

УДК 528.3

*Сергій Крячок, Іван Боханов, Людмила Мамонтова***ВПЛИВ РОЗМІРУ ВІДБИВНОЇ ПОВЕРХНІ РЕФЛЕКТОРА НА ТОЧНІСТЬ
ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ ЕЛЕКТРОННИМ ТАХЕОМЕТРОМ***Сергей Крячок, Иван Боханов, Людмила Мамонтова***ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА НА
ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ТАХЕОМЕТРОМ***Serhiy Kryachok, Ivan Bohanov, Liudmyla Mamontova***THE INFLUENCE OF THE SIZE OF THE REFLECTING SURFACE OF THE
REFLECTOR ON THE ACCURACY OF DISTANCE MEASUREMENT BY
ELECTRONIC TOTAL STATION**

Виконано експериментальне дослідження впливу розміру відбивної поверхні рефлектора на точність вимірювання короткої відстані електронним тахеометром. В експерименті використано електронний тахеометр Trimble 3305 DR та рефлектор від електронного віддалеміра «Блеск». Різні розміри (діаметри) рефлекторів моделювались за допомогою бленд з різними внутрішніми діаметрами, які прикріплювались на рефлектор. Виміряна відстань становила 4,310 м. У результаті опрацювання даних експерименту отримано залежність значень виміряної відстані від робочих діаметрів рефлекторів. Гранична похибка визначення середніх значень відстані становила $\pm 0,3$ мм за випадковою складовою.

Ключові слова: геодезична мережа, точність вимірювання відстаней, електронний тахеометр, призмове відбивачі, визначення координат.

Рис.: 5. Табл.: 2. Бібл.: 7.

Выполнены экспериментальные исследования влияния размера отражающей поверхности рефлектора на точность измерения короткого расстояния электронным тахеометром. В эксперименте использован электронный тахеометр Trimble 3305 DR и рефлектор от электронного дальномера «Блеск». Разные размеры (диаметры) рефлекторов моделировались с помощью бленд с разными внутренними диаметрами, которые крепились на рефлектор. Измеренное расстояние составляло 4,310 м. В результате обработки данных эксперимента получена зависимость значений измеренного расстояния от рабочих диаметров рефлекторов. Предельная погрешность определения средних значений расстояния составила $\pm 0,3$ мм по случайной составляющей.

Ключевые слова: геодезическая сеть, точность измерения расстояний, электронный тахеометр, призмные отражатели, определение координат.

Рис.: 5. Табл.: 2. Библ.: 7.

Experimental studies of the influence of the size of the reflecting surface of the reflector on the accuracy of measurement of short distances by electronic total station were made. In the experiment used electronic total station Trimble 3305 DR and reflector from electronic rangefinder "Блеск". Different sizes (diameters) of the reflectors were simulated by using blends with different inner diameters. The blends were attached to the reflector. Distance was 4,310 M. After processing of experimental data was obtained the dependence of the values of the measured distance from the working diameters of the reflectors. The limiting error in determining the average values of the distance was ± 0.3 mm for the random component.

Keywords: surveys net, accuracy of measurement of lines, electronic total station, prismatic reflectors, the determination of the coordinates

Fig.: 5. Tabl.: 2. Bibl.: 7.

Постановка проблеми. Для визначення координат точок місцевості у реальному часі застосовуються новітні досягнення техніки – супутникові технології [1]. Разом з тим удосконалюються і наземні засоби координування [2; 3]. Особливе поширення мають електронні тахеометри, які дозволяють визначати координати як з використанням призмових відбивачів (рефлекторів), так і у безвідбивному режимі. Для цього застосовуються або спеціальні відбивні марки, або відбите лазерне випромінювання фіксується безпосередньо від об'єкта. Такий режим роботи використовується для знімання об'єктів та для координування розпланувальних марок на будівельному майданчику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [4] виконано аналіз публікацій, присвячених роботі електронних тахеометрів у безрефлекторному режимі в різних погодних умовах, залежно від кольору відбивної поверхні об'єкта, кута відбиття світлового променя, довжини виміряної лінії та застосування відбивних плівок різних виробників. У [5] наведено дослідження похибок вимірювання відстані від розмірів відбивних марок. Доведено, що зі збільшенням розмірів марок похибка визначення відстані зменшується.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Застосування безрефлекторного режиму дозволяє вимірювати відстані до кількох сотень метрів, тоді як для створення полігонометричних мереж виникає необхідність визначати відстані до кількох кілометрів. Крім того, точність вимірювання відстаней у безрефлекторному режимі нижча ніж з використанням призми відбиття. Тому визначення особливостей вимірювання відстаней з використанням рефлекторів є актуальною темою для досліджень.

Мета статі. Головною метою цієї роботи є дослідження впливу розмірів (діаметрів) відбивної поверхні рефлекторів на точність вимірювання відстані.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показано розташування електронного тахеометра марки Trimble 3305 DR та відбивача на стаціонарних опорах у вигляді стовпчиків під час експерименту, який проводився в лабораторії геодезії навчального корпусу № 22 ЧНТУ. Сутність експерименту полягала у наступному. На рефлектор (рис. 2) у вигляді трипель-призми, який входив у комплект електронного віддалеміра «Блеск», прилаштовувалась бленда, зовнішній діаметр якої дорівнював діаметру рефлектора, а діаметр отвору був меншим. Візирна вісь зорової труби тахеометра наводилась на центр рефлектора. Було використано п'ять бленд із зовнішнім діаметром 57,2 мм, вкритих чорною матовою фарбою з такими діаметрами отворів у міліметрах: 19,8; 26,0; 32,0; 38,0; 45,5. Внутрішній діаметр зорової труби тахеометра дорівнював 45 мм. З кожною блендою на рефлекторі було проведено серії вимірювань відстані. Кожна серія складалась з 80 вимірювань. Було виконано один хід вимірювань, який починався з бленди з найменшим діаметром та закінчувався вимірюванням відстані на відбивач без неї. Другий хід дублював перший. Необхідність у другому ході пов'язана з фіксацією можливого впливу нагрівання тахеометра на стабільність вимірювання відстані.



Рис. 1. Розташування приладів під час експерименту



Рис. 2. Відбивач з блендою

В табл. 1 наведено середні значення відстані в серіях вимірювань, які обчислюються як $S_i = S' + \Delta S_i = 4,310\text{мм} + \Delta S_i$. Середнє значення систематичної похибки у багатьох по-

двійних вимірюваннях становило $c = +0,20/6 = +0,033$ мм. За критерієм значущості систематичної похибки [6] встановлено, що систематична похибка відсутня. Це означає відсутність термічного впливу від роботи тахеометра на стабільність вимірювання відстані.

Таблиця 1

Опрацювання результатів вимірювання відстані

№ п/п	Діаметр бленди, мм	Виміряна відстань $S'=4,310$ м		Різниця d , мм	Середнє з ходів, мм	$ d $, мм
		ΔS_i , мм I хід	ΔS_i , мм II хід			
1	19,8	3,71	3,52	+0,19	3,62	0,19
2	26,0	3,64	3,45	+0,19	3,54	0,19
3	32,0	3,35	3,30	+0,05	3,32	0,05
4	38,0	3,04	3,15	-0,11	3,09	0,11
5	45,5	3,09	3,21	-0,12	3,15	0,12
6	52,7	3,46	3,46	0	3,46	0
Сума				+0,20		0,66

Для середніх значень вимірних відстаней та відповідних їм діаметрів бленд побудовано діаграму (рис. 3). Виконано апроксимацію з коефіцієнтом достовірності $R^2 = 0,948$ за допомогою полінома третього ступеня та отримано залежність вимірної відстані S від діаметрів бленд $d_{\text{мм}}$

$$S = 4,310 \text{ м} + (4 \cdot 10^{-5} \cdot d_{\text{мм}}^3 - 0,0035 \cdot d_{\text{мм}}^2 + 0,0735 \cdot d_{\text{мм}} + 3,257 \text{ мм}) \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (1)$$

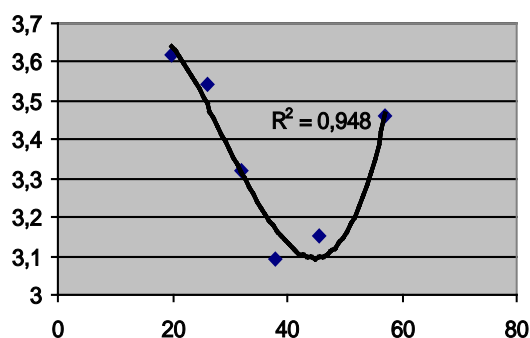


Рис. 3. Залежність середніх значень відстаней від діаметрів бленд

Для розрахунку точності було проведено процедуру перевірки розподілу результатів вимірювань у серіях на відповідність нормальному закону. Враховуючи значні об'єми вибірок, перевірка виконувалась з визначенням асиметрії та ексцесу. Значення асиметрії та ексцесу для кожної з вибірок наведено в табл. 2. Межі критичних областей для асиметрії S_{KP} та ексцесу E_{KP} визначались за формулами [6]

$$S_{KP} = t_{\beta} m_S, \quad (2)$$

$$E_{KP} = t_{\beta} m_E, \quad (3)$$

де t_{β} – параметр, що вибирається з таблиць розподілу Стюдента за кількістю ступенів волі $k = n - 1 = 80 - 1 = 79$ і довірчої ймовірності $P = 0,95$ та дорівнює $t_{\beta} = 2,0$ [6].

Тоді $m_S = \sqrt{6/n} = 0,274$, $m_E = \sqrt{24/n} = 0,548$ [6]. З урахуванням формул (2), (3) $S_{KP} = 0,548$, а $E_{KP} = 1,096$. Як видно з табл. 2, числові значення асиметрії та ексцесу у вибірках не перевищують за абсолютною величиною критичних величин. Тому розподіл

у серіях значень вимірних відстаней можна вважати таким, що відповідає нормальному закону.

Таблиця 2

Вибіркові значення асиметрії та ексцесу

№ п / п	Діаметр бленди, мм	I хід		II хід	
		Асиметрія	Ексцес	Асиметрія	Ексцес
1	19,8	-0,210	-0,150	-0,347	-0,104
2	26,0	-0,092	-0,104	-0,255	+1,025
3	32,0	-0,137	-0,332	+0,006	-0,190
4	38,0	-0,307	+0,226	+0,107	-0,061
5	45,5	+0,074	-0,301	-0,223	-0,051
6	52,7	-0,369	-0,246	-0,015	-0,321

Електронний тахеометр Trimble 3305 DR дозволяє вимірювати відстань на рефлектор із середньою квадратичною похибкою (СКП) $m_s = 2\text{мм} + 2\text{мм} \cdot S_{\text{км}}$, яка для лінії $S = 4,31$ м дорівнює $m_s = 2,01$ мм. СКП середнього значення відстані у вибірці з 80 вимірювань становить $m_{\bar{s}} = 2,01/\sqrt{80} = 0,225$ мм. Межі довірчого інтервалу математичного сподівання $M_{\bar{s}}$ для довірчої ймовірності $P = 0,95$, кількості ступенів волі $k = 79$ і відповідному їм коефіцієнтові Стьюдента $t_{\beta} = 2,0$ дорівнює

$$t_{\beta} m_{\bar{s}} = 2,0 \cdot 0,225 = \pm 0,45 \text{ мм} \tag{4}$$

Межа довірчого інтервалу для середнього значення відстані, визначена з першого та другого ходів, з огляду на (4) дорівнює

$$t_{\beta} \frac{m_{\bar{s}}}{\sqrt{2}} = \pm 0,32 \text{ мм} \tag{5}$$

На рис. 4 наведено довірчі інтервали математичних сподівань та крива апроксимації середніх значень вимірної відстані. З рис. 4 видно, що довірчі інтервали для ймовірності $P = 0,95$, межі яких визначені за формулою (5), частково накривають середні значення, а довірчий інтервал, який відповідає діаметрові бленди 32 мм, накриває всі середні значення вимірної відстані. Здавалося б, що можна констатувати відсутність залежності вимірної відстані від внутрішнього діаметра бленд.

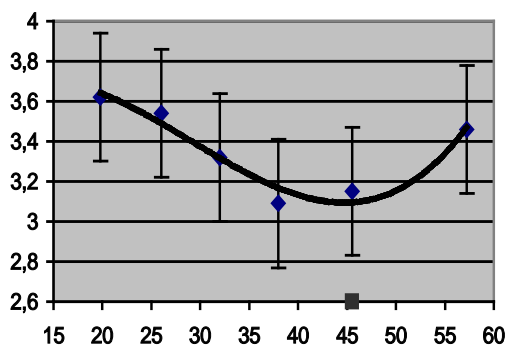


Рис. 4. Довірчі інтервали математичних сподівань в серіях

Але зменшення значення довірчої ймовірності веде до зменшення коефіцієнта t_{β} . У результаті чого, згідно з формулою (4), зменшується і межа довірчого інтервалу математичних сподівань. Крім того, з рис. 5 видно, що середні значення вимірних відстаней у першому та другому ходах знаходяться поруч, а для внутрішнього діаметра бленди 57,2 мм такі

значення збігаються. Тому можна констатувати існування залежності вимірних значень відстані від діаметрів бленд, які моделюють відповідні діаметри рефлекторів. Характерною особливістю такої залежності є те, що найменше значення вимірної відстані знаходиться в межах величини внутрішнього діаметра зорової труби електронного тахеометра (рис. 4, точка 45 мм на осі абсцис).

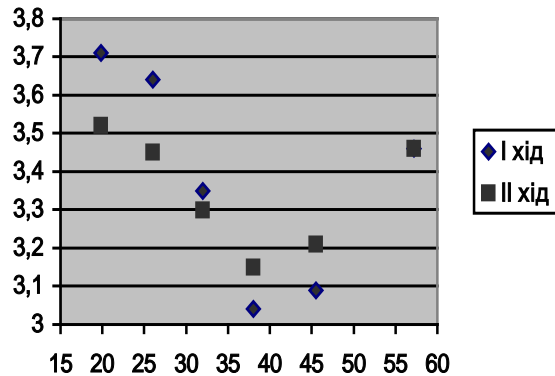


Рис. 5. Відповідність середніх значень відстаней діаметрам бленд по ходах

Згідно з паспортними даними електронного тахеометра Trimble 3305 DR його випромінювання має у поперечному розрізі форму еліпса з кутовими розмірами осей: 0,13 гон ($0,117^\circ$) – по вертикалі та 0,09 гон ($0,081^\circ$) – по горизонталі. Це означає, що на відстані 4,31 м від тахеометра пляма випромінювання на рефлекторі матиме розміри 8,8 мм – по вертикалі та 6,1 мм – по горизонталі. Найменший діаметр бленди, яка застосовувалась у цьому експерименті, дорівнював 19,8 мм. Тобто така бленда ніяк не перекривала діаметр пучка випромінювання від тахеометра, і здавалося не повинна вплинути на вимірювану відстань.

З іншого боку, діаметр D пучка випромінювання, який падає на об'єктив зорової труби електронного тахеометра, відбитий від рефлектора у вигляді тріпель-призми, розміщеної на відстані S , визначається відповідно до наших розрахунків за формулою

$$D = 4S \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

де α – кут між осьовим променем та крайнім променем пучка, який виходить із зорової труби тахеометра. Згідно з формулою (6) на зорову трубу електронного тахеометра падає відбитий пучок з розмірами: $D_B = 4 \cdot 4313 \text{ мм} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,117}{2} = 17,6 \text{ мм}$ – по вертикалі та по горизонту

$D_r = 4 \cdot 4313 \text{ мм} \cdot \operatorname{tg} \frac{0,081}{2} = 12,2 \text{ мм}$. Такі розміри падаючого пучка не будуть повністю заповнювати внутрішній діаметр зорової труби тахеометра розміром 45 мм.

Крім основного пучка лазерного випромінювання, який виходить із зорової труби даного електронного тахеометра, існує вторинне випромінювання. Воно виникає через відбиття та заломлення лазерних променів на оптичних деталях зорової труби та потрапляє як у основний пучок, так і надходить до відбивача самостійно поза основного пучка. Після відбиття відбивними поверхнями рефлектора основний та вторинний пучки знову перетинаються і потрапляють у зорову трубу тахеометра, відбиваються та заломлюються на оптичних деталях і надходять на сенсор приймача сигналу. Через високу когерентність лазерного випромінювання та різні шляхи проходження окремі промені вторинного та основного пучків накладаються та зазнають інтерференції як на шляху до відбивача, так і після нього. Це веде до зміни початкової фази результуючого випромінювання та, як наслідок, – до зміни вимірної відстані фазовим електронним віддалеміром, а також до часового зсуву фазового фронту ім-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

пульсів сигналу [7], що впливає на відміряну відстань імпульсним електронним віддалеміром.

Використання бленд у цьому експерименті частково екранує вторинне випромінювання, яке знаходиться поза основним пучком променів, тим більше, чим менший внутрішній діаметр бленди. Це призводить до зміни значення відстані, що і фіксується під час точного вимірювання з граничною похибкою $\pm 0,3$ мм. Оскільки бленди різного діаметра імітують різні діаметри рефлекторів, то аналогічне явище можна спостерігати у випадку застосування рефлекторів, розміри робочих діаметрів яких будуть впливати на вимірювання коротких відстаней з точністю $\pm 0,3$ мм і менше.

Висновки. У результаті опрацювання даних експерименту отримано залежність значень вимірюваної відстані від робочих діаметрів рефлекторів. Гранична похибка визначення середніх значень відстані становила $\pm 0,3$ мм за випадковою складовою.

Список використаних джерел

1. Терещук О. І. Відновлення міських полігонометричних мереж згущення сучасними супутниковими технологіями / О. І. Терещук, І. О. Нисторяк, Р. В. Шульц // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2015. – Вип. 82. – С. 59–72.
2. Пат. 93119, Україна, МПК (2011.01) G01C7/00. Спосіб згущення геодезичної мережі / Д. Ф. Байса, В. О. Боровий, В. Г. Бурачек [та ін.] ; заявники та патентов. Д. Ф. Байса, В. О. Боровий, В. Г. Бурачек, П. Д. Крельштейн, С. Д. Крячок. – №а2009 06037; заявл. 11.06.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.
3. Крячок С. Д. Побудова полігонометричних мереж зустрічними ходами / С. Д. Крячок, Л. С. Мамонтова // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 5. – С. 9–12.
4. Тревого І. Дослідження безрефлекторного методу роботи електронними тахеометрами / І. Тревого, О. Лісник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – Вип. II (26). – С. 141–142.
5. Тарасенко М. І. Методика визначення технічних параметрів електронних тахеометрів при роботі у безвідбивачевому режимі / М. І. Тарасенко, А. Г. Тищенко // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – Вип. 72. – С. 45–52.
6. Войтенко С. П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів / С. П. Войтенко. – К.: КНУБА, 2003. – 216 с.
7. Супутникові радіонавігаційні системи : навчальний посібник / авт. кол.: І. В. Корнієнко, В. І. Богом'я, О. І. Терещук, С. П. Корнієнко. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2014. – 280 с.

References

1. Tereshchuk, O. I., Nystoriak, I. O., Shults, R. V. (2015). Vidnovlennia miskyykh polihonometrychnykh merezh zghushchennia suchasnymy suputnykovymy tekhnolohiyamy [Restoration of urban networks thickening polygonometric modern satellite technology]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, Lviv, issue 82, pp. 59–72 (in Ukrainian).
2. Baisa, D. F., Borovyi, V. O., Burachek, V. H., Krelshtein, P. D., Kriachok, S. D. (2011). *Sposib zghushchennia heodezychnoi merezhi [A method of thickening geodetic network]*. Patent 93119, Ukraine, MPK G01S7/00, a2009 06037 (in Ukrainian).
3. Kriachok, S. D., Mamontova, L. S. (2014). Pobudova polihonometrychnykh merezh zustrichnymy khodamy [Building networks polygonometric counter moves]. *Visnyk heodezii ta kartohrafiyi – Bulletin of Surveying and Mapping*, no 5, pp. 9–12 (in Ukrainian).
4. Trevoho, I., Lisnyk, O. (2013). Doslidzhennia bezreflektornoho metodu roboty elektronnykh takheometrnykh [Study on reflex-free method of operation of the electronic total stations]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements of geodetic science and industry*, issue II (26), pp. 141–142 (in Ukrainian).
5. Tarasenko, M. I., Tyshchenko, A. H. (2009). *Metodyka vyznachennia tekhnichnykh parametriv elektronnykh takheometriv pry roboti u bezvidbyvachevomu rezhymy [Methods of determining the technical parameters of the total station when working in reflectorless mode]*. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia. – Geodesy, cartography and aerial photography*, issue 72, pp. 45–52 (in Ukrainian).
6. Voitenko, S. P. (2003). *Matematychnaobrobkaheodezychnykhvymiriv. Teoriia pokhybok vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements. The theory of measurement errors]*. Kyiv: KNUBA (in Ukrainian).
7. Kornienko, I. V., Bohomia, V. I., Tereshchuk, O. I., Kornienko, S. P. (2014). *Suputnykovi radionavihatsiini systemy [Satellite navigation systems]*. Chernihiv: Chernihiv National University of Technology (in Ukrainian).

Крячок Сергій Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Крячок Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геодезии, картографии и землеустройства, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kryachok Serhiy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kryachock.serg@yandex.ua

Боханов Іван Іванович – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Боханов Иван Иванович – кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры геодезии, картографии и землеустройства, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Bohanov Ivan – PhD in Military Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: Ivan.bohanov@gmail.com, gkz.kaf@gmail.com

Мамонтова Людмила Степанівна – старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Мамонтова Людмила Степановна – старший преподаватель кафедры геодезии, картографии и землеустройства, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Mamontova Liudmyla – Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: liudmyla.mamontova@yandex.ua