

УДК 528.33.13.551.24

ПРОЕКТУВАННЯ ТОЧНОСТІ ПЛАНОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ НА ГДП АЕС

© Черняга П.Г., 1999

Рівненський Державний технічний університет

Охарактеризованы источники и свойства ошибок светодальномерных измерений; сделана их классификация и группирование. Приведены формулы для определения ожидаемой точности светодальномерных измерений. Эти изыскания дают нам возможность выполнять высококачественные точные вычисления для геодезического мониторинга горизонтальных движений поверхности Земли и зданий на атомной электростанции.

The sources and properties of the mistakes of the light-distantal measurings were characterized at this article; the classification and corresponding grouping of them also were made. The formulas for calculation the waiting exactness of the light-distantal measurings were taken out. These findings give us a passibility to carry out with high-quality the exact calculations for geodesical monitoring of the horizontal motions of the earthy surface and the buildings at the Atomic Pover Station.

Найважливішим для геодезичного моніторингу на ГДП АЕС є вибір методів побудови як планових, так і висотних геодезичних мереж; розрахунок очікуваної точності вимірювань; застосування відповідних приладів, станцій та технологій; обробка та аналіз результатів спостережень з обчисленням і прогнозуванням деформацій земної кори, поверхні, мобільності споруд, а також технологічного обладнання АЕС.

Зроблено розрахунок та аналіз очікуваної точності планового положення геодезичних мереж. Проаналізовано джерела помилок світловіддалемірних вимірів, подано розрахунок точності для топографічних світловіддалемірів та світловіддалемірної полігонометрії.

Дано детальний аналіз джерел помилок з врахуванням вимог до побудови мереж на ГДП АЕС.

Джерела та властивості помилок світловіддалемірних вимірювань. Загальна формула фазових світловіддалемірів може бути записана так [1,3]:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \cdot \frac{c}{fn} + p, \quad (1)$$

де $\Delta\varphi$ – виміряна різниця фаз опорного та вимірюючого сигналів; c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі; f – частота модуляції світла; n – інтегральне значення показника заломлення повітря на шляху електромагнітних хвиль; p – постійна світловіддалеміра.

У формулі (1) усі параметри (крім π) визначаються з деяким наближенням і тому вони є джерелом помилок лінійних вимірювань.

Отже, маємо п'ять джерел помилок в лінії при вимірюванні її світловіддалеміром:

- помилка за неточність вимірювання різниці фаз опорного та вимірюючого сигналів, що викликає помилку в лінії $m_{S\Delta\varphi}$;
- неточність визначення швидкості світла у вакуумі, яка призводить до помилок m_{Sc} у лінії;
- неточне визначення інтегрального значення показника заломлення n . Це джерело необхідно розділити на дві складові:
 - m_{Sn} – помилку в довжині лінії, що виникає від неточного визначення n на кінцях лінії;

- m_{S_n} – помилку представництва n , тобто різниці між вимірним значенням n та інтегральним n на трасі;
- відхилення основної частини модуляції від заданої, що викликає помилку в лінії m_{S_f} ;
- неточність визначення постійної світловіддалеміра p , яка спричиняє помилку в лінії m_{S_p} .

До цих джерел можна додати ще [5]:

- неточність центрування приймача та відбивача над кінцевими точками лінії, що призводить до помилки в лінії $m_{S_{u,p}}$;
- неточне приведення довжин ліній до центрів знаків;
- помилки вихідних даних тощо.

Необхідно відзначити, що мережі геодинамічних полігонів будують вільними і тому на них не впливають помилки вихідних даних. Якщо розглядати помилку в неплоскості переднього фронту розповсюдження електромагнітних хвиль, то вона зводиться до мінімуму уточненням наведення світловіддалеміра за максимальним відбитим сигналом. Так що цими джерелами помилок далі будемо нехтувати.

Розглянемо коротко вплив вищезгаданих джерел на помилки в довжині лінії. Помилку за неточність вимірювання різниці фаз опорного та вимірюючого сигналів можна представити у вигляді:

$$m_{S_{\Delta\varphi}} = \frac{c}{4\pi f n} \cdot \frac{m''_{\Delta\varphi}}{\rho''} \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що $m_{S_{\Delta\varphi}}$ не залежить від S . Для зменшення її впливу необхідно віддавати перевагу світловіддалемірам з великою частотою модуляції. Помилка $m_{\Delta\varphi}$ пов'язана з відліком за фазометром і носить випадковий характер, а також залежить від числа прийомів k . Відомо [1], що точність разового вимірювання $\Delta\varphi$ дорівнює $0,1^0$. У високоточних віддалемірах автоматично проводиться багаторазове вимірювання різниці фаз, що дає змогу одержати результат на порядок надійніший. У таких віддалемірах на табло видається результат в одиницях віддалі.

Для визначення m_{S_c} звернемося до такого аналізу. Нехай неточність визначення швидкості у вакуумі позначимо через m_c і знайдемо помилку m_{S_c} в лінії, використовуючи формулу (1)

$$m_{S_c} = S \cdot \frac{m_c}{c} \quad (3)$$

Помилка m_{S_c} є в прямій пропорційній залежності від лінії S і не залежить від кількості прийомів k . Якщо прийняти $C=299792458$ м/сек, допускаючи, що $m_c=1$ м, то

отримаємо $m_{sc} = 0,0033$ мм для лінії в 1 км. При сучасній точності вимірювань помилку m_{sc} можна взагалі не враховувати.

Далі розглянемо помилку в довжину лінії за неточне визначення інтегрального значення показника заломлення n . Як було уже сказано, ми розділили її на дві складові: m_{sn} і $m_{s\bar{n}}$. Помилка m_{sn} виникає від неточного визначення n для світлових хвиль на кінцях лінії. Використовуючи формулу (1), знайдемо:

$$m_{sn} = S \cdot \frac{m_n}{n}. \quad (4)$$

З виразу видно, що m_{sn} прямопропорційна S .

Для визначення n на кінцях лінії вимірюють температуру, тиск і вологість з деякими випадковими помилками. Тому m_{sn} буде теж випадковою помилкою. При k прийомах помилка визначення n буде зменшуватися у $\sqrt{k}$ разів.

Помилку m_n можна представити формулою

$$m_n = \sqrt{m_{nT}^2 + m_{nP}^2 + m_{ne}^2}, \quad (5)$$

де m_{nT} , m_{nP} , m_{ne} – середні квадратичні помилки відповідно температури, тиску і вологості. Враховуючи те, що $m_{nT} = 1,11 \times 10^{-6} m_T$; $m_{nP} = 0,4 \times 10^{-6} m_P$; $m_{ne} = 0,06 \times 10^{-6} m_e$ [2] при нормальних атмосферних умовах і приймаючи граничні помилки вимірювання температури $m_T = 0,2^\circ \text{C}$; тиску $m_P = 0,3$ мбар; вологості $m_e = 0,5$ мбар, отримаємо:

$$m_{nT} = 0,222 \times 10^{-6};$$

$$m_{nP} = 0,120 \times 10^{-6}, \quad (6)$$

$$m_{ne} = 0,030 \times 10^{-6}.$$

За формулою (4) розрахуємо значення $m_n = 0,254 \times 10^{-6}$.

Для лінії $S = 1$ км при $n \approx 1$ на основі формули (3), отримаємо $m_{sn} = 0,254$ мм.

Розглянемо помилку $m_{s\bar{n}}$ в лінію за різницю між інтегральним значенням показника заломлення $\bar{n}$ та визначеним середнім значенням n на кінцях лінії.

Для цього випадку, відповідно (3), отримаємо:

$$m_{s\bar{n}} = S \cdot \frac{m_{\bar{n}}}{\bar{n}}. \quad (7)$$

Показник заломлення n змінюється з висотою і точки вимірювання метеопараметрів біля приймача та відбивача розташовані нижче ніж середня висота променя світла над поверхнею землі, тому помилка носить переважно систематичний характер і не залежить від кількості прийомів k .

Можна прийняти інтегральні значення тиску та вологості такими, що дорівнюють середнім значенням на кінцях лінії. Однак температуру при цьому прийняти однаковою не можна. При спокійних зображеннях, коли необхідно проводити вимірювання ліній, вертикальний градієнт температури дорівнює $\gamma_H = -0,0098$ град/м. При середній висоті променя світла 30 м над поверхнею землі систематична помилка неточного врахування температури становить:

$$m_T = 0,29^\circ \text{C}, \text{ тому } m_{n_T} = 1 \times 11 \times 10^{-6} \times m_T = 0,322 \times 10^{-6}.$$

При тих же помилках $m_{n_p} = 0,120 \times 10^{-6}$ і $m_{n_e} = 0,030 \times 10^{-6}$ отримаємо:

$$m_n = 0,345 \times 10^{-6}.$$

Для лінії довжиною в 1 км $m_{s_n} = 0,345$ мм.

Помилка в лінії m_{sf} за відхилення основної частоти модуляції від заданої визначається за формулою

$$m_{sf} = S \cdot \frac{m_f}{f}. \quad (8)$$

Вона знаходиться у прямопропорційній залежності від довжини лінії S , носить систематичний характер і не залежить від кількості k прийомів. Приймаючи граничну помилку дрейфу частоти $m_f = 15$ Гц, отримаємо при частоті модуляції 30 МГц для $S = 1$ км величину $m_{sf} = 0,5$ мм.

Неточність визначення постійної p регламентується найперше помилкою базису. Помилки m_{sp} можуть становити від 0,5 до 2,0 мм. Вони постійні і не залежать від S та кількості прийомів. Зауважимо, що при визначенні деформацій за повторними вимірами, ці помилки виключаються.

Помилки центрування та редукції $m_{s_{u,p}}$ у моніторингових геодезичних мережах повинні бути мінімізовані примусовим центруванням світловіддалеміра та відбивача. За даними цілого ряду фірм помилки залежать від чистоти виготовлення поверхні тертя і примусового центрування. Такі джерела помилок в довжину лінії переважно мають випадковий вплив і не залежать від довжини ліній S та кількості прийомів.

Розглянемо також помилку m_{sh} , яка відтворює приведення ліній до центрів знаків. Скористаємося формулою поправки ΔS_h в довжину лінії за нахил лінії:

$$\Delta S_h = \frac{h^2}{2S}, \quad (9)$$

де h – перевищення.

Таблиця 1

Основні джерела помилок та їх характер

№ п/п	Основні джерела помилок світловіддалемірних вимірів	Позначення	Характеристика
1	Вимірювання різниці фаз	$m_{s\Delta\varphi}$	Випадкова, не залежна від S , залежна від k
2	Визначення показника заломлення повітря $n=f(T,P,e)$	m_{sn}	Випадкова, залежна від S , залежна від k
3	Представництво показника заломлення повітря	$m_{s\bar{n}}$	Систематична, залежна від S , не залежна від k
4	Дрейф частоти ГВЧ	m_{sf}	Систематична, залежна від S , не залежна від k
5	Визначення постійної світловіддалеміра	m_{sp}	Систематична, не залежна від S , не залежна від k
6	Центрування світловіддалеміра та редукція відбивача	$m_{S_{ц,р}}$	Випадкова, не залежна від S , не залежна від k
7	Приведення ліній до центрів знаків	m_{Sh}	Випадкова, не залежна від S , не залежна від k

Перейдемо до середніх квадратичних помилок і отримаємо:

$$m_{Sh} = \frac{h}{S} m_h. \quad (10)$$

Зауважимо, що h у даному випадку є різниця між висотами приймача та відбивача над поверхнею Землі. Помилка визначення висоти приймача та відбивача дорівнюватиме $1\text{мм} \times \sqrt{2} \approx 1,4\text{ мм}$ і якщо $S=0,5\text{ км}$, а $h=1\text{м}$, то $m_{Sh}=0,003\text{ мм}$. При збільшенні віддалі S помилка m_{Sh} буде зменшуватись. Необхідно зауважити, що m_{Sh} не є помилкою приведення лінії до горизонтальної проекції. Вона є випадковою і не залежить від кількості прийомів.

Нами охарактеризовано основні джерела помилок, які зустрічаються при вимірюванні ліній світловіддалемірами, прийнято їх позначення, показано їх характер та властивості. Зведемо їх у табл. 1.

Формули для розрахунку очікуваної точності світловіддалемірних вимірів. Розглянемо помилки у табл. 1 з позиції двох груп: у першій групі будуть помилки, які не залежні від S ; у другій – залежні. Для окремої лінії світловіддалемірних вимірів не має значення, який характер носять дані помилки – випадковий чи систематичний. Оскільки помилка визначення постійної світловіддалеміра виключається при визначенні деформацій за повторними вимірами, то поправка в лінію входити не буде. При такому визначенні до першої групи увійшли три випадкові помилки, а до другої – дві систематичні та одна випадкова.

Позначимо групи помилок, відповідно, μ_0 і σ_0 .

Запишемо вирази для μ_0 та σ_0 :

$$\mu_0^2 = m^2_{S_{\Delta\varphi}} + m^2_{S_h} + m^2_{S_{\varphi, p}} \quad (11)$$

$$\sigma_0^2 = m^2_{S_n} + m^2_{S_{\pi}} + m^2_{S_f} \quad (12)$$

При таких позначеннях формула очікуваної помилки в лінії, яка виміряна одним прийомом, набуває вигляду:

$$m_S^2 = \mu_0^2 + \sigma_0^2 \cdot S^2 \quad (13)$$

У формулі (13) μ_0 – сумарна випадкова помилка вимірювання світловіддалеміром будь-якої лінії одним прийомом; σ_0 – сумарна переважно систематична помилка вимірювання 1 км цієї ж лінії також одним прийомом.

Величину m_s можна представити і рівнянням прямої регресії $m_s = \mu_0 + \sigma_0 \cdot S$, але початкові значення помилок в лінії, які викликані різними джерелами, можуть бути як додатними, так і від'ємними. Виходячи з цього, на наш погляд, кращим і точним представленням для m_s буде вираз (13). Різниці в m_s , обчислених за цими формулами, будуть не значні.

У табл.2 подані числові значення окремих помилок та їх сумарні значення μ_0 і σ_0 для різних найбільш точних віддалемірів: ME-3000; Pulsar50; Геодиметр 8; Eldi 10; "Гранат".

У табл. 2 m^0_{φ} – гранична точність вимірювання різниці фаз, а m_f – гранична помилка дрейфу частоти.

Точність вимірювань можна підвищити, виконуючи на станції декілька прийомів. Враховуючи, що один прийом вимірів сучасними світловіддалемірами триває коротко, то збільшення кількості прийомів є одним з найдоцільніших методів підвищення точності.

Якщо позначити μ_k – сумарну випадкову помилку вимірювання світловіддалеміром довільної лінії k прийомами, а σ_k – сумарну переважно систематичну помилку вимірювання 1 км цієї ж лінії також k прийомами, то загальна помилка у цій лінії буде:

$$m_{S_k}^2 = \mu_k^2 + \sigma_k^2 \cdot S^2 \quad (14)$$

Кількісні значення помилок (в мм) μ_0 та σ_0 для світловіддалемірів

Позначення	ME - 3000	Pulsar 50	Геодиметр, 8 модель	Eldi 10	“Гранат”
1	2	3	4	5	6
f (Гц)	499510400	300000000	31465500	600000000	300000000
m^0_{φ}	0,2 ⁰	0,2 ⁰	0,35 ⁰	0,6 ⁰	0,3 ⁰
$m_{S\varphi}$	0,167	2,78	4,65	4,14	4,16
m_{Sh}	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
$m_{S_{\varphi, p}}$	0,07	0,14	0,14	0,14	0,14
m_f (Гц)	15	15	15	15	15
m_{Sf}	0,020	0,500	0,476	0,250	0,500
m_{Sn}	0,120	0,254	0,254	0,254	0,254
$m_{S\bar{n}}$	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345
μ_0	0,181	2,784	4,652	4,142	4,162
σ_0	0,366	0,658	0,640	0,496	0,658

При цьому значення величини μ_k та σ_k розраховуються за формулами

$$\mu_k^2 = \frac{m^2_{S\Delta\varphi}}{k} + m^2_{Sh} + m^2_{S_{\varphi, p}} \quad (15)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{m^2_{Sn}}{k} + m^2_{S\bar{n}} + m^2_{Sf} \quad (16)$$

Однак нам необхідні не довжини ліній S_i , а їх різниці ΔS_f за суміжними повторними вимірюваннями. Тоді помилки для різниць ΔS_f можна знайти за формулою

$$m_{\Delta S_k}^2 = \Delta\mu_k^2 + \Delta\sigma_k^2 \cdot S^2 \quad (17)$$

Своєю чергою

$$\Delta\mu_k^2 = 2 \left(\frac{m^2_{S\Delta\varphi}}{k} + m^2_{Sh} + m^2_{S_{\varphi, p}} \right); \quad (18)$$

$$\Delta\sigma_k^2 = 2 \frac{m^2 s_n}{k} + \frac{m^2 s_{\bar{n}}}{4} + \frac{m^2 s_f}{4}. \quad (19)$$

Будемо вважати, що систематичні помилки в суміжних циклах спостережень є стабільними і їх вплив на ΔS_L буде меншим у два рази. При однакових систематичних помилках у суміжних циклах цей вплив взагалі буде дорівнювати нулю. Крім того, нами прийнято, що квадрати випадкових помилок в різницях вимірів збільшуються у два рази. Що і показано у формулах (18) та (19).

Формулу (18) можна записати і так:

$$\Delta\mu_k = \mu_k \sqrt{2}. \quad (20)$$

У табл.3 подані значення μ_k , σ_k , $\Delta\mu_k$, $\Delta\sigma_k$ для різної кількості прийомів ($k=10, 24, 36, 48$).

Виконавець робіт, залежно від заданих допусків, може вибирати необхідну кількість прийомів для досягнення точності визначення ΔS_L .

На основі формули (17) складено табл.4, в якій представлено граничні середні квадратичні та відносні помилки визначення різниць довжин ΔS_L для ліній довжиною 1, 2, 3, 4, 5 км, якщо виконана кількість прийомів для мекометра ME-3000 – 10, а для інших – 48.

Абсолютні та відносні граничні помилки, які представлені у табл. 4, є практично мінімальними для сучасних віддалемірів. Відповідно до табл. 4 можна вважати, що мекометр ME-3000 є прецизійним, а усі інші світловіддалеміри – високоточні.

Найближчі за точністю до мекометра ME-3000 є також прилади фірми “Leica”, до яких можна віднести: світловіддалемір (дистанціємір) Д1 2002, тахеометр (тотальна станція) ТС 2002. Для цих приладів $\mu_0 = 1$ мм, а $\sigma_0 = 0,1$ мм. Вже при кількості прийомів $k=10$, будемо мати $\mu_k = 0,316$ мм. Буде меншою і систематична помилка. Максимальні віддалі, що можуть бути виміряні цими приладами, відповідно, 7 (з одинадцятьма призмами) та 2,8 км (з трьома призмами).

До високоточних світловіддалемірів, які можуть вимірювати лінії до 19 км, відносяться також дистанціємір фірми “Leica” Д1 3000 S ($\mu_0 = 3$ мм, $\sigma_0 = 0,1$ мм).

Подальше підвищення точності можливе:

1. визначенням ΔS_L не з поодиноких ліній або ходів, а з декількох, які прокладені з так званих нерухомих точок. При цьому точність буде вищою при рівних вагах ліній або ходів у стільки ж разів. Ваги можна знайти для ліній як $P_i = \frac{c}{S_i}$, а для ходів –

$P_i = \frac{c}{[S_i]}$, де c – довільний коефіцієнт і S_i – довжина ліній в кілометрах;

2. зрівноваженням ходу або мережі. Після зрівноваження помилка у слабкому місці ходу зменшиться. Розрахунок такого підвищення точності для конкретної запроектованої мережі не викликає труднощів.

Таблиця 3

Значення μ_k , σ_k , $\Delta\mu_k$, $\Delta\sigma_k$

Кількість прийомів вимірювань - К

Світло- далеміри	К											
	10				24				36			
	Коефіцієнти (мм)				Коефіцієнти (мм)				Коефіцієнти (мм)			
	μ_k	σ_k	$\Delta\mu_k$	$\Delta\sigma_k$	μ_k	σ_k	$\Delta\mu_k$	$\Delta\sigma_k$	μ_k	σ_k	$\Delta\mu_k$	$\Delta\sigma_k$
ME 3000	0,087	0,348	0,124	0,181								
Pulsar 50					0,584	0,613	0,823	0,312	0,484	0,609	0,682	0,310
Eldi 10					0,893	0,429	1,259	0,225	0,704	0,428	0,993	0,228
Геодиметр 8					0,459	0,590	1,352	0,302	0,788	0,589	1,111	0,300
Гранат					0,861	0,610	1,214	0,312	0,707	0,609	0,997	0,310
									0,425	0,608	0,599	0,308
									0,614	0,428	0,866	0,219
									0,686	0,589	0,967	0,298
									0,616	0,608	0,868	0,308

Таблиця 4

Абсолютні та відносні граничні помилки визначення векторів ΔS_r

Світловід- далеміри	1 км		2 км		3 км		4 км		5 км	
	$m_{\Delta S}$ (мм)	$\frac{m_{\Delta S}}{S}$	$m_{\Delta S}$ (мм)	$\frac{m_{\Delta S}}{S}$	$m_{\Delta S}$ (мм)	$\frac{m_{\Delta S}}{S}$	$m_{\Delta S}$ (мм)	$\frac{m_{\Delta S}}{S}$	$m_{\Delta S}$ (мм)	$\frac{m_{\Delta S}}{S}$
ME - 3000	0,219	$\frac{4566210}{2,19 \times 10^{-7}}$	0,383	$\frac{5221930}{1,19 \times 10^{-7}}$	0,557	$\frac{5386000}{1,86 \times 10^{-7}}$				
Pulsar 50	0,674	$\frac{1483680}{6,74 \times 10^{-7}}$	0,859	$\frac{2328280}{4,30 \times 10^{-7}}$	1,101	$\frac{2724790}{3,67 \times 10^{-7}}$	1,370	$\frac{2919710}{3,42 \times 10^{-7}}$	1,652	$\frac{3026630}{3,30 \times 10^{-7}}$
Eldi 10	0,893	$\frac{1119820}{8,93 \times 10^{-7}}$	0,970	$\frac{2061860}{4,85 \times 10^{-7}}$	1,087	$\frac{2759890}{3,62 \times 10^{-7}}$	1,232	$\frac{3246750}{3,08 \times 10^{-7}}$	1,396	$\frac{3581680}{2,79 \times 10^{-7}}$
Геодиметр, 8	1,012	$\frac{988140}{10,12 \times 10^{-7}}$	1,136	$\frac{1760560}{5,68 \times 10^{-7}}$	1,317	$\frac{2227900}{4,49 \times 10^{-7}}$	1,535	$\frac{2605860}{3,84 \times 10^{-7}}$	1,776	$\frac{2815320}{3,55 \times 10^{-7}}$
Гранат	0,921	$\frac{1085780}{9,21 \times 10^{-7}}$	1,064	$\frac{1879700}{5,32 \times 10^{-7}}$	1,268	$\frac{2365930}{4,23 \times 10^{-7}}$	1,507	$\frac{2654280}{3,77 \times 10^{-7}}$	1,768	$\frac{2828050}{3,54 \times 10^{-7}}$

Підсумовуючи вищесказане, можна відзначити, що дана робота дасть змогу спеціалістам якісно виконувати точні розрахунки для проведення геодезичного моніторингу горизонтальних рухів земної поверхні та споруд на ГДП АЕС.

1. Большаков В.Д., Дейнлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радио-геодезические и электро-оптические измерения. М., 1985. 2. Величко В.А., Генике А.А., Лобачев В.М., Полуторок В.К. Фазовые способы измерения расстояний в геодезии. М., 1963. 3. Костецкая Я.М. Свето-и радиодальномеры. Львов, 1986. 4. Мороз О.І., Муха В.І., Островський А.Л. Розрахунок точності світловіддалемірів та світловіддалемірної полігонометрії // Зб. наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. "Геодезичний моніторинг, геодинаміка і рефрактометрія на межі ХХІ століття". Львів, 1998. С.34–41. 5. Тревого И.С., Шевчук П.М. Городская полигонометрия. М., 1996.