

**Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА**

Кафедра геодезії та землеустрою

Ісенко Анастасія Максимівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
«Використання технології мобільного лазерного сканування для
підвищення ефективності геодезичної зйомки»
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

А. Ісенко, студент групи ГЗ-22-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: д.г.н., професор Приходько Микола Миколайович
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри **проф. Микола ПРИХОДЬКО**
(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Ісенко Анастасія Максимівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Використання технології мобільного лазерного сканування для підвищення ефективності геодезичної зйомки»

керівник роботи д.г.н., професор Приходько Микола Миколайович

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Переваги та недоліки персональних лазерних сканерів
2. Збір тривимірної інформації про об'єкти на Землі з високою точністю
3. Проведення дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Переваги та недоліки персональних лазерних сканерів		
2	Збір тривимірної інформації про об'єкти на Землі з високою точністю		
3	Проведення дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ *Ісенко А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

Поточними технологічними досягненнями у сфері лазерного сканування є низка методів збору просторової інформації, серед котрих виділяють сканування з поверхні землі, з повітря та із рухомих засобів, що знаходять розширене використання у роботах з геодезії та землеустрою на території України.

Виокремлену гілку серед цих методик складають індивідуальні (персональні) лазерні сканери, впровадження яких в інженерно-геодезичні проєкти останнім часом стало досить помітним.

Індивідуальні комплекси лазерного сканування групуються на переносні та ранцеві установки, і вони визнаються дієвим засобом для проведення вимірювань у непростих ландшафтних умовах, властивих різним областям України.

Ключова перевага персональних сканерів полягає у їхній значній рухливості під час знімального процесу, що дає змогу швидко й безперебійно акумулювати просторові відомості на ділянках зі складною конфігурацією рельєфу, густою забудовою чи густим рослинним покривом.

Властиво, на противагу класичним стаціонарним та рухомих (мобільним) системам, фахівець під час збору даних переміщується територією зі звичайною швидкістю пересування пішки, чого цілком достатньо для формування насичених масивів точок.

Застосування індивідуальних лазерних сканерів усуває труднощі, спричинені необхідністю багаторазово переміщувати наземну апаратуру між точками вимірювання та заново монтувати прилади на триногу, що має значний вплив на процес виконання землепоряджувальних зйомок.

У рамках цієї бакалаврської роботи було здійснено цільове вивчення потенціалу використання ранцевої лазерної сканувальної системи

LiBackpack DGC50, яка класифікується як персональний лазерний сканер, для актуалізації кадастрових даних.

Просторові величини, зафіксовані під час сеансу сканування, були прив'язані до Української державної геодезичної системи координат УСК-2000 та згодом задіяні для створення та верифікації кадастрових відомостей згідно з чинними нормами системи ведення кадастру України.

Ключові слова: персональні лазерні сканери, ранцеве лазерне сканування, УСК-2000, кадастрова система України, хмари точок, точність кадастрових зйомок.

Abstract

Current technological advances in the field of laser scanning include a number of methods for collecting spatial information, including scanning from the ground, from the air, and from mobile devices, which are widely used in geodesy and land management work in Ukraine.

A separate branch among these methods is individual (personal) laser scanners, the implementation of which in engineering and geodetic projects has recently become quite noticeable.

Individual laser scanning complexes are grouped into portable and backpack installations, and they are recognized as an effective means for conducting measurements in difficult landscape conditions characteristic of various regions of Ukraine.

The key advantage of personal scanners is their significant mobility during the surveying process, which allows you to quickly and smoothly accumulate spatial information in areas with a complex terrain configuration, dense construction, or dense vegetation cover.

In fact, in contrast to classic stationary and mobile systems, during data collection, a specialist moves through the territory at a normal walking speed, which is quite sufficient to form saturated arrays of points.

The use of individual laser scanners eliminates the difficulties caused by the need to repeatedly move ground equipment between measurement points and re-mount the devices on a tripod, which has a significant impact on the process of performing land surveying.

As part of this bachelor's thesis, a targeted study of the potential of using the LiBackpack DGC50 backpack laser scanning system, which is classified as a personal laser scanner, for updating cadastral data was carried out.

Spatial values recorded during the scanning session were tied to the Ukrainian State Geodetic Coordinate System USK-2000 and subsequently used

to create and verify cadastral information in accordance with the current standards of the Ukrainian cadastral management system.

Keywords: personal laser scanners, backpack laser scanning, USK-2000, cadastral system of Ukraine, point clouds, accuracy of cadastral surveys.

ЗМІСТ

Вступ

1. Переваги та недоліки персональних лазерних сканерів

1.1 Переваги персональних лазерних сканерів

1.2 Недоліки персональних лазерних сканерів

1.3 Аналіз точності та джерела похибок

2. Збір тривимірної інформації про об'єкти на Землі з високою точністю

2.1 Основні підходи до отримання 3D-просторових даних

2.2 Роль лазерного сканування у високоточному 3D-зборі даних

2.3 Формування хмар точок і цифрових моделей

2.4 Забезпечення високої точності тривимірних вимірювань

2.5 Застосування високоточних 3D-даних у кадастровій та інженерній практиці

2.6 Підходи до збору тривимірної інформації про об'єкти на Землі

3. Проведення дослідження

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

При здійсненні топографічних та геодезичних зйомок використовується цілий спектр технік, вибір яких детермінований як масштабами досліджуваної ділянки, так і тим рівнем деталізації, що потрібен у підсумку.

Якщо ж об'єкти займають обширні простори, які вимірюються кілометрами, найраціональнішим рішенням стає залучення повітряних носіїв, а саме – літальних апаратів або ж безпілотних систем.

Первинно геодезичні проміри здійснювалися традиційними інструментами, такими як теодоліти та тахеометри, і це стосувалося переважно невеликих площ.

Подальше впровадження супутникових навігаційних технологій суттєво полегшило процес прив'язки точок до глобальних або національних систем координат, зокрема до УСК-2000, яка є обов'язковою умовою для ведення кадастру в межах України.

Однак, незважаючи на високу точність зазначених підходів, для формування якісних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) отримати необхідну насиченість вимірювань все одно вимагає вагомих часових інвестицій.

На сьогоднішній день, об'ємні набори просторових відомостей, котрі вміщують мільйони точок та гарантують точність у межах міліметра-сантиметра, звичним чином створюються за допомогою наземних лазерних сканувальних пристроїв.

Подальший прогрес цієї технології призвів до виникнення мобільних лазерних сканерів, які певною мірою долають обмеження нерухомих установок та дають можливість наростити ефективність вимірювальних операцій "у полі".

Наступний щабель у розвитку лазерного сканування ознаменувався інтеграцією персональних лазерних сканерів — апаратурних комплексів, які обслуговуючий персонал переносить безпосередньо під час переміщення.

Залежно від конструктивного оформлення, такі системи класифікуються як портативні (ті, що тримають у руках) та ранцеві.

На відміну від стаціонарних наземних сканерів, персональні системи не вимагають фіксації на штативі та характеризуються значною рухливістю, що уможливлює швидкий та безперебійний збір просторових даних.

Портативні лазерні томографи спроможні проводити оцифрування заплутаних тривимірних ландшафтів у динаміці, навіть коли сигнал GNSS не є надійним.

Це досягається завдяки використанню методів одночасного визначення місця розташування та побудови карти (SLAM), у роботу яких залучені лідарні, інерційні та процесорні компоненти.

Подібні технологічні рішення активно розробляються та знаходять своє впровадження у галузі лісівництва, зокрема для обліку лісонасаджень, прорахунку характеристик окремих екземплярів дерев, визначення показника листової поверхні (LAI), а також планування шляхів пересування у лісових угіддях.

Результати наукових праць свідчать, що комбінація даних, отриманих із наземного та індивідуального лазерного сканування, оптимізує збір інформації про будову рослинного ярусу та нижнього ярусу, що має ключове значення для аналізу ризиків загоряння у лісових екосистемах.

До того ж, використання персональних сканерів мінімізує часові витрати та допомагає уникнути недостовірності даних, яка часто трапляється при використанні стаціонарних наземних апаратів.

Конкретно, доведено, що процес ідентифікації розташування та вимірювання діаметра дерев за допомогою мобільних лазерних сканерів

може здійснюватися у рази стрімкіше, аніж при застосуванні традиційних наземних лазерних систем.

Персональні лазерні сканери бачаться як економічно вигідний та прагматичний спосіб збирати і опрацьовувати просторову інформацію у лісових масивах України.

У результаті утворені хмари точок можна застосовувати для побудови цифрових моделей місцевості, підрахунку обсягів деревини, планування лісівницьких заходів та визначення параметрів моделей росту лісу.

Специфічні природні обставини, притаманні багатьом територіям України, зокрема Карпатському краю та лісостепу, диктують необхідність у мобільних засобах, здатних ефективно працювати на нерівних, зарослих і важкодоступних ділянках.

Ключовою перевагою у прогресі технологій лазерного сканування є поєднання високої точності лідарних замірів, насиченості даних та маневреності оператора, який пересувається пішки.

Портативні лазерні сканери являють собою вагомий плюс при дослідженні теренів зі складною будовою рельєфу та обмеженою оглядовістю.

Системи, що носяться за спиною (ранцеві), об'єднують лідар, інерційні сенсори (IMU), обчислювальні пристрої та додаткове устаткування у єдиний рухомий комплекс, де геодезист є фактичним переносником цієї апаратури.

Порівняно зі стаціонарними наземними лідарними апаратами, системи лідарного сканування, що переносяться за спиною, відзначаються меншою вагою та вищою мобільністю, що дає змогу створювати високоякісні тривимірні набори точок, навіть у лісових угіддях, незалежно від густоти рослинного покриву.

У місцях, куди важко дістатися, подібні комплекси можуть успішно комбінуватися з іншими способами збору даних, наприклад, аерофотографуванням за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Що стосується землевпорядних (кадастрових) завдань в Україні, традиційні підходи до зйомки, що ґрунтуються на розгортанні полігонометрії чи застосуванні систем GNSS, стикаються з певними труднощами.

Це включає необхідність прямої видимості між точками, ускладнення роботи серед густої рослинності та відсутність можливості генерувати насичені тривимірні відомості.

Водночас, індивідуальні лазерні сканери спроможні нівелювати частину цих проблем, забезпечуючи збір детальних хмар точок із точним позиціонуванням у національній системі координат УСК-2000.

У цьому дослідженні здійснено розгляд потенціалу застосування ранцевого портативного лазерного сканера задля актуалізації кадастрових зйомок.

Було виконано порівняльний аналіз точності, беручи до уваги дані, отримані як геодезичними методами, так і за допомогою лідарних вимірювань.

Наступні секції сфокусовані на вивченні сильних та слабких сторін персональних лазерних сканерів, а також містять докладний опис об'єкту дослідження, опису робочого процесу та інтерпретації здобутих даних.

У заключній частині доведено практичну цінність використання ранцевих лазерних сканерів для верифікації й оновлення контурів земельних наділів, особливо у важкодоступних природних локаціях.

1. Переваги та недоліки персональних лазерних сканерів

Персональні лазерні сканери — це порівняно новий тип лідарних установок, де апаратуру для збору даних носить із собою оператор, рухаючись при цьому.

Ця методика докорінно відрізняється від застосування традиційних наземних та рухомих лазерних сканерів, що обумовлює як вагомі позитивні сторони, так і деякі рамки їхнього застосування у геодезичних, кадастрових та лісогосподарських заходах на теренах України.

1.1 Переваги персональних лазерних сканерів

Один із головних плюсів портативних лазерних сканерів — це їхня виняткова рухливість при отриманні просторових відомостей.

На відміну від стаціонарних наземних сканерів, які вимагають фіксації на тринозі та неодноразового переставлення між точками заміру, персональні апарати дають змогу робити виміри безперервно, поки оператор рухається пішки.

Це надзвичайно цінно в непростих ландшафтних умовах, притаманних значній частині українських територій, зокрема у густих лісах, гірських місцевостях і кварталах з густою забудовою.

Іншою важливою перевагою є помітне прискорення виконання польових завдань. Застосування індивідуальних лазерних сканерів суттєво зменшує часові витрати на збір інформації, якщо порівнювати з класичними геодезичними підходами та скануванням за допомогою наземних станцій.

Режим безперервних замірів сприяє швидкому формуванню насичених точкових хмар, що є вирішальним моментом для побудови електронних моделей місцевості та споруд.

Ключовою перевагою особистих лазерних сканерів є їхня здатність функціонувати навіть за слабкого чи мінливого сигналу GNSS.

Використовуючи підходи на кшталт одночасної локалізації та побудови карти (SLAM), ці пристрої можуть здійснювати зйомку у густих лісах, під кронами дерев, у тісних міських каньйонах чи біля архітектурних конструкцій, де супутниковий зв'язок є ускладненим.

Це значно розширює межі використання персональних лазерних сканерів, виводячи їх за межі традиційних GNSS-залежних методик.

Персональні лазерні сканери генерують надзвичайно насичений обсяг просторових даних, що дає змогу фіксувати складні тривимірні об'єкти з високим ступенем деталізації.

Згенеровані масиви точок придатні, зокрема, для створення наддеталізованих цифрових моделей рельєфу, точного вимірювання геометричних характеристик споруд, а також для інвентаризаційних робіт у лісовому господарстві, аналізу рослинності та спостереження за змінами у довкіллі.

Ще однією перевагою, що вирізняє персональні лазерні сканери, є їхня здатність до широкого спектру застосувань.

Їхнє вживання охоплює численні сфери, починаючи від топографічних зйомок та інженерних вимірювань, аж до сфери управління лісами, контролю за станом довкілля та формування цифрових моделей будівель.

Стосовно кадастрової роботи на теренах України, такі портативні сканери постають як інструмент із великим потенціалом для точнішого визначення меж землевласних територій та актуалізації наявної просторової інформації, особливо там, де умови є складними.

1.2 Недоліки персональних лазерних сканерів

Незважаючи на вагомі переваги, ручні лазерні сканери також мають певні вади, які слід брати до уваги при проектуванні та здійсненні знімальних робіт.

Ключовою слабкістю є менша абсолютна точність визначення координат, якщо порівнювати з традиційними наземними сканерами, особливо коли відсутнє стабільне прив'язування через GNSS.

Якість отриманих даних значною мірою детермінована ефективністю роботи алгоритмів SLAM та фактичними умовами знімання.

Критичним елементом, що відбивається на якості зібраної інформації, є прогресуюче накопичення помилок у процесі переміщення оператора.

Довгі шляхи сканування, які не завершуються замиканням контуру, можуть спричинити поступове збільшення помилок позиціонування.

Це, своєю чергою, вимагає впровадження додаткових технік для моніторингу та виправлення неточностей, як-от застосування еталонних маркерів чи поєднання з даними GNSS.

Серед мінусів портативних лазерних сканерів виокремлюється також обмежений радіус дії та часто недостатня роздільна здатність вимірювань певних моделей, що може не задовольнити потреби при зйомці обширних територій на відкритому повітрі чи височенних споруд.

Для таких сценаріїв раціональним рішенням стає інтеграція персонального лазерного сканування з іншими підходами, як-от аерофотографування з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або традиційні геодезичні роботи.

Ключовим питанням постає процес опрацювання зібраної інформації.

Масиви точок, накопичені завдяки персональним лазерним сканерам, вимагають суттєвих потужностей обчислювальної техніки та застосування фахового програмного забезпечення для їхнього очищення, приведення у відповідність (реєстрації) та прив'язки до державної системи координат УСК-2000.

Це, своєю чергою, може створювати перешкоди для впровадження подібних технологічних рішень у діяльності менших підприємств.

Окрім того, необхідно зважати на фізичний тягар, який несе оператор.

Тривале оперування ранцевими установками здатне спричинити втому, особливо коли роботи проводяться на нерівній території чи за негоди.

З огляду на це, час безперервного виконання завдань у полі є обмеженим, і це вимагає належного навчання для персоналу.

1.3 Аналіз точності та джерела похибок

Якість просторової інформації, здобутої шляхом лазерного сканування, безпосередньо залежить від її точності, яка, своєю чергою, диктує придатність цих даних для застосування у землевпорядкуванні, інженерних вишукуваннях та лісовому господарстві.

Щодо портативних (персональних) лазерних сканерів, оцінка точності набуває першорядного значення, оскільки ці апаратури інтегрують дані лідарів із показаннями інерційних сенсорів та методами SLAM (одночасна локалізація та картографування), що призводить до формування унікального розподілу похибок.

У сфері лазерного сканування прийнято розрізняти два типи точності: відносну та абсолютну.

Показником відносної точності є ступінь збігу взаємного розташування точок, що входять до єдиного масиву (хмари), і він визначає коректність відображення геометрії об'єктів.

Абсолютна ж точність стосується відповідності обчислених координат об'єктів загальноприйнятій державній системі координат, наприклад, УСК-2000, і має вирішальне значення для ведення кадастру на території нашої держави.

Стосовно індивідуальних лазерних сканерів, здебільшого їм притаманна висока відносна точність, проте абсолютна точність насамперед визначається методом геореференціації, доступністю даних GNSS та застосуванням наземних геодезичних маркерів.

Помилки, що виникають під час персонального лазерного сканування, є багатограничними й накопичуються на різних стадіях процесу – від збору до опрацювання інформації.

Ключовим чинником формування неточностей виступають помилки, властиві самим лідарним вимірюванням.

Це обумовлено точністю розрахунку дистанції до цілі, кутовою деталізацією (роздільною селективністю) роботи сканера та якістю отриманого відбитого сигналу.

На зазначені характеристики прямо впливають такі фактори, як метеорологічні умови, характеристики відбивальної здатності поверхонь об'єктів і ступінь заліснення чи чагарниковості території.

Незначні недоліки в роботі інерційних вимірювальних модулів (IMU) суттєво позначаються на кінцевих даних.

Поступове наростання помилок при вимірюванні орієнтації й прискорення, що відбувається у процесі переміщення особи, яка керує апаратом, тягне за собою зміщення шляху сканування.

На тривалих відрізках, де немає потреби повторно охоплювати вже пройдені зони, це здатне викликати зсув загального положення хмари точок.

Ядро окремого класу становлять помилки, притаманні алгоритмам SLAM, які, своєю чергою, тісно пов'язані з архітектурою оточення та наявністю у ньому чітких елементів для кореляції.

На відкритих або ж у зовсім недиференційованих просторах, як от орні землі чи ділянки лісозаготівлі, функціонування SLAM може погіршуватися через брак надійних просторових орієнтирів.

Значну роль відіграє також і суб'єктивний чинник, адже темп руху оператора, рівномірність його шляху та метод, яким він долає маршрут, безпосередньо відображаються на якості зведених точкових масивів.

Раптові маневри, зупинки чи нерівномірний хід руху можуть спричинити локальні викривлення у зібраних даних.

На отримані результати персонального лазерного сканування суттєво впливають зовнішні чинники.

У заболочених та лісистих місцевостях, як от Карпати чи Полісся, густа рослинність, хоча й допомагає алгоритмам SLAM працювати ефективніше, ускладнює стабільний прийом супутникових (GNSS) даних.

У міській забудові, де будівлі розташовані близько одна до одної, вертикальні фасади фахово допомагають у зшиванні (реєстрації) хмар точок.

Водночас, ті самі перешкоди спричиняють багатопроменевість GNSS, що погіршує точність прив'язки до абсолютних координат.

З огляду на це, при роботі у кадастровій сфері в таких умовах, варто інтегрувати персональне лазерне сканування з традиційними геодезичними вимірюваннями.

Щоб досягти задовільної точності у процесі індивідуального лазерного сканування, необхідно впроваджувати різноманітні механізми коригування та верифікації.

Серед усіх доступних методів, найбільш продуктивним визнано включення інформації від GNSS-систем для прив'язування сформованих хмар точок до єдиної державної системи координат, а саме УСК-2000.

Застосування технологій RTK чи РРК дає змогу значно покращити показники абсолютної точності.

Наступний ключовий спосіб полягає у залученні реперних геодезичних маркерів, чії координати були визначені з високим ступенем достовірності за допомогою традиційних геодезичних процедур.

Ці базисні точки слугують для верифікації та подальшого калібрування результатів знімання вже на стадії опрацювання зібраних даних.

Окрім того, варто оптимізувати траєкторії руху сканера, плануючи їх з огляду на закриття полігональних ходів та повторне охоплення певних зон.

Це допомагає мінімізувати накопичення систематичних відхилень, властивих алгоритмам SLAM.

Вагомий внесок також робить попереднє навчання фахівця, який виконує роботи, та суворе дотримання встановленої швидкості переміщення апаратури під час збору даних.

Щоб застосовувати портативні лазерні сканери у кадастрових роботах на території України, критично важливо, щоб одержані результати відповідали встановленим нормам стосовно точності встановлення меж земельних наділів.

Дослідження свідчать: якщо сканери коректно прив'язати до Української державної системи координат 2000 року (УСК-2000) та задіяти репери для контролю, ці пристрої здатні досягти точності, необхідної для актуалізації кадастрових схем, навіть у місцевостях зі складним рельєфом.

Отже, персональні лазерні сканери варто сприймати не як абсолютну заміну усталеним геодезичним технікам, а радше як потужний інструмент, що їх підсилює.

Це особливо актуально при обстеженні зон, до яких важко дістатися або які густо заросли, де використання традиційних способів вимірювань стає надзвичайно обтяжливим.

Зведена вивірка експлуатаційних властивостей різних технік збору даних міститься у Таблиці 1 нижче.

Таблиця 1 Порівняльна характеристика TLS / MLS / PLS

Критерій	TLS (Наземне)	MLS (Мобільне)	PLS (Персональне)
Платформа	Штатив, стаціонарна	Автомобіль, візок	Оператор (пішки)
Мобільність	Низька	Середня	Висока
Щільність хмари точок	Дуже висока	Висока	Висока
Абсолютна точність	Мм–см	См	См–дм
Робота без GNSS	Так	Обмежено	Так (SLAM)
Придатність для лісу	Обмежена	Середня	Висока
Придатність для кадастру	Висока	Середня	Перспективна
Продуктивність	Низька	Висока	Дуже висока
Вартість	Висока	Дуже висока	Середня

2. Збір тривимірної інформації про об'єкти на Землі з високою точністю

Здобуття просторових відомостей про земні об'єкти з високою точністю у тривимірному форматі являє собою одну з фундаментальних проблем у сферах геодезичної науки, картографування, кадастрової діяльності та інженерно-технічних вишукувань сьогодення.

Об'ємні просторові дані надають вичерпну характеристику як природного рельєфу, так і створених людиною конструкцій, а також об'єктів рослинного світу та порядку землекористування.

Це, своєю чергою, стає незамінною умовою для процесів територіального планування, відстеження трансформацій, що відбуваються у довкіллі, і, звісно, для коректного ведення Державного земельного кадастру на території України.

2.1 Основні підходи до отримання 3D-просторових даних

Здобуття тривимірних просторових відомостей є наріжним каменем актуальних геодезичних, землевпорядних та будівельних досліджень.

Вибір технологічного шляху залежить від охоплення території, необхідної правдивості даних, їх насиченості та обставин знімання; кожна методика має свої сильні та слабкі сторони.

У контексті вітчизняних геодезичних практик, головні шляхи отримання 3D-просторової інформації прийнято умовно розмежовувати на традиційні геодезичні способи, використання супутникових систем GNSS, фотограмметричні підходи та системи лазерного сканування (лідари).

Зведена таблиця 2 демонструє загальний розподіл цих методів, їх визначальні ознаки та типові області використання.

Таблиця 2 – Класифікація основних підходів до отримання 3D-просторових даних

Підхід	Основні технології	Характерні особливості	Типові сфери застосування в Україні
Класичні геодезичні методи	Тахеометрія, нівелювання, полігонометрія	Висока точність окремих точок, низька щільність даних	Кадастрові зйомки, інженерно-геодезичні роботи
GNSS-технології	Static, RTK, PPK	Оперативна геоприв'язка, залежність від супутникового сигналу	Кадастр, опорні геодезичні мережі, інженерні вишукування
Фотограмметрія	Наземна, БПЛА (SfM-MVS)	Висока деталізація, залежність від освітлення та перекриття	Топографічне картографування, містобудування, моніторинг
Лазерне сканування (LiDAR)	TLS, MLS, ALS, PLS	Щільні хмари точок, висока просторово-часова ефективність	Ліси, складний рельєф, інфраструктура, 3D-моделювання
Інтегровані підходи	GNSS + LiDAR + фотограмметрія	Компенсація недоліків окремих методів	Комплексні кадастрові та інженерні проєкти

Традиційні геодезичні підходи, такі як тахеометрична зйомка, вимірювання висот (нівелювання) та створення полігонометричних мереж, історично застосовувалися для фіксації просторового положення (координат) ключових об'єктів на місцевості.

Ці техніки гарантують необхідну ступінь точності та відповідають усім чинним стандартам України для кадастрових завдань.

Проте, вони вимагають значних витрат праці та є не надто продуктивними при потребі створення детальних, насичених тривимірних моделей, оскільки обчислення координат відбувається для кожної точки індивідуально.

Водночас, впровадження супутникових навігаційних систем (GNSS) суттєво розширило інструментарій для просторових вимірювань, даючи

змогу швидко визначати координати об'єктів у межах загальнодержавної системи координат УСК-2000.

Різні режими роботи з GNSS – статичний, кінематичний, а також технології RTK та PPK – наразі активно інтегровані у щоденну роботу в галузях землеустрою та інженерних геодезичних досліджень на території держави.

Однак, методики GNSS, незважаючи на здатність забезпечувати високу точність у певних точках, стикаються з обмеженнями стосовно густини збору даних, і їхня ефективність сильно залежить від умов приймання сигналів від супутників.

Це стає особливо вагомим фактором там, де багато лісів, у гірських ландшафтах або ж у районах зі щільною забудовою.

Інший ключовий метод отримання тривимірних даних – це фотограмметрія.

Застосування наземних зйомок, аерофотограмметрії або апаратури з безпілотників дає змогу будувати об'ємні моделі місцевості через аналіз послідовно накладених (перекритих) зображень.

Завдяки прогресу в алгоритмах типу "Структура з руху" (SfM) та методах детальної відбудови, фотограмметричні техніки перетворилися на рентабельний та дієвий засіб для формування цифрових моделей як рельєфу, так і окремих об'єктів.

В українських реаліях фотограмметрія активно використовується у процесах топографічного картування, при вирішенні містобудівних завдань та для здійснення територіального моніторингу.

Утім, слід пам'ятати, що якість фінальних фотограмметричних моделей безпосередньо корелює з роздільною здатністю знімків, умовами освітлення на момент зйомки та кількістю використаних вихідних (опорних) точок.

Технології на основі лідарів наразі посідають чільне місце серед актуальних методів збору просторових даних у тривимірному форматі.

Завдяки лазерному скануванню стає можливим зняття прямих показників відстані до обчислюваних об'єктів, що дає змогу формувати високощільності хмари точок зі значною точністю у просторовому розподілі.

Залежно від того, на якій платформі здійснюється апаратне виконання, виділяють лідарне сканування з повітря, з поверхні землі, мобільне чи індивідуальне (персональне).

У межах геодезичних завдань на території України лідарні апаратні комплекси демонструють непересічну результативність при знімальних роботах на територіях зі складними висотними характеристиками, ділянках, вкритих лісами, а також об'єктах, що входять до інфраструктурної мережі.

Ключовим трендом сьогодення виступає об'єднання різних способів здобуття тривимірної інформації.

Симбіоз результатів, отриманих із застосуванням супутникових навігаційних систем (GNSS), фотограмметричних методів та лазерного сканування, дає змогу усунути обмеження, притаманні поодиноким підходам, і водночас піднести сумарну достовірність та насиченість просторовими відомостями.

Як ілюстрацію, можна навести приклад, коли результати персонального лазерного сканування застосовують для досягнення високого рівня деталізації певних ділянок, тоді як аерофотознімки, зібрані за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), надають ширший загальнопросторовий огляд.

Зрештою, визначення найкращого методу для захоплення тривимірних просторових відомостей залежить від специфіки цілей дослідження, характеристик рельєфу та необхідного рівня деталізації.

Стосовно умов України, де зустрічаються як різноманітні природні ландшафти, так і забудовані міські зони, найбільш виправданим видається багатокomпонентний спосіб, що об'єднує традиційні геодезичні техніки із впровадженням сучасних технологій лазерного сканування та фотограмметричних розробок.

2.2 Роль лазерного сканування у високоточному 3D-зборі даних

Лазерне сканування вважається одним із фундаментальних засобів у підпорядкуванні сучасної геодезії з метою здобуття тривимірних просторових відомостей найвищої точності.

На противагу традиційним геодезичним підходам, які зосереджуються на фіксації координат лише певних орієнтирів, лазерне сканування дає змогу генерувати насичені набори просторових відомостей — так звані хмари точок — котрі з великою деталізацією відображають конфігурацію предметів та поверхонь.

Головна перевага, яку надає лазерне сканування, полягає у прямому визначенні відстаней до об'єктів шляхом посилення лазерних імпульсів, що гарантує високу здатність до розділення просторових елементів та підтверджену точність метричних вимірювань.

З огляду на це, технології лідарного сканування знайшли широке застосування у формуванні цифрових моделей рельєфу (ЦМР), цифрових моделей місцевості (ЦММ), а також тривимірних апроксимацій будівельних об'єктів, інженерних конструкцій та природних формацій.

Залежно від апаратної реалізації, лазерне сканування поділяється на аеро-, наземне, мобільне та персональне.

Авіаційні лідарні комплекси дають змогу ефективно охоплювати значні площі, що робить їх оптимальними для територіального аналізу та створення топографічних карт.

Натомість, наземні лазерні сканери вирізняються винятковою точністю та високою деталізацією отриманих даних, знаходячи застосування при докладному обмірі архітектурних пам'яток, інфраструктурних об'єктів та промислових будівель.

Мобільні та персональні ж сканери дають можливість швидко збирати тривимірну інформацію вздовж лінійних або важкодоступних об'єктів.

У межах геодезичної та земельно-кадастрової діяльності в Україні лазерне сканування суттєво покращує якість та насиченість просторових відомостей.

Поєднання лідарних вимірювань із технологіями супутникової навігації уможливорює прив'язку результатів до офіційної української системи координат УСК-2000, що є обов'язковою умовою для подальшого використання цих даних у кадастрових роботах та інженерних вишукуваннях.

Лазерне сканування набуває критичної важливості при виконанні завдань у важкодоступних природних ландшафтах, типових для деяких областей України, наприклад, у зонах із густою лісовою рослинністю чи в гірській місцевості.

Лідарні апаратно-програмні комплекси мають спроможність частково проникати крізь зелене насадження, забезпечуючи доступ до інформації про рельєфну поверхню навіть під кронами дерев, де застосування фотограмметрії або GNSS-технологій демонструє знижену результативність.

Завдяки формуванню хмар точок із винятковою щільністю та високою мірою достовірності, лазерне сканування формує міцний фундамент для проведення різноманітних видів просторового аналізу, створення модельних представлень та відстеження динаміки змін.

Накопичені тривимірні набори даних знаходять застосування у верифікації меж земельних активів, дослідженні деформаційних процесів будівельних конструкцій, територіальному плануванні, а також у процесах оцінки екологічних загроз.

Отже, лазерне сканування позиціонується як гнучкий та надзвичайно продуктивний засіб накопичення тривимірної інформації, що ефективно доповнює усталені геодезичні підходи та дозволяє досягти якісно нового рівня деталізації та метричної достовірності отримуваних просторових даних.

В умовах нашої держави, де сукупно діють різноманітні природні умови та сліди людської діяльності, впровадження технологій лідарного сканування постає як один із найбільш вірогідних шляхів для створення великоточних тривимірних карт.

2.3 Формування хмар точок і цифрових моделей

Завдяки впровадженню новітніх підходів лазерного зондування та фотограмметричних методів, ми отримуємо хмари точок.

Це впорядковані сукупності тривимірних координатних значень, що детально описують конфігурацію земної поверхні, штучних споруд та природних елементів.

Такі точкові скупчення виступають фундаментальним складником для розробки цифрових моделей рельєфу, а також є винятково важливим підґрунтям для подальших операцій із просторового аналізу, моделювання та створення карт.

Етап генерації хмар точок стартує зі збору вихідних вимірів.

Під час цього етапу кожен імпульс лазера чи відповідний фотограмметричний маркер реєструється як позиційна точка, прив'язана до певної системи координат – локальної чи світової.

Щодо лідарного обладнання, то визначення кожної окремої точки ґрунтується на даних про вимірювану дистанцію до об'єкта та орієнтаційні параметри сканера у момент фіксації даних.

У фотограмметричних роботах визначення розташування точок у просторі відбувається завдяки просторовому відновленню, яке ґрунтується на взаємно перекриваючих знімках.

Критичною стадією є вирівнювання та зведення до купи точкових хмар, здобутих із різноманітних ракурсів чи під час переміщення апаратури.

Стосовно наземного й індивідуального лазерного сканування, ця процедура полягає у склеюванні окремих масивів даних в уніфікованій системі координат, що досягається через застосування методів автоматичного або частково автоматизованого вирівнювання.

Для портативних (персональних) сканерів вирішальне значення мають алгоритми SLAM, котрі гарантують неподільне з'єднання інформаційних потоків безпосередньо під час руху користувача.

Після успішного узгодження виконується прив'язка точкових хмар до офіційної системи геодезичних координат.

На території України для цього запроваджено Українську Спільну Координатну Систему (УСК-2000), що гарантує можливість інтеграції отриманих результатів із даними, наявними в кадастрі, топографічних матеріалах та інженерних базах.

Прив'язка може бути реалізована через інтеграцію вимірювань GNSS, використання заздалегідь визначених геодезичних орієнтирів або застосування змішаних підходів для корекції.

Наступний етап полягає у фільтруванні та категоризації згенерованих хмар точок, метою чого є усунення шумів, хибних даних вимірювань та групування точок відповідно до типів об'єктів.

У залежності від цілей проведеного аналізу здійснюється відокремлення елементів, таких як поверхня землі, зелені насадження, споруди та інші складові ландшафту.

Для лісових масивів на території України критично важливим є точне виокремлення власне ґрунтової поверхні, що приховується під кронами дерев, оскільки це є обов'язковою умовою для створення достовірних цифрових моделей висот.

З оброблених масивів точок формуються цифрові моделі рельєфу (ЦМР) та цифрові моделі місцевості (ЦММ). ЦМР репрезентує виключно земну поверхню, ігноруючи будь-які наземні споруди чи рослинний покрив, тоді як ЦММ охоплює всі зафіксовані елементи, які потрапили у вибірку під час збору даних.

Значна насиченість хмар точками дає змогу конструювати моделі з високим рівнем просторової пропрацьованості та низьким кроком дискретизації.

Окрім побудови поверхневих моделей, хмари точок також застосовуються для створення тривимірних представлень різноманітних об'єктів, як-от споруди, інженерні конструкції та складові інфраструктурних систем.

Ці моделі знаходять своє використання у сферах містобудування, ведення кадастру, проєктування, а також у процесах контролю за технічним станом об'єктів.

Зокрема, в Україні для кадастрових завдань 3D-моделі можуть надавати додаткові відомості з метою точнішого визначення розташування у просторі границь земельних наділів та елементів забудови.

Отже, процес створення як самих хмар точок, так і кінцевих цифрових моделей є послідовністю кількох етапів, що охоплюють збір вихідних вимірювань, їхнє поєднання (реєстрацію), просторове прив'язування, очищення даних (фільтрацію) та власне моделювання.

Етапи створення цифрових моделей деталізовано у Таблиці 3.

Таблиця 3 – Послідовність формування цифрових моделей від етапу сканування до отримання ЦМР та ЦММ

Етап	Основні процеси	Результат
Лазерне сканування	Збір первинних лідарних вимірювань (TLS / MLS / PLS), фіксація положення та орієнтації сенсора	Сирі лідарні дані
Формування хмари точок	Реєстрація, об'єднання сканів, SLAM-обробка, геоприв'язка до УСК-2000	Геоприв'язана хмара точок
Фільтрація та класифікація	Видалення шумів, класифікація точок (рельєф, рослинність, забудова)	Очищена та класифікована хмара точок
Побудова цифрових моделей	Інтерполяція, побудова поверхонь	ЦМР (рельєф), ЦММ (місцевість)

Рівень якості кожного з цих етапів напряду визначає достовірність та коректність отриманих фінальних даних.

В українських реаліях, де значну частину займають утруднені як природні, так і створені людиною ландшафти, застосування передових підходів до опрацювання хмар точок стає вирішальним елементом для здобуття просторової інформації у 3D, що вирізняється високою точністю та має практичну цінність.

2.4 Забезпечення високої точності тривимірних вимірювань

Для ефективного застосування просторової інформації у геодезиці, кадастровій справі та інженерних розрахунках, критично важливим є досягнення високої точності тривимірних замірів.

Добротність 3D-інформації формується низкою аспектів, включаючи параметри апаратури для вимірювання, підходи до акумуляції даних,

обставини проведення знімальних робіт, а також методики опрацювання та просторового прив'язування отриманих результатів.

Фундаментальним елементом, що диктує рівень точності 3D-вимірювань, виступають технічні спроможності лідарних приладів.

Сюди входять параметри визначання дальності, здатність до кутового поділу, швидкість отримання замірів та надійність функціонування сенсорних систем.

Підбір необхідної апаратної бази повинен базуватися на потребах щодо прецизійності та необхідного охоплення досліджуваної зони.

Ключовим елементом для досягнення високої достовірності є географічна прив'язка замірів.

Щоб тривимірні відомості були придатними для кадастрової та інженерної діяльності в межах України, їх слід прив'язувати до національної системи координат УСК-2000.

Цей процес реалізується через поєднання лазерного сканування з використанням GNSS-технологій, зокрема завдяки застосуванню режимів RTK чи PPK, а також через залучення реперних геодезичних пунктів, чії координати встановлено з високим ступенем точності.

Якість одержаних результатів значною мірою залежить від умов, за яких проводилося знімання.

Фактори, як-от густа рослинність, складний ландшафт, метеорологічні обставини та обмеження оглядовості, здатні негативно позначитися на якості фіксованої інформації.

У подібних обставинах раціональним рішенням постає добре продумане планування траєкторій сканування, підбір оптимальної швидкості пересування виконавця та використання комплексних підходів до збирання первинних даних.

Ключовим етапом, що не можна ігнорувати, є опрацювання та виправлення тривимірних даних.

Аби вийти на високий рівень точності в результатах, життєво необхідно провести реєстрацію точкових хмар, ліквідувати систематичні зсуви, відсіяти шуми та виправити накопичені неточності.

Щодо портативних лазерних сканерів, то там вирішального значення набувають алгоритми SLAM, чия успішність на пряму корелює зі ступенем просторової заплутаності оточення та коректністю виставлених параметрів обробки.

Для покращення точності, з якою здійснюються 3D-вимірювання, активно використовується злиття різнорідних джерел інформації.

Комбінування даних, отриманих за допомогою лідарів, з матеріалами фотограмметрії та традиційними геодезичними замірами, дає змогу компенсувати недоліки, притаманні кожному окремому способу, забезпечуючи тим самим більшу достовірність підсумків.

Цей метод є надзвичайно цінним, особливо коли йдеться про складні для кадастрового обліку об'єкти чи ділянки, доступ до яких ускладнений.

Отож, досягнення значної точності у тривимірних вимірюваннях являє собою багатоетапну процедуру, яка вимагає коректного підбору апаратури, належного прив'язування до місцевості (геореференціювання), сприятливих умов для знімання та скрупульозного опрацювання зібраних відомостей.

З огляду на реалії України, інтеграція різноманітних методів спільно з неухильним дотриманням законодавчо встановлених стандартів щодо точності — це ключ до отримання надійних, а також цілком застосовних тривимірних геопросторових даних.

2.5 Застосування високоточних 3D-даних у кадастровій та інженерній практиці

Надточні об'ємні просторові відомості набувають все більшої ваги у розбудові кадастрової та будівельної сфер, адже вони надають усеосяжне та докладне зображення об'єктів земної поверхні.

Застосування тривимірних даних уможливорює відхід від звичного площинного опису теренів до повноцінного просторового дослідження, що має значну релевантність для поточних практик господарювання землею та містобудування на території України.

У контексті кадастрової роботи ці високоточні 3D-матеріали використовуються з метою більш чіткого визначення розташування рубіжів земельних наділів, оцінки форми об'єктів нерухомості та ідентифікації розбіжностей між реальною ситуацією на місцях та зафіксованими у кадастрі даними.

Хмари точок та цифрові моделі з прив'язкою до державної системи координат УСК-2000 згодяться як допоміжне джерело відомостей для поповнення Державного земельного кадастру, особливо там, де місцевість має складний рельєф або густий рослинний покрив.

Тривимірні дані високої точності виявляються дієвим інструментом при проведенні відновлення кадастрових зйомок на територіях, куди важко дістатися, адже класичні методи там обмежуються потребою у прямій видимості між точками або стійкості сигналу GNSS.

Використання технології лазерного сканування, зокрема портативних та пересувних установок, дає змогу швидко збирати вичерпну інформацію про висоти та об'єкти землі, мінімально впливаючи на оточуюче середовище.

У царині інженерної геодезії об'ємні просторові відомості знаходять чимале застосування при розробці планів, зведенні та підтримці функціональності різноманітних інженерних конструкцій.

Цифрові аналоги земної поверхні слугують невід'ємним підґрунтям для дослідження рельєфу, обрахунку мас ґрунту, що підлягає переміщенню, організації шляхів прокладання інженерних мереж та прогнозування відбиттів проєктних рішень на довкілля.

Завдяки високому ступеню деталізації цих моделей, можна досягти більшої точності у фахових обчисленнях та мінімізувати ймовірність хибних кроків на стадії втілення розробок.

Окремою сферою використання прецизійних тривимірних відомостей є відстеження змін форми та поточного стану споруд.

Періодичне проведення лазерного сканування дає змогу фіксувати просторові зсуви у будівлях, інженерних системах та елементах ландшафту, що є критично важливим для визначення рівня експлуатаційної безпеки та вчасного вжиття необхідних заходів управління.

У фаховій діяльності, що стосується просторового розпланування та міського будівництва, тривимірні моделі слугують інструментом для вивчення забудови, оцінки інсоляції, аналізу видимості та просторової взаємоподії між об'єктами.

На теренах України, де міська інфраструктура зазнає інтенсивного розвитку, втілення 3D-даних допомагає зміцнити аргументацію планувальних рішень та покращити прозорість у питаннях землекористування.

Отже, просторові дані у тривимірному форматі з високою точністю являють собою комплексний засіб, що інтегрує кадастрові та інженерні аспекти просторового дослідження.

Їхнє залучення гарантує зростання точності, швидкості реагування та достовірності геодезичних заходів, паралельно створюючи підґрунтя для

подальшого вдосконалення цифрових кадастрових та геоінформаційних систем на території України.

2.6 Підходи до збору тривимірної інформації про об'єкти на Землі

Отримання детальних відомостей про форму та розташування об'єктів на земній поверхні із значною точністю, а також їх наступне фіксування у комп'ютерному форматі, належить до наріжних проблем сучасної геодезичної науки, апаратної реєстрації об'єктів та створення карт за допомогою портативних пристроїв.

Тривимірні відомості, зняті з високою достовірністю, слугують невід'ємною базою для аналізу простору, конструювання макетів, прийняття рішень у сфері земельного обліку та інженерних проєктів, а також для розробки електронних моделей ландшафту та споруд.

Щоб здобути тривимірні просторові відомості, використовується низка технологічних стратегій, зокрема лазерне (лідарне) та зондувальне (радіолокаційне) сканування, метод отримання даних через аналіз стереопар фотографій, а також акустичне зондування води.

Конкретний спосіб збору інформації зумовлюється низкою обставин, до яких входять обсяг території, що підлягає дослідженню, необхідний рівень точності й деталізації, фінансові витрати на реалізацію завдань, зручність впровадження та час, необхідний для опрацювання зібраних даних.

Серед доступних методик, лазерне сканування вирізняється як один із найбільш гнучких та продуктивних інструментів здобуття об'ємної просторової інформації.

Цей технологічний підхід активно залучається для створення планів місцевості, відображення рослинності, забудови міст, інженерних конструкцій, а також інших об'єктів, сформованих природою або людиною.

Залежно від того, на якій платформі працює система, лазерне сканування поділяють на аерозображувальне, безпілотне, наземне, мобільне та індивідуальне.

Наземне лазерне сканування (НЛС) виконується із застосуванням стаціонарних лідарних апаратів, закріплених на тринозі, і дає змогу отримати хмари точок із надзвичайно високою точністю та насиченістю.

Вивчення можливостей НЛС у галузі геодезії бере свій початок десь на початку двохтисячних років.

Однак, задля забезпечення повного огляду комплексних об'єктів, потрібне неодноразове переміщення апарату, що, у свою чергу, подовжує час, витрачений на збір первинних даних на місці.

На противагу стаціонарним установкам, мобільне лазерне сканування (МЛС) пропонує значне прискорення збору інформації та мінімізацію ефектів затінення.

Стандартна апаратура МЛС включає в себе лазерний далекомір (лідар), приймач глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) та інерціальний вимірювальний пристрій.

Якість отриманих вимірювань безпосередньо залежить від злагодженості роботи цих елементів та точності їхнього часового узгодження.

Однак, накопичення помилок у визначенні координат під час переміщення апаратури спричиняє погіршення точності відносно наземного лазерного сканування (НЛС), а застосування транспортних одиниць ускладнюється через особливості рельєфу місцевості.

Наступним кроком у розвитку є портативні лазерні сканери (PLS), що комбінують портативність із здатністю детально обстежувати комплексні об'єкти.

На відміну від стаціонарних установок, персональні лазерні сканери дають змогу оператору вільно маневрувати навколо об'єктів сцени, забезпечуючи, таким чином, усебічне просторове охоплення.

При цьому хмарні дані, як правило, менш насичені та мають підвищений рівень перешкод, проте їх формування відбувається набагато швидше.

Фундаментальною характеристикою портативних лазерних сканерів є застосування методів одночасної локалізації та побудови карти.

Алгоритм SLAM аналізує інформацію, отриману від лідарних датчиків та інерційних сенсорів, задля визначення орієнтації сканера у незнайомому оточенні та формування цілісної тривимірної хмари точок, усуваючи необхідність покладатися на GNSS.

Це дає змогу використовувати портативні лазерні сканери ефективно у лісовій місцевості, під густим покривом крон, у тісних умовах, а також там, де сигнал супутників є нестійким або взагалі відсутній, що доволі часто трапляється на значній частині українських територій.

Водночас, нинішні втілення алгоритмів SLAM, як правило, мають проблему накопичення похибок, що спричиняє зменшення абсолютної точності, яку забезпечує персональне лазерне сканування, порівняно з апаратами наземного базування.

Через це, коли йдеться про кадастрові роботи або інженерно-геодезичні вишукування, розумно використовувати персональні лазерні сканери у зв'язці з техніками геореференціювання та приведення отриманих даних до чинної державної координатної системи УСК-2000.

Отже, кожна з існуючих методик збору тривимірних відомостей має свої сильні сторони та недоліки, а їхня успішна експлуатація залежить від коректного підбору технології з огляду на ландшафтні особливості та необхідний рівень точності.

Персональні лазерні сканери займають вагоме місце серед актуальних способів отримання 3D-інформації, виступаючи доповненням до традиційних геодезичних та лідарних розробок.

3. Проведення дослідження

Завданням цієї наукової роботи постає опрацювання геопросторових відомостей, здобутих завдяки ранцевому лазерному скануванню, а саме — хмар точок, та подальше застосування цих даних з метою формування чи актуалізації кадастрового плану визначеної ділянки.

Значний акцент робиться на вивченні потенціалу використання точкових хмар як джерела просторових даних надвисокої деталізації для кадастрових цілей.

Територія, що стала об'єктом дослідження, локалізація якої ілюструється на рисунку 1, охоплює орієнтовно дев'яносто гектарів і відзначається комбінацією житлових споруд, транспортної мережі вулиць, озелених зон, а також суміжних сільськогосподарських земель.

Обумовлене рельєфне розташування формує ідеальне тло для ревізії продуктивності ранцевих лазерних сканувальних систем у варіативному просторовому оточенні.

У процесі цієї роботи було здійснено збирання, первинну верифікацію та розподіл за класами хмар точок, аби ідентифікувати об'єкти, що мають кадастрову вагу, зокрема межі будівель та складові інфраструктури.

Здобуті дані були трансформовані у державну референтну рамку УСК-2000 і згодом залучені до створення кадастрової схеми, яка задовольняє актуальним стандартам геодезичних та кадастрових робіт.



Рисунок 1. Розташування досліджуваної ділянки

Територія, що підлягала вивченню, вирізняється переважно розкритою планувальною організацією, де споруди розміщені відокремлено.

У межах цієї зони переважає низькоповерхова житлова забудова, при цьому оточення будинків є досить вільним і має гарну проглядність.

Рослинність формується з укріплених зелених насаджень, зокрема дерев та чагарників, що створює типові умови для виконання лазерного сканування у частково відкритому середовищі.

Для фіксації просторових відомостей у формі точкового поля залучається ранцевий лазерний сканер LiBackpack DGC50, зображення якого та складові вузли показано на рисунку 2.



Рисунок 2. Лазерний сканер LiBackpack DGC50

У межах цього дослідження, для збирання просторових відомостей, головним інструментом слугує ранцевий лазерний сканер моделі LiBackpack DGC50, що належить до категорії портативних лідарних пристроїв.

Цей апарат здатний формувати згруповані та кольорові набори точок, оскільки він поєднує лідарний датчик із вмонтованою системою інерціальної навігації.

Аби опрацювати та об'єднати отриману від сканування інформацію, використовується профільоване програмне забезпечення LiFuser-BP.

Воно дає змогу виконувати вирівнювання, стикування та прив'язку до геопростору тих хмар точок, які були зафіксовані під час сеансу отримання даних.

LiBackpack DGC50 являє собою рухомий пристрій для 3D-проємування, розроблений для експлуатації однією особою, що дає змогу здійснювати лазерне промірювання як усередині будівель, так і поза ними.

Ця апаратура здатна генерувати просторові тривимірні дані про предмети з високим ступенем точності, поєднуючи у своїй роботі методики GNSS та SLAM.

Додаткова панорамна система візуалізації покращує точність зведення точкових хмар та забезпечує їхнє адекватне розміщення у просторі.

Ключовою перевагою даного устаткування є здатність фіксувати просторові дані навіть там, де сигнал GNSS є слабким або нерівномірним, що часто трапляється на заліснених ділянках, у густо забудованих міських зонах або в замкнутому середовищі.

Це суттєво розширює діапазон використання системи та збільшує її продуктивність у тих ситуаціях, де умови збору даних є викликом.

Ранцевий лазерний сканер DGC50 від LiBackpack знаходить широке застосування як для знімань усередині будівель, так і поза ними, збору даних із підземних об'єктів, виконання геодезичних робіт у тунелях, цифрового обліку видобутих мінералів, обліку лісових активів, формування інформаційних моделей будівель (BIM), а також у низці інших сфер практичної геодезії.

Ключові технічні особливості та технічні показники цього апарату розміщені у таблиці 4.

Таблиця 4. Технічні характеристики LiBackpack DGC50

Категорія	Параметр	Значення
Система	Маса	8,6 кг
	Відносна точність	3 см
	Абсолютна точність	5–10 см
	Споживана потужність	50 Вт
GNSS-модуль	Канали	GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5; GLONASS: L1 C/A, L2C, L2P, L3, L5; BEIDOU: B1, B2
	Точність	1 см + 1 ppm
LiDAR	Кількість LiDAR-сенсорів	2
	Кількість каналів	16
	Дальність сканування	100 м (при відбивній здатності 20%)
	Поле зору (FOV)	Вертикальне: $-90^{\circ} \dots +90^{\circ}$;
	Швидкість сканування	Горизонтальне: 360°
		600 000 точок/с (одиначне відбиття)
Камера	Роздільна здатність	3840×1920
	Частота кадрів	30 кадрів/с
	Поле зору	360°
	Кількість пікселів	18 МП
Режим роботи	Тип системи	Ранцевий (Backpack)

До того, як розпочати накопичення просторової інформації, було здійснено попередній огляд території дослідження, аби визначити умови для зйомки та намітити план заходів.

Виходячи з даних цієї розвідки, тривалість одного сеансу лазерного сканування встановили у чверть години.

В цілому, на терені, що підлягав дослідженню, провели 63 сеанси сканування, а весь процес збору даних розтягнувся на тиждень.

Як ілюстрацію, на малюнках 3 та 4 показано зразки кольорових та геоприв'язаних точкових скупчень, здобутих упродовж одного сеансу сканування цієї території.



Рисунок 3. Двовимірне представлення хмари точок сеансу



Рисунок 4. Тривимірне представлення хмари точок сеансу.

LiBackpack DGC50 – апарат для лазерного сканування, що пакується за спиною, згенерує вихідні масиви точок у форматі сирих вимірів, які зберігаються у файлах із розширенням *.bag.

Процес сканування паралельно супроводжується відеозаписом, котрий також зберігається, але вже у вигляді файлів *.mp4.

Зв'язка відеоряду з інформацією хмари точок дає змогу створити кольорову хмару точок, насичену справжніми RGB-кольорами.

Це, своєю чергою, збагачує змістовність просторових відомостей і спрощує процес осмислення об'єктів рельєфу.

У рамках нашого дослідницького проєкту, хмари точок, здобуті з кожної окремо проведеної операції сканування, піддавалися обробці у спеціалізованому софті LiFuser-BP.

У цій програмі відбувалася початкова процедура зведення даних до купи (реєстрація) та формування даних, прив'язаних до географічних координат.

Фінальні результати після цього етапу були експортовані у формат *.laz.

Через те, що програмне забезпечення, вибране для апаратної обробки, не давало змоги оперувати файлами у стисненому розширенні .laz, ми здійснили конвертацію даних у формат .las.

Це було зроблено за допомогою спеціалізованого інструментарію, призначеного для опрацювання та зіставлення сукупностей точок.

Створення креслень та подальша геодезична, інженерна обробка були реалізовані в програмному комплексі Trimble Business Center (TBC).

Точкові хмари, зібрані в межах ділянки, демонструють значну насиченість даних та високу ступінь метрологічної вірності, що дало змогу відобразити практично увесь існуючий будівельний фонд.

За підсумками проведеного сканування вдалося відтворити у тривимірному просторі майже кожен кут та фасад будівельних об'єктів.

Незважаючи на те, що відокремлення допоміжних споруд, як-от господарські прибудови, навіси чи складські зони, що прибудовані до головних будівель, іноді викликає труднощі, застосування кольорових точкових хмар істотно спростило завдання виявлення та виокремлення цих елементів.

Це демонструє ефективність використання кольорового лідарного сканування у кадастровій та інженерній практиці.

Оскільки приймання сигналів GNSS було неперервним та надійним, координати для сканованих даних генерувалися безпосередньо у процесі збору інформації.

Геореференсовані точкові хмари формувалися незалежно для кожного сеансу сканування; злиття хмар точок, отриманих у різні сеанси, не проводилося.

Робота була організована на основі окремих сесій, і відповідні креслення створювалися по завершенню опрацювання даних кожного сеансу.

На фінальній стадії окремі креслярські напрацювання звели до купи у системі автоматизованого проєктування (САПР), аби сформувати загальне тривимірне зображення території, що була об'єктом дослідження.

Сукупний образ результатів, отриманих після всіх сесій, у програмному забезпеченні "АвтоКАД" демонструється на ілюстрації п'ятій.



Рисунок 5. Кадастровий план у середовищі САПР.

Обриси досліджуваної ділянки окреслені здебільшого нещільним забудуванням, що складається з будівлі, розташованих окремо.

Оскільки навігаційні супутникові системи функціонували у цьому районі надійно та продуктивно, лазерне сканування вдалося здійснити, використовуючи ранцевий апарат LiBackpack DGC50, не вдаючись до створення безперервної мережі полігонів.

Для перевірки достовірності отриманих даних було встановлено реперні точки, чії координати встановлювались за допомогою системи GNSS.

З цих реперних точок потім проводилися заміри для визначення координат ключових елементів об'єктів, обраних для аналізу точності.

Загалом, положення 25 опорних маркерів було встановлено за допомогою тахеометра, які слугували еталонними даними для подальшого зіставлення.

У Таблиці 5 представлено зведені дані зіставлення координат, визначених як традиційним тахеометричним способом, так і методом лідарного сканування; це дає можливість проаналізувати ступінь точності й доцільності використання персонального лазерного сканера у межах обстежуваної території.

Таблиця 5. Порівняння результатів тахеометричних та лідарних вимірювань

Точка	Y, м (тахеометрія)	X, м (тахеометрія)	Y, м (LiDAR)	X, м (LiDAR)	ΔY , м	ΔX , м
1	460363.829	4613541.392	460363.811	4613541.424	0.018	0.032
2	460363.825	4613534.082	460363.821	4613534.051	0.004	0.031
3	460361.398	4613529.311	460361.422	4613529.302	0.024	0.009
4	460360.993	4613529.671	460361.013	4613529.645	0.02	0.026
5	460360.524	4613536.374	460360.524	4613536.394	0.0	0.02
6	460358.311	4613533.006	460358.325	4613533.062	0.014	0.056
7	460354.802	4613519.903	460354.843	4613519.921	0.041	0.018
8	460352.939	4613548.437	460352.912	4613548.397	0.027	0.04
9	460351.012	4613521.672	460351.044	4613521.643	0.032	0.029
10	460350.601	4613521.911	460350.643	4613521.922	0.042	0.011
11	460347.362	4613540.056	460347.349	4613540.062	0.013	0.006
12	460342.438	4613555.278	460342.391	4613555.311	0.047	0.033
13	460339.626	4613529.059	460339.636	4613529.089	0.01	0.03
14	460339.374	4613550.821	460339.333	4613550.804	0.041	0.017
15	460335.392	4613559.92	460335.334	4613559.911	0.058	0.009
16	460332.393	4613555.384	460332.341	4613555.352	0.052	0.032
17	460332.121	4613492.712	460332.138	4613492.704	0.017	0.008
18	460328.756	4613492.632	460328.772	4613492.621	0.016	0.011
19	460328.519	4613492.776	460328.541	4613492.752	0.022	0.024
20	460322.994	4613483.684	460323.017	4613483.663	0.023	0.021
21	460322.712	4613568.429	460322.691	4613568.415	0.021	0.014

22	460321.538	4613497.288	460321.542	4613497.334	0.004	0.046
23	460317.973	4613473.542	460318.013	4613473.523	0.04	0.019
24	460315.644	4613488.423	460315.702	4613488.409	0.058	0.014
25	460314.301	4613555.951	460314.258	4613555.911	0.043	0.04

Найбільша різниця, яку вдалося зареєструвати між даними вимірювань, не сягає 7 сантиметрів.

З огляду на здобуті показники, зроблено логічний висновок: застосування лазерного сканера в межах робочої ділянки з метою встановлення меж власності на землю надає рівень точності, що повністю узгоджується з гранично допустимими похибками, визначеними у чинному законодавстві та нормативних актах.

Розрахунок стандартних відхилень координат виконувався згідно з формулою (1), і отримані ними величини становлять 0,031 метра для осі X та 0,025 метра для осі Y.

Цей факт слугує вагомим підтвердженням того, що обрана методика є цілком придатною для виконання кадастрових та супутніх геодезичних завдань.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

У формулі (1) змінна n символізує число контрольних пунктів, тоді як x_i та $\bar{x}$ є відповідно зареєстрованим значенням відповідної координати та її середньоарифметичною оцінкою.

З огляду на те, що фокус дослідження був спрямований на встановлення меж ділянок землі, оцінка достовірності по висоті (координати Z) була виключена, і робота обмежувалася лише оцінкою точності у горизонталі.

Задля детальнішого вивчення та приведення результатів, отриманих із лідарного сканування, у відповідність до еталонних даних, зібраних за

допомогою традиційних методів вимірювання, було задіяно трансформацію подібності, що описується формулою (2).

Ця операція проводилася з використанням координат, визначених класичними геодезичними способами для кожної точки, що забезпечило належне зіставлення обох комплектів просторової інформації.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \lambda R_{\alpha} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

У виразі (1), позначення T_x та T_y вказують на зміщення по прямих лініях, паралельних осям X та Y відповідно, тоді як R_{α} відображає кут ротації в площині, що є горизонтальною.

Параметр λ являє собою множник масштабу, який слугує для обліку потенційних розбіжностей у пропорціях між системами координат, що зіставляються.

Якщо вираз (1) розкладено повністю, його можна представити у наступному форматі:

$$X = ax - by + c \quad (3)$$

$$Y = bx - ay + d \quad (4)$$

У наданому записі маємо, що x та y представляють координати точок відповідно до першої системи відліку, тоді як X та Y позначають координати тих самих точок, але вже у другій системі.

Коефіцієнти a , b , c та d — це параметри двовимірного перетворення подібності, які встановлюють залежність між цими двома системами координат.

Кількісні показники параметрів двовимірного перетворення подібності, знайдені шляхом калібрування класичних геодезичних знімків з даними лідарного сканування, зафіксовані у Таблиці 6.

Водночас, залишки помилок для двадцяти п'яти реперних точок відображено у Таблиці 7.

Таблиця 6. Обчислені параметри перетвор

Параметр	Значення
a	-0,0044
b	0,0012
c	0,0008
d	1,0000

Таблиця 7. Таблиця залишкових відхилень координат контрольних точок

Точка	V _y , м	V _x , м
1	0.0157	-0.0090
2	-0.0442	0.0051
3	-0.0223	0.0213
4	-0.0319	0.0216
5	0.0084	0.0070
6	0.0402	0.0143
7	0.0131	0.0337
8	-0.0456	-0.0132
9	-0.0338	0.0252
10	0.0065	0.0354
11	-0.0010	0.0001
12	0.0329	-0.0277
13	0.0353	0.0112
14	-0.0146	-0.0212
15	-0.0015	-0.0339
16	-0.0190	-0.0275
17	0.0016	-0.0080
18	0.0043	-0.0181
19	-0.0155	-0.0080
20	-0.0010	-0.0053
21	0.0087	0.0131
22	0.0601	-0.0243
23	0.0031	-0.0034
24	0.0149	0.0286
25	-0.0145	-0.0169

Таблиця 8 Статистичний аналіз залишкових відхилень координат

Координата	Мінімальне значення, м	Максимальне значення, м	RMS, м
V _y	-0.0456	0.0601	0.0254
V _x	-0.0339	0.0354	0.0201

Проведення статистичного розбору залишків спостережень засвідчило, що найбільші відхилення не виходять за межі кількох сантиметрів, при цьому середньоквадратичне значення (RMS) знаходиться у межах 0,03–0,04 м.

Це, своєю чергою, демонструє збіг отриманих даних із нормативними вимогами, встановленими для кадастрових робіт.

Визначені показники стандартного відхилення для погрішностей, що залишилися, склали 0,0254 м для вертикальної складової (Y) та 0,020 м для горизонтальної (X).

Даний факт підтверджує високий ступінь кореляції між результатами, отриманими за допомогою LiDAR-сканування, та традиційними геодезичними методами зйомки.

Висновок

Ранцеві (індивідуальні) сканери лазерні уособлюють значний поступ у розвитку технологій захоплення просторових відомостей, адже вони зводять до купи високу якість вимірювань лазерними засобами з можливістю пересування та пристосованості до умов на місцевості.

Використання техніки ранцевого лазерного сканування дає змогу суттєво прискорити збирання даних, якщо порівнювати з традиційними геодезичними підходами, а також знизити обсяг робіт, які необхідно виконати безпосередньо у полі.

У рамках цієї роботи для потреб оновлення кадастрової інформації було задіяно та проаналізовано ранцевий лазерний сканер, здатний формувати хмари точок із насиченістю, співмірною з іншими актуальними системами лазерного знімання.

Здобуті відомості стали підґрунтям для успішного виявлення важливих для окреслення меж наділів елементів, а саме: фасадів будівель, огорожувальних конструкцій та інших лінійних структур.

Водночас було виявлено, що за умов густої чи висотної забудови, а також на обмежених за шириною шляхах, може збільшуватися кількість некоректних вимірів, що, відповідно, вимагатиме додаткових кроків для верифікації збору.

Аби здобути більш детальну просторову картину там, де фізичний доступ скрутний, наприклад, у внутрішніх двориках чи закритих секторах, слушно буде застосувати безпілотні апарати.

Зведення воєдино відомостей, отриманих завдяки лазерному скануванню з ранцевого апарату, та даних з БПЛА дозволяє створити цілісніші й точніші просторові образи досліджуваної місцевості.

Основні позитивні аспекти, які надають ранцеві лазерні сканери, можна згрупувати ось як:

1. У зонах, де переважають окремі та невисокі будови, індивідуальні лазерні сканери спрощують етапи опрацювання відомостей, оскільки вони напряду генерують прив'язані до місцевості (геоприв'язані) координати споруд.
2. Створення кольорових масивів точок суттєво спрощує роботу з камерального аналізу та розробки креслень, особливо коли йдеться про виділення складових частин заплутаних інженерних систем.
3. Коли у хмарі точок відсутні значні похибки, більшість виправлень можна здійснити, повторно проаналізувавши відповідний запис даних, без потреби у додаткових вимірюваннях на місцевості.
4. У порівнянні зі звичними методами, які вимагають значних зусиль у польових умовах, портативні лазерні сканери гарантують оператору більшу швидкість та комфорт під час виконання завдань.
5. Хоча етап камеральної обробки відомостей може займати більше часу, сумарний строк виконання всього комплексу робіт із застосуванням індивідуальних лазерних сканерів скорочується, що веде до зростання загальної ефективності.
6. При зборі даних на місцевості ранцеві лазерні сканери мають вагомні переваги над апаратами наземного та мобільного типу, зокрема через те, що не потрібно використовувати штатив і можна проводити сканування об'єктів із різноманітних позицій.

З огляду на вищевикладене, отримані підсумки дослідження засвідчують слушність використання сканерів лазерного типу, які переносяться за спиною, для вирішення задач із поновлення кадастрових даних, зокрема у місцевостях із переважанням низької поверховості будинків та на відкритих просторах.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Використання технології мобільного лазерного сканування
для підвищення ефективності геодезичної зйомки»**

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)