



СИСТЕМНЕ КАЛІБРУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ: МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ

Рассматривается принцип и математическая модель системной калибровки наземных лазерных сканеров с использованием точечных и плоскостных марок. Приводятся формулы для решения задачи выбора модели с целью определения систематических погрешностей лазерного сканера. Предложенная авторами гибридная модель базируется на модели погрешностей электронного тахеометра и включает свыше двадцати дополнительных параметров.

The principle and mathematical model of terrestrial laser scanners system of calibration using point-based and plane-based targets is described. The formulas applied to solve the problem of the model selection for the purpose of systematic errors of laser scanner measurement are given. The hybrid model, offered by authors, is based on the errors model of electronic tachometer and contains over 20 additional parameters.

Постановка проблеми. Використання технологій наземного лазерного сканування (НЛС) для вирішення прикладних задач останніми роками значно розширилось, а подекуди сканери навіть замінюють традиційні прилади. Це можна пояснити тим, що за точністю деякі сучасні системи досягають показників основної лінійки геодезичних приладів. Але серед широкого кола користувачів досі побутує стереотип про недостатню точність даних, отриманих в ході НЛС.

У більшості праць останніх років дана технологія розглядається виключно як допоміжна для топографічного знімання та отримання цифрової моделі місцевості. Можливо, цей хибний погляд прийшов до нас з часів першого покоління сканерів (це приблизно 1997-2002 рр.), коли похибка визначення координат точки становила понад 25 мм (наприклад, сканер Riegl LMS Z210). Але вже в 2002 р. з'явилися системи, точність визначення просторових координат якими становить до 10 мм, а наразі точність фазових сканерів наближається до кількох міліметрів.

Особливістю технології систем НЛС є характер даних. На відміну від традиційної геодезії, де оперують координатами конкретної точки, положення якої фіксується знаками, центрами, марками або твердими контурами, в технології НЛС оперують поняттям хмари точок, з якої отримують геометричні характеристики об'єкта сканування або (після оброблення) математичний опис цього об'єкта у вигляді математичних залежностей. Друга суттєва відмінність – це величезна надлишковість даних, що створює умови для пошуку нових, оптимальних методів та моделей їх оброблення.

З апаратної точки зору особливість НЛС і в тому, що загалом нам відомі лише загальні принципи будови сканерів, тоді як для правильного математичного опису об'єкта потрібно знати ще й геометричні та просторові зв'язки між конструктивними елементами сканера. Це спонукає дослідників при аналізі похибок систем НЛС розглядати їх (системи) з позицій "чорної скриньки", про що сказано в праці [2]. Виходячи з цього, підвищення точності НЛС сьогодні залишається досить акту-

альним завданням. До того ж, вищенаведені особливості НЛС залишають широке поле для досліджень.

Аналізуючи дані провідних виробників апаратної частини технології НЛС (Sokkia Topcon, Zoller-Fröhlich, Surphaser, Faro, Riegl, Callidus), помічаємо, як постійно підвищується точність обладнання. Однак деякі види інженерно-геодезичних робіт поки можна виконати лише традиційними методами. Підвищення точності НЛС передусім дозволить вирішувати задачі інженерної геодезії, пов'язані з високоточними вимірюваннями, наприклад, проводити високоточне виконавче знімання, моніторинг об'єктів підвищеної категорії складності тощо. Невід'ємним завданням підвищення точності є задача калібрування систем НЛС, яка через вказані вище особливості систем є складною і на сьогодні не має однозначного рішення.

Калібрування можна визначити як "процес визначення параметрів, за допомогою яких мають бути виправлені виміряні величини для отримання їхніх дійсних значень" [17]. Найчастіше, калібрування пов'язане з визначенням інструментальних похибок, а саме розбіжностей між реальним та ідеальним інструментом, які виникають через недосконалість механічних й електронних компонентів. Калібрування НЛС може бути виконане одним з таких методів:

1. *Апаратне калібрування.* Воно виконується для окремих частин інструменту, таких як віддалемір-на та кутомір-на системи. Цей тип калібрування потребує досконалого розуміння моделі похибок сканера. Проте таке розуміння обмежене виробником обладнання патентуванням окремих компонентів і систем. Крім того, апаратне калібрування потребує доступу до спеціальних можливостей, на кшталт високоточних базових ліній, компараторів, високоточних кутових мір, що практично неможливе для пересічного користувача [19]. При цьому важливо пам'ятати, що побудована таким чином математична модель похибок має фізичний зміст, тобто описує конкретний фізичний процес. Деякі вчені продовжують досліджувати окремо інструментальні похибки НЛС [2,17,19]. Не виключено, що в подальшому це спричинить підвищення точності.

2. *Системне калібрування.* У цьому випадку використовується підхід, відомий з фотограмметрії, в



якій системне калібрування кваліфікується як "визначення параметрів внутрішнього орієнтування та всіх систематичних похибок для всіх камер (зображень)" [9,10]. Системне калібрування може бути проведено шляхом самокалібрування. У фотограмметрії останнє трактується, як "визначення всіх систематичних похибок (плюс, можливо, параметри внутрішнього орієнтування) одночасно з усіма іншими параметрами системи (сумісне вирівнювання), використовуючи концепцію додаткового оцінювання параметрів." Враховуючи системну подібність фотограмметричного процесу і НЛС, можна сформулювати остаточну дефініцію терміна: *самокалібрування – це визначення всіх систематичних похибок НЛС одночасно з іншими параметрами системи.* На відміну від апаратного калібрування, в цьому випадку розуміння моделі похибок сканера не настільки важливе. При такому підході використовуються поліноміальні моделі різного типу [13-15], які найкраще описують залежність між виміряними величинами та їх похибками. Отже, оцінювання інструментальних похибок виконується без врахування причин або характеру їхнього походження [17]. Такий підхід найкращим чином відповідає підходу до моделі сканера, як "чорної скриньки".

Метод самокалібрування за останні 10 років став одним з найпопулярніших для калібрування НЛС [12]. Його було розроблено для фотограмметрії на початку 1970-х років. Він вважається більшістю дослідників оптимальним методом калібрування.

Огляд попередніх публікацій. Як і в класичних геодезичних приладах, калібрування (юстування) – надзвичайно важливий процес і передумова для отримання максимально точної та надійної інформації про тривимірне положення як всієї хмари точок, так і похідних від неї геометричних характеристик об'єкта [1].

Попри величезну кількість праць з теорії та методів калібрування систем НЛС, як було вказано в праці [2] одного з авторів цієї статті, сама наявність такої кількості підходів вказує на те, що до вироблення оптимального методу ще дуже далеко. Математичній моделі самокалібрування було приділено багато уваги у зарубіжних дослідженнях. Можна сказати, що на сьогодні ця модель охоплює майже весь спектр можливих додаткових параметрів калібрування. Ті параметри, що лишаються поза даною моделлю, називають емпіричними, і їх отримують, досліджуючи конкретну модель НЛС. У 2010 р. були спроби використати для опису математичної моделі похибок тривимірну статистику і теорію графів [8], але дана модель не змогла скласти конкуренції загальноприйнятій. Тож структура математичної моделі калібрування НЛС дотепер невизначена.

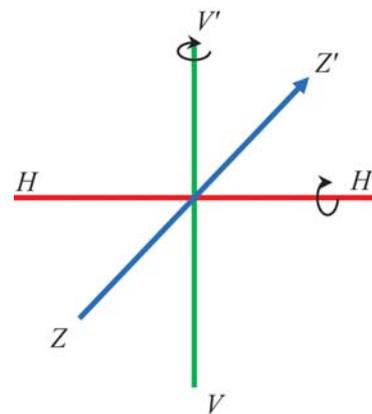
Особливістю публікацій останніх років є дискусія щодо вибору даних для калібрування. Використання хмари точок породило спір про те, які об'єкти брати для калібрування: точкові [7], пло-

щинні [5], циліндричні [6] чи сферичні [17]. Але ці дослідження більше стосуються технології калібрування, ніж математичних моделей опису похибок.

Пошук оптимальних моделей оцінювання похибок НЛС при системному калібруванні залишається відкритим питанням.

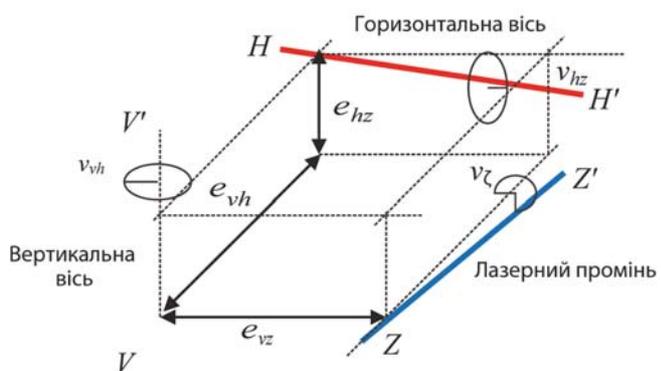
Постановка завдання. *Метою роботи є розгляд загальної моделі та принципів її побудови для оцінювання похибок при системному калібруванні наземних лазерних сканерів.*

Основний зміст дослідження. Загальна модель НЛС. Математична (геометрична) модель калібрування заснована на припущенні, що інструментальні похибки типового лазерного сканера відповідають інструментальним похибкам електронного тахеометра [18]. Умовна полярна система координат інструмента на станції визначається вертикальною віссю обертання приладу (VV'), горизонтальною віссю обертання дзеркала (HH') та віссю лазерного променя (ZZ') (мал.1).



Мал. 1. Основні осі лазерного сканера

Відносно просторове положення цих трьох осей може бути виражене шістьма параметрами – трьома зсуву і трьома повороту (мал. 2).



Мал. 2. Ексцентриситет і розворот осей лазерного сканера

Відносно будь-яких двох осей можна визначити такі величини: e_{vh} – ортогональна відстань між вертикальною віссю обертання приладу та віссю обертання дзеркала; e_{vz} – ортогональна відстань між вертикальною віссю обертання приладу і віссю



лазерного променя; e_{hz} – ортогональна відстань між віссю обертання дзеркала і віссю лазерного променя; α_{vh} – кут між вертикальною віссю обертання приладу і віссю обертання дзеркала; α_{vz} – кут між вертикальною віссю обертання приладу та віссю лазерного променя; α_{hz} – кут між віссю обертання дзеркала і віссю лазерного променя.

Для кутів справедливі такі вирази:

$\alpha_{vh} + v_{vh} = 90^\circ$ (v_{vh} – похибка за нахил осі обертання дзеркала);

$\alpha_{vz} = \zeta + v_\zeta$ (v_ζ – похибка вертикального індекса (місце нуля); ζ – виміряна зенітна відстань;

$\alpha_{hz} + v_{hz} = 90^\circ$ (v_{hz} – похибка за колімацію).

Для віддалемірного блоку можна написати такий вираз:

$d_d = a + d_{\text{вим}} \cdot m$ (тут d_d – дійсна відстань; a – поправка (константа); $d_{\text{вим}}$ – виміряна відстань; m – масштабний коефіцієнт).

Отже, задача калібрування полягає у визначенні параметрів e_{vh} , e_{vz} , e_{hz} , v_{vh} , v_ζ , v_{hz} , а також їхнього впливу на загальну точність процесу калібрування. Як буде показано нижче, зазначені вище вирази є основними при визначенні моделі похибок сканера.

Сучасні моделі сканерів поділяються на дві великі групи – панорамні та гібридні. Панорамними прийнято називати сканери з полем зору по вертикалі $>180^\circ$, гібридними – $<180^\circ$. Фактично у гібридних сканерів поле зору становить $70-100^\circ$ (наприклад, Topcon GLS-1500, Riegl VZ-400), а у панорамних – $270-320^\circ$ (Topcon GLS-2000, Z+F 5010), що дозволяє їм сканувати сферу навколо себе (за винятком невеликого сектора під собою, де зазвичай знаходиться штатив). На практиці ширше використовуються панорамні сканери. Для завдань калібрування вони також зручніші, бо, маючи таке широке поле огляду, вони дають змогу сканувати марки з діаметрально протилежних сторін. Найближча аналогія при звичайних вимірюваннях – це вимірювання кута повним кутовим прийомом (при двох положеннях вертикального круга). Тому визначення v_ζ та v_{vh} у гібридних приладів є проблемним.

Методика та математична модель НЛС. Запропонована у джерелі [14] методика самокалібрування НЛС полягає у створенні калібрувального полігона (зазвичай у приміщенні), який складатиметься з марок. Марки можуть бути точковими або площинними. До точкових відносять плоскі, циліндричні й сферичні марки, оскільки при вимірюваннях визначають координати їх центроїдів. Це пов'язано з тим, що у випадку сканування з двох і більше станцій точки, отримані з різних станцій, не співпадають (через обмеження роздільної здатності скану). Таким чином, для дотримання необхідної точності виконують сканування мішені та наступну за цим дію – визначення її центроїда [11]. У випадку роботи з точковими мішенями використовують їхні координати, а у випадку з площинними – координати плоских поверхонь.

Нижче наведено математичну модель самокалібрування сканера [17], яка базується на строгому перетворенні між системою координат приладу та зовнішньою системою координат, доповнену

інструментальними похибками сканера (параметрами калібрування). Отже, при використанні точкових мішеней можна оцінити такі параметри:

- елементи зовнішнього орієнтування сканера на всіх станціях по відношенню до зовнішньої системи координат – параметри перетворення:
 - три параметри зсуву (координати центра сканера в зовнішній системі координат): ΔX , ΔY , ΔZ ;
 - три кути повороту відносно координатних осей: ω , φ , κ ;
- параметри калібрування сканера, які ще називають додатковими параметрами;
- координати точки – координати мішені (центра мішені).

При використанні площинних опорних марок всі виміряні точки мають відповідати умовному рівнянню належності точки площині.

Використовуючи рівняння площини, елементи зовнішнього орієнтування та параметри калібрування, рівняння калібрування в загальному вигляді записують у матричній формі:

$$\mathbf{n}_k^T (\mathbf{M}_j^T \mathbf{p}_{ij} + \mathbf{P}_j) - d_k = 0, \quad (1)$$

де \mathbf{n}_k – вектор нормалі до площини k ; \mathbf{M}_j – матриця повороту, що визначає розворот хмари точок j як функцію від кутів Ейлера; \mathbf{p}_{ij} – вектор координат точок x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} ; \mathbf{P}_j – величина, що визначає тривимірне положення сканера j ; d_k – нормальна відстань від початку координат до площини k .

Калібрувальний полігон сканується з однієї або декількох станцій, після чого проводиться самокалібрування, в процесі якого визначаються параметри калібрування сканера та інші параметри системи з оцінювання точності. Для визначення масштабного коефіцієнта виміряної відстані необхідно мати надлишкові вимірювання. У цьому випадку сканування проводять з двох і більше станцій [19].

Виміряні величини (див. [7]) визначаються в полярній системі координат:

$$\begin{aligned} \rho_{ij} &= \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho; \\ \theta_{ij} &= \arctg\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta; \\ \alpha_{ij} &= \arctg\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

де ρ_{ij} , θ_{ij} , α_{ij} – відстань, горизонтальний та вертикальний кути відповідно точки i в системі координат сканера j ; x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} – прямокутні координати точки в системі координат сканера j ; $\Delta\rho$, $\Delta\theta$, $\Delta\alpha$ – додаткові систематичні поправки у відстань, горизонтальний і вертикальний кути, обчислені через параметри калібрування.

Відповідні центроїди марок використовуються для зв'язку хмар точок, отриманих з різних станцій та з різною орієнтацією способом тривимірного перетворення координат:



$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{bmatrix} = R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{0j} \\ Y_{0j} \\ Z_{0j} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де X_i, Y_i, Z_i – прямокутні координати точки i у зовнішній системі координат; X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j} – початок відліку системи координат сканера j в зовнішній системі координат; $\omega_j, \phi_j, \kappa_j$ – елементи орієнтування системи координат сканера j відносно зовнішньої системи координат.

Використовуючи вирази (2) і (3), можна оцінити елементи зовнішнього орієнтування для забезпечення оптимальної відповідності між точковими марками в зовнішній системі координат. За методом найменших квадратів мінімізують невизначеність розташування марки у зовнішній системі координат [11].

При використанні площин за основу приймають вираз (1). Ідея методу полягає у мінімізації нормальної відстані між усіма точками на площині k . Вираз (1) у розгорнутому вигляді можна записати так:

$$(a_k b_k c_k) \left\{ R_3(\kappa_j)R_2(\phi_j)R_1(\omega_j)P + \begin{bmatrix} X_{0j} \\ Y_{0j} \\ Z_{0j} \end{bmatrix} \right\} - d_k = 0, \quad (4)$$

$$де P = \begin{bmatrix} (\rho_{ij} - \Delta\rho)\cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha)\cos(\theta_{ij} - \Delta\theta) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho)\cos(\alpha_{ij} - \Delta\alpha)\sin(\theta_{ij} - \Delta\theta) \\ (\rho_{ij} - \Delta\rho)\sin(\alpha_{ij} - \Delta\alpha) \end{bmatrix} - \text{вектор координат}$$

точок як функція вимірних кутів і відстані; a_k, b_k, c_k, d_k – параметри площини, які визначають вісь нормалі nf та нормальну відстань до площини.

Відштовхуючись від результатів багатьох досліджень, ми дійшли висновку про доцільність використання гібридного підходу як моделі для визначення систематичних похибок. Ретельний аналіз моделей опису систематичних похибок НЛС дає підстави запропонувати формули, які є комбінацією фізичного та поліноміального моделювання. В результаті отримано вирази для опису систематичних похибок вимірної відстані:

$$\Delta\rho = A_0 + A_1\rho_{ij} + A_2\sin(\alpha_{ij}) + A_3\sin\left(\frac{4\pi}{U}\rho_{ij}\right) + A_4\cos\left(\frac{4\pi}{U}\rho_{ij}\right) + ET_\rho, \quad (5)$$

де A_0 – поправка віддалеміра; A_1 – масштабний коефіцієнт віддалеміра; A_2 – вертикальне зміщення осі лазера; A_3 і A_4 – циклічні похибки; U – одиниця довжини; ET_ρ – емпірична похибка віддалеміра.

Для описування систематичних похибок горизонтального кута пропонується такий вираз:

$$\Delta\theta = B_1\theta + B_2\sin(\theta) + B_3\cos(\theta) + B_4\sin(2\theta) + B_5\cos(2\theta) + B_6\sec(\alpha) + B_7\text{tg}(\alpha) + B_8\rho^{-1} + B_9\sin(\alpha) + B_{10}\cos(\alpha) + ET_\theta, \quad (6)$$

де B_1 – похибка за масштабний коефіцієнт горизонтального напрямку; B_2 і B_3 – ексцентриситет горизонтального круга; B_4 і B_5 – неортогональність відлікового пристрою горизонтального круга вертикальної осі обертання приладу; B_6 – похибка за горизонтальність колімаційної осі; B_7 – похибка за нахил осі обертання дзеркала; B_8 – горизонтальний ексцентриситет колімаційної осі; B_9 і B_{10} – хитання осі обертання дзеркала; ET_θ – емпірична похибка горизонтального напрямку.

Для опису систематичних похибок вертикального кута або зенітної відстані можна скористатись такою формулою:

$$\Delta\alpha = C_0 + C_1\alpha + C_2\sin(\alpha) + C_3\cos(\alpha) + C_4\sin(2\alpha) + C_5\cos(2\alpha) + C_6\rho^{-1} + C_7\sin(\theta) + C_8\cos(\theta) + ET_\alpha, \quad (7)$$

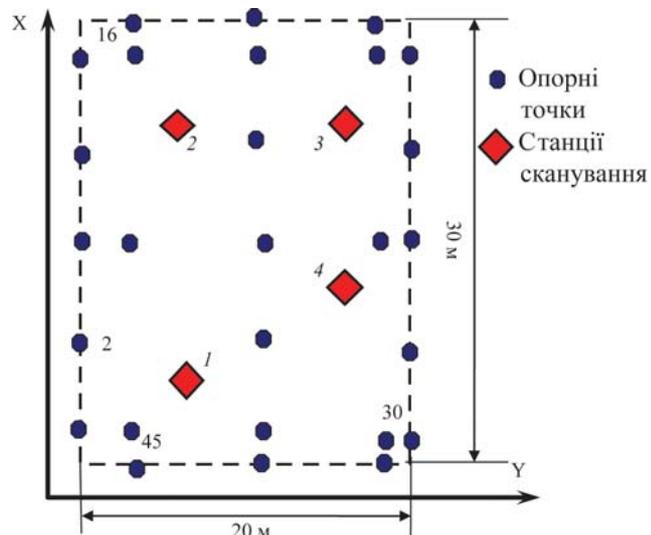
де C_0 – похибка індексу вертикального круга (M0); C_1 – похибка за масштабний коефіцієнт; C_2 і C_3 – ексцентриситет вертикального круга; C_4 і C_5 – неортогональність відлікового пристрою вертикального круга осі обертання дзеркала; C_6 – вертикальний ексцентриситет колімаційної осі; C_7 і C_8 – хитання вертикальної осі обертання приладу; ET_α – емпіричні похибки зенітної відстані.

Наведені гібридні моделі (5-7) вимагають ґрунтовного дослідження в порівнянні з існуючими ними [1]. Запропоновані нами моделі за своєю структурою теоретично дозволяють найповніше описати "поведінку" систематичних похибок НЛС.

Ап'риорний розрахунок точності калібрування.

З метою перевірки запропонованих моделей та оцінювання очікуваної точності, яку можна досягти при їх застосуванні, було виконано статистичне моделювання результатів вимірювань модельного калібрувального полігона з подальшим обробленням даних.

Для виконання калібрування здійснено моделювання сканування полігона, схему якого наведено на мал. 3. Висота стелі полігона 8 м.



Мал. 3. Схема калібрувального полігона



Загалом визначено координати 45-ти опорних марок з точністю, що дорівнює точності визначення параметрів калібрування (для моделювання точність визнано безпомилковою). Для калібрування виконано моделювання процесу сканування з 4-х станцій. Було взято такі моделі виникнення систематичних похибок:

$$\Delta R = \delta R + a_0 R_{\text{вим}} + a_1 R_{\text{вим}}^2;$$

$$\Delta \theta = \delta \theta + b_1 \cos \theta_{\text{вим}}; \Delta \varphi = \delta \varphi + c_1 \sin \varphi_{\text{вим}}.$$

Такі моделі дають змогу виконати детальне дослідження, оскільки систематичні похибки впливатимуть не тільки на значення параметрів, а й на величини та знаки поправок.

Складено систему рівнянь, в результаті вирішення якої отримано параметри переходу від систем координат станцій сканування до системи координат калібрувального полігона (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри перетворення та оцінки точності

Номер станції сканування	Крен, град.	Тангаж, град.	Курс, град.	X, м	Y, м	Z, м	μ
1	399,9989	0,0009	15,5909	-2,059	3,431	1,001	5,096
2	0,0011	399,999	384,4017	-2,060	-3,433	1,001	4,371
3	399,999	0,0019	10,5162	3,2551	2,326	-0,500	4,574
4	0,0017	399,9976	368,8108	1,372	-5,492	-0,000	3,667

Значення визначених систематичних похибок представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Систематичні похибки

ΔR , мм	$\Delta \theta$, град.	$\Delta \varphi$, град.	$m_{\Delta R}$, мм	$m_{\Delta \theta}$, град.	$m_{\Delta \varphi}$, град.
6	0,0055	-0,0066	1	0,0011	0,0022

За розробленим алгоритмом отримані значення систематичних похибок автоматично враховано при обчисленні поправок у виміряні лазерним сканером кути і відстані. Після виключення значень похибок було отримано залишкові значення відхилень вимірних величин на опорних марках. Використовуючи ці результати отримано значення СКП вимірювання кутів і відстаней без впливу систематичних похибок (табл. 3).

Таблиця 3. Значення СКП після виключення систематичних похибок

СКП	Станції сканування			
	1	2	3	4
m_{φ} , град.	0,00064	0,00045	0,0007	0,0007
m_R , мм	0,0052	0,0056	0,0046	0,0062
m_{θ} , град.	0,00096	0,00071	0,0006	0,00074

СКП вимірювання лазерним сканером після остаточного виключення систематичних похибок становили: $m_{\theta} = 0,0007^\circ$, $m_{\varphi} = 0,0006^\circ$, $m_R = 5,2$ мм. Ці значення відповідають точності, що заявлена виробником лазерного сканера.

Висновки та перспективи досліджень. У статті описано концепцію системного калібрування наземних лазерних сканерів та базову математичну модель, що використовується при калібруванні. Наводиться приклад вирішення однієї з методичних задач, що виникають при їх калібруванні, а саме визначення моделі похибок сканера. Модель базується на методі визначення похибок електронного тахеометра та інших складових і включає близько 20-ти параметрів. Проведено апріорний розрахунок точності шляхом статистичного моделювання результатів вимірювань модельного калібрувального полігона. Наведену математичну модель калібрування рекомендуємо прийняти за основну при калібруванні НЛС. У подальшому автори планують провести експериментальні дослідження запропонованих рішень для різних типів та моделей наземних лазерних сканерів з метою стандартизації математичних моделей для врахування систематичних похибок при системному калібруванні цього типу приладів.

Література

1. Шульц, Р.В. Аналіз методів та моделей калібрування наземних лазерних сканерів / Р.В. Шульц // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2011. – Вип. II. – С. 128-133.
2. Шульц, Р.В. Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.24.01 / Р.В. Шульц, Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2012. – 36 с.
3. Abbas, M. The Effect of Datum Constraints for Terrestrial Laser Scanner Self-Calibration / M. Abbas, H. Setan, Z. Majid [et al.]. – FIG Congress, 2014, Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia 16-21 June 2014. – Kuala Lumpur, 2014. – P. 2-18.
4. Alba, M. Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring / M. Alba, F. Roncoroni, M. Scaioni // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. XXXVII. – Part B5. – Beijing, 2008. – P. 1053-1059.
5. Bae, K. On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners / K. Bae, D. Lichti // The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W52). – Espoo, Finland, 2007. – P. 14-19.
6. Chan, T. Cylinder-based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner / T. Chan, D. Lichti. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. – Melbourne, 2012. – P. 169-174.
7. Chow, J. Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners / J. Chow, D.D. Lichti, C. Glennie // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W12, 2011, ISPRS, Calgary, 2011, Workshop, 29-31 August 2011, Calgary, Canada. – P. 121-126.



8. *Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of Spherical Statistics and 3D Graphs* [Електрон. ресурс] / A. Cuartero, J. Armesto, P. Rodriguez, P. Arias // SENSORS. – 2010. – № 10. – P. 10128-10145. – <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/11/10128>
9. *Förstner, W. Mathematical concepts in photogrammetry*. [In: Manual of Photogrammetry, 5th ed.] / W. Förstner, B. Wrobel, J.C. McGlone [et al.]. – Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1151 p.
10. *Gruen, A. Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* / A. Gruen, T.S. Huang. – New York, 2001. – Springer Science & Business Media. – P. 163-164.
11. *Improvement to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods* [Електрон. ресурс] / J.C.K. Chow, D.D. Lichti, C. Glennie, P. Hartzell // SENSORS. – 2013. – № 6. – P. 7224-7249. – <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/6/7224>
12. *Lichti, D. A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanners* / D. Lichti // Boletim de Ciências Geodésicas. sec. Artigos, v. 16, no 1. – Curitiba, 2010. – P. 3-19.
13. *Lichti, D. Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment* / D.D. Lichti, M.G. Licht // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 5). – Newcastle upon Tyne, 2006. – P. 155-160.
14. *Lichti, D. Modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner* / D. Lichti // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – Amsterdam, 2007. – 61. – P. 307-324.
15. *Lichti, D. Self-Calibration and Analysis of the Surphaser 25HS 3D Scanner* / D. Lichti, S. Brustle, J. Franke // Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, FIG Working Week, Hong Kong, China, 13-17 May 2007. – P. 31-44.
16. *Miri, M. Evaluating parameters affecting the georeferencing accuracy of terrestrial laser scanners* / M. Miri, M. Varshosaz // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, 2011 ISPRS Trento 2011 Workshop, 2-4 March 2011, Trento, Italy. – P. 387-390.
17. *Reshetyuk, Y. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning: Doctoral thesis in Infrastructure* / Y. Reshetyuk // Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Sweden, Stockholm, January 2009. – 173 p.
18. *Rietdorf, A. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners* / A. Rietdorf, F. Gielsdorf, L. Gruendig. – TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II – Laser Scanning and Photogrammetry at FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004. – P. 2-11.
19. *Schultz, T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy: Dissertation for the degree of Doctor of Sciences* / T. Schultz. – ETH Zurich. – Zurich, 2007. – 172 p.

Надійшла 16.02.15

* * *

УДК 621.396.933:629.783:332.3

Л. В. Гебрин, Ю. Ю. Бандурович

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА НАЗЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ЗАКАРПАТСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Исследовано современное состояние почв Мукачевского района Закарпатской области. Проанализировано информативность спектральных снимков спутника Landsat 8 OLI и Landsat 7 ETM. Обосновано оптимальный выбор каналов для решения конкретных задач оценки состояния почв (определение степени засоленности, гумификации, влажности) с помощью алгоритма, который основан на анализе динамики вегетационных индексов, определяемых по мультиспектральным космическим снимкам.

The current state of soils of Mukachevo district of Transcarpathian region has been examined. The informational content of the spectral satellite images from Landsat 8 OLI and Landsat ETM 7 are analyzed. The optimal channel selection for specific tasks of soil assessment (determining the salinity degree, humification, humidity) applying the algorithm based on the analysis of the dynamics of vegetation indices and defined by the multispectral satellite images has been motivated.

Актуальність теми дослідження. Питання розвитку аграрного сектору, зокрема раціонального використання земель сільськогосподарського призначення – одне з пріоритетних для економіки нашої країни. Інтенсивне, без дотримання екологічно обґрунтованих норм використання земель у сільському

господарстві призвело до посилення ерозійних процесів та зниження родючості ґрунтів. Ефективно використовувати сільськогосподарські землі – це не тільки збирати високі врожаї, а й стежити за станом ґрунтового покриття [6].

Відомо багато способів покращення стану ґрунтового середовища (осушення, удобрення, меліорація та ін.). Але завжди гостро стояло завдання пошуку

© Л. В. Гебрин, Ю. Ю. Бандурович, 2015