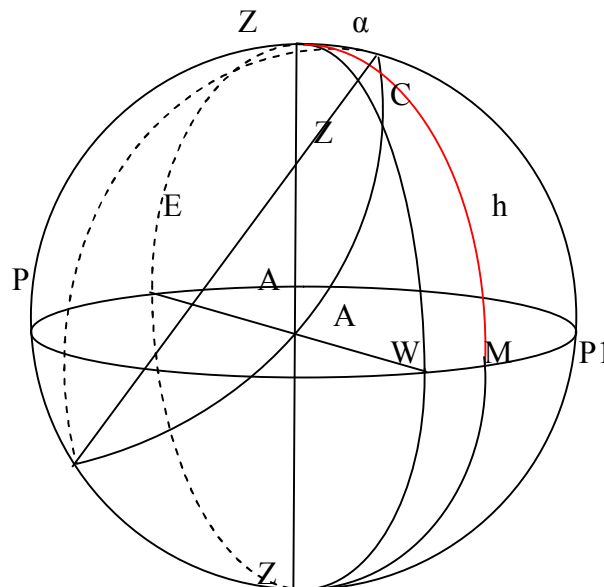


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ
ЕКОНОМІКИ І УПРАВЛІННЯ

Р.М.Літнарівч

ГЕОДЕЗИЧНА АСТРОНОМІЯ

Навчальний посібник для студентів спеціальності
“Землевпорядкування та кадастр”



Чернігів, 2000

УДК 378.147.31

Літнарівч Р.М. Геодезична астрономія. Навчальний посібник для студентів спеціальності “Землепорядкування та кадастр”. ЧДІЕіУ, Чернігів, 2000. – 76 с.

Рецензент В.О.Боровий, доктор технічних наук, професор

З М І С Т :

Передмова	3
Лекція №1. Предмет геодезичної астрономії. Системи координат в астрономії..	4
Лабораторна робота № 1. Системи координат. Добовий рух світил.....	7
...Лекція № 2. Прилади для вимірювання і реєстрації часу.....	13
Лабораторна робота № 2. Лічба часу.....	16
...Лекція № 3. Астрономічні прилади.....	18
Лабораторна робота № 3. Вивчення будови астрономічного універсала.....	19
...Лекція № 4. Дослідження астрономічного теодоліта.....	25
...Лабораторна робота № 4. Перевірки і дослідження точних і високоточних	
...теодолітів.....	29
...Лекція № 5. Азимутальні способи астрономічних визначень.....	31
...Лабораторна робота № 5. Дослідження точного і високоточного теодоліта....	35
...Лекція № 6. Сумісне визначення азимута , широти і довготи із	
...спостережень світил в різних вертикалях і на різних зенітних віддалях.....	37
...Лабораторна робота № 6. Проведення пробних азимутальних і	
...зенітних спостережень.....	40
...Лекція № 7. Обробка спостережень.	41
...Лабораторна робота № 7. Сумісне визначення геодезичного азимута і	
...складових відхилення прямої лінії із спостереження зірок	
...у різних вертикалях.....	44
...Лекція № 8. Зенітальні способи астрономічних визначень.....	47
...Лабораторна робота № 8. Зрівноваження результатів. Оцінка точності.....	50
...Лекція № 9. Загальна теорія зенітальних способів астрономічних визначень...	52
.. Лабораторна робота № 9. Обробка спостережень у методі Сомнера.....	55
...Лекція № 10. Сумісне визначення широти і довготи по вимірним	
...зенітним віддалям світил в різних вертикалях	56
...Лабораторна робота № 10. Зрівноваження за способом найменших квадратів..	60
...Лекція № 11. Наближене визначення азимута по часовому куту	
...Сонця і Полярній	62
...Лабораторна робота № 11. Наближені способи астрономічних визначень.....	66
...Лекція № 12. Вимірювання істинного азимута по висоті Сонця.....	69
...Лабораторна робота № 12. Абсолютні методи визначення азимута по Сонцю і	
...зіркам.....	72

Л І Т Е Р А Т У Р А :

1. Уралов С.С. Курс геодезической астрономии. – М.: Недра, 1980, 592 с.
2. Закатов П.С. Курс высшей геодезии . Геодезиздат. - М.: 1953, 405 с.
3. Рабинович Б.Н. Основы построения геодезических сетей. Геодезиздат. – М.: 1948, 323 с.

ПЕРЕДМОВА:

Даний навчальний посібник призначений для студентів спеціальності “Землепорядкування та кадастр” в об’ємі 12 лекцій і 12 лабораторних робіт.

Метою курсу є ознайомлення студентів з загальною теорією визначення координат пунктів спостережень.

Астрономічні роботи відіграють важливу роль при вирішенні наукових і практичних задач геодезії. Відмітимо основні випадки використання астрономічних широт, довгот і азимутів в геодезії:

1. Астрономічні визначення широт і довгот на відповідних пунктах триангуляції являються важливою складовою частиною градусних вимірів для визначення розмірів і форми Землі в цілому.

2. Астрономічні визначення широт і довгот пунктів разом з результатами геодезичних вимірів дають можливість детально вивчати геоїд. Співставлення астрономічних і геодезичних координат і вивід ухилів прямовисних ліній дає можливість виконати побудову профілів геоїда відносно референц еліпсоїда.

3. Астрономічні спостереження дають значення вихідних координат для початкового пункту триангуляції, від якого проводять обчислення координат всіх пунктів.

Другими словами, астрономічні координати дають можливість виконати орієнтування референц – еліпсоїда в тілі Землі і визначають географічне положення триангуляції, а, відповідно, і планшетів топографічного знімання на поверхні Землі.

4. Астрономічні азимути після введення в них поправки за відхилення прямовисних ліній (азимути Лапласа) контролюють в триангуляції і полігонометрії орієнтування триангуляції і підвищують точність визначення координат пунктів.

5. Астрономічні спостереження дають можливість визначити координати точок земної поверхні як опорних пунктів топографічних знімачів. При цьому слід враховувати, що координати астрономічних пунктів спотворені впливом відхилень прямовисних ліній. Тому користуватися астрономічними пунктами як опорними можна лише при зніманні в масштабі 1 : 100000 і більш дрібних масштабах.

6. Астрономічні азимути, що визначаються, на точках теодолітних ходів, є хорошим незалежним контролем вимірів і забезпечує значне підвищення точності цих ходів.

7. Астрономічні спостереження являються засобом визначення географічних координат корабля на морі і літаках в повітрі.

Лекція 1. Предмет геодезичної астрономії. Системи координат в астрономії.

1.1. Загальні відомості.

Астрономія – одна із самих давніх наук. Своїм предметом вона вивчає природу, рух і розподілення небесних світил і улаштування Всесвіту в цілому. В наш час астрономія поділяється на розділи. Кожний з яких є самостійною галуззю знань.

Астрономічні роботи, які виконуються в геодезичних цілях і мають своєю задачею визначення географічних координат на земній поверхні, ґрунтуються на двох розділах астрономії: сферичної астрономії і практичної або геодезичної астрономії.

Сферичною астрономією називається розділ астрономії, в якому розглядаються видимі рухи світил, способи визначення їх положень на небесній сфері за допомогою застосування різних систем координат і закономірності явищ, що спостерігаються із земної поверхні і виникають в результаті руху Землі навколо Сонця і обертання її навколо осі.

Практичною або геодезичною астрономією називається розділ астрономії, в якому розглядаються методи і прийоми астрономічних вимірів, прилади, які використовуються при виконанні цих вимірів, а також способи обробки астрономічних вимірів для визначення координат світил на небесній сфері і географічних координат точок земної поверхні.

Інші розділи астрономії – *теоретична астрономія, небесна механіка, астрофізика, космогонія* – вивчають рухи світил, їх фізичні і хімічні властивості, розвиток небесних тіл і Всесвіту в цілому.

1.2. Системи координат.

Астрономічні широти і довготи точок земної поверхні і азимуту напрямків визначаються із відповідних спостережень небесних світил – Сонця і зірок.

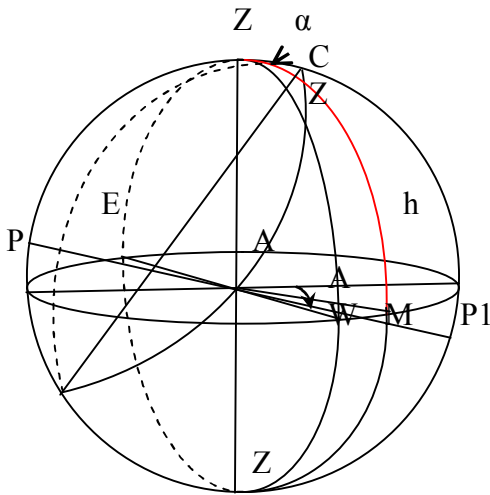
Побудуємо сферу довільного радіуса. Нехай, центр сфери співпадає з точкою спостереження. В подальшому будемо вважати, що всі світила спроектовані прямими лініями із центра цієї допоміжної сфери на її внутрішню поверхню. Задача заключається в визначенні положення проекції світила на цій сфері, яка називається **небесною сферою**.

Положення любой точки на небесній сфері визначається як перетин двох великих кіл, побудованих відомим чином. Проводячи через дану точку різним чином кола, будемо мати різні системи координат. Ці кола розташовують у взаємно перпендикулярних площинах. Положення кожного із двох кіл, які проходять через дану точку сфери, визначається дугою, яку відраховують від відповідного великого кола, приймаємо за початкове.

Як відомо Земля обертається навколо своєї осі із заходу на схід. У спостерігача на земній поверхні складається враження, що всі небесні тіла – зірки, Сонце, планети – рухаються із сходу на захід. Обертання Землі навколо своєї осі називається **добовим рухом**, тому що проміжок часу за який Земля робить один оберт відносно зовнішньої точки, приймається за одиницю часу, яку називають **добом**.

1.3. Горизонтальна система координат.

Побудуємо допоміжну сферу. Продовжимо прямовисну лінію в точці спостереження A зі сферою в точках Z і Z_1 . ці точки називаються відповідно точками **зеніту** і **надиру**. Велике коло, площина якого перпендикулярна лінії ZZ_1 приймаємо за перше основне коло, відносно якого будемо визначати положення світила на небесній сфері. Це коло називається **небесним**, або **астрономічним горизонтом**.



Проведемо через центр сфери лінію, паралельну осі обертання Землі, до перетину зі сферою. Ця лінія називається **віссю світу**. Нехай, вісь світу пересікає допоміжну сферу в точках **P** і **P₁**, які називаються **полюсами світу**. Велике коло небесної сфери **PZSP₁Z₁N**, яке проходить через полюси світу і зеніт місяця спостереження (точки **A**), називається **астрономічним**, або **небесним меридіаном**. Прийнемо небесний меридіан за друге основне коло, відносно якого будемо визначати положення світила на сфері. Горизонтальна лінія **AN**, яка лежить в площині меридіана, показує напрямком на північ, а протилежна їй **AS** – на південь. Тому точки **N** і **S** називаються

відповідно **точками півночі і півдня**. Велике коло, яке проходить через точки зеніта і надіра перпендикулярне площині меридіана, називається **першим вертикалом**; точки **W** і **E** перетину цього кола з горизонталом називаються відповідно точками **заходу і сходу**.

В даній системі координат положення світила **σ** визначається:

- 1) Дугою великого кола **Zσ**, яка вимірює зенітну віддаль світила і позначається через **Z**;
- 2) Двогранним кутом **α** між площиною астрономічного меридіана **PZP₁Z₁** і вертикальною площиною **ZσZ₁**, який називається **азимутом** світила. Азимут в астрономії відраховується від південної частини меридіана по ходу часової стрілки.

Іноді в астрономії замість координати **Z** застосовують **висоту h**, рівне $90^\circ - Z$, що вимірюється дугою **Mσ**; **h** відповідає прийнятому в геодезії куту нахилу.

Малі кола небесної сфери паралельні площині горизонту, тобто кола рівних висот, називаються **альмукантаратами**.

Якщо позначити через **A** азимут при рахунку від північної частини меридіану, то

$$A = \alpha \pm 180^\circ \quad (1.1)$$

В результаті обертання Землі навколо осі видиме із точки **A** положення світила **σ** на сфері безперервно змінюється, завершуючи повний поворот за добу. Видимий рух світила на протязі доби проходить по малому колу **cdσ**, який називається **добовою паралеллю**. Таким чином, для даної точки спостереження **A** значення координат **Z** і **α** будуть різні в різні часи доби. В різних точках земної поверхні прямовисна лінія має різний напрямок, тому в один і той же момент часу, але для різних точок спостережень горизонтальні координати одного і того ж світила також не будуть однаковими.

На протязі доби світило два рази пересікає астрономічний меридіан – в точках **c** і **d**. Положення світила в меридіані називається **кульмінацією** світила. Ближня до світила кульмінація називається **верхньою кульмінацією**, дальня – **нижньою кульмінацією**.

У верхній кульмінації зенітна віддаль досягає найменшого значення, а в нижній кульмінації – найбільшого. Азимут світил в моменти кульмінації має значення 0° або 180° .

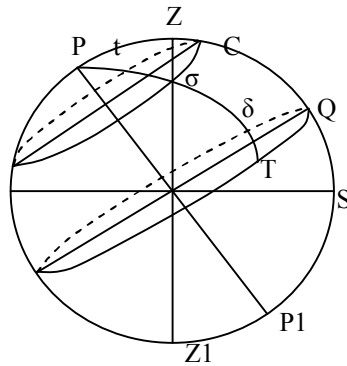
1.4. Перша екваторіальна система координат.

Візьмемо допоміжну сферу і побудуємо ті ж точки проведемо велике коло QQ_1 , площина якого перпендикулярна **осі світу**. Це коло називається **астрономічним**, або **небесним екватором**. Його приймаємо за одне із кіл, відносно яких будемо визначати положення світила σ на сфері. За друге координатне коло візьмемо, як і раніше, астрономічний меридіан PZP_1Z_1 . тоді положення світила σ визначатиметься:

1) Дугою σT , яка називається **схиленням світила** і позначається буквою δ ; коло PT , перпендикулярне до екватора, по якому відраховується схилення δ , називається **колом схилення**.

2) двогранний кут t між площиною астрономічного меридіана і площиною кола схилення називається **часовим кутом**; часовий кут відраховується від меридіана в напрямку, протилежному напрямку обертання Землі; від 0° до 360° ; іноді він обертається на обидві сторони від меридіана від 0° до $\pm 180^\circ$; в цьому випадку часові кути, відраховані на захід, вважаються додатними, а на схід – від'ємними.

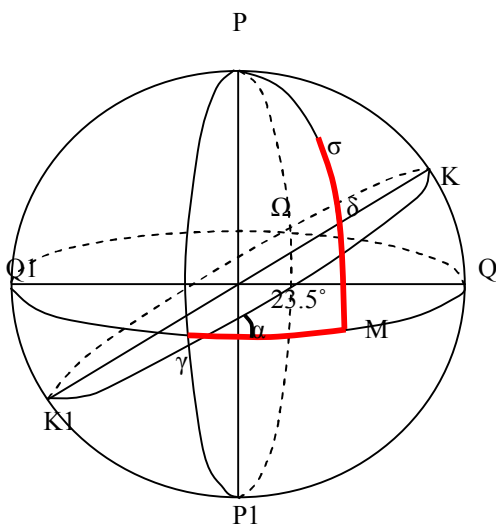
В ході добового руху світила δ переміщається по паралелі $c\delta d$, всі точки якої знаходяться на однаковій віддалі від астрономічного екватора, рівні схиленню δ світила; тому схилення δ не залежить від добового руху небесної сфери.



Часовий рух змінюється від 0° до 360° пропорційно добовому обертанню Землі. Так як обертання Землі проходить рівномірно; тому годинний кут прийнято виражати в годинній мірі. Повний оберт світила на 360° відповідає 24^h звідси: 1^h відповідає 15° дуги; $1^m - 15'$; $1^s - 15''$ дуги.

1.5. Друга екваторіальна система координат.

Земля є супутником Сонця, обертається навколо нього по орбіті, яка має форму еліпса. Повний поворот навколо Сонця Земля робить на протязі одного року. Спостерігачу ж з Землі, здається, що Сонце рухається навколо Землі, роблячи повний поворот навколо неї на протязі року. Тому у сферичній астрономії прийнято говорити про видимі рух Сонця. Перетин площини, в якій проходить видимий річний рух Сонця, з небесною сферою називається **екліптикою**. Площина екліптики нахилена відносно астрономічного екватора приблизно на кут $23^\circ 1/2$.



Велике коло $K\gamma K_1\Omega$ буде екліптикою. В даній системі координат основні кола, відносно яких визначається положення світила, слідує: небесний екватор QQ_1 і коло схилень, яке проходить через точку овна γ - точку перетину екватора і екліптики. В цій системі координат положення світила δ на небесній сфері визначається: 1) схиленням δ ; 2) дугою γM , яку називають **прямим піднесенням** і позначають буквою α . Точки перетину екватора з екліптикою - γ і Ω називаються, відповідно, **точками весняного і осіннього рівнодення**. В цих точках Сонце знаходиться **21 березня** і **23 вересня**, коли день рівний ночі на всій Землі.

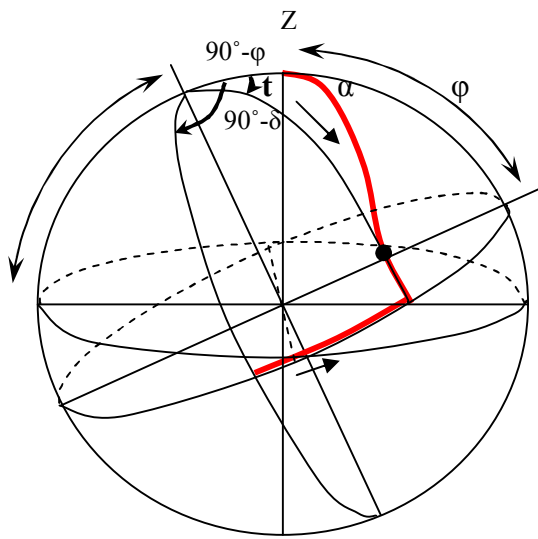
Положення екватора і точки весняного рівнодення відносно світил не залежить від добового обертання небесної сфери і географічних координат точки спостереження A ; тому від цих причин не залежать і координати світил α і δ . Екваторіальні координати α і δ визначаються із спостережень зірок в обсерваторіях і публікуються в спеціальних каталогах. При астрономічних роботах, які виконуються в польових умовах для геодезичних цілей, ці координати вважаються відомими.

Лабораторна робота № 1. Системи координат. Добовий рух світил.

1.6. Зв'язок між різними системами координат.

Для встановлення зв'язку між описаними вище системами координат побудуємо на допоміжній сфері всі основні кола, які визначають положення світила в розглянутих вище трьох системах координат. Замітимо, що кут між віссю Світу PP_1 і прямовисною лінією, що вимірюється дугою PZ , рівний $90^\circ - \varphi$, де φ - астрономічна широта точки A .

1.6.1. Зв'язок між горизонтною (z і a) і першою екваторіальною (δ і t) системами координат.



Так як горизонтні координати залежать від місця спостереження, то при встановленні зв'язку між вказаними координатами широту φ точки A необхідно вважати відомою.

Дано координати в першій екваторіальній системі (δ, t); необхідно обчислити горизонтні координати (z, a).

З трикутника $PZ\delta$ маємо

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (1.1.6.1)$$

Згідно формули косинуса сторони сферичного трикутника косинус сторони сферичного трикутника дорівнює добутку косинусів двох других його сторін плюс добуток синусів тих же сторін на косинус кута між ними.

На основі формули добутку синуса сторони на косинус прилеглого кута (формула п'яти елементів): добуток синуса сторони на косинус прилеглого кута дорівнює добутку косинуса протилежної цьому куту сторони на синус третьої сторони без добутку синуса протилежної сторони на косинус третьої і на косинус кута між ними:

$$\sin Z \cos a = \cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t \quad (1.1.6.2)$$

На основі формули синусів: синуси сторін сферичного трикутника пропорційні синусам протилежних кутів:

$$\frac{\sin Z}{\sin t} = \frac{\sin (90^\circ - \delta)}{\sin (360^\circ - a)}$$

Звідки

$$\sin Z \sin a = \cos \delta \sin t \quad (1.1.6.3)$$

Розділивши (1.1.6.3) на (1.1.6.2), отримаємо:

$$\operatorname{tg} a = - \frac{\cos \delta \sin t}{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t} \quad (1.1.6.4)$$

Формули (1.6.1) і (1.6.4) рішають задачу.

Трикутник **PZδ** називається **паралактичним** трикутником і має важливе значення при рішенні багатьох задач сферичної і практичної астрономії. Кут трикутника при світилі **δ** називається **паралактичним кутом** і позначається через **q**.

Задача 1. Обчислити висоту і азимут Місяця в точці з координатами

$$\varphi_A = 40^\circ 13' N, \quad \lambda_A = 49^\circ 40' E, \quad t = 353.86608^\circ, \quad \delta = 12.600503^\circ.$$

$$\text{Відповідь: } h_a = 61.861045^\circ = 61^\circ 51.7'; \quad Z = 28^\circ 08. '20'' 26, \quad A = 167^\circ 13' 32'' 9.$$

Задача 2. Обчислити висоту і азимут зірки **α** Кассіопеї при

$$\varphi_A = 40^\circ 18,5' N, \quad \lambda_A = 14^\circ 31' W, \quad t = 311.11608^\circ, \quad \delta = 56.48539^\circ.$$

$$\text{Відповідь: } h_A = 54.709203^\circ = 54^\circ 42.6'; \quad Z = 28^\circ 08. '20'' 26,$$

$$a = 46.056595^\circ = 46^\circ 03.4'.$$

Програма розрахунку горизонтальних координат ZiA по екваторіальним δ і t.

F _{ПРГ}	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
00	с/п	K _{0ПГ} →	хп1	F sin	хп2	с/п	K ₀₁₁₁ →	хп3	F sin	хп4
10	х	хп6	с/п	K ₀₁₁₁ →	хп7	F cos	хп8	хп1	F cos	хпс
20	х	пх3	F cos	хп9	X	+	F cos ₁	хпа	K ₀₁₁₁ ←	с/п
30	9	0	пха	-	K ₀₁₁₁ ←	с/п	хп2	пх9	х	пх8
40	х	пхс	хп4	х	-	пха	F sin	°	1 - 1	Fcos ⁻¹
50	хпв	пх7	F sin	хп4	Fх<0	61	хпв	K ₀₁₁₁ ←	с/п	БП
60	68	3	6	0	Хпв	-	K ₀₁₁₁ ←	с/п	пх9	пх5
70	х	пха	F sin	°	F sin ⁻¹	K ₀₁₁₁ ←	с/п	F	АВТ	

Робочі формули програми:

$$Z_c = \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t)$$

$$n_c = 90^\circ - Z_c$$

$$a = \arccos(\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t / \sin z)$$

$$t < 180^\circ \quad A = 360^\circ - a$$

$$t > 180^\circ \quad A = a$$

Контрольна формула:

$$a = \arcsin(\cos \delta \sin t / \sin z)$$

Протокол розрахунку за програмою:

№ п/п	Введення даних	Результат	Позна - чення	№ п/п	Введення даних	Результат	Позна - чення
1	в/о с/п			1	в/о с/п		
2	40° 13' с/п		φ	2	40° 18' 30'' с/п		φ
3	12° 36' 01,81'' с/п		δ	3	56° 29' 07.4'' с/п		δ
4	353° 51' 57,9'' с/п		t	4	311° 06' 57.9'' с/п		t
5		28° 08' 20,26'' с/п	z	5		35° 17' 26.82'' с/п	z
6		61° 51' 39,74'' с/п	h	6		54° 42' 33.18'' с/п	h
7		167° 13' 32,20'' с/п	A	7		46° 03' 23.69'' с/п	A
8		-12° 46' 27,82''	a контр. рез-т.	8		-46° 03' 23.84'' с/п	a контр. рез-т.

1.1.6.2. Зв'язок між першою і другою екваторіальними системами координат .

Ці системи мають загальну координату δ – схилення світила. Необхідно знайти тільки зв'язок між α і t .

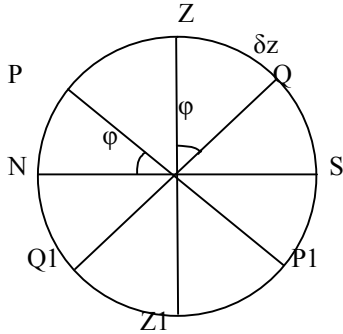


Рис.5.

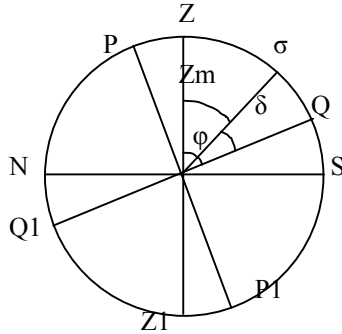


Рис.6.

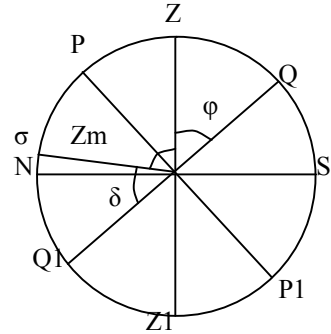


Рис.7.

З рис.4. маємо

$$t_\gamma = t + \alpha \tag{1.1.6.2.1}$$

де t_γ - часовий кут точки весняного рівнодення.

Дальше буде показано, що часовий кут точки весняного рівнодення t_γ дорівнює зоряному часу s в момент спостереження в даній точці. Тому рівняння (1.1.6.2.1) може бути переписано так:

$$s = \alpha + t \tag{1.1.6.2.2}$$

1.1.6.3. Деякі залежності між астрономічними і географічними координатами.

а) З Рис.5. видно, що дуги PN і ZQ вимірюються дугою, рівною географічній широті ϕ ; тому, висота полюса над горизонтом h_p рівна схиленню точки зеніту δ_z і рівна географічній широті місця спостереження

$$h_p = \delta_z = \phi \tag{1.1.6.2.3}$$

б) На Рис.6. показано положення світила δ в момент його проходження через меридіан, тобто в момент верхньої кульмінації. Якщо позначити через Z_m зенітну віддаль світила δ у верхній кульмінації, то маємо:

$$\phi = \delta + Z_m \tag{1.1.6.2.4}$$

Зробивши аналітичну побудову, можна побачити, що при кульмінації світила на південь від екватора і точки зеніту (δ від'ємне) також маємо:

$$\phi = \delta + Z_m \tag{1.1.6.2.5}$$

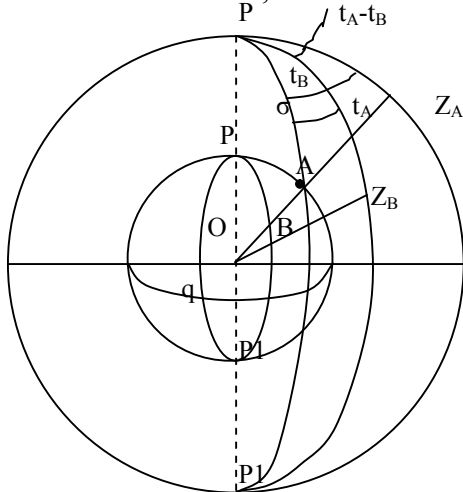
При верхній кульмінації світила між точками Z і P

$$\phi = \delta - Z_m \tag{1.1.6.2.6}$$

Для нижньої кульмінації світила (Рис.7.) маємо:

$$\phi = 180^\circ - (\delta + Z_m) \tag{1.1.6.2.7}$$

в) Різниця довгот двох точок земної поверхні дорівнює різниці годинних кутів одного і того ж світила, визначених в один і той же момент в цих двох точках.



На Рис.8. зображена допоміжна небесна сфера, в центрі якої знаходиться земна куля. Візьмемо на поверхні земної кулі дві точки A і B , розташованих на різних меридіанах, що мають довготи λ_A і λ_B . Візьмемо деяке світило δ ; часові кути його діл точок A і B в один фізичний момент, нехай будуть t_A і t_B ; OAZ_A і OBZ_B - прямовисні лінії в точках A і B , продовжені до пересічення з небесною сферою. З Рис.8. видно, що площини земних меридіанів, які проходять через точки A і B

співпадають з площинами небесних меридіанів в цих же точках.

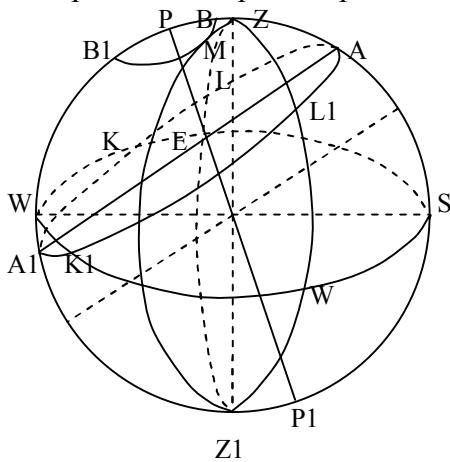
Рис.8. Таким чином, кут між площинами земних меридіанів, рівний різниці довгот цих меридіанів, дорівнює куту між площинами небесних меридіанів, тобто різниці часових кутів світила в один і фізичний момент, тобто:

$$\lambda_A - \lambda_B = (t_A - t_B) \quad (1.1.6.2.8)$$

1.1.6.3. Зміни координат від добового руху.

1.1.6.3.1. Зміни горизонтних координат Z і a .

Горизонтальні координати всіх світил – зенітна віддаль Z і азимута a на протязі доби безперервно змінюються внаслідок видимого руху небесної сфери, причому ця зміна проходить нерівномірно.



Нехай видимий рух деякого світила проходить по добовій паралелі AA_1 (Рис.9). У східній частині неба, в точці K світило має зенітну віддаль рівну 90° і деякий азимут. В ході добового руху зенітна віддаль зменшується, досягаючи **мінімуму** в той момент, коли світило проходить меридіан в точці A ; в цей момент азимут світила рівний нулю (якщо воно на південь від точки зеніту).

Після проходження меридіан зенітна віддаль починає збільшуватись, і в момент проходження через площину горизонту в точці K знову досягає 90° ; в точці A_1 , в момент нижньої кульмінації, азимут світила дорівнює 180° , а зенітна віддаль досягає максимальної величини. Потім світило рухається по напрямку до точки K , і його зенітна віддаль знову зменшується. Така картина повторюється щодоби.

Рух світила по добовій паралелі AA_1 проходить рівномірно, але зміна координат Z і a проходить нерівномірно. Диференціюючи формули (1.1.6.1) і (1.1.6.2), отримаємо аналітичний вираз для зміни Z і a , які приведемо у кінцевому вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta z &= 15 \cos \varphi \sin a \Delta t \\ \Delta a &= 15 (\sin \varphi + \cos \varphi (\cos a / \operatorname{tg} z)) \Delta t \end{aligned} \quad (1.1.6.3.2)$$

або

$$\Delta a = 15 (\cos \delta \cos q / \sin z) \Delta t \quad (1.1.6.3.3)$$

де Δz і Δa виражені у дуговій мірі, а Δt - у годинниковій мірі.

Із даних формули видно, що швидкість зміни **зенітної віддалі** досягає **мінімуму в момент верхньої і нижньої кульмінації**, а швидкість зміни азимута досягає максимуму в момент верхньої кульмінації, швидкість же зміни зенітної віддалі досягає максимуму при проходженні світила через перший вертикал.

Розглянемо зміну горизонтальних координат для випадку коли верхня кульмінація проходить на меридіані може полюсом і точкою зеніту, наприклад в точці B , а добова паралель зображується кругом BB_1 . В цьому випадку зенітна віддаль в загальному змінюється так, як і в попередньому випадку. Але в зміні азимута є **суттєва різниця**: в момент верхньої кульмінації в точці B азимут світила рівний 180° , а не 0° . При добовому русі азимут зменшується, досягаючи свого мінімального значення в деякій точці M , в якій вертикал ZMZ_1 буде дотикатися добової нормалі світила. Це

положення світила називається **елонгацією** світила (вданому випадку – західною елонгацією). Після проходження світила через точку елонгації азимут його починає збільшуватися і при досягненні нижньої кульмінації знову стає рівним 180° . Аналогічна картина буде спостерігатися і в східній стороні неба, але в цьому випадку зміни азимута будуть оберненими. Внаслідок дотику вертикала ZMZ_1 добові паралелі BMB_1 в момент елонгації паралактичний кут $q = PMZ$ рівний 90° .

Із описаного ходу зміни азимута світила, що має елонгацію, слідує, що в момент елонгації зміна азимута світила рівна нулю, що також видно з формули (1.1.6.3.3). із Рис.9 видно, що світило має елонгацію при

$$\delta > \varphi \quad (1.1.6.3.4)$$

1.1.6.3.2. Зміна координат першої екваторіальної системи.

Схилення δ світла від добового руху небесної сфери не залежить, тому що рух світила проходить по добовій паралелі, всі точки якої мають однакове схилення.

Друга координата – часовий кут світила - змінюється; як було зазначено раніше, зміна t проходить на протязі доби рівномірно, від 0° до 360° або від 0° до 24^h . В момент проходження через меридіан у верхній кульмінації годинний кут світил рівний нулю. Годинний кут відраховується від меридіана, тому, він залежить від довготи місця і не залежить від широти.

1.1.6.3.3. Зміна координат другої екваторіальної системи.

Координати цієї системи при добовому обертанні небесної сфери не змінюється. Про постійність схилення при добовому обертанні небесної сфери було сказано вище. Пряме піднесення α від добового обертання небесної сфери також не залежить, тому що ця координата відраховується від точки весняного рівнодення, яка має видиме добове обертання, як і всі небесні світила.

Таким чином, положення світил відносно точки весняного рівнодення не змінюється.

Так як ця система координат не зв'язана з горизонтом і меридіаном місця, то вона не залежить від широти і довготи місця спостереження.

1.1.6.4. Проходження світил через деякі основні круги небесної сфери.

Задача заключається у визначенні часу, зенітної віддалі і азимута світила при проходженні його через заданий круг небесної сфери. Розглянемо проходження світила через меридіан, перший вертикал і точку елонгації.

1. Проходження світила через меридіан. Світило два рази на добу проходить через меридіан у верхній і нижній кульмінації.

У верхній кульмінації:

а) якщо світило кульмінує на південь від точки зеніту, тобто $\delta > \varphi$, то при проходженні світила в меридіані $t = 0$ і на основі формули (1.1.6.2.2)

$$s = \alpha \quad (1.1.6.4.1)$$

На основі формули (1.1.6.2.4), отримаємо

$$\begin{aligned} Zm &= \varphi - \delta \\ a &= 0 \end{aligned} \quad (1.1.6.4.2)$$

б) Якщо світило кульмінує між точками полюса і зеніту, то, як і раніше

$$s = \alpha \quad (1.1.6.4.3)$$

На основі формули (1.1.6.2.6), отримаємо

$$\begin{aligned} Zm &= \delta - \varphi \\ a &= 180^\circ \end{aligned} \quad (1.1.6.4.4)$$

В нижній кульмінації:

$$s = \pm 12^h \quad (1.1.6.4.5)$$

На основі формули (1.1.6.2.7), отримаємо

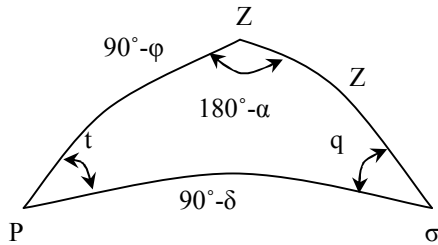
$$Z m = 180^\circ - (\varphi + \delta)$$

$$a = 180^\circ$$

(1.1.6.4.6)

2. Проходження світила через перший вертикал.

При проходженні світила через перший вертикал маємо: в західній частині небесної сфери $a_w = 90^\circ$, у східній - $a_E = 270^\circ$.



З паралактичного трикутника $PZ\delta$, приймаючи $\alpha = 90^\circ$, маємо:

$$\cos t = (\sin \delta / \sin \varphi)$$

(1.1.6.4.7)

Тому що у прямокутному трикутнику косинус середнього елемента дорівнює добутку котангенсів крайніх, суміжних з ним.

Рис.10.

При цьому прямий кут не приймається до уваги, а замість катетів приймається їх рівність до 90° . Косинус окремо стоячого елемента прямокутного сферичного трикутника дорівнює добутку синусів елементів, не суміжних з ним.

На основі формули (1.1.6.2.2), отримаємо для західної частини небесної сфери

$$S_w = \alpha + t$$

(1.1.6.4.8)

Для східної частини небесної сфери

$$S_E = \alpha - t$$

(1.1.6.4.9)

В даному випадку під t мається на увазі абсолютне значення кута, яке слід вважати додатним у західній частині і від'ємним – у східній частині; цим і пояснюється знак мінус в останній формулі.

3. Елонгація світила.

При елонгації світила $q = 90^\circ$, тому паралактичний трикутник є прямокутником з прямим кутом при вершині δ . З цього трикутника маємо:

$$\cos t = (\operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg} \delta)$$

$$\cos z = (\sin \varphi / \sin \delta)$$

(1.1.6.4.10)

$$\sin a' = (\cos \delta / \cos \varphi)$$

де $a' = 180^\circ - \alpha$. Далі, як і раніше

$$S_w = \alpha + t$$

$$S_E = \alpha - t$$

(1.1.6.4.11)

Азимути зірок в моменти західної і східної елонгації розташовуються за формулами:

$$a_w = 180^\circ + a'$$

$$a_E = 180^\circ - a'$$

(1.1.6.4.12)

Завдання до дому: Зарисувати карту зоряного неба. N варіанта = N місця. Формат А3.

Лекція 2. Прилади для вимірювання і реєстрації часу.

2.1. Загальні поняття.

Астрономічні визначення географічних координат і азимута із спостереження світил, безперервно змінюючих своє видиме положення в просторі, в результаті добового обертання Землі, виконуються в певній системі обліку часу.

Практично ця система враховується за допомогою спеціальних приладів вимірювання часу.

Для точних астрономічних визначень в стаціонарних умовах обсерваторії до недавнього часу застосовувались точні маятникові годинники, які в даний час замінені більш доскональними кварцовими і атомними годинниками.

Для астрономічних визначень в астрономо – геодезичній мережі ще застосовуються звичайні механічні хронометри і лише в останні часи вони стали витіснятись більш точними польовими кварцовими годинниками і хронометрами.

Для визначення пунктів спеціального призначення, а також для наближених хронометрів, широке застосування мають двострілочні секундоміри і кишенькові годинники підвищеної точності.

Визначення поправки годинника (тобто величини, яку необхідно придати до показів годинника в деякій момент, щоб отримати вірний час в прийнятій системі рахунку) відносно місцевого середнього, або зоряного часу виконується із спостережень світил. Методами і способами, які будуть розглянуті пізніше.

Визначення поправки годинника відносно часу початкового меридіану, а також визначення ходу годиннику (величини, яка характеризує зміну поправки годинника за одиницю часу) в деякий час звичайно виконують із прийому радіосигналів точного часу, які передаються радіостанціями по спеціальній програмі.

2.2. Хронометр.

Хронометром називається прилад для точного виміру часу. Хронометр, який застосовується при астрономічних роботах, називають *настольним*, тому що для спостережень він встановлюється на столі або на стовпі поруч з спостерігачем. Настільні хронометри, закріплені на карданному підвісі в спеціальному ящику, широко використовуються моряками для астрономічного визначення місцеположення корабля. Тому іноді такі хронометри називають також *морськими*.

Хронометр був винайдений англійським годинникарем Гаррісоном в 1734 – 1768 рр. За минувши двісті років дещо змінився загальний вигляд цього приладу, змінилась якість і технологія виготовлення окремих його частин, але принципова схема приладу залишилась майже без змін.

Основними частинами хронометра являються: регулятор або маятник, передаточний механізм або спуск, лічильник, двигун, контактний пристрій.

Хронометр – точний астрономічний прилад, від якості якого залежать якість і точність астрономічних визначень географічних координат і азимута напрямку.

При роботі з ним необхідно дотримуватись слідуєчих правил:

При перенесенні слід оберегти хронометр від поштовхів і різких поворотів, тому що при необережних рухах балансір може одержати деякий розмах, що спускове колесо перескочить через один – два зубців і в показаннях хронометра буде загублена половина або ціла секунда. Необхідно слідкувати, щоб циферблат хронометра завжди мав горизонтальне положення.

Перевозити хронометри необхідно в спеціальних амортизованих ящиках з м'якою оббивкою всередині. Необхідно приймати всі можливі міри щодо того, щоб при

перевезенні не було сильних поштовхів, тряски, ударів. На час переїздів зупиняти хронометри не рекомендується.

При роботі заводити хронометр необхідно кожен день в один і той же час. Робота на одних і тих же частинах пружини двигуна забезпечує найбільшу постійність ходу. Без необхідності не слід переставляти стрілки, а рухати їх проти ходу категорично забороняється. Не слід без потреби відкривати механізм хронометра, тому що при цьому можливе проникнення пилу, що призводить до згущення змазки.

Компенсація хронометра досягається в межах температур від 0° до 40° С, слід запобігати тривалій дії холоду і сонячного проміння. При згущенні змазки під дією холоду хронометр взагалі може зупинитись. Всяка різка зміна температури веде до значного коливання ходу.

Для забезпечення довгої роботи хронометра слід міняти змазку через кожні 2 – 3 роки, тому що змазка згущається і старіє, що може погано відбитись на роботі хронометра.

2.3. Поняття про кварцовий годинник. Польовий кварцовий хронометр ПКХ – 4.

В кінці вісімнадцятого століття був відкритий п'єзоелектричний ефект деяких кристалів, наприклад кварцу, сечнетової солі і т.д.

Суть цього ефекту в тому, що при стиску або розтягу кристалів у визначених напрямках на її границях виникають електричні заряди. І, навпаки, якщо кристал помістити у змінне електричне поле, то під дією цього поля він почне стискуватись і розтягатись, тобто виконувати пружні коливання у визначених напрямках.

Дослідженнями встановлено, що амплітуда пружних коливань пластинки або кільця кварцу досягає найбільшого значення при резонансі, тобто при рівності частоти власних коливань кварцу. При визначених умовах частота таких коливань відрізняється високою стабільністю.

В 1929 році п'єзоелектричний ефект кварцу вперше був застосований для виготовлення годинників, які називали *кварцовими*. Роль маятника в цих годинниках грає пластинка з кристалу кварцу, поміщена в електричне поле. В кварцових годинниках застосовують високочастотні кварцові елементи з частотою до 10^{-6} - 10^7 періодів в секунду, володіючи малим декрементом затухання. Виникаючими коливаннями кварцу встановлюється частота генератора змінного струму, що живить спеціальний синхронний мотор, який приводить в дію часовий механізм.

Польовий кварцовий хронометр ПКХ – 4 представляє собою переносний кварцовий годинник з економічним живленням і застосовується для астрономічних визначень широт, довгот і азимутів на пунктах астрономо – геодезичної мережі. ПКХ – 4 має часовий механізм, який дає показання в годинах, хвилинах і секундах. Він має секундний контакт з хвилинною маркою для реєстрації показань хронометра на стрічці хронометра. Хід ПКХ – 4 відрегульований по зоряному часу.

Основними частинами приладу є:

- Кварцовий генератор в термосі з частотою 100274 Гц , що відповідає 100000 періодам в зоряну секунду;
- Перетворювач форми сигналів генератора;
- Дільник частоти з 100000 до 2 періодів в зоряну секунду;
- Електронне реле приводу годинникового механізму;
- Кроковий годинниковий механізм;
- Внутрішня батарея резервного живлення із сухих елементів;
- Вимірюючий прилад з перемикачем для контролю напруги джерел живлення і роботи генератора.

2.4. Експедиційний кварцовий хронометр “Альтаір”.

Експедиційний кварцовий хронометр “Альтаір” призначений для вироблення координованого часу. *Хронометр забезпечує:*

- Збереження координованого часу;
- Видачу на зовнішні розйоми сигналів часу і частоти;
- Управління рееструючими пристроями МПУ8 – ЗІ ХМП – 3;
- Автоматичне і ручне фазування показів хронометра по радіосигналам часу;
- Визначення поправки до показів хронометра відносно сигналів часу.

2.5. Двохстрілочний секундомір і палубний годинник.

При визначенні географічних координат і азимута напрямку на пунктах спеціального призначення, а також для наближених астрономічних визначень замість хронометра можна застосовувати двох стрілочний секундомір 51СД або морський палубний годинник ГП.

Двохстрілочний секундомір 51СД представляє собою годинниковий механізм з вільним анкерним ходом.

Циферблат секундоміра має дві шкали: зовнішню – секундну і внутрішню – хвилину. Секундна шкала розділена на тридцять великих секундних ділень, кожне з яких розділене на 10 малих. Ціна малого ділення шкали рівна $0,1^s$. Хвилинна шкала також розділена на 30 великих хвилиних ділень. Ціна малого ділення хвилиної шкали рівна $0,5^m$. Секундомір має три стрілки: хвилину і дві секундні – основну (чорну) і допоміжну (червону).

Палубні часи (ЧП) – це кишенькові часи підвищеної точності з анкерним ходом. Балансир палубного годинника компенсаційний. Годинник відрегульовані по середньому часу.

2.6. Поправка і хід хронометра (годинника, секундоміра).

Поправкою хронометра називається величина U , яку необхідно прибавити до показника хронометра T , щоб отримати точний час.

Поправкою хронометра в деякий момент часу називається різниця між часом в прийнятій системі рахунку і показами хронометра T в даний момент:

$$U' = S - T$$

$$U = m - T$$

де S - місцевий зоряний час; m - місцевий середній час.

Визначити поправку хронометра – значить визначити час у цей момент.

Поправку хронометра в системі місцевого зоряного чи середнього часу визначають із спостережень зірок і Сонця. Якщо відома довгота пункту λ , то поправку хронометра відносно місцевого зоряного чи середнього часу можна також визначити із прийому радіосигналів часу. Поправку хронометра в системі всесвітнього чи грінвічського зоряного часу можна визначити із прийомів радіосигналів часу незалежно від знання довготи пункту.

Поправку хронометра не залишається постійною, а змінюється з ходом часу. Тому завжди слід вказувати момент T по хронометру, для якого знайдена його поправка.

Зміна поправки хронометра за одиницю часу називається ходом хронометра.

Для визначення середнього значення ходу хронометра ω в інтервалі часу, обмеженому показниками хронометра T_1 і T_2 необхідно знати поправки хронометра U_1 і U_2 в ці моменти. Тоді хід хронометра визначається формулою:

$$\omega = (U_2 - U_1 / T_2 - T_1)$$

Якщо інтервал часу $T_2 - T_1$ визначити в добах, годинах чи десятках хвилин, то у відповідності з цим хід називається добовим, годинним або десятихвилинним.

Знак ходу хронометра визначається знаком різниці $U_2 - U_1$, тому що проміжок часу $\tau = T_2 - T_1$ між двома послідовними моментами T_1 і T_2 завжди додатній.

Якщо знак ходу від'ємний, тобто $U_2 - U_1 < 0$, то це означає, що поправка з ходом часу зменшується ($U_2 < U_1$) і хронометр іде вперед.

Обчислення нової величини U по видимим величинам U_1 і ω називають передачею поправки на другий момент. Тоді

$$\omega = (U - U_1 / T - T_1)$$

Звідки

$$U = U_1 + \omega (T - T_1)$$

Якщо момент T знаходиться в проміжку $T_2 - T_1$, для якого визначений хід ω по видимим значенням $U_2 - U_1$, то передача поправки на момент T виконана інтерполюванням; якщо ж момент T лежить за межами проміжку $T_2 - T_1$, то така передача виконується екстраполюванням.

Точність передачі поправки хронометра інтерполюванням вище точності передачі екстраполюванням, тому що немає впевненості в постійності ходу за межами проміжку $T_2 - T_1$, на якому він визначався. Тому передачу поправки хронометра екстраполюванням в практиці точних астрономічних визначень, як правило, не застосовують.

Лабораторна робота № 2. Лічба часу.

В астрономічних щорічниках, зокрема в “Астрономічному календарі”, використовуються різні системи відліку часу (динамічний, всесвітній, місцевий, зоряний).

Земний динамічний час **TDT** вживається (з 1986 р.) як аргумент видимих геоцентричних ефемерид. Для диференціальних рівнянь теорії руху Сонця, Місяця та планет Сонячної системи був запропонований як аргумент барицентричний динамічний час **TDB** (різниця між цими шкалами є величина, що періодично змінюється). Отже, в табл. 1 Астрономічного календаря (АК) треба було б писати - “0 год земного динамічного часу”, але для спрощення позначення “земний” не вживається.

З 1960 р. (і до 1986 р.) основним аргументом ефемеридний час T_e , а до 1960 р. – всесвітній час T_v , тобто гринвіцький середній час. Різниця між ефемеридним та всесвітнім часом визначалась з спостережень за рухом Місяця, а наближене її значення знаходили екстраполяцією. Земний динамічний час **TDT** за своїм фізичним змістом практично збігається з ефемеридним часом T_e , тому можна записати співвідношення $T_e - T_v = TDT - T_v$. Для 1999 р. воно дорівнює наближено 66 сек.

Під терміном “**місцевий час**” розуміється не той час, яким ми користуємось у повсякденному житті і який відлічують наші годинники. Останній зветься поясним часом T_n . **Місцевий середній час** T визначається за положенням середнього Сонця на небі відносно місцевого меридіану і буде різним для різних місць земної поверхні. Наприклад, для двох пунктів з однією й тією ж широтою (припустимо, $\varphi = 50^{\circ}25'$), для віддалених в напрямку схід – захід приблизно на **300 м, різниця місцевого часу дорівнюватиме 1с.**

Гринвіцький зоряний час S визначається за положення точки весняного рівнодення на небі відносно гринвіцького меридіану, місцевий зоряний час S – відносно місцевого меридіану.

Залежність між T, T_v, T_n така

$$T = T_v + \lambda \tag{2.1}$$

де λ – довгота місця, додатна на схід (широти і довготи деяких міст України і Канади подано в табл.52);

$$T_{\Pi} = T_{\text{в}} + Z \quad (2.2)$$

$$T_{\Pi} = T + (Z - \lambda) \quad (2.3)$$

де Z - номер часового поясу.

У момент місцевого часу T зоряний час

$$S = S_0 + T + 9,86 (T - \lambda) \quad (2.4)$$

де S_0 - гринвіцький зоряний час в 0 год всесвітнього часу для відповідної дати (його подано в табл. 1); різницю $(T - \lambda)$ треба брати в годинах, тоді добуток одержуємо в секундах.

Наближено, з точністю 3 – 5 хв, зоряний час у момент T_{Π} для України можна знайти за формулою:

$$S = T + 2N + \lambda - 21,4_{\text{год}} \quad (2.5)$$

де N – де десятковий дріб, цілою частиною якого є порядковий номер місяця у році, а дробового – частка місяця, яка визначається заданим числом.

Якщо даний місяць передує вересневі, то N треба збільшити на 12. Наприклад, для 12 березня $N = 15,4$, бо березень - третій місяць року й передує вересневі, а число 12 становить 0,4 місяця; для 20 жовтня $N = 10,7$.

Для Києва ($\lambda = 2$ год 2 хв), подана вище формула має вигляд:

$$S = T_{\Pi} + 2N - 19,4 \quad (2.6)$$

або

$$S = T + 2N - 19,4 \quad (2.7)$$

При цьому S отримуємо в годинах.

Приклад. Щоб знайти для Києва ($\lambda = 2$ год 2 хв) зоряний час 14 січня 1999 року у момент $T = 10$ год 55 хв 01 с виписуємо з ефемеридної частини календаря (табл. 1) для 14 січня $S_0 = 7$ год 32 хв 04 с, вираховуємо $(T - \lambda) = 8$ год 53 хв 01 с = 8,88 і $9,86 (T - \lambda) = 88$ с = 1 хв 28 с, тоді $S = 7$ год 32 хв 04 с + 10 год 55 хв 01 с + 1 хв 28 с = 18 год 28 хв 33 с.

За формулою (2.7) одержуємо $S = 10,9 + 2(1,5 + 12) - 19,4 = 18,5$ год.

За величинами рівняння часу η , що їх подано в табл. 1, можна знайти істинний сонячний час $T_{\text{іст}}$ у момент місцевого часу T

$$T_{\text{іст}} = T - \eta \quad (2.8)$$

або, визначивши за сонячним годинником $T_{\text{іст}}$ знайти відповідний йому момент T :

$$T = T_{\text{іст}} + \eta \quad (2.9)$$

1 квітня 1981 р. стрілки годинників у нашій країні було переведено на 1 год вперед відносно декретного часу. То був запроваджений так званий **літній час**, який діяв до 1 жовтня. Таке переведення стрілок здійснювалося щорічно, але в 1984 р. цей порядок змінили: стрілки годинників треба було переводити на годину вперед в останню неділю березня 2 год, а назад – в останню неділю вересня о 3 год. З 1 липня 1990 р. в Україні був скасований декретний час, тобто відтепер в осінньо – зимовий період ми живемо за часом другого часового поясу.

Постановою Кабінету Міністрів України від 13.05.96 р. введено новий порядок обчислення часу: годинникову стрілку будуть переводити на 1 год вперед в останню неділю березня 3 години, а а назад – в останню неділю вересня о 4 години. У 1999 році це були 28 березня і 31 жовтня.

У таблиці – календарі наведено ще юліанські дні, тобто безперервний лік днів, починаючи з 12 год 1 січня 4713 р. до н.е. Останні мають дробову частину, оскільки початкові моменти календарних дат і юліанських днів відрізняються на 12 год. Кожна нова календарна дата починається опівночі (в середню північ). Щоб не відбувалась зміна дати під час нічних спостережень, астрономи вважали за початок середній полудень, а з 1925 р. вони теж перейшли на громадянський лік днів від середньої півночі. Однак для юліанських днів було вирішено продовжувати відлік від середнього гринвіцького полудня.

Завдання до дому : Підготувати кварцові ручні годинники до спостережень і визначити поправку і хід свого годинника з оформленням лабораторної роботи.

Лекція 3. Астрономічні прилади.

3.1. Загальні поняття.

Способи визначення широти, часу і азимута напрямку на земний предмет основані на вимірюванні зенітних віддалей світил або горизонтальних напрямків на світила, а також на різних варіаціях цих основних методів: на спостереження проходження світил через один і той же альмукантарат або вертикал, на вимірюванні малої різниці зенітних віддалей або горизонтальних кутів і т.д.

Різні методи астрономічних визначень, а також специфічні способи кожного з них привели до створення цілого ряду спеціалізованих астрономічних приладів для спостережень тим чи іншим способом.

Зараз існують наступні основні методи нульових астрономічних приладів:

- Астрономічний теодоліт;
- Зеніт – телескоп;
- Призмена астролябія;
- Насажний інструмент.

Для наближених астрономічних визначень застосовуються різні теодоліти середньої і малої точності, а в морехідній і авіаційній астрономії – сектанти. Необхідним приладом для астрономічних спостережень є хронометр або точний годинник, по якому фіксують моменти спостережень світил.

Спеціальними дослідженнями встановлено, що оцінка показань хронометра на слух в моменти візування на світило супроводжується значною систематичною особистою похибкою спостерігача, а також великими випадковими похибками спостережень.

Для послаблення їх впливу застосовують напівавтоматичні і автоматичні методи спостереження світил за допомогою спеціальних приладів: контактного мікрометра, контактного хронометра, хронографа, механізму для обертання верхньої частини теодоліта по азимуту труби по висоті.

В останні роки розроблений метод фотоелектричної реєстрації моментів спостереження зірок, повністю виключаючий особисті похибки спостерігача. При застосуванні цього методу замість контактної мікрометра для спостережень зірок використовується фотоелектрична установка, яка складається із фотоелектричної насадки на окулярну частину труби теодоліта, підсилювача фотоструму, спеціального хронографа і блока живлення.

3.2. Астрономічні теодоліти.

Найбільше застосування в практиці геодезичної астрономії на сучасному етапі має астрономічний теодоліт. Він застосовується для точних вимірів горизонтальних напрямків і зенітних віддалей світил, а також може застосовуватись для спостереження проходження світил через один і той же альмукантарат і через один і той же вертикал. За допомогою окулярного мікрометра труби теодоліта можна вимірювати малі різниці зенітних віддалей і малі різниці азимутів.

Таким чином, за допомогою астрономічного теодоліта можна виконувати визначення широти, часу і азимута напрямку всіма відомими способами астрономічних визначень.

Для забезпечення певної “універсальності” горизонтальний і вертикальний круги астрономічного теодоліта, як правило, мають однакові розміри, і відліки по ним виконуються з однаковою точністю.

Широко поширені в практиці астрономічних визначень способи, основані на принципі рівних висот (способи Цингера, Певцова, Маваєва) або на принципі вимірювання малої різниці зенітних віддалей двох зірок (спосіб Талькотта), дають можливість виконувати точні визначення широти і часу без безпосереднього вимірювання зенітних віддалей світил. Тому потреба в точно розподіленому вертикальному крузі для високоточних астрономічних робіт в значній мірі відпала.

Тому астрономічними теодолітами зараз називають і такі, у яких горизонтальний і вертикальний круги мають різні розміри і різну точність відліку.

Прикладом такого приладу є астрономічний теодоліт АУ2''/ 10'', який випускається заводом ЕОМЗ ЦНПГАіК, у якого найменша ділянка шкали мікроскопа – мікрометра горизонтального круга складає 2'', а точність відліку по вертикальному крузі 10''.

Таким чином, безвідносно до точності горизонтального чи вертикального кругів, астрономічним теодолітом називають такий прилад, за допомогою якого можна визначити всі елементи – широту, час, азимут напрямку найбільш поширеними способами теодоліт астрономічних визначень.

Специфічними особливостями сучасного астрономічного теодоліта в порівнянні з точними геодезичними кутомірними приладами є:

- Ламана центральна труба: за допомогою, якої можна виконувати спостереження світил і предметів на зенітних віддальх від 0° до 110 -120°, тобто практично на любых видимих зенітних віддальх;

- Вдосконалена оптика: до оптики здорових труб астрономічних теодолітів пред'являються підвищені вимоги, тому що при астрономічних спостереженнях використовується значна частина поля зору, а не тільки центр поля зору, як при геодезичних спостереженнях;

- Наявність точних рівнів: астрономічні теодоліти мають, як правило, три точних рівні: накладний (підвісний) на горизонтальну вісь труби теодоліта – для визначення її нахилу при вимірюванні горизонтальних напрямків; накладний на раму мікроскопів вертикального круга при вимірюванні зенітних віддалей, який закріплюється з горизонтальною віссю труби (Талькоттівський рівень) – для фіксації малих вимірів положення труби по висоті при спостереженнях способами рівних висот або способом Талькотта;

- Сітка ниток, яка складається з 7 – 9 рівновіддалених паралельних ниток і перпендикулярного до них рухомого бісектора окулярного мікрометра; коробка окулярного мікрометра разом з всіма нитками може повертатись на кут 90°;

- Електропідсвітка поля зору труби і мікроскоп – мікрометрів горизонтального і вертикального кругів для виконання астрономічних спостережень;

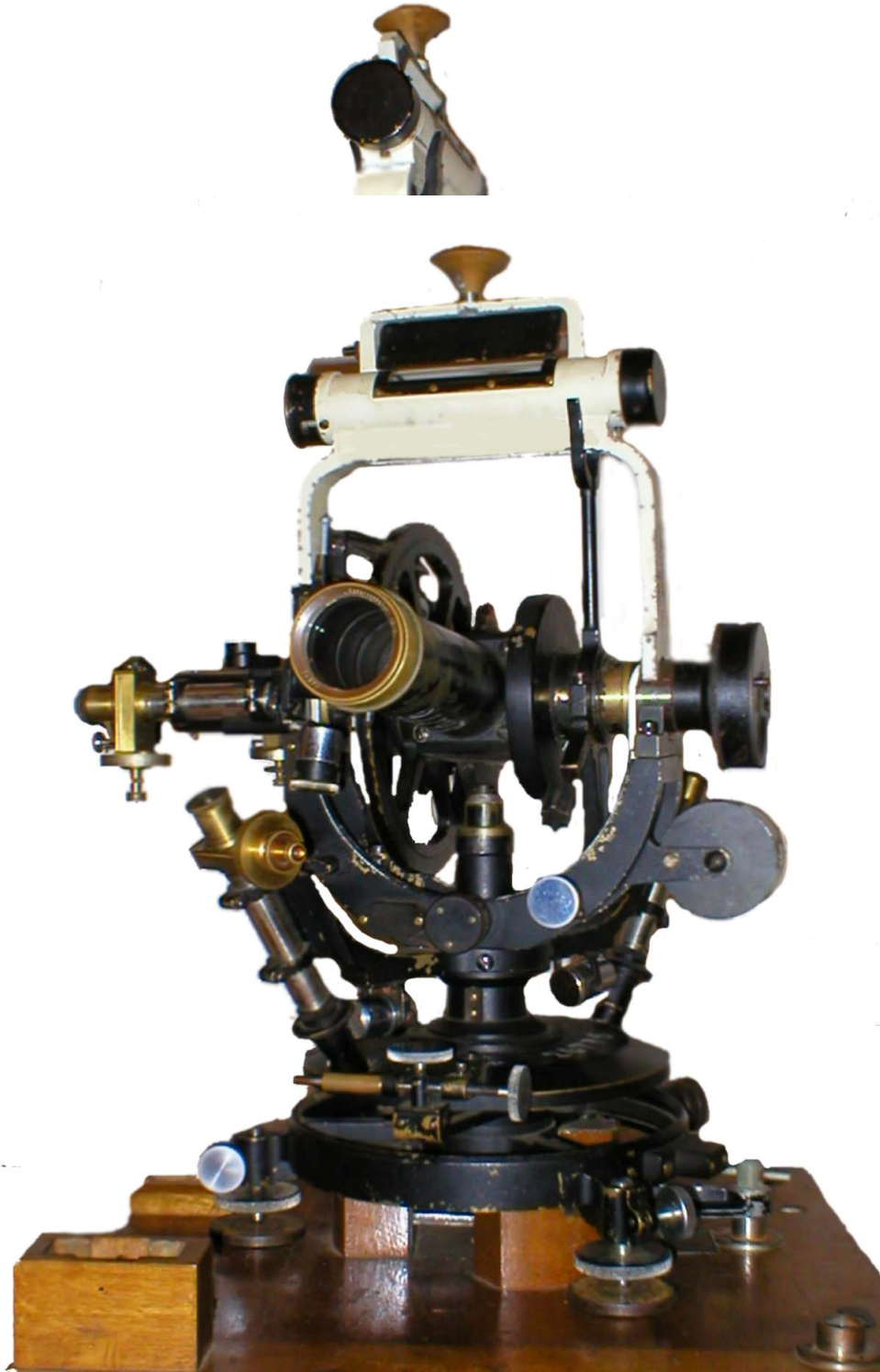
- Прилади для напівавтоматичних (або автоматичних) спостережень моментів проходження зірок: контактний мікрометр, електромоторний привід з редуктором для спостережень косих проходжень зірок.

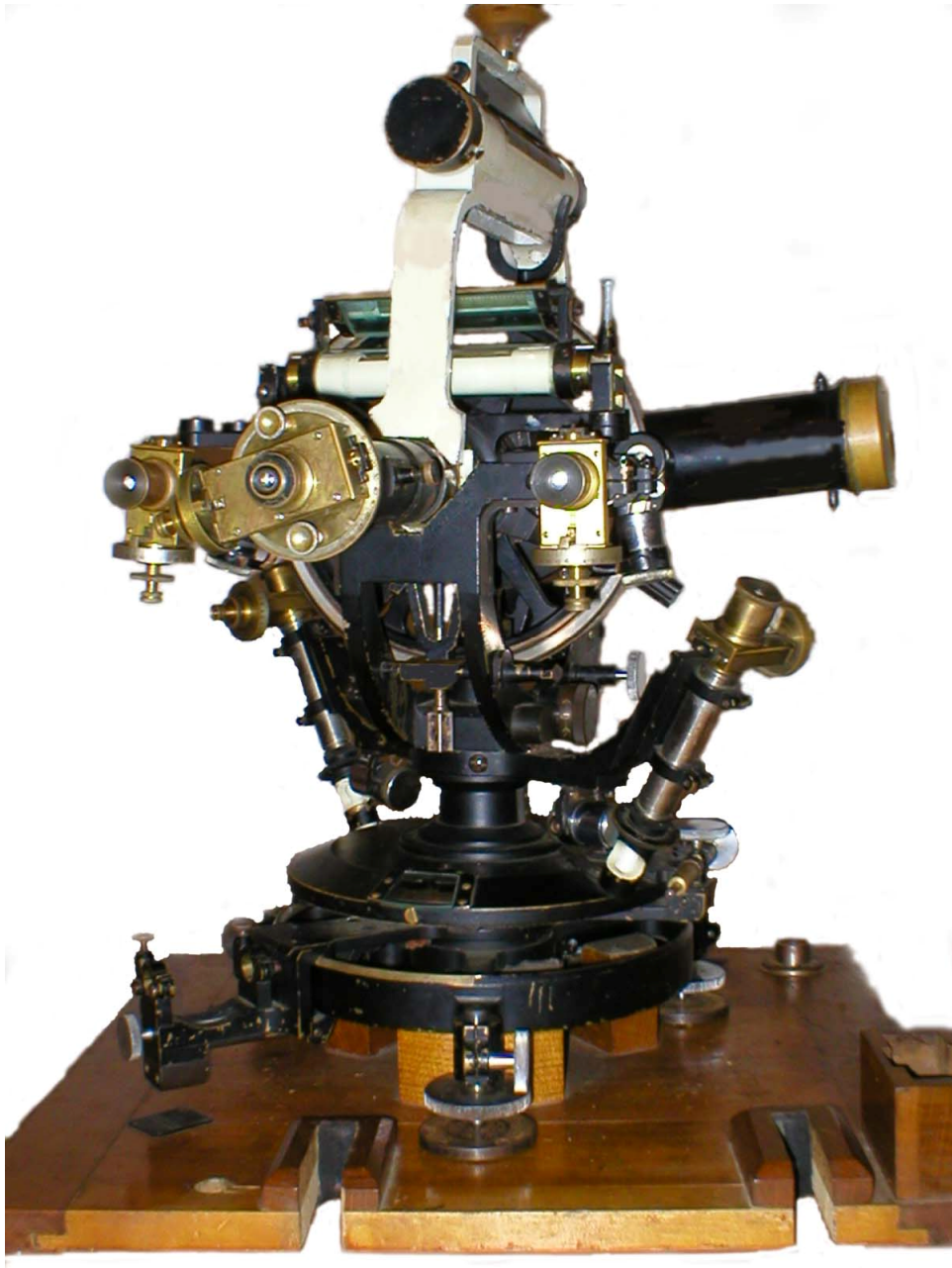
Для виконання астрономічних визначень на пунктах 1 і 2 класів астрономо – геодезичної мережі колишнього Союзу основними приладами були астрономічні теодоліти АУ2''/ 10'', АУ2''/ 2'' і У5. Крім того, Інструкція дозволяла також застосовувати астрономічні теодоліти відповідної точності іноземних фірм.

Лабораторна робота № 3. Вивчення будови астрономічного універсалу.

3.3. Астрономічний теодоліт АУ2''/ 10''.

Загальний вигляд астрономічного універсалу зі сторони об'єктива





Загальний вигляд астрономічного універсалу зі сторони окуляра.
Вверху – Талькоттовський рівень. Зорова труба ломана (кут=90°)



Вигляд астрономічного універсалу зі сторони, протилежній окуляру мікроскоп-мікрометра

Астрономічний теодоліт призначений для визначення широт, довгот і азимутів на пунктах геодезичної мережі 1 і 2 класів.

Головна труба теодоліта – центральна, ламана, об'єктив - двох лінзовий, просвітлений. Фокусна віддаль об'єктива 450 мм, діаметр вільного отвору 55 мм, дозволяюча властивість 2,6^{''}. Змінні окуляри з фокусними віддальми 10 і 8 мм дають збільшення головної труби 45 і 56^x. Поле зору труби 54['].

Вісь обертання труби (горизонтальна вісь теодоліта) в центральній частині має потовщення у формі куба. В середині цього куба поміщена трьохгранна скляна призма повного внутрішнього відображення. Одна грань призми звернена до об'єктива, друга – до окулярного кінця труби. Пучок світла проходить через об'єктив, падає на призму і, відбившись від її гіпотенузної грані, повертає в сторону окуляра. Предмет в полі зору труби зображується так, що верх виявляється знизу., зліва. Для встановлення грані призми перпендикулярно до оптичної осі труби в кубі є два юстировочні гвинти, які закручуються в оправу призми.

Освічується поле зору труби лампочкою, яка встановлюється в протилежному (“противовесняному”) кінці осі. В окуляр світило попадає через призмочку, закріплену на гіпотенузній грані поворотної призми. Фокусування труби проводиться вручну, шляхом переміщення окулярного коміна. Межі фокусування – від 5м до безмежності.

Діаметри цапф горизонтальної осі рівні 40 мм. Довжина осі між робочими січеннями цапф складає 252 мм. Для розвантаження робочих лагер на підставці труби є регульовані удавані (хибні) лагери з опорними роликами. Регулюванням пружин удаваних лагер досягають рівномірного тиску труби на кожну роботу лагера. Фасети робочих лагер мають плоску або циліндричну форму.

Окулярний мікрометр головної труби звичайної конструкції. Сітка ниток складається із семи нерухомих наукових ниток, натягнутих на рухомій каретці. Середня віддаль між нерухомими нитками біля 90^{''}. Дві із нерухомих ниток представляють собою бісектор. Кутова віддаль між нитками бісектора складає 25 – 30^{''}. Третя рухома нитка одинична. Вона віддалена від ближньої нитки бісектора на віддалі приблизно одного повороту головки окулярного мікрометра (біля 115^{''}). Головка мікрометра розділена на 100 ділень. Коробку мікрометра разом із сіткою ниток можна повертати на 90°.

Для визначення нахилу горизонтальної осі на її цапфи встановлюють **накладний рівень**, який підтримується на ній спеціальною вилкою. Ціна ділення 2 – 2,5^{''} на 2 мм шкали. Нерівність підставок труби може бути виправлена двома юстировочними гвинтами, розміщеними на одній із підставок.

Талькоттівський рівень закріплюється з горизонтальною віссю через хомутик, який має закріплені гвинт. Ціна ділення 1,2 – 2,0^{''} на 2 мм шкали. Рівень обладнаний елеваційним гвинтом для проведення бульбашки рівня на середину.

Вертикальна вісь теодоліта конічна, з опорою зверху. Верхня (опорна) частина осі має кульову поверхню. На цій поверхні лежить проміжна подушка, яка має знизу конічну виточку, а зверху площину, на яку опирається регулюючий гвинт з головкою – грибок. Обмежувальна (“ограничительная”) гайка, накручена на вертикальну вісь нижче кульової поверхні, уберігає баксу від роз'єднання з віссю. Наносючи тонкий шар спеціального масла на кульову поверхню і на вісь, можна добитися поворотом регулюючого гвинта такого зазору між віссю і баксою (втулкою), при якому верхня частина теодоліта буде обертатись легко і без коливань навколо вертикальної осі.

Лімб горизонтального круга діаметром 220 мм розділений через 5[']. Підписи ділень нанесені по годинниковій стрілці. Крім основного кільця ділень, є додаткове кільце, розділене через 1°, з підписами через 10°. Додаткове кільце служить для установки верхньої частини теодоліта по азимуту незброєним оком з точність до 0,1°

по індексу, розташованому в вікні кожуха алідади. Індекс можна перемішувати в невеликих межах, для чого необхідно послабити гвинти його кріплення. Переміщенням індексу встановлюють відповідність відліків по мікроскопам – мікрометрам відліку по індексу.

Горизонтальний круг можна переставляти за допомогою стержня з конічною шестернею, яку вводять в зачеплення з кільцевою рейкою.

Зробивши установку, круг закріплюють закріплюючим гвинтом. Горизонтальний круг закритий захисним кожухом алідади. Відліки по горизонтальному лімбу беруться за допомогою мікроскопів – мікрометрів. Трубки мікроскопів – мікрометрів ламані, мають збільшення 49^{\times} і ціпу ділення головки $2''$. Найменший інтервал лімба $5'$ рівний $2,5$ поворотам гвинта мікрометра. На рухомій каретці мікроскопа – мікрометра натягнуті два бісектори, віддаль між якими рівна двом поворотам навідного гвинта. Відлік числа поворотів гвинта виконується по гребінці, закріпленій на колодці і видимій в полі зору мікроскопа – мікрометра. При юстируванні мікроскопа – мікрометра гребінку можна перемішувати за допомогою гайки, яка знаходиться на боковій стінці коробки мікрометра.

Вертикальний лімб діаметром 135 має найменше ділення $5'$. Градусні ділення підписані по часовій стрілці. На алідаді вертикального круга закріплені відлікові мікроскопи з вертикальними шкалами. Шкала з номінальною точністю відліку $10''$ підписана від 0 до 30 через кожні 5 ділень. Збільшення мікроскопів 28^{\times} . Вертикальний круг закритий захисним кожухом, в якому є два круглих отвори для відліків по лімбу – на рамці мікроскопів вертикального круга закріпленій рівень з ціною приблизно рівний $8''$. Рівень має виправні гвинти для виправлення місця зеніта.

Повірочна труба – пряма, застосовується для спостережень азимута зі столика геодезичного сигналу. Вільний отвір об'єктива 36 мм, фокусна віддаль 360 мм. Збільшення повірочна труба 30^{\times} . Ціна повороту окулярного мікрометра рівна приблизно $140''$. Повірочна труба закріплюється в лагерах спеціальної каретки, яка може рухатись по азимуту в межах спектра між двома піднімальними гвинтами.

До комплекту теодоліта може надаватись рамний рівень конструкції Л.Б. Міщанського. звичайний накладний рівень дає можливість піднімати трубу до зенітної віддалі 17° - 20° . З рамним рівнем Міщанського можна виконувати азимутальні спостереження світил на зенітних віддальях від 0° до 52° .

До комплекту теодоліта також входять контактний мікрометр, штатив і дрібні деталі. Теодоліт укладають у два ящики. Для транспортування є спеціальні упаковочні ящики. Маса теодоліта без ящиків 37 кг (12 кг верхня частина і 25 кг нижня), в упаковочних ящиках 71 кг, в транспортних ящиках $127,5$ кг. Маса штатива з упаковочним ящиком $43,5$ кг. Маса повного комплекту 172 кг.

Лекція 4. Дослідження астрономічного теодоліта.

4.1. Загальні положення.

Прилади для астрономічних визначень необхідно детально дослідити як в лабораторних, так і в польових умовах. Матеріали досліджень додають до до звіту про астрономічні визначення, а результати досліджень заносять в паспорт встановленої форми.

В лабораторних умовах, перед виїздом на польові роботи, досліджуються:

- Оптичні якості труби;
- Правильність роботи і похибки гвинтів мікроскопів – мікрометрів і окулярного мікрометра. В оптичних астрономічних теодолітах - правильність роботи оптичних мікрометра;
- Похибки діаметрів горизонтального круга; похибки діаметрів вертикального круга досліджуються лише в тому випадку, якщо намічаються точні виміри зенітних віддалей світил;
- Правильність обертання амплітудної частини теодоліта;
- Правильність обертання труби навколо горизонтальної осі;
- Похибки цапф горизонтальної осі (на інтерферометрі Уверського методом ЦНІГАіК);
- Ціна ділення і якість рівнів (на екзаменаторі, по способу проф.Васильєва);
- Ексцентриситет горизонтального круга. Ексцентриситет вертикального круга досліджується в тому випадку, якщо будуть виконуватися вимірювання зенітних віддалей світил;
- Ціна ділення барабанів окулярних мікрометрів або оптичних мікрометрів;
- Бокове згинання труби (з автоколімаційною насадкою ЦНІГАіК);
- Ціна повороту контактного мікрометра (на коліматорі);
- Мертвий хід контактного мікрометра;
- Ширина контактів;
- Пробні виміри горизонтального кута між коліматорами, розташованими на різних зенітних віддальях, стосовно до програми визначення азимута по Полярній.

Із цих вимірів встановлюється постійність колімаційної похибки головної труби.

В польових умовах виконуються слідуєчі дослідження теодоліта:

- Визначення ціни поділки рівнів по способу Комстока, визначення робиться один раз на початку польового періоду;
- Визначення ціни повороту окулярного мікрометра головної труби (контактного мікрометра) із спостережень зірок в елонгації або в меридіані; визначення робиться два рази - на початку і в кінці польового періоду, для чого кожний раз спостерігаються чотири зірки;
- Визначення віддалей бокових ниток сітки від середньої; визначення робиться один раз на початку польового періоду із спостереженням проходження 6 – 8 зірок в меридіані;
- Визначення рена мікроскопів горизонтального круга; визначення робиться на першому пункті. На решті пунктів слідкують за зміною рену по матеріалам азимутальних спостережень. Рен мікроскопів вертикального круга визначають у випадку точних вимірів зенітних віддалей світил;
- Визначення ширини контактів контактного мікрометра виконують на кожному польовому пункті;
- Визначення мертвого ходу контактного мікрометра виконують в кожний вечір спостережень;

- Визначення бокового гнуття труби при азимутальних спостереженнях; це дослідження доцільно виконувати на кожному польовому пункті;

- Правильність обертання алідадної частини теодоліта навколо вертикальної осі; повіряється на кожному польовому пункті за показами накладного або талькотівського рівня.

Крім вказаних досліджень на кожному польовому пункті перед початком спостережень виконуються слідуєчі перевірки і юстировки теодоліта:

- Вісь накладного рівня повинна знаходитись в одній площині з горизонтальною віссю труби і бути їй паралельною;

- Горизонтальна вісь труби повинна бути перпендикулярна до вертикальної осі теодоліта;

- Середня горизонтальна нитка (рухома нитка контактного мікрометра) при спостереженнях зенітальним способом повинна бути горизонтальна. При спостереженнях азимутальними способами середня вертикальна нитка (рухома нитка контактного мікрометра) повинна бути вертикальна;

- Візирна вісь труби повинна бути перпендикулярна до горизонтальної осі;

- Місце зеніта вертикального круга повинно бути менше одиниці.

З переважною частиною перелічених вище досліджень і перевірок, з їх теорією і практикою студенти ознайомлені із попередніх курсів геодезії і геодезичного приладоведення.

4.2. Дослідження оптичних якостей труби.

До оптики труб астрономічних приладів пред'являються астрономічні вимоги, тому що при астрономічних спостереженнях використовується значна частина поля зору труби.

Оптичні якості зорової труби зв'язуються за спостереженнями яскравої зірки як в центрі поля зору, так і на віддалені від нього до $1/3$ радіуса поля зору. При добрій якості оптики і правильному фокусуванні труби зірка повинна бути в полі зору у вигляді малого яскравого і різко окресленого диска без всяких променів, сьйв, додатків і помітного зафарбування.

При порушеному фокусуванні труби, а також при неосвітленому полі зору диск перетворюється в кілька концентричних дифракційних кілець, які мають форму правильних кіл. Зовнішнє кільце виділяється своєю шириною. При відсутності сферичної і хроматичної аберації дифракційні кільця не мають червонуватого окрасу і відмінності в яскравості. Суттєву відмінність в яскравості зовнішніх і внутрішніх кілець вказує на наявність сферичної аберації. Якщо кільця при висунутому чи всунутому окулярі будуть зображатися овалами, то це вказує на наявність астигматизму. При цьому звичайно великі осі овалів при висунутому чи всунутому окулярі взаємно перпендикулярні. Слід зазначити, що іноді причиною астигматизму є дефект ока спостерігача. Повертаючи голову навколо окуляра, а після окуляр, при нерухомому положенні голови, встановлюють дійсну причину астигматизму.

Неправильне центрування лінз об'єктиву визначається по дифракційному зображенню поряд зенітної зірки, що зафарбовується при всунутому окулярі в червоний колір з однієї сторони більше ніж з другої. Якщо ця похибка значна, то зображення зірки витягується у вигляді спектра.

Якщо об'єктив невірно від юстирований відносно візирної осі труби, то замість яскравого диску буде видно віялоподібне зображення зірки.

При всуванні і висуванні окуляра зображення зірки витягується у грушоподібну пляму, вузький кінець якої буде найбільш світлим.

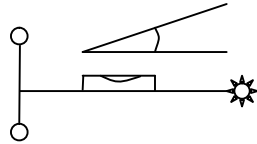
Якщо в результаті проведених досліджень виявляються дефекти оптики, теодоліт не слід використовувати для виконання точних астрономічних визначень. Виправлення

недоліків може бути виконане тільки в оптичній майстерні, яка має спеціальні прилади і обладнання.

4.3. Визначення ціни поділки рівня по способу Комстока.

Наші прилади дають координати в горизонтній системі координат. Напрямок прямовисної лінії дають рівні.

Дослідження рівнів в лабораторних умовах виконують за способом професора Васильєва на экзаменаторі: визначають ціну поділки і встановлюють якість виготовлення і шліфовки трубки.

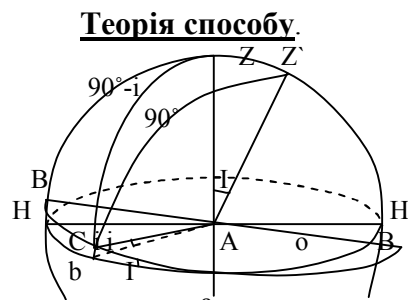


В польових умовах ціна поділки рівня визначається за способом Комстока. Рівень не знімається з приладу на відміну від лабораторних досліджень.

3 піднімальні гвинти

1'' точність повороту гвинта

Вертикальна вісь розглядається як напрямок прямовисної лінії. Нехай, прилад має ідеальну юстировку. OZ - напрямок прямовисної лінії, суміщений з вертикальною віссю. O - точка пересічення осей приладу.



На H' - велике коло, напрямлене до горизонту, будемо вважати, що горизонтальний круг і вісь рівня лежать паралельно до осі горизонту. Нехай, вертикальна вісь приладу нахилена на кут J . Тоді отримаємо OZ' похиле положення вертикальної осі. BAV' - нахилення положення горизонтального круга приладу. Бульбашка рівня при нахилі вертикальної осі зійде з середини і позначить нахил осі рівня до площини горизонту. Нехай, Oc - положення осі рівня. i - її нахил в площині горизонту. При обертанні верхньої частини приладу, можна визначити положення при якому вісь рівня буде паралельна площині горизонту (положення $0a$). $A = ac$ - горизонтальний кут між положеннями $0a$ і $0c$. Цей кут можна отримати по різниці відліків на горизонтальному крузі. Задамо нахил горизонтальної осі і знайдемо положення $0a$, де бульбашка буде на середині. Беремо відлік по горизонтальному крузі. Повертаємо аліададу. Бульбашка зійде з середини. Знову беремо відлік по горизонтальному крузі. Різниця відліків дасть дугу, яка буде відповідати зміщенню бульбашки рівня. Із сферичного трикутника abc :

$$\sin i = \sin J \sin A$$

По малості кутів:

$$i'' = (JA) / \rho \quad (4.1.)$$

Повертаючи теодоліт по обидві сторони від точки a , отримуємо:

$$i'' = (J / \rho) * A_1; \quad i'' = (J / \rho) * A_2$$

i

$$i_2'' - i_1'' = (J / \rho) * (A_2 - A_1);$$

або

$$i'' = i_2'' - i_1'' = (J / \rho) * \Delta A \quad (4.2.)$$

де $\rho = 206265''$

Виражають J в градусах, A - в хвиликах

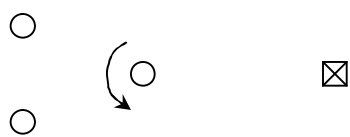
$$i'' = 1,0472 J^\circ * \Delta A' \quad (4.3.)$$

Тоді ціна поділки рівня τ :

$$\tau'' = (i'' / \omega) \quad (4.4.)$$

де ω – число ділень рівня, на яке переміститься бульбашка при повороті приладу на кут ΔA .

На практиці прилад на стовпі. Один підймальний гвинт по напрямку марки. Наводять трубу на марку. Беруть відлік по вертикальному крузі.



Мікрометренним гвинтом труби збивають відлік на 1° . Підймальним гвинтом наводимо на марку. Тим самим вертикальна вісь нахилена на кут J . Бульбашка рівня зійде під оправу.

Повертаючи верхню частину теодоліта по азимуту знаходять положення, коли бульбашка займе крайні положення робочої частини шкали. Беруть відліки A_2 і A_1 по горизонтальному крузі. Роблять декілька прийомів.

4.4. Визначення відстані бокових ниток від середньої із спостереження зірок в меридіані.

Для визначення відстані між нитками із спостереження зірок в меридіані постійні нитки сітки поворотом коробки мікрометра встановлюють у вертикальне положення.

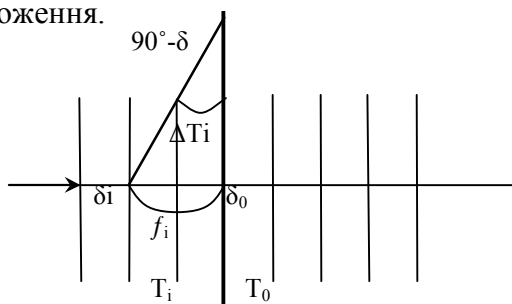


Рис.1.

Теодоліт орієнтується в меридіані. Для дослідження вибирають північні зірки зі схиленням $\varphi < \delta < + 80^\circ$, користуючись каталогом середніх місць зірок АЩ. Робочі ефемериди зірок для спостережень в меридіані вираховуються по відомим формулам сферичної астрономії:

$$S = \alpha$$

$$z = \delta - \varphi \text{ - для зірок в верхній кульмінації}$$

$$A_N = 0^\circ$$

$$S = \alpha \pm 12^h$$

$$z = 180^\circ - (\delta + \varphi) \text{ - для зірок в нижній кульмінації}$$

$$A_N = 0^\circ$$

Спостереження проходження зірок через вертикальні нитки сітки виконуються наступним чином:

за 3 – 4 хв. до моменту кульмінації встановлюють трубу при КЛ (окуляр W) на зенітну віддаля зірки, вибраної із ефемерид; відлік по орієнтованому горизонтальному крузі повинен бути рівний 0° (при орієнтуванні діаметра $0 - 180^\circ$ нульовим на Північ);

при входженні зірки в поле зору труби підправляють мікрометричним гвинтом установку труби по зенітній віддалі так, щоб зображення зірки переміщувалось поблизу, або всередині ниток горизонтального бісектора;

спостерігають і записують моменти T_i по хронометру, відповідні пересіченням зорею кожної нитки.

Для обчислення віддалей f_i бокових ниток від середньої (Рис.1.) знаходять різниці:

$$\Delta T_i = T_i - T_0,$$

де T_i – момент по хронометру проходження зорі через середню нитку, T_0 – момент проходження зорі через середню нитку.

В деяких способах астрономічних визначень необхідно знати віддалі бокових ниток не від середньої дійсної нитки, а від середньої фіктивної нитки. Момент проходження через середню фіктивну нитку розраховується за формулою:

$$T_0' = (\sum T_i / n)$$

Для встановлення нумерації ниток прийнято умовно вважати першою ниткою ту, на яку при положенні приладу “ окуляр W” зоря в верхній кульмінації вступає раніше, ніж на інші.

Для обчислення віддалей f_i застосовується формула, яка витікає з прямокутного трикутника $P \delta_i \delta_0$ (Рис.1

$$\sin f_i = \cos \delta \sin \Delta T_i;$$

за малістю f_i і T_i можна вважати

$$f_i'' = 15 \cos \delta [\Delta T_i - (15^2 \sin^2 \delta / 6 \rho^2) * (\Delta T)^3] = 15 \cos \delta [\Delta T_i - C_i] \quad (4.5.)$$

Другий член формули (4.5.) враховується, коли $\Delta T_i > 400''$. Проводяться спостереження не менше 6 – 8 зірок. Середня квадратична похибка виведеного результату не повинна перевищувати $0,3''$.

По дослідженню астрономічних теодолітів виконується РГР1.

Лабораторна робота № 4. Перевірка і дослідження точних і високоточних теодолітів.

4.1. Перевірка стійкості штатива.

Ніжки штатива повинні бути добре стягнуті вкладишами з головою штатива і легко розсуватись. Однак, в той же час при їх підйомі на півметра вони не повинні повертатися в попереднє положення під дією власної ваги. Математичні башмаки ніжок штативу повинні бути жорстко зв'язані з ними і не мати люфту.

4.2. Перевірка ходу піднімальних гвинтів.

Обертання піднімальних гвинтів повинно бути легким, плавним, без люфту. Вони повинні повертатись не туго, але з деяким зусиллям.

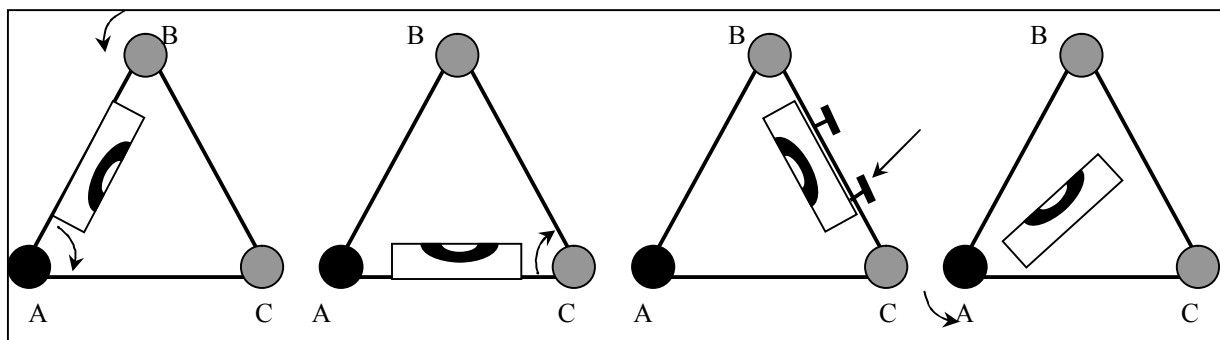
Для перевірки теодоліт закріплюють на штативі або центрувальній плиті. Наводять бісектор труби на віддалений предмет, який чітко видно, і закріплюють аліададу. Взавшись обома руками за корпус теодоліта, легким порухом намагаються повернути злегка теодоліт в одну сторону. Після цього забирають руки, намагаються надати протилежне розвертання і знову забирають руки. Якщо після таких спроб зображення повертається в бісектор, тобто має місце пружна деформація, то піднімальні гвинти не потребують юстування. Якщо ж зображення не повертається, то регулюють піднімальні гвинти. Регулювання досягається поступовим обертанням регулюючих гайок. Теодоліти ОТ – 02М і Т05 мають для закріплення регулювання спеціальні гвинти.

4.3. Перевірка навідних пристроїв.

Навідні пристрої аліади горизонтального і вертикального кругів і зорової труби повинні мати плавний рівномірний хід, без скачків і коливань. Хід їх гвинтів перевіряють наведенням на добре видиму віддалену точку. Регулюють їх зміною тиску пружин у гільзах гвинтів. Якщо відокремлювати навідний пристрій пружиною не вдається, то слід замінити його гвинт.

4.4. Перевірка циліндричного рівня на алідаді горизонтального круга.

Вісь рівня повинна бути перпендикулярна до осі обертання теодоліта.



Розглянемо раціональний спосіб перевірки циліндричного рівня.

У тих випадках, коли сильно збита бульбашка циліндричного рівня, раціонально виконати перевірку, прийнявши до уваги рівність сторін трикутника, утвореного піднімальними гвинтами. Поміщаємо гвинт **A** і встановлюємо циліндричний рівень по стороні **AB**. Піднімальними гвинтами **A** і **B** виводимо бульбашку на середину.

Встановлюємо циліндричний рівень по стороні **AC** і гвинтом **C**, виводимо бульбашку на середину. Яким би не був роз'юстирований циліндричний рівень, а піднімальні гвинти **B** і **C** будуть встановлені на одній відомості, тому що трикутник рівносторонній. Встановивши рівень по стороні **BC**, **виправними гвинтами рівня** виводять бульбашку **рівно на середину**. Юстирування рівня можна вважати закінченим, якщо при поворотах алідади бульбашка рівня зміщається не більше ніж на одне ділення.

4.5. Перевірка накладного рівня.

Його вісь також повинна бути перпендикулярна до осі обертання приладу. Перевіряють, переставляючи рівень на 180° . При цьому попередньо вісь обертання приладу встановлюється у прямовисне положення рівнем на алідаді. Якщо бульбашка рівня не розташовується в центрі ампули, то виправними гвинтами приводять його бульбашку в нуль – пункт.

4.6. Перевірка зображень горизонтального і вертикального кругів.

Освітленість поля зору оптичного мікроскопа повинна бути достатньою і рівномірною, зображення штрихів лімба і шкали секунд повинні бути видні одночасно чітко і різко, без перефокусування окуляра; лінія розділу зображень верхніх і нижніх штрихів лімба повинна бути тонкою і прямою; зображення верхніх і нижніх штрихів – однієї довжини і перпендикулярні до лінії розділу. Регулювання мікроскопа виконується тільки в майстерні.

Лекція 5. Азимутальні способи астрономічних визначень.

5.1. Особливості вимірювання горизонтальних напрямків на світила.

В азимутальних способах астрономічних визначень величинами, що вимірюються, є горизонтальні напрямки на світила. Якщо стоїть задача визначення азимута напрямку на місцевий предмет, то додатковою величиною, що вимірюється, є також горизонтальні напрямки на місцевий предмет. І в цьому випадку в залежності від методики, що застосовується, спостереження в якості вимірюваної величини можна також вважати горизонтальний кут Q між вертикалом світила і вертикалом предмета.

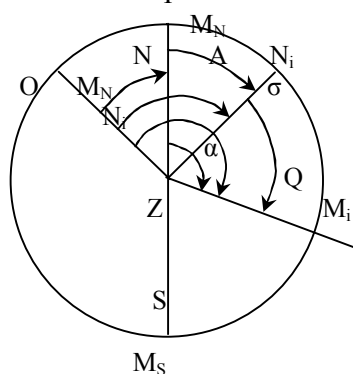


Рис.5.1.

На Рис.5.1. горизонтальний круг приладу суміщений з площиною астрономічного горизонту, а центр кола – з проекцією zenіту Z . Полуденна лінія MS являє собою слід січення площини меридіана з площиною горизонту. При заданій орієнтовці горизонтального круга маємо 0 – нульовий діаметр лімба (нульовий МП напрямок);

M_N – місце Півночі – відлік на лімбі (горизонтальний напрямок, який відповідає напрямку на Північ);

M_S – місце Півдня; $M_S = M_N \pm 180^\circ$;

N_i – горизонтальний напрямок на світило δ ;

M_i – горизонтальний напрямок на місцевий предмет M ;

Q – горизонтальний кут між вертикалами світила і предмета.

У функції вимірюваного горизонтального напрямку азимут світила, відрахований від точки Півночі, визначиться формулою:

$$A = N_i - M_N \quad (5.1.)$$

Необхідно відмітити, що знак перед M_N не змінюється з переводом труби через zenіт. Тому в середньому значенні A , отриманому із спостережень при двох кругах, величина M_N не включається, подібно до того як може бути виключено значення M_Z при вимірюванні zenітних віддалей світил.

Азимут напрямку на місцевий предмет можна представити у вигляді:

$$a = M_i - M_N \quad (5.2.)$$

де

$$M_N = N_i - A \quad (5.3.)$$

або

$$a = A + Q \quad (5.4.)$$

де

$$Q = M_i - N_i \quad (5.5.)$$

Особливості вимірів горизонтальних напрямків на світила, так як і при вимірах із zenітних напрямків, найперше зв'язані з методикою візування. Так як горизонтні координати світил безперервно змінюються внаслідок обертання Землі навколо своєї осі, то вимірювання горизонтальних напрямків на світила необхідно проводити у визначеній системі рахунку часу.

Внаслідок цього процес візування на світило пов'язаний з відліками показів хронометра в моменти наведення вертикальної нитки на світило або в моменти проходження світила через вертикальні нитки нерухомої по азимуту труби теодоліта.

Візування шляхом наведення вертикальної нитки на світило під лічбу ударів хронометра доцільно застосовувати тільки для спостереження близькополюсних зірок

(наприклад Полярної) і зірок в положенні елонгації, де зміни азимута світила проходять надзвичайно повільно.

Візування шляхом спостереження моментів проходження світила через вертикальні нитки нерухомої труби теодоліта необхідно застосовувати у всіх випадках, коли азимут світила, що спостерігається, змінюється достатньо швидко.

Точно так, як і при вимірюванні зенітних віддалей світил, для послаблення особистих похибок спостерігача, характерних для методу “Око – вухо”, візування на світило при вимірюванні горизонтальних напрямків доцільно виконувати за допомогою контактного мікрометра (напівавтоматичний метод візування) або фотоелектричної реєстрації зоряних проходжень (автоматичний метод візування).

Крім особливостей, пов'язаних з методикою візування, вимірювання горизонтальних напрямків на світила, виконуються не поблизу горизонту, а на різних зенітних віддальях. Тому виміряні горизонтальні напрямки на світила необхідно виправляти поправками за нахил горизонтальної осі теодоліта, за вплив колімаційної похибки, за бокове гнуття труби, за похибки цапф і інші похибки, які залежать від зенітних віддалей світил, спостерігаються.

Виключення впливу систематичних і випадкових похибок діаметрів горизонтального лімба виконується шляхом підбору доцільної програми перестановки круга між прийомами, а також застосування способів, в яких відліки по лімбу не виконуються.

Крім похибок приладу, на результати вимірів горизонтальних напрямків впливають зовнішні джерела похибок (бокова рефракція, кручення стовпа) і особиста похибка спостерігача. В азимутальних способах астрономічних спостережень необхідно виключати ці похибки доцільно побудованою методикою спостережень або враховувати їх в результатах спостережень.

5.2. Загальна теорія азимутальних способів астрономічних визначень.

В основу теорії азимутальних способів астрономічних визначень закладено вже відоме нам рівняння зв'язку між азимутом напрямку на світило A , широтою φ і поправкою хронометра U в деякий момент T по хронометру.

$$\operatorname{ctg} A = \sin \varphi \operatorname{ctg} t - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t \quad (5.6.)$$

де

$$t = T_H + u - \alpha \quad (5.7.)$$

Так як в геодезії і інших прикладних науках пов'язаних з нею, азимуті напрямків відраховуються від точки Півночі, то з метою узгодженості зі вказаним положенням всі висновки в подальшому ми будемо виконувати, враховуючи азимут напрямку від точки Півночі по ходу руху годинникової стрілки, від 0° до 360° .

За допомогою рівняння зв'язку (5.6.) можна вирішити задачі, як сумісного визначення широти, поправки хронометра і напрямку меридіана по спостереженням азимутів світил в різних вертикалах і на різних зенітних віддальях.

При побудові загальної задачі всі три шуканих елементи - широта, поправка хронометра і напрямку меридіана – вважаються невідомими; на вибір зірок для сумісного визначення вказаних елементів не накладаються які – небудь обмежуючі умови, крім їх задовільної видимості. Умови найвигіднішого вибору світил при сумісному або роздільному визначенні шуканих величин визначаються в результаті рішення загальної задачі. При цьому різні способи як сумісного так і роздільного визначення широти, часу і напрямку меридіана повинні витікати із рішення загальної задачі як окремі часткові випадки. Принципове рішення задачі сумісного визначення широти, часу і напрямку меридіана із азимутальних спостережень світил в різних вертикалах може бути отримано не менше ніж із трьох рівнянь виду (5.6.), тобто по даним спостережень в крайньому випадку трьох зірок.

Для здійснення такого рішення, виразивши азимуту світил у функції вимірних напрямків на світила, а відповідні їм часові кути – у функції спостережених показів хронометра, будемо мати:

$$A_1' = N_1' - M_N; \quad A_2' = N_2' - M_N; \quad A_3' = N_3' - M_N \quad (5.8.)$$

де N_1', N_2', N_3' - вимірні значення напрямків на світила; M_N - місце Півночі на горизонтальному лімбі приладу.

$$\begin{aligned} t_1 &= T_1 + u + \omega (T_1 - X) - \alpha_1 \\ t_2 &= T_2 + u + \omega (T_2 - X) - \alpha_2 \\ t_3 &= T_3 + u + \omega (T_3 - X) - \alpha_3 \end{aligned} \quad (5.9.)$$

де T_1, T_2, T_3 - покази хронометра, які відповідають моментам спостереження зірок; X - момент по хронометру, для якого визначаються поправки u ; ω - часовий хід хронометра.

Нехай,

$$\begin{aligned} \kappa' &= t_2 - t_1 = (T_2 - T_1) + \omega(T_2 - T_1) - (\alpha_2 - \alpha_1) \\ \kappa'' &= t_3 - t_1 = (T_3 - T_1) + \omega(T_3 - T_1) - (\alpha_3 - \alpha_1) \end{aligned} \quad (5.10.)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_1 \\ t_2 &= t_1 + \kappa' \\ t_3 &= t_1 + \kappa'' \end{aligned} \quad (5.11.)$$

На основі рівняння зв'язку (5.6.), враховуючи (5.8.), (5.9.), (5.10.) і (5.11.), для кожної з трьох спостережених зірок будемо мати:

$$\begin{aligned} \text{ctg } (N_1' - M_N) &= \sin \varphi \text{ ctg } t_1 - \cos \varphi \text{ tg } \delta_1 \text{ cosec } t_1 \\ \text{ctg } (N_2' - M_N) &= \sin \varphi \text{ ctg } (t_1 + \kappa') - \cos \varphi \text{ tg } \delta_2 \text{ cosec } (t_1 + \kappa') \\ \text{ctg } (N_3' - M_N) &= \sin \varphi \text{ ctg } (t_1 + \kappa'') - \cos \varphi \text{ tg } \delta_3 \text{ cosec } (t_1 + \kappa'') \end{aligned} \quad (5.12.)$$

з рішення системи рівнянь (5.12.) можна знайти φ, t_1 і M_N , а далі, користуючись виразом (5.9.) для t_1 , знайдемо u . Рішення системи рівнянь (5.12.) в кінцевому вигляді не може мати практичного значення. Задача значно спрощується, якщо, користуючись попередніми значеннями φ_0, u_0 і M_N^0 , перейти до її рішення за допомогою диференціальних формул, які витікають з рівняння (5.6.).

Припускаючи

$$t_i = T_i + \omega (T_i - X) + u_0 + \Delta u - \alpha_i = t_{0i} + \Delta u \quad (5.13.)$$

де

$$t_{0i} = T_i + u_0 + \omega (T_i - X) - \alpha_i$$

і

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi$$

розкладаємо вираз для A , представлене формулою (5.6.) в ряд Тейлора по ступеням $\Delta \varphi$ і Δu .

В практиці астрономічних визначень значення $\Delta \varphi$ і Δu можуть бути прийняті дуже малими. Тому при розкладі в ряд достатньо для практичних цілей обмежитися членами, що утримують $\Delta \varphi$ і Δu у першому ступені, тобто

$$A_i = A_{0i} + \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + 15 \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i \Delta u \quad (5.14.)$$

У виразі (5.14.) маємо:

$$A_{0i} = \arctg (\sin \varphi_0 \text{ ctg } t_{0i} - \cos \varphi_0 \text{ cosec } t_{0i}) \quad (5.15.)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \right)_i = \sin A_i \text{ ctg } Z_i \quad (5.16.)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i = \frac{\sin \delta_i \cos q_i}{\sin Z_i} = \sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \text{ ctg } Z_i \cos A_{0i} \quad (5.17.)$$

Залежність між точними (зрівноваженими) значеннями A, M_N, N_i

$$A_i + M_N = N_i \quad (5.18.)$$

Із спостережень нам відомі виміряні значення горизонтального напрямку на світило N_i' і покази хронометра в момент спостереження світила T_{Hi} . крім того, відомі попередні координати пункту φ_0 і λ_0 .

Із прийомів радіосигналів часу можна визначити з прийнятою довготою пункту λ_0 попереднє значення поправки u_0 хронометра і хід хронометра ω .

Користуючись отриманими значеннями φ_0 і λ_0 , а також спостереженим моментом T_{Hi} , можемо обчислити попередні значення часового кута t_{0i} і азимута світила A_{0i} за формулами (5.13.) і (5.15.) відповідно.

З обчисленим азимутом світила A_{0i} попереднє значення місця Півночі M_N^0 на горизонтальному крузі обчислиться за формулою:

$$M_N^0 = N_i - A_{0i} \quad (5.19.)$$

Зрівноважені значення у функції виміряних чи обчислених попередніх значень цих же величин можна представити алідуючому вигляді:

$$\begin{aligned} N_i &= N_i' - v_i' \\ A_i &= A_{0i} + \Delta A_i \\ M_N &= M_N^0 + \Delta M_N \end{aligned} \quad (5.20.)$$

де v_i - поправка виміряного напрямку на світило N_i ;

$$\Delta A_i = \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i \Delta u - \text{поправка азимута } A_{0i}, \text{ що зачисляється, за}$$

невірно прийнятї значення φ_0 і u_0 ; ΔM_N - поправка попереднього значення місця Півночі M_N^0 .

Підставивши вирази (5.20.) в (5.18.), отримаємо рівняння поправок для виміряного горизонтального напрямку.

$$\Delta M_N + \Delta A_i + l_i = v_i \quad (5.21.)$$

в якому

$$l_i = (\Delta A_{0i} + \sum i + M_N^0) - N_i' \quad (5.22.)$$

У виразі (5.22.) $\sum i$ - сума методичних поправок, обрахованого азимута світила.

Враховуючи вирази (5.14.) – (5.16.) для кожного виміряного горизонтального напрямку на світило будемо мати рівняння поправок у кінцевому вигляді

$$\Delta M_N + \sin A_i \operatorname{ctg} Z_i \Delta \varphi + 15(\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} Z_i \cos A_i) \Delta u + l_i = v_i \quad (5.23.)$$

В практиці астрономічних визначень часто постає задача визначення азимута напрямку N_i' на світило, вимірюють також горизонтальний напрямок на місцевий предмет M_i' . Очевидно, астрономічний азимут напрямку на місцевий предмет може бути визначений за однією із наступних формул:

$$a = M_i - M_N \quad (5.24.)$$

або

$$a = A_i + Q \quad (5.25.)$$

де $Q_i' = M_i' - N_i'$ - виміряний кут між світилом і місцевим предметом.

Якщо в якості необхідного невідомого M_N прийняти азимут напрямку на місцевий предмет

$$a = a_0 + \Delta a \quad (5.26.)$$

де a_0 - попереднє значення азимута; Δa - поправка попереднього значення азимута напрямку на місцевий предмет.

В цьому випадку рівняння поправки для виміряного горизонтального кута прийме вигляд:

$$\Delta a - \sin A_i \operatorname{ctg} Z_i \Delta \varphi - 15(\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} Z_i \cos A_i) \Delta u + l_i = v_i \quad (5.27.)$$

де $l_i' = [a_0 - (A_{0i} + \sum i)] - Q_i'$, v_i - поправка виміряного кута Q_i' ;

Якщо спостереження серії зірок розташована у проміжку між двома прийомами радіосигналів точного часу, то в результаті сумісної обробки даних спостережень і прийому радіосигналів можна безпосередньо отримати значення географічних координат (широти і довготи) місця спостереження, азимута напрямку на місцевий предмет (або M_N на горизонтальному крузі).

Рівняння поправок для вимірюного горизонтального напрямку або горизонтального кута приймуть в цьому випадку відповідно вигляд:

$$\Delta M_N + \sin A_{oi} \operatorname{ctg} Z_i \Delta \varphi + 15(\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} Z_i \cos A_{oi}) \Delta \lambda + l_i = v_i$$

$$\Delta a - \sin A_{oi} \operatorname{ctg} Z_i \Delta \varphi - 15(\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} Z_i \cos A_{oi}) \Delta \lambda + l_i' = v_i \quad (5.28.)$$

В подальшому в залежності від задачі, що потребує рішення, будемо користуватися рівняннями як (5.23.) і (5.27.), так і (5.28.), маючи на увазі, що вони ідентичні. В отриманих лінійних рівняннях поправок, як і раніше маємо три незалежних параметричних невідомих: ΔM_N (Δa), $\Delta \varphi$ і Δu ($\Delta \lambda$). Для їх сумісного визначення необхідно виконати спостереження в крайньому разі трьох зірок. Якщо виконані спостереження n зірок в різних вертикалах, причому $n > 3$, то для визначення трьох невідомих будемо мати надлишкове число $n - 3$ рівнянь поправок. Вирішуючи систему із n рівнянь поправок по методу найменших квадратів, знайдемо ймовірніші значення величин, що визначаються, і можемо оцінити точність їх виводу. Такий основний шлях рішення загальної задачі азимутальних способів астрономічних визначень.

Лабораторна робота № 5. Дослідження точного і високоточного теодоліта.

5.8. Перевірка вертикальності ниток бісектора.

Бісетор повинен знаходитись в кульмінаційній площині. В теодоліті ОТ –02М положення бісектора виправляють поворотом сітки ниток, злегка відпустивши всі три юстировочні гвинти і разом з ними повертаючи сітку.

Перевірку виконують, візуючи бісектор на нитку виска, закріпленого за 20 – 30м від теодоліта.

5.9. Перевірка перпендикулярності візирної осі зорової труби до осі її обертання.

Візують на віддалену точку і беруть відліки по горизонтальному кругу при двох положеннях вертикального круга. Збивають лімб і повторюють відліки на ту ж саму точку.

Колімаційну похибку C розраховують за формулою:

$$c = \frac{(KЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (KЛ_2 + КП_2 \pm 180^\circ)}{4}$$

де $KЛ_1$, $KП_1$ - відліки по горизонтальному кругу при “кругу зліва” і “кругу зправа” на одну і ту ж точку; $KЛ_2$, $KП_2$ - відліки по горизонтальному кругу на і ту ж точку при збитому лімбі теодоліта.

Значення подвійної колімації похибки повинно бути мінімальним (біля $5''$) і, у всякому випадку не перевищувати $20''$.

У протилежному випадку розраховують правильний відлік

$$KЛ_2^0 = KЛ_2 - \frac{C}{\sin Z}$$

або

$$KЛ_2^0 = KЛ_2 + \frac{C}{\sin Z} \pm 180^\circ$$

Звідси, середній з відліків при двох положеннях круга

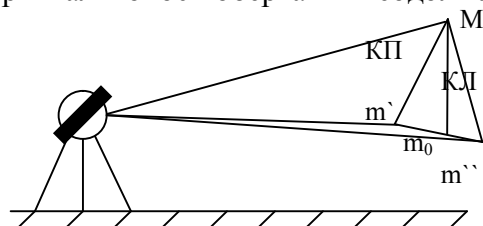
$$N = \frac{K\Lambda_2 + K\Pi_2 \pm 180^\circ}{2}$$

Отже, можемо зробити наступні висновки:

1. Середнє із відліків, взятих при двох положеннях круга (КЛ і КП), повністю вільне від впливу колімаційної похибки.
2. Вплив колімаційної похибки на кут, що вимірюється, повністю виключається, якщо кут отриманий із спостережень при двох положеннях круга (КЛ і КП).
3. Похибка кута, обумовлена колімаційною похибкою, виміряного при одному положенні круга (при КЛ і КП), буде рівна нулю при рівності зенітних віддалей цілей, що спостерігаються.
4. Якщо вирахувати із відліку при КЛ, відлік КП, при візуванні на одну і ту ж ціль, отримаємо $\theta = \text{КЛ} - \text{КП} = 180^\circ - \frac{2c}{\sin Z}$. В триангуляції зенітні віддалі близькі до 90° , тоді $\sin Z = 1$, і $2c = \text{КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ$. При цьому коливання $2c$ не залежать від похибок лімба. Коливання $2c$ повністю відображають похибки відліків, похибки візування і азимутальні зсуви приладу, тобто якість роботи спостерігача, вплив зовнішнього середовища і поведінку сигналу або штатива. Тому коливання $2c$ являються чудовою характеристикою якості роботи і умов спостереження.

Виправлення $2c$ досягаються юстувальними гвинтами сітки ниток, попередньо встановивши мікрометренним гвинтом аліади правильний відлік КЛ_2^0 або КП_2^0 . при юстуванні у теодолітів Т05 і Т1 відлік по окулярному мікрометру повинен бути 0.

5.10. Горизонтальна вісь обертання повинна бути перпендикулярна до вертикальної осі обертання теодоліта.



Візують на високу точку і проєктують її на висоту приладу при двох положеннях вертикального круга і беруть відліки по горизонтально покладеній рейці або лінійці. Якщо точки m' і m'' співпадають, то умова виконується.

Якщо не перпендикулярність перевищує $5''$, то юстування виконують в майстерні. Теодоліт Т05 має спеціальні юстувальні гвинти для виправлення нерівності підставок.

5.11. Перевірка місця зеніта.

Прийнято добиватись, щоб місце зеніта відрізнялось від 0° або 360° не більше $10''$.

Місцем зеніту (МЗ) називається відлік по вертикальному кругу теодоліта, при якому візирна лінія вертикальна і бульбашка циліндричного рівня при аліаді вертикального круга на середині.

Візують на високу точку і беруть відліки по вертикальному кругу (КЛ) і (КП)

$$МЗ = \frac{КЛ + КП - 360^\circ}{2}$$

Зенітна віддаль Z розраховується за формулою:

$$Z = \text{КЛ} - \text{МЗ}$$

$$Z = \text{МЗ} - \text{КП}$$

$$Z = \frac{КЛ + КП + 360^\circ}{2}$$

Зенітна віддаль, або **зенітний кут** – це кут між прямовисною лінією і напрямком на ціль, відраховується від зеніту Z до точки спостереження від 0° до 180° .

Для юстування приладу мікрометренним гвинтом труби встановлюють правильний відлік Z . При цьому точка зійде з центра сітки ниток. Вертикальними виправними гвинтами сітки ниток вводять точку в центр.

Або: мікрометренним гвинтом рівня труби встановлюють відлік, рівний Z . При цьому бульбашка циліндричного рівня вертикального круга зійде з середини. Виправними гвинтами рівня виводять бульбашку **рівно** на середину. Перевірку повторюють.

5.12. Перевірка рена.

Перевірка рену – це його попереднє визначення. У теодолітів Т2 і ТБ1 рен не повинен перевищувати $1,5''$. Рен – це невідповідність штрихів мікрометра штрихам лімба.

5.13. Перевірка оптичних центрів.

Вісь оптичного центра повинна співпадати з вертикальною віссю теодоліта. Відмічаючи на аркуші паперу під штативом проекцію центра кружка оптичного центра при обертанні алідади. Якщо така точка залишається в центрі кружка, або відходить від нього не більше ніж на половину його радіуса, то умова виконується. Теодоліти 2Т здають в ремонтну майстерню при невиконанні умови.

Лекція 6. *Сумісне визначення азимута, широти і довготи із спостережень світил в різних вертикалах і на різних зенітних віддалях.*

6.1. Теоретичні основи способу.

Способи визначення азимута, широти і довготи із спостережень світил в різних вертикалах і на різних зенітних віддалях по точності визначень дещо поступаються відповідним способам із спостереження світил на рівних висотах або в площині одного вертикалу. Однак способи цієї групи є найбільш гнучкими по виконанню спостережень. Вони основані, як правило, на багаторазових визначеннях яскравих зірок, що забезпечує їх успішне застосування у важких метеорологічних і в умовах незаходячого Сонця. Тому ці способи даної групи являються найбільш доцільними при виконанні робіт у високих широтах і в період Полярного дня.

Можливість даних астрономічних визначень по спостереженням яскравих зірок у високих широтах відома. При порівняно низькій висоті Сонця в умовах Полярного дня за допомогою світла сильних переносних приладів є можливість спостерігати зірки до $3,0 - 3,5$ зоряної величини. Таких зірок в Астрономічному Щорічнику біля 130. Із них доступні для спостережень в любий час дня під різними азимутами і висотами $50 - 60$ зірок. Для практичного застосування цих способів у МІГАіК складена програма для обчислення добових ефемерид який забезпечує лінійне інтерполювання Z і A на момент спостереження s з точністю $2 - 3''$.

При багаторазових спостереженнях яскравих зірок поблизу меридіану і першого вертикалу можна користуватися середніми місяцями зірок любого каталогу і “Ефемеридами для спостереження зірок в першому вертикалі”. Користуючись вказаними ефемеридами і диференційними змінами зенітної віддалі і азимута, можна впевнено знаходити зірки днем, в кутових віддаленнях від даних вертикалів до $10 - 15^\circ$.

На основі поданої вище теорії, для сумісного визначення азимута, широти і довготи вимірюють горизонтальні кути Q_i' між світилами і місцевим предметом. У відповідності з найвигіднішими умовами світила вибираються для спостережень на середній віддалі 35° ($20^\circ < Z < 50^\circ$), при рівномірному їх розташуванні по азимутам.

Вибір яскравих зірок для спостережень вдень виконується за допомогою вказаних вище ефемерид, для спостережень вночі – візуально, з послідовним їх розпізнанням за допомогою зоряної карти і номограми до неї.

Для визначення геодезичного азимута і складових відхилення прямовисної лінії за допомогою z – секундного астрономічного теодоліта, спорядженого контактним мікрометром, з середньою квадратичною похибкою

$$M_{ar} = M_{\xi} = M_{\eta} = 0,4''$$

Необхідно виконати спостереження не менше 36 зірок, рівномірно розташованих по азимутам. Ці спостереження можуть бути виконані на протязі кількох вечорів.

Періодично, не більше ніж через 2 години в кожний вечір спостережень, виконується прийом радіосигналів точного часу. При спостереженнях з кварцовим хронометром інтервал між прийомами радіосигналів може бути збільшений до 3 – 4 годин.

При обробці спостережень з умовними координатами φ_0 і λ_0 для кожного світила складається рівняння поправок виду:

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v_i' \quad \text{з вагою} \quad P_i = \sin^2 Z_i \lambda$$

$$l_i = [a_0 - (A'_{0i} + \sum i)] - Q_i' \quad (6.29.)$$

$$\Delta a_r = b_i \xi + c_i \eta + l_i = v_i \quad \text{з вагою} \quad P_i = \sin^2 Z_i$$

$$\text{де} \quad l_i = [a_0 - (A_{ri} + \sum i)] - Q_i' \quad (6.30.)$$

A_{ri} – азимут світила, розрахований з геодезичними координатами B і L за формулою:

$$\text{ctg } A_{ri} = \sin B \text{ ctg } t_{ri} - \cos B \text{ tg } \delta_i \text{ cosec } t_{ri} \quad (6.31.)$$

в якій

$$t_{ri} = T_{ni} + u_r + \omega(T_{ni} - x) - \alpha_i \quad (6.32.)$$

u_r - поправка хронометра в момент X , отримана із прийому радіосигналів часу з геодезичною довготою пункту L .

При цьому рівняння Лапласа буде:

$$a_r = a - 15(\alpha - L) \sin \varphi + \frac{\eta \cos a - \xi \sin a}{\text{tg } Z_{з.п.}} \quad (6.33.)$$

При цьому умовний азимут світила обчислюється з середнім моментом T_{ni} спостереження світила в прийомі і виправляється поправкою за прискорення.

При обчисленнях з геодезичними координатами пункту B і L для кожного світила складається рівняння поправок виду (6.29.)

Для обчислення коефіцієнтів і ваг рівнянь поправок, а також поправок у виміряні напрямки (за нахил горизонтальної осі, похибки цапф, за вплив добової аберації, прискорення руху зірок по азимуту і т.і.) в кожному напівприйомі вимірюються грубо, з точністю 2 - 3', зенітні віддалі світила Z_i . такі виміри звільняють від ручного розрахунку зенітних віддалей світил по відомим часовим кутам.

При обчисленнях на ЕОМ вимірювання зенітних віддалей світил виконувати не потрібно.

Із сумісного рішення n рівнянь поправок по моменту найменших квадратів отримують ймовірніші значення a' , x і y .

Від умовних значень азимута і складових відхилення виска переходить до геодезичного азимута напрямку a_r і астрономо – геодезичним складовим відхиленням прямовисної лінії ξ і η . При необхідності можна обчислити астрономічний азимут напрямку і астрономічні координати φ і λ .

При обчисленнях з відомими геодезичними координатами пункту B і L із сумісного рішення n рівнянь поправок по моменту найменших квадратів зразу отримують зрівноважені значення геодезичного азимута a_r і астрономо – геодезичних складових відхилення прямовисної лінії ξ і η .

Для точних визначень α , ξ і η (λ) необхідно виконувати визначення особисто – інструментальної різниці спостерігача на основному пункті і враховувати її в результатах польових визначень довгот (складової η) і азимутів напрямків. Визначення особисто – інструментальної різниці на основному пункті необхідно, взагалі кажучи, виконувати по тій же методиці, яка застосовується при визначенні польових пунктів. Однак, маючи на увазі, що особисто – інструментальне рівняння визначається як різниця $\partial\lambda = \lambda_{\text{осн.}} - \lambda'_{\text{осн.}}$, то для її знаходження доцільно застосовувати способи визначення довготи по вимірним горизонтальним напрямкам на світила поблизу меридіана, зберігаючи принципово ту ж методику спостережень, як і в даному способі.

6.2. Спостереження.

Спостереження виконуються 2 – секундним астрономічним теодолітом з контактним мікрометром.

Для виключення остаточного впливу нахилу рухомої вертикальної нитки застосовується позиційний пристрій (наприклад, ДКМ – ЗА) або механізм для обертання труби по висоті. Конструкція механізму така ж, як і для обертання теодоліта по азимуту. Механізм кріпиться до підставки труби, несучій навісній гвинт. Необхідна швидкість обертання труби по висоті підбирається шляхом зміни величини напруги, яка подається на моторчик, так щоб рух видимого зображення зірки в полі зору труби проходив паралельно середній горизонтальній нитці. Перед виїздом на польові роботи виконують дослідження теодолітом у відповідності з вимогами Інструкції до азимутальних спостережень.

Загальний порядок спостережень складається з:

- Прийому радіосигналів часу;
- Вимірювання горизонтальних кутів між світилами і місцевим предметом;
- Повторного прийому радіосигналів часу.

Порядок вимірювання горизонтального кута між світилом і місцевим предметом в кожному прийомі наступний:

а) *Спостереження місцевого предмету при КЛ (КП):*

- Три наведення рухомою ниткою контактного мікрометра на місцевий предмет з відповідними відліками по мікрометру;
- Відліки горизонтального лімба;
- Наведення рухомою ниткою на земний предмет виконується поблизу нуля – пункту гребінки, так щоб абсолютне значення відліків по мікрометру не перевищувало 10 – 15 ділень. Якщо зенітна віддаль земного предмету відрізняється від 90° більше ніж на 1° , то визначається нахил горизонтальної осі по відлікам накладного рівня.

б) *Спостереження зірки при КЛ (КП):*

- Вибір зірки і наведення труби на зірку (при роботі без ефемерид виконується візуально, при наявності ефемерид установка приладу Z і A по виконується за $3 - 4^m$ до моменту s);
- Включення механізму повороту труби по висоті і підбір необхідної величини напруги, що подається, на моторчик; швидкість обертання труби по висоті повинна бути такою, щоб видимий рух зірки проходив паралельно середній горизонтальній нитці і поблизу від неї; корекція положення теодоліта по азимуту (за допомогою навісного гвинта аліадади) і по висоті (за допомогою корекційного гвинта механізму обертання);
- Відліки по накладному на горизонтальну вісь рівню і перекладання його;
- Включення хронографа і спостереження проходження зірки на двох – трьох центральних поворотах гвинта контактного мікрометра;
- Відліки накладних рівня;

- Відліки горизонтального лімба;
- Відліки вертикального лімба з точністю 1'.

в) Переведення труби через зеніт і установка по відрахованій зенітній віддалі для положення КП (КЛ):

- Поворот верхньої частини теодоліта на 180° з врахуванням упередження по азимуту і наведення труби на ту ж зірку.

г) Спостереження зірки при КП (КЛ) в порядку описаному в пункті б); при цьому величина напруги, яка подається на моторчик, залишається такою ж, як і для першого положення приладу;

для виключення впливу паралаксу марок (пер) хронографа запис моментів контактування при другому положенні приладу виконується з переключенням соленоїдів хронографа.

д) Спостереження місцевого предмету при КП (КЛ) в порядку описаному в пункті а).

При спостереженнях з контактним мікрометром, який має позиційний пристрій фірми Керн (ДКМ - ЗА), загальний порядок спостережень в прийомі залишається таким же. Однак при спостереженнях зірок виникають особливості, пов'язані з виключенням впливу остаточного нахилу вертикальної рухомої нитки контактного мікрометра. Цей вплив буде виключений, якщо для кожного положення теодоліта слід видимого руху світила пройде через центр поля зору труби. Спостереження зірок в цьому випадку виконується в наступному порядку.

Користуючись раніше складеними ефемеридами, прилад встановлюють по **Z** і **A** даної зірки за 2 – 3 хв. до ефемеридного часу s . При підході зображення зірки до кола позиційних кутів обертанням навідних гвинтів труби і сліду добиваються такого положення, щоб зірка приймала під кутом q до горизонтальної нитки.

Після цього обертання навідних гвинтів труби і аліади припиняють. Рухому нитку мікрометра ставлять на 1,5 повороту від нуля – пункту гребінки назустріч видимому руху зірки. Далше беруть відліки накладного рівня (рівень в теодоліті ДКМ – ЗА не перекладається), спостерігають проходження зірки на трьох поворотах гвинта контактного мікрометра, враховують горизонтальний лімб і наближено вертикальний лімб. В такому є порядку спостереження зірки при другому положенні приладу.

Так як радіальні штрихи градусів позиційного пристрою теодоліта ДКМ – ЗА мають порівняно велику довжину, то не складає труднощів обертанням навідного гвинта труби підібрати таке положення труби по висоті, при якому видиме зображення зірки зміщалося би паралельно одному із штрихів шкали.

Таким чином, можна обійтись без попереднього обчислення паралактичних кутів q , а встановлювати їх “емпірично” при спостереженнях зірок.

Для запису спостережень зручна форма журналу, який застосовується при визначеннях азимута по часовому куту Полярної зірки.

**Лабораторна робота № 6. Пробні вимірювання
при сумісному визначенні азимута, широти і довготи
із спостережень світил в різних вертикалах і на різних
зенітних віддальях**

Теодоліт У5 № 1217

Пункт: Іванівка; $\varphi = 44^\circ 58' 40,0''$; $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$;

$M_Z^0 = 0^\circ 00' 00,0''$;

Дата: 25/26.6.99 р. $i^{n/2} = (Л + П) - m$; $g = + 0.1''$; $\tau = 3.60''$;

$t_0^0 = 19.7^\circ$; $B = 741.5\text{мм}$

Хронометр	Рівень		Вертикальний круг		Горизонтальний круг А
	Л	і	Мікроскоп 1	Мікроскоп 2	
15 ^h 02 ^m 05.5 ^s	12,0	+ 4,6	27°30'00''	31'33''	205,5°
27,5	32,6		00''	33	
50,5		+ 4,6	30 00	31 33	
$T_H = 12,0$ 15 ^h 02 ^m 27.83 ^s	12,0 32,6	+ 4,6	27°30'46,5' '		
$\Delta T_a = 0,021^s \cos 27^\circ 31' = 0,02^s$ $T_H + \Delta T_a = 15^h 02^m 27.81^s$			$i \frac{\tau}{2} = 8,3''$ L = 27°30'54.8'' M _Z ⁰ = 0 0 0.0 ρ = 0 00 28.5 g sin Z 0 00 0.0	ρ ₀ = 30,26'' γ = 0,9668 B = 0,9757	
			Z _{ВІМ.} = 27°31'23,3'	ρ = + 0° 0'28,5''	

Лекція 7. Обробка спостережень.

Обробка спостережень складається з:

- Обробки прийомів радіосигналів часу;
- Розшифровки хронографічної стрічки;
- Обробки журналу спостережень;
- Обчислення вільних членів рівнянь поправок;
- Складання і рішення нормальних рівнянь;
- Виводу зрівноважених значень a_r , φ і λ ;
- Оцінки точності отриманих результатів.

а) Обробку прийому радіосигналів часу виконують по загальній для всіх способів методиці.

Прийняти радіосигнали часу – значить визначити покази хронометра в момент виходу сигналу з антени станції, що передає сигнал. Як правило, приймають 8 – 10 сигналів і обчислюють покази хронометра в середній момент передачі сигналів. Для приведення отриманого показу хронометра на момент виходу відповідного сигналу з антени передаючої станції необхідно враховувати поправки за час поширення радіохвиль τ_p а також за час затримки в ланках прийомного пристрою.

Для радіохвиль В4 діапазону (3 – 30 МГц)

$$\tau_p = 0,9 + 3,25 \frac{L}{1000} \quad (7.1.) \quad \text{де } L -$$

віддаль між передатчиком і приймачем по дузі великого кола Землі;

$$L = Z * 1,852 \text{ км} \quad (7.2.)$$

де Z - центральний кут в хвилинах, який відповідає дузі великого кола між пунктами на поверхні Землі.

$$\cos z = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta \lambda \quad (7.3.)$$

φ_1 і φ_2 - широти пунктів передачі і прийому (з точністю до 1'); $\Delta \lambda$ – різниця довгот (з точністю до 1'). Для віддалей 500 – 5000 км похибка τ_p не перевищує 1 – 2 мс.

З прийомів радіосигналів часу кожних двох сусідніх станцій з умовною довготою пункта λ_0 визначають поправку хронометра u_0 в момент $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ і часовий хід хронометра ω .

Якщо відомі геодезичні координати пункту, то із прийомів сигналів часу з геодезичною довготою пункту обчислення поправку хронометра u_r в момент x .

б) Розшифровка хронографічної стрічки виконують за допомогою дешифрованого приладу ЦНПГАіК або клинкової палетки точно так, як зенітальних способах. При роботі з контактним мікрометром, який має 9 чи 10 контактів, цілком достатньо брати в обробку один поворот мікрометра, розташований симетрично відносно нуля – пункту гребінки.

В межах вказаного повороту виконується розмітка секунд, тобто розшифрування хронографічної стрічки, результати якої записуються в журнал спостережень.

в) Обробка журналу спостережень виконують у наступному порядку:

Підраховуються середні моменти спостереження зірок для кожного положення приладу (КЛ і КП)

$$T_{L,R} = \frac{\sum T_{Li} R_i}{n} \quad (7.4.)$$

а також середній момент спостереження зірки в прийомі за формулою

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2} \quad (7.5.)$$

Одночасно підраховуються величини

$$\Delta T = T_H - T_{L,R} \text{ і } 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \quad (7.6.)$$

необхідні для обчислення поправки азимута зірки за прискорення; обчислюються значення горизонтальних напрямків на місцевий предмет M і світило N . Для цього в журналі підраховуються середні значення відліків по горизонтальному лімбу, середні значення відліків окулярного мікрометра при спостереженнях місцевого предмета, середні значення нахилу горизонтальної осі по відлікам накладного рівня, зенітну віддаль світила для положення приладу КЛ і КП (з точністю 1').

Якщо сума run обох мікроскопів – мікрометрів перевищує $0,5^0$, то середні відмітки горизонтального лімба виправляються поправками за run .

Середні значення вимірних напрямків на місцевий предмет і зірку обчислюються за формулою:

$$N = \frac{L + R}{2} = \frac{L' + (R' \pm 180^\circ)}{2} + \frac{b_L \text{ctg } Z_L + b_R \text{ctg } Z_R}{2} + \frac{c}{2} (\text{cos ec } Z_R - \text{cosec } Z_L) + run_{cp}. \quad (7.7.)$$

В даній формулі враховані поправки за нахил горизонтальної осі, колімаційну похибку і run мікроскопів – мікрометрів.

Додатково враховується сумарний вплив похибок цапф на вимірний горизонтальний напрямок за формулою:

$$\Delta N_{\alpha''} = \Delta a_{Z''} + \Delta i_Z \text{ctg } Z \quad (7.8.)$$

$$\Delta a_{Z''} = \frac{72915}{L} (\Delta \rho_{Z+135^\circ} - \Delta \rho_{Z+225^\circ} + \Delta \rho_{-Z+135^\circ} - \Delta \rho_{-Z+225^\circ}) \quad (7.9.)$$

$$\Delta \rho_Z = (\Delta r_z^\circ - \Delta r_z'') \quad (7.10.)$$

де Δr_z° , Δr_z^\wedge - похибки окулярної і лампової цапф.

Проекція зміщення цапф на прямовисну лінію при L :

$$\Delta i_{\text{п}} = - \frac{\cos 45^\circ}{L \sin 1''} (\Delta \rho_{z+45^\circ} + \Delta \rho_{z-45^\circ}) \quad (7.11.)$$

Поправка за нахил горизонтальної осі при обчисленні напрямку на місцевий предмет враховується в тому випадку, коли зенітна віддаль місцевого предмету відрізняється від 90° більше ніж на 1° .

Якщо визначення нахилу горизонтальної осі в кожному напівприйомі виконувалось без перекладання рівня, то середнє значення горизонтального напрямку виправляється поправкою за середній нахил за формулою:

$$\Delta N_{\text{в.ср.}} = \frac{(\text{л} + \text{п})_0 - 0(\text{л} + \text{п})}{2} * \frac{h}{2} \text{ctg } Z_{\text{ср.}} \quad (7.12)$$

Для обчислення поправки горизонтального напрямку на зірку за остаточний вплив колімації.

$$\Delta N_c = \frac{c}{2} (\text{cosec } Z_R - \text{cosec } Z_L) = cq \quad (7.13.)$$

де

$$q = \frac{c}{2} (\text{cosec } Z_R - \text{cosec } Z_L) \quad (7.14.)$$

величина і знак колімаційної похибки C встановлюється із спостережень двох, трьох зірок на основі виразу:

$$C = \frac{(A'_L - A'_R) - [N'_L - (N'_R \pm 180^\circ)]}{\text{cosec } Z_L + \text{cosec } Z_R} \quad (7.15.)$$

в якому A'_L і A'_R - значення азимутів світила, обчислені окремо для КЛ і КП; N'_L і N'_R - значення горизонтальних напрямків на світило при КЛ і КП, з врахуванням поправок за нахил горизонтальної осі.

$$\text{Так як при спостереженнях зірок величина } q = \frac{1}{2} (\text{cosec } Z_R - \text{cosec } Z_L)$$

$$\text{завжди мала, то для обчислення поправки } \Delta N_c = c q$$

Значення самої колімації c достатньо знати наближено, з точністю до декількох секунд дуги. На основі цього, числове значення і знак колімаційної похибки c для положення рухомої нитки контактної мікрометра на середньому контакті повороту гвинта, приймаємо в обробку, можна також встановити з спостережень місцевого предмета. Для цього достатньо встановити рухому нитку мікрометра у вказане положення, і виконати спостереження місцевого предмета при КЛ і КП. Тоді

$$C = \frac{L_{\Delta} \pm 180^\circ}{2} \quad (7.16.)$$

Після виведення горизонтальних напрямків M_i і N_i в журналі обчислюється значення горизонтального кута Q_i' за формулою:

$$Q_i' = M_i - N_i \quad (7.17.)$$

г) Обчислення вільних членів рівнянь поправок виконується з умовними або геодезичними координатами пункту за формулами:

$$I_i = [a_0 - (A_{0i}' + \sum \delta A_i)] - Q_i' \quad (7.18.)$$

$$I_{\text{ri}} = [a_0 - (A_{\text{ri}}' + \sum \delta A_i)] - Q_i' \quad (7.19.)$$

в яких

$$A_{0i}' = \text{arcctg} (\sin \varphi_0 \text{ctg } t_{0i} - \cos \varphi_0 \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{0i}) \quad (7.20.)$$

$$A_{\text{ri}}' = \text{arcctg} (\sin B \text{ctg } t_{\text{ri}} - \cos B \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{\text{ri}}) \quad (7.21.)$$

$$t_{0i} = T_{\text{Hi}} + u_0 + \omega(T_{\text{Hi}} - x) - \alpha_i \quad (7.22.)$$

$$t_{ri} = T_{Hi} + u_r + \omega(T_{Hi} - x) - \alpha_i \quad (7.23.)$$

$$\sum \delta A_i = \delta A_i + \Delta A_{wi} + \Delta A_{(шк-мх)} \quad (7.24.)$$

Поправки за вплив добової аберації δA_i , за прискорення руху зірок ΔA_{wi} , за ширину контактів і мертвий хід $\Delta A_{(шк-мх)}$ обчислюються відповідно за формулами:

$$\delta A = \frac{0.32'' \cos \varphi \cos A'_N}{\sin Z} \quad (7.25.)$$

$$\Delta A_w = 5,454 \frac{d^2 A}{dt^2} \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \quad (7.26.)$$

де

$$\Delta T = T_H - T_L \quad (7.27.)$$

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2}, \quad T_{L,R} = \frac{\sum T_{L,Ri}}{n} \quad (7.28.)$$

$$\Delta A''_{(шк-мх)} = \left(\pm \text{шк-мх} \right) \frac{R''}{2} \operatorname{cosec} Z \quad (7.29.)$$

д) Складання і рішення нормальних рівнянь, вивід зрівноважених значень визначаємих величин і оцінка точності виконується по методу найменших квадратів у відповідності із формулами загальної теорії.

Лабораторна робота № 7. Сумісне визначення геодезичного азимута і складових відхилення прямокутної лінії із спостережень зірок у різних вертикалах.

Обчислення вільних членів рівнянь поправок.

Пункт: Іванівка $B = 44^\circ 58' 32,28''$ $L = 3^h 16^m 35,295^s$

Напрямок: Іванівка – Руеутово $a_0 = 225^\circ 1440''$

Теодоліт: ДКМ – 3А № 87990

Дата: 10.07.1999 р.

$$\sin B = 0,706806$$

$$\cos B = 0,707407$$

Позначення	Зірка №277	Позначення	Зірка №277
T_H	$15^h 50^m 46,58^s$	ΔA_w	$+ 6,48''$
u_r	$+38,58$	$\frac{R}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \operatorname{csc} Z$	$- 0,85$
$\omega(T_H - x)$	$+0,02$	Q'_i	$273\ 07\ 05, 13$
S	$15\ 51\ 25, 18$	a'_r	$225\ 14\ 06, 32$
A	$10\ 59\ 44, 17$	a_0	$225\ 14\ 00, 00$
t_r^h	$4\ 51\ 41, 01$	l	$+ 3,68''$
t_r^0	$72^\circ 55' 15,15''$	$\sin A'_r$	$- 0,7418$
Δ	$56\ 34\ 25, 60$	$\sin 2A_r$	$- 0,9949$
$\operatorname{tg} \delta$	$1,515071$	$\frac{d^2 A}{dt^2} = K_1 \sin A_r$	$+ 0,3787$
$\operatorname{ctg} t_r$	$0,307242$	$- K_2 \sin 2A_r$	
$\operatorname{csc} t_r$	$1,046134$	$\Delta A_w = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 x$	$+ 6,48''$
$\sin B \operatorname{ctg} t_r$	$0,217160$		
$\cos B \operatorname{tg} \delta \operatorname{csc} t_r$	$1,121217$		

$\operatorname{ctg} A'_r$	-0,904057		
A'_r	312°06'55,34''		
$\delta A'_r = \frac{0,32'' \cos B \cos A'_r}{\sin Z}$	+0,22		

Сумісне визначення геодезичного азимута і складових відхилення прямої лінії із спостереження зірок в різних вертикалах.

Пункт: Іванівка $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,00''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$
 $B = 44^\circ 58' 32,28'' \pm 0,03''$ $L = 3^h 16^m 35,295^s \pm 0,002^s$
 Попередній азимут напрямку Іванівка $a_0 = 333^\circ 15' 50,00''$

Рівняння поправок

Дата	Номер зірки	m	A	Z	P	a	b	c	l'	s	v
17.8.99	186	1.9	108.9°	49.5°	0.58	1	- 0.804	- 0.276	+ 3.14	+3.060	- 0.71
17.8.99	190	- 1.6	145.4	68.8	0.87	1	- 0.221	- 0.320	+ 3.66	+4.119	- 0.65
17.8.99	142	0.3	175.6	53.4	0.64	1	- 0.056	- 0.743	+ 7.76	+7.861	+ 2.78
17.8.99	21	2.2	316.8	30.7	0.26	1	+1.166	+1.242	+ 4.31	+7.718	+ 1.05
17.8.99	119	1.1	217.7	33.3	0.30	1	+0.930	- 1.203	+ 3.18	+3.907	- 3.09
17.8.99	506	1.3	56.5	57.2	0.71	1	- 0.533	+0352.	+ 3.57	+4.389	+ 0.35
18.8.99	119	1.0	240.9	42.1	0.46	1	+0.939	-0.522	+ 8.55	+9.967	+ 3.15
18.8.99	21	2.2	316.5	40.8	0.42	1	+0.802	+0.846	+ 2.27	+4.918	- 1.25
18.8.99	148	1.7	226.2	48.0	0.55	1	+0.652	-0.625	+ 3.78	+4.807	- 1.55
19.8.99	21	2.2	24.5	66.6	0.84	1	-0.179	+0.392	+ 1.86	+3.073	- 1.56
19.8.99	316	1.7	47.5	47.3	0.54	1	-0.682	+0.624	+ 4.02	+4.962	+ 1.26
19.8.99	278	1.9	356.2	17.0	0.09	1	+0.218	+3.261	+ 1.78	+6.259	+ 1.81
[P] = + 6.26									[Pv] = 18.562		

Індивідуальний варіант студенти отримують, додаючи до вільного члена дві останні цифри шифру ab

$$l = l' + a, b$$

Нормальні рівняння

	a]	b]	c]	l]	s]
[Pa	+ 6,260	+ 0,138	+ 0,029	+ 25,440	+ 31,867
[Pb		+ 2,426	- 0,265	+ 2,485	+4,784
[Pc			+ 3,347	- 4,132	- 1,021
[Pl				+ 128,392	+ 152,185
[Ps	- 26,061	- 1,517	+ 3,786	+ 23,793	- 23,792
контроль					

Розрахунково – графічна робота № 2. Сумісне визначення геодезичного азимута і складових відхилення прямої лінії із спостережень зірок у різних вертикалах.

Журнал спостережень:

10.07.1999 р.
 = 15^h50^m
 $Z_{cp} = 44^\circ 52'$

Пункт Іванівка
 Прийом I
 Зірка № 277

Теодоліт ДКМ – 3А № 87990 s
 Хронометр № 4074
 Хронограф ХМП № 1123

$$\operatorname{ctg} Z_{cp} = 1,0047$$

$$\frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} Z_{cp} = 0.866'' \quad \frac{\tau}{2} = 0.862''$$

$$b^2 = \frac{(\Lambda + \Pi)_0 - (\Lambda + \Pi)}{2} \Delta M_L$$

$$= +(m_L - 10) \mu \operatorname{csc} Z$$

$$\operatorname{csc} Z_{\Delta} = 1,000$$

$$\mu \operatorname{csc} Z_{\Delta} = 0,9647 \quad \mu = 0,9647'' \quad \Delta M_k = -(m_k - 10) \mu \operatorname{csc} Z$$

$$\csc Z_{cp} = 1,4175$$

$$\frac{R}{2} (\text{Ш}_k - M_x) = - 0,60''$$

$$\frac{R}{2} (\text{Ш}_k - M_x) \csc Z_{cp} = - 0,85''$$

Об'єкт спостереження	Окулярний мікрометр	Хронометр T_L, R	Рівень	Горизонтальний лімб	Поправки $\Delta M_L, R, \Delta N$	Горизонтальні напрямки	Примітка (вертикальний лімб)
п.Решгово Ліхтар	10 ⁰⁰ 30,3 ⁰ 32,1 32,1		КЛ	225°12' 28,8'' 29,2	$\Delta M_L = +30,39''$	225°12'59,39''	$Z_{\Delta} = 80^{\circ}15'$
	10 31,5 -10	225°12' 29,00''					
	$(M_L - 10) = +31,5$						
Зірка № 227		15 ^h 16 ^m 28,36 ^s 32,02 37,64 42,08 47,63 56,86	27,0-14,3 27,0-14,3 (Л+П) ₀ =4 1,30 в = -7,02 ⁰² КП				
		48 02,11 49 06,63 11,72					
		$T_L = 5^h 53^m 43,71^s$	21,3-34,1 21,3-34,0				

Лекція 8. *Зенітальні способи астрономічних визначень.*

8.1. Особливості вимірювання зенітних віддалей світил.

В зенітальних способах астрономічних визначень величинами, які належить виміряти, є зенітні віддалі світил.

Особливості вимірювання зенітних віддалей світил є в тому, що світила безперервно міняють своє видиме положення в просторі з плином часу. Тому вимірювання зенітних віддалей світил, як правило, необхідно виконувати у визначеній системі відліку часу. В результаті цього процес візування на світило у загальному випадку пов'язаний з відліками показів хронометра в моменти наведення горизонтальної нитки на світило або в моменти проходження світила через горизонтальної нитки, встановленої нерухомо по висоті труби приладу.

Візування методом наведення горизонтальної нитки на світило під рахунок ударів хронометра доцільно застосовувати лише в тих випадках, коли швидкість зміни зенітної віддалі світила близька до нуля. *В південних і середніх широтах це відповідає положенню світил в меридіані і поблизу його.* У високих широтах, де кути між добовими паралелями світил і кругами рівних висот малі, границі застосування методу наведення значно розширюються.

Візування методом спостереження проходження світил через горизонтальної нитки встановлені нерухомо по висоті труби приладу необхідно застосовувати у всіх випадках, коли швидкість зміни зенітної віддалі світила достатньо велика. Для послаблення впливу особистих похибок спостерігача, характерних для методу “Око – вухо”, при точних астрономічних визначеннях спостереження “проходжень” виконують за допомогою контактного мікрометра (напівавтоматичний метод візування) або фотоелектричної реєстрації зоряних проходжень (автоматичний метод візування). Крім особливостей, пов'язаних з методом візування при вимірюванні зенітних віддалей світил для введення поправок за астрономічну рефракцію враховують вплив зовнішніх умов спостережень: температуру, тиск, вологість повітря.

Спостереження світил виконують на різних зенітних віддаль, тому необхідно врахувати, або виключати (доцільно) побудованою програмою спостережень вплив різних джерел похибок приладів, які впливають на результати вимірів у функції зенітних віддалей світил, що спостерігаються.

В астрономічних теодолітах, які застосовують для точних астрономічних визначень, вертикальний круг обертається разом з трубою і, як правило, має підписи ділень, що зростають по ходу годинникової стрілки. Мікроскопи вертикального круга кріпляться в обіймах нерухомої рами, на яку встановлюється також і накладний рівень.

Назвемо **місцем зеніту** і позначимо через M_Z відлік на вертикальному крузі, при якому візирна вісь труби направлена точно в зеніт (тобто, коли візирна вісь співпадає з прямовисною лінією) і коли бульбашка рівня накладного на раму мікроскопів вертикального круга знаходиться на середині. Очевидно, відлік M_Z залишається одним і тим же для спостережень як при крузі ліво (КЛ), так і при крузі право (КП).

Якщо як при крузі ліво обернути трубу у напрямку збільшення зенітної віддалі, то при зростаючих по годинниковій стрілці підписах ділень, відмітки по вертикальному лімбу будуть також зростати. Для круга право будемо спостерігати обернене явище, тобто при зростанні зенітної віддалі труби, відліки по вертикальному лімбу будуть зменшуватись. Зенітна віддаль **любого предмету Z'** , як вертикальний кут, відрахований від направлення в зеніт до направлення на предмет, буде дорівнювати різниці відповідних відліків по вертикальному лімбу. Позначивши відлік при візуванні на предмет для круга ліво через **L**, а для круга право – через **R**, отримаємо:

$$Z' = L - M_Z$$

$$Z' = M_Z - R \quad (8.1.)$$

Із формули (8.1) слідує:

$$Z' = \frac{L - R}{2} \quad (8.2.)$$

і

$$M_Z = \frac{L + R}{2} \quad (8.3.)$$

Якщо підписи ділень вертикального лімба зростають проти ходу годинникової стрілки, то формули для обчислення Z' мають слідуєчий вигляд:

$$Z' = R - M_Z \quad (8.4.)$$

$$Z' = M_Z - L \quad (8.5.)$$

$$Z' = \frac{R - L}{2} \quad (8.6.)$$

$$M_Z = \frac{L + R}{2} \quad (8.6.)$$

Відліки по вертикальному лімбі беруть звичайно по обом мікроскопам з наведенням на молодший і старший штрихи. Після утворюють середній відлік, який виправляють поправкою за нахил осі рівня при алідаді вертикального круга. При точних астрономічних визначеннях рівень звичайно не проводять на середину, тому що це порушує рівновагу частини теодоліта, отриманої ними під час спостереження світила, а положення бульбашки рівня відмічають по відліках його кінців і після виправляють отриманий відлік по лімбі за нахил осі рівня.

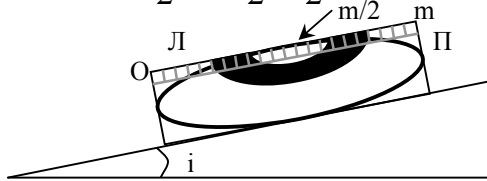
Якщо через L' і R' позначити зняті з лімба відліки, а через i – поправку за нахил осі рівня, то виправлені відліки будуть:

$$L = L' + i \quad R = R' + i \quad (8.7.)$$

Під нахилом осі рівня розуміється кут i , утворений віссю рівня в момент спостережень з тим її напрямком, який вона займала б при положенні бульбашки рівня точно на середині. Очевидно, величина цього кута визначається величиною зміщення середини бульбашки рівня відносно нуля – пункту.

Якщо шкала оцифрована так, що на одному кінці підписаний нуль, а на другому – число ділень, рівня m (середина $m/2$), то нахил осі рівня в діленнях виразиться так:

$$i^{\circ} = \frac{\Lambda + \Pi}{2} - \frac{m}{2} - \frac{1}{2}[(\Lambda + \Pi) - m] \quad (8.8.)$$



де Λ і Π - відліки по лівому і правому кінцям бульбашки при умові, що спостерігач стоїть обличчям до рівня, з тієї ж сторони, де знаходиться вертикальний круг.

Н Цей же нахил, виражений в напівділеннях і в секундах дуги, буде відповідно

$$i^{\frac{\circ}{2}} = [(\Lambda + \Pi) - m] \quad (8.9.)$$

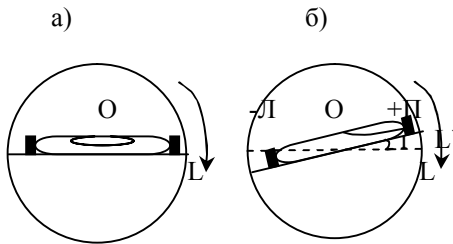
$$i'' = [(\Lambda + \Pi) - m] \frac{\tau''}{2} \quad (8.10.)$$

де $\frac{\tau''}{2}$ - ціна одного напівділення, виражена в секундах.

Якщо шкала рівня оцифрована так, що в середині міститься нуль, а підписи ділень зростають в обидві сторони, то нахил (в секундах) буде:

$$i = (\Lambda + \Pi) \frac{\tau}{2} \quad (8.11.)$$

Знак поправки за нахил осі рівня визначається напрямком зростання підписів ділень на лімбі і положенням нуля (молодшого ділення) на шкалі рівня. При зростанні підписів ділень лімба по ходу годинникової стрілки лівому кінцю бульбашки підписують знак “-”, а правому “+”.



Дійсно, нехай при положенні бульбашки рівня на середній відлік по лімбу буде L . Якщо бульбашка рівня зійшла вправо, то це вказує на переміщення аліади (лінії, яка з'єднує нуль – пункти мікроскопів – мікрометрів) вертикального круга в сторону зменшення відліку по лімбу. Тому для отримання правильного відліку L треба зняти з лімба відлік L' збільшити на кут i , тобто $L = L' + i$.

Кут i буде додатнім лише в тому випадку, якщо відліку по правому кінцю бульбашки придати знак “+”, а лівому “-”. Якщо ж у даному випадку, тобто при зростанні підписів ділень лімба по годинниковій стрілці, шкала рівня оцифрована так, що на лівому кінці шкали буде підпис m , а на правому 0 , то поправка за нахил осі рівня обчислиться за формулою:

$$i = [m - (\Lambda + \Pi)] \frac{\tau''}{2} \quad (8.12.)$$

Для випадку, коли на лівому кінці шкали написано число m_1 , а на правому m_2 , причому $m_2 > m_1$, поправка за нахил визначиться формулою:

$$i = [(\Lambda + \Pi) - (m_1 + m_2)] \frac{\tau''}{2} \quad (8.13.)$$

якщо ж $m_1 > m_2$, поправка за нахил буде:

$$i = [(m_1 + m_2) - (\Lambda + \Pi)] \frac{\tau''}{2} \quad (8.14.)$$

Так як положення світил безперервно змінюється внаслідок видимого добового обертання небесної сфери, то при надходженні їх зенітних віддалей звичайно користуються формулою (8.1.). при цьому методи спостережень і обчислень будуть таким чином, щоб у кінцевому результаті визначення широти чи часу виключився вплив похибок у прийнятому значенні M_z .

Формулою (8.2.) при обчисленнях зенітних віддалей світил користуються менше; при цьому зенітна віддаль, виправлена поправкою за прискорення руху світила, буде відповідати середньому моменту спостережень світила, виконаних при обох положеннях вертикального круга теодоліта.

Для послаблення впливу випадкової похибки візування на світило методом наведення горизонтальної нитки під рахунок ударів хронометра доцільно виконувати багатократне візування за допомогою рухомої нитки окулярного мікрометра труби. У цьому випадку відлік по вертикальному лімбу необхідно виправити поправкою за окулярний мікрометр.

Якщо через L_0 і R_0 позначити відліки по лімбу, а через L' і R' - відліки з поправкою за мікрометр, то

$$\begin{aligned} L' &= L_0 \pm (M_L - 10^{06}) R \\ R' &= R_0 \pm (M_k - 10^{06}) R \end{aligned} \quad (8.15.)$$

де M_L і M_k - відліки по головці окулярного мікрометра; R - ціна повороту окулярного мікрометра, виражена в секундах градусної міри.

Поправка за мікрометр додається або віднімається від того, зростають чи зменшуються відліки по мікрометру з збільшенням зенітної віддалі.

Для врахування впливу астрономічної рефракції під час спостережень періодично вимірюється температура повітря і атмосферний тиск.

Зенітна віддаль світила, виправлена поправкою за рефракцією, буде:

$$Z = Z' + \rho \quad (8.16.)$$

Враховуючи можливі великі похибки таблиць рефракції поблизу горизонту, зенітні віддалі світил, які перевищують $70 - 75^\circ$, не вимірюються, а в точних способах астрономічних визначень спостерігаючи світила на зенітних віддальх, які перевищують $50 - 60^\circ$, не рекомендується.

Лабораторна робота № 8. Зрівноваження результатів. Оцінка точності.

8.2. Стандартні формули для обчислення невідомих.

$$\Delta a' = \frac{\Delta' a}{\Delta}; \quad x = \frac{\Delta x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta y}{\Delta}$$

де

$$\begin{aligned} \Delta &= [P] \Delta_{11} - [Pb] \Delta_{12} + [Pc] \Delta_{13} \\ \Delta' a &= - \{ [Pl] \Delta_{11} - [Pbl] \Delta_{12} + [Pcl] \Delta_{13} \} \\ \Delta x &= - \{ [Pc] \Delta x_{31} - [Pbc] \Delta x_{32} + [Pcc] \Delta x_{33} \} \\ \Delta y &= - \{ - [Pb] \Delta x_{31} + [Pbb] \Delta x_{32} - [Pbc] \Delta x_{33} \} \end{aligned}$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [Pbb] & [Pbc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{12} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pc] \\ [Pbb] & [Pbc] \end{vmatrix};$$

$$\Delta x_{31} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pbl] \\ [Pc] & [Pcl] \end{vmatrix}; \quad \Delta x_{32} = \begin{vmatrix} [P] & [Pl] \\ [Pc] & [Pcl] \end{vmatrix}; \quad \Delta x_{33} = \begin{vmatrix} [P] & [Pl] \\ [Pb] & [Pbl] \end{vmatrix}.$$

Для нашої системи нормальних рівнянь маємо:

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= + 8,0496; & \Delta x_{31} &= - 0,6423; & \Delta &= + 50,3226; \\ \Delta_{12} &= + 0,4696; & \Delta x_{32} &= - 26,6041; & \Delta a' &= - 204,0569; \\ \Delta_{13} &= - 0,1070; & \Delta x_{33} &= + 12,0454; & \Delta y &= + 61,2609. \end{aligned}$$

$$\Delta a' = \frac{-204,0569}{50,3226} = -4,055'', \quad x = \frac{-33,2473}{50,3226} = -0,66'',$$

$$y = \frac{61,2609}{50,3226} = +1,217''.$$

8.3. Стандартні формули для оцінки точності.

а) середня квадратична похибка ваги

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-k}}$$

де

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pl] \Delta a' + [Pbl] + [Pbl]x + [Pcl]y$$

Для нашого прикладу

$$[Pv^2] = 128,392 - 103,159 - 1,640 - 5,041 = 18,552$$

$$\mu = 1,43''$$

$$v_i = a_i \Delta a' + b_i x + c_i y + l_i$$

б) Середні квадратичні похибки зрівноважених значень невідомих

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{Pa'}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{Px}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{Py}};$$

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{\Delta_{11}}; \quad P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{22}}; \quad P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{33}}.$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [P_{bb}] & [P_{bc}] \\ [P_{bc}] & [P_{cc}] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} [P] & [P_c] \\ [P_c] & [P_{cc}] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} [P] & [P_b] \\ [P_b] & [P_{bb}] \end{vmatrix}.$$

Для нашого прикладу маємо:

$$\Delta_{11} = + 8,049; \quad \Delta_{22} = + 20,9519; \quad \Delta_{33} = + 15,1678.$$

$$P_{a'} = \frac{50,3226}{8,0496} = 6,252; \quad P_x = \frac{50,3226}{20,9519} = 2,402,$$

$$P_y = \frac{50,3226}{15,1678} = 3,318.$$

$$m_{a'} = \frac{1,43''}{\sqrt{6,252}} = 0,57''; \quad m_x = \frac{1,43''}{\sqrt{2,402}} = 0,92''; \quad m_y = \frac{1,43''}{\sqrt{3,318}} = 0,78''.$$

8.4. Зрівноважені значення шуканих величин.

1) Зрівноважені значення шуканих величин.

$$a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 50,00'' - 4,06'' = 333^\circ 16' 45,94'';$$

$$m_{a'} = 0,57''$$

2) Геодезичний азимут того ж напрямку

$$a_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B + \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} Z_\Delta}$$

$$\lambda_0 - L = - 0,795''; \quad 15(\lambda_0 - L) \sin B = - 8,43'';$$

$$\eta_0 = 15(\lambda_0 - L) \cos B = - 8,44''.$$

$$+ \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} Z_\Delta} = - 0,03''; \quad \xi_0 = \varphi_0 - B = + 7,72''; \operatorname{tg} Z_\Delta = 149,47'';$$

$$a_r' = 333^\circ 16' 45,94'' + 8,43'' - 0,03'' = 333^\circ 16' 54,34''; \quad m_{a_r} = m_{a'} = 0,57''$$

3) Асторомо – геодезичні складові відхилення прямовисної лінії

$$\xi = x + (\varphi_0 - B) = - 0,66'' + 7,72'' = + 7,1''; \quad m_x = m_\xi = 0,9'';$$

$$\eta_0 = y + 15(x_0 - L) \cos B = + 1,22'' - 8,44'' = - 7,2''; \quad m_y = m_\eta = 0,8''.$$

4) Широта пункту

$$\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 40,00'' - 0,66'' = 44^\circ 58' 39,30''; \quad m_x = m_\varphi = 0,9''.$$

5) Довгота пункту

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi = 3^h 16^m 34,500^s + \frac{1,22''}{10,611} = 3^h 16^m 34,615^s;$$

$$m_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi = \frac{0,78}{10,611} = 0,074^s.$$

Лекція 9. Загальна теорія зенітних способів астрономічних визначень.

Постановка і рішення загальної задачі.

Для зенітальних способів астрономічних визначень основним рівнянням, яке зв'язує величину Z , що вимірюється з визначаючими значеннями φ і часу s (поправка годинника u), являється:

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (9.1.)$$

в якому

$$t = T + u - \alpha \quad (9.2.)$$

де T – показання хронометра в момент спостереження світила; α - його пряме сходження.

За допомогою рівняння (9.1.) по виміряним зенітним віддалям можна вирішувати задачі як сумісного визначення широти і часу, так і задачі їх роздільного визначення. В тому і другому випадках задача визначення величин φ і u значно полегшується тими обставинами, що їх наближене значення буває вже заздалегідь відомим.

Найбільш загальною задачею зенітальних способів є задача сумісного визначення широти і часу по виміряним зенітним віддалям світил.

При постановці загальної задачі не накладаються які – небудь обмежуючі умови на вибір світил по зенітним віддалям і азимутам, крім обмежень, обумовлених впливом систематичних інструментальних і рефракційних похибок, а саме $10^\circ < Z < 60^\circ$.

Питання встановлення найвигідніших умов спостережень (умов найвигіднішого вибору світил по зенітним віддалям і азимутам) для цілей сумісного або роздільного визначення широти і часу отримують своє рішення в результаті рішення загальної задачі.

Принципово рішення загальної задачі може бути отриманим не менше ніж з двох рівнянь (9.1.). однак в загальному випадку вимірювання зенітних віддалей світил може виконуватись при одному положенні вертикального круга теодоліта (КЛ чи КП). В цьому випадку всі виміряні зенітні віддалі світил отримують додаткову невідому поправку:

$$\Delta Z = \epsilon = \text{const} \quad (9.3.)$$

за неточне значення місця зеніту M_Z і другі систематичні похибки, загальні для групи зірок, тому в рівнянні (9.1.) буде три невідомих величини φ , u і ϵ .

При цій умові рішення загальної задачі може бути отримане мінімум з трьох рівнянь (9.1.), тобто даним спостережень в крайньому разі трьох світил.

Однак, необхідно зазначити, що рівняння систем тригонометричних рівнянь (9.1.) в кінцевому вигляді дуже складне і не може мати практичного значення.

Задача значно спрощується, якщо є наближені значення φ_0 , u_0 і M_Z^0 , за допомогою яких вирішуються лінійні рівняння поправок, які витікають з виразу (9.1.).

Маючи на увазі, що

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi \quad (9.4.)$$

і

$$t_i = T_{Hi} + u_0 + \Delta u + \omega (T_{Hi} - X) - \alpha_i = t_{0i} + \Delta u \quad (9.5.)$$

де

$$t_{0i} = T_{Hi} + u_0 + \omega (T_{Hi} - X) - \alpha_i \quad (9.6.)$$

Розкладемо вираз для Z , представлений формулою (9.1.), в ряд Тейлора по степеням $\Delta \varphi$ і Δu . В практиці астрономічних визначень значення $\Delta \varphi$ і Δu можуть бути прийняті дуже малими. Тому при розкладі в ряд цілком достатньо для практичних цілей обмежитися лінійними членами, тобто

$$Z_i = Z_{0i} + \left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + 15 \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_i \Delta u \quad (9.7.)$$

У виразі (9.7.)

$$Z_{0i} = \arccos(\sin \varphi_0 \sin \delta_i + \cos \varphi_0 \cos \delta_i \cos t_{0i}) \quad (9.8.)$$

- обчислене значення зенітної віддалі з попередніми значеннями φ_0 і u_0 спостереженнями T_{hi} ;

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi} \right)_i = \pm \cos A_i \quad \text{і} \quad \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_i = \pm \cos \varphi_0 \sin A_i \quad (9.9.)$$

У виразах (9.9.) знак плюс відповідає рахунку азимута світила від точки Півдня; знак мінус – від точки Півночі.

У формулах (9.4.) - (9.9.) маємо:

T_{hi} - момент хронометру спостереження світила;

x – показання хронометра в середній момент прийому радіосигналів часу;

u_0 - поправка хронометра в момент x , отримана з обробки прийому радіосигналів з попередньою довготою λ_0 ;

Δu – поправка до величини u_0 за невірно прийняту довготу;

ω – годинний час хронометра;

$(T_{hi} - X)^h$ – проміжок часу, виражений в годинах, який пройшов від середнього моменту прийому радіосигналів до моменту спостереження світила;

α_i і δ_i - видимі координати світила, виправлені поправками за короткоперіодичні члени нутації.

Порівнюючи значення зенітної віддалі, представлене формулою (9.7.), з його вимірним значенням по відлікам вертикального круга, отримаємо слідувачи рівняння поправок

$$Z_{0i} + \left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + 15 \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_i \Delta u = Z_{H'} + r + v_i \quad (9.10.)$$

де

$$Z_{H'} = (L_i' + i_i) - M_Z^0 + \rho_i + g \sin Z_i$$

або

$$Z_{H'} = M_Z^0 - (R_i' + i_i) + \rho_i + g \sin Z_i \quad (9.11.)$$

r - поправка зенітної віддалі за неточно прийняте місце зеніту; v_i - ймовірніша поправка вимірної зенітної віддалі.

Підставивши значення частинних похідних, отримаємо кінцеве рівняння поправок у вигляді :

$$-e \pm \cos A_i \Delta \varphi \pm 15 \cos \varphi_0 \sin A_i \Delta u + l_i = v_i \quad (9.12.)$$

де

$$l_i = Z_{0i} - Z'_{hi} \quad (9.13.)$$

Для сумісного визначення трьох невідомих r , Δu і $\Delta \varphi$ необхідно виконати виміри зенітних віддалей в крайньому разі трьох світил і вирішувати систему з трьох рівнянь виду (9.12.). при відсутності надлишкових вимірів системи рівнянь, в правих частинах яких замість v_i будуть нулі.

Якщо спостереження серії зірок розташувати у проміжку між двома прийомами радіосигналів точного часу, то в результаті сумісної обробки даних спостережень і прийому радіосигналів можна безпосередньо отримати значення географічних координат (широти і довготи) пункти спостереження.

Дійсно, якщо позначити через u поправку хронометра відносно місцевого зоряного часу в середній момент прийому сигналів, а через U поправку хронометра відносно зоряного часу початкового меридіана в той же момент, то

$$\lambda = u - U \quad (9.14.)$$

Поправка хронометра U відносно грінвіцького зоряного часу виводиться з високою точністю із прийому радіосигналів точного часу і не залежить від довготи місця спостереження. Очевидно, $d\lambda = du$, тобто визначаємо значення поправки Δu до наближеного значення u_0 в рівняннях поправок може бути замінено рівним йому значенням поправки $\Delta\lambda$ до прийнятої при обчисленнях наближеної довготи пункту λ_0 .

Рівняння поправок в цьому випадку має вигляд:

$$-r \pm \cos A_i \Delta \varphi \pm 15 \cos \varphi_0 \sin A_i \Delta \lambda + I_i = v_i \quad (9.15.)$$

В подальшому, в залежності від задачі, що потребує рішення, будемо користуватися рівняннями (9.12.) або (9.15.).

Із рівнянь (9.15.), (9.12.) слідує, що сумісне визначення r , $\Delta \varphi$ і Δu можливе лише при спостереженнях світил у різних вертикалах. Якщо виміри зенітних віддалей світил виконані в площині одного вертикала, то в принаймні в двох рівняннях із трьох коефіцієнти будуть пропорційні. Визначник такої системи буде рівний нулю, а сама система - не вирішувана.

В загальному випадку рішення задачі сумісного визначення φ і $u(\lambda)$ виконується по спостереженням не трьох а n світил.

Якщо виконані виміри зенітних віддалей n світил у різних вертикалах, причому $n > 3$, то для визначення трьох невідомих будемо мати надлишкове число $n - 3$ рівнянь.

Із рішення системи n рівнянь виду (9.12.) або) по методу найменших квадратів знайдемо ймовірніші значення величин, що визначаються, і можемо оцінити точність їх виводу.

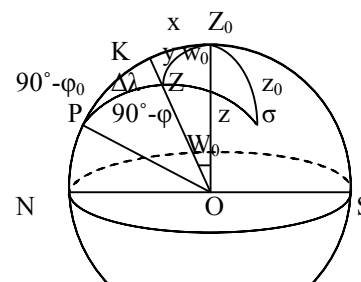
Якщо попередні координати пункту відмінні від їх істинних значень не більше ніж на $1 - 1,5'$, то впливом членів розкладу вищих порядків можна нехтувати по малості. З вказаною точністю попередні координати пункту можна зняти впевнено з карти масштабу 1:1000000 і крупніше.

Практично значення зчислимих координат можна отримати з точністю до декількох секунд дуги будь - яким з наближених способів, які будуть розглянуті пізніше.

В тому випадку, коли попередня значення координат відомі з похибкою, яка не перевищує $10''$, коефіцієнти при невідомих в рівняннях поправок достатньо мати до трьох значущих цифр. При цьому похибка зрівноважених значень невідомих не перевищить $0,03''$.

Геометрична інтерпретація рівняння поправок зенітальних способів.

Умовні (зчислимі) зенітні відділі світила Z_0 , обчислені з умов N - ними (попередніми) координатами пункту φ_0 і λ_0 , вимірюються на допоміжній небесній сфері від умовного (зчислимого) зеніту Z_0 , а істинна (астрономічна) зенітна віддаль Z - від астрономічного зеніту Z . Положення астрономічного зеніту на небесній сфері відповідає точним значенням координат φ і λ .



Дуга ZZ_0 , численно рівня центральному куту $\angle ZOZ_0 = W_0$, є відхилення прямовисної лінії OZ від умовної нормалі OZ_0 . Вона називається умовним відхиленням прямовисної лінії. Якщо з точки Z опустити сферичний перпендикуляр на умовний меридіан PZ_0 , то дуга $Z_0K = x$ називається складовою умовного відхилення прямовисної лінії в меридіані, а дуга $ZK = y$ - складовою умовного відхилення прямовисної лінії у першому вертикалі.

$$\begin{aligned} x &= \varphi - \Delta \varphi \\ y &= 15(\lambda - \lambda_0)^s \cos \varphi \end{aligned} \quad (9.16.)$$

Якщо замість умовних координат пункту φ_0 і λ_0 взяти геодезичні координати B і L , то рівняння поправок будуть автоматично редуковані до геодезичного зеніту, а із зрівноваженнями отримаємо значення складових астрономо – геодезичного відхилення прямої лінії ξ і η .

Тоді:

$$\begin{aligned} \xi &= \varphi - B \\ \eta &= 15(\lambda - L) \cos \varphi \end{aligned} \quad (9.17.)$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{геод.}} - Z_i &= \xi \cos A_i + \eta \sin A_i \\ Z_i &= Z_{\text{вим}} + r + v_i \end{aligned} \quad (9.18.)$$

Лабораторна робота № 9. Обробка спостережень у методі Сомнера.

Обчислення вільних членів рівняння поправок.

$$l_i = Z_{\text{вир.}i} - Z'_{\text{вим.}i}; \quad l'_i = l_i \pm N;$$

$$\cos Z_{\text{вир.}i} = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta)(1 + \cos t_{0i}) - (\varphi_0 + \delta)(1 - \cos t_{0i})]$$

Дії	З і р к а	
	345	424
$T_H + \Delta T_a$	15 ^h 02 ^m 27,81 ^s	15 ^h 09 ^m 49,50 ^s
u_0	- 3.37	- 3.37
$\omega(T_H - x)$	- 0.11	- 0.09
s	15 02 24.33	15 09 46.04
α	14 14 04.99	17 33 20.30
t_0^h	0 48 19.34	- 2 23 34.26
t_0^0	12° 04'50.10''	- 35° 53'33.90''
φ_0	44 58 40.00	44 58 40.00
δ	19 21 51.64	12 35 01.78
$\varphi_0 - \delta$	25 36 48.36	32 23 38.22
$\varphi_0 + \delta$	64 20 31.64	57 33 41.78
$\cos(\varphi_0 - \delta)$	0.901718	0.844385
$1 + \cos t_0$	1.977854	1.810116
$\cos(\varphi_0 + \delta)$	0.43297	0.536393
$1 - \cos t_0$	0.022146	0.189884
$\cos Z_{\text{выч}}$	0.886953	0.713291
$Z_{\text{выч}}$	27° 30'26.0''	44° 29'38.0''
$Z'_{\text{вим}}$	27° 31'23.3''	44 30 41.6
l	- 57.3	- 53.6
$N_{\text{граф}}$	+ 70.0	+ 70.0
$l'_{\text{граф}}$	+ 12.7	+ 16.4
$N_{\text{анал}}$	+ 57.0	+ 57.0
$l'_{\text{анал}}$	- 0.3''	+ 3.4''
A	205.5°	125.3°

Аналитичне зрівноваження по способу найменших квадратів.

Рівняння поправок.

$$ar + b_i x + c_i y + l_i = v_i$$

де $a = -1$; $b_i = -\cos A_{Ni}$; $c_i = -\sin A_{Ni}$;

Номер	N_{Ni}	A	b	c	l	S	Вага
-------	----------	-----	-----	-----	-----	-----	------

зірки							p
453	77,4°	- 1	- 0,22	-0,98	+ 1,7''	- 0,50	1
345	205,5	- 1	+ 0,90	+ 0,43	- 0,3	- 0,03	1
424	125,3	- 1	+ 0,58	- 0,82	+ 3,4	- 2,16	1
325	308,3	- 1	- 0,62	+ 0,78	+ 0,1	- 0,74	1
318	272,1	- 1	- 0,04	+ 1,00	- 2,2	- 2,24	1
360	349,3	- 1	- 0,98	+ 0,19	- 3,5	- 5,29	1
506	65,7	- 1	- 0,41	- 0,91	+ 1,6	- 0,72	1
Сумарне		- 7	- 0,79	- 0,31	+ 0,80	- 7,30	- 1/7

Індивідуальний номер варіанта студенти беруть по двом останнім цифрам шифру в заліковій книжці, і додають їх до вільного члена відповідної зірки.

$$I_{i \text{ варіанта}} = I_i + a, b''$$

де **a** і **b** - дві останні цифри залікової книжки студента

Потім підраховується стовпець **s**

$$S_i = a_i + b_i + c_i + I_i$$

Лекція 10. Сумісне визначення широти і довготи по виміряним зенітним віддалям світил в різних вертикалях (спосіб Сомнера – Акімова)

1.1. Загальні положення

Сумісне визначення x і y може бути виконано по виміряним зенітним віддалям світил мінімум у двох вертикалях, причому для отримання обох шуканих величин з рівною вагою ($P_x = P_y$) спостереження світил повинні виконуватися або при рівномірному їх розташуванні по азимутам, або в площинах двох любых взаємно перпендикулярних вертикалів симетрично відносно зеніту. Теорія способу сумісного визначення x і y (φ і λ або ξ і η) по виміряним зенітним віддалям n світил в різних вертикалях являється теорією найбільш загальної задачі зенітальних способів астрономічних визначень.

Суть даного способу лежить у вимірюванні зенітних віддалень n світил ($n \geq 3$), рівномірно розташованих по азимутам. Зенітні віддалі світил рекомендується вибирати в межах від 10 до 60°.

Для кожного спостереженого світила складається рівняння поправок

$$a_r + b_i x + c_i y + I_i = v_i \quad \text{з вагою } P = 1 \quad (10.1)$$

Із рішення n рівнянь поправок по методу найменших квадратів знаходять значення умовних складових відхилення прямої лінії x і y . Далі за формулами

$$\varphi = \varphi_0 + \chi; \quad \lambda' = \lambda_0 + \gamma + \frac{y}{15} \sec \varphi \quad (10.2)$$

обчислюють астрономічні широту і довготу пункту. У випадку необхідності можна обчислити астрономо – геодезичні складові відхилення прямої лінії ξ і η .

Замітимо, що ця ж задача може бути вирішена з геодезичними координатами пункту **B** і **L** за формулами

$$a_r + b_i \xi + c_i \eta + I_{ii} = v_i \quad \text{з вагою } P_i = 1 \quad (10.3)$$

Оцінка точності зрівноважених значень визначаємих величин виконується відповідно за формулами

$$\mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n-3}} \quad (10.4)$$

$$m_r = \frac{\mu}{\sqrt{Pr}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{Px}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{Py}} \quad (10.5)$$

Необхідно відмітити, що при спостереженнях світил на різних зенітних віддальях на результати вимірів будуть у повній мірі впливати невраховані систематичні похибки, які діють у функції зенітних віддалей спостерігаємих світил (остаточний вплив рефракції, невраховані похибки гнуття труби приладу, систематичні похибки діаметрів вертикального круга і т.і.).

В результаті цього для точних астрономічних визначень даний спосіб не застосовується. Для наближених астрономічних визначень він має цілий ряд переваг, тому що дозволяє в короткий термін по спостереженням невеликого числа світил отримати координати φ і λ . Для спостереження вночі спосіб не потребує складання спеціальних ефемерних зірок. Для визначень використовують яскраві зірки, вибір яких виконується візуально. Внаслідок цього спосіб являється гнучким і він дозволяє виконувати спостереження у важких метеорологічних умовах – спостерігати зірки у просвітах хмар, що неможливо виконати другими способами. При наявності ефемерид яскравих зірок спосіб з успіхом можна застосовувати у денний час. При цьому в програму спостережень можна включати також Сонце і планети. Завдяки вказаним перевагам спосіб знаходить широке застосування при розвитку опорних геодезичних мереж спеціального призначення, в різних експедиційних умовах, в авіаційній і морській астрономії.

В залежності від необхідної точності отримання астрономічних координат, приладів, що застосовуються, і методики вимірів, визначення астрономічних пунктів даним способом звичайно виконують із спостереження двох – трьох серій зірок по 6 – 8 зірок в кожній серії.

При розрахунку необхідності точності значення середньої квадратичної похибки одиниці ваги μ приймається із досвіду спостереження даним приладом, а значення ваг зрівноважених значень невідомих підраховується на основі формул

$$Pr = n; \quad Px = \frac{n}{2}; \quad Py = \frac{n}{2}; \quad (10.6)$$

для випадку рівномірного розподілення світил по азимутам.

Наприклад, для спостережень теодолітом У5 методом “Око – вухо” $\mu=1,8''$, число зірок в одній серії $n = 6$ $Px = Py = \frac{n}{2}$, отримаємо

$$m_x = m_\varphi = \mu \sqrt{\frac{1}{Px}} = 1.8'' \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 1.0''$$

$$m_y = \mu \sqrt{\frac{1}{Py}} = 1.8'' \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 1.0''$$

$$m_\lambda = \frac{m_y}{15} \sec \varphi \approx 0.07^s \sec \varphi$$

Необхідно відмітити, що приведені значення середніх квадратичних похибок дають характеристику точності по внутрішній сходимості результатів спостережень. Враховуючи вказану вище дію систематичних похибок вимірювання зенітних віддалей світил, дійсна точність визначень даним способом буде дещо нижчою ніж отримана по апріорним підрахункам.

Ідея способу сумісного визначення φ і λ . була відома давно. Його розробки велись багатьма астрономами.

В морехідній астрономії, а також в другій спеціальній літературі він відомий по імені англійського моряка Сомнера. Однак слід відмітити, що Сомнер дав лише графічний метод обробки спостережень зенітної віддалі Сонця на географічній карті в проекції Меркатора (1843р.). Ця ж задача була вирішена дещо раніше російським моряком Акімовим (1839р.)

10.2 Спостереження.

Загальний порядок спостереження у кожній серії складається із:

- прийому сигналів часу 1-ї радіостанції;
- виміру зенітних віддалень n світил (6-8 світил);
- прийому сигналів часу 2-ї радіостанції.

Перед спостереженнями теодоліт виставляється на штативі або на стовпі, ретельно горизонтується і орієнтується в меридіані. Вимірювання зенітних віддалей світил можна виконувати як при двох, так і при одному положенні вертикального круга приладу (КЛ або КП). Спостереження, виконані при двох положеннях вертикального круга, будуть при однаковому числі світил дещо точніше спостережень, виконаних при одному крузі. Крім того, при вимірах зенітної віддалі кожного світила при двох кругах, можна не боятись можливих змін по часу місця зеніту приладу. Однак, спостереження і їх обробка, виконані при двох кругах, займають значно більше часу, ніж відповідні їм спостереження при одному крузі. Тому за один і той же проміжок часу у вимірах при одному крузі можна виконати спостереження значно більшого числа світил, ніж при вимірах, виконаних при двох кругах. З врахуванням цього можна сказати, що обидві методики вимірів практично однакові по точності одержаних результатів.

При роботі з сучасними високоточними кутомірними приладами можна рекомендувати слідуєчу методику вимірювань зенітних віддалей світил (спостереження при одному крузі –КЛ):

- наведення труби теодоліта на вибране світило;
- відлік рівня при вертикальному крузі;
- спостереження проходження світила через три середні горизонтальні нитки поблизу вертикального бісектора; при цьому записують покази хронометра T_i , що відповідають моментам проходження світила через вказані нитки;
- відлік вертикального лімба;
- відлік горизонтального лімба з точністю до десятої долі градуса.

Відлік горизонтального лімба виконується в цьому способі з метою подальшого виявленого розпізнавання спостерігаємої зірки, а також для знаходження коефіцієнтів при невідомих x і y у рівняннях поправок.

При орієнтованому теодоліті відлік горизонтального лімба відповідає азимуту спостерігаємого світила. Якщо вибране світило виявиться в момент спостереження в меридіані чи поблизу нього, то візування на світило виконується методом наведення середньої горизонтальної нитки під рахунок ударів хронометра. При цьому виконується послідовно три наведення.

Спостереження Сонця виконують аналогічним чином. При цьому для приведення спостережень до центра Сонця візування виконується на верхній і нижній краї Сонця.

На початку, в середині і в кінці спостереження серії світил записують покази барометра і термометра, необхідні для обчислення поправки за рефракцією. При обчисленні зенітної віддалі Сонця, крім впливу рефракції, враховується добовий паралакс.

10.3. Обробка спостережень.

Обчислення спостережень складається із слідуючих операцій:

- обробки прийому радіосигналів часу;
- обробки журналу спостережень;
- обчислення вільних членів рівнянь поправок;
- виведення кінцевих значень координат астрономічного пункту і оцінки точності.

Обробка прийому радіосигналів координованого часу двох станцій (до спостереження і після спостереження світил) виконується за формулами і схемою, які приводяться в Інструкції. Із обробки прийому радіосигналів часу з попередньою довготою пункту λ_0 виводяться значення поправок хронометра u_0 відносно місцевого зоряного часу в середній момент прийому X і часовий хід хронометра ω .

Приведено результати обробки прийому радіосигналів часу для розглядаемого прикладу

$$u_{01} = -3,569^s \text{ в момент } X_1 = 14^h 34,8^m$$

$$u_{02} = -3,163^s \text{ в момент } X_2 = 16^h 31,1^m$$

$$u_0 = \frac{u_{01} + u_{02}}{2} = -3.366^s \text{ в момент } X = \frac{X_1 + X_2}{2} = 15^h 35,0^m$$

$$\omega = \frac{u_{01} + u_{02}}{(X_2 - X_1)^h} = \frac{-3.163^s + 3.569^s}{2} = +0.203^s$$

Обробка журналу спостережень для кожного світила включає обчислення:

- середнього моменту спостереження світила $T_n = \Sigma T_i / n$ де T_i момент по хронометру, який відповідає проходженню світила через i - у нитку, n – число ниток;
- нахилу i осі рівня при вертикальному крузі за формулою

$$i'' = [(\Lambda + \Pi) - m] \frac{\tau}{2} \quad (10.7)$$

- середнього відліку по вертикальному лімбу L (R), виправленого поправкою за рівень

$$L = L' + i; \quad R = R' + i; \quad (10.8)$$

- поправки за рефракцію

$$\rho = \rho_0 \gamma B \quad (10.9)$$

де $\rho_0 = \mu \operatorname{tg} Z$ - середня рефракція, вибрана з таблиць 39 Астрономічних таблиць по аргументу; $Z'_{\text{вим.}}$ - видимі зенітні віддалі. Величину γ вибирають з розділі 2 тих же таблиць по аргументу t° - температурі зовнішнього повітря під час спостережень. Величину B вибирають з розділу 3 таблиць по аргументу B , мм (тиск атмосфери).

- поправки за гнуття труби теодоліта $\Delta Z = g \sin Z$ коефіцієнт g знаходиться з спеціальних досліджень приладу;
- спостереження зенітної віддалі світила за формулами

$$Z'_{\text{вим.}} = L - M^\circ Z + \rho + g \sin Z \quad (10.10)$$

$$Z'_{\text{вим.}} = M^\circ Z - R + \rho + g \sin Z \quad (10.11)$$

При спостереженнях Сонця для кожного наведення зенітна віддалі обчислюється за формулами:

$$\begin{aligned} Z'_{\text{вим.}} &= L - M^\circ Z + \rho + g \sin Z_0 - p_0 \sin Z_0 \pm R_0 \\ Z'_{\text{вим.}} &= M^\circ Z - R + \rho + g \sin Z_0 - p_0 \sin Z_0 \pm R_0 \end{aligned} \quad (10.12)$$

Де p – горизонтальний добовий паралакс Сонця; R_0 - видимий радіус Сонця.

У виводі середньої зенітної віддалі радіус Сонця можна не враховувати. Обчислення вільних членів рівнянь поправок виконують за формулою:

$$l_0 = Z_{\text{об.}} - Z'_{\text{вим}} \quad (10.13)$$

де

$$\cos Z_{об.} = \sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0 \quad (10.14)$$

У формулі (10.14) φ_0 - попередні (зчислимі) значення широти пункту; t_0 - попередні(зчислимі) значення часового кута світила.

Часовий кут t_0 обчислюється з зчислимыми значеннями поправки хронометра u_0 приведеної часовим ходом до моменту спостереження за формулою:

$$t_{0i} = T_H + \Delta T_{ai} + u_0 + \omega(T_H - X) - \alpha \quad (10.15)$$

де $\Delta T_{ai} = -0,021^s \cos Z$ - поправка за вплив добової аберації.

Якщо спостереження світил виконувались при двох кругах, то вільний член обчислений за формулою (10.14) з середнім моментом в прийомі, необхідно виправити поправкою за відділі прискорення руху світила по зенітній віддалі.

$$l = l_0 + \Delta l_v \quad (10.16)$$

поправка за прискорення Δl_v обчислюється за формулою:

$$\Delta Z_w = 5.545 \frac{d^2 Z}{dt^2} \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \quad (10.17)$$

де

$$\Delta T = T_H - T_{L,R}; \quad T_H = \frac{T_L + T_R}{2}; \quad T_{L,R} = \frac{\sum T_{L,R_i}}{n} \quad (10.18)$$

Складання рішення систем рівнянь поправок.

Для кожного спостереженого світила складається рівняння поправок

$$a r + b_i x + c_i y + l_i = v_i \quad \text{з вагою } p_i = 1 \quad (10.20)$$

де коефіцієнти при невідомих представляють собою слідувачі величини: $a = -1$, $b_i = \pm \cos A_i$,

$c_i = \pm \sin A_i$. Знак плюс перед коефіцієнтами b_i і c_i відповідає азимуту A від точки Півдня, а знак мінус – від точки півночі.

Рівняння поправок можна рішати по методу найменших квадратів у слідувачому порядку. Складається таблиця рівнянь поправок і обчислюються коефіцієнти і вільні члени нормальних рівнянь. Так як поправка r за неточно вказане місце зеніту не враховується, то її доцільно виключати при зрівнюванні, застосувавши для цієї цілі перше правило Шрейберга. Для цього до рівнянь поправок даної серії зірок додають сумарне рівняння виду

$$[a]r + [b_i]x + [c_i]y + [l_i] = v \quad \text{з вагою } p_i = 1/n \quad (10.21)$$

де n - число зірок, прийнятих в обробку.

Система нормальних рівнянь при умові застосування першого правила Шрейберга буде

$$\begin{aligned} [pbb]x + [pbc]y + [pbl] &= 0 \\ [pbc]x + [pcc]y + [pcl] &= 0 \end{aligned}$$

(10.22)

Рішення системи нормальних рівнянь (10.22) може бути виконано як методом послідовного виключення невідомих по сумі Гауса, так і звичайним алгебраїчним шляхом за допомогою визначників.

Лабораторна робота № 10. Зрівноваження за способом найменших квадратів.

10.1. Нормальні рівняння.

	a]	b]	c]	l]	s]
[pa		+ 2,7093	- 0,24	+ 4,22	+ 6,60
[pc		+ 2,62	+ 4,28	- 8,80	- 4,76
[pl				+ 34,11	+ 29,53

[ps контроль]		- 3,40	+ 7,96	- 4,58	- 0,02
------------------	--	--------	--------	--------	--------

10.2. Рішення нормальних рівнянь за допомогою визначників.

Нормальні рівняння.

$$[pbb]x + [pbc]y + [pbl] = 0$$

$$[pbc]x + [psc]y + [pcl] = 0$$

$$2.62x - 0.24y + 4.22 = 0$$

$$- 0.24x + 4.28y - 8.80 = 0$$

-

Рішення нормальних рівнянь.

$$\Delta = [pbb] [psc] - [pbc] [pbc] ; \quad \Delta y = [pbb] [pcl] - [pbc] [pbl] ;$$

$$\Delta x = [pbc] [pcl] - [psc] [pbl] ; \quad x = \frac{\Delta x}{\Delta} ; \quad y = \frac{\Delta y}{\Delta}$$

$$\Delta = 11.156 ; \quad \Delta x = - 15.4946 ; \quad \Delta y = + 22.0432$$

$$x = \frac{-15.4946}{11.1560} = -1.43'' \quad y = \frac{22.04326}{11.1560} = +1.97''$$

$$p_x = \frac{\Delta}{[psc]} \quad p_y = \frac{\Delta}{[pbb]}$$

$$p_x = \frac{11.1560}{4.28} = 2.60 \quad p_y = \frac{11.1560}{2.62} = 4.26$$

$$[pv^2] = [pll] + [pbl]x + [pcl]y$$

$$[pv^2] = 34.11 - 6.05 - 17.34 = 10.72$$

11.3. Вивід ймовірніших значень.

$$\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 40,0'' - 1,4'' = 44^\circ 58' 38,6''$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{y}{2} \sec \varphi = 3^h 16^m 34,50^s + \frac{1,97''}{15} 1.414 = 3^h 16^m 34,68^s$$

$$\text{Оцінка точності} \quad \mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{n-k}} ; \quad m_\varphi = m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}} ; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} ;$$

$$\mu = \sqrt{\frac{10.72}{7-3}} = 1.64'' \quad m_\varphi = m_x = \frac{1.6''}{\sqrt{2.60}} = 1.0'' \quad m_y = \frac{1.6''}{\sqrt{4.26}} = 0.8''$$

$$m_{\lambda'} = \frac{m_y}{15} \sec \varphi = \frac{0.8''}{15} 1.414 = 0.08''$$

Лекція 11. *Наближене визначення азимута по часовому куту Сонця і Полярній.*

11.1. Суть способу одержання робочої формули і її використання.

Даний спосіб поширений. Він дозволяє визначити азимут практично цілий день, час необхідно знати з точністю до 1 секунди.

Суть способу: безпосередньо вимірюють горизонтальний кут між центром видимого диска Сонця і місцевим моментом з фіксацією в момент спостереження сонця часу по годиннику. Знаючи довготу λ , визначають часовий кут Сонця t . По схиленню δ і широті φ розраховують азимут A . перехід виконують через горизонтальний кут Q . Широту φ визначають по карті з точністю $5''$, довготу λ , також, точністю $5''$.

11.2. Отримання робочої формули і її використання.

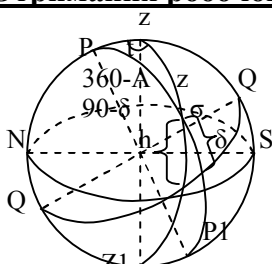


Рис. 8

Схема визначення азимута A

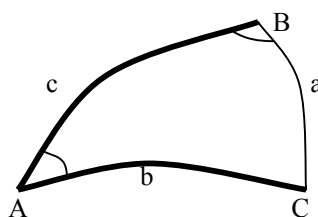


Рис. 9

Сферичний трикутник

Якщо в сферичному трикутнику 4 елементи лежать поруч, то добуток котангенсів крайньої сторони на синус внутрішньої дорівнює добутку котангенсів крайнього кута на синус внутрішнього кута плюс добуток косинусів внутрішніх елементів.

$$\text{ctg } b \sin a = \text{ctg } B \sin A + \cos A \cos C \quad (11.1.)$$

і в нашому випадку формула чотирьох елементів:

$$\text{ctg } (90^\circ - \delta) \sin (90^\circ - \varphi) = \text{ctg } (360^\circ - a) \sin t +$$

$$\cos t \cos (90^\circ - \varphi),$$

або

$$\text{tg } \delta \cos \varphi = - a \sin + \cos t \sin \varphi$$

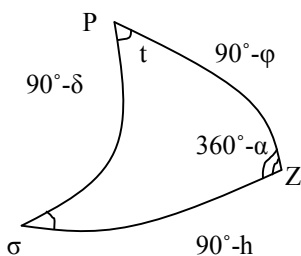


Рис. 10.

Сферичний трикутник $PZ\delta$

Формула визначення азимута по часовому куту буде:

$$\text{ctg } a = \text{ctg } t \sin \varphi - \frac{\text{tg } \delta \cos \varphi}{\sin t} \quad (11.2.)$$

позначаючи

$$\text{ctg } t \sin \varphi = x \quad (11.3.)$$

$$\text{tg } \delta \cos \varphi = y \quad (11.4.)$$

в кінцевому вигляді оримаєм:

$$\text{ctg } a = x - \frac{y}{\sin t} \quad (11.5.)$$

При визначенні азимута з точністю $30''$ теодолітом Т2 необхідно виконати 3 прийоми. Розходження азимутів в прийомах повинно бути не більше $60''$.

11.3. Визначення азимута одним прийомом.

При підготовці до спостережень необхідно до початку і після спостережень звірити годинник. Необхідно вивірити рівень при алідаді горизонтального круга.

а) При КЛ наводиться труба на земний предмет і береться відлік по горизонтальному кругу.

б) Наводиться труба на Сонце і в момент дотику сонячного диска до вертикальної нитки сітки ниток по команді “С!” помічник спостерігача бере відлік по годиннику, а спостерігач бере відлік по горизонтальному кругу теодоліта.

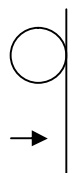


Рис. 11.

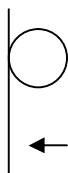


Рис. 12.

Момент дотику

в) Переводиться труба через зеніт і в другому напівприйомі при КП наводиться диск Сонця на вертикальну нитку сітки ниток і по команді помічник спостерігача фіксує час, а спостерігач бере відлік по горизонтальному кругу теодоліта.

г) Візують на місцевий предмет і беруть відлік по горизонтальному кругу.

Журнал визначення істинного азимута по часовому куту Сонця з точки теодолітного ходу 24 на 25.

Дата: 22.07.99 р.

$t^\circ = +14^\circ$;

Видимість: добра.

Теодоліт: 2Т № 47563

$B = 750$ мм.рт.ст.

Погода: ясно, тихо

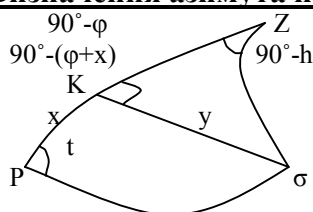
Предмет, що спостер.	Час спостереження	Відлік по горизонтальному кругу	Середнє	Примітка	Абрис
25	- $19^{\text{h}}29^{\text{m}}19^{\text{s}}$	КЛ $0^\circ 02'10''$ $08''$ $268^\circ 18'40''$ $41''$	$08''$ $40''$	$2C = -1''$ $T_{\text{ч}} = 19^{\text{h}}30^{\text{m}}19^{\text{s}},5$ $U = 0$ $T_{\text{моск}} = 19^{\text{h}}30^{\text{m}}19^{\text{s}},5$	
25	$19^{\text{h}}31^{\text{m}}20^{\text{s}}$	КП $88^\circ 13'02''$ $01''$ $180^\circ 02'10''$ $11''$	$02''$ $10''$	$M_{\text{ср}} = 0^\circ 02'10''$ $C = 268^\circ 15'51''$ $Q = M - C = 91^\circ 46'19.0''$	- відлік на місцевий предмет

Довготу визначають по карті з точністю $5''$. Схилення Сонця δ розраховують за формулою:

$$\delta = \delta_0 + \Delta \delta_0 (T_{\text{м}} - 3^{\text{h}})^{\text{h}} \quad (11.6.)$$

де δ_0 - таблична величина схилення Сонця; $\Delta \delta_0$ - таблична зміна схилення.

11.5. Визначення азимута по часовому куту Полярної.

Рис. 13. $\Delta = 90^\circ - \delta$

При виконанні спостережень дозволяється використовувати годинник. Міцність визначення азимута $30'' - 60''$. На Рис. 13. $\text{к}\delta$ - сферичний перпендикуляр. По малості $\Delta \text{Рк}\delta$ можна вважати як плоский. формули прямої геодезичної задачі:

$$x = \Delta \cos t \quad (11.5.1.)$$

$$y = \Delta \sin t \quad (11.5.2.)$$

Застосуємо аналогії Непера - Модюсі. В прямокутному сферичному трикутнику прямиий кут не враховується елементом і береться доповнення катетів до 90° .

$$90^\circ - 90^\circ + \phi + x = Z \quad \text{КZ} = 90^\circ - \phi - x = 90^\circ - (\phi + x) \quad (11.5.3.)$$

Косинус будь - якого елемента дорівнює добутку котангенсів прилеглих до нього елементів.

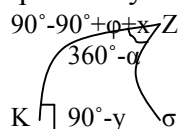


Рис. 14.

$$\cos(\varphi + x) = \operatorname{ctg}(360^\circ - a) \operatorname{ctg}(90^\circ - y)$$

або

$$\cos(\varphi + x) = - \operatorname{ctg} a \operatorname{tg} y$$

Тому

$$\operatorname{ctg} a = - \frac{\cos(\varphi + x)}{\operatorname{tg} y} \quad (11.5.4)$$

або

$$\operatorname{tg} a = - \frac{\operatorname{tg} y}{\cos(\varphi + x)} \quad (11.5.5)$$

Так як величини Y малі, то точність визначення азимута невисока і становить $30''$. Азимут Полярної мала величина – в межах $1,5^\circ$. Тоді

$$a = - \frac{y}{\cos(\varphi + x)}$$

або

$$a = - \frac{\Delta \sin t}{\cos(\varphi + \Delta \cos t)} \quad (11.5.6)$$

Формула (12.5.6.)і є робочою формулою для обчислення азимута по часовому куту Полярної. Порядок спостереження азимута такий же, як і по Сонцю, але наводимо на центр зірки. Вважати Полярну світячою точкою.

Визначення часового кута.

При обробці спостережень нам необхідно знати зоряний час s ,

$$s = S_0 + (T_k - 3^h) + \Delta S + \lambda \quad (11.5.7)$$

де ΔS - поправка за період від середнього часу до Зоряного. Наш годинник іде по середньому часу. Зоряна доба коротша на $3^m 56^s,56 = 236,56^s$. Тому,

поправка буде $\frac{236,56^s}{24^h} = 9.856^s \approx 10^s$

$$\text{При цьому} \quad \Delta s = (T - 3^h) 10^s \quad (11.5.8)$$

$$t = s - \alpha \quad (11.5.9)$$

де s – зоряний час.

Схилення α вибирається з каталогу і не потребує інтерполявання.

Розглянуті вище методи застосовуються у військовій справі і взяті з конспекту автора по ВТС (Львів, ЛПІ, 1968 р.).

11.6. Перехід від астрономічного азимута до геодезичного азимута і дирекційного кута.

Астрономічним азимутом називається кут, утворений площиною астрономічного меридіана і вертикальною площиною, яка проходить через заданий напрямок. Вертикальна лінія проходить через прямовисну лінію.

Геодезичним азимутом називається кут, утворений площиною геодезичного меридіана(на притягнутому референцеліпсоїді) в початковій точці і нормальною площиною, яка проходить через дану точку по заданому напрямку. Як бачимо, різниця в тому, що в першому випадку береться прямовисна лінія, а в другому – нормаль до поверхні еліпсоїда.

Ці кути в загальному випадку не однакові, їх різниця складає декілька секунд у рівнинній місцевості і декілька десятків секунд в горах. На морях і океанах площина геоїда співпадає з площиною загального земного еліпсоїда.

Якщо необхідна точність визначення азимута $5''$, $10''$ або $15''$, то слід врахувати поправки за відхилення виска і широту знати з точністю $m_\varphi = \pm 5$ секунд, довготу $m_\lambda = \pm 3$ секунди. Для цього необхідні спеціальні гравіметричні карти.

Перехід від геодезичних координат до астрономічних виконують за формулами (рівняннями) Лапласа:

$$\varphi = B + \xi \quad (11.6.1.)$$

$$\lambda = L + \eta \sec \varphi \quad (11.6.2.)$$

$$A_E = A_\Gamma - (L - \lambda) \sin \varphi \quad (11.6.3.)$$

де L - геодезична довгота точки;
 λ - астрономічна довгота точки;
 φ - астрономічна широта;
 B - геодезична широта;
 ξ, η - складові відхилення виска.

L знаходять шляхом визначення з карти або шляхом перерахування геодезичних координат з географічних.

Для високої точності $5''$; $10''$; $15''$ за допомогою рівнянь Лапласа роблять перехід. Якщо точність $30''$, то поправки не враховують. В окремих випадках враховують поправки за перехід до площини Гаусса.

Розраховують диференційний кут α за формулою:

$$A = A_\Gamma - (\pm \gamma) \quad (11.6.4.)$$

Де збільшення меридіанів γ може бути обраховано по строгим формулам:

$$\text{tg } \gamma = \text{tg } l \sin \varphi \quad (11.6.5.)$$

$$\text{де } l = L - L_0 \quad (11.6.6.)$$

де L_0 - довгота осьового меридіана зони; L - довгота точки.

Формула (11.6.5.) є строгою, але нею рідко користуються.

На практиці користуються наближеною формулою:

$$\gamma'' = l'' \sin \varphi \quad (11.6.7.)$$

в даному випадку γ і l можуть бути в хвилинах і секундах.

Найбільша похибка цієї формули складає $4''$ на краю зони (не більше). Зближення меридіанів можна вирахувати і по прямокутним координатам

$$\gamma = (KY_0 - \Delta \gamma) \quad (11.6.8.)$$

де коефіцієнт K

$$\frac{1}{1000} K = \frac{\rho''}{N_0} \text{tg } \varphi \quad (11.6.9.)$$

а $\Delta \gamma$ розраховується по формулі :

$$\Delta \gamma = \frac{\rho''}{3N^3} \text{tg } \varphi Y^3 (1 + \text{tg}^2 \varphi) \quad (11.6.10.)$$

де N_0 - радіус земної кори;

Y_0 - дійсна ордината точки спостереження.

Кінцева формула має вигляд:

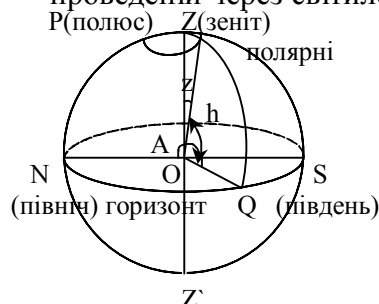
$$\gamma'' = \frac{\rho''}{3N^3} \text{tg } \varphi Y^3 (1 + \text{tg}^2 \varphi) \quad (11.6.11.)$$

Лабораторна робота № 11. *Наближенні способи астрономічних визначень.*

11.1. Знаходження широти за Полярною зорею.

Широта місця спостереження дорівнює висоті небесного полюса над горизонтом. Оскільки Полярна зоря знаходиться поблизу північного полюса неба, то її висота над горизонтом відрізняється від широти місця на невелику поправку. Цю поправку беремо з табл.46 Астрономічного календаря (1999 р., с.181) за аргументом зоряний час і додаємо до вимірної за допомогою теодоліта висоти Полярної зорі.

Кут між площиною горизонту і напрямком на світило називається висотою світила h . Висота світила $h = \phi$ вимірюється кутом, який лежить у площині, проведеної через світило, центр небесної сфери і зеніт.



$$h = 90^\circ - Z \quad (11.1.)$$

Протягом доби, внаслідок добового обертання неба, висота всіх світил безперервно змінюється. В даній місцевості кожна зоря кульмінує завжди на тій сімій кутовій висоті над горизонтом, що залежить від її положення на небесній сфері і від географічної широти місцевості.

Висота Сонця над горизонтом в момент його верхньої кульмінації буває різною не тільки для різних місцевостей (наприклад, у Петербурзі і Одесі), а також і в різні пори року (взимку вона менша, а влітку більша). Для місяця і планет ця висота змінюється складніше.

11.2. Врахування рефракції.

Внаслідок рефракції світловий промінь викривлюється в земній атмосфері і світила заються нам розташованими не в тому напрямку, в якому вони містяться насправді. Якщо ми бачимо світило на небесній сфері на висоті h' над горизонтом, то насправді висота буде менша на величину рефракції, тобто

$$h = h' - R \quad (11.2.)$$

Біля самого горизонту величина рефракції R стає такою великою, що ми бачимо Місяць і Сонце повністю над горизонтом, тоді як насправді вони ще під ним. В ефемеридах сходу і заходу Місяця і Сонця цей вплив рефракції враховано: у таблицях подано моменти видимого сходу та заходу.

У табл.47. наведено величину середньої рефракції, яка відповідає температурі повітря 0°C і атмосферному тиску 760 мм рт.ст. Поправочні коефіцієнти до середньої рефракції, залежать від інших величин температури повітря і атмосферному тиску і визначаються за додатковою таблицею.

Рефракція R при температурі t і тиску P обчислюється за формулою:

$$R = R_c (1 + K_t + K_p) \quad (11.3.)$$

Таблиця 47.

Середня рефракція

(при температурі повітря 0°C і атмосферному тиску 760 мм рт.ст.)

Висота над горизонтом	R_c	Висота над горизонтом	R_c	Висота над горизонтом	R_c	Висота над горизонтом	R_c
$0^\circ 00'$	36,3'	$1^\circ 40'$	29,9'	5°	10,2'	16°	3,4'
0 10	34,3	2 00	19,1	6	8,8	20	2,7
0 20	32,2	2 20	17,5	7	7,7	25	2,1

0 30	30,3	2 40	16,2	8	6,8	30	1,7
0 40	28,6	3 00	15,0	9	6,1	40	1,2
0 50	27,1	3 30	13,5	10	5,5	50	0,8
1 00	25,6	4 00	12,2	12	4,6	70	0,4
1 20	23,1	4 30	11,1	14	3,9	90	0,0

Поправки середньої рефракції

Темпера- тура ° С	Множник К _t	Темпера- тура ° С	Множник К _t	Темпера- тура ° С	Множник К _t	Тиск мм рт.ст.	Множник К _p
- 20	+ 0,03	- 4	+ 0,02	+ 14	- 0,05	710	- 0,06
- 18	+ 0,07	- 2	+ 0,01	+ 16	- 0,06	720	- 0,05
- 16	+ 0,07	+ 2	- 0,01	+ 18	- 0,06	730	- 0,04
- 14	+ 0,06	+ 4	- 0,02	+ 20	- 0,07	740	- 0,03
- 12	+ 0,05	+ 6	- 0,02	+ 22	- 0,08	750	- 0,01
- 10	+ 0,04	+ 8	- 0,03	+ 24	- 0,08	770	+ 0,01
- 8	+ 0,03	+ 10	- 0,04	+ 26	- 0,09	780	+ 0,03
- 6	+ 0,02	+ 12	- 0,04	+ 28	- 0,10	790	+ 0,04

11.3. Підготовка ефемерид.

Приклад: заплановано провести спостереження Полярної о 24 годині 1 травня 1999 року визначення широти пунктів м.Рівного. виховуючи, що в травні діяв літній час і час, який відлічують наші годинники, так званий, поясний час $T_{п} = 24^h$, а відповідний йому місцевий середній час T буде $T = T_{п} - 1^h$ і $T = 23^h$.

Щоб знайти для м.Рівне ($\lambda = 1^h44.5^m$) зоряний час 1 травня 1999 року у момент $T = 23^h$, випишемо з ефемеридної частини календаря (табл.1) для 1 травня $S_0 = 14^h33^m55^s$.

У момент місцевого часу T зоряний час S буде

$$S = S_0 + T + 9,86(T - \lambda) \quad (11.4.)$$

$(T - \lambda)$ треба брати в годинах, тоді $\Delta = 9,86(T - \lambda)$ буде в секундах. Контрольна наближена формула (з точністю 3 – 5^m) формула має вигляд:

$$S = T + 2N + \lambda - 21,4^h \quad (11.5.)$$

де N - десятковий дріб, цілою частиною якого є порядковий номер місяця у році, а дробовою – частка місяця, яка визначається заданим числом. Якщо даний місяць передувє вересневі, то N треба збільшити на 12.

Для м.Рівне $\lambda = 1^h44^m = 1,74^h$, отримаємо

$$S = T + 2N - 19,66^h \quad (11.6.)$$

в даній формулі всі елементи і результат виражаються в годинах і долях годин.

Розрахунки проводяться у наступному порядку:

Елементи формул	Значення	Елементи формул	Значення
Дата	1.05.1999 р.	Контроль	
$T_{п}$	$24^h00^m00^s$	T	$23,0^h$
$T = T_{п} - 1$	$23^h00^m00^s$	$2N$	$2(5 + 12)^h$
λ	$1^h44^m = 1,74^h$	Δ	$1,74^h$
S_0 (табл.1 с.40)	$14^h33^m55^s$	Const	$21,4^h$
$T - \lambda$	$21^h15.5^m = 21,26^h$	$S' = T + 2N + \lambda - 21,4^h$	$37,34^h$
$\Delta = 9,86(T - \lambda)$	209.60^s	S	$13,34^h$
$\Delta^{m,s}$	$3^m29.60^s$	f_s	17.01^m
$S' = S_0 + T + \Delta$	$37^h37^m24.6^s$		
S	$13^h37^m24.6^s$		

По таблиці 46 знаходимо поправку висоти $\Delta h = - 43'$ для $S = 13^h37^m24.6^s$

При вимірюванні висоти Полярної отримали $h = 49^{\circ}52'46''$. Тоді для 50° середня рефракція $R_c = 0,8'$. Для $t = 14^{\circ}$, $K_t = -0,05$, для $p = 770$ мм рт.ст. $K_p = +0,01$.

Підставляючи дані значення у формулу (11.3.), отримуємо:

$$R = 0,8 (1 - 0,05 + 0,01) = 0,768 \quad \text{або} \quad 0,768' * 60'' = 46''.$$

Таким чином, виправлена за рефракцією висота Полярної зорі, спостережена о $14^{\text{h}}33^{\text{m}}55^{\text{s}}$ зоряного часу становить $h' = 49^{\circ}52'00''$. Поправка висоти за таблицею дорівнює $\Delta h = -43'$. Отже, широта пункту спостереження φ буде:

$$\varphi = h' - R - \Delta h \quad (11.7.)$$

і в нашому випадку

$$\varphi = 49^{\circ}52'00'' - (-43') = 50^{\circ}35'00''$$

Для контролю виконуються спостереження на даному пункті кожним членом бригади і розраховується середня квадратична похибка визначення пункту

$$m_{\varphi} = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (11.8.)$$

де n - число спостережень, рівне числу членів бригади.

$$v_i = \varphi_{\text{ср}} - \varphi_i \quad (11.9.)$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} \quad (11.10.)$$

11.4. Знаходження азимута за Полярною зорею і довготи пункту спостереження.

Геодезичний азимут предмета – кут між напрямком на цей предмет та північним напрямком меридіана місця спостереження з вершиною в точці спостереження. Він визначається за формулою:

$$A = M_k - M + (\pm A_{\text{зх}}^{\text{cx}}) \quad (11.11.)$$

де A – азимут предмета; M_k – середнє з двох відліків горизонтального круга теодоліта при двох положеннях труби (“коло прако” та “коло ліво”) при наведенні на предмет; M – середнє з відліків при наведенні на Полярну зорю; $A_{\text{зх}}^{\text{cx}}$ – азимут Полярної зорі (східний з знаком “+”, західний з знаком “-”).

Азимут Полярної зорі наведено в табл.46 за аргументом “зоряний час” S та “широта” φ . Азимут вимірюються від точки півночі і будуть західними - $A_{\text{зх}}$, якщо S міститься в таблиці ліворуч, і східними + $A_{\text{зх}}^{\text{cx}}$, якщо S - праворуч.

У нашому випадку, для $S = 13^{\text{h}}37^{\text{m}}24.6^{\text{s}}$ зоряного часу на широті $50^{\circ}35'$ азимут Полярної зорі становить $15,74'$ східний.

Табличне інтерполювання проводиться на програмованому мікрокалькуляторі МК61 по спеціальній програмі:

$F_{\text{прг}}$	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
00	2	0	хп1	5	хп2	с/п →	K_{0111}	хп3	с/п →	K_{0111}
10	хп4	-	с/п	хп6	с/п	-	X	пх1	0_0	6
20	0	х	хп5	пх6 ↔		с/п	хп7	с/п →	K_{0111}	с/п
30	х	пх2	0_0	пх7	+	с/п				

Протокол розрахунку за програмою:

№ п/п	Введення даних	Результат	Познач	№ п/п	Введення даних	Результат	Познач
1	в/о с/п	5		6	-		Зменш “-” збільш “+”
2	$13^{\text{h}}37^{\text{m}}24.6^{\text{s}}$ с/п		$S_{\text{місц}}$	7		$15,40'$ с/п	A'
3	$13^{\text{h}}31^{\text{m}}$		$S_{\text{табл}}$	8	$0^{\circ}35'$ с/п		$\Delta \varphi$
4	$17'$ с/п		A_1	9	$3'$ с/п		$\Delta A'$
5	$12'$ с/п	1,60	A_z, AA	10		$15,74749'$	$A_{\text{сх}}$

Віднявши від відліку на Полярну $15,75'$, закріплюють на місцевості напрямок істинного меридіана для визначення довготи пункту. Визначивши по годиннику точний

місцевий час кульмінації Сонця на даному меридіані, і з врахуванням літнього часу, а також знаючи, що верхня кульмінація Сонця повинна відбуватися точно о $12^{\text{h}}00^{\text{m}}00^{\text{s}}$ справжнього часу, по їх різниці знаходять довготу пунктів спостереження.

Лекція 12. Вимірювання істинного азимута по і висоті Сонця.

12.1. Постановка задачі.

Якщо на місцевості пунктів опори немає, то визначають істинний азимут по Сонцю на кінцевій лінії теодолітного ходу. Крім того, істинний азимут визначають на одній із ліній теодолітного ходу в середині, якщо довжина ходу більше 10 км при зніманні в масштабах 1:10000 і 1:25000 і більше 6 км при зніманні в масштабі 1:5000.

При цьому застосовують спосіб визначення істинного азимута по висоті Сонця, коли висота його не менше 10° . Не рекомендується спостерігати Сонце (по місцевому часу) від 10 до 14 годин в широтах від 20° до 40° , від 9 до 15 годин в широтах від 40° до 60° , і від 8 до 16 годин в широтах від 60° до 70° .

Умови спостереження азимута.

h_{min}	Не спостерігати	В широтах φ	Менше 10 км	Менше 6 км
$\leq 10^\circ$	$10^{\text{h}} - 14^{\text{h}}$	$20^\circ - 40^\circ$	1 : 10000	1 : 5000
$\leq 10^\circ$	$9^{\text{h}} - 15^{\text{h}}$	$40^\circ - 60^\circ$	1 : 25000	
$\leq 10^\circ$	$8^{\text{h}} - 16^{\text{h}}$	$60^\circ - 70^\circ$		

Використовують теодоліти Т – 2, Т – 5, Т15, 2Т – 30 і годинник з довгою секундною стрілкою.

12.2. Суть способу отримання робочої формули.

а) Суть способу

Суть способу в тому, що в момент спостережень вимірюється висота Сонця над горизонтом і відраховується час спостереження. По відомій висоті h , схиленню Сонця δ і широті точки спостереження φ , яку визначають по карті, розраховують азимут a світила.

б) Отримання робочої формули і її використання.

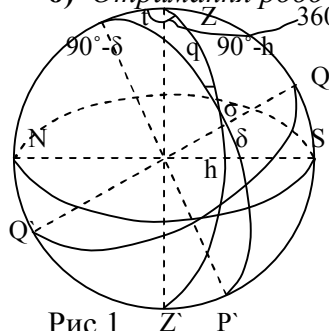
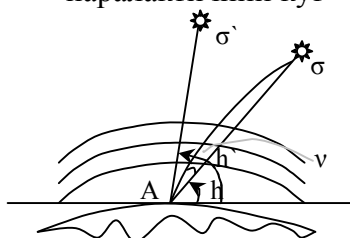


Рис.1

Небесна сфера Z , трикутник і паралактичний кут



δ - світило; Z - точка зеніту; P - полюс світу;
 $- Z\delta = 90^\circ - h = Z$ - зенітна віддаль
 $- P\delta = 90^\circ - \delta = \Delta$ - полярна віддаль
 $- PZ = 90^\circ - \varphi = \theta$ - полярна віддаль точки зеніту
 $\angle PZ\delta = 360^\circ - a$ - азимут світила
 $\angle Zp\delta = t$ - годинний кут
 $\angle P\delta Z$ - паралактичний кут
 висота світила $h = h' - R$ (12.1.)

де R - астрономічна рефракція.

Поправка за рефракцію знаходиться по табл.47 (с.182) Астрономічного календаря по формулі:

$$R = R_c (1 + K_t + K_p) \quad (12.2.)$$

де коефіцієнти за температуру K_t і тиск K_p вибираються по тій же таблиці.

Схилення вибирається із відповідного каталогу

$$\delta = \delta_0 + T_0 \Delta \delta_0 \quad (12.3.)$$

де $\Delta \delta_0$ - погодинна зміна схилення; T_0 - час спостереження на меридіані Грінвіча.

Запишемо теорему косинусів для сферичного трикутника ABC .

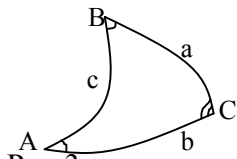


Рис.3.

$$\cos b = \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos B \quad (12.4.)$$

Косинус сторони дорівнює добутку косинусів двох других сторін сферичного трикутника плюс добуток синусів цих сторін на косинус кута між ними.

Сферичний трикутник

Застосуємо дану формулу для трикутника $PZ\delta$

$$\cos (90^\circ - \delta) = \cos (90^\circ - \varphi) \cos (90^\circ - h) + \sin (90^\circ - \varphi) \sin (90^\circ - h) \cos (360^\circ - a)$$

Звідки

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin h + \cos \varphi \cos h \cos a$$

і

$$\cos a = \frac{\sin \delta - \sin \varphi \sin h}{\cos \varphi \cos h} \quad (12.5.)$$

це ж і буде робочою формулою. Або

$$\cos a = \frac{\sin \delta - x}{y} \quad (12.6.)$$

де

$$x = \sin \varphi \sin h \quad (12.7.)$$

$$y = \cos \varphi \cos h \quad (12.8.)$$

12.3. Умови застосування. Точність.

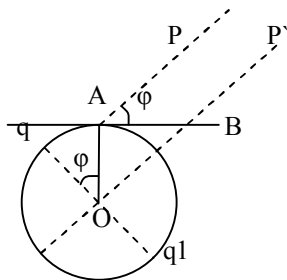


Рис.4

Принцип врахування широти.

В точці полудня змінюватись буде тільки напрямок по азимуту, а висота буде незмінною. Тому точність буде нижча. Схилення на 0^h грінвіцького часу вибирають з каталогу. Час визначають з точністю $1,5^m$ при ньому не потрібно хронометра, але час на спостереження обмежений.

При визначенні азимута використовують теодоліти Т2, Т5, Т15. У відповідальних випадках виконують не менше 3 прийомів з перестановкою лімба на 60° .

12.4. Організація і виконання спостережень азимута по Сонцю.

Приведена методика забезпечує точність визначення азимута $30''$. Використання даної методики вимагає жорсткої умови виконання спостережень до 10 годин місцевого часу і починати спостереження тільки з 16 годин. Але в літній час цим способом можна визначити. Широти мають бути від 40° до 60° .

Встановлюють теодоліт над даною точкою, центрують і нівелюють. Азимут передається на слідууючу точку теодолітного ходу.

Особливо уважно повинен бути перевірений рівень при алідаді вертикального круга. Необхідно підготувати світлофільтр темний, але такий щоб чітко був видимий диск Сонця. Спостереження ведуться при двох положеннях круга.

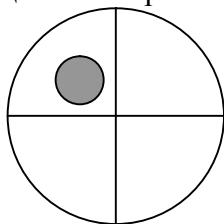


Рис.5.

Спостереження при КЛ

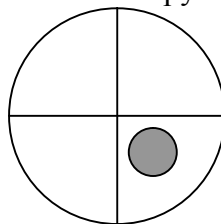


Рис.6

Спостереження при КП

В момент дотику фіксується час. Потім беруться відліки по вертикальному і горизонтальному кругах.

Порядок спостереження азимута по висоті Сонця:

1. При КЛ труба теодоліта без світлофільтра наводиться на місцевий предмет (наступну точку теодолітного ходу) і записується відлік тільки по горизонтальному кругу.
2. Наводиться труба теодоліта на Сонце в 1 сектор, попередньо навівши насадку з світлофільтром. Коли зображення Сонця попаде в поле зору труби, спостерігач горизонтальну нитку сітки ниток підводить до краю диска Сонця наводним гвинтом труби і тримає цим гвинтом на горизонтальній нитці. Коли край диска Сонця доторкнеться вертикальної плити, помічник спостерігача по команді "Є" бере відлік по годиннику.
3. Виводиться бульбашка рівня вертикального круга на середину і беруться відліки по вертикальному і горизонтальному кругах.
4. Переводиться труба через зеніт і виконується другий напівприйм при КЛ. Сонце спостерігається в діаметрально протилежному секторі сітки ниток для того, щоб середнє значення із відліків по вертикальному і горизонтальному кругах відносилось до центра Сонця. Помічник спостерігача фіксує час.
5. Виводиться бульбашка рівня вертикального круга на середину і беруться відліки по вертикальному і горизонтальному кругах.
6. Наводиться труба на земний предмет і береться відлік тільки по горизонтальному кругу.

Журнал визначення істинного азимута по висоті Сонця з точки теодолітного ходу 14 на точку 15.

Дата: 21.07.99 р.

 $t^{\circ} = + 14^{\circ}$;

Видимість: добра.

Теодоліт: 2Т № 47563

В = 750мм.рт.ст.

Погода: ясно, тихо

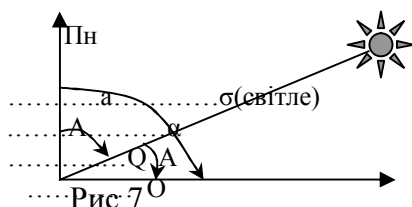
Предмет, що спостер.	Час спостер	Відлік по горизонтальному кругу	Середнє	Відлік по вертикальному Кругу	Середнє	Примітка
15	- 17 ^h 30 ^m	КЛ - 64° 20'10'' 10''	10''	0° 14'35'' 37'' 333° 06'33'' 33''	36'' 33''	$MZ = \frac{КЛ + КП \pm 360^{\circ}}{2} =$ = 0° 37'07'' $Z = КЛ - MZ =$ = 64° 57'17''
15	17 ^h 36 ^m - Tr = 17 ^h 35 ^m Um = 0	КП 294° 25'35'' 37'' -	36'' -	153° 38'06'' 08'' 180° 14'40'' 40''	07'' 40''	$M = 0^{\circ} 14'38''$ $C = 333^{\circ} 22'20''$ $Q = 26^{\circ} 52'48''$ $Z = 64^{\circ} 57'17''$ $h' = 25^{\circ} 02'48''$ = 2'02''

	$l_m = 17^h 33^m$				$h = 25^\circ 00' 41''$
--	-------------------	--	--	--	-------------------------

12.5. Розрахунок азимута.

Чверть в якій буде знаходитись сонце

Знак $\cos a'$	Ранок	Вечір
+	1 чверть $a' = a$	4 чверть $a' = 360^\circ - a$
-	2 чверть $a' = 180^\circ - a'$	3 чверть $a' = 180^\circ + a'$



На Рис. 7. a – азимут світила;
 Q – кут між земним предметом і світилом
 A – азимут земнимного предмета
 $A = a + Q$ (12.9.)

Схема розрахунку азимуту

Перехід від азимута a до дирекційного кута α , виконується по формулам:

$$\alpha = A - (\pm \gamma) \quad (12.10.)$$

зближення меридіанів γ буде:

$$\gamma = (L - L_0) \sin B \quad (12.11.)$$

де L - довгота меридіану, що проходить через дану точку; L_0 - довгота основного меридіану зони; B - широта даної точки.

12.6. Визначення азимута по висотам яскравих зірок.

Більш точний спосіб. Можна спостерігати на протязі всієї ночі не менше 30 хвилин після і до заходу Сонця. Міцність визначення азимуту $30''$.

Зірки повинні відповідати сліуючим умовам:

Точність визнав. азимуту	φ_{\max}	Прилад	Число прийомів	Мінімальна висота	Азимути, в яких вибираються зірки.
$30''$	до 70°	T2, T5	3	$10^\circ - 60^\circ$	Поблизу 1 вертикалу $40^\circ - 140^\circ; 220^\circ - 320^\circ$.
$60''$	до 70°	T15, T30	2	$10^\circ - 60^\circ$	Забороняється спостерігати зірки поблизу меридіану $40^\circ - 140^\circ; 220^\circ - 320^\circ$.

Особливу увагу слід приділяти нівеліровці приладу. Слід нівелювати прилад при кожному спостереженні зірки. Необхідно добре знати зоряне небо. Перший клас зірок яскравіше другого у 2,5 рази. Для світила на Сході азимут a , відрахований від точки Півночі, буде:

$$a = a_N$$

а для світила на Заході:

$$a = 360^\circ - a_N$$

Лабораторна робота № 12.

Абсолютні методи визначення азимуту по Сонцю і зіркам.

1. Абсолютні методи визначення азимуту по Сонцю.

Застосовується в тих випадках, коли не потрібно знати координат світила.

Старанно перевірений теодоліт встановлюють в заданому пункті і приводять його в робоче положення. При цьому особливу увагу звертають на забезпечення нерухомості приладу в період спостережень.

За 4 год до полудня закріплюють лімб, наводять трубу на кінцеву точку лінії і записують відлік по лімбу **b**. Потім надівають на окуляр насадку (світлофільтр) і наводять трубу на сонце.

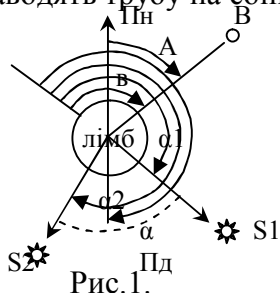


Рис.1.

Визначення істинного азимута лінії теодолітного ходу по спостереженням Сонця на рівних висотах.

В той момент, коли зображення сонячного диска буде дотикатись до горизонтальної і вертикальної сітки ниток, записують відлік по годиннику з точністю до хвилини і горизонтальному та вертикальному колам **a₁**. Для контролю і уточнення результатів до і після полудня необхідно провести декілька таких визначень.

Закінчивши останнє допозуденне визначення, не змінюючи положення труби, відкріплюють алідаду і після полудня ловлять момент, коли сонячний диск буде в положенні, яке зображено на Рис.2.(б); і цей момент записують відліки по годиннику і по горизонтальному колу **a₂**. Після цього послідовно встановлюють трубу на відліки по вертикальному колу, зафіксовані до полудня, і записують відліки по годиннику і по горизонтальному колу.

З півсум відліків $(a_1 + a_2)/2$ по всім визначенням виводиться середній відлік **a**, який і вкаже напрямок на південь, однак з відліку **a** в кожен отриману півсума відліків слід ввести поправку **k** за зміну схилу до і після полудня неоднаковий.

Таким чином:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \pm k \quad (1.1.)$$

де

$$k = \frac{t \Delta\delta}{\cos\varphi \sin 15t} \quad (1.2.)$$

в цій формулі **t** - число хвилин в половині проміжку часу між спостереженнями до і після полудня; $\Delta\delta$ - зміна схилу Сонця за 1 хвилину, визначається по "Астрономічному щорічнику"; $15t$ - час в годинах, перетворений в градусну міру; φ - широта місця спостереження, визначена по карті з точністю $0,1 - 0,5^\circ$.

Поправки **k**, виражені в хвилинах, додають при спостереженнях, виконаних в період 22 червня – 21 грудня і віднімаються в період 22 грудня – 21 червня.

Істинний азимут лінії **PB** визначається за формулою;

$$A = b - a + 180^\circ \quad (1.3.)$$

Точність визначення істинного азимута лінії описаним способом $\pm 2'$.

Методика взята з книги Д.М.Кудрицького "Геодезія". Л.:Гідрометеоіздат, 1982, - 416с.

2. Визначення істинного азимута способом рівних висот по зіркам.

Визначити напрямок істинного меридіану можна шляхом спостережень на відповідних висотах деякої зірки до і після її проходження через меридіан. Спочатку

описаним вище способом спостерігається положення зірки східніше, а потім західніше меридіана. Так як зірки, на відміну від Сонця, описують симетричну дугу відносно площини меридіана, то вносити в результати спостережень поправку k не потрібно і відлік a по горизонтальному колу, відповідний напрямку труби на південь, визначиться за формулою:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (1.4.)$$

При нічних спостереженнях необхідно забезпечити освітленість сітки ниток в трубі і відлікових пристроїв теодоліта, крім цього необхідна насадка на окуляр.

Визначений напрямок істинного меридіану необхідно закріпити на місцевості і визначити істинний азимут лінії теодолітного ходу. *Одночасно визначається схилання магнітної стрілки.*

Додаток 1: Сумісне визначення геодезичного азимута і складових відхилення прямої лінії із спостереження зірок в різних вертикалах.

Програма розрахунку на МК-61

ФПРГ	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
00	5	ХП4	9	ХП0	С/П	КХП4	FL0	04	ПХ6	ПХ9
10	Х	ПХ7	Fx^2	-	ХП0	С/П	ПХе	Х	ХП1	ПХС
20	ПХ9	Х	ПХd	ПХ7	Х	-	ХП2	С/П	ПХ8	Х
30	ПХ1	-	ХП1	ПХС	ПХ7	Х	ПХd	ПХ6	Х	-
40	ХП3	С/П	ПХа	Х	ПХ1	-	/-/	ХП4	С/П	ПХв
50	ПХ0	Х	ПХС	ПХ2	Х	-	ПХd	ПХ3	Х	+
60	ХП5	С/П	ПХ4	:	F1/X	С/П	ПХС	ПХа	Х	ПХ8
70	ПХd	Х	-	ХП2	С/П	ПХd	Х	ХП1	ПХв	ПХа
80	Х	ПХе	ПХd	Х	ХП3	С/П	ПХ7	Х	ПХ1	-
90	ХП1	ХПв	ХПв	Х	ПХе	ПХС	Х	-	ХП4	С/П
100	ПХ9	Х	ПХ1	С/П						

Протокол контрольного розрахунку за програмою:

№пп	Введення даних	результат	позн	№пп	Введення даних	результат	позн
1	В/о с/п			20		7,0686658	ΔX
2	2,426 с/п		[Рвв]	21	-		
3	-0,265 с/п		[Рвс]	22	/-/	-33,276215	
4	2,485 с/п		[Рвл]	23	ПХ5		
5	3,347 с/п		[рсс]	24	:	-	
6	-4,132		[рсл]	25	Х		
7	6,26 с/п		[рв]	26	+	61,258946	ΔY
8	0,13766(с/п)		[рв]	27	ПХ5		
9	0,029 с/п		[Рс]	28	:	1,2173176	Y
10	25,4399 с/п		[Рл]	29	ПХ5		
11		8,049597 с/п	Δ11	30	ПХ0		
12		0,46843302 с/п	Δ12	31	:	6,2516042	Pa`
13		-0,1068339 с/п	Δ13	32	ПХв		
14		-204,05832 с/п	Δa`	33	ПХ9		

15		50,322895	Δ	34	X		
16		-4,0549798	$\Delta a'$	35	ΠX_d		
17		- 0,64087612 с/п	ΔX_{31}	36	F_x^2		
18		-26,604077 с/п	ΔX_{32}	37	-	20,951379	Δ_{22}
19		-12,054043 с/п	ΔX_{33}	38-40	$\Pi X_5, \Pi X_0, :$	2,40188942 20,951379, 4018894	P_x
				41-46	$\Pi X_B, \Pi X_6,$ $\Pi X_C, F_x^2$	15,16781	Δ_{33}
				47-49	$\Pi X_5, :, F_1/X$	3,317743	P_y

Руслан Миколайович, Літнарівч
кандидат технічних наук, доцент

ГЕОДЕЗИЧНА АСТРОНОМІЯ

Навчальний посібник.....
для студентів спеціальності “Землепорядкування та кадастр”

Навчальне видання

Комп'ютерне редагування в ОС WindowsXP Word2000:
Парамонов Андрій Валерійович ,Царенко Сергій

м. Чернігів

вул. Стрілецька,1

[URL:www.geci.cn.ua](http://www.geci.cn.ua)

E-mail:rector@geci.cn.ua

Тел.: (0462) 179-308

(04622) 5-61-70