



До врахування впливу земної атмосфери на точність вимірювань відстаней електронними тахеометрами на горизонтальних трасах

О.В. Прокопов, А.І. Шлома, А.Є. Олійник

ННЦ "Інститут метрології", вул. Мироносицька, 42, 61002, Харків, Україна
alexander.prokopov@metrology.kharkov.ua

Анотація

Для вимірювання відстаней за допомогою електромагнітних хвиль оптичного діапазону на приземних трасах сьогодні широко використовуються різноманітні типи лазерних віддалемірів та електронних тахеометрів. Одним із ключових чинників, що обмежують точність таких вимірювань, є відмінність швидкості поширення оптичного сигналу в просторово неоднорідній земній атмосфері від швидкості світла у вакуумі. Методи врахування цього впливу, що активно розвиваються, передбачають корекцію результатів вимірювань відстаней шляхом введення поправки на усереднений уздовж вимірюваної траси показник заломлення повітря. Водночас у геодезичній практиці під час вимірювання відстаней електронними тахеометрами широко використовується емпіричний підхід до визначення зазначеної поправки: за інформацією про метеопараметри атмосфери лише в точці стояння приладу.

У цій статті на основі використання спрощених аналітичних моделей атмосферної неоднорідності обговорюються умови застосування вищевказаного емпіричного підходу.

Ключові слова: віддалемірні вимірювання; точність; електронний тахеометр; врахування впливу атмосфери; метеопараметри.

Отримано: 20.08.2025

Відредаговано: 05.09.2025

Схвалено до друку: 10.09.2025

Вступ

Для забезпечення метрологічної простежуваності лінійних вимірювань від еталона довжини 1 м до віддалемірних вимірювань у геодезії, геодинаміці, навігації, космічних дослідженнях та ін. необхідне коректне врахування впливу неоднорідної земної атмосфери на результати вимірювань, здійснюваних за допомогою електромагнітних хвиль на відповідних трасах. Щоб зробити таке врахування, необхідно знати середньоінтегральний (усереднений уздовж вимірюваної траси) показник заломлення повітря, який залежить від метеопараметрів неоднорідної атмосфери (тиску P , температури T і вологості e повітря) й визначає основну частину додаткової затримки сигналу, пов'язану з відмінністю швидкості його поширення в атмосфері від швидкості світла у вакуумі.

Останніми роками вимоги до точності методів визначення середньоінтегрального показника заломлення повітря суттєво зросли, що привело до активного розвитку таких методів [1–3]. Водночас у геодезичній практиці під час вимірювання відстаней віддалемірною частиною електронних тахеометрів широко використовується емпіричний підхід до врахування впливу атмосфери – за інформацією про значення метеопараметрів атмосфери лише в точці стояння приладу (див., наприклад, [4–6]).

Аналіз точності (умов застосовності) вищезазначеного підходу може бути виконано з використанням методології, розробленої в [7] на основі спрощених аналітичних моделей атмосферної неоднорідності. Такий аналіз зроблено у цій статті для віддалемірної частини електронних тахеометрів, метрологічні та технічні вимоги до якої наведено в [8].

Результати досліджень

У загальному випадку вхідні співвідношення для аналізу точності визначення довжини прямої лінії L , що з'єднує кінцеві точки вимірюваної траси, можуть бути подані у вигляді [7]

$$L = \mathcal{L} - \delta\mathcal{L},$$

$$\text{де } \mathcal{L} = \frac{c \cdot \tau}{n}, \quad \delta\mathcal{L} = \int_{\sigma} d\sigma - L, \quad \bar{n} = \mathcal{L}^{-1} \cdot \int_{\sigma} n(\sigma) d\sigma. \quad (1)$$

Тут c — швидкість світла у вакуумі; τ — час проходження сигналу між кінцевими точками вимірюваної траси (безпосередньо вимірювана величина); $\mathcal{L}$ — довжина викривленої за рахунок рефракції в неоднорідній атмосфері траєкторії електромагнітного випромінювання; $\delta\mathcal{L}$ — рефракційне подовження траєкторії; $\bar{n}$ — середньоінтегральне вздовж траєкторії значення показника заломлення повітря $n(\sigma)$. Траєкторія, уздовж якої беруться інтеграли для $\delta\mathcal{L}$ та $\bar{n}$ у співвідношеннях (1), задовольняє променеве рівняння геометричної оптики [1–3] (σ — променева координата, що відраховується вздовж траєкторії).

У цій статті розглядаються траси, для яких величина $\delta\mathcal{L}$ у разі вимірювань довжини тахеометром виявляється дуже малою і далі не враховується. Тобто мається на увазі, що $L = \mathcal{L}$ й інтеграли у формулах (1) беруться вздовж прямої лінії, що з'єднує кінцеві точки вимірюваного базису. У цьому випадку для врахування впливу атмосфери необхідно визначити лише середньоінтегральне вздовж L значення показника заломлення

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L n(x) dx, \quad (2)$$

де x — координата, яка відраховується вздовж L (прямої лінії).

Залежність показника заломлення n від x зумовлена просторовою неоднорідністю метеорологічних параметрів атмосфери $T(x)$, $P(x)$, $e(x)$. Відомі різні варіанти функціонального зв'язку $n = f(T, P, e)$, що враховують цю залежність. У статті використовується наведена в [7] для видимого діапазону оптичного випромінювання спрощена формула, що забезпечує необхідну для оцінок точність

$$n = 1 + 83,11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P}{T} - 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{e}{T}, \quad (3)$$

де температура повітря T — у градусах кельвіна К, а тиск P і вологість e повітря — у гектопаскалях гПа.

Для спрощення обчислень відповідно до [7] вважаємо, що вздовж горизонтальної траси довжиною L тиск і вологість повітря не змінюються, а від координати x уздовж траси залежить лише температура $T(x)$. Необхідно зазначити, що з формули для показника заломлення (3) випливає, що при строгому підході в розглянутому випадку середньоінтегральний показник заломлення $\bar{n}_{acc}$ має визначатися за формулою (2) через середньоінтегральне значення величини, зворотної до температури

$$\left\langle \frac{1}{T(x)} \right\rangle = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \frac{dx}{T(x)}, \quad (4)$$

а не через значення температури T_0 у точці розташування приладу, як це передбачається при отриманні емпіричного значення $\bar{n}_{emp}$ емпіричним підходом, що розглядається.

Таким чином, відповідно до [7] при використанні емпіричного підходу виникає методична складова похибки визначення величини $\bar{n}$. Ця складова залежить від різниці $\bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp}$, яка на відміну від наведеного в [7] співвідношення набуває вигляду

$$\begin{aligned} \bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp} &= \\ &= (83,11 \cdot 10^{-6} \cdot P - 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot e) \left[\left\langle \frac{1}{T(x)} \right\rangle - \frac{1}{T_0} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Найбільш простий варіант оцінки величини $\bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp}$ може бути виконаний для лінійної зміни температури повітря вздовж траси

$$T(x) = T_0 + g_T \cdot x, \quad (6)$$

де g_T — горизонтальний (уздовж траси) градієнт температури повітря. Використовуючи (6), за допомогою формул (4), (5) з урахуванням рівності $T_L = T_0 + g_T \cdot L$ отримуємо

$$\begin{aligned} \bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp} &= (83,11 \cdot 10^{-6} \cdot P - 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot e) \times \\ &\times \frac{1}{T_0} \left[\frac{T_0}{g_T \cdot L} \ln(1 + \frac{g_T \cdot L}{T_0}) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

За допомогою співвідношення (7) оцінюються систематична складова похибки вимірювань довжини траси L , обумовлена похибкою визначення величини $\bar{n}$

$$\frac{L}{\sqrt{3}} |\bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp}|, \quad (8)$$

яку необхідно порівнювати з відповідною складовою нормованої середньої квадратичної похибки (СКП) вимірювань довжини L тахеометром (приклад СКП див. у [8]). Для тахеометра Trimble 3305 DR, нормовану СКП вимірювань довжини якого наведено в [9, 10], така складова (що пропорційна довжині L й відображає вплив атмосфери на точність вимірювань) у загальному випадку повинна мати вигляд $k \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot L$, де L у мм, коефіцієнт k визначає долю атмосферного впливу в цій складовій. Складові, які враховують інші ефекти, обговорюються в [11]. Результатом такого порівняння має бути встановлення граничних значень довжини L_{lim} залежно від T_0 та g_T , для яких можливе застосування емпіричного підходу, що базується на інформації про метеопараметри лише в точці розміщення тахеометра. Загальною умовою для такого порівняння є необхідність виконання співвідношення

$$\frac{1}{\sqrt{3}} |\bar{n}_{acc} - \bar{n}_{emp}| < k \cdot 2 \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

Таблиця 1

Граничні значення довжини L_{lim} залежно від T_0 та g_T (для $k=1$, $P=1013,25$ гПа, $e=13,33$ гПа)

g_T , °C/km	1				2				3			
T_0 , °C	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
L_{lim} , km	6,38	6,61	6,84	7,08	3,19	3,31	3,42	3,54	1,59	1,65	1,71	1,77

Згідно з (9) виконані розрахунки для $k=1$, $P=1013,25$ гПа, $e=13,33$ гПа для значень T_0 та g_T , вказаних у табл. 1 (температура в таблиці надано в градусах Цельсія). В цій таблиці надані також отримані результати розрахунку граничних значень довжини L_{lim} . Якщо довжини L , що вимірюються в експерименті, не перевищують отриманих значень L_{lim} , то емпіричний підхід із використанням метеоданих лише в точці розміщення приладу є можливим. Якщо ж перевищують, то ні (розробка науково обґрунтованих практичних рекомендацій для цього випадку є предметом подальших досліджень).

Для $k < 1$ наведені в таблиці значення L_{lim} відповідно зменшуються. Розрахунки для конкретних значень коефіцієнта k мають виконуватися згідно з наданою вище схемою з урахуванням можливої залежності його величини від довжини траси L .

Таким чином, у випадку вимірювань горизонтальних трас віддалемірною частиною електронних тахеометрів співвідношення (9) дає змогу оцінити (у межах лінійної моделі) умови, за яких можливе застосування емпіричного підходу до визначення середньоінтегрального показника заломлення повітря (за інформацією про метеопараметри лише в точці розміщення приладу).

Для отримання даних, що відповідають іншим співвідношенням $n(x)$, усі обчислення згідно

з обговорюваною методологією можна виконати з більш складними (зокрема, немонотонними) аналітичними або реальними профілями.

Висновки

Сформульовано методологію аналізу точності відомого емпіричного підходу, що використовується при визначенні поправки до результатів вимірювань довжини віддалемірною частиною електронних тахеометрів, яка враховує усереднений уздовж вимірюваної горизонтальної траси показник заломлення повітря, знайдений за метеоданими лише в точці розміщення тахеометра. На основі спрощених аналітичних моделей атмосферної неоднорідності обґрунтовані співвідношення, що встановлюють граничні значення довжини залежно від температури повітря та її градієнта уздовж траси, за яких можливе застосування цього емпіричного підходу. Наведено результати конкретних розрахунків для тахеометра Trimble 3305 DR, які дають змогу до проведення вимірювань оцінити можливість використання розглянутого емпіричного підходу (за наявності інформації щодо температури в точці розміщення тахеометра та її градієнта уздовж вимірюваної траси). Обговорювану методологію може бути застосовано для розрахунків із більш складними (зокрема, немонотонними) модельними або реальними профілями.

Accounting for the influence of the Earth's atmosphere on the accuracy of distance measurements by electronic total stations along horizontal traces

O. Prokopov, A. Shloma, A. Oliinyk

NSC "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
alexander.prokopov@metrology.kharkov.ua

Abstract

Various types of laser rangefinders and electronic total stations are currently widely used to measure distances with electromagnetic waves of the optical range along surface traces. One of the key factors limiting the accuracy of such measurements is the difference between the propagation speed of an optical signal in the spatially heterogeneous Earth's atmosphere and the speed of light in vacuum. Methods for accounting for this influence, being actively developed at present, involve correcting the results of distance measurements by introducing a correction to the refractive index of air averaged along the measured trace. At the same time, in geodetic practice, when measuring distances with electronic total stations, the empirical approach is widely applied: when the correction is determined only from meteorological parameters at the point of the device.

This paper discusses the conditions for applying the empirical approach using simplified analytical models of atmospheric heterogeneity. The analysis concludes that the systematic error caused by relying solely on local atmospheric data is directly related to the air temperature gradient and the length of the measured trace. Based on the derived relations, limiting distances are determined, within which the simplified method provides accuracy comparable to the specifications of the instrument. Numerical examples for the Trimble 3305DR total station confirm that it is possible to preliminarily assess the feasibility of the empirical approach before field measurements.

The proposed methodology provides scientifically grounded criteria for selecting an appropriate correction method depending on observation conditions. Not only can it be used to improve geodetic practice, but also to extend the potential of electronic total stations in high-precision distance measurements.

Keywords: range measurements; accuracy; electronic total station; considering atmospheric effects; meteorological parameters.

Список літератури

1. Pollinger F., Bauch A., Meiners-Hagen K., Astrua M., Neyezhnikov P., Kupko V. et al. Metrology for long distance surveying: A joint attempt to improve traceability of long distance measurements. Rizos C., Willis P. (Eds). *IAG 150 Years. Proceedings of the 2013 IAG Scientific Assembly*, 2016, pp. 651–656.
2. Neyezhnikov P., Kupko V., Panasenko T., Prokopov A., Skliarov V., Shloma A. Analysis of accuracy requirements to the meteorological sensors used to compensate for the influence of the Earth's atmosphere in high precision length measurement. *Proceedings of Sensor and Measurement Science International Conference (SMSI 2020)*, Nuremberg, Germany, 2020, pp. 279–280. doi: <https://doi.org/10.5162/SMSI2020/D3.3>
3. Неєжмаков П., Панасенко Т., Прокопов О., Шлома А., Тревого І. Порівняльний аналіз квадратурних формул для середньointегрального показника заломлення повітря у високоточній віддалеметрії. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2020. Вип. І (39). С. 69–73. doi: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-39-13>
4. Геодезичні прилади. Робота з електронним тахеометром 3Та5Р: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Укл.: Н.Ю. Лазоренко-Гевель, Б.І. Денисюк. Київ: КНУБА, 2014. URL: <https://studfile.net/preview/5025239/>
5. Кутіві та лінійні виміри в полігонометрії: методичні вказівки. Укл.: О.В. Адаменко та ін. Київ: КНУБА, 2024. 36 с. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/472-%D0%B5-2024-69_V_24.pdf
6. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затверджена наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 9 квітня 1998 р. № 56.
7. Neyezhnikov P., Prokopov O. Using the average air temperature along the trace for atmospheric correction in laser ranging: accuracy analysis.

Ukrainian Metrological Journal, 2022, no. 4, pp. 30–33. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2022.276320>

8. ДСТУ 8955:2019. Метрологія. Теодоліти й тахеометри. Метрологічні та технічні вимоги. Київ, 2020.
9. Trimble 3300DR User Guide. URL: <https://www.vermessen.de/wp-content/uploads/downloads/handbuch/Trimble/trimblezeiss330xengl.pdf>
10. Крячок С. Визначення величини й точності сталої віддалеміра електронного тахеометра за результатами прив'язки до подвійного стінного геодезичного знаку. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2(20). С. 278–285. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-278-285](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-278-285)
11. Braun J et al. Suppression of Systematic Errors of Electronic Distance Meters for Measurement of Short Distances. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 19264–19301. doi: <https://doi.org/10.3390/s150819264>

References

1. Pollinger F., Bauch A., Meiners-Hagen K., Astrua M., Neyezhnikov P., Kupko V. et al. Metrology for long distance surveying: A joint attempt to improve traceability of long distance measurements. Rizos C., Willis P. (Eds). *IAG 150 Years. Proceedings of the 2013 IAG Scientific Assembly*, 2016, pp. 651–656.
2. Neyezhnikov P., Kupko V., Panasenko T., Prokopov A., Skliarov V., Shloma A. Analysis of accuracy requirements to the meteorological sensors used to compensate for the influence of the Earth's atmosphere in high precision length measurement. *Proceedings of Sensor and Measurement Science International Conference (SMSI 2020)*, Nuremberg, Germany, 2020, pp. 279–280. doi: <https://doi.org/10.5162/SMSI2020/D3.3>
3. Neyezhnikov P., Panasenko T., Prokopov O., Shloma A., Trevoho I. Porivnialnyi analiz kvadraturnykh formul dlia serednointehrlnoho pokaznyka zalomlennia povitria u vysokotochnii viddalemetrii [Comparative analysis of quadrature formulas for the mean integral refractive index of

- air in high-precision ranging]. *Modern achievements of geodesic science and industry*, 2020, vol. I (39), pp. 69–73 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-39-13>
4. Heodezychni prylady. Robota z elektronnym takheometrom 3Ta5P: Metodychni vkazivky do vykonання laboratornykh robit [Geodetic instruments. Work with electronic total station 3Ta5P: Methodical instructions for performing laboratory work]. Compiled by N. Lazorenko-Hevel, B. Denysiuk. Kyiv, 2014 (in Ukrainian). Available at: <https://studfile.net/preview/5025239/>
 5. Kutovi ta liniini vymiry v polihonometrii: metodychni vkazivky [Angular and linear measurements in polygonometry: methodical instructions]. Compiled by O. Adamenko et al. Kyiv, 2024. 36 p. (in Ukrainian). Available at: https://library.knuba.edu.ua/books/472-%D0%B5-2024-69_V_24.pdf
 6. Instruction on topographic surveying at scales of 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500. Approved by the Order of the Main Directorate of Geodesy, Cartography and Cadastre under the Cabinet of Ministers of Ukraine of April 9, 1998, No. 56 (in Ukrainian).
 7. Nyezhamkov P., Prokopov O. Using the average air temperature along the trace for atmospheric correction in laser ranging: accuracy analysis. *Ukrainian Metrological Journal*, 2022, no. 4, pp. 30–33. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2022.276320>
 8. DSTU 8955:2019. Metrology. Theodolites and tacheometers. Metrological and technical requirements. Kyiv, 2020 (in Ukrainian).
 9. Trimble 3300DR User Guide. Available at: <https://www.vermessen.de/wp-content/uploads/downloads/handbuch/Trimble/trimblezeiss330xengl.pdf>
 10. Kriachok S. Vyznachennia velychyny y tochnosti staloi viddalemira elektronnoho takheometra za rezultatamy pryv'iazky do podviinoho stinnoho heodezychnoho znaku [Determination of the magnitude and accuracy of the range finder constant correction of an electronic total station from the results of binding to a double geodetic wall sign]. *Technical sciences and technologies*, 2020, no. 2(20), pp. 278–285 (in Ukrainian). doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-278-285](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-278-285)
 11. Braun J et al. Suppression of Systematic Errors of Electronic Distance Meters for Measurement of Short Distances. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 19264–19301. doi: <https://doi.org/10.3390/s150819264>