи, як вимірювання часу життя флуоресценції і спектроскопія перехідного поглинання, мають вирішальне значення для розуміння біологічних систем, динаміки напівпровідників і фотохімічних реакцій.

Незважаючи на свою ефективність у дослідженні перехідних явищ, застосування спектроскопії з часовою роздільною здатністю у дистанційному зондуванні обмежене. Метод зазвичай вимагає точної синхронізації лазерних імпульсів з відгуком зразка, що стає складним завданням у неконтрольованих середовищах. Крім того, висока часова роздільна здатність часто не є необхідною для дистанційного зондування, де просторова і хімічна роздільна здатність мають пріоритет. Складність і чутливість установок з часовою роздільною здатністю ще більше ускладнюють їхнє розгортання в польових умовах.

2.2.3 Лазерна Раманівська спектроскопія

Лазерна Раманівська спектроскопія використовує непружне розсіювання монохроматичного світла для дослідження коливальних, обертальних і низькочастотних мод молекул. Коли лазерний промінь взаємодіє зі зразком, більшість фотонів розсіюється пружно (релеєвське розсіювання), але невелика

частина розсіюється непружно, передаючи енергію молекулам або від них. Виникаючі енергетичні зсуви відповідають молекулярним коливанням або іншим низькоенергетичним переходам, забезпечуючи молекулярний відбиток. Сучасні методи, такі як когерентна антистоксова Раманівська спектроскопія та поверхнево-посилене Раманівське розсіювання, значно підсилюють раманівський сигнал, що дозволяє виявляти навіть слідові кількості речовин.

Таким чином, лазерна Раманівська спектроскопія є найбільш придатним методом для дистанційного зондування завдяки своїй здатності надавати детальну молекулярну та хімічну інформацію про об'єкт без необхідності фізичного контакту. Ефект комбінаційного розсіювання, який полягає у непружному розсіюванні фотонів молекулами, дозволяє ідентифікувати специфічні коливальні та обертальні моди, характерні для різних речовин. Це дозволяє виявляти і аналізувати широкий спектр матеріалів, включаючи гази, рідини і тверді речовини, *in situ* і в реальному часі. Метод особливо корисний для зондування атмосфери та навколишнього середовища, де він може ідентифікувати забруднювачі, контролювати хімічні процеси та виявляти мікроелементи на великих відстанях за допомогою сфокусованих лазерних пучків. Пристосованість Раманівської спектроскопії до віддалених конфігурацій, таких як автономні системи виявлення, ще більше розширює її можливості застосування для польових робіт як у земному, так і в позаземному середовищі [5].

Ще однією ключовою перевагою лазерної Раманівської спектроскопії у дистанційному зондуванні є її надійність і універсальність у різноманітних умовах експлуатації. На відміну від інших методів, які вимагають суворого контролю навколишнього середовища або покладаються на поля високої інтенсивності, Раманівська спектроскопія може ефективно працювати в умовах навколишнього середовища з мінімальною підготовкою зразків. Досягнення в лазерних технологіях, включаючи розробку компактних і потужних лазерів, значно розширили її діапазон і чутливість, уможлививши ефективне дистанційне виявлення навіть у складних сценаріях. Крім того, використання

лазерів, налаштованих на довжину хвилі, і вдосконалених систем фільтрації гарантує, що раманівські сигнали можуть бути ізольовані від фонового шуму, що робить метод надійним для таких застосувань, як дослідження планет, моніторинг довкілля і промислова безпека. Ці особливості в поєднанні зі здатністю аналізувати хімічно складні та гетерогенні зразки роблять лазерну Раманівську спектроскопію найкращим вибором для застосування в дистанційному зондуванні.

2.3 Теоретичне підґрунтя Раманівської спектроскопії

Комбінаційне розсіювання можна розглядати як непружне зіткнення падаючого фотона $\hbar\omega_i$ з молекулою на початковому енергетичному рівні E_i (рис. 2.3, а). Після зіткнення реєструється фотон $\hbar\omega_s$ з меншою енергією, а молекула виявляється на вищому енергетичному рівні E_f :

$$\hbar\omega_i + M(E_i) \rightarrow M^*(E_f) + \hbar\omega_s, \text{ де } \hbar(\omega_i - \omega_s) = E_f - E_i > 0. \quad (2.8)$$

Різниця енергій $\Delta E = E_f - E_i$ може проявлятися як коливальна, оберտальна або електронна енергія молекули. Якщо фотон $\hbar\omega_i$ розсіюється коливально збудженою молекулою, вона може набути енергії, і розсіяний фотон має вищу частоту ω_{as} (рис. 2.3, в), де:

$$\hbar\omega_{as} = \hbar\omega_i + E_i - E_f, \text{ де } E_i > E_f. \quad (2.9)$$

Таке «надпружне» розсіяння фотонів називається антистоксовим випромінюванням.

У діаграмі енергетичних рівнів (рис. 2.3, б) проміжний стан $E_v = E_i + \omega_i$ системи під час процесу розсіяння часто формально описують як віртуальний рівень, який, однак, не обов'язково є «дійсним» стаціонарним власним станом

молекули. Якщо умовний рівень збігається з одним із власних станів молекули, то говорять про резонансний ефект комбінаційного розсіювання [5].



Рисунок 2.3 – Діаграма рівнів комбінаційного розсіювання

Класичний опис коливального ефекту комбінаційного розсіювання описується співвідношенням:

$$p = \mu_0 + \tilde{\alpha}E, \quad (2.10)$$

між амплітудою електричного поля $E = E_0 \cos(\omega t)$ падаючої хвилі і дипольним моментом p молекули. Перший член μ_0 представляє можливий постійний дипольний момент, тоді як $\tilde{\alpha}E$ (де $\tilde{\alpha}$ – тензор поляризованості молекули, який кількісно показує, як спотворюється електронна хмара молекули під впливом електричного поля; а E – зовнішнє електричне поле, що взаємодіє з молекулою) є індукованим дипольним моментом. Поляризованість зазвичай виражається тензором (α_{ij}) другого ступеня, який залежить від молекулярної симетрії. Дипольний момент і поляризованість є функціями координат ядер і електронів. Однак, поки частота падаючого випромінювання далека від резонансу з електронними або коливальними переходами, ядерні зміщення, індуковані поляризацією електронної хмари, досить малі. Оскільки розподіл електронного заряду визначається положенням ядер і миттєво підлаштовується

під зміни цих положень, то є можливість розкласти дипольний момент і поляризованість у ряд Тейлора в нормальних координатах q_n ядерних зсувів:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu(0) + \sum_{n=1}^Q \left(\frac{\partial \mu}{\partial q_n} \right)_0 q_n + \dots, \\ \alpha_{ij}(q) &= \alpha_{ij}(0) + \sum_{n=1}^Q \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial q_n} \right)_0 q_n + \dots,\end{aligned}\tag{2.11}$$

де $Q = 3N - 6$ (або $3N - 5$ для лінійних молекул) дає число нормальних мод коливань для молекули з N ядрами, а $\mu(0) = \mu_0$ і $\alpha_{ij}(0)$ – дипольний момент і поляризованість при рівноважній конфігурації $q_n = 0$. Для малих амплітуд коливань нормальні координати $q_n(t)$ молекули, що коливається, можна апроксимувати:

$$q_n(t) = q_{n0} \cos(\omega_n t),\tag{2.12}$$

де q_{n0} – амплітуда;

ω_n – частота n -го нормального коливання.

Підставивши (2.11) та (2.12) у (2.10), можна отримати повний дипольний момент:

$$\begin{aligned}p &= \mu_0 + \sum_{n=1}^Q \left(\frac{\partial \mu}{\partial q_n} \right)_0 q_{n0} \cos(\omega_n t) + \alpha_{ij}(0) E_0 \cos(\omega t) + \\ &+ \frac{1}{2} E_0 \sum_{n=1}^Q \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial q_n} \right)_0 q_{n0} + [\cos(\omega + \omega_n)t + \cos(\omega - \omega_n)t].\end{aligned}\tag{2.13}$$

Другий доданок описує інфрачервоний спектр, третій – релєєвське розсіювання, а останній - комбінаційне розсіювання. На рисунку 2.4 показано залежність $\partial \mu / \partial q$ і $\partial \alpha / \partial q$ для трьох нормальних коливань молекули CO_2 . З нього видно, що $\partial \mu / \partial q \neq 0$ для згинальних коливань ν_2 і для асиметричного

розтягування ν_3 . Ці два коливальні режими називаються «інфрачервоно активними». Зміна поляризованості $\partial\alpha/\partial q \neq 0$ тільки для симетричного розтягу ν_1 , який тому називається «раманівським активним».

Оскільки осцилюючий дипольний момент є джерелом нових хвиль, що генеруються на кожній молекулі, рівняння 2.13 показує, що утворюється пружно розсіяна хвиля з частотою ω падаючої хвилі (релеївське розсіяння), а також непружно розсіяні компоненти з частотами $\omega - \omega_n$ (стоксівські хвилі) і надпружно розсіяні хвилі з частотами $\omega + \omega_n$ (антистоксівські компоненти). Мікроскопічні внески від кожної молекули складаються в макроскопічні хвилі, інтенсивність яких залежить від заселеності $N(E_i)$ молекул на початковому рівні E_i , від інтенсивності падаючого випромінювання та від виразу $(\partial\alpha_{ij}/\partial q_n)q_n$, який описує залежність компонент поляризованості від ядерних зміщень.

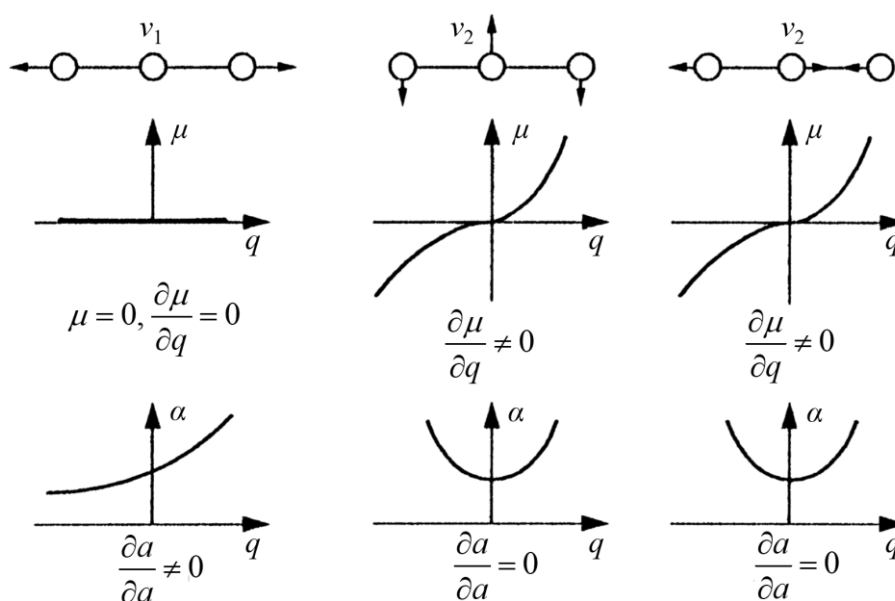


Рисунок 2.4 – Залежність $\partial\mu/\partial q$ дипольного моменту та $\partial\alpha/\partial q$ поляризованості від нормальних коливань молекули CO₂

Хоча класична теорія правильно описує частоти $\omega \pm \omega_n$ раманівських ліній, вона не дає правильних інтенсивностей і потребує квантово-механічної

обробки. Математичне сподівання компоненти α_{ij} тензора поляризованості має вигляд:

$$\langle \alpha_{ij} \rangle_{ab} = \int u_b^*(q) \alpha_{ij} u_a(q) dq, \quad (2.14)$$

де функції $u(q)$ є власними функціями молекул на початковому рівні a і кінцевому рівні b . Інтегрування поширюється на всі ядерні координати. Це показує, що обчислення інтенсивності раманівських ліній ґрунтується на знанні молекулярних хвильових функцій початкового і кінцевого станів. У випадку коливально-обертального комбінаційного розсіяння це обертально-коливальні власні функції електронного основного стану.

Для малих зсувів qn молекулярний потенціал можна апроксимувати гармонічним потенціалом, де зв'язком між різними нормальними коливальними модами можна знехтувати. Тоді функції $u(q)$ можна розкласти на добуток коливальної власної функції n -ї нормальної моди з ν_n коливальними квантами:

$$u(q) = \prod_{n=1}^{\rho} w_n(q_n, \nu_n), \quad (2.15)$$

Використовуючи співвідношення ортогональності функцій $w_n(q_n)$, з (2.14) та (2.11):

$$\int w_n w_m dq = \delta_{nm}, \quad (2.16)$$

можна отримати:

$$\langle \alpha_{ij} \rangle_{ab} = (\alpha_{ij})_0 + \sum_{n=1}^{\rho} \left(\frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial q_n} \right)_0 \int w_n(q_n, \nu_a) q_n w_n(q_n, \nu_b) dq_n. \quad (2.17)$$

Перший доданок є сталою і відповідає за релеевське розсіювання. Для невідроджених коливань інтеграли в другому доданку зникають, якщо $\nu_a = \nu_b \pm 1$. У цих випадках він має значення $[1/2(\nu_a + 1)]^{1/2}$. Основним інтенсивним параметром коливальної Раманівської спектроскопії є похідна $(\partial\alpha_{ij}/\partial q)$, яку можна визначити з раманівських спектрів.

Інтенсивність раманівської лінії на стоксовій або антистоксовій частоті $\omega_s = \omega \pm \omega_n$ визначається густиною заселеності $N_i(E_i)$ на початковому рівні $E_i(\nu, J)$, інтенсивністю I_L падаючого лазера накачування і перерізом комбінаційного розсіяння $\sigma_R(i \rightarrow f)$ для раманівського переходу $E_i \rightarrow E_f$:

$$I_s = N_i(E_i)\sigma_R(i \rightarrow f)I_L. \quad (2.18)$$

При тепловій рівновазі густина популяції $N_i(E_i)$ слідує розподілу Больцмана:

$$N_i(E_i, \nu, J) = \frac{N}{z} g_i e^{-E_i/kT}, \text{ де } N = \sum N_i. \quad (2.19)$$

Статистичні вагові коефіцієнти g_i залежать від коливального стану $\nu = (n_1\nu_1, n_2\nu_2, \dots)$, обертального стану з обертальним квантовим числом J , проекції K на вісь симетрії у випадку симетричної вершини, а також від ядерних спінів I для N ядер. Функція розщеплення:

$$Z = \sum_i g_i e^{-E_i/kT}, \quad (2.20)$$

є нормувальним коефіцієнтом, який робить $\sum N_i(\nu, J) = N$.

У випадку стоксівського випромінювання початковим станом молекул може бути коливальний основний стан, тоді як для випромінювання антистоксівських ліній молекули повинні мати початкову енергію збудження.

Через меншу густину заселеності на цих збуджених рівнях інтенсивність антистоксових ліній менша в $\exp(-\hbar\omega_{\nu}/kT)$ разів.

Переріз розсіяння залежить від матричного елемента (2.17) тензора поляризованості і, крім того, містить частотну залежність ω^4 , отриману з класичної теорії розсіяння світла. Отримуємо аналогічно до двофотонного перерізу:

$$\sigma_R(i \rightarrow f) = \frac{8\pi\omega_s^4}{9\hbar c^4} \left| \sum_j \frac{\langle a_{ij} \rangle \hat{e}_L \langle a_{jf} \rangle \hat{e}_s}{\omega_{ij} - \omega_L - i\gamma_j} + \frac{\langle a_{ji} \rangle \hat{e}_L \langle a_{jf} \rangle \hat{e}_s}{\omega_{jf} - \omega_L - i\gamma_j} \right|^2, \quad (2.21)$$

де \hat{e}_L і \hat{e}_s – одиничні вектори, що представляють поляризацію падаючого лазерного променя і розсіяного світла.

Сума поширюється на всі молекулярні рівні j з однорідною шириною γ_j , доступні для однофотонних переходів з початкового стану i . Рівняння 2.21 демонструє, що початковий і кінцевий стани з'єднані двофотонними переходами, що означає, що обидва стани мають однакову парність. Наприклад, коливальні переходи в одноядерних двоатомних молекулах, які заборонені для однофотонних інфрачервоних переходів, доступні для раманівських переходів.

Матричні елементи $\langle \alpha_{ij} \rangle$ залежать від характеристик симетрії молекулярних станів. Хоча теоретична оцінка величини $\langle \alpha_{ij} \rangle$ вимагає знання відповідних хвильових функцій, питання, чи дорівнює $\langle \alpha_{ij} \rangle$ нулю чи ні, залежить від властивостей симетрії молекулярних хвильових функцій для станів $|i\rangle$ і $|f\rangle$ тому може бути вирішене за допомогою теорії груп без явного обчислення матричних елементів (2.17).

Згідно з рівнянням 2.21, переріз комбінаційного розсіяння значно зростає, якщо частота лазера ω_L відповідає частоті переходу ω_{ij} молекули (резонансний ефект комбінаційного розсіяння). За допомогою лазерів на барвниках, що перестроюються, і подвоєння оптичної частоти ця резонансна умова часто може бути реалізована. Підвищена чутливість резонансного комбінаційного

розсіювання може бути використана для вимірювання мікроразків або дуже малих концентрацій молекул у розчинах, де поглинання хвилі накачування мале, незважаючи на резонанс з молекулярним переходом.

Якщо різниця частот $\omega_L - \omega_s$ відповідає електронному переходу молекули, ми говоримо про електронне комбінаційне розсіювання, яке дає додаткову інформацію до електронно-абсорбційної спектроскопії. Це пов'язано з тим, що початковий і кінцевий стани повинні мати однакову парність, і тому прямий дипольно-дозволений електронний перехід $|i\rangle \rightarrow |f\rangle$ неможливий.

У парамагнітних молекулах можуть відбуватися раманівські переходи між різними компонентами тонкої структури (спін-перекидні раманівські переходи). Якщо молекули помістити в поздовжнє магнітне поле, паралельне лазерному променю, то раманівське світло є циркулярно поляризованим і вимірюється як σ^+ світло для $\Delta M = +1$ і як σ^- для $\Delta M = -1$ переходів.

2.4 Застосування лазерної Раманівської спектроскопії

2.4.1 Аналіз земних ресурсів

Останні досягнення в галузі дистанційної раманівської спектрометрії продемонстрували її корисність для виявлення мінералів, хімічних речовин, води та льоду на поверхні Землі. Оснащені регульованою енергією збудження і чутливими механізмами виявлення, раманівські системи забезпечують молекулярні і структурні дослідження з високим співвідношенням сигнал/шум навіть у складних умовах природного середовища. Отримані дані можуть бути використані для екологічного моніторингу, прогнозування природних ризиків і забезпечення сталого використання природних ресурсів (рис. 2.5).

Здатність системи ідентифікувати такі мінерали, як силікати, карбонати та сульфати, є важливим інструментом у геології Землі [6].

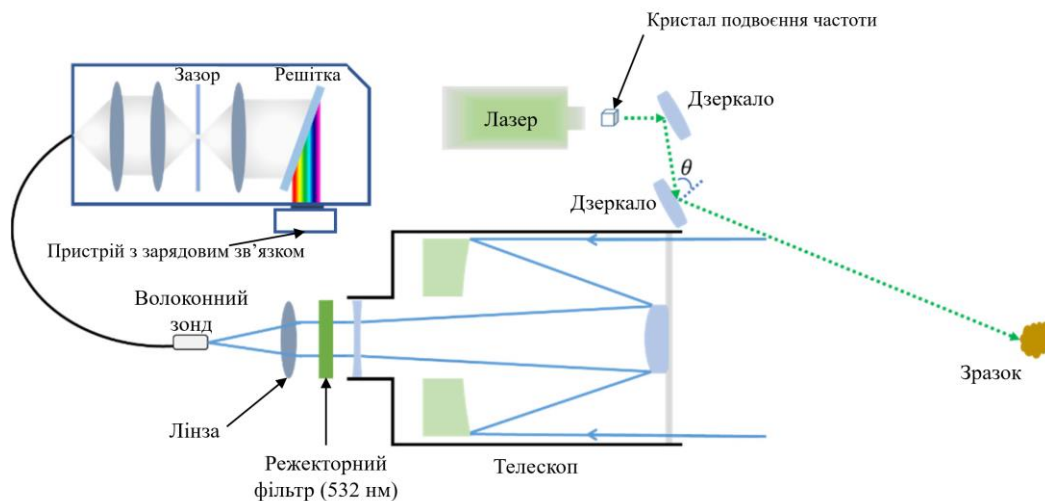


Рисунок 2.5 – Схема системи дистанційної раманівської сканування

Дистанційне раманівське виявлення дозволяє ефективно розрізняти характерні раманівські особливості мінералів, таких як олівін, кварц і польовий шпат, що дає змогу проводити мінералогічну класифікацію та аналізувати хімічний склад земної кори. Ці дані є критично важливими для визначення родовищ корисних копалин, оцінки придатності територій для будівництва та аналізу стабільності геологічних масивів. Спектри комбінаційного розсіювання водних і безводних сульфатів висвітлюють екологічні умови, зокрема вологість і мінералізацію ґрунту, що може використовуватись для оптимізації сільськогосподарської діяльності (рис. (2.6–2.7)).

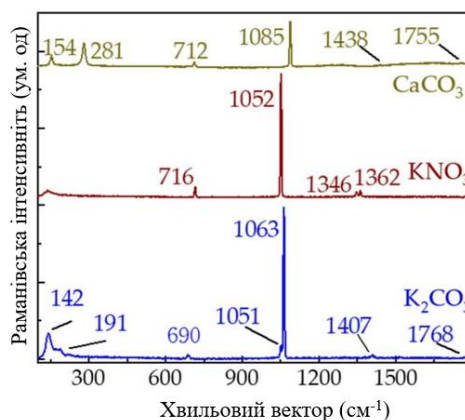


Рисунок 2.6 – Дистанційні спектри комбінаційного розсіювання світла CaCO_3 , K_2CO_3 та KNO_3

У дослідженнях ґрунтів і водних середовищ дистанційна раманівська спектроскопія успішно виявила перхлорати й нітрати, які є ключовими для розуміння геохімічних процесів Землі. Наприклад, аналіз нітратів у ґрунті допомагає визначити рівень забруднення, оцінити родючість і стан агроєкосистем. Ця інформація корисна для розробки заходів зі зменшення антропогенного впливу на довкілля, планування сільськогосподарських робіт і відновлення деградованих земель.

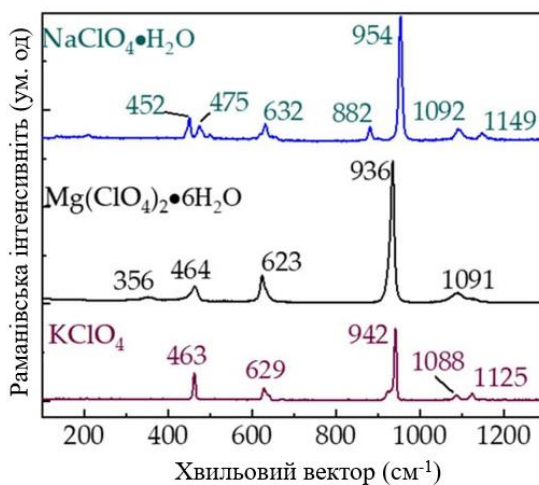


Рисунок 2.7 – Дистанційні спектри комбінаційного розсіювання світла $\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та KClO_4

Вода і льодовикові утворення, що є важливими ресурсами для життя, були виявлені за допомогою раманівської спектроскопії з високою точністю. Метод дозволяє розрізнити коливальні режими води, що сприяє чіткому розмежуванню рідкої та твердих фаз. Це має вирішальне значення для моніторингу запасів прісної води, аналізу зміни клімату та управління водними ресурсами в регіонах із ризиком дефіциту води (рис. 2.8) [6].

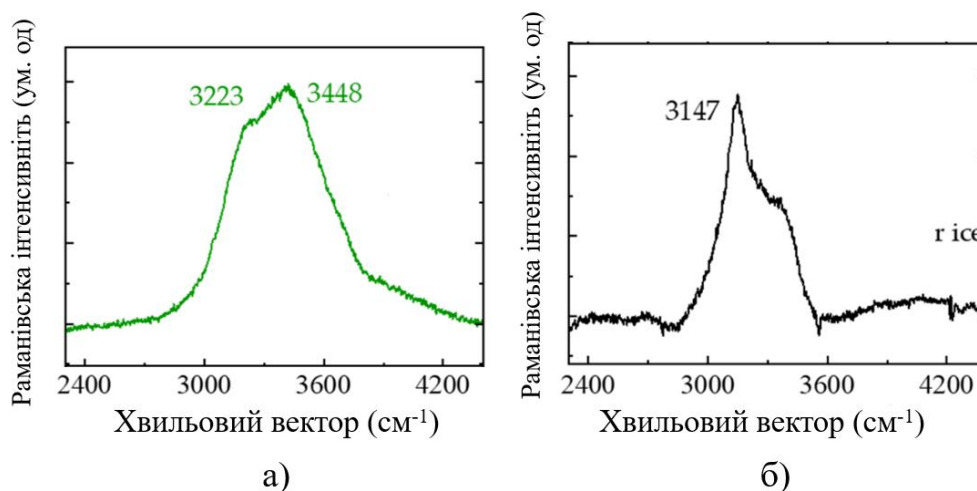


Рисунок 2.8 – Дистанційні спектри комбінаційного розсіювання світла для води а) та водянистого льоду б)

Раманівські системи також демонструють свою ефективність у виявленні органічних сполук, таких як амінокислоти, які можуть свідчити про біологічну активність або рівень органічного забруднення. Наприклад, дистанційне виявлення органічних речовин, таких як етанол, L-аланін і фенілаланін, підкреслює застосування цього методу для оцінки стану ґрунтів і водойм. Отримана інформація є основою для моніторингу екосистем, оцінки впливу промисловості на природу і планування природоохоронних заходів.

2.4.2 Детектування небезпечних речовин

Раманівська спектроскопія, особливо в її дистанційному та часовому виконанні, є потужним інструментом для виявлення та ідентифікації небезпечних речовин з високою точністю та ефективністю. Здатність виявляти сліди хлорату калію (KClO_3), нітрату натрію (NaNO_3), сульфату амонію ($(\text{NH}_4)\text{SO}_4$) та карбонату кальцію (CaCO_3) на відстані до 10 метрів демонструє надійність цієї технології. Наприклад, сигнали комбінаційного розсіювання всього лише 0,1 мг цих речовин були надійно виявлені на різних підкладках,

включаючи алюмінієві пластини, дерев'яні блоки, картон, тканину і листя, що ілюструє її корисність у різноманітних і складних реальних сценаріях.

На рисунку 2.9 представлено діаграму раманівської спектроскопії для виявлення небезпечних речовин, а також платформи, на яку вона монтується: ВД – вторинне дзеркало, ПД – первинне дзеркало, ДКФ – довгохвильовий крайовий фільтр, ППД – позаосьове параболічне дзеркало, ЛК – лазерний коліматор, МС – модуль синхронізації, МСт – модуль стробування, ІКМОН – детектор на основі інтенсифікованої комплементарної структури метал-оксид-напівпровідник [7].

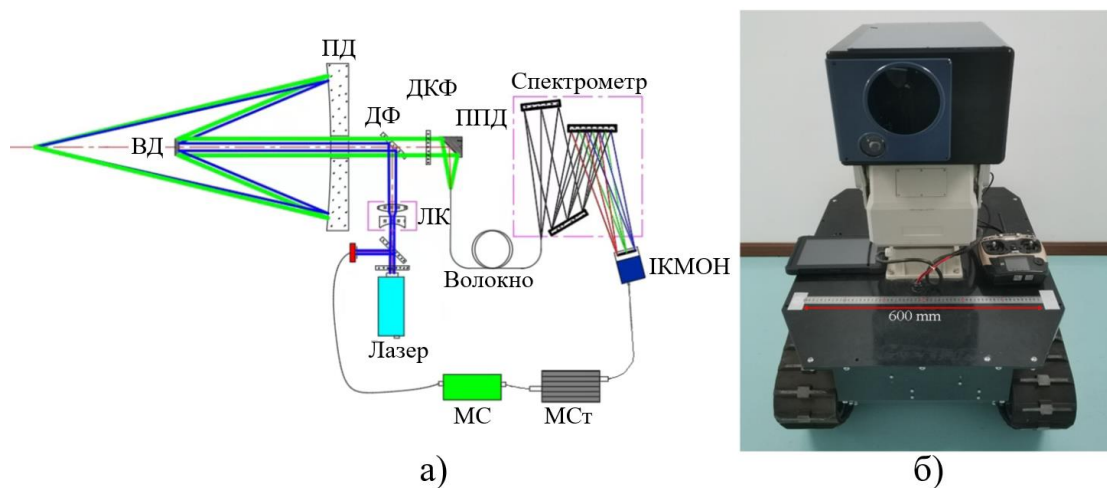


Рисунок 2.9 – Схема Раманівської спектроскопії (а) та мобільна платформа на змонтованою раманівською системою (б) [7]

Значна перевага Раманівської спектроскопії полягає в її здатності надавати специфічні молекулярні сигнатури для небезпечних речовин, що уможливорює їх однозначну ідентифікацію. Характерні піки комбінаційного розсіювання для небезпечних сполук, такі як симетричні та асиметричні коливання розтягування Cl-O в KClO_3 при 939 cm^{-1} і 982 cm^{-1} , відповідно, підкреслюють точність цього методу (рис. 2.10). Аналогічно, ідентифікація нітратів за допомогою симетричних і асиметричних коливань N-O при 1070 cm^{-1}

та 1391 см^{-1} демонструє потенціал для виявлення вибухонебезпечних прекурсорів.

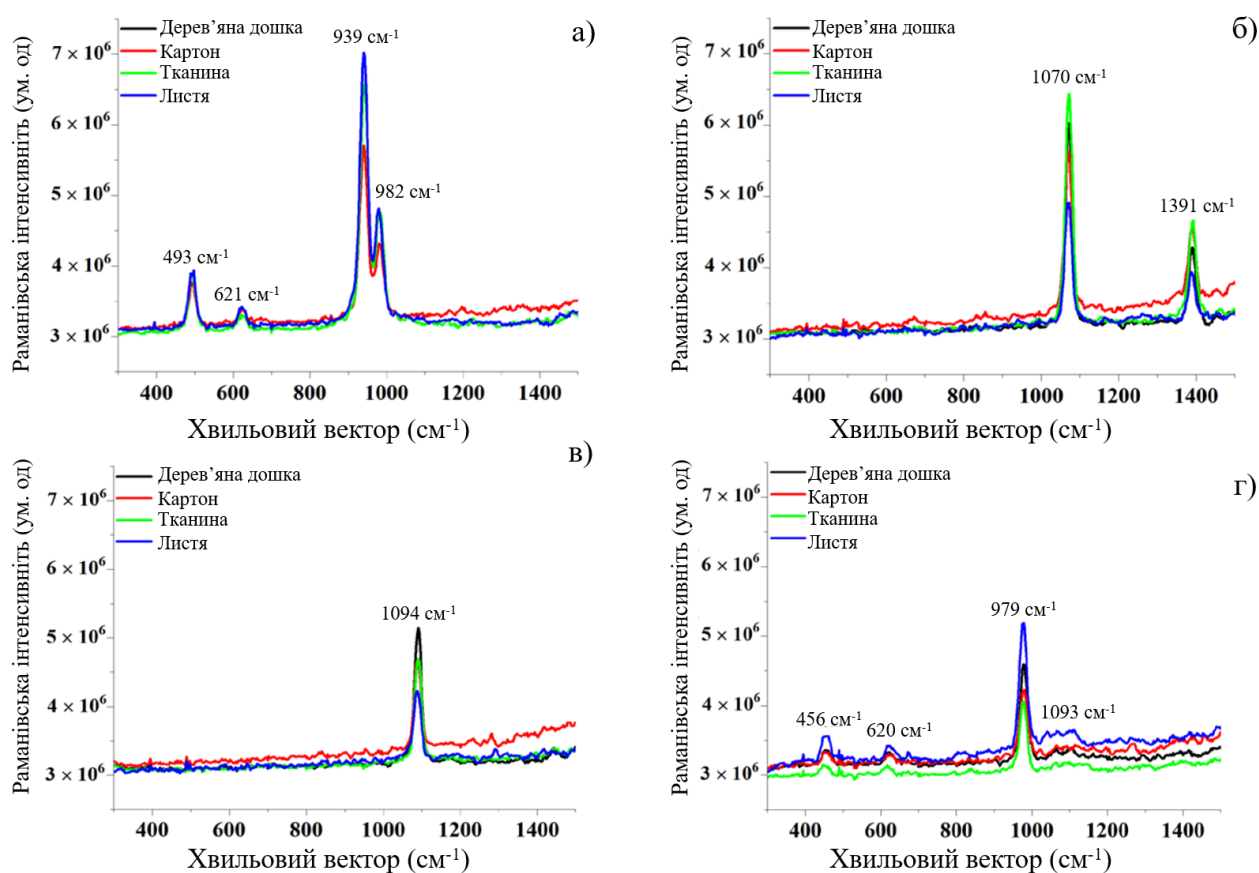


Рисунок 2.10 – Середні спектри комбінаційного розсіювання для 0,1 мг KClO_3 (а), NaNO_3 (б), CaCO_3 (в) та $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (г) на відстані 10 м

Компактні та безпілотні конфігурації систем дистанційної раманівської спектроскопії надають додаткові переваги для виявлення небезпечних речовин. Прототипи систем, такі як ті, що використовують імпульсний лазер з довжиною хвилі 266 нм і детектор на основі комплементарних металів-оксидів-напівпровідників, що підсилюють ультрафіолетове випромінювання, мають підвищену портативність, знижене енергоспоживання і мінімальні вимоги до технічного обслуговування. Це робить їх дуже придатними для використання в антитерористичних програмах та інших критично важливих для безпеки додатках.

Здатність виявляти речовини на різних підкладках ще більше підкреслює універсальність раманівських систем. Наприклад, послідовне виявлення характерних раманівських характеристик небезпечних сполук на деревині, тканині і листі вказує на те, що раманівська спектроскопія може адаптуватися до різноманітних умов експлуатації. Ця адаптивність має вирішальне значення для команд реагування на надзвичайні ситуації та сил безпеки, які повинні діяти в непередбачуваних і динамічних умовах.

Таким чином, висока чутливість, специфічність і адаптивність раманівської спектроскопії роблять її ключовою технологією для виявлення небезпечних речовин. Її інтеграція з передовими методами аналізу даних і компактними, віддаленими конфігураціями забезпечує її ефективність у різних сферах застосування – від антитерористичних заходів до моніторингу навколишнього середовища. Здатність точно виявляти навіть сліди небезпечних хімічних речовин підкреслює її важливість для забезпечення громадської безпеки і розвитку наукових досліджень.

3 ЛАЗЕРНА ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ

Гіперспектральна візуалізація – це технологія, що поєднує спектроскопію з можливостями візуалізації. Вона дозволяє збирати детальну інформацію про склад і характеристики об'єктів і поверхонь у спосіб, який неможливий за допомогою звичайних систем візуалізації.

3.1 Взаємозв'язок між спектроскопією, візуалізацією та гіперспектральною візуалізацією

Спектроскопія, візуалізація та гіперспектральна візуалізація – це взаємопов'язані технології, які разом уможливають детальний аналіз та візуалізацію властивостей матеріалів. Спектроскопія вивчає взаємодію світла з речовиною, таку як поглинання, відбиття та випромінювання в різних діапазонах довжин хвиль. Цей метод дає змогу отримати спектральний відбиток матеріалу, розкриваючи його хімічний і молекулярний склад. Однак спектроскопія часто обмежується точковими вимірюваннями, не враховуючи просторовий контекст, який має вирішальне значення для застосувань, що вимагають розуміння розподілу матеріалу.

На противагу цьому, візуалізація фокусується на фіксації просторових даних, таких як розмір, форма і текстура, за допомогою таких методів, як цифрова фотографія або мікроскопія. Хоча візуалізація чудово передає просторові деталі, вона обмежена в своїх можливостях надати уявлення про хімічний або молекулярний склад зразка. Наприклад, звичайна RGB-зйомка може розрізняти об'єкти за кольором, але не може ідентифікувати хімічні властивості речовин у сцені.

Гіперспектральна візуалізація заповнює прогалину між цими двома методами, інтегруючи їхні можливості. Вона генерує тривимірний куб даних, де два виміри представляють просторову інформацію, а третій вимір фіксує спектральні дані. Це дозволяє створювати детальні просторові карти

спектральних варіацій у зразку, що дає змогу ідентифікувати і розподіляти матеріали в полі зору. Цей метод особливо корисний для розрізнення матеріалів зі схожим візуальним виглядом, але різними спектральними характеристиками. Він знайшов застосування в таких галузях, як оцінка якості харчових продуктів, сільське господарство та медична діагностика, де його використовують для картографування хімічного складу і виявлення дефектів або забруднень неруйнівними методами (табл. 3.1) [8].

Поєднуючи переваги спектроскопії та візуалізації, гіперспектральна візуалізація є потужним аналітичним інструментом, що надає як якісну, так і кількісну інформацію в єдиній системі.

Таблиця 3.1 – Основні відмінності між методами візуалізації, спектроскопії та гіперспектральної візуалізації

Особливості	Візуалізація	Спектроскопія	Гіперспектральна візуалізація
Просторова інформація	+	–	+
Спектральна інформація	–	+	+
Багатокомпонентна інформація	–	+	+
Побудова хімічних зображень	–	–	+
Гнучкість вилучення спектральної інформації	–	–	+

3.2 Принцип роботи систем гіперспектральної візуалізації

Гіперспектральна візуалізація поєднує методи візуалізації зі спектроскопічними принципами для отримання детальних просторових і спектральних даних про зразок. Метод дозволяє отримувати зображення в широкому діапазоні довжин хвиль, що зазвичай охоплює від видимого до інфрачервоного діапазону електромагнітного спектра. Аналізуючи, як різні довжини хвиль взаємодіють зі зразком, гіперспектральна візуалізація витягує хімічну, фізичну і структурну інформацію, що робить її універсальним

інструментом у наукових дослідженнях. В основі його роботи лежать принципи, запозичені з інфрачервоної та комбінаційної спектроскопії, які досліджують молекулярні коливання та їхню взаємодію з електромагнітним випромінюванням.

Як було зазначено у попередньому розділі, інфрачервона спектроскопія працює за принципом поглинання енергії молекулярними коливаннями. Молекули складаються з атомів, з'єднаних хімічними зв'язками, які коливаються в різних режимах, таких як розтягнення або згинання, внаслідок теплового руху. Коли інфрачервоне випромінювання взаємодіє з цими вібруючими молекулами, енергія поглинається, якщо частота фотонів відповідає енергії, необхідній для коливального переходу. Це поглинання відбувається, коли зміна дипольного моменту молекули супроводжує вібрацію, що призводить до появи характерних піків поглинання, які формують ІЧ-спектр. Гіперспектральна візуалізація використовує це, записуючи дані про поглинання в різних діапазонах довжин хвиль, створюючи детальну спектральну карту зразка [9].

Раманівська спектроскопія, навпаки, ґрунтується на непружному розсіюванні фотонів, а не на поглинанні. Коли монохроматичне джерело світла, зазвичай лазер, освітлює зразок, більшість фотонів пружно розсіюється без зміни енергії. Однак невелика частина зазнає непружного розсіювання, коли їхня енергія змінюється внаслідок взаємодії з молекулярними коливаннями. Ці енергетичні зсуви, відомі як ефект комбінаційного розсіювання, відповідають певним коливальним режимам молекул. Раманівський спектрометр виявляє ці розсіяні фотони, генеруючи раманівський спектр, який виявляє молекулярні відбитки. Цей метод додає ще один шар інформації до гіперспектральних зображень, ідентифікуючи коливальні моди, які можуть бути неактивними в інфрачервоному діапазоні.

Інтеграція спектроскопічних принципів у гіперспектральну візуалізацію уможливорює всебічний аналіз зразків. Збираючи дані в численних спектральних діапазонах, гіперспектральна візуалізація виявляє як особливості

поглинання від активних коливань, так і патерни розсіювання, пов'язані з раманівськими активними модами. Ця здатність забезпечує більш повне розуміння молекулярного складу і структури, що робить гіперспектральну візуалізацію особливо ефективною для складних матеріалів і біологічних систем.

3.3 Конфігурація системи гіперспектральної візуалізації

3.3.1 Режими зйомки

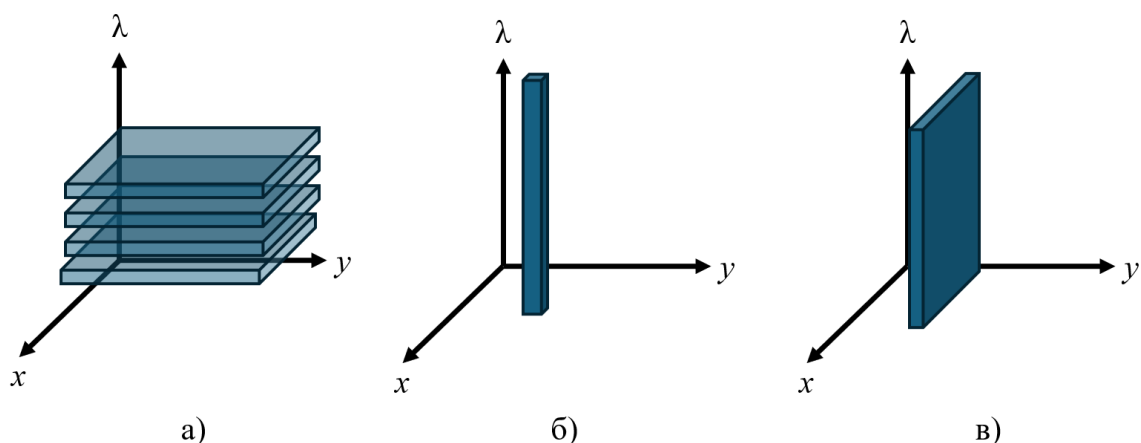
Гіперспектральна візуалізація використовує три основні режими зйомки, що представлені на рисунку 3.1 [8]:

- зональне сканування;
- точкове сканування;
- лінійне сканування.

Метод зонального сканування передбачає утримання поля зору зображення фіксованим і отримання зображень однієї довжини хвилі за іншою, тому її концептуально називають методом сканування довжини хвилі або методом послідовного сканування смуг. Для отримання зображень на різних довжинах хвиль у цій конфігурації потрібен фільтр, що переналаштовується.

Метод точкового сканування, також відомий створює гіперспектральні зображення шляхом вимірювання спектра однієї точки, а потім зразок переміщують і знімають інший спектр.

Третій метод – лінійне сканування, передбачає отримання спектральних вимірювань з лінії зразка, які одночасно реєструються детектором масиву.



а) зональне сканування; б) точкове сканування; в) лінійне сканування.

Рисунок 3.1 – Режими зйомки гіперспектральної візуалізації:

Лінійне сканування є найбільш придатним режимом для дистанційного зондування. Його перевагою є здатність охоплювати великі площі під час руху платформи, наприклад супутника чи літака, що дозволяє створювати детальні карти великих територій. У цьому методі використовується масивний детектор, який одночасно реєструє спектральні дані для кожної точки лінії, забезпечуючи високу просторову і спектральну роздільну здатність. Це робить лінійне сканування ідеальним для дослідження земельних ресурсів, моніторингу рослинності, аналізу водних об'єктів і екологічних змін.

Ще однією перевагою лінійного сканування є його ефективність з точки зору часу й енерговитрат. Завдяки одночасному збору спектральних даних з усієї лінії, цей метод забезпечує швидке отримання інформації навіть для великих територій. На відміну від зонального чи точкового сканування, лінійне сканування дозволяє зменшити обсяг механічних переміщень і переналаштувань, що особливо важливо для забезпечення стабільності й точності даних під час використання на рухомих платформах.

3.3.2 Конструкція системи гіперспектральної візуалізації

Система гіперспектральної візуалізації з лінійним скануванням складається з шести основних компонентів (рис. 3.2) [10]:

- камери з охолоджуваним двовимірним фотодетектором;
- спектрографа;
- рухомої платформи;
- джерела випромінювання освітлення;
- об'єктиву;
- комп'ютера.

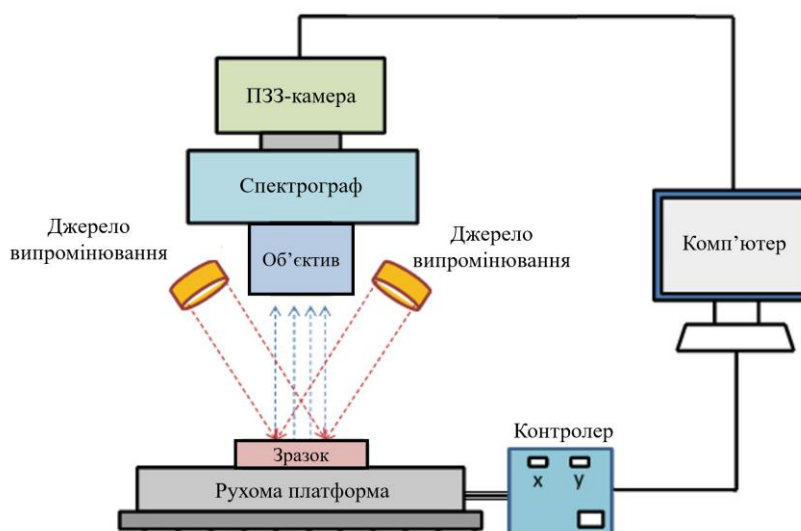


Рисунок 3.2 – Конструкція системи гіперспектральної візуалізації

Кожен з цих компонентів має свої характеристики, які впливають на загальну точність системи. Щоб охарактеризувати продуктивність всієї системи, важливо виміряти і оптимізувати всі параметри, які впливають на якість отриманого спектрального зображення. Скануючи об'єкт шляхом переміщення платформи, включається другий просторовий вимір, в результаті чого створюється тривимірний куб даних з розмірами (x, y, K) .

Блок диспергування довжини хвилі в системі представляє собою, ґратчастий спектрограф з детектором. Він використовує вхідну щілину, що

обмежує поле, і спектрометр для формування зображень з диспергуючим елементом, що дозволяє детектору здійснювати вибірку спектрального виміру і одного просторового виміру одночасно. Об'єктив зображення фокусує світло на вхідну щілину, потім світло колімується, розсіюється решіткою і фокусується на детекторі. Другий просторовий вимір, y , зазвичай генерується шляхом переміщення або сканування поля зору камери відносно сцени. Спектральна роздільна здатність системи залежить як від ширини щілини, так і від оптичної аберації. Коли промінь світла потрапляє в спектрограф, він розсіюється в різних напрямках відповідно до довжини хвилі, зберігаючи при цьому свою просторову інформацію. Потім розсіяне світло накладається на матрицю детектора, в результаті чого створюється двовимірне зображення, один вимір якого представляє спектральну вісь, а інший містить просторову інформацію про лінію сканування. Скануючи всю поверхню зразка, створюється повний тривимірний гіперспектральний куб зображення, де два виміри представляють просторову інформацію, а третій – спектральну. На рисунку 3.3 показано реалізацію цього принципу.

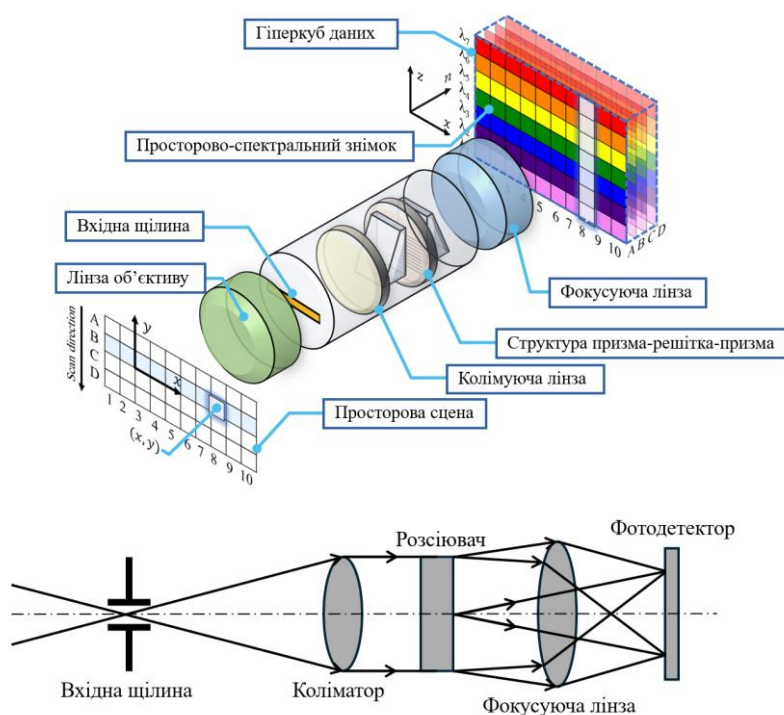


Рисунок 3.3 – Принцип роботи спектрографа «призма-решітка-призма»

З технічної точки зору, в контексті системної інтеграції, основні елементи гіперспектрального спектрографа зображень показані на рисунку 3.4. Джерело світла, наприклад, галогенна лампа, освітлює об'єкт вимірювання, а вхідна оптика, наприклад, об'єктив камери, збирає випромінювання від об'єкта і формує зображення на площині зображення (площина зображення 1 на рисунку 3.4), де розташована вхідна щілина спектрографа. Щілина діє як польовий стоп для визначення миттєвого значення поля видимості у просторових напрямках довжиною Δx і шириною Δy , позначених як вимірювана область на рисунку 3.4. Кожна точка A в просторовому напрямку x вимірюваної області має своє зображення A' на вхідній щілині. Випромінювання від щілини колімується лінзою або дзеркалом, а потім розсіюється диспергуючим елементом, який зазвичай являє собою призму або решітку, так що напрямок поширення випромінювання залежить від його довжини хвилі. Потім воно фокусується на площині зображення 2 за допомогою фокуруючої оптики (лінзи або дзеркала). Кожна точка A зображується на площині зображення 2 серією монохроматичних зображень, що утворюють неперервний спектр у напрямку спектральної осі, позначених різними розмірами A'' . Сфокусоване випромінювання реєструється за допомогою двомірного масиву детекторів, таких як прилад із зарядовим зв'язком або комплементарний детектор метал-оксид-напівпровідник. Спектрограф з візуалізацією дозволяє масиву детекторів одночасно сканувати один просторовий вимір довжиною Δx і нескінченною шириною Δy , а також спектральний вимір 3D-куба. Ширина Δy також визначає спектральну роздільну здатність, яку можна розглядати як $\Delta y''$ в напрямку спектральної осі на рисунку 3.4. На додаток до визначення спектральної роздільної здатності, ширина щілини контролює кількість світла, що потрапляє в спектрограф. Крім того, коліматор робить це світло паралельним, щоб диспергатор (решітка або призма) розсіював його. Другий просторовий вимір об'єкта, y , генерується скануванням або переміщенням поля видимості приладу відносно сцени, що відповідає положенням y_N, y_{N+1}, y_{N+2} на рисунку 3.4.

високою щільністю надають точну топографічну інформацію, в той час як гіперспектральна зйомка фіксує тонкі зміни у фенології рослинності або складі ґрунту. Таке поєднання даних було застосовано для вивчення динаміки заплав, пропонуючи розуміння гідрологічних змін та їхнього впливу на рослинність і ґрунтові умови.

Помітною перевагою є здатність лідару проникати крізь рослинні покриви, виявляючи особливості рельєфу, в той час як гіперспектральна зйомка надає детальні спектральні ознаки покривів. Така комбінація була використана для оцінки стану лісів, зокрема, в дослідженнях заплавних евкаліптових лісів, де комбіновані набори даних сприяли всебічному аналізу стану дерев і структурної цілісності.

Крім того, ця синергія виявляється важливою для виявлення та кількісної оцінки впливу екологічних порушень. Точне картографування ерозійних процесів і зсувонебезпечних ділянок за допомогою лідару у поєднанні з гіперспектральним аналізом вологості і складу ґрунту дає змогу вживати проактивних заходів для управління земельними ресурсами. Такі застосування є критично важливими в регіонах, схильних до стихійних лих, де своєчасні дані можуть стати основою для стратегій зменшення ризиків.

Модульна інтеграція цих систем у безпілотні літальні апарати розширює можливості їх застосування. Легкі датчики і передові методи обробки дозволяють безпілотнику збирати дані з високою роздільною здатністю на складних ділянках місцевості (рис. 3.5). Така гнучкість робить систему ідеальною для досліджень, що вимагають детального просторового покриття, таких як моніторинг сільськогосподарських ландшафтів або стабільності міської інфраструктури в умовах екологічного стресу (рис. 3.6).



Рисунок 3.5 – Безпілотний апарат з встановленим лідаром та гіперспектральною камерою

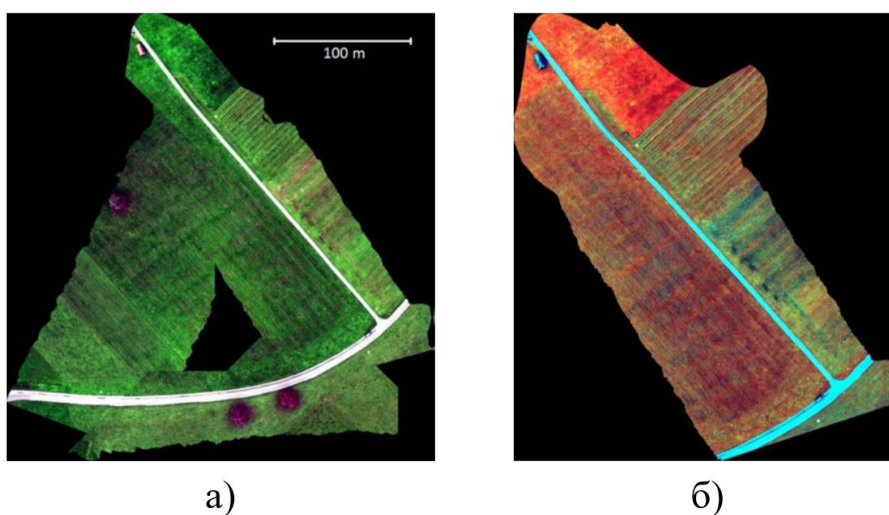


Рисунок 3.6 – Гіперспектральне зображення відображене у природніх кольорах (а) та у змінених кольорах для демонстрації відмінності між рослинним покривом (б)

3.4.2 Виявлення та ідентифікація пластику в морі

Гіперспектральна візуалізація стала перспективною технологією для виявлення та ідентифікації пластикового сміття у водному середовищі, вирішуючи критичну проблему забруднення води пластиком. Даний метод

використовує унікальні спектральні характеристики різних типів пластику у видимому, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному спектрах. На відміну від традиційних методів моніторингу, таких як візуальний підрахунок або відбір проб, гіперспектральна візуалізація дозволяє автоматизовано виявляти пластик з високою роздільною здатністю на великих територіях з мінімальними затратами праці, пропонуючи значний прогрес для моніторингу навколишнього середовища.

Розробка спеціалізованих систем, таких як система дистанційної гіперспектральної зйомки, вбудована в безпілотний водний дрон, є прикладом інновацій в цій галузі (рис. 3.7 – 3.8). Такі системи працюють близько до поверхні води, фіксуючи гіперспектральні дані плаваючих пластикових відходів з високою просторовою і спектральною роздільною здатністю. Такий підхід усуває обмеження супутникових і повітряних платформ, такі як недостатня просторова роздільна здатність і необхідність внесення атмосферних поправок. Крім того, ці системи можна адаптувати до різних водних середовищ, включаючи річки, естуарії та прибережні зони.

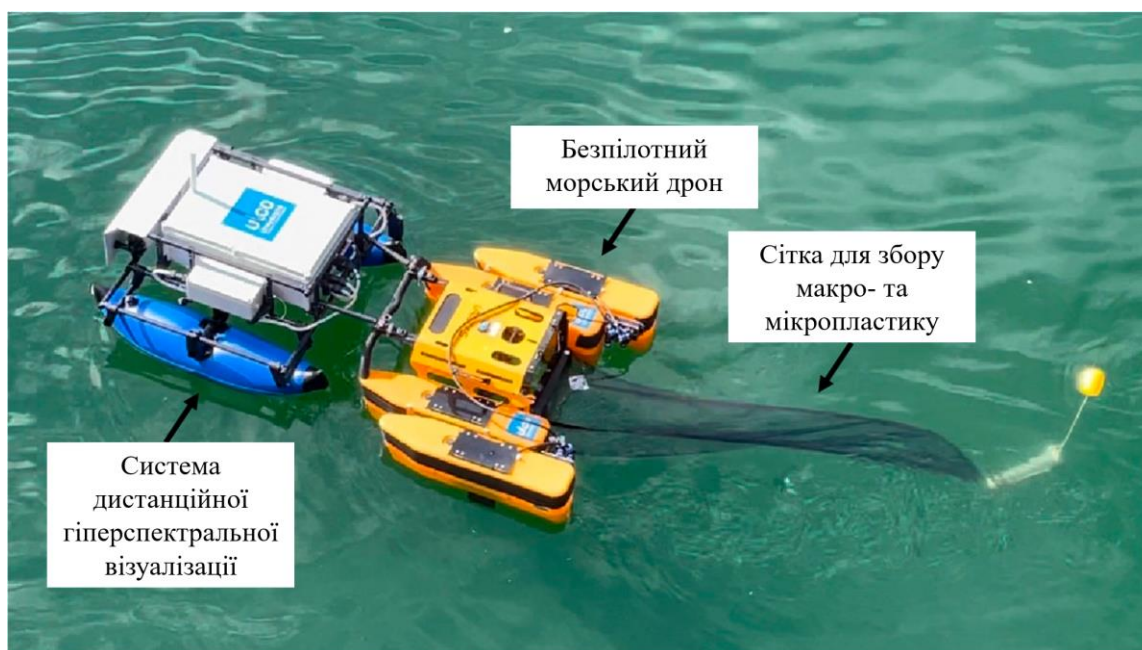


Рисунок 3.7 – Система дистанційної гіперспектральної візуалізації, що монтована на морський дрон



Рисунок 3.8 – Внутрішня будова системи дистанційної гіперспектральної візуалізації

Процес ідентифікації ґрунтується на спектральних характеристиках відбиття пластичних полімерів [12]. Наприклад, поширені полімери, такі як поліетилен, поліпропілен і поліетилентерефталат, мають чіткі особливості поглинання в діапазоні від 750 нм до 2500 нм (рис. 3.9). Спектральні відмінності дозволяють алгоритмам машинного навчання класифікувати типи пластику з високою точністю. Дослідження з використанням таких систем продемонстрували точність класифікації близько 90 %, що підтверджує їхній потенціал для оперативного розгортання.

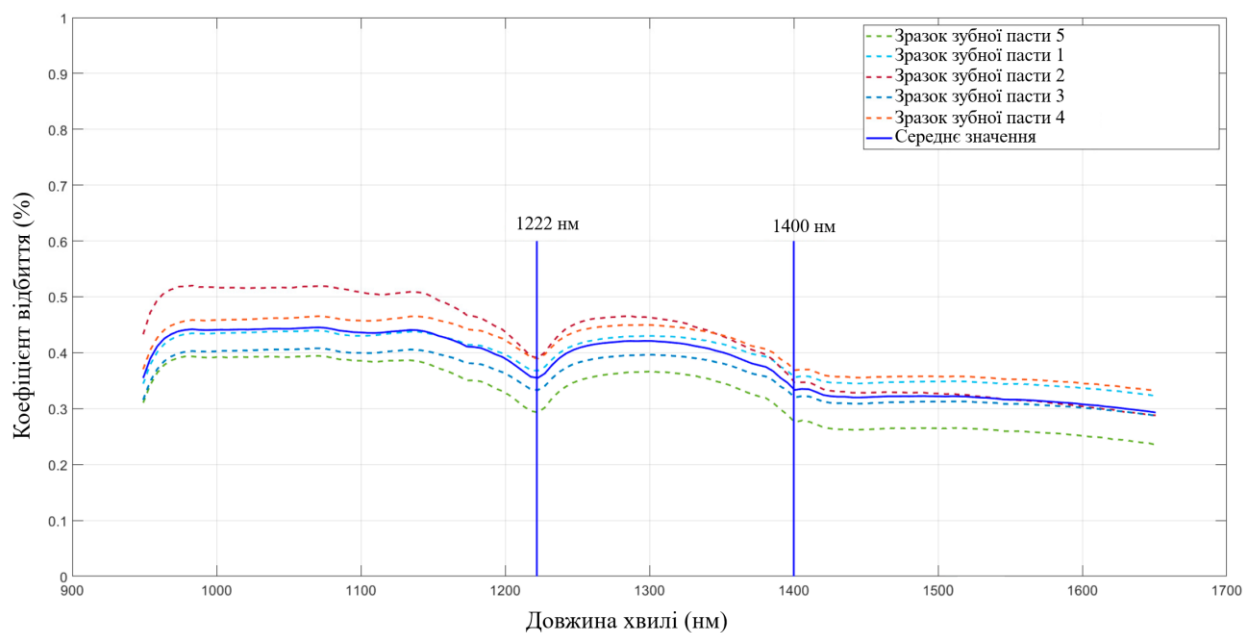


Рисунок 3.9 – Спектр поглинання поліетилену низької щільності у вигляді упаковки зубної пасти

Хоча гіперспектральна візуалізація надає значні переваги, проблеми залишаються. Висока вартість гіперспектрального обладнання і обчислювальні вимоги до обробки даних створюють бар'єри для широкого впровадження. Крім того, фактори навколишнього середовища, такі як поглинання води, вологість пластику і змішаних матеріалів, можуть впливати на точність виявлення. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію цих систем для реальних умов, підвищення їхньої надійності та економічної ефективності.

Отже, гіперспектральна зйомка є трансформаційним інструментом для вирішення проблеми пластикового забруднення водних екосистем. Поєднуючи передові сенсорні технології з машинним навчанням, ці системи пропонують потужний засіб для виявлення, класифікації та кількісної оцінки пластикових відходів, надаючи критичні дані для інформування про зусилля з очищення та формування політики. З розвитком технології вона може відігравати ключову роль у глобальних зусиллях із захисту водних середовищ від повсюдної загрози пластикового забруднення.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи проведено дослідження фізико-математичних засад лазерного дистанційного зондування. Увага була зосереджена на детальному вивченні трьох основних напрямів: лідара, спектроскопії та гіперспектральної візуалізації, а також на аналізі їх практичного застосування.

У рамках дослідження технології лідара розглянуто рівняння далекометрії, що описує принципи визначення відстаней до об'єктів за допомогою лазерного випромінювання. Також проаналізовано структуру лідарних систем, включно з джерелами випромінювання та приймачами сигналу. Розглянуто різноманітні сфери застосування лідарних систем в залежності від принципу роботи та сфери використання.

Дослідження в галузі лазерної спектроскопії включали аналіз будови спектрометрів та можливих різновидів дистанційної спектроскопії. Особливий акцент зроблено на Раманівській спектроскопії як оптимальному методі для ідентифікації речовин. Ця технологія показала високу ефективність у визначенні небезпечних хімічних сполук, моніторингу стану навколишнього середовища та аналізі земних ресурсів. Також обговорено перспективи її використання у промислових та наукових дослідженнях.

Гіперспектральна візуалізація розглядалася у контексті взаємозв'язку спектроскопії та візуалізації. Було вивчено конструкцію систем гіперспектральної візуалізації, що включають оптичні компоненти для збору, розкладання та аналізу спектрів. Окремо висвітлено можливість інтеграції гіперспектральної візуалізації з лідарними даними для моніторингу динаміки ландшафту. Як перспективний напрям зазначено використання цієї технології для виявлення та ідентифікації пластикових забруднень у морях і океанах.

Можливі напрямки розвитку лазерного дистанційного зондування включають вдосконалення технічних характеристик систем, таких як підвищення роздільної здатності, чутливості приймачів та ефективності обробки даних у реальному часі. Перспективним є інтеграція лідарних,

спектроскопічних і гіперспектральних технологій у комплексні платформи для отримання багатовимірної інформації про об'єкти та середовища. Особливу увагу слід приділити розробці мобільних автономних систем зондування, що використовують безпілотні літальні апарати, а також їх синергії з технологіями штучного інтелекту для автоматизованого аналізу даних. Крім того, актуальними є дослідження нових джерел лазерного випромінювання, зокрема у ширших діапазонах довжин хвиль, і створення енергоефективних систем, придатних для роботи у складних умовах, таких як космічний простір чи океанічне середовище.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wandinger U. Introduction to Lidar, in Lidar / edited by: Weitkamp D. C. New York: Springer. 2016. P. 1–18. URL: https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_1 (дата звернення: 10.01.2025).
2. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційновимірювальна техніка для задач військового призначення : монографія / Ю. П. Мачехін, О. С. Гнатенко, В. В. Семенець та ін. ; Харків : ФОП Панов А.М., 2019.156 с.
3. Chazette P. et al. Principle and Physics of the LiDAR Measurement // Optical Remote Sensing of Land Surface. 2016. P. 201–247. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-102-4.50005-3> (дата звернення: 10.01.2025).
4. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2. Параметри лазерного випромінювання: монографія / Ю. П. Мачехін, О. С. Гнатенко ; Харків : ФОП Панов А.М., 2021. 145 с. ISBN 978-966-637-975-0
5. Demtröder W. Laser Spectroscopy: Vol. 2: Experimental Techniques. Springer Science & Business Media, 2018. 797 p.
6. Qu H., Zongcheng L. et al. A Remote Raman System and Its Applications for Planetary Material Studies // Sensors. 2021. Vol. 21, No № 21. С. 6973. URL: <https://doi.org/10.3390/s21216973> (дата звернення: 10.01.2025).
7. Wenzhen R., Bo W. An Unmanned Vehicle-Based Remote Raman System for Real-Time Trace Detection and Identification // Photonics. 2023. Vol. 10, No 11. P. 1230. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics10111230> (дата звернення: 10.01.2025).

8. ElMasry G., Sun D.-W. Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control. Chapter 1. Principles of Hyperspectral Imaging Technology. 2019. P. 3–43. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374753-2.10001-2> (дата звернення: 10.01.2025).

9. Hyperspectral Imaging and Applications / ed.: C.-I. Chang et al. // MDPI. 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03921-523-2> (дата звернення: 10.01.2025).

10. Yuen P. W., Richardson M. An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition // The Imaging Science Journal. 2019. Vol. 58, No 5. P. 241–253. URL: <https://doi.org/10.1179/174313110x12771950995716> (дата звернення: 10.01.2025).

11. Gallay M., Eck C., Zraggen C. High resolution airborne laser scanning and hyperspectral imaging with a small uav platform // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. XLI-B1. P. 823–827. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b1-823-2016> (дата звернення: 10.01.2025).

12. Alboody A., Vandenbroucke N., Porebski A. A New Remote Hyperspectral Imaging System Embedded on an Unmanned Aquatic Drone for the Detection and Identification of Floating Plastic Litter Using Machine Learning // Sensing. 2023. Vol. 15, No 14. P. 3455. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15143455> (дата звернення: 10.01.2025).