

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АГРОБІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність G18 (193) «Геодезія та землеустрій»

Допускається до захисту
Зав. кафедри геодезії та землеустрою
доцент _____ Т.М. Сіроштан

«29» травня 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

НА ТЕМУ:
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Виконав(ла) Криховецький Олександр Володимирович
прізвище, імя, по бат ькові, підпис

Керівник к.е.н., доцент Сіроштан Т.М.
вчене звання, прізвище, ініціали підпис

Рецензент _____
вчене звання, прізвище, ініціали підпис

Я, Криховецький Олександр Володимирович, засвічую, що кваліфікаційну роботу виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Біла Церква – 2025

РЕФЕРАТ

Криховецький Олександр Володимирович

«Аналіз сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування»

Актуальність теми. Наземні лазерні сканери (НЛС) все частіше використовуються в декількох застосуванні, таких як інженерія, цифрова реконструкція історичних пам'яток, геодезія та обстеження, моніторинг деформацій конструкцій, збереження кримінальної злочинності, виробництво та збірки інженерних компонентів та архітектурні, інженерні та будівельні (АЕС) додатки.

Допуски, необхідні для цих завдань, варіюються від кількох десятків міліметрів (наприклад, в історичній оцифровці пам'ятників) до кількох десятків мікрометрів (наприклад, у виробництві та складі високої точності). Завдяки численним виробникам інструментів НЛС, кожна з яких пропонує кілька моделей НЛС з ідіосинкратичними специфікаціями, для користувачів є значна проблема порівнювати інструменти або оцінити їх ефективність, щоб визначити, чи відповідають вони специфікаціям. Як результат, дослідницькі групи в усьому світі доклали значних зусиль для моделювання джерел помилок НЛС та розробки спеціалізованих процедур тестування оцінки ефективності. У цій роботі ми розглядаємо ці зусилля, включаючи останні роботи з розробки документальних стандартів для НЛС

На сьогоднішній день наземне лазерне сканування (НЛС) все більше використовується для вирішення найрізноманітніших задач, серед яких й інженерно-геодезичних. Використовуючи спочатку системи НЛС для знімання складних промислових об'єктів, користувачі поступово розширили галузі їх використання. Зараз НЛС широко використовується при будівництві, маркшейдерських роботах, охороні пам'яток культурної спадщини, для вирішення різних задач промисловості, класичного топографічного знімання та, навіть, у криміналістиці.

Особливістю інженерно-геодезичних робіт при супроводженні будівництва є підвищені вимоги до їх точності. Тому постає практичне завдання підвищення точності даних, отриманих способом наземного лазерного сканування. На сьогодні таким методом підвищення точності являється калібрування.

Метою цієї роботи є проведення аналізу сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування.

Для реалізації даної мети нами були поставлені та виконані наступні завдання:

- проаналізувати наявні методи та моделі калібрування наземних лазерних сканерів різних типів;
- визначити джерела похибок та їх вплив на дані, отримані за допомогою наземного лазерного сканування;
- проаналізувати сучасні підходи до підвищення точності наземного лазерного сканування.

Об'єкт дослідження—дані, отримані способом наземного лазерного сканування.

Предмет дослідження—методи і моделі калібрування наземних лазерних сканерів, що використовуються для підвищення точності.

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 61 сторінку, 7 таблиць, 27 рисунків, список використаних джерел із 51 найменування.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, НЛС, калібрування, ЛІДАР, методи дистанційного знімання, просторові дані, системне калібрування, інженерно-геодезичні роботи, методика калібрування, підвищення точності.

ABSTRACT

Krykhovetsky Alexander Vladimirovich

**" Analysis of modern approaches to improving the accuracy
of terrestrial laser scanning "**

The relevance of the topic. Laser laser scanners (NLS) are increasingly used in several application, such as engineering, digital reconstruction of historical monuments, geodesy and examination, monitoring of structural deformations, criminal offense, production and assembly of engineering components and architectural, engineering and construction.

The tolerances required for these tasks vary from several tens of millimeters (for example, in historical digitization of monuments) to several tens of micrometers (for example, in production and high accuracy). Thanks to numerous NLS tool manufacturers, each of which offers several NLS models with idiosyncratic specifications, for users there is a significant problem to compare the tools or evaluate their effectiveness to determine whether they meet the specifications. As a result, research groups worldwide have made considerable efforts to model NLS errors and develop specialized efficiency testing testing procedures. In this work we are considering these efforts, including the latest documentary standards for NLS

To date, land laser scanning (NLS) is increasingly used to solve a variety of tasks, including geodetic engineering. Using NLS systems first to remove complex industrial sites, users have gradually expanded their industries. NLS is now widely used in construction, marketers, cultural heritage monuments, to solve various problems in industry, classical topographic removal and even in criminalistics.

The peculiarity of engineering and geodetic works in the support of construction is the increased requirements for their accuracy. Therefore, there is a practical task of increasing the accuracy of data obtained by a method of ground laser scanning. Today, this method of increasing accuracy is calibration.

The purpose of this work is to analyze modern approaches to increasing the accuracy of ground laser scanning.

For the realization of this goal, we were set and completed the following tasks:

- to analyze the available methods and models of calibration of land laser scanners of different types;
- determine the sources of errors and their impact on the data obtained by ground laser scanning;
- to analyze modern approaches to increasing the accuracy of ground laser scanning.

The study object is the Dani obtained by the land laser scanning method.

The subject of the study is the methods and modeling of land laser scanners used to increase accuracy.

The bachelor's qualification work contains 61 pages, 7 tables, 27 figures, a list of sources used from 56 names.

Keywords: ground laser scanning, NLS, calibration, lidar, remote removal methods, spatial data, system calibration, engineering and geodetic work, calibration technique, accuracy.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ	10
1.1. Сучасні дослідження калібрування наземних лазерних сканерів	10
1.2. Огляд задач інженерної геодезії, де виправдане використання систем НЛС	14
1.3. Топографічне знімання	18
Висновки до 1 розділу	23
РОЗДІЛ 2. ПЛАНУВАННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ В БУДІВНИЦТВІ	25
2.1. Критерії якості хмарних даних	25
2.2. Параметри, що впливають на критерії якості даних	29
2.3. Планування наземного лазерного сканування в будівництві	33
Висновки до 2 розділу	38
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ.	40
3.1. Огляд інструментальних похибок сканерів	40
3.2. Способи визначення систематичних похибок НЛС	44
3.3. Обґрунтування досяжного рівня точності методом наземного лазерного сканування на підставі попередніх розрахунків	46
Висновки до 3 розділу	52
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56

ВИСНОВКИ

Загалом, на сьогоднішній день не існує єдиних моделей розрахунку та врахування похибок кутових та лінійних вимірювань наземним лазерним сканером через різноманітність сканерів з різними технічними характеристиками та принципами вимірювання, складність джерел похибок, які включають внутрішні характеристики сканера, зовнішні умови, властивості об'єкта сканування та процес сканування, а також складність математичного моделювання всіх цих взаємопов'язаних факторів. Незважаючи на це, існують різні підходи до оцінки похибок, такі як використання специфікацій виробника, проведення калібрування, аналіз розбіжностей з контрольними точками, застосування статистичних методів, моделювання окремих джерел похибок, використання методів машинного навчання та розробка елементарних моделей похибок. В результаті, користувачам НЛС доводиться комбінувати ці підходи для оцінки та врахування похибок, а розробка універсальної моделі залишається актуальним завданням.

Аналіз сучасних підходів до підвищення точності наземного лазерного сканування свідчить про активний розвиток методів, спрямованих на мінімізацію різних джерел похибок. Основні напрямки включають:

- Удосконалення технологій сканування: Розробка нових сенсорів та принципів вимірювання, що дозволяють зменшити внутрішні інструментальні похибки та підвищити щільність і точність отриманих даних.
- Розвиток методів калібрування: Вдосконалення процедур калібрування сканерів для більш ефективного усунення систематичних похибок, включаючи розробку автоматизованих та польових методів калібрування.
- Покращення алгоритмів обробки даних: Розробка більш досконалих алгоритмів фільтрації, зшивання сканів та вирівнювання хмар точок, що дозволяють зменшити вплив шумів та підвищити точність кінцевого результату.

- Моделювання та компенсація зовнішніх впливів: Розробка методів моделювання та компенсації похибок, спричинених атмосферними умовами, вібраціями та іншими зовнішніми факторами.
- Інтеграція з іншими геопросторовими технологіями: Комбінування даних лазерного сканування з даними, отриманими за допомогою GNSS, фотограмметрії та інших методів, для підвищення загальної точності та надійності результатів.

Незважаючи на значний прогрес, досягнення універсального та повністю автоматизованого підходу до підвищення точності НЛС залишається актуальним завданням. Майбутні дослідження, ймовірно, будуть зосереджені на розробці інтелектуальних систем, здатних адаптивно враховувати різні джерела похибок та оптимізувати процес сканування та обробки даних для досягнення максимально можливої точності в конкретних умовах застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Загальна інформація про мостові споруди [Електронний ресурс] 11
Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D1%81%D1%82>
2. Загальна інформація про мостові споруди [Електронний ресурс] //
Режим доступу: <http://mapme.club/poradi/5093-naivishhii-mist.html>
3. Фізико-географічний опис [Електронний ресурс] // Режим доступу:
<https://uain.press/videos/tsikava-ukravina-top-5-mostiv-vaki-obov-vazkovo-potribno-pobachvtv-180372>
4. Barsanti SG, Remondino F, Visintini D, (2014). 3D surveying and modeling of Archaeological Sites-Some critical issues. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W1, 145-150
5. Boquera JH, Ríos JLD, García EMG, Esteve PN, (2012) Applications del Láser Scanner a la ingeniería civil. Publishing online.
6. mageMaster (2008) Pro_Manual.pdf. Publishing online.
7. Remondino F, El-Hakim, S, (2016) Image-based 3D Modeling: A Review. Photogrammetric Record, 21, 115, 269-291.
8. Remondino F, (2021) Heritage Recording and 3D Modelling with Photogrammetric and 3D Scanning. Remote Sensing, 3, 1104-1138.
9. Trcon (2008) IS2EngRev2.pdf". Publishing online
10. Vosselman G, Maas HG, (2010) Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press Book.
11. Адаменко О.В. Методи розрахунку точності геодезичних робіт при зведенні мостів шляхом моделювання напружено-деформованого стану [Текст]: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.24.01/ О.В. Адаменко. – К., 2012. - 18 с.
12. Баран П. І. Інженерна геодезія. К.: ВІПОЛ, 2012. 618 с.
13. Бурак К. О. Розрахунок оптимальних даних для забезпечення співвісності деталей РУ типу ВВЕР-1000 при монтажі. Інженерна геодезія. 2002. № 45. С.34–40.

14.Бурак К. О., Лиско Б. О. Використання RTN при перенесенні в натуру проектів горизонтального планування території та осей будівель та споруд. GEOFORUM 2018 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Місто, 2018 рік. С 15–16.

15.Бурак К.О., Лиско Б. О. Дослідження впливу технологічних параметрів на точність визначення відносних координат вектора з допомогою RTN рішень. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського, серія: Технічні науки. Київ, 2019. Том 30 (69) № 4 Частина 1. С. 134-142.

16.Бурак К. О., Лиско Б. О. Результати дослідження точності RTN методу GNSS вимірів єдиним (вихідним) базовим рішенням та можливості його використання для розмічувальних робіт при будівництві. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2017. № 27. С 145–150.

17.Визначення точності відхилення положення близькостворної точки за допомогою електронного тахеометра / Бурак К. О., Гринішак М. Я., Ковтун В. М., Михайлишин В. П., Шпаківський О. П. *Вісник геодезії і картографії*. Київ, 2012. №2 (77). С. 15–17.

18.Войтенко С. П., Шульц Р. В., Медведський Ю. В. Сучасні методи передачі координат пунктів просторової геодезичної мережі на монтажний горизонт. *Будівництво України: наук.-виробн. журнал*. К., 2009. Вип. № 9–10. С. 21–24.

19.Впровадження державної геодезичної референцної системи координат України – УСК 2000 / О. Кучер, Ю. Стопхай, Р. Васютенко, О. Ранкевич. Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід. Вип.4. Чернігів, 2008. С. 25–3

20.Геодезичне забезпечення будівництва. Частина 2. : навчальний посібник / Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Бікс Ю. С., Вовк Т. Ю. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 99 с

21.ДБН В.1.3.-2:2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів в будівництві. Геодезичні роботи в будівництві. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 70 с.

22. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. К.: Мінрегіонбуд України, 2014. 126 с.

23. Двудіт П. Д., Джуман Б. Б., Смедянець О. В. Модель гравіметричних складових відхилень прямовисних ліній території України за даними EGM 2008. *Геодинаміка: Наук.-техн. зб.* Л.: НУ “Львівська політехніка”, 2012. № 1(12). С. 30–35.

24. Дослідження точності визначення координат GNSS методом в режимі RTK / Віват А. Й., Літинський В. О., Колгунов В. М., Покотило І. Я. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* 2011. №74. С. 52–59.

25. ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів. К., 2010. 70 с.

26. Afrooz Aryan, Frédéric Bosché, Pingbo Tang. Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. *Automation in Construction*, Volume 125, May 2021, 103551.

27. Заблоцький Ф., Савчук М. Точність вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GPS-спостережень. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2014. Вип. І(27). С. 52–54.

28. Задемленюк А. В. Аналіз GNSS обладнання для роботи в RTK режимі. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів, 2010. Вип. ІІ (18). С. 108–116.

29. Задемленюк А. В. Дослідження впливу похибок на супутникові вимірювання в RTK-режимі. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* 2010. № 73. С. 25–33.

30. Задемленюк А. В. Дослідження похибок супутникових вимірювань в RTK режимі. Нові технології в геодезії та землевпорядкуванні. Ужгород, 2010. Вип. 5. С. 90–93.

31. Задемленюк А. В. Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру. *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* Львів, 2008. Вип. 70. С. 14–20.

32. Задемленюк А. В. Результати експериментальних досліджень точності визначення координат та практичне застосування RTK-технології з використанням GPRS Internet з'єднання. Геодезія, архітектура та будівництво. Львів, 2009. Вип. 2. С. 130–133.

33. Застосування супутникових методів для створення геодезичної мережі при будівництві метрополітену / Р. В. Шульц, М. В. Білоус, В. Я. Ковтун та ін. Вісник геодезії та картографії, 2012, № 2 (77). С. 5–9.

34. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.geoguide.com.ua/basisdoc/basisdoc.php?part=tgo&art=3501>.

35. Інструкція про побудову державної геодезичної мережі з використанням супутникових радіонавігаційних систем. Офіц. вид. К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2002. 56 с.

36. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування.

37. ДБН В. 1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві.

38. Фізико-географічний опис [Електронний ресурс] // Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Мукачівський район](http://uk.wikipedia.org/wiki/Мукачівський_район);

39. Фізико-географічний опис [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://ecozakarpat.gov.ua/wp-content/pzf_ekomereia/zvit_mukachivskv.doc;

40. Фізико-географічний опис [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%83%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%B2%D0%BE#cite_note-17

41. Геологія і геоморфологія Закарпатської області [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://carpaty.net/?p=30958&lang=uk>

42. Геологічна карта Закарпатської області [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://geo.inf.kiev.ua/wp/w/Vie wer.php?pr=1&ump=m34-35&fmp=kv_m34-35_3.jpg

43. Сейсмічність Закарпатської області [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://zakarpatva.net.ua/News/101177-Тектоничнви-rozлом-iakvi-dilvt>

Zakarpattia-navpil-bezperestanku-rozshvriuietsia

44. Землетруси на території Закарпаття [Електронний ресурс] // Режим доступу: [http : //www, mukachevo. net/ua/ne ws/vi e w/142491](http://www.mukachevo.net/ua/news/view/142491)

45. Геофізична інформація Закарпатської області [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://geolmigi.com/book_view.php?id=111

46. Система Zakpos [Електронний ресурс] // Режим доступу: [http://zakpos.zakgeo.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=55;](http://zakpos.zakgeo.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=55)

47. Тахеометр Sokkia Power Set 250RX [Електронний ресурс] // Режим доступу <https://www.rusgeocom.ru/products/taheometr-sokkia-set-250rx>

48. GNSS - приймач South Galaxy GIPlus [Електронний ресурс] // Режим доступу <https://geoagronavt.com.ua/ua/p1398979045-gnss-rtk-priemnik.html>

49. Тахеометричне знімання [Електронний ресурс] // Режим доступу: [https : //buklib. net/books/35732/](https://buklib.net/books/35732/)

50. RTK режим [Електронний ресурс] // Режим доступу: [http : //www. demetra5. kiev. ua/ua/info/articles/GNS S-network;](http://www.demetra5.kiev.ua/ua/info/articles/GNSS-network)

51. Програмне забезпечення Digitals [Електронний ресурс] // Режим доступу: [https://studfile.net/preview/5720767/page: 14/](https://studfile.net/preview/5720767/page:14/)