

УДК 528.5-18

## АНАЛІЗ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ 3D-СКАНЕРІВ ТА СФЕРА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

**А. Маліцький, В. Лозинський**

Національний університет “Львівська політехніка”

**Ключові слова:** наземні лазерні сканери, параметри сканерів, сфера застосування.

### Постановка проблеми

Наземні лазерні сканери є найбільш поширеними та використовуваними серед інших видів сканерів. Нині розробленням приладів для лазерного сканування займається багато фірм. Найвідомішими є Trimble (США), Leica Geosystems (Швейцарія), Riegl (Австрія), Zoller + Fröhlich (Німеччина), Topcon (Японія), Faro (США) [1]. Через велику різноманітність використання приладів та їх специфікацій наземні лазерні сканери слід розрізняти за певними технічними характеристиками.

### Постановка завдання

Ця стаття є продовженням досліджень авторів, розпочатих у праці [22]. Виділивши наземні лазерні сканери в окрему групу приладів, автори глибше аналізують та характеризують їх. Розглядаючи останні моделі сканерів, автори простежили тенденції у розвитку наземного сканування та класифікували прилади залежно від їх технічних можливостей.

### Виклад основного матеріалу проблеми

На основі поділу наземних 3D сканерів за технологією сканування лазерні сканери зараховано у групу безконтактних активних приладів. Вони можуть бути як стаціонарними, так і портативними. В геодезії здебільшого використовуються портативні сканери, які на період проведення вимірювань мають бути нерухомо встановлені на штатив чи інше кріплення, а їх переміщення не є трудомістким [22]. Тому в статті класифікація наземних лазерних сканерів стосується саме цього типу.

Характеризуючи наземні лазерні сканери, виділяють такі параметри:

- метод вимірювання відстані;
- параметри лазера;
- точність вимірювання відстані та кута;
- кут огляду;
- дальність вимірювання;
- швидкість та щільність сканування;
- інші параметри.

### Метод вимірювання відстані

Основною характеристикою лазерних сканерів є тип віддалеміра. За способом визначення відстані сканери поділяють на фазові, імпульсні та триангуляційні. Основна частка наземних лазерних сканерів побудована на імпульсній та фазовій технології визначення відстані. В геодезичних роботах, через малий радіус дії, триангуляційні сканери зазвичай не використо-

вують. Наприклад, ручний сканер Creaform 3D scanner REVscan (рис. 1) має розміщуватися на відстані 30 см від поверхні сканування [2]. Раніше сканери Creaform під своїм брендом продавала ZCorporation. Цей тип сканерів використовують для вимірювання невеликих поверхонь з високою точністю. До прикладу, точність визначення координат поверхні з використанням Creaform 3D scanner MAXscan, за роздільної здатності 0,1 мм, становить 0,020 мм  $\pm$  0,025 мм/м. Це дозволяє проводити знімання складних за будовою об'єктів з максимальною точністю. Отже, триангуляційні сканери доцільно використовувати для знімання окремих архітектурних об'єктів, де важлива повнота та точність відтворення реального стану поверхні (рис. 2).



Рис. 1. Ручний триангуляційний лазерний сканер Creaform 3D-scanner REVscan



Рис. 2. Процес сканування з використанням ручного сканера

Відмінність між імпульсною та фазовою технологіями роботи лазерних сканерів проявляється у точності визначення відстані. Але застосування різних технологій та алгоритмів обчислення координат точок у різних моделях сканерів може цю відмінність нівелювати. Саме тому тип лазерного віддалеміра не є основним параметром під час вибору наземного лазерного сканера.

### Параметри лазера

Від параметрів лазера залежить відстань сканування, а також точність вимірювання цієї відстані. Основні характеристики лазера:

- довжина хвилі;
- потужність лазера;
- тип лазера;
- діаметр лазерного променя;
- розходження лазерного променя.

Оскільки усі 3D-сканери виробляються за кордоном, то в технічних характеристиках приладу вказують клас безпеки лазера за міжнародним стандартом IEC EN60825-1:2007) [21]. За цим стандартом більшість лазерів 3D сканерів потрапляють у категорію 3R, рівень травматизму від яких мінімальний. Винятком є деякі сканери далекого радіуса дії. Наприклад, Riegl VZ-6000 з максимальним радіусом дії 6 км використовує лазери класу 3B, які є небезпечними у випадку безпосередньої дії на сітківку ока.

Залежно від діаметра лазерного променя на виході, його розходження та кроку сканування, сканер на певній відстані не зможе повноцінно обміряти дрібну деталь навколишнього середовища. Головною причиною цього є збільшення розміру лазерної точки. Тому зі збільшенням радіуса дії сканерів, щоб зберегти точність результатів сканування, діаметр лазерного променя треба зменшувати. Наприклад, лазерний сканер Riegl LMS-Z390 і за максимальної відстані сканування 400 м має розходження лазерного променя приблизно 0,3 мрад, сканер Riegl LMS-Z420i – 0,25 мрад при 1000 м, Riegl LMS-Z620 – 0,15 мрад при 2000 м, а Riegl VZ-6000 (рис. 4) – 0,12 мрад за максимальної відстані вимірювання 6 км [6].

Контроль діаметра лазерного променя можна забезпечити фокусуванням променя на певній відстані. Наприклад, у сканерах HDS 3000, ScanStation і ScanStation 2 лазерний промінь має фокус на відстані близько 25 м від сканера (рис. 3). Це означає, що на відстані до 50 м діаметр лазерного променя не збільшуватиметься [1].

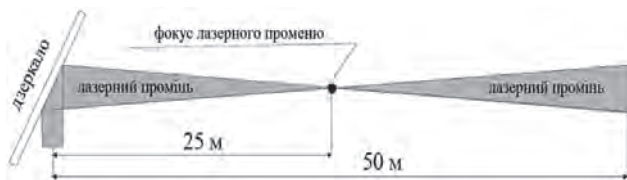


Рис. 3. Фокусування лазерного променя

Отже, від параметрів лазера залежатиме основна сфера використання 3D сканера. Наприклад, для картографії льодовиків чи гірничої промисловості важливою є відстань сканування (рис. 8). Тому в таких роботах оптимальним буде використання сканерів фірми Riegl з радіусом дії до 6 км та точністю визначення координат близько 10 мм. Під час роботи з архітектурними об'єктами більше значення матиме точність одержаних даних. Тому застосування сканерів Riegl у цій сфері є обмеженим.

### Точність обчислення координат

Точність обчислення координат точок поверхні об'єкта залежить від точності визначення відстані та вертикального і горизонтального кутів. Точність вимірювання відстані зв'язана з типом віддалеміра, який використовується у приладі. У різних сканерах точність вимірювання відстані варіюється в межах від близько 0,3 мм до 15 мм. Потрібно звернути увагу, що цей параметр залежить від відстані до об'єкта та відбивних властивостей поверхні, яка сканується. У технічних характеристиках приладу – сканерів різних фірм-виробників вказано різні умови визначення точності сканування.

Точність визначення відхилення лазерного променя у різних приладів також відрізняється, але зазвичай вона однакова у вертикальній і горизонтальній площині. Наприклад, лазерний сканер Topcon GLS-1500 проводить вимірювання з кутовою точністю 6'' [7], Leica ScanStation 2–12'' [8], а Z+F imager 5010–25'' [9]. Отже, за точністю вимірювання кутів та відстані лазерні сканери можна поділити на низькоточні (помилка одержаних координат становить від 8 мм), середньої точності (від 3 до 8 мм) та високоточні (менше за 3 мм).

### Кут огляду

Деякі моделі сканерів, через певні особливості їх будови, мають обмежене поле зору. Наприклад, Trimble GX (рис. 5), з повним кутом огляду по горизонталі (360°), обмежений 60° зоною сканування по вертикалі [10]. Через це для повного сканування місцевості потрібно створити більше станцій стояння приладу, порівняно зі сканерами більшого кута огляду. Такий самий кут огляду і в нових моделях наземних лазерних сканерів Riegl.

Застосування сканера з вертикальним полем огляду 270° і більше дає можливість уникнути створення надлишкових станцій. Сканер Leica HDS7000 (рис. 6), завдяки своїй конструкції охоплює 320° зону сканування по вертикалі і 360° по горизонталі [8], що дає змогу максимально повно відсканувати місцевість. Невідсканованою зоною залишається область, розміщена під сканером (рис. 9).

У більшості сканерів у налаштуванні режиму сканування є опція вибору області знімання, яка дає змогу не виконувати надлишкових вимірювань та зекономити час. Провівши оглядове сканування (найнижчі параметри якості та роздільної здатності), за одержаним панорамним зображенням можна обмежити кут огляду сканера.

### Дальність вимірювання

Дальність вимірювань залежить від потужності лазера, чутливості приймального пристрою та властивостей поверхні, яка сканується. Зазвичай виробник вказує дальність вимірювань спільно зі значенням коефіцієнта відбиття.

Коефіцієнт відбиття визначається як відношення потоку випромінювання, що відбивається поверх-



Рис. 4. Наземний лазерний сканер Riegl VZ-6000



Рис. 5. Наземний лазерний сканер Trimble GX



Рис. 6. Наземний лазерний сканер Leica HDS7000



Рис. 7. Наземний лазерний сканер Leica HDS8810



Рис. 8. Сканування просторів Гренландії за допомогою наземного лазерного сканера Riegl VZ-6000



Рис. 9. Місце встановлення сканера на фрагменті точкової моделі



Рис. 10. Присвоєння кольорів у чорно-білому діапазоні на основі значень коефіцієнта відбиття



Рис. 11. Наземний лазерний сканер Stonex X9



Рис. 12. Наземний лазерний сканер Trimble TX 8



Рис. 13. Наземний лазерний сканер Focus3D X 330



Рис. 14. Наземний лазерний сканер Faro Photon 120

нею, до потоку випромінювання, що падає на поверхню. Залежно від фізичних властивостей матеріалу, який сканується, змінюватиметься максимальна відстань знімання приладу. Наприклад, сканер Leica HDS8810 (рис. 7), за коефіцієнта відбиття лазерного променя 80 %, здатен відсканувати поверхню на відстані 1400 м, а за коефіцієнта відбиття 10 % – 500 м [8]. Також зі зміною відстані від об'єкта до приладу змінюватиметься точність визначення координат – сканер Leica HDS8810 при скануванні на відстань до 200 м дає результати з точністю 8 мм, а на відстань до 1000 м – 20 мм.

Встановлено, що одні з найвищих показників відбиття мають срібло (95 %), ватман (76–82 %). Одні з найнижчих – червона цегла (8–10 %), необроблена сталь (5–10 %), скло (0,08 %) [23]. Значення коефіцієнта відбиття також залежить від відстані, на якій проводиться знімання, та кута попадання світлового променя на поверхню.

Враховуючи значення коефіцієнта відбиття, кожній точці скана присвоюється колір у вибраному діапазоні кольорів (рис. 10).

### **Швидкість та щільність сканування**

Швидкість вимірювання залежить від:

- кількості вимірювань за одиницю часу;
- роздільної здатності вимірювання;
- точності вимірювання;
- відстані вимірювань;
- захоплення реальних кольорів місцевості.

Перевагою лазерного сканування над традиційним зніманням є кількість вимірювань. Щоб досягнути відтворення реального стану об'єкта у вигляді точок за найкоротший час, лазерний сканер повинен досить швидко проводити вимірювання. Це головний параметр сканера, від якого залежить кількість часу, витраченого на польові роботи. Stonex X9 (рис. 11) здатен опрацювати до 1016027 точок за секунду, що робить його одним з найшвидших сканерів. Швидкість обертання дзеркала оптичної системи становить 50 обертів за секунду [12]. Точність сканування залежатиме від встановлених параметрів сканування, а також відбивної здатності об'єктів сканування. Наприклад, у разі вимірювання на відстань 10 м точність становить 0,5 мм (коефіцієнт відбиття 14 %) або 0,3 мм (80 %). Виконуючи вимірювання на відстань 100 м, можна досягти точності сканування від 2 мм (80 %) до 10 мм (14 %). Тому сканери такого типу можна вважати найуніверсальнішими, їх застосування є ширшим.

Час проведення сканування прямо залежить від встановлених параметрів приладу. Враховуючи необхідний результат сканування та особливості місцевості, на приладі вибирають необхідні значення роздільної здатності та якості (точності) вимірювань. Деякі нові сканери, наприклад Trimble TX8 (рис. 12), мають функцію змінних параметрів на одному скані. Це застосовується для детальнішого вимірювання певного об'єкта та менш детального знімання інших деталей місцевості.

### **Інші параметри**

Наземні лазерні сканери можуть розрізнятися й за іншими особливостями будови та користування. Цими параметрами є:

- цифрова камера;
- центрир;
- датчики орієнтування скана;
- передача даних та зв'язок;
- фізичні розміри і маса;
- температурний режим роботи.

Кожен імпульс лазерного віддалеміра містить інформацію не тільки про відстань, але й про колір об'єкта в чорно-білому діапазоні, який виражається коефіцієнтом відбивної здатності поверхні. Але багато замовників не хочуть працювати в псевдокольорах. Для присвоєння точкам скану реальних кольорів створюється фотопанорама місцевості. Для правильного суміщення фотозображення і хмари точок необхідно, щоб фотокамера перебувала в тій самій точці, що і вимірювальна система приладу. Зробивши фотографії з таким самим колом огляду, як і в сканера, всім точкам скану можна присвоїти відповідні кольори.

Деякі сканери, зазвичай моделі попередніх років, для захоплення кольору місцевості, використовують зовнішні цифрові фотокамери (рис. 14). Перевагою такого способу є можливість налаштувати якість та параметри фотографування. Істотним недоліком – процес суміщення фотографії та хмари точок, який є доволі трудомістким [13].

В модельному ряді більшість сучасних 3D-сканерів оснащені внутрішньою цифровою фотокамерою, яка спрощує процедуру опрацювання хмар точок. Але через автоматизований процес фотографування реальні кольори об'єктів можуть бути спотворені.

Центрир використовується для встановлення сканера над конкретною точкою. Оскільки не всі сканери оснащені цим пристроєм, то орієнтування сканів іноді може бути ускладненим.

До датчиків орієнтування сканів, встановлених у лазерних сканерах, належать альтиметр (висотомір), компас, інклінометр, GPS приймач. Ці сенсори допомагають в автоматичній обробці сканів, надаючи інформацію про висоту сканування, орієнтування на північ, відхилення хмар точок від горизонту, координати місця розташування приладу. Усі датчики, окрім GPS-приймача, містить лазерний сканер Focus3D X 330 (рис. 13) [14]. Точність визначення кута нахилу сканера становить 54" при діапазоні роботи 5°. Альтиметр в цьому сканері працює за принципом електронного барометра. Одночастотним GPS-приймачем також оснащуються сканери фірми Riegl [6].

Дані сканування найчастіше записують на внутрішній жорсткий диск чи зовнішній флеш-накопичувач. Також існують рішення запису даних на карту пам'яті стандарту SD. Оскільки у процесі знімання відбувається інтенсивний запис інформації, найкраще використовувати карти пам'яті 10 класу і вище. Вони забезпечують швидкість запису даних не нижче за 10 Мб/с. Осно-

вними стандартами для передавання даних є Ethernet, WiFi або USB 2.0.

Велике значення у виборі сканера може відіграти габарити та маса приладу. Одним з найменших сканерів вважається Trimble TX5 з габаритами 240×200×100 мм [15]. Маса приладу – 5,0 кг. Набагато більша маса лазерного сканера Leica ScanStation C10. Вона становить 13 кг за габаритів 238×358×395 мм [8].

Один з найкращих температурних діапазонів роботи мають сканери Riegl VZ-1000 [6]. Їх використання можливе при температурі від – 40 °С до +40 °С.

### Висновок

У результаті проведеного аналізу розглянуто сучасні найпоширеніші наземні лазерні сканери провідних фірм-виробників і визначено, що ці прилади слід характеризувати за такими параметрами:

- метод вимірювання відстані;
- параметри лазера;
- точність вимірювання відстані та кута;
- кут огляду;
- дальність вимірювання;
- швидкість та щільність сканування;
- інші параметри.

У цій статті наведено приклади застосування сучасних наземних лазерних 3D-сканерів і сфери їх застосування, а саме:

- для сканування дрібних архітектурних об'єктів використовують триангуляційні сканери;
- для проведення інженерно-геологічних досліджень рекомендуємо використовувати сканери великого радіуса дії, типу Riegl VZ-6000;
- для сканування промислових об'єктів зручно використовувати сканери, оснащені допоміжними пристроями орієнтування, наприклад, сканер Faro Focus3D X 330;
- для знімання будівель та споруд населених пунктів доцільно використовувати універсальні сканери середнього радіуса дії та середньої точності вимірювання

### Література

1. Середович В.А. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
2. <http://www.creaform3d.com/ru/sistemy-nerazrushayushchego-kontrolya/lazernye-skanery-handyscan-3d>
3. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1990.
4. Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements (2nd ed.). International Electrotechnical Commission. 2007.
5. [http://www.leica-geosystems.ru/3D\\_21077.htm](http://www.leica-geosystems.ru/3D_21077.htm)
6. <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>
7. <http://www.topcompositing.com/products/scanning>
8. [http://hds.leica-geosystems.com/en/HDS-Laser-Scanners-SW\\_5570.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/HDS-Laser-Scanners-SW_5570.htm)
9. <http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-5010-3D.21.0.html?&L=1>
10. <http://www.trimble.org.ua/3d-scanner-trimble-gx.htm>
11. [http://remartspb.ru/infopages/kojefficient\\_otrazhenija.htm](http://remartspb.ru/infopages/kojefficient_otrazhenija.htm)
12. <http://www.archiproducts.com/en/products/52773/laser-scanner-stonex-x9-stonex-europe.html>
13. [http://www2.faro.com/ap/resource/techsheets/in/Laser\\_Scanner\\_Photon.aspx](http://www2.faro.com/ap/resource/techsheets/in/Laser_Scanner_Photon.aspx)
14. <http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/overview>
15. <http://www.trimble.com/3D-laser-scanning/3d-scanners.aspx>
16. <http://archive.cyark.org/mt-rushmore-scanning-project-a-success-blog>
17. <http://www.scanlabprojects.co.uk/projects/scanning-the-mist.html>
18. <http://www.virtual-tours.ru/>
19. Scene 5.1. User Manual, October 2012, p.-366
20. <http://www.autodesk.ru/>
21. <http://www.prolaser.co.uk/news08a.html>
22. Романишин І., Маліцький А., Лозинський В. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. II(24). – С. 69–74.
23. [http://remartspb.ru/infopages/kojefficient\\_otrazhenija.php](http://remartspb.ru/infopages/kojefficient_otrazhenija.php)
24. Тревого І., Баландюк А., Григораш А. Аналіз технологічних можливостей сучасних наземних лазерних сканерів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2010. – Вип. I (19), С.170–176.

### Аналіз наземних лазерних 3D-сканерів та сфера їх застосування

А. Маліцький, В. Лозинський

Виконано класифікацію різних типів наземних сканерів і проаналізовано принципи їх роботи. Авторська класифікація покликана пояснити особливості застосування сканерів у різних сферах і допомогти у виборі оптимальних моделей залежно від поставлених цілей.

### Анализ наземных лазерных 3D-сканеров и область их применения

А. Малицкий, В. Лозинский

Классифицировано различные типы наземных сканеров и проанализировано принципы их работы. Авторская классификация призвана объяснить особенности применения сканеров в различных сферах и помочь в выборе оптимальных моделей в зависимости от поставленных целей.

### Analysis terrestrial laser 3D-scanner and their scope

A. Malitskiy, V. Lozynskiy

This article classifies the various types of terrestrial laser scanners and examines the principles of their work. Author's classification is designed to explain the peculiarities of scanners in various areas and help in selecting optimal models, depending on the goals.