

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)  
ЛАЗЕРНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СКАНУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ЛОЕТМ-21-1  
Пятенко М.Є.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»  
(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)

2022 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 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
(код і повна назва)

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

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пятенку Михайлу Євгеновичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерні інформаційно-вимірювальні скануючі технології

затверджена наказом університету від « 04 » листопада 2022 р. № 1445 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 26 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Технологія 3D лазерного сканування

2. Експлуатаційні характеристики лідара

3. Гіперспектральна лазерна візуалізація

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Вступ. 2 Види та принципи роботи 3D сканерів. 3 Перспективи розвитку технології гіперспектральної 3D лазерної візуалізації

Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів,  
комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_  
Демонстраційний матеріал – 19 шт. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні сканери та їх характеристики	01.09.22–27.09.22	Виконано
2	Дослідження впливу похибок на наземне лазерне сканування	28.09.22–23.10.22	Виконано
3	Виконання класифікації похибок тривимірного лазерного сканування	24.10.22–08.11.22	Виконано
4	Аналіз параметрів та похибок тривимірних лазерних сканерів	09.11.22–14.11.22	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	15.11.22–28.11.22	Виконано
6	Оформлення демонстраційного матеріалу	29.11.22–04.12.22	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	05.12.22–22.12.22	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	23.12.22–24.12.22	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	25.12.22–27.12.22	

Дата видачі завдання 01 вересня 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 43 с., 15 рис., 3 табл., 1 додаток, 26 джерел.

ЛАЗЕР, ЛІДАР, ОПТИЧНА СИСТЕМА, СКАНУВАННЯ, ХМАРА ТОЧОК, ТРИВИМІРНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СКАНЕР.

Об'єкт дослідження – інформаційно-вимірювальні лазерні технології.

Метод – тривимірне лазерне сканування.

Мета роботи – дослідження фізичних принципів конструкцій систем тривимірного лазерного сканування. Для досягнення мети у роботі вирішені такі завдання.

1. Проаналізовані фізичні та математичні досади тривимірного лазерного сканування.
2. Досліджені експлуатаційні характеристики лідара, як основи систем тривимірного лазерного сканування.
3. Досліджено технологію гіперспектральної лазерної візуалізації.

## **ABSTRACT**

Explanatory note of the qualification work: 43 pages, 14 figures, 3 table, 1 supplement, 26 sources.

LASER, OPTICAL SYSTEM, SCANNING, POINT CLOUD, LIDAR, THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNER.

The object of research is information and measurement laser technologies.

The method is three-dimensional laser scanning.

The purpose of the work is to study the physical principles of the construction of a three-dimensional laser scanning system. To achieve the goal, the following tasks were solved in the work.

1. To analyze the physical and mathematical problems of three-dimensional laser scanning.
2. Investigate operational characteristics of the lidar as the basis of the three-dimensional laser scanning system.
3. To study the technology of hyperspectral laser imaging.

**ЗМІСТ**

Вступ.....	7
1 Технологія лазерного 3D-сканування .....	8
1.1 Области застосування тривимірного лазерного сканування .....	9
1.2 Види технологій тривимірного сканування .....	10
1.3 LIDAR як основа систем 3D-сканування .....	11
1.4 Практична реалізація 3D-сканування.....	18
2 Гіперспектральна 3D лазерна візуалізація .....	21
2.1 Технології мульти та гіперспектрального зображення .....	23
2.2 Технології гіперспектроскопії.....	24
2.3 Мультиспектральний LIDAR.....	26
2.4 Гіперспектральний LIDAR.....	28
2.5 Гіперспектральний LIDAR на базі суперконтинуму .....	30
2.6 Перспективи розвитку технології гіперспектральної 3D лазерної візуалізації. ....	33
Висновки.....	40
Перелік джерел посилання .....	41
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	44

## ВСТУП

Лазерне сканування засноване на використанні оптично спрямованих лазерних променів для збирання інформації про об'єкт у прямих тривимірних вимірах. До лазерної техніки відносяться прилади (установки, пристрої), під час реалізації функцій яких використовується лазерне випромінювання.

Наприклад, в інформаційно-вимірювальних лазерних приладах відбувається виділення інформації про об'єкт, що міститься в лазерному випромінюванні; у медичних та технологічних установках лазерне випромінювання формується належним чином для впливу на об'єкт, в приймально-передаючих лазерних системах відбувається формування лазерного випромінювання та її обробка.

Лазерні прилади та системи наразі становлять такий великий обсяг, що перерахування їх зайняло б багато часу. Можна відзначити, наприклад, такі як далекоміри, локатори, системи зв'язку, гіроскопи, інтерферометри, геодезичні прилади, широкий спектр медичних установок тощо.

Технічні характеристики лазерних приладів у значній ступені визначаються властивостями лазера як джерела випромінювання. Тому при виборі конкретного лазера з їх великим спектром різноманітнім, в першу чергу значення набуває знання параметрів і характеристик, які описують властивості лазера. Частина цих параметрів та характеристик наводиться у паспорті (описанні) лазера, а деякі доводиться визначати експериментально чи розрахунковим шляхом.

## 1 ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО 3D-СКАНУВАННЯ

Лазерне 3D сканування – це сучасна технологія збору просторових даних. В результаті сканування формується тривимірна модель об'єкта – «хмара точок», що складається з набору вершин, положення кожної з яких визначається значеннями координат X, Y та Z (рис. 1.1).

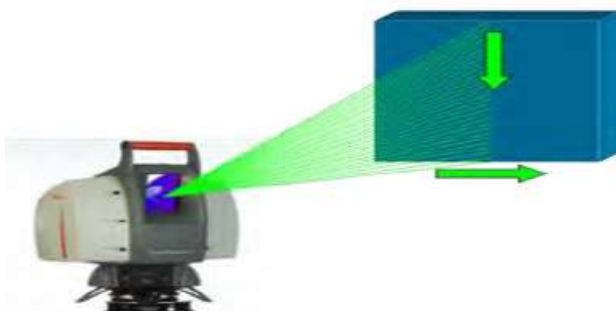


Рисунок 1.1 – Приклад роботи лазерного сканера

3D сканування може здійснюватися двома способами – стаціонарним (скануються окремі будівлі та споруди, внутрішні приміщення) та мобільним (скануються великі території, лінійні об'єкти) [1]. Технологія 3D сканування дозволяє одночасно проводити горизонтальну та висотну зйомку місцевості. В результаті роботи лазерного сканера формується «хмара точок», на основі якої будуються ортофотоплани. «Хмара точок» та ортофотоплани можуть бути представлені у різних системах координат (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад створення полігональної моделі з «хмари точок»

Технологія лазерного сканування працює наступним чином.

Перше – це польовий етап: сканер робить зйомку об'єктів. Друге – це камеральна обробка, де польові дані перетворюються на ті результати, які вам потрібні. У полі ставиться сканер в оптимальне, для зйомки об'єкта положення, натискаєте кнопку і чекаєте, поки сканер зробить свою роботу. На польовому етапі, якщо це необхідно, можна отримати панорамні знімки об'єкта і зробити дані ще більш реалістичними. Для отримання зйомки всього об'єкта виконується сканування з різних точок і виходить кілька сканів, які потім зшиваються і прив'язуються до системи координат під час сканування або пізніше. Дані сканування можуть бути точно прив'язані до потрібної системи координат, як за стандартної топографічної зйомки. Програмне забезпечення для обробки даних дозволяє користувачам створювати нескінченну кількість кінцевих проектів, починаючи від найпростіших результатів таких як двовимірні плани та висотні позначки, зрозумілі та зручні панорамні зображення з можливістю отримання вимірювальної інформації для кожного пікселя, габаритні розміри, вимірювання між точками, точками та поверхнею, вищих та нижчих позначок вузлових точок, перерізів та профілів, вимірювання об'ємів [1].

### 1.1 Области застосування тривимірного лазерного сканування

3D сканування широко використовується в геодезії та картографії, в проектуванні, будівництві та експлуатації автошляхів.

Гірська промисловість:

- визначення обсягів виробок та складів сипучих матеріалів;
- створення цифрових моделей відкритих кар'єрів та підземних виробок з метою їх моніторингу (дані про інтенсивність відбитого сигналу та реальний колір дозволяють створювати геологічні моделі);
- маркшейдерський супровід бурових та вибухових робіт.

Нафтогазова промисловість:

- створення цифрових моделей промислових та складних технологічних об'єктів та обладнання з метою їх реконструкції та моніторингу;

- калібрування нафтоналивних наземних резервуарів та танків наливних суден;

Архітектура:

- створення архітектурних креслень фасадів будівель;

- реставрація, ремонт, оздоблення, переоснащення внутрішніх приміщень чи окремих елементів декору.

Інші області:

- розробка заходів щодо запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

- виконання топографічної зйомки територій, що мають високий – рівень забудови;

- суднобудування;

- моделювання різного виду;

- створення двовимірних та тривимірних геоінформаційних систем управління підприємство [2].

## 1.2 Види технологій тривимірного сканування

Технологія 3D з'явилася всього кілька десятиліть тому, в кінці 20-го століття. Перший працюючий прототип з'явився в 60-х роках. Звичайно, тоді він не міг похвалитися широким спектром можливостей, проте це був справжній 3D сканер, непогано справляється з основною функцією [1].

В середині 80-х років скануючі пристрої вдосконалили. Їх почали доповнювати лазерами, джерелами білого світла і затемнення. Завдяки цьому вдалося поліпшити «захоплення» досліджуваних об'єктів. У цей період з'являються контактні датчики. З їх допомогою оцифровувалася поверхні твердих предметів, які не відрізнялися складною формою. Щоб удосконалити обладнання, розробникам довелося запозичити ряд оптичних технологій з

військової промисловості [3].

Застосування 3D сканерів було цікавим не тільки конструкторам дизайн-студій, автомобільних концернів, а й працівникам кіноіндустрії. У 1980-х – 2000-х роках різні компанії випускали свої моделі обладнання: Head Scanner, 3D-сканер REPLICA і інші. З тих часів агрегати змінилися, удосконалилися, стали більш мобільними і функціональними. Характеристики 3D сканера сьогодні істотно відрізняються. Пристрій 3D сканера займається детальним дослідженням фізичних об'єктів, після чого відтворюються їх точні моделі в цифровому форматі. Сучасні агрегати можуть бути стаціонарними або мобільними. Як підсвічування застосовується лазер або особлива лампа (їх використання збільшує точність вимірювань).

Виділяють два основних методи тривимірного сканування.

**Контактний.** Пристрій зондує предмет за допомогою фізичного контакту, поки об'єкт знаходиться на прецизійній повірочній поверхні. Контактний 3D сканер відрізняється надточними результатами роботи. Правда, при скануванні можна пошкодити або змінити форму об'єкта.

**Безконтактний.** Застосовується випромінювання або особливе випромінювання (ультразвук, рентгенівські промені). В даному випадку предмет сканується через відображення світлового потоку [4].

### 1.3 LIDAR як снова систем 3D-сканування

LIDAR – (Light Detection And Ranging) – це технологія дистанційного зондування. Така технологія з'явилася ще в 60-ті рр. минулого сторіччя, однак ефективно через ДДЗ та через програмне забезпечення ГІС (геоінформаційні системи) використовується лише в останнє десятиріччя. LIDAR являється активним далекоміром оптичного діапазону. Тобто це активна сенсорна система, яка посилає дружній людському оку промінь із частотою випромінювання в межах інтервалу від 10 тис. до 70 тис. сигналів у секунду, звичайно за синусоїдою, у напрямку, перпендикулярному до руху носія

скануючого пристрою. Скануючі “лідарзасоби” в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору, що вдало коригується з можливостями ГІС-платформ надавати тривимірну візуалізацію у вигляді так званої 3D-Сцени.

Лазерне сканування ґрунтується на використанні оптично спрямованих лідарних пучків для збору інформації про об’єкт у прямих 3D-вимірах. Це дає змогу системі траєкторії будувати зображення надійно і точно. Ефективність технології Lidar пояснюється її здатністю 3D-вимірювання та проникнення променів через рослинність для збору інформації про довкілля та глибини землі. Отримання інформації ґрунтується на принципах лазерного спектра. Традиційний спосіб отримання даних – це подання лазерного імпульсу до об’єкта і збір сигналу зворотного розсіювання. Обробка сигналу передбачає виявлення об’єкта на основі різних діапазонів променя світла з використанням вибору спектральних довжин хвиль для передачі збору даних [5].

Лідарне знімання виконується для різних типів проєктів залежно від поставлених завдань. Наприклад, для картографування та цивільного будівництва використовують зйомки максимальної деталізації, дані якої отримують із низьких висот (50–300 м) на міліметровому рівні (наприклад, RIEGL VUX-240 або Optech ORION C300-1). Щільність даних цього рівня становить десятки або сотні точок на квадратний метр. Для дорожнього та міського планування часто застосовують сканування середньої висоти (400–1000 м), а щільність даних зазвичай становить близько двох десятків точок на квадратний метр. Картографічні польоти дрібних масштабів проводять на висоті 2000 м і вище. Щільність даних менше десяти точок на квадратний метр, як правило, 1–2. Сучасними приладами цього напрямку застосування на ринку є Leica Terrain Mapper, Optech ALTM Pegasus і RIEGL VQ-1560i. Зазначимо, що найбільш точний сигнал записується за допомогою повного сигналу Lidar. Політ у режимі Гейгера та однофотонної технології відтворюють ряд дискретної матриці. Збільшення кута сканування впливає на сигнал відповідно до змінюваного напрямку світла через завіс (рис. 1.3). У теперішніх умовах

аерофотознімання виявилось нерентабельним і малоефективним у зв'язку з великими матеріальними затратами на утримання та експлуатацію літального апарата та всього знімального комплексу, собівартість застосування літаків і гелікоптерів у десятки разів більша. Враховуючи те, що оновлення даних про той чи інший об'єкт є досить затратним, альтернативою класичному аерофотозніманню з літаків є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яке нині широко застосовують в Україні та світі [6].

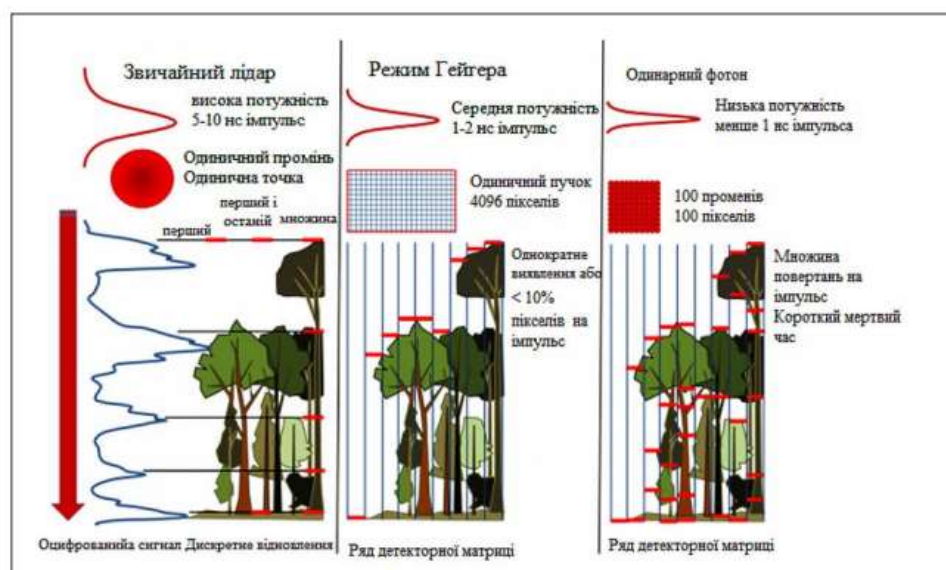


Рисунок 1.3 – Напрями роботи лідарних режимів

Існує два основних види наземних лідарів: мобільний і стаціонарний. Мобільна зйомка відбувається безпосередньо під час руху і встановлюється на транспортний засіб. При стаціонарній зйомці система лідару зазвичай встановлюється на штатив або інший нерухомий об'єкт. Обидві установки обладнані безпечними для очей лазерними установками [7].

Система наземної лазерної зйомки є більш точною і дозволяє отримувати дуже густо розташовані точки, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати об'єкти. Такі щільні хмари точок можна використовувати для управління спорудами і обладнанням, обстеження автомобільних і залізних доріг і навіть для створення тривимірних моделей міста, включаючи моделі не тільки міської

забудови, а й внутрішніх приміщень будівель і споруд.

Мобільний лідар – це набір хмар точок лазерної зйомки, яка проводиться з використанням рухомої знімальної платформи. Системи мобільного лідару можуть включати різну кількість сенсорів, встановлених під час керування автомобілем. Такі системи можуть бути встановлені на автомобілях, поїздах, морських і річкових суднах. Мобільні системи, як правило, складаються з лазерного сенсора, камер, GPS і INS (Внутрішньої навігаційної системи), так само як і системи лазерної аерозйомки (рис. 1.4).

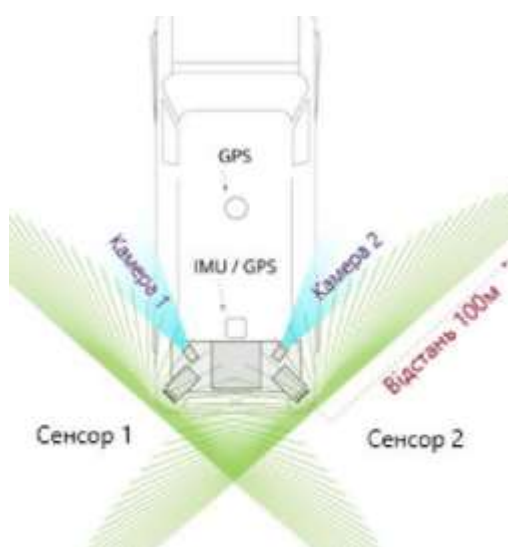


Рисунок 1.4 – Мобільний лідар

Існують різні варіанти систем LIDAR, але в загальному випадку всі вони включають такі ключові елементи, що визначають принцип роботи системи:

- джерело фотонів (найчастіше це лазер або система лазерів);
- детектор фотонів;
- ланцюг тактування;
- оптична приймально-передавальна частина.

Системи LIDAR типу Time-of-Flight, ToF використовують короткі імпульси лазерного випромінювання, з високою точністю фіксуючи моменти їх передачі і прийому відгуків (відбитих сигналів), щоб обчислити відстані до

об'єктів в навколишньому просторі або на поверхні землі (наприклад, при топозйомці з БПЛА). Після об'єднання серії таких вимірювань з інформацією про місцезнаходження і орієнтації апарату, створюється результуюча тривимірна сцена необхідної області простору. Найчастіше ця сцена зберігається у вигляді масиву координат  $(x, y, z)$ , званого хмарою точок. На рис. 1.5 показані основні компоненти системи лідар для сканування місцевості [8].

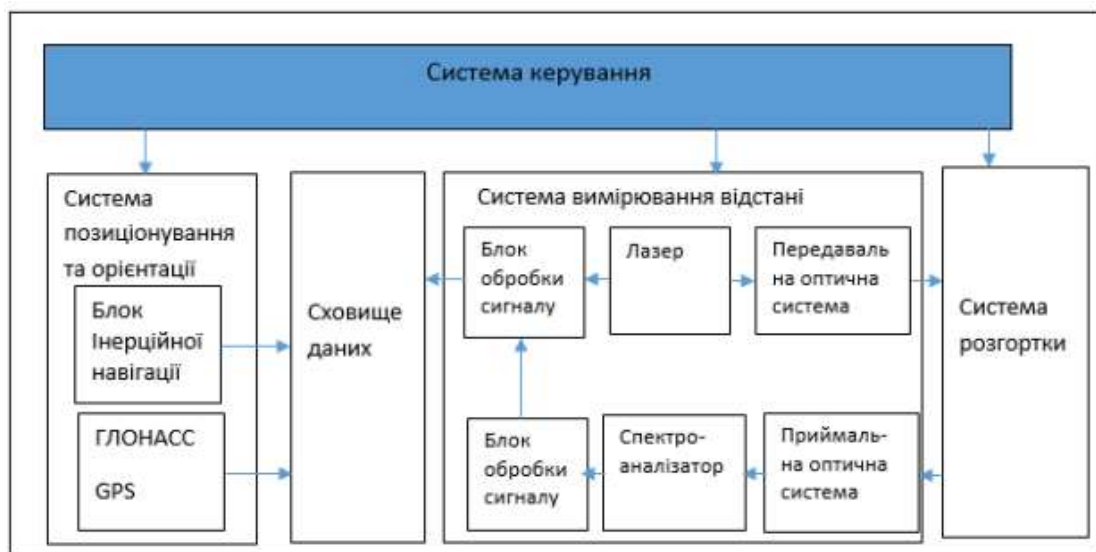


Рисунок 1.5 – Компоненти системи LIDAR

Незважаючи на те, що існує безліч пристроїв LIDAR для різних областей застосування, всі вони складаються з схожого набору функціональних вузлів (рисунок 1.5.), таких як:

- підсистема вимірювання відстані (лазерний передавач і приймач);
- скануюча підсистема;
- підсистема позиціонування і орієнтації;
- система управління;
- сховище даних;

Лазерні скануючі далекоміри працюють на різних довжинах хвиль, але частіше за інших використовуються наступні:

- 1064 нм (ближній інфрачервоний діапазон) – для топографічних

сканерів;

– 532 нм (зелений) – для батиметричних (вимірюють глибину) сканерів;

– 600–1000 нм – для наземних пристроїв, призначених для комерційного використання;

– ~1500 нм – для наземних скануючих систем, що використовуються в наукових цілях.

Зафіксовані значення моментів передачі і прийому лазерного променя використовуються для розрахунку часу, проведеного світлом в дорозі, і, отже, відстані до об'єкта, який відбив промінь. В системі LIDAR зазвичай використовується один з двох режимів, що визначають метод вимірювання відстані: імпульсний режим або режим безперервної хвилі. У системах з імпульсною модуляцією, також відомих як час прогонової системи, лазером випромінюються поодинокі світлові імпульси з високою частотою проходження. Вимірюється час, що минув з моменту випромінювання імпульсного сигналу до моменту повернення відгуку в приймач. Відстань до точки поверхні об'єкта, в якій сталося відображення лазерного променя, може бути обчислено за формулою 1.1:

$$D = 0,5ct , \quad (1.1)$$

де  $c$  – швидкість світла;

$t$  – повний час проходження світлом шляху до точки відображення і назад (раундтрип);

$D$  – шукана відстань до точки відображення.

У системах з безперервною хвилею лазер випромінює безперервний сигнал, до якого потім застосовується синусоїдальна амплітудна модуляція. В цьому випадку час проходження світлом повного шляху від передавача до приймача буде прямо пропорційно зсуву фаз в випромінюваному і прийнятому сигналах:

$$t = \frac{\varphi}{2\pi} T, \quad (1.2)$$

де  $\varphi$  – фазовий зсув;

$T$  – період сигналу.

Після визначення часу  $t$  проходження променя, відстань  $D$ , як і в першому випадку, обчислюється за формулою (1.1.). Для зниження невизначеності може бути використана багатотонава синусоїдальна модуляція. Також в системах з безперервною хвилею використовується альтернативний метод – з лінійною частотною модуляцією.

Усю сукупність похибок у величинах, що вимірюються лазерним скануванням, можна розділити на дві групи.

1. Інструментальні, зумовлені якістю складання та юстирування механічних, оптичних та електронних частин приладу.

2. Методичні, джерелом яких є сам метод визначення величин за допомогою лазерного сканування [9].

Величини похибок першої групи фактично відображаються в технічному паспорті сканера і спочатку визначаються на етапі складання та юстування приладу, а потім періодично: під час калібрування та метрологічної атестації. Результатом таких досліджень є висновок про відповідність (невідповідність) точності роботи окремих блоків приладу заявленим характеристикам. Інструментальні похибки, як правило, можна виключити лише заміною частин та/або технології виготовлення приладу. Методичні похибки зазвичай можна враховувати під час обробки результатів вимірів. Стосовно наземного лазерного сканування методичні похибки можна розділити на такі:

а) похибки, викликані навколишнім середовищем (атмосферною рефракцією, загасанням електромагнітних хвиль, вібрацією приладу тощо);

б) похибки, зумовлені характеристиками об'єкта сканування (розміром, орієнтацією, кольором, текстурою тощо).

Для визначення та обліку методичних похибок у результатах наземного лазерного сканування існує два основні підходи. Сутність першого полягає у роздільному оцінюванні впливу кожного фактора. Другий підхід заснований на

комплексному обліку впливу всіх факторів, аналогічно до того, як виконується виключення систематичних похибок у координатах точок знімків при їх фотограмметричній обробці. За допомогою першого підходу усувають основну (велику) частину систематичних похибок з результатів вимірювання кутів та відстаней сканером, причому такий виняток виконують на так званому етапі попередньої обробки сканів. Решту систематичних похибок усувають за допомогою комплексного підходу, для чого зазвичай використовують поліноміальні моделі. Виняток спотворень у координатах точок сканів за допомогою комплексного підходу є найбільш універсальним [10].

#### 1.4 Практична реалізація 3D-сканування

Leica 3D Disto (рис 1.6) – сучасна вимірювальна система, з неперевершеною точністю! Тривимірна вимірювальна система для внутрішніх та зовнішніх робіт. Точність: 4 мм на 50 м. Дальність: від 0,5 м до 50 м. Цифровий візир зі збільшенням 4x. Багатий функціонал, підтримка повноцінних кутомірних вимірювань, робота із CAD файлами \*.DXF, \*.DWG, інтерфейс WLAN (Wi-Fi). Ступінь захисту: IP54. Ідеальний варіант для меблевих майстерень, сходових майстерень, кам'яних майстерень, архітектурних та дизайнерських бюро [11].



Рисунок 1.6 – Leica 3D Disto

Leica 3D Disto виявляє розташування і висоту точки вимірювання. Дані збираються і зберігаються, а також можуть бути використані для пост обробки. Висновок: ефективний, точний і швидкий інструмент, який революційно легкий в зверненні (рис. 1.7).

Основні можливості Leica 3D Disto:

- Вимірювання положення, висоти і відстані в будь-якому напрямку з одного місця, в разі необхідності лише в зоні прямої видимості;
- заміри стелі, підлоги, покрівлі, розрахунок обсягу, похилих поверхонь, перепаду висот, кутів;
- вертикальна проекція точок, паралельний перенос розмітки щодо базової осі, передача рівня від стіни до стіни;
- передавання лінійок на екрані в реальному часі;
- позиційно точне уявлення виміряних точок на екрані, над зображенням видошукача;
- імпорт та експорт даних на ПК і USB накопичувач в форматах DXF, CSV, TXT, JPG. Можливість обробки в програмі AutoCad;
- наявність видошукача з 8-кратним цифровим зумом для більш точного наведення на великих відстанях [11].



Рисунок 1.7 – Практичне використання Leica 3D Disto

Проектор. Відображення точок або геометричних сіток на будь-якій площині. Допускається імпорт розрахункових даних в форматі DXF або в табличному вигляді, а також введення параметрів геометрії вручну - незамінне при розбивці складних планів на будь-яких поверхнях.

Сканування приміщення. 3D DISTO надає практичні засоби вимірювання розмірів приміщень, стін, вікон, сходів та інших елементів із зазначенням базової висоти. Працює в ручному і автоматичному режимі.

Інструменти. Прості і точні засоби встановлення вертикалі (схилу), наведення, визначення необхідної висоти щодо базової, передачі рівня від стіни до стіни, створення паралельних ліній.

Переміщення – функція переходу між точкам стояння, що дозволяє відновлювати орієнтування інструмента за наявними точкам [12].

## 2 ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНА 3D ЛАЗЕРНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ

Спектр речовини – залежність інтенсивності поглинання (вилучення або розсіювання) електромагнітного випромінювання атома (молекули) від частоти (або довжини хвилі) випромінювання.

Спектроскопія – процес отримання та інтерпретації спектра.

В залежності від умов експерименту спектр складається з широких смуг або спектральних ліній.

Спектроскопія – фізичний метод дослідження закономірностей взаємодії електромагнітного випромінювання (світла) із хімічною речовиною. Такі взаємодії можуть супроводжуватися: поглинанням, випромінюванням або розсіюванням електромагнітного випромінювання. Взаємодія електромагнітного коливання з хімічною речовиною призводить до переходів між енергетичними рівнями речовини (атома чи молекули). Спектроскопія дозволяє отримувати відомості про енергетичні стаціонарні стани атомів або молекул на підставі переходів між цими станами [13].

Основні завдання спектроскопії:

1. Ідентифікація з'єднань – встановлення будови.
2. Визначення якісного та кількісного складу сумішей неорганічних та органічних речовин.
3. Визначення енергетичних та геометричних характеристик атомів та молекул.
4. Вивчення внутрішньо- та міжмолекулярних взаємодій.
5. Дослідження кінетичних властивостей хімічних реакцій.
6. Візуалізація об'єктів.

Види спектроскопії: Мес-бауерівська спектроскопія, метод парамагнітного резонансу, метод ядерного магнітного резонансу, лазерна спектроскопія.

Лазерна спектроскопія. Просторова та часова когерентність лазерного випромінювання уможливила когерентне збудження енергетичних рівнів

частинок, що значно збільшило спектральний дозвіл у вимірах електромагнітних переходів у досліджуваних середовищах.

Можливості лазерної спектроскопії:

1. Лазерна спектроскопія дозволила розпочати вирішення низки принципово важливих завдань, насамперед до досягнення межі чутливості спектрального аналізу атомів і молекул. За допомогою лазерного випромінювання вдається реєструвати близько 100 атомів у кубічному сантиметрі (флуоресценція парів Na, що збуджується лазером видимого діапазону, що перебудовується).

2. Запропоновано методи лазерного детектування окремих атомів та молекул за рівнем чутливості, доступною кращим мас-спектрометрам.

3. Методи лазерної спектроскопії, на відміну методів мас-спектрокопії, дозволяють детектувати як тип частинки, а й визначати її квантовий (електронний, коливальний, обертальний) стан.

4. Досягнення високої роздільної здатності, що визначається розширенням спектральних ліній речовини, стало особливо суттєвим для спектроскопії газів в інфрачервоній області.

Спектральна роздільна здатність спектрографа або частотного спектра є мірою його здатності розділяти елементи в електромагнітному спектрі. Зазвичай він позначається як  $\Delta\lambda$  і тісно пов'язаний з роздільною здатністю спектрографа, що визначається як:

$$R = \Delta\lambda/\lambda, \quad (2.1)$$

де  $\Delta\lambda$  це найменша різниця у довжинах хвиль, яку можна розрізнити на довжині хвилі  $\lambda$  [14].

## 2.1 Технології мульти та гіперспектрального зображення

В той час як око людини сприймає кольори видимого світла в основному трьох смуг спектру, спектральне зображення поділяє спектр на багато більшу кількість смуг. Ця методика поділу зображення на смуги може використовувати спектри за межами видимого.

Мультиспектральне зображення (МЗ) це технологія отримання зображення, в якому дані фіксуються у певних діапазонах довжин хвиль в електромагнітному спектрі. Довжини хвиль можуть розділятися за допомогою оптичних фільтрів або із використанням сенсорів, що чутливі до конкретних довжин хвиль, в тому числі світло УФ та ІЧ діапазонів. Спектральна візуалізація дозволяє отримати додаткову інформацію, яку не можна побачити людським. МЗ вимірює світло в невеликій кількості (зазвичай від 3 до 15) спектральних діапазонів. Фрагмент спектру ЕМВ, що використовується в МЗ:

- синій – від (450–515) нм до 520 нм, використовується для зображення атмосфери і глибоководдя, в чистій воді може проникати на глибину до 50 м;
- зелений – від (515–520) нм до (590–600) нм, використовується для зображення рослинності та глибоководних структур, до 30 м в чистій воді;
- червоний – від (600–630) нм до (680–690) нм, використовується для зображення техногенних об'єктів, в воді до 9 м в глибину, ґрунтів, і рослинності;
- близький ІЧ – від 750 нм до-900 нм, в основному використовується для зображення рослинності;
- серединій ІЧ – від 1550 нм до 1750 нм, використовується для зображення рослинності, вмісту вологи в ґрунті, і іноді лісових пожеж;
- далекий ІЧ – від 2080 нм до 2350 нм, використовується для зображення ґрунтів, вологи, геологічних ознак, силікатів, глини, і вогню;
- термальний – від 10400 нм до 12500 нм, реєструє випромінені, а не відображені хвилі, для зображення геологічних структур, термальної різниці в

течії води, вогню, і для нічного спостереження.

Гіперспектральне зображення (ГЗ), як і інші методи спектрального зображення, збирає і обробляє інформацію про електромагнітний спектр. Для ГЗ доступними є сотні неперервних спектральних смуг. Задачею ГЗ є отримати спектр для кожного пікселя зображення сцени, з метою:

- а) знаходження об'єктів;
- б) визначення матеріалів;
- в) здійснення процесів розпізнавання.

Два основні види спектральних зображень.

1. спосіб отримання зображення за типом лінійного сканера, які зчитують зображення за деякий час;

2. спосіб, що дозволяє отримати моментальний знімок з використанням масивів, що генерують зображення в одну мить де  $\Delta\lambda$  це найменша різниця у довжинах хвиль, яку можна розрізнити на довжині хвилі  $\lambda$  [15].

В ГЗ, записані спектри мають чітку роздільну здатність відповідно до довжин хвиль і охоплюють широкий діапазон довжин хвиль. ГЗ вимірює неперервні спектральні смуги, на відміну від мультиспектрального зображення яке вимірює розділені спектральні смуги.

Гіперспектральні сенсори і системи обробки їх даних будують для застосувань в астрономії, сільському господарстві, біомедичній інженерії, геології, фізиці, спостереженні, системах машинного зору. Гіперспектральні сенсори дивляться на об'єкт у широкій смузі електромагнітного спектру. Конкретні об'єкти залишають унікальні «відбитки» в електромагнітному спектрі, відомі як спектральні підписи. Ці «відбитки» дозволяють ідентифікувати матеріали з яких складається сканований об'єкт.

## 2.2 Технології гіперспектроскопії

Технологія ГЗ набула обертів в останні десятиліття, оскільки як широкосмугове генерування світла, так і світлочутливі компоненти

(гіперспектральні камери) зробили значний стрибок вперед. Новітні технічні розробки призвели до створення мініатюрних датчиків, керованих MEMS (мікроелектрична та мікромеханічна система), для використання в смартфонах, дронах та CubeSats (Nano-satellite). Ці та інші розробки відкрили можливості дистанційного зондування та вимірювання, починаючи від моніторингу лісу до розпізнавання обличчя за допомогою штучного інтелекту (ШІ) [16].

Дистанційне зондування (ДЗ) на основі ГЗ об'єднує спектральні та просторові дані. Тенденція в цьому напрямку полягає в тому, щоб доповнити гіперспектральні камери однохвильовими лідарами. Ще зовсім недавно дослідники розглядали створення гіперспектрально-лідарних приладів, в яких тривимірні дані хмари точок із сигналу лідара включали гіперспектральну інформацію. Іншим підходом до дистанційного зондування є об'єднання технології ГЗ та гіперспектрального лідара. У ДЗ як традиційні камери, так і однохвильовий лідар можуть зробити досить багато самі по собі. Для ДЗ рослинності, наприклад, обидві технології здатні класифікувати дерева в лісі, застосовуючи спеціальні алгоритми обробки даних. Але додаючи спектральний вимір і доповнюючи його просторовою інформацією, можна значно покращити точність класифікації. Гіперспектральні камери можуть отримувати більш точну статистику умов, і вимірювати певні екологічно важливі характеристики, такі як рівень хлорофілу та вологості, що важко визначити кількісно за допомогою звичайних камер. Багат шаровість просторових даних з лідара ще більше покращує точність статистичних даних. Це також підвищує здатність до обчислення об'ємної інформації, наприклад щільність дерев. Ці переваги стосуються не лише досліджень рослинності, але й багатьох інших завдань.

Гіперспектральні камери доповнені однохвильовим лідаром стають зрілою технологією. Це порівняно проста комбінація має кілька переваг: відносно низька вартість, хороша доступність компонентів і, у більшості випадків, безпечна для очей операція. Точність приладу, однак має тенденцію до масштабування з витратами. І технологія все ще стикається з низкою проблем, у тому числі: обмежена роздільна здатність камери, точна реєстрація

між зображенням з камери та даних лідара, а також неоднчасне захоплення спектральних даних відносно просторових даних [17].

Реєстрація даних і неоднчасний збір даних стають особливо проблематичними в нестатичних ситуаціях, наприклад, під час польоту на приладі над ціллю. Багато реалізацій гіперспектральних камер використовують просторове сканування, спектральне сканування або обидва. Сканування передбачає обмежений час збору даних; отже, якщо відносна цільова позиція переміщується під час сканування, результати можуть бути спотвореними. Моментальний знімок гіперспектрального зображення може уникнути цього, зафіксувавши обидва спектральну та просторову інформацію одночасно. Там однак є компроміс між вартістю та роздільною здатністю точність і продуктивність, які необхідно враховувати при оцінці конкретного рішення камери. Незалежно виду камери, узгоджена реєстрація даних лідара і даних камери залишається проблемою, оскільки часові рамки отримання хмари точок значно відрізняються від системи камери, нестационарної цілі вносять помилки. Ці аспекти знаходяться в стадії активності дослідження і зазвичай розглядаються статистично.

### 2.3 Мультиспектральний LIDAR

Деякі з наведених проблем можна подолати шляхом інкорпорації спектральних вимірювань безпосередньо в лідар. Мультиспектральні лідари мають дві або більше довжин хвиль (зазвичай через використання кількох лазерів), що дозволяє отримувати різні цільові характеристики в залежності від довжини хвилі. Одним із найперших завдань для таких інструментів було у морській батиметрії — картографування глибин океану. У цих приладах імпульси від 532-нм лазера використовуються для проникнення в товщу води та картографування морського дна, тоді як імпульси від лазера 1064 нм вимірюють висоту до водної поверхні (рис. 2.1).



Рисунок 2.1– Titan ALTM - перший комерційний мультиспектральний лідарний датчик с трьома активними каналами довжини хвилі (1550, 1064, і 532 нм)

Можна реалізувати мультиспектральну лідарну технологію у спосіб, який дозволяє одночасне захоплення цільових спектральних характеристик на кожній довжині хвилі, що використовується. Ця здатність долає багато проблем із реєстрацією даними. На практиці, однак реалізація багатоспектрального лідару, що використовує кілька дискретних лазерів, може бути складною з точки зору оптики, і точності вимірювання, які вимагають ретельного вирівнювання лазерних променів [18].

Проблеми. Всі методи, що використовують лідар, страждають від деяких загальних проблем: обмежений діапазон вимірювання (зазвичай кілька сотень метрів для безпечних для очей систем); низька частота пульсації; погана кутова роздільна здатність. Фундаментальна проблема полягає в оптичному фокусуванні. Лідари, як правило, працюють у широкому діапазоні відстаней, і реалізація автофокусування є складним якщо не неможливим завданням. Як правило, оптика розрахована на фіксований фокусний діапазон або нескінченність. Через затухання і розбіжність лазерного імпульсу, інтенсивність відбитого світла — «коефіцієнт зворотного розсіювання» — загалом обернено пропорційний квадрату відстані. Фокуруючі властивості збиральної оптики можуть внести додаткові втрати, коли ціль не знаходиться у фокусній точці збиральної оптики.

## 2.4 Гіперспектральний лідар

Гіперспектральний лідар – лідарні прилади, які намагаються надати повну спектральну інформацію в кожній точці тривимірної хмари точок — це остання розробка, спрямована на об'єднання спектральних і просторових даних (рис. 2.2). Слово гіперспектральний означає використання широкосмугового джерела світла та здатність фіксувати широкосмуговий спектральний відгук цілі, навіть якщо збір даних не може бути безперервним.

Є декілька прототипів гіперспектрального лідара. Наприклад, лідар з широкосмуговим лазером, коли світло генерується джерелами суперконтинууму.

Вимірювання спектрального відгуку може бути реалізовано кількома способами. Деякі інструменти використовують інтерферометр Фабрі-Перо або подібні керовані фільтри для вибору одного вузького вікна довжини хвилі, а потім сканує це вікно. Ця техніка спектрального сканування вимагає ряд послідовних лазерних імпульсів для покриття повного діапазону довжин хвиль. Поки цей метод не забезпечує спектральні дані високої роздільної здатності в нестационарних системах, так як кожен імпульс  $i$ , отже, кожне вимірювання довжини хвилі може бути взяті в дещо інших точках мішені.



Рисунок 2.2 – Отримання гіперспектральних даних від імпульсів лідара

Інший тип конструкції використовує звичайний спектрографічний підхід у поєднанні з масивом фотосенсорів. У цих інструментах відбитий імпульс проектується на ґратчастий або призмений спектрограф на матрицю фотодіодів, фокусуючи різні діапазони довжин хвиль на різні фотодіодні елементи. Такий підхід дозволяє одночасне захоплення спектральних даних від одного лазерного імпульсу [19].

Третє рішення полягає у використанні дихроїчно-дзеркальної основи фільтрація за допомогою дискретних фотодатчиків. Як і з спектрограф, цей підхід ділить довжину хвилі діапазону вимірювання на дискретну кількість каналів.

Системи розвиваються. Додавання алгоритмів вищого рівня, наприклад на основі ШІ розпізнавання цілі або одночасна локалізація і відображення simultaneous localization and mapping - SLAM) – для обробки спектральної 3D-точок хмари висуватиме ще більш суворі вимоги.

## 2.5 Гіперспектральний LIDAR на базі суперконтинууму

Призначення оптичної гребінки – вимірювання абсолютних частот лазерного випромінювання. На рисунку представлена схема синтезатора фемтосекундної лазерної гребінки. Кожен колір, кожен поділ є частотою як випромінювання, так і частотою для виміру. утворюється своєрідна лінійка (рис. 2.3).

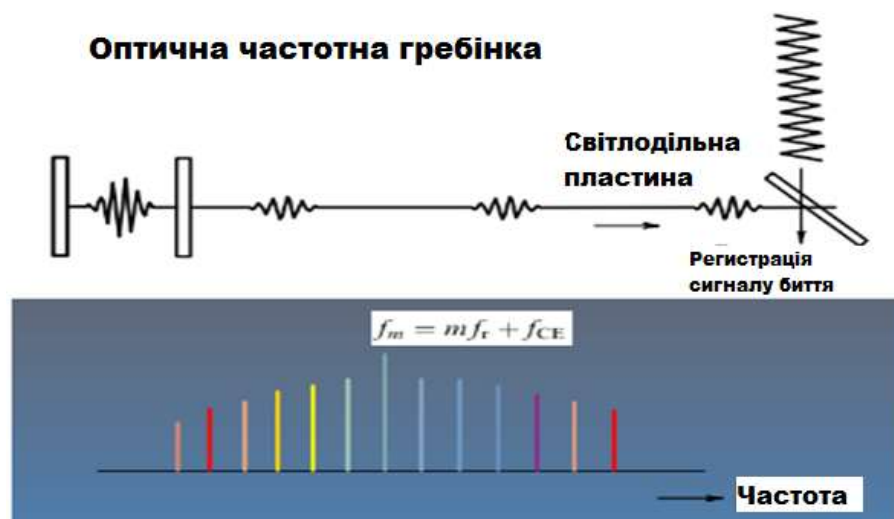


Рисунок 2.3 – Схема синтезатора фемтосекундної лазерної гребінки

Звичайно, відтворюваність частоти (довжини хвилі) важлива характеристика, але для лінійних вимірів необхідно знати абсолютне значення довжини хвилі випромінювання (абсолютну частоту). Для виміру абсолютних оптичних частот створювалися радіочастотні мости й з їхньою допомогою дотепер вимірювали частоту лазерів в оптичному діапазоні. Сучасна техніка для виміру оптичних частот заснована на технології з використанням фемтосекундних лазерів.

Слід зазначити, що розвиток цієї технології тільки почався, тому вартість експериментального обладнання дуже висока. Із-за цього роботи з фемтосекундними лазерами не стали ще широкомасштабними. Щоб вимірювати з використанням цієї техніки абсолютне значення оптичної частоти

необхідно знати параметри оптичного дискретного спектру випромінювання імпульсного лазера [7]

У данному прикладі в якості джерела випромінювання, запропоновано використання фемтосекундного лазера, за допомогою якого формується оптична гребінка [20].

Випромінювання лазера являє собою послідовність імпульсів, які є копіями одного і того ж імпульсу (рис. 2.4). Час між імпульсами:

$$T_0 = \frac{2L}{V_{gr}}, \quad (2.1)$$

де  $V_{gr}$  – швидкість поширення імпульсу в резонаторі;

$L$  – довжина резонатора.

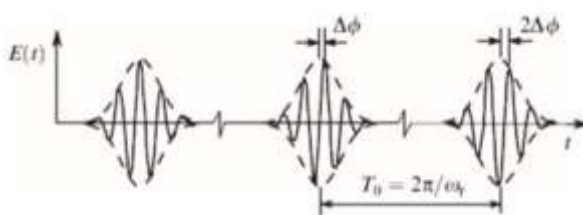


Рисунок 2.4 – Часові характеристики

Але імпульси не зовсім однакові внаслідок того, що їх огинаюча поширюється зі швидкістю  $V_{gr}$ , а несуча хвиля з частотою  $\omega c$  – є фазовою швидкістю. Після кожного обходу резонатора несуча хвиля набуває фазовий зсув  $\Delta\phi$  щодо обвідної (рис. 2.5). Значення частоти повторення імпульсів зазвичай знаходиться в межах до 100 МГц і визначається геометрією резонатора лазера:

$$\omega r = \frac{v_g}{2L} \quad (2.2)$$

де  $v_g$  – групова швидкість випромінювання всередині резонатора.

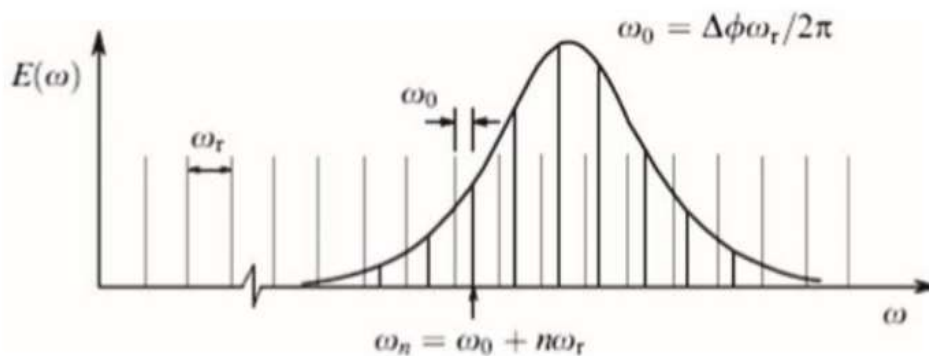


Рисунок 2.5 – Спектральні характеристики

Частота  $\omega$ , відповідна піку гребінки з номером  $N$ , визначається співвідношенням:

$$\omega_n = \omega_r \cdot N + \omega_0, \quad (2.3)$$

де  $\omega_0$  – зміщення піку з номером  $N = 1$  «ідеальної» частотної сітки, яка перекриває весь частотний діапазон, щодо  $\omega = 0$ . Наявність цього частотного зсуву обумовлено різницею між фазовою і груповою швидкостями випромінювання в резонаторі лазера.

Оптична гребінка в чомусь подібна лінійці. З її допомогою можна вирішувати складні метрологічні і спектроскопічні завдання: вимірювати інтервали між двома різними оптичними частотами, визначати невідомі частоти в тих діапазонах, в яких іншим способом їх виміряти важко, якщо взагалі можливо. Їх можна використовувати в надточних годинниках, супутникових системах позиціонування, в лазерній спектроскопії високої роздільної здатності, для генерації електромагнітного випромінювання з низьким рівнем шуму, для аналізу стану холодних атомів або іонів і ін. Практичне застосування оптичної гребінки – застосовуються, як стандарти частоти [21].

## 2.6 Перспективи розвитку технології гіперспектральної 3D лазерної візуалізації

Розроблення подібних систем вимагає вирішення низки питань. Одна важлива проблема включатиме оптимізацію та компроміси між безпекою очей, діапазоном вимірювання та спектральний дозвілом. Інші проблеми полягають у величезних обсягах даних, які ці системи збирають у 3D хмари точок лідара з просторовою інформацією високої роздільної здатності в 3D, і з кожною точкою  $(x, y, z)$ , включаючи спектр як четвертий вимір. Інші питання стосуються проектування оптики та оптимізації, між ними - спектральна роздільна здатність і чутливість. Особливе занепокоєння в дизайні оптики викликає складність створення рівного спектрального відгуку у всьому діапазоні довжин хвиль вимірювання – частково оптична проблема, а частково проблема внаслідок чутливості фотосенсора.

Незважаючи на ці та інші виклики, гіперспектральний лідар має перспективи як система надійної ідентифікації цілей і просторово-роздільного моніторингу великої території, особливо у поєднанні з машинним навчанням та іншим методами розпізнавання цілей штучного інтелекту (ШІ). Нижче будуть приведені приклади приладів в яких застосовується безпосередньо система лідар і наскільки ця система має великий обсяг в різноманітних приладах і установках.

Багатоволоконний спектрометр S200-MF (рис 2.6). S200-MF – це представник нового покоління спектрометрів з високою просторовою роздільною здатністю по всій площі комерційно доступних двокоординатних (матричних) датчиків зображення. Завдяки інноваційній оптичній схемі та спеціально розробленій оптиці з корекцією аберацій спектрометр S200-MF має повну компенсацію астигматизму як у центрі світлочутливої зони детектора, так і на краях. Це дозволяє приєднати до вхідної щілини спектрометра оптичний багатоволоконний кабель і одночасно отримувати спектри від декількох світловодів. Максимальна кількість світловодів у кабелі залежить від

висоти світлочутливого майданчика детектора та від діаметра світловода. При використанні стандартних датчиків заввишки близько 6 мм, число одночасно аналізованих світловодів може досягати декількох десятків [22].



Рисунок 2.6 – Спектрометр S200-MF

Отже, за допомогою S200-MF можна одночасно реєструвати не один спектр як у випадку традиційного спектрометра, а два, п'ять, десять, двадцять і більше спектрів відповідно до вимог Вашого аналітичного завдання. В табл. 2.1 наведені основні технічні характеристики спектрометра S200-MF.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики S200-MF

Спектральний діапазон чутливості детектора, нм	200–1100
Фокусна відстань, мм	191
Відносний отвір	1:8,5
Вхідна щілина (одна з рядку), мкм	Фіксовані ширини: 20, 30, 50 або 100
Спектральне розширення	Залежить від обраної дифракційної решітки
Модель ПЗС-детектора	S10140-1109
Кількість пікселів	2068 × 512

Продовження табл. 2.1

Кількість активних пікселів	2048 × 506
Розмір пікселя, мкм	12 × 12
Розмір світлочутливої зони, мм	24,576 × 6,072
Максимум спектральної чутливості, нм	600
Квантова ефективність в максимумі	> 90 %
Нерівномірність чутливості	± 3 %
Антиблюмінг	ні
АЦП, біт	16
Швидкість зчитування даних, кГц	250
Середньоквадратичний шум читання, відліків АЦП	< 12
Динамічний діапазон	~ 5 400 : 1
Час експозиції	від 8,3 мсек до 3 сек
Час обробки кадра у режимі підсумовування рядків, мс	9,39
Термоелектричне охолодження	ні
Робоча температура	від 10 °С до 30 °С
Інтерфейс зв'язку з комп'ютером	Full Speed USB
Синхронізація	IN/OUT
Вимоги до внутрішнього синхроімпульсу: – полярність; – амплітуда, В; тривалість імпульсу по пів висоті, мкс	позитивна 3–15 5-20 BNC-58
Механічний затвор (для роботи з безперервними сигналами, опція): – час відкриття/закриття, мс мінімальний час між відкриттями, мс	< 15 80
Оптичний вхід	багатожильний оптичний світловод (потрібне узгодження специфікації світловода) без світловідвода
Розмір, мм Вага кг	283 × 129 × 123 4,4

Джерело суперконтинууму з розширеним УФ-діапазоном.

Нове джерело суперконтинууму охоплює широкий спектральний діапазон від 320 нм до 2200 нм і має загальну вихідну потужність понад 250 мВт (рис. 2.7). Блок керується одним рухом і може бути монтований у стійку або інтегрований у різні оптичні системи. Джерело має невеликі габаритні розміри та ефективно економить простір [23, 24].



Рисунок 2.7 – Графік проходження вхідного пучка через призму

Типовий спектр:

- а) вихідний пучок  $M2 < 1,2$ ;
- б) вихідний пучок після проходження через призму.

Застосування:

- флуоресценція з тимчасовим дозволом;
- флуоресцентна обробка зображень (FLIM);
- флуоресцентна кореляційна спектроскопія (FCS);
- стимульована емісійна мікроскопія (STED);
- ідентифікація одиночних фотонних випромінювачів;
- спектроскопія одиночних молекул.

В табл. 2.2 наведені характеристики джерела супеконтинууму з роширенням УФ-діапазона.

Таблиця 2.2 – Характеристики джерела супеконтинууму з роширенням УФ-діапазона.

Діапазон довжин хвиль	
Загальна потужність	> 250 мВт, 2,5МГц
Потужність у видимому діапазоні (320–850) нм	> 40 мВт, 2,5 МГц
Тривалість імпульсів (за ТЗ)	100 пс – 2 нс
Частота слідування (зовнішній або внутрішній тригер)	2 кГц – 2,5 МГц
Вихід променя (одиначний режим)	Коліматор або FC/APC
Довжина кабелю виводу, м	1,5 – 4
Інтерфейс	USB
Габаритні розміри (19* 1U rack)	210 × 300 × 60
Вага, кг	< 5

Гіперспектральні камери. Камерами гіперспектральної візуалізації Resonon можна керувати за допомогою програмного забезпечення SpectronPro, яке керує камерами та етапом сканування та має безліч інструментів для аналізу гіперспектральних даних. SpectronPro також має можливість приймати плагіни користувача, дозволяючи користувачеві інтегрувати користувацькі алгоритми аналізу даних в SpectronPro [25, 26] .

Доступна безкоштовна версія SpectronPro разом із зразками кубів даних.

Для клієнтів, які хочуть інтегрувати гіперспектральні камери Resonon у власну програмну систему, доступний комплект для розробки програмного забезпечення C++. Доступно у Windows та Linux.

Камера Pika NUV (рис. 2.8) для гіперспектральної зйомки у ближньому ультрафіолеті охоплює спектральний діапазон від 350 нм до 800 нм. Включає спеціальний об'єктив із високими характеристиками, оптимізований для отримання зображень в ультрафіолетовому діапазоні [25].



Рисунок 2.8 – Гіперспектральна камера Pika NUV

В табл. 2.3 наведені порівняльні характеристики камер Pika NUV та Pika Nir-f.

Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики камер Pika NUV та Pika Nir-f

	Pika NUV	Pika Nir-f
Спектральний діапазон, нм	350–800	900–1700
Спектральне розширення, нм	2,5	12,5
Число спектральних каналів	184	64
Число просторових каналів	1600	64

Продовження табл. 2.3

Максимальна частота кадрів, кадр/сек	67	1000
Радіометричне розширення, біт/піксель	12	16
Вага, кг	2,1	2,7
Габарити, см	10,0 × 26,4 × 7,3	12,3 × 22,0 × 7,9
Тип з'єднання	GigE, CameraLink	CameraLink
Допустимі температури, °C	0–45	0-50
$f/\#$ , мм	2,4	1,8
Характеристики світлової плями, лм	8	10
Ступінь спектрального спотворення, Вт/ср	4	10
Ступінь спектрального спотворення, Вт/ср	6	10

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню фізичних принципів роботи, конструкції тривимірного лазерного сканера та запропонуванню напрямків його вдосконалення.

Для досягнення цієї мети були вирішені такі задачі.

1. Досліджено основні принципи роботи та схеми тривимірних лазерних сканерів. Описані та проаналізовані 3D лазерні сканери різних конструкцій, а саме основою яких є імпульсні або фазові далекоміри.

2. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження окремих джерел похибок, що впливають на точність створюваної продукції за даними наземного лазерного сканування.

3. Сформульовано напрямки підвищення точності роботи сканерів. Було виконано класифікацію похибок точності роботи 3D-сканерів та причини їх виникнення.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Батраков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы // Радиотехника. 1988. С. 448.
2. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. Київ: Вища школа, 1988. 383 с.
3. Широкова Т.А., Егорченкова Е.А., Комиссаров А.В. Априорная оценка точности создания цифровых моделей местности и рельефа по данным наземного лазерного сканирования // Инженерные изыскания. 2012. № 12. С. 58–60.
4. Курской Ю.С. Теоретическая модель измерения параметров лазерного излучения // Радиотехника. 2019. № 197. С. 86–92.
5. Дубиновский В.Б., Саранцев А.И. Аналитические модели местности и снимков (макетные снимки). 2-е изд. доп. и перераб. Москва: Недра, 1989. 140 с.
6. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Москва: ФГУП Картгеоцентр, 2006. 360 с.
7. Антипов И.Т. О математической трактовке задачи калибровки АФА // Фотограмметрия в топографогеодезическом производстве и инженерно-геодезической практике. 1983. № 7. С. 3–24.
8. Антипов И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции // Геодезиздат. 2003. С. 296.
9. Аникушкин М.Н. Наземные системы лазерного сканирования // Геопрофи. 2005. № 1. С. 49–50.
10. Суетин В.П. Применение трехмерного лазерного сканирования в отечественном судостроении // Геопрофи. 2005. № 1. С. 13–16.
11. Чибуничев А.Г. Разработка автоматизированной технологии создания векторной модели объекта по результатам трехмерного лазерного сканирования и цифровой фотосъемки // Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 2. С. 89–92.
12. Фрейдин А. Лазерное 3D-сканирование в геодезии для строительства // Строительная инженерия. 2005. № 1. С. 40–43.

13. Федосов Б.Т. Об исследовании когерентного светодальномера с активным отражателем // Геодезия и аэрофотосъемка. 1981. № 5. С. 122–128.
14. Виноградов В.В. Сравнительные оценки применения термодинамической модели атмосферы при введении метеопоправки в светодальномерные измерения // Геодезия и аэрофотосъемка. 1993. № 5. С. 18–20.
15. Скейвалас И.М. Влияние систематических ошибок на критерий эффективности оценки математического ожидания и дисперсии при усеченном распределении // Геодезия и аэрофотосъемка. 1991. № 6. С. 31–36.
16. Machekhin Y., Kurskoy Y. The Evaluation of Cooled Particles Parameters by Instruments of Nonlinear Metrology // Метрологія та прилади. 2015. № 6. С. 50–53.
17. Синькова М.Г. Фотограмметрическая съемка архитектурных сооружений с использованием данных наземного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2002. № 2. С. 29–33.
18. Русяева Е.А. Об использовании преобразующей функции при исследовании рядов ошибок геодезических измерений // Геодезия и аэрофотосъемка. 1982. № 5. С. 20–27.
19. Плотников В.С. Некоторые вопросы характера проявления ошибок осевых систем в различных типах угломерных приборов // Геодезия и аэрофотосъемка. 1986. № 2. С. 105–110.
20. Середович В.А., Широкова Т.А. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования // Геодезия и картография. 2006. № 6. С. 12–14.
21. Михайлов А.П. Применение стереоскопического метода для наблюдения и обработки результатов трехмерного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2003. № 9. С. 24–28.
22. Масленников А.С. Поверка электронных геодезических дальномеров // Геодезия и картография. 1996. № 2. С. 17–18.
23. Малявский Б.К. Аналитическая обработка фотограмметрической информации в целях инженерных изысканий. Москва: Недра, 1984. 220 с.

24. Арефьев А.А. Исследование влияния амплитудных искажений энергетического профиля лазерного пучка на ошибку измерения прямолинейности и неплоскостности // Геодезия и аэрофотосъемка. 1983. № 5. С. 95–98.

25. Астапович А.В. Уравнивание геодезических сетей с учетом ошибок координат исходных пунктов регуляризованным методом наименьших квадратов // Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. № 3. С. 21–25.

26. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С., Гнатенко А.С. Принципы моделирования измерений в оптических нелинейных динамических системах // Радиотехника. 2018. № 194. С. 29–35.