

УДК.528.3:551.5

ПОРІВНЮВАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВРАХУВАННЯ АНОМАЛЬНОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ САНТИЛОМЕТРОМ, ВІДЕОТЕОДОЛІТОМ, ЦИФРОВИМ НІВЕЛІРОМ

А. Островський, О. Островська, В. Новосад, О. Кіселик
Національний університет „Львівська політехніка”

Постановка задачі.

Визначення та врахування рефракції, що досліджується в багатьох країнах світу [6,7,8], вкрай необхідне, оскільки непрямолінійність і нерівномірність розповсюдження електромагнітних хвиль (ЕМХ) є головним бар'єром на шляху підвищення точності астрономо-геодезичних вимірів. Сталося так, що сучасне геодезичне приладобудування досягло такого рівня, коли не вимірні якості приладів стримують подальше підвищення точності вимірів, а неоднорідність атмосфери за густиною. Тому необхідність врахування атмосферних впливів є безальтернативним на шляху розв'язання завжди важливої та актуальної науково-технічної проблеми - підвищення точності вимірів.

Сучасні методи рефрактометрії базуються переважно на теорії турбулентності [1,2,4], оскільки такий підхід здається перспективним з точки зору автоматизованого врахування рефракції. Однак при цьому дослідники часто йдуть складним шляхом, намагаючись знайти систематичні помилки рефракції за випадковими процесами турбулентності, не враховуючи того, що явище турбулентності є не тільки випадковим, але й таким, що характеризується строгими фізичними законами і, перш за все, законом плавучості елементарних частинок повітря та вихорів різних розмірів в навколишній атмосфері. Закон плавучості або плавучість є рівнодіючою двох сил: сили ваги Ньютона та виштовхувальної сили Архімеда.

Те, що рефракційні впливи носять переважно систематичний характер, в наш час є загальноизвестним. На жаль, турбулентність і в наш час, звичайно, вважають тільки випадковим явищем, хоча рефракція і турбулентність обумовлені однією причиною - просторовою неоднорідністю густини атмосфери. При пошуках автоматизованих методів врахування рефракції використовуються такі оптичні прояви турбулентності, як

флуктуації амплітуди, фази, видимого розміру джерела світла, розмитості мір.

При цьому названі явища вважають тільки випадковими. Можна не сумніватись, що використання в цих явищах певних закономірностей, наприклад, максимальних коливань фази (кута приходу світлових хвиль), які досить точно регламентуються законом плавучості, дозволять не тільки спростити автоматизоване визначення рефракції, але, головне, значно підвищити точність її врахування. Виходячи з вище викладеного, в даній статті будуть проаналізовані сучасні досягнення автоматизованого визначення рефракції та зроблені пропозиції стосовно можливого підвищення точності такого врахування.

Аналіз сучасних досягнень автоматизованого врахування рефракції.

Деякі сучасні геодезичні прилади оснащені ССД – сенсорами (приладами зарядного зв'язку - ПЗЗ), які дозволяють визначити структурну характеристику турбулентності C_n^2 або середні квадратичні похибки відліку рейки - $m_{кв}$

Це сучасні цифрові нівеліри фірми Sokkia (Японія), SDL-30 та фірми Цейс (Німеччина) ДН N10, відеотеодоліт фірми Leica (Швейцарія) TM 3000V.

На жаль, ні структурні характеристики турбулентності C_n^2 , які видає на цифрове електронне табло теодоліт TM 3000V, ні середні квадратичні похибки - $m_{кв}$, семи послідовних відліків кодової рейки, які видає на монітор нівелір SDL-30, ще не є поправками за рефракцією. Зауважимо, що швидкі зміни значень відліків рейки обумовлені, перш за все, тільки турбулентністю атмосфери – коливаннями фази кута приходу світлового променя (зміни кута і нівеліра не носять миттєвого характеру). Тому ці похибки можна вважати середніми квадратичними похибками рефракції.

Одночасно, в роботі [9] показана єдність теорії турбулентності та рефракції,

і, зокрема, доведено, що при термічній турбулентності структурна характеристика турбулентності C_n^2 є не що інше, як квадрат аномального вертикального градієнта показника заломлення повітря $\left(\frac{dn}{dz}\right)_{ан}$. Так що при термічній турбулентності:

$$C_n = \left(\frac{dn}{dz}\right)_{ан} \quad (1)$$

Крім того, в роботі [3] виведена формула залежності між середніми аномальними рефракціями, що спотворюють вимірні зенітні кути та повними середніми квадратичними рефракціями $\sigma_{п.кв}$. Ця формула має вигляд:

$$\delta_{ан.сер}'' = \frac{\sigma_{п.кв}'' \cdot \sqrt{L}}{4} \quad (2)$$

Якщо відома часткова середня квадратична рефракція $\sigma_{г.кв}$, тоді формула (2) набуде вигляду:

$$\delta_{ан.сер}'' = \frac{\sigma_{г.кв} \cdot \sqrt{L}}{2} \quad (3)$$

У цих формулах $\delta_{ан.сер}$ - не миттєві, а середні аномальні часткові рефракції за короткий проміжок часу біля 1сек., необхідний спостерігачу для наведення зорової труби на середнє положення візирної цілі, що флюктує. У випадку лінійної рефракції - r , що діє на результати нівелювання (спотворює відліки рейки) формула (3) матиме вигляд:

$$r = \frac{m_{кв} \cdot \sqrt{L}}{2} \quad (4)$$

Що стосується $m_{кв}$, яке видає нівелір, то воно може бути обчислене за формулою В.І. Татарського [5].

Формули (1) та (4) дозволяють по новому використати C_n^2 та $m_{кв}$, що видаються на монітори теодоліта та нівеліра, а саме: найти кутові $\delta_{ан.сер}''$ і лінійні r поправки за рефракцію. Для дослідження точності таких визначень використані результати експерименту, описаного в роботі [7].

Суть експерименту.

Експеримент поставлено в Швейцарії. На одному кінці лінії $L = 86$ м, рядом

(перпендикулярно до лінії) були встановлені сантілометр SLS 20 (Німеччина), відеотеодоліт TM 3000V та цифровий нівелір SDL-30. На протилежному кінці лінії була встановлена кодова нівелірна рейка. Нівелір автоматично виконував відлік цієї рейки, за якими, як звичайно, визначаються перевищення, і дискретно в часі виводив на цифрове табло середню квадратичну похибку семи послідовних відліків рейки, які ми прийняли за часткову середню квадратичну рефракцію. Одночасно ССД - сенсор та комп'ютер відеотеодоліта за коливаннями зображень частини поділок рейки обчислювали та видавали на табло, також дискретно в часі, значення C_n^2 . На цьому ж кінці лінії, лоряд з нівелірною рейкою було встановлено трансмітер, що був активною візирною ціллю для сантілометра і випромінював хвилі двох різних довжин. Сантілометр - прилад для визначення C_n^2 за коливаннями амплітуди (яскравості) світлового потоку, що проходить в турбулентній атмосфері. В наш час уже можна стверджувати, що метод фіксації амплітуди яскравості світла не може бути застосованим для визначення C_n^2 при довгих приземних трасах [4]. Однак, є спроби застосування цього методу для коротких трас. В експерименті сантілометр видавав безперервний ряд значень C_n^2 . Експериментальні спостереження велись впродовж 2.5 годин, з 14⁰⁰ до 16³⁰. Результати спостережень подані на двох графіках роботи [7]. На одному графіку подані значення C_n^2 сантілометра та відеотеодоліта; на другому - дані сантілометра C_n^2 та цифрового нівеліра - $m_{кв}$,

Опрацювання даних експерименту.

На основі експерименту важливо було встановити:

- точність визначення аномального градієнта показника заломлення

$C_n = \left(\frac{dn}{dz}\right)_{ан}$ на основі порівняння даних сантілометра, теодоліта та нівеліра;

- точність визначення кутових та лінійних рефракцій цими приладами, якщо турбулентність вважається тільки випадковим процесом;

- перевірити роботоспроможність формули (3), порівнюючи знайдені кутові та лінійні

Таблиця 1

Середні значення $C_n = \left(\frac{dn}{dz} \right)_{ан}$ отриманих за даними сантилометра.

N/N	Час	$\left(\frac{dn}{dz} \right)_{ан}$	N/N	Час	$\left(\frac{dn}{dz} \right)_{ан}$
1	2	3	4	5	6
1	14.00	0,78	26	15.15	0,59
2	14.03	0,66	27	15.18	0,44
3	14.06	0,71	28	15.21	0,53
4	14.09	0,72	29	15.24	0,60
5	14.12	0,72	30	15.27	0,63
6	14.15	0,72	31	15.30	0,66
7	14.18	0,73	32	15.33	0,66
8	14.21	0,83	33	15.36	0,60
9	14.24	0,70	34	15.39	0,59
10	14.27	0,69	35	15.42	0,42
11	14.30	0,67	36	15.45	0,59
12	14.33	0,72	37	15.48	0,56
13	14.36	0,78	38	15.51	0,62
14	14.39	0,76	39	15.54	0,49
15	14.42	0,74	40	15.57	0,44
16	14.45	0,72	41	16.00	0,56
17	14.48	0,76	42	16.03	0,49
18	14.51	0,77	43	16.06	0,68
19	14.54	0,72	44	16.09	0,62
20	14.57	0,64	45	16.12	0,62
21	15.00	0,64	46	16.15	0,58
22	15.03	0,64	47	16.18	0,52
23	15.06	0,60	48	16.21	0,53
24	15.09	0,54	49	16.24	0,49
25	15.12	0,55	50	16.27	0,49

Таблиця 2

Результати порівняння кутових рефракцій, отриманих за даними сантилометра, теодоліта та нівеліра.

Час	Рефракції $\delta''_{ан ср.}$			Різниці рефракцій		
	Сантилометр	теодоліт	нівелір	$\Delta\delta''_1 = \delta''_C - \delta''_T$	$\Delta\delta''_2 = \delta''_C - \delta''_H$	$\Delta\delta''_3 = \delta''_T - \delta''_H$
1	2	3	4	5	6	7
14.00	6,92	8,25		-1,33		
14.03	5,85	4,17	5,34	1,68	-1,51	-1,17
14.12	6,39		5,90		0,49	
14.21	7,54	5,76	6,23	1,78	+1,31	-0,47
14.24	6,21	4,61	5,23	1,60	0,98	
14.27	6,12	4,61		1,51		
14.30	5,50	5,32	4,00	0,18	1,50	1,32
14.33	6,39		4,87		1,52	
14.45	6,39	6,12		0,27		
14.48	6,74		5,68		1,06	
14.51	6,83	7,27	5,43	-0,56	1,60	1,84
14.57	5,68	4,70	6,33	0,98	-0,65	-1,63
15.00	5,68	5,21	5,88	0,47	-0,20	-0,67
15.03	5,68	5,21		0,47		
15.06	5,32	4,86	5,44	0,80	-0,12	-0,58

1	2	3	4	5	6	7
15.09	4,79	5,59		-0,80		
15.12	4,88		5,56		-0,68	
15.15	5,23	4,00	4,23	1,23	1,00	-0,23
15.18	3,90	4,00		-0,10		
15.21	4,70		4,68		0,02	
15.24	5,32	3,55		1,77		
15.30	5,85	4,00		1,85		
15.33	5,85		4,89		0,96	
15.39	5,59		4,68		0,91	
15.42	3,72		4,22		-0,52	
15.45	5,23	7,18		-1,95		
15.48	4,97	5,76	4,66	-0,79	0,31	1,10
15.51	5,50	5,32		0,18		
15.54	4,35	3,28	3,45	1,07	0,90	-0,17
15.57	3,90	4,00	2,57	-0,10	1,33	1,43
16.00	4,26	4,00		0,26		
16.03	4,35	4,00		0,35		
16.06	5,76	4,70	6,45	1,06	-0,69	-1,75
16.12	5,50	6,65		-0,15		
16.15	5,14	4,35	4,12	0,79	1,02	0,23
16.18	4,61	5,59		-0,98		
16.21	4,70	4,44	3,45	0,26	1,25	0,99
16.24	4,35	4,17		0,18		
16.27	4,35	4,70	5,23	-0,35	-0,88	-0,53

Після виключення систематичних похибок з даних $\delta_{ан.ср.і}$, отриманих сантимоетром, була проведена оцінка точності визначення рефракцій (при цьому отримані кінцеві дані $\delta_{ан.ср.і}$ розглядались як подвійні рівноточні виміри) за формулами:

$$\begin{aligned}
 m_{\delta_{ан.1}} &= \sqrt{\frac{\Delta\delta^2_{1_i}}{2n_1}}, \\
 m_{\delta_{ан.2}} &= \sqrt{\frac{\Delta\delta^2_{2_i}}{2n_2}}, \\
 m_{\delta_{ан.3}} &= \sqrt{\frac{\Delta\delta^2_{3_i}}{2n_3}}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\delta_{ан.1}} &= 0.66'', \quad m_{\delta_{ан.2}} = 0.65'', \\
 m_{\delta_{ан.3}} &= 0.74''.
 \end{aligned}$$

Середнє вагове значення похибки $m_{ваг.} = 0.67''$.

Далі перейдемо до обробки вимірів лінійних рефракцій. Лінійні рефракції r_i , як за даними сантимоетра, так і теодоліта, обчислювалися за відомою формулою: переходу від кутових рефракцій до лінійних

$$z = \frac{L_{(мм)} \cdot \delta_{ан.ср.і}}{\rho''} \tag{9}$$

Лінійні рефракції за даними нівеліра отримані на основі формули (4), як зазначалося вище. Результати обчислень зведені в таблицю 3.

Дані лінійних рефракцій були опрацьовані аналогічно, як і кутові. Можна було передбачувати, що лінійні рефракції, отримані за даними сантимоетра також будуть обтяжені систематичними похибками. Так і сталося, а ці похибки виявились рівними:

$$\begin{aligned}
 \sigma'_1 &= \frac{\sum \Delta r_{1_i}}{n_1}, & \sigma'_2 &= \frac{\sum \Delta r_{2_i}}{n_2} \\
 \sigma'_1 &= 0.137\text{мм}, & \sigma'_2 &= 0.235\text{мм}
 \end{aligned}$$

Систематичні похибки $\sigma'_3 = \frac{\sum \Delta r_{3_i}}{n_3}$,

рівні $\sigma'_3 = 0.004\text{мм}$, тобто знову виявились меншими майже на два порядки. Знайдемо середньо-вагське значення систематичної похибки (з σ'_1 та σ'_2). Це значення $\sigma_{ваг.} = 0,180\text{ мм}$. Після виключення систематичних похибок за кінцевими даними лінійних рефракцій r_i були знайдені похибки m_{r_1} , m_{r_2} , m_{r_3} , за формулами, аналогічними формулі (8):

$$\begin{aligned}
 m_{r_1} &= 0.274\text{мм}, & m_{r_2} &= 0.252\text{мм}, \\
 & & m_{r_3} &= 0.464\text{мм}.
 \end{aligned}$$

Середньо-вагове $m_{ваг.} = 0.31\text{ мм}$.

Таблиця 3

Результати порівняння лінійних рефракцій.

Час спостережень	Лінійні рефракції			Різниця рефракцій			$m_{кв}$
	сантиметр	теодоліт	нівелір	$\Delta r_1 = r_C - r_T$	$\Delta r_2 = r_C - r_H$	$\Delta r_3 = r_T - r_H$	
1	2	3	4	5	6	7	8
14.00	2,88	3,44		-0,56			
14.03	2,44	1,74	2,23	0,70	0,21	-0,49	0,48
14.12	2,66		2,46		0,20		0,53
14.21	3,14	2,40	2,60	0,74	0,54	-0,20	0,56
14.24	3,59		2,18		0,41		0,47
14.27	2,55	1,92		0,63			
14.30	2,29	2,20	1,67	0,09	0,62	0,53	0,36
14.33	2,66		2,03		0,63		0,44
14.45	2,66	2,55		0,11			
14.48	2,81		2,37		0,44		0,51
14.51	2,85	3,03	2,18	-0,18	0,67	0,85	0,47
14.54	2,66	2,07		0,59			
14.57	2,37	1,96	2,64	0,39	-0,27	-0,68	0,57
15.00	2,37	2,17	2,45	0,20	0,20	-0,28	0,53
15.03	2,37	2,17		0,20			
15.06	2,22	2,03	2,27	0,19	-0,05	-0,24	0,49
15.09	2,00	2,33		-0,33			
15.12	2,03		2,32		-0,29		0,50
15.15	2,18	1,67	1,76	0,51	0,42	-0,09	0,38
15.18	1,63	1,67		-0,04			
15.21	1,96		1,95		0,01		0,42
15.24	2,22	1,48		0,74			
15.30	2,44	1,67		0,77			
15.33	2,44		2,04		0,40		0,44
15.39	2,33		1,95		0,38		0,42
15.42	1,55		1,76		-0,21		0,38
15.45	2,18	2,99		-0,81			
15.48	2,07	2,40	1,94	-0,33	0,13	0,46	0,42
15.51	2,29	2,22		0,07			
15.54	1,81	1,37	1,44	0,44	0,37	-0,07	0,31
15.57	1,63	1,67	1,07	-0,04	0,56	0,60	0,23
16.00	1,78	1,67		0,11			
16.03	1,81	1,67		0,14			
16.06	2,40	1,96	2,69	0,44	-0,29	-0,73	0,58
16.12	2,29	2,77		-0,48			
16.15	2,14	1,81	1,72	0,33	0,42	0,09	0,37
16.18	1,92	2,33		-0,41			
16.21	1,96	1,85	1,44	0,11	0,52	0,41	0,31
16.24	1,81	1,74		0,07			
16.27	1,81	1,96	2,18	-0,15	0,37	-0,22	0,47

Висновки

1). Точність автоматизованого методу визначення аномальної вертикальної рефракції сучасними відеотеодолітами та цифровими нівелірами, оснащеними ССД сенсорами, якщо метод оснований на використанні флуктуацій фази візирної цілі викликаної турбулентністю атмосфери, яка вважається тільки випадковим явищем, то при довжинах трас порядку 100м складає

$\pm 0.67''$ в кутовій мірі, та 0.31мм в лінійній мірі.

2). Досягнута точність визначення рефракції не може задовольнити сучасні прецизійні геодезичні роботи. Перехід до використання систематичних властивостей турбулентності, наприклад, максимальних флуктуацій фази, які є закономірними і точно регламентуються законом плавучості частинок повітря в навколишній атмосфері,

може, не тільки підвищити точність визначення аномальної вертикальної рефракції в 2-3 рази, але й значно спростити алгоритми її визначення.

3). На основі експериментальних досліджень, проведених в Швейцарії [7], і по новому опрацьованих у даній статті, виявлена систематична помилка визначення рефракції сантилометром, яке основане на вимірах коливань не фази, а амплітуди (яскравості) джерела, що випромінює дві різні довжини світлових хвиль. Величина систематичної похибки $\sigma = +0.39''$ при довжині траси 86м. Про можливі систематичні похибки цього методу визначення структурної характеристики турбулентності атмосфери - C_n^2 стверджується також у роботі [4].

4). На основі обробки експериментальних даних встановлено також, що запропонована в [3] формула переходу від квадратичних похибок рефракції, які видають на табло цифрові нівеліри, до середніх поправок за рефракцію у відліки рейок, працює досить добре і не вносить помітних систематичних похибок.

Література

1. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. Труды ин-та Теорет. Геофиз. АН СССР. 1954, № 24, с. 163-187.
2. Обухов А.М. Турбулентность в термично-неоднородной атмосфере. Труды ин-та

Теорет. Геофиз. АН СССР, 1946, Т. 1 – с. 95-115.

3. Островська О. А. Формула залежності між середніми та середніми квадратичними аномальними вертикальними рефракціями в турбулентній атмосфері. Геодезія, картографія і аерофотознімання (міжвідомчий науково-технічний збірник) Львів, 2003, № 64, с 55-58.
4. Самохвалов И.В. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. Сибирское отделение Академии наук СССР. Новосибирск, изд. "Наука", 1986, 90 с.
5. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. Изд. "Наука", М., 1967, 548 с.
6. Bockem B., Flach P., Weiss A., Hennes M. Refraction influence analysis and investigations on automated elimination of refraction effects on geodetic measurements. Paper to XVI IMEKO World Congress, 25-28 Sept. 2000, Vienna. 1-6 pp.
7. Flach P., Maas H. Vision-based techniques for refraction analysis in applications of terrestrial geodesy. IAPRS, Onuma, Vol. XXXII, Part.5 – 3W12, hh.195-201.
8. Flach P., Hennes V. Die optische Turbulenz – wirklich nur ein limitierender factor fur geodatische Messungen? In: Freeden W. (ed): Progress in Geodetic Science, Proceedings to Geodatische Woche Kaiserslautern 1988, pp. 65-72.
9. Moroz O, Ostrovskyi A. Generalized theory of refraction and turbulence. Proceedings of the "EGS" symposium G12. Nice, France, 2000, №6 (52). p. 217-226.

THE COMPARISON RESEARCHES OF ACCURACY OF THE AUTOMATED DEFINITION AND THE ACCOUNT OF AN ANOMALOUS VERTICAL REFRACTION BY A SANTILOMETR, A VIDEOTHEODOLITE AND A DIGITAL LEVEL

A. Ostrovskij, O. Ostrovska, V. Novosad, O. Kiselik

It is proved in the article, that accuracy of the modern automated methods of definition of an anomalous vertical refraction to the devices equipped with CCD – sensor, makes: 1. by the videoteodolite TM3000V – 0,67"; 2. by the level SDL-30 – 0,31mm at length at distance about 100m.

The offers concerning increase of accuracy of definition of a refraction are made.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И УЧЕТА АНОМАЛЬНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ САНТИЛОМЕТРОМ, ВИДЕОТЕОДОЛИТОМ И ЦИФРОВЫМ НИВЕЛИРОМ

А. Островский, О. Островская, В. Новосад, О. Киселик

В работе доказано, что точность современных автоматизированных методов определения аномальной вертикальной рефракции приборами, оснащенными ССД-сенсорами, составляет: Видеотеодолитом TM3000V – 0,67"; Нивелиром SDL-30 – 0,31мм при длине трасы около 100м;

Сделаны предложения, касающиеся повышения точности определения рефракции.