



2. *Евстафьев, О.В.* Современные технологии геодезического деформационного мониторинга – опыт применения / О.В. Евстафьев. – М.: Фирма "Г.Ф.К.", 2010. – 32 с.

3. *Могильный, С.Г.* Трикоординатный вимірювальний комплекс "Визир-3D" / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, Є.І. Шморгун: наук. пр. ДонНТУ: Сер. гірничо-геологічна. – Вип. 9. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 13-25.

4. *Могильный, С.Г.* Измерительный комплекс "Визир-3D" на предприятиях Украины: геодезический контроль и выверка технологического оборудования / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, В.Н. Ревуцкий, В.А. Пригаров // Геопрофиль. – 2009. – № 3. – С. 12-19.

5. *Могильный, С.Г.* Автоматизированная система геодезического мониторинга / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, Е.И. Шморгун // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва. – 2010. – Вип. I. – С. 193-197.

6. *Craenenbroeck, J.v.* Engineering Structures First International FIG Workshop. – Hong Kong / J.v. Craenenbroeck // International Federation of Surveyors (FIG). – Belgium. – 2012. – P. 1-18.

7. *Craenenbroeck, J.v.* Driving Burj Dubai core walls with an advanced data-fusion system / J.v. Craenenbroeck, D. Mc L. Hayes, I. R. Sparks // 12th FIG Symposium. 22-

24 May, 2006. – Baden. – P. 1-12.

8. *Craenenbroeck, J.v.* State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant / J.v. Craenenbroeck, A. Balan // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва. – 2012. – Вип. I. – С. 162-168.

9. *Lambrou, E.* Special marking of 3D networks points for the monitoring of modern constructions / E. Lambrou, G. Pantazis, K. Nikolitsas // 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis; 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. 12-15 May, 2008. – Lisbon, Portugal. – P. 1-10.

10. *Rizos, C.* Advances in GNSS-RTK for Structural Monitoring in Regions of High Ionospheric Activity. Deformation Measurement of Structures Using GNSS // C. Rizos, J.v. Craenenbroeck, V. Liu // FIG Congress 2010. Facing the Challenges – Building the Capacity. 11-16 April, 2010. – Sydney, Australia. – P. 1-13.

Інтернет-джерело

11. ПАТ "Укргідроенерго" // Співпраця із Світовим банком. – Реж. доступу: www.uge.gov.ua. – 20.01.2013.

Надійшла 29.01.13

* * *

УДК 528.3:551.5

В. О. Літинський, С. С. Перій, В. О. Сухоруков

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОСТОРОННЬОГО ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ

Описывается новый способ двухстороннего тригонометрического нивелирования, который позволяет не измерять высоту приборов и отражателей. Проведена апробация способа и его анализ. Доказано, что двухсторонним тригонометрическим нивелированием можно заменить геометрическое нивелирование III класса.

It is described a new method of double sided trigonometric leveling, that allows not to measure the height of appliances and reflectors. The testing of the method and its analysis are carried out. It is proved that double sided trigonometric leveling can substitute geometrical leveling of the third class.

Постановка проблеми. Метод тригонометричного нівелювання економічно ефективніший, ніж метод геометричного нівелювання. Однак тригонометричне нівелювання менш точне. Тому висотні мережі згущення для великомасштабного знімання та інженерних робіт створюють в основному методом трудомісткого геометричного нівелювання.

Електронні тахеометри дали змогу суттєво спростити деякі процеси геодезичних вимірювань, підвищити їх точність. Супутникові технології не завжди можуть забезпечити необхідну точність, час і місце виконання робіт. Проблема ще й у тому, як, використовуючи один і той же прилад (електронний тахеометр), створювати висотну і планову основи, виконувати електронне топографічне знімання. Крім цього, на точність визначення переви-

шень у тригонометричному нівелюванні значний вплив має вертикальна рефракція.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори праць [1, 2], проаналізувавши вплив вертикальної рефракції на результати тригонометричного нівелювання, дали детальні рекомендації щодо зменшення цього впливу завдяки вдалому вибору найвигіднішого часу для вимірювань вертикальних кутів, виконання неодноразових і одночасних двосторонніх вимірювань, застосування локальних значень коефіцієнтів вертикальної рефракції, виконання вимірювань у моменти встановлення нейтрального стану стратифікації атмосфери, застосуванню статистичних моделей параметрів приземного шару повітря, використанню високих штативів, зменшення довжин трас тощо.

Інструкція [4] не пропонує методики для врахування вертикальної рефракції у тригонометричному нівелюванні, яке використовують для створення

© В. О. Літинський, С. С. Перій,
В. О. Сухоруков, 2013



висотної основи знімання.

Найкращих результатів визначення перевищень тригонометричним нівелюванням можна досягнути методом двосторонніх вимірювань [5-7]. При цьому частково компенсується вплив вертикальної рефракції.

Нерозв'язані частини загальної проблеми. За допомогою електронних тахеометрів визначають перевищення за вимірними значеннями похилої віддалі D , вертикального кута Z , висоти інструменту i та висоти візирної цілі v . Прилад також враховуватиме, якщо будуть увімкнені функції автоматичного введення, поправки за кривину Землі та вертикальну рефракцію (їх беруть з інструкції до відповідного тахеометра). Обчислення перевищення $h^{\text{тах}}$ тахеометр виконує за формулою

$$h^{\text{тах}} = D \cos Z + (1-k) \frac{D^2 \sin^2 Z}{2R_3} + i - v, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт вертикальної рефракції; R_3 – середній радіус кривини Землі.

Визначити і ввести наперед у тахеометр дійсне значення коефіцієнта вертикальної рефракції на весь період вимірювань неможливо, тому його приймають за 0 або вводять коефіцієнт нормальної рефракції, обчислений за адиабатичним градієнтом температури $k_H^{\text{адіаб}} \approx 0,13$, або коефіцієнт для стандартної атмосфери $k_H^{\text{станд}} \approx 0,20$. У деяких тахеометрах є функція введення значення коефіцієнта, розрахованого або змодельованого на весь період спостережень. Обчислене тахеометром значення перевищення із внесеними у пам'ять даними про коефіцієнт вертикальної рефракції необхідно виправити за рахунок вилучення аномального значення коефіцієнта вертикальної рефракції:

$$h = h^{\text{тах}} - k^{\text{аном}} \frac{D^2 \sin^2 Z}{2R_3}. \quad (2)$$

Аномальний або загальний коефіцієнти вертикальної рефракції уздовж траси проходження візирного променя можуть бути визначені за метеорологічними спостереженнями, але це затратний процес (вимірювання необхідно проводити у багатьох точках, що не завжди можливо), до того ж, такі визначення характеризуються малою точністю через турбулентність атмосфери та інерційність пристроїв вимірювання температури й тиску.

Застосування двостороннього тригонометричного нівелювання дозволяє дещо компенсувати вплив вертикальної рефракції визначенням перевищень у прямому і зворотному напрямках спостережуваної лінії AB :

$$\begin{aligned} h_{AB} &= h_{AB}^{\text{тах}} - k_{AB}^{\text{аном}} \frac{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}{2R_3}; \\ h_{BA} &= h_{BA}^{\text{тах}} - k_{BA}^{\text{аном}} \frac{D_{BA}^2 \sin^2 Z_{BA}}{2R_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

За умов одночасних спостережень на приблизно симетричному профілі з однаковою підстильною поверхнею $k_{AB}^{\text{аном}} \approx k_{BA}^{\text{аном}}$. Виконавши вимірювання з однакових висот приладу та відбивачів: $D_{AB} = D_{BA}$ і $Z_{AB} = 180^\circ - Z_{BA}$, запишемо з формул (3) значення середнього перевищення, прийнявши до уваги, що $h_{AB} = -h_{BA}$:

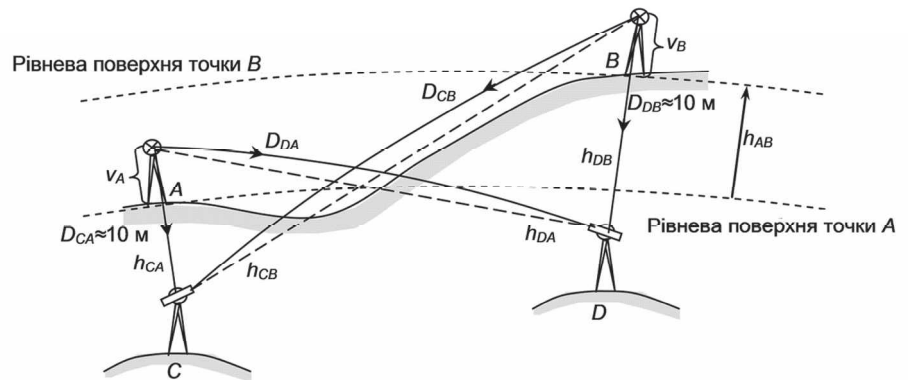
$$\bar{h}_{AB} = \frac{h_{AB}^{\text{тах}} - h_{BA}^{\text{тах}}}{2}. \quad (4)$$

Проаналізувавши рівняння (1), бачимо, що для двосторонніх спостережень суттєвим залишається точність визначення висот встановлення приладів та візирних цілей (відбивачів). Такі точні вимірювання складні, вимагають від виконавця скрупульозності й максимальної точності, оскільки похибки вимірювань повністю входять у визначуване перевищення.

Постановка завдання і мета дослідження: удосконалити спосіб двостороннього тригонометричного нівелювання для підвищення точності визначення перевищень та зменшення часу на виконання вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Пропонується виконувати подвійне вимірювання перевищення способом нівелювання між точками (мал. 1). Встановимо тахеометр на станції C на віддалі 5-10 м від пункту A . Похибка у перевищенні за вплив вертикальної рефракції на віддалі CA несуттєва і нею можна знехтувати:

$$k_{CA}^{\text{аном}} \frac{D_{CA}^2 \sin^2 Z_{CA}}{2R_3} = k_{DB}^{\text{аном}} \frac{D_{DB}^2 \sin^2 Z_{DB}}{2R_3} = 0. \quad (5)$$



Мал. 1. Схема двостороннього тригонометричного нівелювання методом нівелювання між точками

Виконавши спостереження на пункти A і B , де встановлено відбивачі на однакових висотах $v_A = v_B$, на підставі виразу (2) запишемо значення перевищення між точками A і B з урахуванням рівняння (5):

$$h_{AB} = h_{CB}^{\text{тах}} - h_{CA}^{\text{тах}} - k_{CB}^{\text{аном}} \frac{D_{CB}^2 \sin^2 Z_{CB}}{2R_3}. \quad (6)$$

Здійснивши аналогічні спостереження на станції D , розташованій поблизу пункту B , на ті самі напрями A і B та для тих же висот візирних



цілей, знайдемо перевищення між ними. За аналогією з виразом (6) запишемо:

$$h_{AB} = h_{DB}^{\text{таx}} - h_{DA}^{\text{таx}} + k_{DA}^{\text{аном}} \frac{D_{DA}^2 \sin^2 Z_{DA}}{2R_3}. \quad (7)$$

Середнє значення перевищення отримаємо з рівнянь (6) і (7):

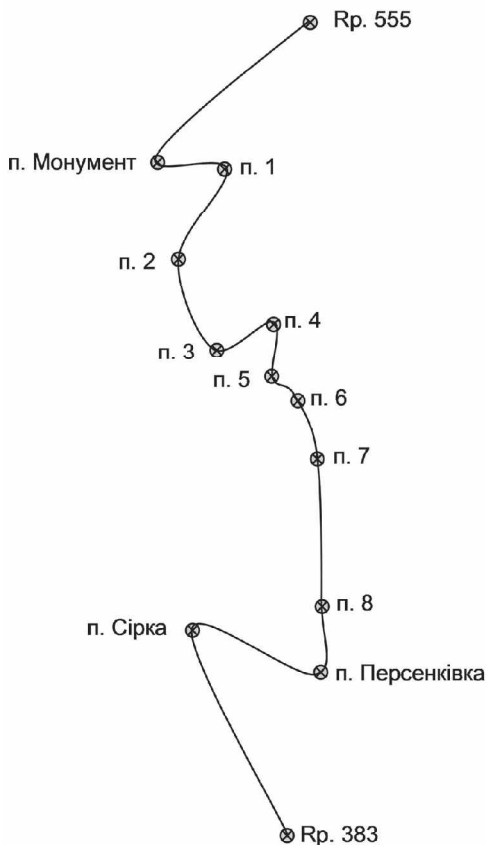
$$\bar{h}_{AB} = \frac{h_{CB}^{\text{таx}} - h_{CA}^{\text{таx}} + h_{DB}^{\text{таx}} - h_{DA}^{\text{таx}}}{2} - \left(k_{CB}^{\text{аном}} \frac{D_{CB}^2 \sin^2 Z_{CB}}{4R_3} - k_{DA}^{\text{аном}} \frac{D_{DA}^2 \sin^2 Z_{DA}}{4R_3} \right) \quad (8)$$

З другого члена формули (8), за деяких припущень ($D_{CB} \cong D_{DA}$ та $\sin^2 Z_{CB} \cong \sin^2 Z_{DA}$), можна отримати лінійне значення поправки за вертикальну рефракцію $\Delta r_{AB}^{\text{двост}}$ у двостороннє тригонометричне нівелювання на коротких трасах:

$$\Delta r_{AB}^{\text{двост}} = \frac{k_{CB}^{\text{аном}} - k_{DA}^{\text{аном}}}{2} \frac{D_{CB}^2 \sin^2 Z_{CB(DA)}}{2R_3}. \quad (9)$$

Для підвищення точності виконання тригонометричного нівелювання таким способом пропонується встановлювати тички (відбивачі) на однаковій висоті, не вимірюючи їх.

Спосіб пройшов апробування на спеціальному полігоні (мал. 2). Дослідження виконували на полігонометричному ході, висоти пунктів якого визначені за програмою геометричного нівелювання III класу цифровим нівеліром DiNi 22.



Мал. 2. Схема розташування пунктів полігонометрії та геометричного нівелювання

Експериментальне тригонометричне нівелювання здійснювали електронним тахеометром Sokkia SET 610, технічні характеристики якого: $m_D = 2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm} \cdot D$ і $m_\beta = m_Z = 6''$. До початку вимірювань виконали всі необхідні перевірки приладу, особливо детально – місце нуля та приладову поправку світловідалеміра.

Вимірювали двома приладами одночасно за три прийоми. Безпосередньо біля місця встановлення тахеометра перед виконанням спостережень визначили температуру і тиск атмосфери з подальшим уведенням одержаних значень у пам'ять приладу для врахування поправок за зовнішні умови.

Загальна довжина тригонометричного ходу, який прокладено від репера I класу № 555 до репера II класу № 383 – 3,97 км.

Наближено оцінити точність виконаних вимірювань можна, припустивши, що похибки вимірювання ліній такими тахеометрами несуттєво (порівняно з похибками вимірювання вертикальних кутів) впливають на точність визначення перевищень. Згідно з теорією запропонованого способу похибки у перевищення через похибки у вимірюванні висот приладів вилучаються повністю, а похибки у перевищенні через похибки у вимірюванні висот візирних цілей дорівнюють різницям висот установлення відбивачів на однаковій висоті. Проаналізувавши вирази (8) і (9) та замінивши $k_{CB}^{\text{аном}} - k_{DA}^{\text{аном}} = \Delta k$, запишемо:

$$m_h^{\text{двост}} = \sqrt{\frac{-2}{2\rho^2} \overline{D_{CB}} m_Z^2 + \frac{\overline{D_{CB}}^4}{16R_3^2} m_{\Delta k}^2}, \quad (10)$$

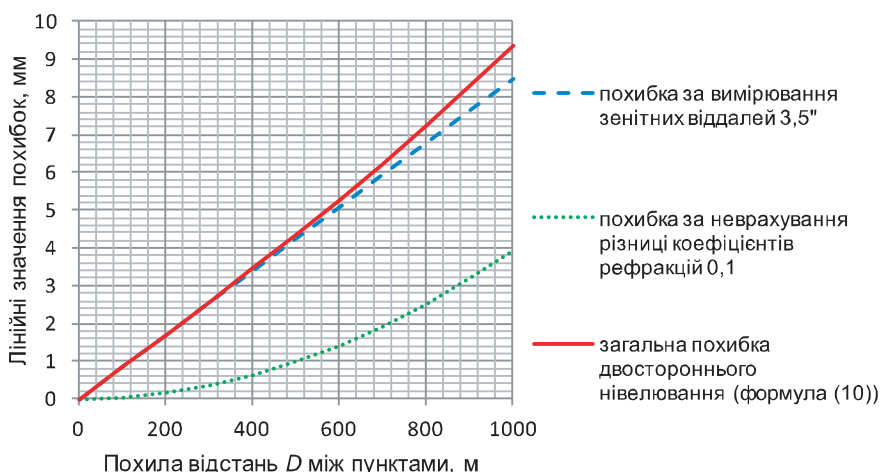
де $m_h^{\text{двост}}$ – середня квадратична похибка визначення перевищення із двосторонніх вимірювань методом нівелювання між точками; $\overline{D_{CB}} = \frac{D_{CB} + D_{DA}}{2}$ – середня довжина довгих ліній спостережень (див. мал. 1); m_Z – точність вимірювання вертикальних кутів трьома прийомами: $m_Z = \frac{6''}{\sqrt{3}} = 3,5''$; $m_{\Delta k}$ – похибка у перевищенні через різницю коефіцієнтів вертикальної рефракції.

Різниця коефіцієнтів вертикальної рефракції в ході одночасних спостережень за нормальної стратифікації атмосфери між взаємно протилежними напрямками не перевищуватиме 0,1, а лінійне значення вертикальної рефракції на трасах до 600 м – 1 мм [2]. Різниця коефіцієнтів вертикальної рефракції Δk повністю увійде до похибки визначення середнього значення перевищення.

Розрахунок середньоквадратичних похибок визначення перевищення запропонованим методом подано на мал. 3.

З малюнка видно, що середня квадратична похибка визначення перевищення тригонометричним способом на віддалі до 1 км електронним тахеометром з точністю вимірювання вертикальних кутів одним прийомом відповідає точності геометричного нівелювання III класу – $f_h = 10 \sqrt{L} (\text{км}) \text{ мм}$.

Результати нівелювань зведено у таблицю.



Мал. 3. Залежність точності визначення перевищень від точності вимірювання вертикальних кутів і визначення різниць коефіцієнтів вертикальних рефракцій

Результати тригонометричного та геометричного нівелювань

Лінія ходу	Довжина ліній нівелювання		Виміряні перевищення		Різниці перевищень, мм	$f_n = 10 \sqrt{L}$ мм
	тригон., м	геом., м	тригон., м	геом., м		
Рр. 555 – п. Монумент	807,2	823,7	41,1925	-41,1899	2,6	8,9
п. Монумент – п. 1	148,6	156,2	-3,7450	3,7459	0,9	3,9
п. 1 – п. 2	262,7	262,3	2,1451	-2,1462	-1,1	5,1
п. 2 – п. 3	315,9	316,7	1,8059	-1,8072	-1,3	5,6
п. 3 – п. 4	201,9	201,0	-2,0362	2,0354	-0,8	4,5
п. 4 – п. 5	187,5	187,9	1,7038	-1,7047	-0,9	4,3
п. 5 – п. 6	123,1	122,9	-1,2700	1,2706	0,6	3,5
п. 6 – п. 7	181,1	188,5	1,0717	-1,0706	1,1	4,3
п. 7 – п. 8	435,3	435,9	2,9498	-2,9513	-1,5	6,6
п. 8 – п. Персенківка	242,6	242,3	1,0426	-1,0436	-1,0	4,9
п. Персенківка – п. Сірка	406,4	469,2	3,9431	-3,9444	-1,3	6,6
п. Сірка – Рр. 383	623,4	681,7	-3,3666	3,3688	2,2	8,1
		$\sum h_{пр}$	45,4367	-45,4372		
		$\sum h_{теор}$	45,4480	45,4480		
		f_n	-11,3 мм	10,8 мм		
		доп $f_n = 10 \sqrt{L}$ км мм	19,8 мм	20,2 мм		

Висновки. У запропонованому способі тригонометричного нівелювання похибка у перевищенні через похибки вимірювання висот приладів усувається повністю. Похибка у перевищенні через похибки у вимірюванні висот візирних цілей дорівнює різниці висот установлення відбивачів на

однаковій висоті. Крім того, спосіб дозволяє значно зменшити похибку за вертикальну рефракцію.

Запропонованим способом тригонометричного нівелювання можна замінити геометричне нівелювання III класу.

Література

1. Баран, П.І. Тригонометричне нівелювання в інженерно-геодезичних роботах / П.І. Баран, Ф.Ф. Соловйов, В.Я. Чорноконь; за ред. д. т. н., проф. П.І. Барана. – К.: Укргеодезкартографія, 1997. – 130 с.; іл.

2. Изотов, А.А. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования / А.А. Изотов, Л.П. Целлинен // Тр. ЦНИИГАиК. – 1955. – № 102. – 175 с.

3. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов / ГУГК при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1990. – 167 с.

4. Инструкция з топографічного знімання у масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. – К.: 1999. – 156 с.

5. Літинський, В. До питання нівелювання пунктів полігонометрії 4 класу, 1 та 2 розрядів / В. Літинський, С. Перій, І. Гарасимчук // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва в Україні: зб. наук. пр. ЗГТ УТГК. – Л.: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 1997. – С. 65-67.

6. Літинський, В. Тригонометричне нівелювання в ходах геодезичних мереж згущення / В. Літинський, С. Перій // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва в Україні: зб. наук. пр. ЗГТ УТГК. – Л.: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2006. – Вип. II. – С. 125-133.

7. Перій, С.С. Використання двостороннього тригонометричного нівелювання у світловіддалемірній полігонометрії / С.С. Перій // Геодез., картогр. і аерознім. – Л.: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2001. – Вип. 61. – С. 112-117.

Надійшла 24.01.13