

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)
ТРИВИМІРНЕ ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-20-1
Пузіков Д.В.
(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 «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)

2021 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 «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пузікову Денису Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Тривимірне лазерне сканування»

затверджена наказом університету від 08 листопада 2021 р. № 1680 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Представлено аналіз лазерних сканерів

2. Теоретично досліджено похибки наземного лазерного сканування

3. Отримано класифікацію похибок та їх залежності від метеоумов

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Вступ. 2 Види та принципи роботи 3D сканерів. 3 Вдосконалення технологій тривимірного лазерного сканування.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал – 19шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні сканери та їх характеристики	01.09.21 – 27.09.21	Виконано
2	Дослідження впливу похибок на наземне лазерне сканування	28.09.21 – 08.10.21	Виконано
3	Виконання класифікації похибок тривимірного лазерного сканування	09.10.21 – 20.10.21	Виконано
4	Аналіз параметрів та похибок тривимірних лазерних сканерів	21.10.21 – 01.11.21	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.11.21 – 14.11.21	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	15.11.21 – 18.11.21	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	19.11.21 – 02.12.21	Виконано
8	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	03.12.21 – 17.12.21	

Дата видачі завдання 01 вересня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 56 с., 14 рис., 1 додаток, 27 джерел.

ВПЛИВ, ІМПУЛЬС, ЛАЗЕР, ОБ'ЄКТ, ПОХИБКА, СКАНУВАННЯ,
ТРИВИМІРНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СКАНЕР.

Об'єкт дослідження – технології оптичної локації.

Предмет дослідження – тривимірне лазерне сканування.

Мета роботи – дослідити фізичні принципи роботи, конструкції тривимірного лазерного сканера та запропонувати напрямки його вдосконалення.

У роботі було досліджено фізичні принципи, можливості тривимірного лазерного сканера, сформульовано напрямки підвищення точності роботи сканерів. Було виконано класифікацію похибок точності роботи 3D сканерів та причини їх виникнення.

Актуальністю роботи є те, що технологія 3D сканування застосовується у багатьох галузях науки, техніки, медицини та потребує підвищеної точності сканування.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 56 pages, 14 figures, 1 supplement, 27 sources.

INFLUENCE, IMPULSE, LASER, OBJECT, ERROR, SCAN, THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNER.

The object of research is optical location technologies.

The subject of research is three-dimensional laser scanning.

The purpose of the work – to explore the physical principles of operation, capabilities and design of a three-dimensional laser scanner and suggest ways to improve it.

The physical principles, possibilities of the three - dimensional laser scanner are investigated in the work, the directions of increase of accuracy of work of scanners are formulated. The classification of errors in the accuracy of 3D scanners and the reasons for their occurrence were performed.

The relevance of the work is that 3D scanning technology is used in many fields of science, technology, medicine and requires increased scanning accuracy.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Види та принципи роботи 3D-сканерів.....	8
1.1 Історія розвитку скануючих пристроїв.....	9
1.2 Види сканерів	10
1.2.1 Активні сканери	12
1.2.1.1 Часопролітний сканер.....	12
1.2.1.2 Тріангуляційний сканер	13
1.2.1.3 Коноскопична система	16
1.2.1.4 Ручний лазерний сканер	16
1.2.1.5 Структуроване світло	17
1.2.1.6 Модульоване світло	18
1.2.1.7 Тривимірне сканування із застосуванням фотограмметрії ...	19
1.3 Класифікація сучасних сканерів.....	20
1.3.1 Ручні сканери.....	20
1.3.2 Настільні сканери.....	21
1.4 Застосування лазерних сканерів.....	24
2 Вдосконалення технологій тривимірного лазерного сканування.....	28
2.1 Класифікація похибок в даних наземного лазерного сканування	28
2.2 Інструментальні похибки наземних лазерних сканерів	29
2.3 Вплив атмосфери на точність вимірювання кутів та відстаней наземними лазерними сканерами	40
2.4 Вплив метрологічних властивостей об'єктів на точність наземної лазерної зйомки.....	44
2.5 Вплив параметрів сканування та характеристик сканерів на точність отримання даних	50
Висновки	53
Перелік джерел посилання	54
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	57

ВСТУП

Лазерне сканування – технологія, що дозволяє створити цифрову тривимірну модель об'єкта, представивши його набіром точок з просторовими координатами. Технологія заснована на використанні нових геодезичних приладів – лазерних сканерів, що вимірюють координати точок поверхні об'єкта з високою швидкістю близько кількох десятків тисяч точок на секунду. Отриманий набір точок називається «хмарою точок» і може бути представлений у вигляді тривимірної моделі об'єкта, плоского креслення, набору перерізів, поверхні і т.д.

Існує кілька технологій для цифрового сканування форми та створення 3D-моделі об'єкта. Однак була розроблена спеціальна класифікація, яка ділить 3D-сканери на 2 типи: контактні та безконтактні.

Контактні 3D-сканери досліджують (зондують) об'єкт безпосередньо через фізичний контакт, поки сам предмет перебуває на прецизійній перевіірочній плиті, відшліфованій та відполірованій до певної міри шорсткості поверхні.

Активні сканери використовують певні види випромінювання або просто світло та сканують об'єкт через відображення світла або проходження випромінювання через об'єкт чи середовище. У таких пристроях застосовується світло, ультразвук або рентгенівське проміння.

Пасивні сканери не випромінюють світло, натомість вони використовують відбите світло з навколишнього простору. Більшість сканерів цього типу призначені для виявлення видимого світла, адже це найдоступніший вид навколишнього випромінювання.

3D сканери мають широке застосування у багатьох галузях промисловості. Лікарі, наприклад, використовують їх для сканування зубів, кісток та вивчення органів тіла. Інженери можуть приймати 3D-сканування будівлі. Незабаром можлива поява сканерів нового покоління, здатних сканувати об'єкти для передачі в ефір, наприклад, для переговорів у майбутньому.

1 ВИДИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ 3D СКАНЕРІВ

3D-сканер є спеціальним пристроєм, який аналізує певний фізичний об'єкт або простір, щоб отримати дані про форму предмета і, по можливості, про його зовнішній вигляд (наприклад, про колір). Зібрані дані надалі застосовуються для створення цифрової тривимірної моделі цього об'єкта.

Створити 3D-сканер дозволяють відразу кілька технологій, що відрізняються між собою певними перевагами, недоліками, а також вартістю. До того ж, існують деякі обмеження щодо об'єктів, які можуть бути оцифровані. Зокрема, виникають труднощі з блискучими, прозорими або дзеркальними поверхнями, що володіють предмети.

Мета 3D-сканера полягає в тому, щоб створити хмару точок геометричних зразків на поверхні об'єкта. Надалі ці точки можуть бути екстрапольовані для відтворення форми предмета (процес, званий реконструкцією). Якщо були отримані дані і про колір, то колір реконструйованої поверхні також можна визначити.

3D-сканери трохи схожі на звичайні камери. Зокрема, у них є конусоподібне поле зору, і вони можуть отримувати інформацію тільки з поверхонь, які не були затемнені. Відмінності між цими двома пристроями в тому, що камера передає тільки інформацію про колір поверхні, що потрапила в її поле зору, а ось 3D-сканер збирає інформацію про відстані на поверхні, яка також перебуває в його полі зору [1]. Таким чином, «картинка», отримана за допомогою 3D-сканера, описує відстань до поверхні в кожній точці зображення. Це дозволяє визначити положення кожної точки на зображенні відразу в трьох площинах.

Найчастіше одного сканування недостатньо для створення повноцінної моделі предмета. Таких операцій потрібно кілька. Як правило, безліч сканувань з різних напрямків потрібні для того, щоб отримати інформацію про всі сторони об'єкта. Усі результати сканування мають бути приведені до загальної системи координат – процес, званий прив'язкою зображень чи вирівнюванням, і

лише після цього створюється повна модель. Вся ця процедура від простої карти з відстанями до повноцінної моделі називається 3D-конвеєр скануванням.

1.1 Історія розвитку скануючих пристроїв

З усіх комп'ютерних пристроїв, сканер – один із найстаріших за часом з винаходів. Системи для сканування зображення є невід'ємною частиною таких пристроїв, як фототелеграф, телефакс, телекамера та існують більше ста років. В 1855 італійський фізик Казеллі створив прилад для передачі зображень, названий "пантелеграфом". У цьому приладі голка сканувала зображення, намальоване струмопровідним чорнилом. З винаходом фотоелемента було створено фототелеграф, у якому тонкий промінь світла переміщався поверхнею закріпленої на барабані фотографії. Світло, відбиваючись від поверхні зображення, потрапляє на катод фотоелемента, викликаючи струм емісії, пропорційний відбивній здатності. На початку століття німецьким фізиком Корном створили фототелеграф, який нічим принципово не відрізняється від сучасних барабанних сканерів [2]. У ньому відбувається механічне сканування зображення з двох координат і висвітлюється кожна точка окремо. Світло, що проходить через неї, сприймається одним селеновим фотоприймачем – отже, відсутня похибка, пов'язана з неідентичністю чутливих елементів. Це найстаріший і на сьогоднішній день найякісніший, але й найдорожчий спосіб. Він не має важливих обмежень на кількість точок, з яких буде складено зображення. Розвиток напівпровідникових технологій дозволив об'єднати кілька фотоприймачів в одну лінійку та обійтися переміщенням лише за однією координатою. Це призвело до народження планшетних, рулонних, проекційних та ручних сканерів. Їхня оптична схема абсолютно однакова і може бути представлена у вигляді об'єктива, що фокусує рядок зображення на лінійку фотоприймачів. Відмінність полягає у способі переміщення фотографії, лінійки фотоприймачів та об'єктива. Зазвичай об'єктив та лінійка фотоелементів жорстко пов'язані та переміщаються щодо фотографії. Роздільна здатність

подібних пристроїв обумовлена кількістю чутливих елементів у лінійці, і якщо ширина фотографії менше робочої поверхні сканера, то використовується лише частина фотоелементів. У деяких проекційних сканерах і цифрових студійних фотоапаратах відбувається переміщення лінійки фотоприймачів щодо зображення, сформованого нерухомим об'єктивом [3]. Проекційні сканери дозволяють сфокусувати об'єкт на всю ширину лінійки чутливих елементів і, таким чином, незалежно від розміру зображення отримати максимальну роздільну здатність.

Сучасний сканер функціонально складається з двох частин: власне скануючого механізму та програмної частини (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Координатно-вимірювальна машина із двома фіксованими взаємно перпендикулярними вимірювальними руками

1.2 Види сканерів

3D-сканери поділяються на два типи за методом сканування: контактний та безконтактний.

Контактний метод ґрунтується на безпосередньому контакті сканера з досліджуваним об'єктом. Контактні сканери фізично обстежують сканований об'єкт навіпацки, передаючи тривимірні координати на комп'ютер. Перевагами такого виду сканерів є:

- а) здатність сканувати призматичні частини;
- б) незалежність від освітлення;
- в) високий рівень деталізації;
- г) простота використання;
- д) малий обсяг одержуваних файлів.

До недоліків цього виду 3D-сканерів відноситься те, що вони повільні і можуть пошкодити тендітні об'єкти сканування [4]. Сканером, як правило, управляє оператор. Але незважаючи на свої недоліки, вони дуже точні.

Механізм сканера буває трьох різних форм.

1. Каретка з фіксованою вимірювальною рукою, розташованою перпендикулярно, а вимірювання відбувається по осях, поки рука ковзає вздовж каретки. Ця система оптимальна для плоских або звичайних кривих опуклих поверхонь.

2. Маніпулятор з фіксованими складовими та високоточними кутовими датчиками. Розташування кінця вимірювальної руки тягне у себе складні математичні обчислення, що стосуються кута обертання шарніра зап'ястя руки, і навіть кута розвороту кожного з з'єднань руки. Цей механізм ідеально підходить для зондування заглиблень або внутрішніх просторів із невеликим вхідним отвором.

3. Одночасне використання попередніх двох методів. Наприклад, маніпулятор можна поєднати з кареткою, що дозволить отримати 3D-дані від великих об'єктів, що володіють внутрішніми порожнинами або поверхнями, що перекривають один одного.

Неконтактні пристрої можна розділити на дві окремі категорії: активні та пасивні сканери.

1.2.1 Активні сканери

Активні сканери випромінюють на об'єкт деякі спрямовані хвилі (найчастіше світло, промінь лазера) і виявляють його відображення для аналізу.

1.2.1.1 Часопролітний сканер

Часопролітний лазерний 3D-сканер – це активний сканер, який використовує лазерний промінь для дослідження об'єкта. В основі цього типу сканера лежить часопролітний лазерний далекомір. У свою чергу лазерний далекомір визначає відстань до поверхні об'єкта, виходячи з часу прольоту лазера туди і назад. Сам лазер використовується для створення світлового імпульсу, тоді як детектор вимірює час до того моменту, поки світло не відобразиться. Враховуючи, що швидкість світла c – величина постійна, то знаючи час прольоту променя туди-назад, можна визначити відстань, на яку перемістилося світло, вона буде вдвічі більша за відстань між сканером і поверхнею об'єкта [5]. Якщо t – це час польоту променя лазера туди-назад, тоді відстань дорівнюватиме $c \times t/2$. Точність часу прольоту лазерного променя 3D-сканера залежить від того, наскільки точно ми можемо виміряти час t : 3,3 пс (приблизно) необхідно для того, щоб лазер подолав 1 мм.

Лазерний далекомір визначає відстань лише однієї точки у заданому напрямку. Тому пристрій сканує все своє поле зору окремими точками за раз, змінюючи при цьому напрям сканування. Міняти напрям лазерного далекоміра можна або шляхом обертання самого приладу, або за допомогою системи дзеркал, що обертаються. Найчастіше використовують останній метод, адже він набагато швидший, точніший, а також легший у користуванні. Наприклад, прольотні 3D-сканери можуть вимірювати відстань від 10000 точок до 100000 точок за одну секунду.

Часопрольотні девайси також доступні у конфігурації 2D. В основному, це стосується прольотних камер.

1.2.1.2 Тріангуляційний сканер

Тріангуляційні лазерні 3D-сканери також відносяться до активних сканерів, які використовують лазерний промінь для того, щоб прозондувати об'єкт. Подібно до прольотних 3D-сканерів тріангуляційні пристрої посилають на об'єкт сканування лазер, а окрема камера фіксує розташування точки, куди потрапив лазер. Залежно від того, як далеко лазер просувається поверхнею, точка з'являється в різних місцях поля зору камери. Ця технологія названа тріангуляція тому, що лазерна точка, камера і сам лазерний випромінювач утворюють своєрідний трикутник (рис. 1.2).

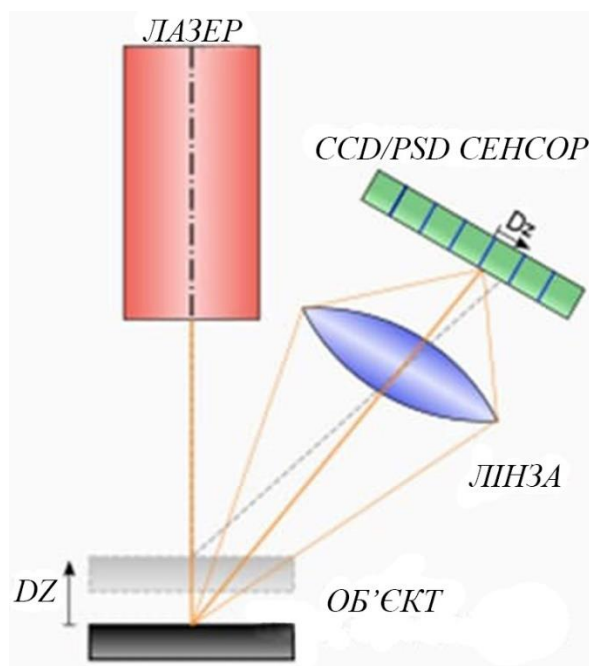


Рисунок 1.2 – Принцип роботи датчика лазерної тріангуляції

Відома довжина однієї сторони цього трикутника – відстань між камерою та лазерним випромінювачем. Також відомий кут лазерного випромінювача. А ось кут камери можна визначити за розташуванням лазерної точки в полі огляду камери. Ці показники повністю визначають форму і розмір трикутника і вказують на розташування кута лазерної точки [6]. У більшості випадків, щоб

прискорити процес отримання даних, замість лазерної точки користуються лазерною смугою (рис. 1.3). Так, Національна науково-дослідна рада Канади була серед перших наукових організацій, які розробили основи технології тріангуляційного лазерного сканування ще 1978 року.

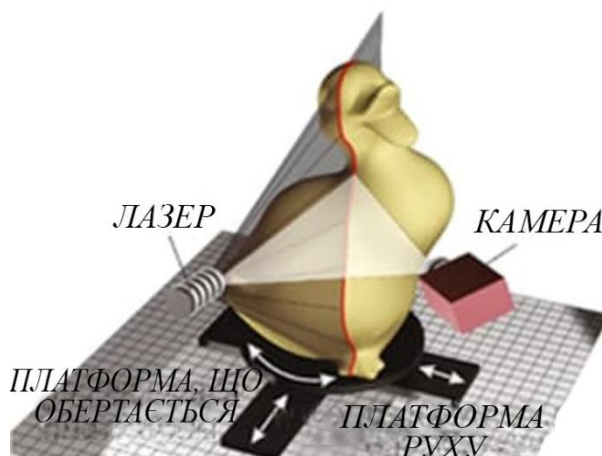


Рисунок 1.3 – Створення хмари точок за допомогою тріангуляції лазерною смугою

Як прольотні, так і тріангуляційні сканери мають свої сильні і слабкі сторони, що визначає їх вибір для кожної конкретної ситуації. Перевага прольотних пристроїв в тому, що вони оптимально підходять для роботи на дуже великих відстанях аж до декількох кілометрів. Вони ідеальні для сканування будівель чи географічних об'єктів. У той самий час, до недоліків можна віднести точність вимірів [7]. Адже швидкість світла досить висока, тому при підрахунку часу, який потрібний променю, щоб подолати відстань від та до об'єкта, можливі деякі погрішності (до 1 мм). І це робить результати сканування приблизними.

Що ж до тріангуляційних далекомірів, то у них ситуація з точністю навпаки. Діапазон їхньої дії становить лише кілька метрів, а ось точність відносно висока. Такі пристрої можуть виміряти відстань з точністю до десятків мікрометрів.

Негативно на точність роботи прольотних сканерів впливає дослідження краю об'єкта. Лазерний імпульс посилається один, а відбивається одразу з двох місць. Координати розраховуються, з позиції самого сканера, береться середнє значення двох відбитків променя лазера. Це призводить до того, що точка буде визначена у неправильному місці. При використанні сканерів з високою роздільною здатністю шанси на те, що лазерний промінь потрапить точно на край об'єкта зростають, але при цьому за краєм з'явиться шум, що негативно позначиться на результатах сканування. Сканери з невеликим променем можуть вирішити проблему сканування краю, але вони мають обмежений діапазон дії, тому ширина променя перевищить відстань. Існує також спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє сканеру сприймати лише перше відображення променя, ігноруючи при цьому друге.

При швидкості роботи 10000 точок за секунду сканери з низькою роздільною здатністю впораються із завданням протягом кількох секунд. А ось для сканерів з високою роздільною здатністю потрібно зробити кілька мільйонів операцій, на що підуть хвилини. Варто враховувати, що дані можуть спотворитися, якщо об'єкт або сканер рухатимуться. Так, кожна точка фіксується у певний момент часу у певному місці [8]. Якщо об'єкт або сканер переміститься в простір, результати сканування будуть помилковими. Тому так важливо встановлювати і об'єкт, і сканер на фіксованій платформі, і звести можливість вібрації до мінімуму. Отже, сканування об'єктів у русі практично неможливо. Проте останнім часом ведуться активні дослідження, як можна компенсувати вплив вібрації на спотворення даних.

Варто врахувати і той факт, що при скануванні в одному положенні протягом тривалого часу невелике усунення сканера може статися через зміну температури. Якщо сканер встановлений на штативі і одна зі сторін сканера піддається сильному впливу сонячних променів, то в такому випадку штатив буде розширюватися, а дані сканування поступово спотворюватимуться з одного боку на інший. Разом з тим, деякі лазерні сканери мають вбудовані компенсатори, які протидіють будь-якому руху сканера під час роботи.

1.2.1.3 Коноскопична система

У коноскопичній системі лазерний промінь проектується на поверхню об'єкта, після чого промінь відбивається по тій же траєкторії, але вже через коноскопичний кристал і проектується на прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). В результаті виходить дифракційний зразок, з якого за допомогою частотного аналізу можна визначити відстань до поверхні об'єкта. Основна перевага коноскопичної голографії у тому, що з вимірювання відстані потрібен лише одне хід променя, що дозволяє визначити, наприклад, глибину невеликого отвору.

1.2.1.4 Ручний лазерний сканер

Ручні лазерні сканери створюють 3D-зображення е за принципом триангуляції, описаним вище. Лазерний промінь або смуга проектується на об'єкт з ручного випромінювача, а сенсор (часто ПЗЗ або координатно-чутливий детектор) вимірює відстань до поверхні об'єкта. Дані збираються щодо внутрішньої системи координат і тому для отримання результатів, якщо сканер перебуває в русі, місце розташування пристрою має бути точно визначено. Це можна зробити за допомогою базових просторових об'єктів на сканованій поверхні (що відбивають елементи, що наклеюються, або природні особливості) або ж за допомогою методу зовнішнього стеження [9]. Останній спосіб найчастіше набуває форми лазерного трекера (що надає датчик положень) із вбудованою камерою (для визначення орієнтації сканера). Також можна використовувати фотограмметрію, що забезпечується 3 камерами, яка надає сканеру шість ступенів свободи (можливість здійснювати геометричні рухи у тривимірному просторі). Обидві техніки зазвичай використовують інфрачервоні світлодіоди, підключені до сканера. За ними спостерігають камери через фільтри, що забезпечують стійкість амбієнтного освітлення (віддзеркалення світла з різних поверхонь).

Дані сканування збираються комп'ютером і записуються як точки тривимірного простору, які після обробки перетворюються на тріангульовану сітку. Потім система автоматизованого проектування створює модель, використовуючи неоднорідний раціональний B-сплайн, NURBS (спеціальна математична форма для створення кривих і поверхонь). Ручні лазерні сканери можуть поєднувати ці дані з пасивними датчиками видимого світла, які захоплюють текстуру поверхні та її колір, що дозволяє створити або провести інжиніринг зворотного повноцінної 3D-моделі.

1.2.1.5 Структуроване світло

3D-сканери, що працюють за технологією структурованого світла, є проекцією світлової сітки безпосередньо на об'єкт, деформація цього малюнка і являє собою модель сканованого предмета. Сітка проектується на об'єкт за допомогою рідкокристалічного проектора або іншого постійного джерела світла. Камера, розташована трохи осторонь проектора, фіксує форму мережі і обчислює відстань до кожної точки в полі зору.

Сканування структурованим світлом досі залишається активною галуззю досліджень, якій щороку присвячується чимало науково-дослідних робіт [10]. Ідеальні карти також визнані корисними як структуровані світлові візерунки, які можуть вирішити проблеми відповідності і дозволяють не тільки виявити помилки, але й виправити їх.

Перевага 3D-сканерів, що використовують структуроване світло, у їх швидкості та точності роботи. Замість сканування однієї точки в один момент часу структуровані сканери сканують одночасно кілька точок або все поле зору відразу. Сканування всього поля зору займає частку секунди, а згенеровані профілі більш точні, ніж лазерні тріангуляції. Це вирішує проблему спотворення даних, викликаного рухом. Крім того, деякі існуючі системи здатні сканувати навіть об'єкти, що рухаються в режимі реального часу. Наприклад,

VisionMaster – скануюча система у форматі 3D – має 5-мегапіксельну камеру, завдяки чому кожен кадр містить 5 мільйонів крапок.

Сканери, що працюють в режимі реального часу, використовують цифрову проекцію краю і фазозсувну техніку (одна з методик застосування структурованого світла), що дозволяє захопити, відновити і створити комп'ютерну модель з високою щільністю деталей об'єктів, що динамічно змінюються (наприклад, міміка) при 40 кадрах в секунду. Нещодавно було створено новий тип сканера. Різні моделі можуть бути використані у цій системі. Частота кадрів для захоплення та обробки даних досягає 120 кадрів за секунду. Цей сканер може обробляти окремі поверхні. Наприклад, 2 рухомі руки. Використовуючи метод бінарного дефокусування, швидкість зйомки може досягати сотень, а то й тисяч кадрів за секунду.

1.2.1.6 Модульоване світло

При використанні 3D-сканерів на основі модульованого світла світловий промінь, спрямований на об'єкт, постійно змінюється. Найчастіше зміна світла відбувається за синусоїдою. Камера фіксує відбите світло та визначає відстань до об'єкта, враховуючи шлях, який подолав промінь світла. Модульоване світло дозволяє сканеру ігнорувати світло з інших джерел, крім лазера, що дозволяє уникнути перешкод.

Пасивні сканери не випромінюють нічого на об'єкт, а натомість покладаються на виявлення відбитого навколишнього випромінювання. Більшість сканерів такого типу виявляє видиме світло – доступне навколишнє випромінювання. Безконтактні сканери поділяються залежно від типу емісії, яка використовується у 3D-фотографіях [11]. Вони можуть використовувати світло, випромінювання та ультразвук. Лазерні сканери використовують світло як джерело виявлення відстані до об'єкта сканування. Вони вимірюють час відбиття лазера від об'єкта. Ультразвукові сканери використовують у медицині. Наприклад, звукові хвилі можуть проникати в матку і показувати тривимірні

зображення плоду, що розвивається. Рентгенівські промені у 3D-сканері також використовуються у медицині. Ці сканери збирають світло або випромінювання, яке створюється об'єктом. До переваг сканерів такого типу належать.

1. Економічність у промисловому застосуванні.
2. Використання поза приміщеннями з різною освітленістю.
3. Безконтактна технологія.
4. Технологія білого структурованого кольору.

1.2.1.7 Тривимірне сканування із застосуванням фотограмметрії

Стереоскопічні системи передбачають використання двох відеокамер, розташованих у різних місцях, але в одному напрямку. Аналізуючи відмінності у знімках кожної камери, можна визначити відстань до кожної точки зображення. Цей метод за своїм принципом нагадує стереоскопічний зір людини.

Фотометричні системи зазвичай використовують одну камеру, яка робить зйомку кількох кадрів за будь-яких умов освітлення. Ці методи намагаються перетворити модель об'єкта, щоб відновити поверхню кожного пікселя.

Силуетні техніки використовують контури із послідовних фотографій тривимірного об'єкта на контрастному тлі [12]. Ці силуети екструдують та перетворюють, щоб отримати видиму оболонку об'єкта. Однак цей метод не дозволяє просканувати заглиблення в об'єкті (наприклад, внутрішню порожнину чаші).

Існують й інші методи, які ґрунтуються на тому, що користувач сам виявляє та ідентифікує деякі особливості та форми об'єкта, спираючись на безліч різних зображень об'єкта, які дозволяють створити приблизну модель цього об'єкта. Такі методи можна застосовувати для створення тривимірної моделі об'єктів простих форм, наприклад, будівлі.

Цей вид 3D-сканування ґрунтується на принципах фотограмметрії. До того ж ця техніка в деяких моментах схожа на панорамну фотографію, за винятком того, що фотографії об'єкта зроблені в тривимірному просторі. Таким чином можна скопіювати сам об'єкт, а не робити серію фото з однієї точки тривимірного простору, що призвело б до відтворення оточення об'єкта.

Перевагами такого 3D-сканування є низькі витрати на апаратну частину та безконтактна технологія.

1.3 Класифікація сучасних сканерів

1.3.1 Ручні сканери

В основу роботи ручних сканерів покладено процес реєстрації відбитих променів світлодіодів від поверхні документа, що сканується. Для того щоб ввести в комп'ютер будь-який документ за допомогою цього пристрою, треба без різких рухів провести головкою, що сканує, за відповідним зображенням. Таким чином, проблема переміщення головки зчитування щодо паперу цілком лягає на користувача. Рівномірність переміщення сканера істотно позначається на якості зображення, що вводиться в комп'ютер. У ряді моделей для підтвердження нормального введення є спеціальний індикатор. Ширина введенного зображення для ручних сканерів зазвичай не перевищує 4 дюймів (10 см). У деяких моделях ручних сканерів для підвищення роздільної здатності зменшують ширину зображення, що вводиться [13]. Сучасні ручні сканери можуть забезпечувати автоматичну "склейку" зображення, що вводиться, тобто формують ціле зображення з окремо введених його частин. Завдяки цьому за допомогою ручного сканера неможливо ввести зображення навіть формату А4 за один прохід.

До основних переваг такого типу сканерів відносяться:

а) низька вартість. Оскільки в ручних сканерах як позиціонуючий модуль виступає користувач, відпадає необхідність у цьому дорогому елементі;

б) портативність. З появою ручних сканерів, що підключаються до паралельного порту, можна використовувати як з настільними, і з портативними комп'ютерами;

в) сканування книг без ушкодження. За допомогою ручного сканера можна відсканувати книгу, не згинаючи та не розриваючи її. Це особливо важливо при скануванні старовинних книг чи стародавніх манускриптів.

Перші моделі ручних сканерів підключалися до комп'ютера за допомогою інтерфейсної карти, якій необхідно було виділяти окреме переривання, канал прямого доступу до пам'яті та адресу вводу-виводу. В даний час практично всі пристрої цього класу підключаються до паралельного порту, звільняючи таким чином необхідні ресурси.

1.3.2 Настільні сканери

Такі сканери дозволяють вводити зображення розміром 8,5 на 11 або 8,5 на 14 дюймів. Вони випускаються зі швидкісними відеоінтерфейсами, зазвичай допускають сканування з планшета або з використанням інтегрованого пристрою автоподачі документів (рис 1.4). Існують три різновиди настільних сканерів: планшетні, рулонні та проекційні.

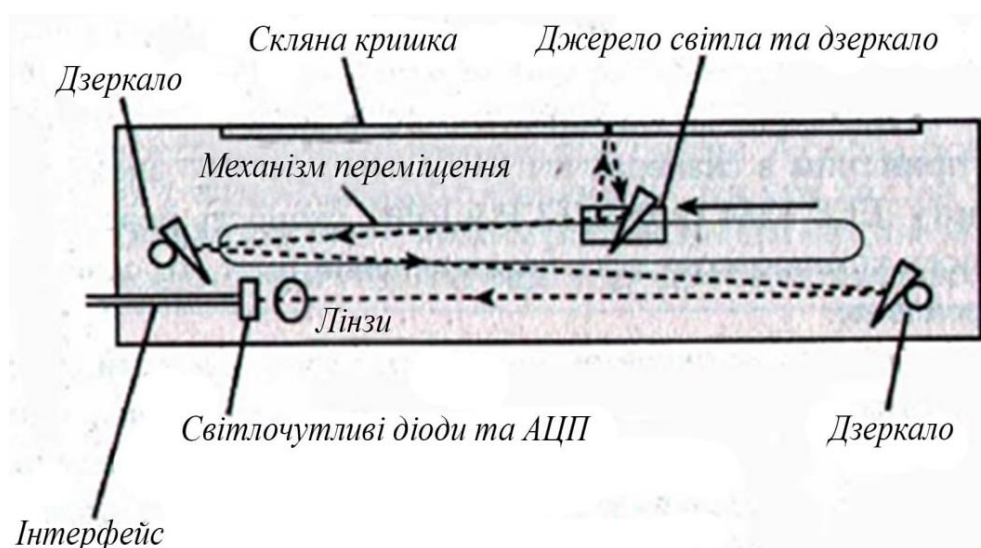


Рисунок 1.4 – Схема настільного сканера

Планшетні сканери, особливо призначені для чогось окрім подарунка або використання як іграшка, при зовнішній простоті є дуже цікавими та досить складними опто-електронно-механічними пристроями [14]. Однак конструкція їх устояла, виробництво добре налагоджене і технологічно не є чимось позамежним.

Основною відмінністю планшетних сканерів є те, що головка, що сканує, переміщається щодо паперу за допомогою крокового двигуна. Зрозуміло, що розглянута конструкція виробу дозволяє сканувати не лише окремі аркуші, а й сторінки журналу чи книги.

Оптична роздільна здатність настільних сканерів регулюється в діапазоні від 100 точок на дюйм до 800 точок на дюйм. Швидкість сканування досягає 64 сторінок за хвилину. На планшетних настільних сканерах можна сканувати документи, книжкові сторінки, документи нестандартного розміру або поліграфічного виконання. Універсальний характер пристроїв підкреслюється останнім часом випуском моделей, що дають змогу поряд зі швидкісним введенням документів повноцінно (до 16,7 млн. кольорів) сканування в кольорі [15]. Незважаючи на те, що паспортна продуктивність окремих моделей настільних сканерів не поступається і навіть, іноді, перевершує відповідні показники спеціалізованих виробничих сканерів, щоб уникнути частих замін елементів пристрою (головним чином, ламп, роликів і прокладок), настільні моделі не слід використовувати в режимах повнозмінного або цілодобового сканування.

Планшетні сканери, у свою чергу, класифікуються на однопрохідні або трипрохідні. Раніше для кольорового сканування доводилося використовувати трипрохідну технологію, тобто перший прохід із червоним фільтром для отримання червоної складової, другий – для зеленої складової та третій – для синьої (рис. 1. 5).

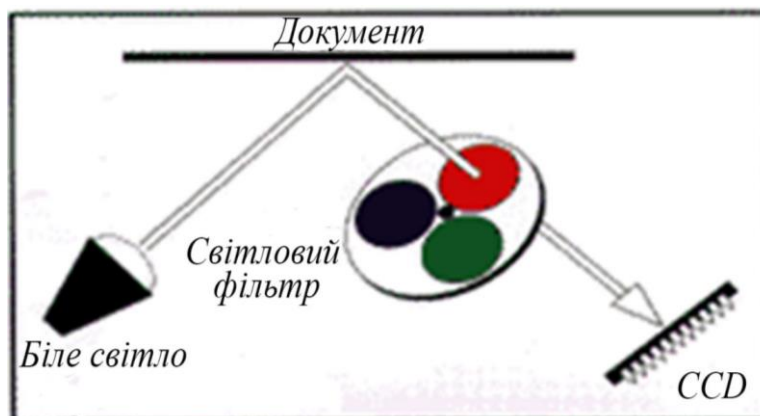


Рисунок 1.5 – Схема для трьохпрохідного сканера

Такий метод має два істотних недоліки: мала швидкість роботи і проблема об'єднання трьох окремих сканів в один, з несуміщенням кольорів. Рішенням стало створення True Color CCD, що дозволяє сприймати всі три кольірні складові кольорового зображення за один прохід (рис. 1.6). Зараз на ринку немає трипрохідних сканерів.

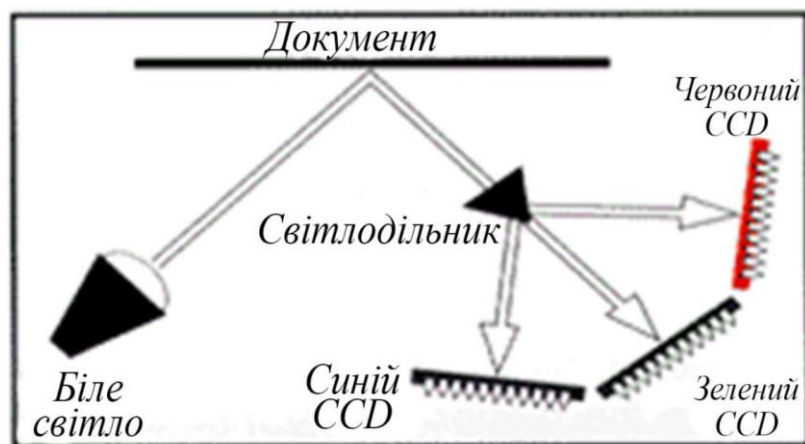


Рисунок 1.6 – Схема для однопрохідного сканера

True Color CCD є стандартом на даний момент і у світі ніхто вже не випускає трипрохідні сканери. Однопрохідні сканери використовують одну з двох підсистем для отримання даних про колір зображення: деякі

використовують ПЗЗ зі спеціальним покриттям, яке фільтрує колір за складовими, інші використовують призму розділення кольорів.

Рулонні сканери є монохромними пристроями, призначеними головним чином для введення документів у машину, за допомогою оптичного розпізнавання символів OCR (Optical Character Recognition). Робота рулонних сканерів відбувається так: окремі аркуші документів простягаються через такий пристрій, при цьому здійснюється їх сканування. Таким чином, у цьому випадку скануюча головка залишається на місці, вже щодо неї переміщується папір. Зрозуміло, що у цьому випадку сканування сторінок книг та журналів просто неможливе [16]. Для зручності роботи рулонні сканери зазвичай оснащуються пристроями автоматичної подачі сторінок.

Різновид настільних сканерів – проекційні сканери, що нагадують своєрідний проекційний апарат (або фотозбільшувач). Документ, що вводиться, кладеться на поверхню сканування зображенням вгору, блок сканування знаходиться при цьому також зверху. Переміщується лише пристрій сканування. Основною особливістю цих сканерів є можливість сканування проекцій тривимірних зображень. Комбінований сканер забезпечує роботу в двох режимах: протягування аркушів і сканера, що саморухається. Для останнього режиму сканера необхідно зняти нижню кришку. При цьому валики, які зазвичай простягають папір, служать для пересування сканера по поверхні, що сканується. Хоча зрозуміло, що ширина зображення, що вводиться сканером, в обох режимах не змінюється, проте в саморухомому режимі можна сканувати зображення з аркуша паперу, що перевищує цей формат, або вводити інформацію зі сторінок книги.

1.4 Застосування лазерних сканерів

Ідея тривимірної візуалізації об'єктів втілюється у 3D-сканерах. На відміну від камери це обладнання дозволяє зосередити увагу на об'єктах таким чином, щоб забезпечити 3D-ефект. Сканери використовуються в індустрії

розваг, для будівництва детальних моделей для різноманітних додатків, включаючи промисловий дизайн та медицину.

Не варто забувати і про те, що збір 3D-даних важливий і для інших застосувань. Так, вони необхідні в індустрії розваг для створення фільмів та відеоігор. Також ця технологія затребувана в промисловому дизайні, ортопедії та протезуванні, реверс-інжинірингу, розробці прототипів, а також для контролю якості, огляду та документування культурних артефактів.

Комп'ютерна томографія (КТ) – спеціальний медичний метод візуалізації, що створює тривимірне зображення внутрішнього простору об'єкта, використовуючи велику серію рентгенівських знімків. За схожим принципом працює і магнітно-резонансна томографія (МРТ) – ще один прийом візуалізації в медицині, який відрізняється контрастним зображенням м'яких тканин тіла ніж КТ. Тому МРТ використовують для сканування мозку, опорно-рухового апарату, серцево-судинної системи, пошуку онкології. Ці методики дозволяють отримати об'ємні воксельні моделі, які можна візуалізувати, змінювати та перетворювати на традиційну 3D-поверхню, використовуючи алгоритми екстракції із поверхні.

Хоча МРТ, КТ або мікротомографія більш активно використовують у медицині, але вони також активно застосовуються і в інших галузях для отримання цифрової моделі об'єкта та його оточення [17]. Це важливо, наприклад, для неруйнівного контролю матеріалів, реверс-інжинірингу чи вивчення біологічних та палеонтологічних зразків.

3D-сканери активно використовують у ортопедії та стоматології для створення 3D-форми пацієнта. Поступово вони замінюють собою застарілу гіпсову технологію. Програмне забезпечення CAD/CAM застосовується для створення протезів та імплантатів.

Багато стоматологів використовують CAD/CAM, а також 3D-сканери для захоплення 3D-поверхні засобу для зубів (у природних умовах або у пробірці), для того, щоб створити цифрову модель за допомогою САПР-технологій або САМ-методів (наприклад, для фрезерного станка під управління ЧПУ (числове

програмне управління), а також 3D-принтера). Такі системи призначені для полегшення процесу 3D-сканування препарату у природних умовах з подальшим моделюванням (наприклад, для коронки, пломби чи інкрустації).

Лазерне 3D-сканування описує загальний спосіб виміру або сканування поверхні за допомогою лазерної технології. Воно застосовується відразу в кількох областях, відрізняючись в основному потужністю лазерів, що використовуються, та результатами самого сканування. Низька потужність лазера потрібна, коли не має впливати на скановану поверхню, наприклад, якщо вона потребує лише оцифрування. Конфонкальне або 3D-лазерне сканування – це методи, що дозволяють отримати інформацію про скановану поверхню. Ще одне малопотужне застосування передбачає проєкційну систему, яка використовує структуроване світло [18]. Вона застосовується для метрології поверхні сонячної батареї, що включає обчислення напруги з пропускнуою здатністю більше 2000 пластин на годину.

Потужність лазера, застосовуваного для лазерного сканування обладнання промисловості, становить 1 Вт. Рівень потужності зазвичай становить 200 мВт чи менше.

Створення 3D-моделі за допомогою сканування має такі переваги.

1. Підвищує ефективність роботи зі складними частинами та формами.
2. Сприяє проєктуванню продуктів, якщо необхідно додати частину, створену кимось іншим.
3. Якщо САПР-моделі застаріють, 3D-сканування забезпечить оновлену версію.
4. Заміщає пропущені або відсутні частини.

3D-сканери активно використовують у індустрії розваг для створення цифрових 3D-моделей у кінематографі та відеоіграх. Якщо у створюваної моделі є аналог у реальному світі, то сканування дозволить створити тривимірну модель набагато швидше, ніж розробка цієї моделі за допомогою 3D-моделювання. Досить часто митці спочатку ліплять фізичну модель, яку

потім сканують, щоб отримати цифровий еквівалент, замість того щоб створювати таку модель на комп'ютері.

Реверс-інжиніринг механічних компонентів вимагає точної цифрової моделі об'єктів, які потрібно відтворити. Це хороша альтернатива тому, щоб безліч точок цифрової моделі перетворити на полігональну сітку, використовувати набір плоских і кривих поверхонь або, що ідеально для механічних компонентів, створювати об'ємну САПР-модель. 3D-сканер може використовуватися для того, щоб привести до цифрової моделі об'єкти, що вільно змінюють форму. Так само як і призматичну конфігурацію, для якої зазвичай використовують координатно-вимірну машину. Це дозволить визначити прості розміри призматичної моделі [19]. Ці дані надалі обробляються за допомогою спеціальних програм зворотного інжинірингу.

3D-сканери також знаходять активне застосування у сфері 3D-друку, оскільки дозволяють у короткий термін створювати досить точні 3D-моделі різних об'єктів та поверхонь, придатні для подальшого доопрацювання та друку. У цій сфері використовуються як контактний, так і безконтактний методи сканування, обидва методи мають певні переваги.

2 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТРИВІМІРНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Важливе значення для вирішення інженерно-наукових задач має точність лазерного сканування. До точності роботи таких приладів висуваються високі вимоги, тому їх розвиток полягає у вирішенні таких задач.

1. Збільшити точність сканування на різних дистанціях.
2. Зменшити вплив на точність сканування погодних умов.
3. Зробити більш дешеву конструкцію, завдяки використанню напівпровідникових лазерів.

2.1 Класифікація похибок в даних наземного лазерного сканування

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

- інструментальні, зумовлені якістю складання та юстирування механічних, оптичних та електронних частин приладу;
- методичні, джерелом яких є сам метод визначення величин за допомогою лазерного сканування.

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 [20]. 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.

2.2 Інструментальні похибки наземних лазерних сканерів

Застосування в наземному лазерному скануванні в якості джерела випромінювання лазера, що працює або безперервно, або з високою частотою імпульсів, викликає нагрівання як самого лазера, так і простору всередині сканера. Тому виробники лазерних сканерів забезпечують їх системою охолодження, відсутність якої може призводити до наступних наслідків:

- в результаті частого нагрівання (вище норми) та охолодження сканера відбуватиметься деформація вимірювальних та обертових частин, що негативно впливає на точність вимірюваних величин від запуску до запуску приладу, і навіть зменшує термін його служби;

- перегрів сканера може викликати заклинювання рухомих частин у сканері, що загрожує виходом приладу з ладу.

У лазерних сканерах реалізується два види систем охолодження, а саме:

- повітряна, тобто заснована на припливі холодного повітря з навколишнього середовища всередину сканера і відтоку гарячого повітря з нього. Такі системи включають набір вентиляторів, функцією яких є забезпечення циркуляції повітря. Недоліком даного виду систем охолодження є відсутність герметичності сканера, і, отже, зниження пило- та вологозахищеності приладу;

- внутрішня, у якій застосовується газ, зазвичай азот. У цих системах охолодження використовують кріогенні насоси. У наземних сканерах широко застосовуються вакуумні насоси, дія яких заснована на поглинанні газу, що відкачується, поверхнею, охолодженою до наднизьких температур. Від якості роботи системи охолодження залежить стабільність роботи лазерного сканера.

Точність визначення відстаней імпульсним методом залежить від помилок відліку часу проходження сигналу та визначення швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль. Швидкість поширення електромагнітних хвиль у середовищі визначається за формулою:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (2.1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, прийнята Міжнародним геодезичним та геофізичним союзом, що дорівнює $299792458 \pm 1,2$ м/с;

n – показник заломлення повітря, який залежить від фізичних властивостей середовища (тиску, температури та вологості повітря) та довжини електромагнітної хвилі.

В даний час для визначення швидкості поширення електромагнітних хвиль у вакуумі застосовують непрямий фізичний метод, в якому використовується залежність:

$$c = \lambda_v f_v, \quad (2.2)$$

де λ_v – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі;

f_v – частота електромагнітного коливання.

На основі непрямого методу величина швидкості поширення електромагнітних коливань у вакуумі отримана із відносною похибкою 3×10^{-9} .

Похибка вимірювання відстані m_R фазовим методом з використанням різних способів вирішення неоднозначності визначається за формулою:

$$m_R = \sqrt{m_C^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 m_\varphi^2 + R^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2 \right]}, \quad (2.3)$$

де m_C – похибка визначення постійної виправлення приладу;

m_φ – похибка визначення різниці фаз між опорним та робочим сигналами;

m_f – похибка, спричинена відмінністю масштабної частоти від номінального значення;

m_v – похибка визначення швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі у атмосфері.

Похибка визначення постійної поправки у відстань m_C , що вимірюється, залежить від конструктивних характеристик наземного сканера (фазового кута, відмінності напруги у мережі від номіналу та інших) і способу визначення даної поправки при повірці приладу. Сучасні методики метрологічної атестації електронних далекомірів припускають примусове центрування приладу та відбивача, яке можна виконати з помилкою близько 0,1 мм. Фактично, ця величина характеризує граничну точність, з якою можна визначити приладову виправлення.

Похибка вимірювання різниці фаз m_φ залежить від інструментальної точності фазометра і містить як випадкову, так і систематичну складові.

Основними причинами виникнення похибок, пов'язаних із метрологічними характеристиками фазометра, є:

- шумові складові вимірювань;
- нелінійність фазової характеристики;
- нелінійність амплітудно-фазової характеристики;
- вплив гармонійних складових вимірюваних сигналів;
- дискретність перетворення «фаза – код» (у цифрових фазометрах).

З двох складових похибки m_R , які не залежать від величини відстані, що вимірюється лазерним скануванням, найбільший «вклад» у загальну помилку вносить похибку визначення різниці фаз.

При роботі зі сканерами, що вимірюють відстані з фіксованими частотами, похибка, викликана відмінністю масштабної частоти від номінального значення m_f , складається з похибок за нестабільністю частоти та еталонуванням, які приблизно одного порядку. У наземних сканерах з плавною зміною частоти похибка m_f головним чином залежить від способу її вимірювання. Частотна похибка включає не тільки випадкову, а й систематичну складову, зумовлену неточною установкою частоти в номінал (помилка еталонування) та повільним дрейфом частоти генератора [21]. У формулі 2.3 перші дві складові практично не залежать від величини вимірюваної відстані, а вплив двох інших пропорційно до цієї відстані. Таким чином, середню квадратичну похибку вимірювання відстаней фазовим наземним лазерним сканером, аналогічно як і імпульсним, можна уявити виразом:

$$m_R = a + bR, \quad (2.4)$$

де a і b – коефіцієнти, зумовлені емпірично з урахуванням виміру довжин еталонних ліній, у кожного далекоміра вони мають значення.

На точність виміру невеликих відстаней фазовими далекомірами основний вплив надають похибки вимірювання та відрахування різниці фаз, а

також похибка постійної далекоміра, так як похибки в відстанях, що залежать від похибок частоти та швидкості поширення електромагнітних коливань в атмосфері, будуть незначні.

Точність вимірювання відстаней та кутів залежить від великої кількості факторів, у тому числі від похибок виготовлення та юстування приладу. У систему для наземного лазерного сканування входить також і програмне забезпечення, що управляє. Це дозволяє виключити частину похибок у вимірних величинах, що мають систематичний характер. У програмних продуктах, призначених для управління наземним лазерним сканером, величини, які використовуються для усунення деякого виду похибок у кутах і відстанях, що вимірюються, називаються параметрами калібрування. Для кожної моделі сканера кількість параметрів калібрування та вид математичної моделі для виключення систематичних похибок безпосередньо з результатів вимірів різняться. Однак аналіз способів калібрування лазерних сканерів дозволив виявити частину параметрів та похибок, загальних для різних сканерів, вплив яких можна зменшити, а саме:

- 1) масштабний коефіцієнт b , що враховується у вимірюваних відстанях;
- 2) приладову виправлення;
- 3) несуміщення вертикальної осі обертання приладу та осі обертання скануючої призми;
- 4) несуміщення вертикальної осі обертання приладу та вектора поширення лазерного променя;
- 5) несумісність осі обертання скануючої призми та вектора поширення лазерного променя;
- 6) похибку осей цапфи;
- 7) вертикальну колімаційну похибку (величина відстояння точки, що відповідає початку вимірювання відстаней лазерним далекоміром, від горизонтальної осі обертання призми);

8) горизонтальну колімаційну похибку (величина відстояння точки, що відповідає початку вимірювання відстаней лазерним далекоміром, від вертикальної осі обертання приладу).

У програмному забезпеченні наземного лазерного сканера передбачено два варіанти обліку перших двох параметрів калібрування сканерів. У першому варіанті в якості параметрів калібрування визначаються окремо поправка приладів і масштабний коефіцієнт, з використанням яких виключаються похибки в вимірюваних відстанях. У другому варіанті вводяться поправки в довжини ліній за сумарний вплив параметрів калібрування, величини яких залежать від конкретного діапазону відстаней. Другий спосіб виключення систематичних похибок з результатів далекомірних вимірювань лазерним сканером є кращим. Це пояснюється такою обставиною. Відстань, що вимірюються сканерами, коливаються від 1 м до 1200 м. Внаслідок цього потужність сигналу, що приймається, сильно змінюється на всьому діапазоні. Також на потужність сигналу значний вплив відбиває здатність об'єкта зйомки. Тому при надходженні потужного сигналу на приймач випромінювання останній може навіть вийти з ладу [22]. У зв'язку з цим виробники сканерів перед приймачем ставлять пристрої, які штучно знижують потужність сигналу. Чим ближче об'єкт сканування, тим більше послаблюється потужність сигналу, що, в свою чергу, призводить до спотворення його форми. В результаті стає скрутним виконання калібрування сканера за допомогою першого варіанта.

Наступним фактором, що впливає на точність одиничного виміру кутів і відстаней, є несинхронність реєстрації R , та θ . Оскільки кожна вимірювана величина R, φ та θ лазерним сканером фіксується через певний інтервал T_R , T_φ і T_θ відповідно, то похибки, викликані несинхронністю реєстрації величин, є функцією, яку в загальному вигляді можна записати наступним чином:

$$\Delta = f(R, T_R, T_\varphi, T_\theta, t), \quad (2.5)$$

де t – час роботи сканера з моменту запуску.

Похибки, викликані несинхронністю реєстрації величин R, φ і θ , неможливо визначити на етапі обробки даних наземного лазерного сканування, тому єдиним способом виключення даного виду похибок є забезпечення рівності $T_R = T_\varphi = T_\theta$ на етапі зборки наземного лазерного сканера.

У сканерах фірм Riegl, Leica, Zoller+Fröhlich та інших для сканування об'єктів у горизонтальному та вертикальному напрямках використовується безперервне обертання призми та оптичної головки. Під час цього обертання лазерне джерело посилає сигнал на призму, яка відбиває їх у напрямку об'єкта. Відбившись від об'єкта, промінь повертається до приймача. Оскільки призма та оптична головка обертаються безперервно, то за час проходження сигналу від сканера до об'єкта та назад відліки по вертикальному та горизонтальному колі змінюються на кути $\Delta\varphi$ та $\Delta\theta$. Тому виникає питання, в який час потрібно фіксувати значення кутів.

1. θ_{out} – у момент подачі сигналу на джерело лазерного випромінювання.
2. θ_{in} – у момент прийому відбитого сигналу.
3. Обчислювати середнє значення кута $(\theta_{out} + \theta_{in}) / 2$.

Для обґрунтування необхідності обліку поправок у вимірних напрямках при скануванні обчислимо кут, на який повернеться призма за час проходження імпульсу від наземного лазерного сканера до об'єкта зйомки та назад. При цьому розглядатимемо лише вертикальний кут сканування, оскільки швидкість сканування у горизонтальному напрямку на кілька порядків нижча, ніж у вертикальному.

Максимальна та мінімальна швидкості сканування у вертикальному напрямку становлять від 1 до 20 ліній на секунду. Це означає, що мінімальна швидкість обертання скануючого променя дорівнюватиме

$$v_{\min} = 1 \text{ ліній} / \text{с} \cdot \frac{2 \cdot 360^\circ}{3} = 240^\circ / \text{с} . \text{ А максимальна} - v_{\max} = 20 \text{ ліній} / \text{с} \cdot \frac{2 \cdot 360^\circ}{3} = 4800^\circ / \text{с} .$$

Можна обчислити час, за який лазерний промінь пройде відстань до об'єкта і назад, а потім значення кутів повороту скануючого дзеркала $\Delta\theta$ за цей час (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Величини кутів повороту дзеркала наземного лазерного сканера з моменту виходу сигналу і до надходження на приймач

R , м	t , с	$\Delta\theta$ при $\nu_{\min}$, °	$\Delta\theta$ при $\nu_{\max}$, °
50	$3,33 \times 10^{-7}$	0,00008	0,00160
100	$6,67 \times 10^{-7}$	0,00016	0,00320
200	$1,33 \times 10^{-6}$	0,00032	0,00640
400	$2,67 \times 10^{-6}$	0,00064	0,01280
1000	$6,67 \times 10^{-6}$	0,00160	0,03200

З таблиці очевидно, що величини $\Delta\theta$ при $\nu_{\min}$ і $\nu_{\max}$ є значними. Це доводить необхідність забезпечення синхронізації вимірювання кутів та відстаней.

Для аналізу факторів, що впливають на точність визначення відстаней тріангуляційним методом, отримаємо формулу залежності від відстані, що визначається від вимірюваних величин. Для цього скористаємось рисунком 2.1, з якого випливає, що:

$$R = d_1 \operatorname{tg} \theta_1, \quad (2.6)$$

$$R = d_2 \operatorname{tg} \theta_2. \quad (2.7)$$

Тоді:

$$d_1 = d + p_1 + p_2 - d_2, \quad (2.8)$$

де d – базис сканера (тріангуляції).

Після підстановки виразу (2.8) у формулу (2.6) та виконання необхідних перетворень, отримаємо:

$$R + R \frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = (d + p_1 + p_2) \operatorname{tg} \theta_1. \quad (2.9)$$

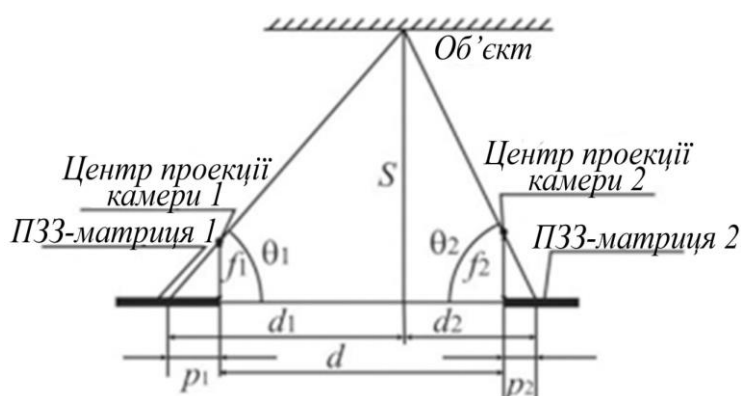


Рисунок 2.1 – Геометрична сутність визначення відстаней тріангуляційними сканерами

Враховуючи, що p_1 і p_2 набагато менші за d і $\operatorname{tg} \theta_2 = f_2 / p_2$, остаточно можна записати:

$$R = \frac{d \cdot f_2 \cdot \sin \theta_1}{f_2 \cdot \cos \theta_1 + p_2 \cdot \sin \theta_1}, \quad (2.10)$$

де f_2 – фокусна відстань об'єктива другої ПЗЗ-камери;

p_2 – абсциса відображення відбитого сигналу від об'єкта на ПЗЗ матриці другої камери.

Тоді максимальну та мінімальну відстані до об'єкта $R_{\max}$ та $R_{\min}$, які є технічними характеристиками тріангуляційних наземних лазерних сканерів, будуть визначені за формулою (2.10) підстановкою до неї граничних значень відхилень скануючого променя $\theta_{1\max}$ та $\theta_{1\min}$. Розмір $R_{\max} - R_{\min}$ називається

глибиною області сканування. З формули (2.10) видно, що точність визначення відстаней до точок об'єкта триангуляційного наземного лазерного сканування залежить від параметрів d , f_2 , θ_1 і точності реєстрації величини p_2 , що характеризує положення відображеного сигналу на ПЗЗ-матриці другої камери. Похибка величини p_2 залежить від розміру елементів ПЗЗ-матриці. З виразу (2.10) випливає, що зменшення базису сканера d призводить до зменшення його дальності дії та збільшення точності визначення просторових координат точок об'єкта. При збільшенні базису сканера збільшується гранична дальність дії сканера, але це спричиняє збільшення розмірів сканера.

Величини $\theta_{1\max}$, $\theta_{1\min}$ залежать від розмірів ПЗЗ-матриць. Їхнє збільшення при незмінному розмірі елементів дозволить збільшити глибину сканування (рис. 2.2), але це призведе до подорожчання наземного лазерного сканера.

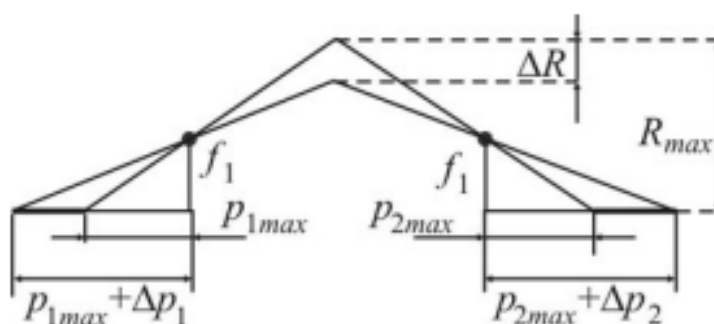


Рисунок 2.2 – Вплив зміни розмірів ПЗЗ-матриці на глибину сканування

Зміна фокусної відстані об'єктива ПЗЗ-камер у триангуляційних наземних лазерних сканерів призводить до зміни двох параметрів: точності отримання координат точок об'єкта та різкості зображення на ПЗЗ-матриці. Аберації використовуваних об'єктивів впливають на точність позиціонування лазерного променя на ПЗЗ-матрицях, оскільки промінь проектується через центр об'єктива [23]. Найбільш вигідно використовувати короткофокусні об'єктиви, що дозволяє забезпечити різкість за великої глибини області сканування. Тому при

розробці тріангуляційних наземних лазерних сканерів необхідно враховувати всі параметри (d, f_2, θ_1, p_2) у комплексі та приходити до компромісних рішень.

Класифікація похибок осьових систем кутомірних приладів, таких як теодоліти, тахеометри та ін., на основі якої похибки кутомірних блоків наземного лазерного сканера можна розділити на такі групи.

1. Ексцентриситети осей приладу:

- ексцентриситет осі обертання призначений для вимірювання вертикальних кутів;
- ексцентриситет осі обертання пристрою для відрахування горизонтальних кутів;
- ексцентриситет осі обертання лінзи, що фокусує лазерний промінь.

2. Колімаційні похибки:

- вертикальна колімаційна похибка (величина відстояння точки, що відповідає початку вимірювання відстаней лазерним далекоміром, від горизонтальної осі обертання призми);
- горизонтальна колімаційна похибка (величина відстояння точки, що відповідає початку вимірювання відстаней лазерним далекоміром, від вертикальної осі обертання приладу).

3. Нахил горизонтальної осі обертання призми або дзеркала:

- коливання нахилу горизонтальної осі;
- неперпендикулярність горизонтальної та вертикальної осей (нерівність цапф);
- нахил горизонтальної осі через нахил вертикальної осі.

4. Нахил вертикальної осі обертання приладу:

- коливання нахилу вертикальної осі;
- нахил вертикальної осі за рахунок пружних деформацій при невірноваженості обертової частини.

5. Похибки нахилу площини відлікового пристрою до відповідної осі її обертання.

Крім перерахованих похибок, в кутомірній системі наземного лазерного сканування при використанні компенсаторів кутів нахилу сканера додається похибка, викликана нахилом вертикальної осі приладу через похибку встановлення її у прямовисне положення (похибки юстування та роботи компенсатора кутів нахилу).

Ще одним видом похибок при вимірі кутів сканером є похибки виготовлення відлікового пристрою, які поділяють на два види: довгоперіодичні та короткоперіодичні.

Система для наземного лазерного сканування, яка включає персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням, дозволяє виключити частину похибок із результатів вимірювання кутів, зокрема, похибки колімації та ексцентриситети відлікового пристрою. Дані види похибок визначаються у вигляді параметрів калібрування та автоматично враховуються на етапі попередньої обробки результатів вимірювань за допомогою керуючого програмного забезпечення. Таким чином, користувач лазерного сканера має доступ лише до виправлених величин кутів.

Унаслідок вимірювання кутів при наземному лазерному скануванні можна виключити похибки виготовлення відлікових пристроїв. Для цього нині використовуються видозмінені ряди Фур'є. Однак у ПЗ існуючих моделей наземних лазерних сканерів облік даних видів похибок практично поки що не виконується. Проведені експериментальні дослідження показали, що виключення цього виду похибок може підвищити точність виміру кутів до 40 %.

Існуючі моделі наземних лазерних сканерів дозволяють вимірювати вертикальні та горизонтальні кути з похибкою від 2" до 9".

2.3 Вплив атмосфери на точність вимірювання кутів та відстаней наземними сканерами

На величини, що вимірюються наземними лазерними сканерами (відстань, горизонтальний і вертикальний кути, інтенсивність і реальний колір

поверхні об'єктів, від яких відбився сигнал), несприятливо впливає атмосфера, особливо приземний її шар. У цьому шарі відбуваються значні зміни щільності повітря, переміщення та флуктуації повітряних мас, що призводить до зменшення швидкості розповсюдження світла та зміни напрямку випромінювання (явлення рефракції), а також до зменшення інтенсивності відбитого сигналу та неправильної передачі кольору (так званий ефект «димки»).

Унаслідок впливу рефракції світлових променів далекомірний блок вимірює оптичну довжину хвилі, яка перевищує по довжині геометричну. Крім цього, атмосфера змінює фізичні параметри випромінювання, викликаючи:

- згасання (послаблення інтенсивності), зумовлене поглинанням та розсіюванням енергії хвилі в атмосфері;
- випадкову зміну параметрів хвилі, зумовлена турбулентністю атмосферного повітря.

Згасання коливань електромагнітної хвилі, спричинене атмосферою, особливо характерне для оптичного діапазону, який використовується у всіх наземних лазерних сканерах. Даний вид впливу атмосфери, в першу чергу, призводить до зменшення дальності дії сканерів і неправильному визначенню здатності, що відбиває об'єкта при наземній лазерній зйомці.

До випадкових змін параметрів електромагнітної хвилі під впливом турбулентності відносяться флуктуації амплітуди (інтенсивності), фази, частоти, поляризації, напрями поширення хвилі та кута розбіжності лазерного променя. Вплив флуктуацій виявляється у збільшенні спектральної щільності потужності шумів на вході приймача, внаслідок чого погіршується відношення сигнал/шум. Флуктуація особливо виявляється при вимірах в оптичному діапазоні. Найкращим способом виключення впливу турбулентності атмосфери є вибір найбільш сприятливих умов вимірювань, які у геодезичній практиці називаються часом «спокійного зображення».

На похибку визначення швидкості світла впливає багато чинників. Основним є значна похибка визначення середньоінтегральної величини

показника заломлення електромагнітних хвиль на відрізок між сканером і точкою об'єкта. Так як швидкість світла у вакуумі на даний момент отримана з відносною похибкою порядку 10^{-9} вона не надає помітного впливу на загальну похибку визначення швидкості світла в атмосфері [24]. Похибка показника заломлення залежить від дисперсійної складової та від похибки визначення метеопараметрів уздовж лазерного променя. Використання як джерело сигналу вузькоспектральних лазерів (характерних для всіх нових розробок в області світлодаальнометрії та лазерного сканування) дозволяє знехтувати дисперсійною помилкою.

Показник заломлення n для конкретних умов середовища є функцією щільності повітря, для визначення якої за допомогою барометрів і психрометрів вимірюють тиск, температуру та вологість повітря. Оскільки принцип вимірювання відстаней світлодіодами та наземними лазерними сканерами аналогічний, то для розрахунку показника заломлення електромагнітних хвиль з урахуванням метеоданих при скануванні об'єкта можна використовувати формулу:

$$n_R = 1 + \frac{n_G - 1}{1 + \alpha(T + 273,16)} \frac{p}{760} - \frac{55E}{1 + \alpha(T + 273,16)} \cdot 10^{-9}, \quad (2.11)$$

де α – постійна газова, рівна $1/273,16$;

p – тиск атмосфери, мм ртутного стовпа;

E – абсолютна вологість повітря, в г/м^3 ;

T – температура повітря, у кельвінах;

n_G – показник заломлення стандартного повітря, що обчислюється за формулою:

$$(n_G - 1) \cdot 10^7 = 2876,04 + \frac{16,288}{\lambda^2} + \frac{0,136}{\lambda^4}, \quad (2.12)$$

де λ – довжина хвилі випромінювача.

Швидкість поширення електромагнітних коливань у щільному середовищі (зокрема, у повітрі), залежить від фізичних властивостей середовища та довжини електромагнітної хвилі. Показник заломлення електромагнітних хвиль у нормальних умовах середовища для конкретної довжини хвилі може бути обчислений за формулою:

$$(n-1) \cdot 10^{-8} = A + \frac{B}{C - \sigma^2} + \frac{D}{E - \sigma^2} + \frac{F(G - \sigma)}{K + (G - \sigma)^2}, \quad (2.13)$$

де A, B, C, D, E, F, G, K – коефіцієнти;

σ – величина, зворотна довжині хвилі у вакуумі, мкм^{-1} .

Для вирішення проблеми обліку впливу атмосферних умов на результат далекомірних вимірювань на основі електромагнітних випромінювань використовуються різні методи, серед яких найефективнішим вважається дисперсійний метод визначення середньоінтегрального показника заломлення з використанням формули (2.13).

Для цього методу зазвичай застосовуються два випромінювача з різними несучими частотами. У фізичному сенсі горизонтальна рефракція є функцією показника заломлення електромагнітних хвиль у різних шарах атмосфери. Цю функціональну залежність особливо важко описати математично для локальних неоднорідностей атмосфери. Тому на практиці для обліку горизонтальної рефракції використовують формулу, до якої входять інтегральні показники атмосфери (температура, тиск та вологість). Дослідження, виконані різними фахівцями, показують, що значне спотворення у виміряний напрямок можуть вносити власні рефракційні поля споруд (у деяких випадках до $20''$ у горизонтальні кути, коли промені проходять поблизу споруд на відстані до $1,5 \text{ м}$).

Найбільш вивченим із усіх явищ є вертикальна рефракція, облік якої вимагає вимірювання температури та тиску.

Вплив вібрації основи наземного лазерного сканера із частотою щонайменше 50 Гц призводить до похибок виміру як кутів, так і відстаней. Вібрація викликає усунення приладу вздовж вимірюваної лінії, а також поперек її у вертикальній та горизонтальній площинах.

Вібрація робить основний вплив на далекомірні вимірювання, вона викликає хаотичне зміщення лазерного пучка щодо заданого напрямку на точку сканування і призводить до випадкової амплітудної та фазової модуляцій. Вплив випадкової зміни амплітуди модулюючого сигналу через вібрацію приладу еквівалентний впливу мультиплікативної перешкоди. Вплив мультиплікативної складової може призводити до значних спотворень у вимірних відстанях. Випадкова фазова модуляція пов'язана з фазовою неоднорідністю модульованого випромінювання та за результатами досліджень, викликає похибки у вимірній відстані близько 1–2 мм. Через вібрацію наземного лазерного сканера при віддаленні приладу від об'єкта на відстань від 20 м до 30 м похибка вимірювання відстаней збільшується від 40 % до 50 % порівняно з похибкою відстані у разі відсутності вібрації. При відстані від 60 м до 70 м ця похибка зростає в 3–4 рази. При відстанях від 80 м до 90 м похибка становить від 10 см до 15 см. Вплив вібрації завжди призводить до збільшення вимірюваної відстані.

2.4 Вплив метрологічних властивостей об'єктів на точність наземної лазерної зйомки

На результати наземного лазерного сканування основний вплив мають такі метрологічні властивості об'єктів: форма і здатність, що відбиває, яка, у свою чергу, визначається текстурою, кольором. Вплив об'єкта зйомки на точність отримання просторової інформації в основному проявляється в похибці вимірюваних відстаней.

При вимірі відстаней імпульсним методом форма лазерного сигналу здебільшого відповідає кривою Гауса з певною шириною [25]. Тривалість

лазерного імпульсу для діодів, що застосовуються в сучасних сканерах, змінюється в межах від кількох десятків пікосекунд до кількох наносекунд, тому на практиці для визначення відстаней від сканера до об'єкта і обернено повинен вимірюватися час поширення сигналу між максимумами двох функцій (рис. 2.3), відповідних вихідному (опорному) та вхідному (робочому) електромагнітному сигналу. Аналогічним чином визначаються відстані фазовим методом, так як вимірювання дробової частини довжини напівхвилі здійснюється подібно до імпульсного методу.

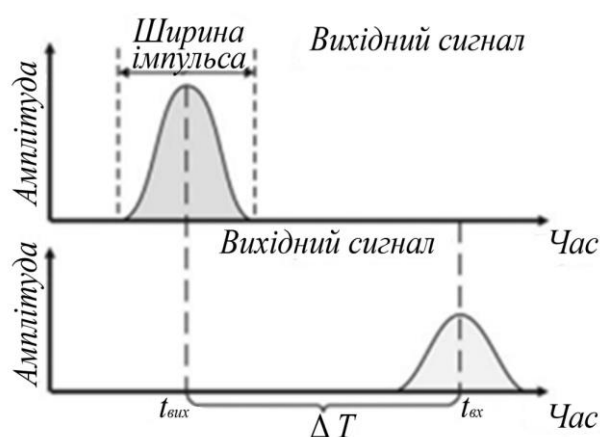


Рисунок 2.3 – Час поширення імпульсу в просторі

Використовувані цифрові фазовимірювальні пристрої реєструють короткочасні імпульси, кожен з яких відповідає певній фазі світлового потоку, що випромінюється і приймається. Короткочасні імпульси утворюються із синусоїдальних електричних сигналів, що подаються на фазовимірювальний пристрій.

При наземному лазерному скануванні на результати пошуку максимумів обох функцій впливають наявність шумових складових електромагнітному сигналі, апертура вихідного сигналу лазера, величина розбіжності лазерного променя, відстань до об'єкта, форма і здатність мети, що відображає.

Припустимо, що об'єкт, до якого вимірюється відстань, має форму сфери радіусом R , що дорівнює відстані від лазерного джерела до мети. Тоді час розповсюдження лазерного сигналу до різних точок об'єкта і назад до приймача (якщо вважати, що він суміщений із джерелом випромінювання) буде постійною величиною (рис. 2.4). У цьому випадку ширина вихідного та вхідного імпульсів збігатиметься і відстань визначатиметься з більш високою точністю. Однак на практиці така ситуація майже ніколи не трапляється.

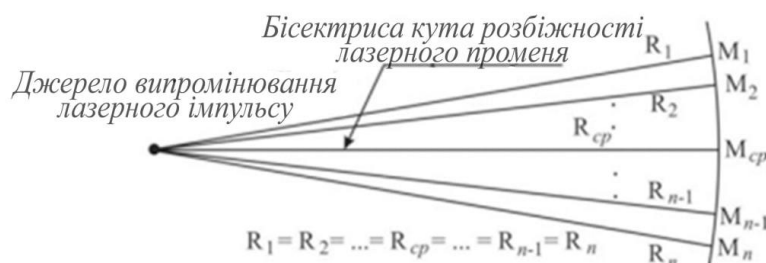


Рисунок 2.4 – Відстань від лазерного джерела до різних точок сферичного об'єкта радіусом R

Припустимо, що ціль являє собою площину. Тоді вхідний сигнал буде дещо ширшим за вихідний, причому ступінь розмивання його залежить від орієнтації площини по відношенню до вектора поширення лазерного променя (вона буде мінімальною, якщо площина розташована перпендикулярно до променя) (рис. 2.5). Таким чином, точність визначення відстаней для випадку A буде вищою, ніж для випадку B .

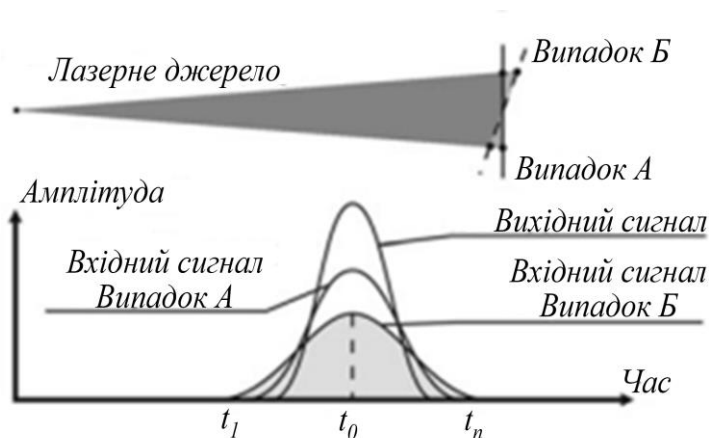


Рисунок 2.5 – Залежність ширини вхідного імпульсу від орієнтації об'єкта

Якщо взяти до уваги симетричність кривої Гауса, то можна замінити пошук максимуму функції визначенням положення центру її мас по осі в р емені. Тоді час поширення сигналу від джерела випромінювання до об'єкта і назад до приймача обчислюватиметься за такою формулою:

$$t_0 = \frac{\int_{t_l}^{t_n} t f(t) dt}{\int_{t_l}^{t_n} f(t) dt} \quad (2.14)$$

де $f(t)$ – функція вхідного.

Проте необхідно зазначити, що симетричність відбитого сигналу порушуватиметься залежно від форми мети, її орієнтації щодо лазерного променя, а також градієнта функції відображуючої здатності об'єкта, на який потрапляє промінь.

Коли лазерний промінь потрапляє на межу двох об'єктів (рис. 2.6), функція відбитого сигналу матиме два максимуми, якщо не враховувати цей факт, то час, що обчислюється за формулою (2.14), а отже, відстань відповідатиме певній точці M (рис. 2.6), яка не належить об'єкту.

Роздільна здатність цієї неоднозначності можлива за умови, якщо визначено положення двох максимумів у функції вхідного сигналу. Якість вирішення цього завдання, у свою чергу, залежить від тривалості лазерного імпульсу та відстані між об'єктами *A* та *B* (рис. 2.6). Мінімальна відстань між двома об'єктами, при якому можливо відокремити один максимум функції від іншого, можна назвати роздільною здатністю розділення двох об'єктів, що залежить від тривалості імпульсу лазерного джерела.

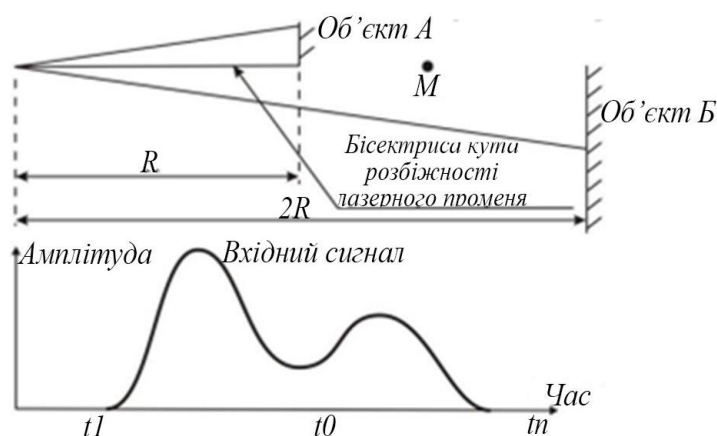


Рисунок 2.6 – Форма вхідного сигналу при попаданні лазерного променя на межу двох об'єктів

Текстура і колір об'єкта, що сканується, безпосередньо впливають на силу відбитого сигналу, що також призводить до зміни форми функції відбитого сигналу. Так, наприклад, із рисунка 2.7 видно, що при скануванні плоского об'єкта, одна частина якого забарвлена в білий колір, а інша – в чорний, результат сканерної зйомки матиме велику шумову складову на межі різних кольорів.

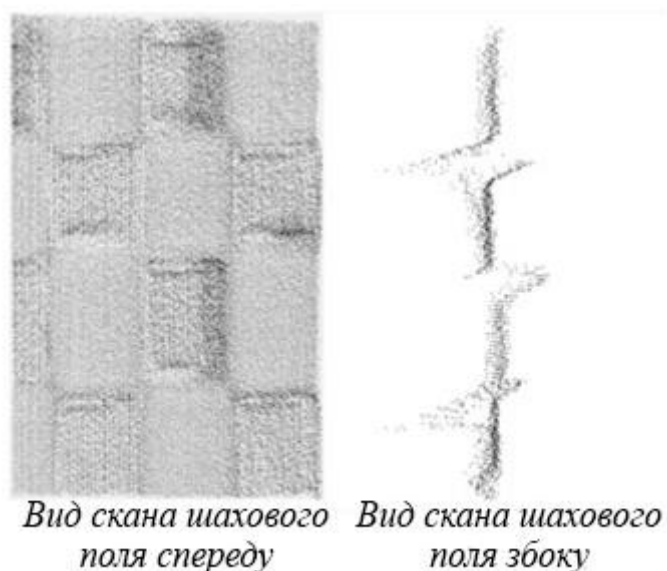


Рисунок 2.7 – Вплив текстури та кольору об'єкта на результат наземного лазерного сканування

Процес поширення лазерного імпульсу у просторі є дуже складним. У загальному вигляді функція вхідного сигналу може бути описана формулою:

$$f_{ex}(t) = \int_{-\Delta\varphi}^{\Delta\varphi} \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \left[f_{вих} \left(t - \frac{2D(\varphi, \nu)}{c} \right) K_{від}(\varphi, \nu) \Psi(\varphi, \nu) \right] d\varphi \cdot d\nu + \eta(t), \quad (2.15)$$

де $f_{ex}(t)$ – функція вихідного сигналу;

$D(\varphi, \nu)$ – функція, яка описує зміну відстані від лазерного джерела до різних точок об'єкта, тобто відображає форму об'єкта;

$K_{від}(\varphi, \nu)$ – функція, що характеризує коефіцієнт відображення сигналу від різних точок об'єкта; променя;

$\eta(t)$ – функція, що характеризує шумові складові результатів сканування.

З використанням формули (2.15) можна виконати математичне моделювання процесу сканерної зйомки та вивчити вплив таких характеристик об'єкта, як форма, колір та структура, на точність отримання даних.

Досвід виконання сканерної зйомки, помилки в відстанях, пов'язані з метрологічними властивостями об'єктів, можуть досягати кількох метрів (якщо розбіжність лазерного променя більше $1 \text{ мрад} \approx 3,5^\circ$), а в середньому становлять від 1 см до 3 см.

Очевидно, що більшості проблем, пов'язаних з впливом структури, форми, орієнтації та кольору об'єкта на результати сканування, можна уникнути, якщо зменшити розбіжність лазерного променя, тобто збільшити ступінь його колімації, покращивши метричні характеристики сканів.

Вплив таких характеристик об'єкта як форма, колір і структура враховувати в реальних умовах сканування дуже складно, тому важко зробити однозначні висновки про точність отримання даних сканування того чи іншого об'єкта. Це завдання можна вирішити, застосовуючи методи математичного моделювання процесу сканерної зйомки конкретних об'єктів з використанням формули (2.15).

2.5 Вплив параметрів сканування та характеристик сканерів на точність отримання даних

При виконанні сканерної зйомки необхідно вибирати інструмент, параметри та технологію сканування, які дозволяють надалі створити модель об'єкта місцевості та рельєфу із заданою точністю та детальністю. Визначальними характеристиками наземного лазерного сканера є:

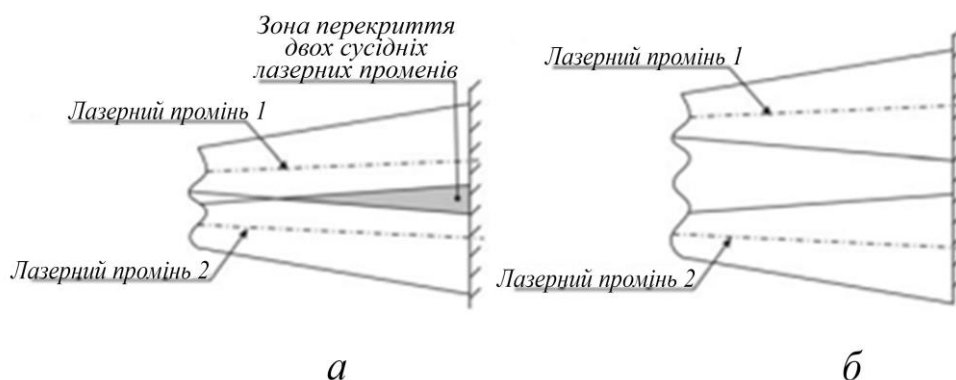
- максимальна вертикальна та горизонтальна роздільна здатність сканування;
- довжина хвилі лазерного випромінювача;
- точність вимірювання відстаней, вертикальних та горизонтальних кутів;
- розбіжність лазерного променя.

У курсі фізики використовують два поняття розбіжності лазерного променя. У першому випадку мають на увазі плоский або тілесний кут Q або Q_s , що визначає ширину діаграми спрямованості в дальній зоні за рівнем рівня

кутового розподілу енергії або потужності, віднесеному до його максимального значення [26]. Найчастіше значення рівня приймається рівним 0,5 та $1/e^2$. Це поняття характеризує випромінювання одномодового лазера, близьке до гаусового, що застосовується у наземних сканерах.

Якщо проводити аналогію наземних лазерних сканерів зі знімальними системами, то перші три характеристики будуть визначати геометричну точність побудови скана, а остання – здатність системи, що вирішує, так як ця величина показує мінімальний розмір об'єкта при заданому видаленні його від сканера для однозначного знаходження максимуму функції вхідного сигналу.

Роздільна здатність системи меншою мірою залежить від дозволу сканування, ніж від розбіжності лазерного променя, оскільки при зменшенні значення кутового кроку сканування збільшується зона перекриття двох сусідніх лазерних променів, як показано на рисунку 2.8. Роздільна здатність лазерних сканерів в основному залежить від розбіжності лазерного променя. З рисунка 2.8 можна дійти невтішного висновку, що кутовий дозвіл має меншу величину, ніж розбіжність лазерного променя. Це означає, що при заданій розбіжності лазерного променя в конкретному сканері не можна отримати на скані дрібні деталі об'єкта лише за рахунок підвищення роздільної здатності сканування.



а – максимальна роздільна здатність сканування;

б – мінімальна роздільна здатність сканування.

Рисунок 2.8 – Тракткування роздільної здатності

Як відомо з курсу фізики, різні матеріали по-різному відображають випромінювання тієї чи іншої довжини хвилі. Тому будуть індивідуальні реєстровані сканером інтенсивності відбитих сигналів певної довжини хвилі. Це свідчить про різні амплітуди і фронти хвиль сигналів, що приймаються. У свою чергу, від крутості фронту хвилі залежить, наскільки правильно можна встановити моменти часу початку та закінчення надходження лазерного імпульсу на приймач, що безпосередньо впливає на похибки вимірювання відстаней.

Оскільки за результатами наземного лазерного сканування надалі відновлюється тривимірна або двовимірна модель місцевості, то для правильного її опису необхідно, щоб від кожного об'єкта зйомки відобразилося якнайбільше лазерних імпульсів, кількість яких залежить від дозволу сканування.

ВИСНОВКИ

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. 1988. С. 383.
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). 1989. С. 140.
6. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. 2006.
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. 1984. С. 220.
24. Арефьев А.А. Исследование влияния амплитудных искажений энергетического профиля лазерного пучка на ошибку измерения

непрямолинейности 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. 29–33.