

ГЕОПРОСТОРОВА ПІДТРИМКА

УДК 528.4/.5

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.62.73-77>

Олександр ГОНЧАРЕНКО, канд. техн. наук

ORCID ID: 0000-0002-0353-2470

e-mail: uy5us@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Сергій БОДНАР, асист.

ORCID ID: 0000-0002-1052-5543

e-mail: bodnarsp@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Маргарита ДУБНИЦЬКА, д-р філософії

ORCID ID: 0000-0002-1907-1496

e-mail: MarharytaDubnytska@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВПЛИВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ШТРИХОВОГО ПОЛЯ НІВЕЛІРНОЇ РЕЙКИ
НА ТОЧНІСТЬ ЗЧИТУВАННЯ ЦИФРОВИМ НІВЕЛІРОМ

Вступ. У статті наведено результати теоретичного аналізу та числового моделювання впливу перспективного спотворення зображення нівелірної штрихкової рейки на точність зчитування цифровим нівеліром. Досліджено процес зміщення максимуму кореляційної функції, що виникає при повороті рейки навколо вертикальної осі. Аналітично доведено, що похибка відліку має квадратичну залежність від кута повороту рейки.

Методи. Для комплексного вивчення системи "нівелір – рейка" застосовано системний аналіз; для визначення перспективних змін розмірів штрихів та їхнього впливу на алгоритм зчитування – методи проєктивної геометрії. Геометричний аналіз використано для математичного опису змін у геометрії штрихових символів при повороті рейки. Кореляційний аналіз виконано для оцінювання зв'язку між кутом повороту рейки, відстанню до неї та середньоквадратичною похибкою вимірювання.

Результати. Числове моделювання, проведене для відстані візування 30 м, показало, що при кутах повороту до 5° похибка залишається в межах 0,2 мм і є несуттєвою для практичних вимірювань. Однак при кутах понад 10° систематична похибка перевищує 0,8 мм, що є критичним для вимог високоточного нівелювання. Продемонстровано, що перспективне спотворення штрихкової шкали призводять до зменшення розмірів штрихів пропорційно закону косинуса кута повороту.

Висновки. Результати числового моделювання узгоджуються з аналітичними оцінками, що підтверджує достовірність запропонованої моделі. Зроблено висновок про необхідність контролю положення рейки під час вимірювання для мінімізації систематичних похибок. Отримані результати можуть бути враховані для вдосконалення технологій цифрового нівелювання, розроблення методів автоматичного контролю положення рейки та підвищення загальної точності геодезичних вимірювань.

Ключові слова: штрихкова нівелірна рейка, перспективне спотворення, кореляційна функція, похибка відліку, високоточне нівелювання.

Вступ

Цифрове нівелювання є невід'ємним складником сучасної геодезичної практики завдяки високій точності й автоматизації оброблення даних. Застосування цифрових нівелірів дозволяє істотно підвищити продуктивність польових робіт і при зчитуванні відліків мінімізувати людський фактор (Leica Geosystems, 2007; Trimble DiNi Digital..., 2017). Проблематика забезпечення точності цифрового нівелювання активно досліджується у науковій літературі. Бруннер і Вошиц (Brunner, & Woschitz, 2004) детально проаналізували потенціал точності цифрових нівелірів і основні джерела похибок, зокрема викривлення шкали рейки та спотворення зображення. Хойнеке та Нойнер (Heipenke, & Neuner, 2011) розробили методики мережевого калібрування цифрових нівелірів для виявлення систематичних похибок, спричинених оптичними дефектами. Стандарт ISO 12858-1:2014 (ISO, 2014) визначає технічні вимоги до інварних рейок і аксесуарів для геодезичних приладів, проте не містить рекомендацій щодо похибок, зумовлених неправильним положенням рейки відносно нівеліра. Дубовий у підручнику "Геодезичні вимірювання високої точності" (Дубовий, 2015) підкреслює важливість точного встановлення рейки, однак окремо не аналізує ефект перспективного спотворення, що виникає при її повороті.

Найближчими до теми дослідження є роботи Німеєр (Niemeier, 2000), де обговорюється загальний вплив спотворень рейки на результати вимірювання, і дослідження Чжан і Альтамімі (Zhang, & Altamimi, 2014), які аналізували точність цифрового нівелювання за допомогою Trimble DiNi, однак також не акцентували увагу на перспективних спотвореннях. У роботах (Бурак, & Гринішак, 2012, 2014; Тревого та ін., 2011, 2012) досліджені питання визначення похибок і точності цифрового нівелювання короткими променями за різних умов виконання робіт. Отже, проведення теоретичного аналізу і числового моделювання впливу повороту нівелірної штрихкової рейки на точність визначення відліку цифровими нівелірами є актуальним, що й обумовлює вибір теми дослідження.

У межах дослідження було поставлено такі основні завдання:

- розробити геометричну модель перспективного спотворення штрихкової рейки, що виникає внаслідок її повороту навколо власної вертикальної осі;
- аналітично вивести залежність зміщення положення кореляційного максимуму від величини кута повороту рейки;
- провести числове моделювання похибок зчитування рейки для різних значень кута повороту;

© Гончаренко Олександр, Боднар Сергій, Дубницька Маргарита, 2025

- здійснити порівняльний аналіз результатів аналітичного та числового підходів із метою верифікації запропонованої моделі;

- сформулювати рекомендації щодо мінімізації впливу похибок перспективного спотворення під час практичного використання цифрових нівелірів.

Методи

Для комплексного вивчення системи "нівелір – рейка" застосовано системний аналіз. Система розглядається як цілісний об'єкт, у якому досліджується взаємовідношення між інформаційно-геометричними характеристиками штрихкової рейки та властивостями електронно-оптичного сенсора. Методи проективної геометрії застосовані для визначення перспективних змін розмірів штрихів та їх впливу на алгоритм зчитування цифровим нівеліром. Геометричний аналіз використано для математичного опису змін у геометрії штрихових символів при повороті рейки. Кореляційний аналіз виконано для оцінювання зв'язку між кутом повороту рейки, відстанню до неї та апіорного розрахунку середньоквадратичної похибки вимірювання.

Результати

Під час проведення нівелювання з використанням цифрового нівеліра передбачається, що нівелірна рейка встановлена вертикально й перпендикулярно до візирної осі приладу. Однак у реальних умовах виникають випадки, за яких установлення рейки необхідно виконати з деяким поворотом навколо власної вертикальної осі, що зумовлює перспективні спотворення зображення штрихів рейки в оптико-електронній системі зчитування цифрового нівеліра.

При куті повороту рейки φ видимий розмір штриха $W_{\text{вид}}$ зменшується за законом

$$W_{\text{вид}} = W \cos \varphi, \quad (1)$$

де W – теоретичний розмір штриха на рейці; φ – кут повороту рейки (в радіанах або градусах).

Це зменшення зумовлює те, що профіль захопленого зображення в цифровому нівелірі вже не відповідає стандартному еталону, що застосовується для визначення висоти методом кореляції (рис. 1).

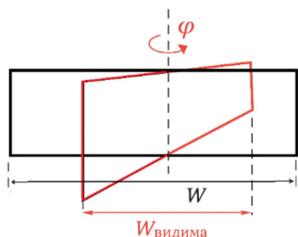


Рис. 1. Геометрична модель перспективного спотворення

Числова ілюстрація процесу:

- при $\varphi = 0^\circ$ видима протяжність штриха дорівнює реальній;
- при $\varphi > 10^\circ$ спостерігається помітне звуження розміру штрихового елемента, яке спричиняє зміщення максимуму кореляції.

Причини виникнення систематичних похибок при геометричному нівелюванні цифровим нівеліром. Цифрові нівеліри зчитують відлік шляхом крос-кореляції захопленого зображення рейки з еталонним профілем штрихового коду. В ідеальних умовах максимум кореляції точно відповідає положенню правильного відліку. Поворот рейки змінює масштаб видимого профілю, що викликає:

- зміну ширини штрихів і пробілів;
- деформацію форми кореляційної функції;

- зміщення положення максимуму кореляції.

Отже, при визначенні відліку цифровий нівелір реєструє хибне значення висоти.

Математична інтерпретація:

- форма кореляційної функції $C(x)$ стає асиметричною при повороті;

- положення максимуму x_{max} зміщується від істинного нуля. Це зміщення інтерпретується як похибка у визначенні перевищення.

Аналітична оцінка похибок. Для малих кутів φ можна використати розклад функції косинуса в ряд Тейлора:

$$\cos(\varphi) \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2} \quad (2)$$

Відповідно, зміщення відліку викликає метричну похибку Δh , яка пропорційна квадрату кута повороту:

$$\Delta h = L(1 - \cos(\varphi)) \approx L \frac{\varphi^2}{2} \quad (3)$$

де L – відстань від цифрового нівеліра до рейки.

Приклад розрахунку: при $L = 30$ м та $\varphi = 10^\circ$ (тобто $\varphi = 0,1745$ рад) отримуємо

$$\Delta h \approx (30 \times 0,1745^2) / 2 \approx 0,45 \text{ мм.}$$

Така похибка є суттєвою і перевищує допустимі значення для високоточного нівелювання.

Числове моделювання процесу спотворення. Для кількісного оцінювання впливу кута повороту рейки навколо вертикальної осі на результати цифрового нівелювання було застосовано метод числового моделювання.

Метою моделювання є встановлення залежності між перспективними спотвореннями зображення штрихів рейки та виникненням похибок у вимірюванні перевищень.

Поворот рейки навколо вертикальної осі є важливим чинником, що зумовлює перспективне "стискання" зображення, наслідком чого є зміщення характерних елементів штрихового коду на фотоелектронному сенсорі приладу.

У цьому моделюванні зроблено припущення, що основним ефектом спотворення є зменшення видимої ширини штрихів пропорційно до косинуса кута повороту. Інші можливі спотворення, такі як викривлення форми штрихів або зміна контрастності, у цьому дослідженні не враховувалися, оскільки їхній вплив вважаємо другорядним при малих кутах повороту.

Числове моделювання (рис. 2) виконане за таким алгоритмом.

1. *Формування еталонного профілю рейки без спотворень.* Створюється математична модель ідеального (недеформованого) зображення штрихкової рейки з правильною геометрією штрихів.

2. *Побудова спотвореного профілю шляхом зменшення ширини штрихів відповідно до заданого кута повороту φ .* Ураховується перспектива: унаслідок повороту рейки навколо власної вертикальної осі видима ширина штрихів зменшується пропорційно до косинуса кута повороту.

3. *Обчислення крос-кореляційної функції між еталонним і спотвореним профілями.* Для кількісного порівняння профілів застосовується метод крос-кореляції, що дозволяє визначити ступінь взаємної відповідності сигналів і виявити можливі зміщення.

4. *Визначення зміщення положення максимуму кореляційної функції.* Зміщення максимуму відносно положення еталонного профілю інтерпретується як результат геометричного спотворення, спричиненого поворотом рейки.

5. *Переведення зміщення в метричну похибку Δh з урахуванням робочої відстані L .* Обчислене зміщення переводиться у похибку вимірювання перевищення, виходячи з геометричних співвідношень між піксельною відстанню і реальною відстанню до рейки.

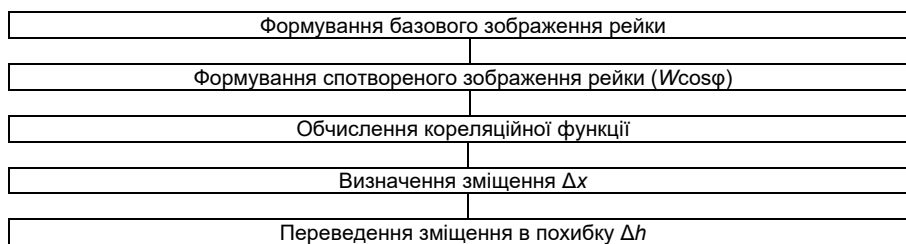


Рис. 2. Блок-схема алгоритму числового моделювання впливу повороту рейки на похибку відліку

Використані параметри моделювання:

- робоча відстань до рейки: $L = 30$ м;
- кути повороту рейки: $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$;
- базова (реальна) ширина штриха на рейці: $W = 10$ мм.

Аналіз похибок. Отримані результати показали квадратичну залежність похибки від кута повороту. При поворотах до 5° похибка залишається незначною (0,2 мм). При кутах більше 10° похибка зростає і досягає 0,8 мм.

Залежність може бути описана узагальненою формулою

$$\Delta h(\varphi) = kL\varphi^2 \quad (4)$$

де $k \approx 0,5$ – емпіричний коефіцієнт пропорційності.

Аналіз геометричних змін видимої ширини штрихів.

На основі аналітичної моделі зменшення ширини штрихів нівелірної рейки при її повороті на кут φ були розраховані значення видимої ширини для кутів $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ та 15° . Розрахунок проводили за формулою (1). Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Видима ширина штриха рейки при заданих кутах повороту		
Кут повороту φ , град.	$\cos(\varphi)$	Видима ширина штриха $W_{\text{вид}}$, мм
0°	1,00000	10,00
5°	0,99619	9,96
10°	0,98481	9,85
15°	0,96592	9,66

Аналіз показує, що при повороті рейки на 15° видима ширина штрихів на відстані 30 м зменшується на понад 3 %, що призводить до суттєвого спотворення видимої форми штрихового образу.

Числове визначення похибок відліку. З використанням моделі деформації зображення виконано числове моделювання процесу кореляційного зчитування відліку. Результати обчислення метричної похибки при різних кутах наведено у табл. 2.

Як видно з табл. 2, при кутах повороту понад 10° систематична похибка у визначенні висоти перевищує 0,8 мм, що є критичним для робіт високої точності.

Для наочності результатів було побудовано графік залежності похибки від кута повороту рейки (рис. 3).

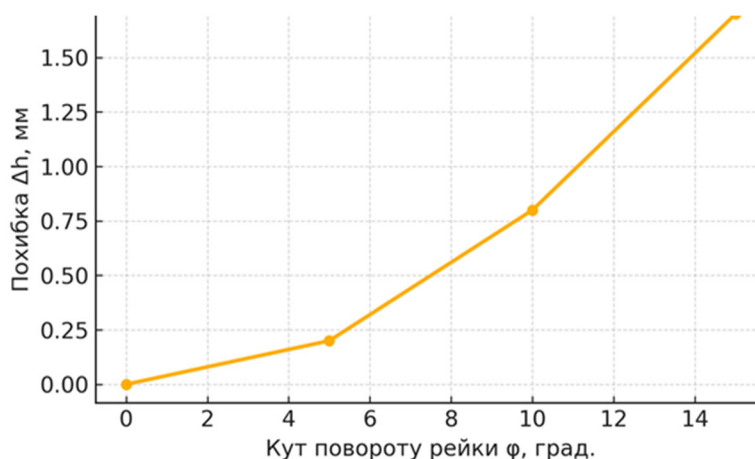
Графік має квадратичний характер, що підтверджує аналітичне виведення залежності:

$$\Delta h \approx \frac{L\varphi^2}{2} \quad (5)$$

Графік демонструє, що при збільшенні кута повороту рейки φ похибка Δh швидко зростає.

Таблиця 2

Похибка відліку Δh залежно від кута повороту рейки φ	
Кут повороту φ , град.	Похибка Δh , мм
0°	0,0
5°	0,2
10°	0,8
15°	1,7

Рис. 3. Залежність похибки Δh від кута повороту рейки φ

Інтерпретація результатів. Дослідження має прикладне спрямування і дає змогу обґрунтовано визначити граничне допустиме значення кута повороту рейки, за якого похибка цифрового нівелювання не перевищує критичних меж точності. За результатами числового моделювання встановлено, що цей поріг перебуває в межах 10° . При

перевищенні цього значення похибка зростає на понад 0,8 мм, що є неприйнятним для вимог нівелювання I та II класу. Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм польових вимірювань і методик перевірки достовірності отриманих даних.

Дискусія і висновки

Проведене аналітичне й числове дослідження впливу повороту нівелірної рейки навколо власної вертикальної осі на точність визначення висоти цифровим нівеліром підтвердило гіпотезу про квадратичний характер залежності похибки від кута повороту.

Отримані результати добре узгоджуються з положеннями аналітичної моделі, що базується на наближенні функціональної залежності косинуса для малих кутів:

$$\cos(\varphi) \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}. \quad (6)$$

Порівняння отриманих результатів із положеннями попередніх досліджень (зокрема Brunner, & Woschitz, 2004; Heunecke, & Neuner, 2011) засвідчило, що хоча загальний вплив геометричних спотворень зображення рейки на точність визначення перевищень був зазначений, вплив саме повороту рейки навколо вертикальної осі як джерела систематичної похибки досі не розглядався окремо. У такому контексті результати цього дослідження заповнюють важливу прогалину в методиці високоточного цифрового нівелювання.

Установлене граничне значення кута повороту рейки (біля 10°) може розглядатися як рекомендаційне при виконанні короткопроменевого нівелювання. При перевищенні цього порогу похибка перевищує 0,8 мм, що є недопустимим для нівелювання I та II класу. Отже, результати дослідження мають практичний характер і можуть бути використані для розроблення нормативних настанов з організації польових вимірювань, а також для вдосконалення алгоритмів оброблення результатів вимірювань програмним забезпеченням цифрових нівелірів щодо фільтрації та автоматичного виявлення спотворених або недостовірних спостережень. Крім того, дослідження засвідчує доцільність використання додаткового оснащення і методів, які дозволяють контролювати або автоматично визначати орієнтацію під час зчитування відліків по штрихкодів рейках, наприклад за допомогою аналізу асиметрії кореляційної функції або інклінометричних модулів.

Таким чином, результати дослідження не лише підтверджують фізичну природу спотворень, пов'язаних із горизонтальним поворотом рейки, але й надають практичні орієнтири для забезпечення точності цифрового нівелювання в реальних умовах.

На основі проведеного теоретичного аналізу й числового моделювання сформульовано такі висновки.

1. Поворот нівелірної рейки навколо її вертикальної осі зумовлює перспективне спотворення зображення штрихів на ПЗЗ-матриці цифрового нівеліра, що зумовлює зміщення максимуму кореляційної функції та генерує систематичну похибку у визначенні перевищень.

2. Похибка має квадратичну залежність від кута повороту й досягає гранично допустимих значень при відносно невеликих кутах повороту штрихкової рейки. Зокрема, при кутах повороту понад 10° розрахункова величина похибки перевищує 0,8 мм. Звідси допустиме значення кута повороту, при якому похибка ще не перевищує межі, установлені для високоточного нівелювання, становить до 10°. Це значення може бути рекомендоване як орієнтир для практичного використання.

3. Результати числового моделювання добре узгоджуються з аналітичною моделлю, заснованою на використанні косинусної залежності для малих кутів, що підтверджує достовірність і надійність запропонованої методики.

4. Отримані результати можуть бути застосовані для:

- розроблення методики й регламентів польових вимірювань;

- удосконалення методів контролю положення нівелірної рейки;

- автоматизації алгоритмів виявлення ненадійних результатів цифрового нівелювання.

Внесок авторів: Олександр Гончаренко – концептуалізація, аналіз джерел, математичне моделювання, оригінальна чернетка; Сергій Боднар – методологія, аналіз джерел, формальний аналіз, валідація даних; Маргарита Дубницька – аналіз джерел, огляд літератури, розробка теоретичних основ дослідження, перегляд і редагування.

Список використаних джерел

- Бурак, К., & Гринішак, М. (2012). Дослідження роботи електронних приладів (віддалеміра LEICA DISTO TM A6, цифрового нівеліра SPRINTER 150M та електронного тахеометра SOKKIA SET 630R) під час різкої зміни температури приладу. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1(23), 72–76.
- Бурак, К., & Гринішак, М. (2014). Дослідження похибки зчитування відліку під час геометричного нівелювання коротким променем цифровими нівелірами. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 80, 30–39.
- Дубовий, С. І. (2015). *Геодезичні вимірювання високої точності*. Вид-во КНУ.
- Тревого, І. Ільків, Є., & Ткаченко, Ю. (2011). Точність цифрового нівелювання з врахуванням додаткових переміщень рейок. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 74, 10–13.
- Тревого, І., Ільків, Є., & Кухтар, Д. (2012). Удосконалення методики нівелювання цифровим нівеліром. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1(23), 96–97.
- Brunner, F. K., & Woschitz, H. (2004). On Digital Levels: Accuracy Potential and Error Sources. *Reports on Geodesy*, 1(70), 71–78.
- Heunecke, O., Neuner, H. (2011). Network-Based Calibration of Digital Levels. *Journal of Applied Geodesy*, 2, 79–89.
- ISO. (2014). ISO 12858-1:2014. *Optics and optical instruments – Ancillary devices for geodetic instruments. Part 1: Invar levelling staffs*. <https://www.iso.org/standard/57606.html>
- Leica Geosystems. (2007). *Leica Sprinter. User Manual*. http://geotop.com.pe/descargas/soporte/manuales/sprinter_manualuser_geotop.pdf
- Niemeier, W. (2000). Digital Levels – A New Chance for Geodetic Precision Levelling. *Proceedings of the FIG Working Week*.
- Trimble DiNi Digital Level User Guide. (2017). *Trimble Navigation Limited*. https://zinyas.geonovus.lt/sites/default/files/2021-09/Trimble%20DiNi%20UserGuide%20ver6_ENG.pdf
- Zhang, C., & Altamimi, Z. (2014). Investigation of Digital Levelling Accuracy Using Trimble DiNi. *Survey Review*, 46(335), 57–65.

References

- Brunner, F. K., & Woschitz, H. (2004). On Digital Levels: Accuracy Potential and Error Sources. *Reports on Geodesy*, 1(70), 71–78.
- Burak, K., & Hrynishak, M. (2012). Study of the operation of electronic devices (LEICA DISTO TM A6 rangefinder, SPRINTER 150M digital level and SOKKIA SET 630R electronic total station) during a sharp change in the temperature of the device. *Modern advances in geodetic science and production*, 1(23), 72–76 [in Ukrainian].
- Burak, K., & Hrynishak, M. (2014). Study of the error of reading the reference during geometric leveling with a short beam by digital levels. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 80, 30–39 [in Ukrainian].
- Dubovy, S. I. (2015). *High-precision geodetic measurements*. KNU [in Ukrainian].
- Heunecke, O., Neuner, H. (2011). Network-Based Calibration of Digital Levels. *Journal of Applied Geodesy*, 2, 79–89.
- ISO. (2014). ISO 12858-1:2014. *Optics and optical instruments – Ancillary devices for geodetic instruments. Part 1: Invar levelling staffs*. <https://www.iso.org/standard/57606.html>
- Leica Geosystems. (2007). *Leica Sprinter. User Manual*. http://geotop.com.pe/descargas/soporte/manuales/sprinter_manualuser_geotop.pdf
- Niemeier, W. (2000). Digital Levels – A New Chance for Geodetic Precision Levelling. *Proceedings of the FIG Working Week*.
- Trevogo, I., Ilkiv, Ye., & Kukhtar, D. (2012). Improvement of the digital leveling method. *Modern advances in geodetic science and production*, 1(23), 96–97 [in Ukrainian].
- Trevogo, I., Ilkiv, Ye., & Tkachenko, Yu. (2011). Accuracy of digital leveling with additional rail displacements. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 74, 10–13 [in Ukrainian].
- Trimble DiNi Digital Level User Guide. (2017). *Trimble Navigation Limited*. https://zinyas.geonovus.lt/sites/default/files/2021-09/Trimble%20DiNi%20UserGuide%20ver6_ENG.pdf
- Zhang, C., & Altamimi, Z. (2014). Investigation of Digital Levelling Accuracy Using Trimble DiNi. *Survey Review*, 46(335), 57–65.

Отримано редакцією журналу / Received: 29.04.25

Прорецензовано / Revised: 05.05.25

Схвалено до друку / Accepted: 08.05.25

Oleksandr HONCHARENKO, PhD (Engin.)
ORCID ID: 0000-0002-0353-2470
e-mail: uy5us@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Serhii BODNAR, Assist.
ORCID ID: 0000-0002-1052-5543
e-mail: bodnarsp@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Marharyta DUBNYTSKA, PhD
ORCID ID: 0000-0002-1907-1496
e-mail: MarharytaDubnytska@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

IMPACT OF PERSPECTIVE DISTORTION OF A BAR-CODE LEVELING STAFF FIELD ON THE ACCURACY OF DIGITAL LEVEL READINGS

Background. This article presents the results of theoretical analysis and numerical modelling of the influence of perspective distortion in the image of a bar-code leveling staff on the accuracy of readings obtained by a digital level. The study examines the displacement of the peak in the correlation function caused by the rotation of the staff around its vertical axis. It is analytically demonstrated that the reading error exhibits a quadratic dependence on the rotation angle of the staff.

Methods. A systems analysis approach was used to comprehensively study the "level-staff" system. Projective geometry methods were applied to determine the dimensional changes in the bar elements due to perspective and their effect on the reading algorithm. Geometric analysis was employed to mathematically describe changes in the geometry of bar-code symbols during staff rotation. Correlation analysis was conducted to assess the relationship between the rotation angle of the staff, the distance to the staff, and the root-mean-square measurement error.

Results. Numerical modelling performed at a sighting distance of 30 metres showed that for rotation angles up to 5° , the resulting error remains within 0.2 mm, which is negligible for most practical measurements. However, at rotation angles exceeding 10° , the systematic error surpasses 0.8 mm, which is critical for high-precision levelling requirements. The study demonstrates that perspective distortion reduces the apparent size of the bar elements proportionally to the cosine of the rotation angle.

Conclusions. The results of numerical modelling are consistent with analytical estimations, confirming the validity of the proposed model. The study concludes that controlling the position of the staff during measurement is essential to minimise systematic errors. The findings can be used to improve digital levelling technologies, develop methods for automatic staff positioning control, and enhance the overall accuracy of geodetic measurements.

Keywords: bar-code leveling staff, perspective distortion, correlation function, reading error, high-precision levelling.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.