

Світловідалеміри

План

1. Принцип дії світловідалемірів.
2. Типи світловідалемірів.
3. Лазерні рулетки.

1. Принципи дії світловідалемірів

Принцип вимірювання довжин ліній світловідалемірами ґрунтується на визначенні часу поширення електромагнітних хвиль видимого або інфрачервоного спектра. У геодезії для розрахунків приймають швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі $c = 299\,792,5$ км/с, або близько 300 000 км/с. Проміжки часу, за які електромагнітні хвилі долають вимірювані віддалі, у геодезії дуже малі. Ці проміжки можуть становити декілька наносекунд – нс (1 нс = 10^{-9} с), пікосекунд – пс (1 пс = 10^{-12} с) та їхні частки. Фіксувати такі невеликі проміжки часу доволі складно, тому вдаються до подвійного проходження хвилями віддалі між початковою та кінцевою точками лінії. В одній точці лінії встановлюють прийомопередавач, а у іншій – відбивач. Довжину лінії за проміжок часу τ , що пройшов від моменту випромінювання сигналу, відбиття його і прийняття приймачем, тобто віддаль між прийомопередавачем і відбивачем, визначають згідно із залежністю

$$L = \frac{c\tau}{2n} \quad (1)$$

де n – показник заломлення реального середовища поширення хвиль.

Замість проміжку часу τ можна вимірювати зміну відомої функції часу, яка відбулася за час дворазового проходження хвилями вимірюваної лінії. Електронні віддалеміри (світловідалеміри) класифікують за тією фізичною величиною, зміну якої визначає вимірювальний пристрій, а саме на імпульсні, фазові та частотні.

В **імпульсних** світловідалемірах невеличка частка кожного імпульсу у момент випромінювання подається на вимірювальний пристрій. Це прямий або опорний імпульс. Основна частина випромінюваного імпульсу двічі проходить вимірювану лінію: від прийомопередавача до відбивача і у зворотному напрямку. Вимірювальний пристрій визначає час запізнення потрапляння до нього відбитого імпульсу порівняно із прямим. За відомим часом визначають довжину вимірюваної лінії згідно із (1). Похибка у визначенні часу τ є причиною похибки довжини лінії, яку вимірюють. Точність вимірювання часу становить 1...10 нс, тому точність вимірювання довжин ліній коливається від 0,3...0,5 м до 10 м. Таку точність можна вважати задовільною для потреб геодезії, якщо вимірювати лінії завдовжки понад 100 км. Перевагою імпульсних світловідалемірів є порівняно

велика потужність випромінювання. Тому з'являється можливість вимірювати віддалі, використовуючи імпульс відбитий об'єктом, не застосовуючи відбивач. Щоправда, ці лінії порівняно невеликої довжини. Варто відзначити, що імпульсні віддалеміри застосовують для визначення віддалей до Місяця та штучних супутників Землі (ШСЗ). Джерелом генерованих імпульсів у цих приладах є рубінові лазери, проміжки часу визначають з точністю до 1 нс.

У **фазових** віддалемірах замість індикатора часу застосовують індикатор різниць фаз. Передавач віддалеміра випромінює уздовж вимірюваної лінії гармонічні коливання. Вони проходять цю лінію, відбиваються, вдруге проходять її і приймач їх приймає. До вимірювального пристрою – фазометра потрапляють прямі та відбиті коливання. Фазометр вимірює різницю фаз прямих і відбитих коливань.

Фаза прямих коливань, які випромінює передавач, і які надходять до фазометра у момент часу t

$$\varphi_n = 2\pi ft + \varphi_0, \quad (2)$$

де f – частота випромінюваних коливань, або вимірювальна частота; φ_0 – початкова фаза. У той самий момент часу до фазометра надходять з приймача відбиті коливання. Вони випромінювалися раніше на проміжок часу $\tau = \frac{2L}{c}$. Тому їхня фаза

$$\varphi_e = 2\pi f(t - \tau) + \varphi_0. \quad (3)$$

Різниця фаз прямих і відбитих коливань

$$\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_e = 2\pi f\tau. \quad (4)$$

Визначивши час τ з (4), і, підставивши його значення у (1), маємо довжину вимірюваної лінії

$$L = \frac{\Delta\varphi c}{2\pi \cdot 2f}. \quad (5)$$

У віддалемірах вимірювальні частоти мають надвисокі частоти коливання (наприклад, більші від 1 000 ГГц). Траєкторії їхнього поширення в атмосфері вважають прямолінійними.

Залежність (5) записують у вигляді

$$L = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

де $\frac{\lambda}{2}$ – півдовжина хвилі вимірювальної частоти.

Відношення $\frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ показує, скільки разів півдовжина хвилі вклалась у вимірюваній лінії. Зазвичай це ціла кількість півдовжини хвиль N і дробова частка $\frac{\lambda}{2} - \delta$. Тому

$$\Delta\varphi = (N + \delta) \cdot 2\pi, \quad (7)$$

Якщо у (6) врахувати значення $\Delta\varphi$, вираз для довжини лінії набуде вигляду

$$L = (N + \delta) \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{\lambda}{2} + l, \quad (8)$$

де $l = \delta \frac{\lambda}{2}$ – лінійний домір. Фазометри віддалемірів дають можливість вимірювати різницю у межах одного періоду, тобто тільки фазовий домір. Кількість півхвиль N (періодів) фазометри не визначають. Якщо змінити довжину лінії на півдовжину хвилі, показ фазометра не зміниться. Коли вимірювати різниці фаз на одній частоті, можна мати багато значень довжини вимірюваної лінії, які відрізняються одне від одного на півдовжини хвилі вимірювальної частоти, тобто існує багатозначність. Щоб виключити багатозначність, вимірювання необхідно виконувати на двох або більше вимірювальних частотах. Частоту можна змінювати плавно – одноступеневий спосіб або дискретно – багатоступеневий спосіб.

В одноступеневому способі вимірювальну частоту змінюють плавно у заданому діапазоні, в якому вибирають не менше від двох частот f_i і f_k , на яких вимірюють фазові доміри. Для зручності приймають, що $f_i < f_k$.

Відповідно до залежності (8) можна записати

$$L = (N_i + \delta_i) \cdot \frac{c}{2f_i}; \quad L = (N_k + \delta_k) \cdot \frac{c}{2f_k} \quad (9)$$

де δ_i і δ_k – фазові доміри, визначені фазометром на частотах f_i і f_k відповідно; N_i і N_k – кількість цілих періодів, що міститься у різницях фаз $\Delta\varphi_i$ та $\Delta\varphi_k$ на цих частотах. У залежностях (9) невідомі S , N_i і N_k .

Під час збільшення частоти плавно збільшується різниця фаз і покази фазометра. Якщо частоту плавно збільшити так, щоб різниця фаз збільшилась на один період, тобто кількість цілих періодів збільшити на один, покази фазометра пройдуть всі можливі значення і повернуться до початкового, тобто пройде один цикл зміни показів фазометра. Якщо порахувати кількість циклів змін показів фазометра після переходу від частоти до частоти f_k , можна визначити, на скільки N_k відрізняється від N_i , тобто

$$n_{ki} = N_k - N_i. \quad (10)$$

Підставивши, наприклад, значення N_k із (10) у друге рівняння із (9), і, прирівнявши праві частини рівнянь, отримаємо вираз для визначення N_i ,

$$N_i = \frac{n_{ki} f_i}{f_k - f_i} + \frac{\delta_k f_i - \delta_i f_k}{f_k - f_i}. \quad (11)$$

Щоб помилки вимірювань фазових домірів та частот якнайменше спотворювали результат обчислень, різниця частот $f_k - f_i$ повинна бути якомога більшою. Тому фазові вимірювання виконують на частотах, що є близькими до меж діапазону зміни частоти у віддалемірі.

Віддалеміри, в яких застосовують багатоступеневий спосіб виключення багатозначності, мають декілька постійних вимірювальних частот. На кожній з частот вимірюють фазові доміри. Виключаючи багатозначність, визначають кількість цілих періодів для однієї з вимірювальних частот, яку називають основною. На ній виконують найбільшу кількість вимірювань і найточніше визначають фазові доміри. Якщо застосовують безпосередній спосіб визначення фазових домірів, другу вимірювальну частоту вибирають у цілу кількість разів меншою від основної, тобто першої; третю частоту у цілу кількість разів меншою від другої частоти, а також від першої і т. д. Наприклад, може бути така комбінація частот: $f_1=15000$ кГц, $f_2 = \frac{f_1}{10} = 1500$ кГц, $f_3 = \frac{f_2}{10} = \frac{f_1}{100} = 150$ кГц,

$$f_4 = \frac{f_3}{10} = \frac{f_2}{100} = \frac{f_1}{1000} = 15 \text{ кГц.}$$

Частота f_i близька до основної частоти f_1 і $f_1 > f'_i$.

Різниця різниць фаз цих двох частот дорівнює різниці фаз на частоті, що є різницею цих двох частот, тобто на середній чи низькій частотах $f_i = f_1 - f'_i$. Кількість цілих періодів в різниці фаз на низькій частоті дорівнює різниці цілих кількостей періодів, які містилися в різниці фаз на кожній з високих частот. Фазовий домір, тобто показ фазометра, на середній чи низькій частотах можна обчислити, взявши різницю фазових домірів двох високих частот.

Щоб виключити багатозначність посереднім способом визначення фазових домірів замість частоти $\frac{f_1}{10}$ використовують частоту, яка дорівнює $0,9 f_1$ або $1,1 f_1$, а частоту $\frac{f_1}{100}$ заміняють частотою $0,99 f_1$ або $1,01 f_1$. Загалом для отримання фазового доміру посереднім способом у віддалемірі, крім першої частоти, застосовують одну з двох частот $f'_i = f_1 + \frac{f_1}{k}$, або $f'_i = f_1 - \frac{f_1}{k}$.

Багатоступеневий спосіб виключення багатозначності доволі легко автоматизувати.

Загалом фазові віддалеміри є найпоширенішими геодезичними віддалемірами.

Частотний спосіб вимірювання віддалей ґрунтується на використанні частотно модульованих несучих коливань. Несучу частоту модулюють так, щоб можна було встановити порівняно просту залежність між зміною частоти та часом, за який ця зміна відбулася, наприклад, згідно із лінійним законом. Половина періоду частоти модуляції несучих коливань $\frac{1}{2}T = \frac{1}{2}f$ має бути більшою від часу подвійного проходження лінії хвилями. Коливання, які двічі пройшли вимірювану лінію, потрапляють до приймача, який разом із частиною прямих коливань передає їх до вимірювального пристрою. Тут визначають різницю частот прямих і відбитих коливань $\Delta f = f_n - f_s$ де f_n – частота коливань,

які випромінює передавач у момент часу t , а f_e – частота відбитих коливань, які приймає приймач у той самий момент часу. Різниця частот залежить від довжини лінії, тобто від часу τ подвійного проходження коливаннями вимірюваної лінії

$$\tau = \frac{\Delta f}{4Ff}, \quad (12)$$

де $f = \frac{1}{T}$; Δf – вимірне значення різниці частоти; F – амплітуда зміни частоти;

T – період частоти модуляції несучих коливань.

Вимірювана віддаль

$$L = \frac{c\Delta f}{8Ff}. \quad (13)$$

Модифікований частотний спосіб з модульованими коливаннями застосовують у радіовисотомірах, а також для забезпечення посадки космічних апаратів.

2. Типи світловідалемірів

Світловідалеміри, які використовують для геодезичних вимірювань, відрізняються один від одного радіусом дії, послідовністю вимірювань ліній, функціональною схемою тощо. Середня квадратична похибка вимірювання ліній віддалеміром залежить від довжини лінії

$$M = a + b \cdot 10^{-6} L, \quad (14)$$

де a , мм – частина середньої квадратичної похибки, що не залежить від довжини лінії; $b \times L$ – частина похибки, що залежить від довжини лінії (у міліметрах на кожний кілометр лінії).

Віддалеміри характеризуються певною точністю (значення a і b (14)), а також радіусом дії, тобто верхньою та нижньою межею вимірюваних довжин ліній. Крім того, їх поділяють за принципом дії та конструкцією. Згідно із стандартом світловідалеміри поділяють на:

– *геодезичні світловідалеміри*, що слугують для створення державних геодезичних мереж ($a = 5,10$; $b = 1,2$; $L = 0,5 \dots 50$ км);

– *прецизійні світловідалеміри*, які слугують для високоточних вимірювань в інженерній геодезії ($a = 0,3 \dots 1,2$; $b = 0,5 \dots 3,0$; $L = 0,002 \dots 3,0$ км);

– *топографічні світловідалеміри* для створення геодезичних мереж згущення, знімальних мереж і для топографічного знімання ($a = 5 \dots 10$; $b = 2 \dots 5,0$; $L = 0,002 \dots 15,0$ км).

Залежно від типу фазометра світловідалеміри поділяють на три покоління. У світловідалемірах першого покоління використовують *оптичні фазометри*, другого – *аналогові*, а третього – *цифрові фазометри*. В останніх процес вимірювань автоматизований.

3. Лазерні рулетки

Оптичні, оптично-механічні і механічні прилади та пристрої вимірювання довжин ліній та віддалей вже поступилися і продовжують поступатися сучасним високопродуктивним електронним і лазерним приладам. Сьогодні, наприклад, лазерні рулетки випускають відомі фірми Leica, Sokkia, Topcon, Trimble-Zeiss та інші. Загалом лазерними рулетками вимірюють віддалі 0,2...400 м, а похибка вимірювань становить 1,5...5 мм незалежно від віддалі. Наприклад, лазерні рулетки типу DISTO™ (Leica) вимірюють віддалі від 0,2 до 200 м з точністю $\pm 1,5$ мм. Габаритні розміри рулетки 172x73x45 мм, а маса 335 г.

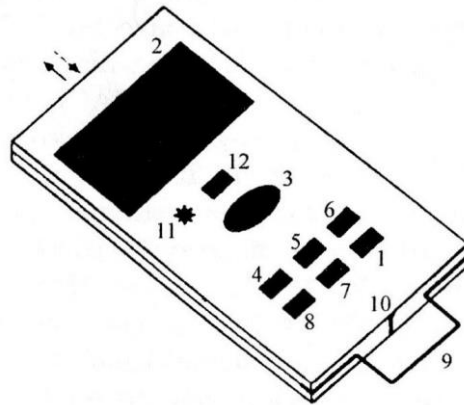


Рис. 1. Панель керування лазерної рулетки HD 360:

1 – клавіша вмикання і вимикання; 2 – дисплей на основі рідких кристалів; 3 – вимірювання; 4 – вимірювання віддалі; 5 – вимірювання площі; 6 – вимірювання об'єму; 7 – вимірювання недопустимої віддалі; 8 – безперервні вимірювання; 9 – скоба початку відліку вимірюваної віддалі; 10 – візирна риска; 11 – клавіша підсвічування дисплею; 12 – перемикач одиниць вимірювань (метри/фути)

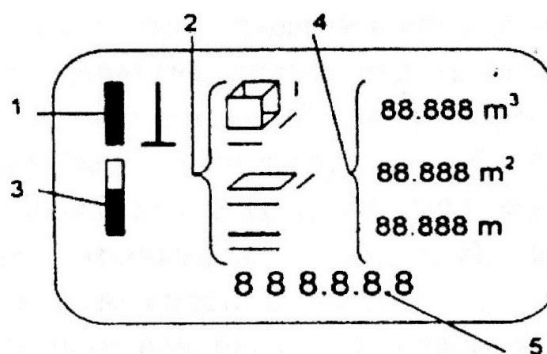


Рис. 2. Екран дисплея рулетки HD 360:

1 – готовність до вимірювань; 2 – режим вимірювань (об'єму, площі, безперервні вимірювання тощо); 3 – зарядження акумулятора; 4 – результат окремого вимірювання; 5 – результат обчислень

Панель керування лазерної рулетки HD 360 (Trimble-Zeiss) наведено на рис. 8.1, а на рис. 8.2 показано екран її дисплея.

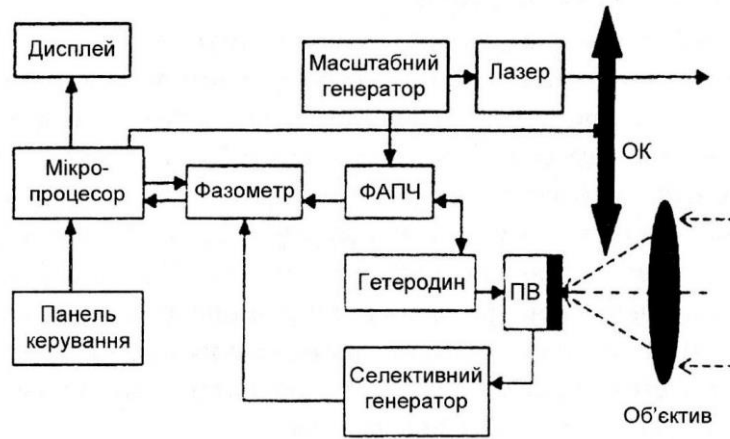


Рис. 3. Функціональна схема лазерної рулетки типу DISTO

В основу дії лазерних рулеток типу HD 360, DISTO та інших моделей покладено фазовий спосіб вимірювання віддалей. На рис. 3 подано функціональну схему рулетки DISTO. Кварцовий масштабний генератор частотою 50 МГц модулює випромінювання напівпровідникового лазера. Скомпільований пучок світла скеровується на дистанцію оптичним комутатором ОК, а потім у режимі “ОКЗ” безпосередньо на приймач випромінювання ПВ. Сигнал з селективного генератора, який дає інформацію про вимірювану віддаль, надходить на інформаційний вхід фазометра. На опорний вхід фазометра надходить сигнал зі схеми фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ). Різниця фаз двох сигналів пропорційна до вимірюваної віддалі у межах фазового циклу, який дорівнює 3 м у лінійній мірі. Для виключення неоднозначності результатів вимірювань у межах 150 м передбачене вимірювання віддалі на масштабній частоті 1 МГц. Одержані результати опрацьовує і подає на дисплей однокристална ЕОМ.

Віддалі вимірюють від задньої стінки корпусу або скоби (поз. 9 рис. 1). Візирна риска 10 слугує для спрямування приладу по лінії вимірювання.

Щоб увімкнути лазер, треба злегка натиснути на клавішу 1 (рис. 1), а для виконання безпосередньо вимірювань клавішу 1 потрібно натиснути повністю. Результати вимірювань відтворюються на екрані дисплея через 0,5...4 с. Про закінчення вимірювань сповіщає звуковий сигнал. Для вимірювання, наприклад, об'єму потрібно натиснути клавішу 6 (рис. 1). На дисплеї з'явиться відповідний символ (рис. 2, поз. 2 вгорі), після цього необхідні три окремі вимірювання (довжина, ширина і висота). Результат окремого вимірювання відображається у верхній частині дисплея, а результат обчислень, які виконуються автоматично, у його нижній частині (поз. 5, рис. 2).

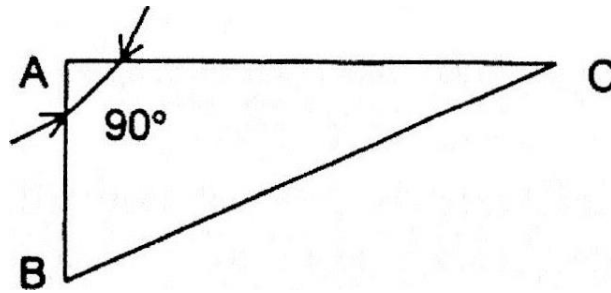


Рис. 4. Схема визначення віддалі лазерною рулеткою до недоступного об'єкта

Щоб виміряти віддаль до недоступного об'єкта, наприклад, за відсутності прямої видимості потрібно натиснути клавішу 7 (рис. 1), після чого на дисплеї з'явиться знак < I. Щоб визначити віддаль AC (рис. 4), з точки B вимірюють віддалі BA і BC. Після другого за чергою вимірювання довжина лінії AC висвічується у нижній частині дисплея. Прилад вимикають, повторно натиснувши клавішу 1 (рис. 1) або він вимикається автоматично через п'ять хвилин після закінчення вимірювань.