

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПТИЧНОЇ КАЛІБРОВКИ У ВИСОКОТОЧНИХ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРАХ

**І.О. Брагинець\***, канд. техн. наук, **Ю.О. Масюренко\*\***, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [masjuriy@ied.org.ua](mailto:masjuriy@ied.org.ua)

*Проведено оцінку ефективності використання оптичної калібрівки в високоточних фазових лазерних далекомірах. З метою забезпечення заданої точності визначення відстані задля встановлення оптимальної періодичності режимів вимірювання відстані і оптичної калібрівки рекомендовано відповідну формулу для оцінки частоти комутації сигналів на вході вимірювального каналу далекоміра. Встановлено, що навіть у разі використання оптичної калібрівки на точність вимірювання відстані впливає похибка фазового детектору, який входить до складу далекоміра. Задля мінімізації впливу цієї похибки запропоновано новий метод безпосереднього вимірювання фазового зсуву в далекомірі, а також застосування компенсаційного методу вимірювання фазового зсуву. Розглянуто відповідні структурні схеми далекомірів, в яких реалізовано запропоновані методи вимірювання фазових зсувів, та проведено аналітичне моделювання перетворювальних в них процесів. Бібл. 7, рис. 2.*

**Ключові слова:** лазер, фазовий далекомір, оптична калібрівка, фазовий детектор, мінімізація похибок.

Розвиток безконтактних оптоелектронних вимірювальних систем для контролю геометричних параметрів великогабаритних виробів у різних галузях промисловості та наукових дослідженнях безпосередньо пов'язаний з підвищенням точності вимірювання відстані до контрольованого об'єкту за допомогою лазерного далекоміра, який входить до складу таких систем. Сучасні вимоги в даному разі передбачають вимірювання відстані до декількох десятків метрів з похибкою на рівні 100 мкм, що наближає вже лазерний далекомір за точністю до лазерного інтерферометра.

Як відомо, одними з найбільш точних є лазерні далекоміри, які засновані на фазовому методі вимірювання відстані з високочастотною синусоїдальною модуляцією інтенсивності лазерного випромінювання [1]. В таких приладах відстань  $L_x$  до контрольованого об'єкта визначається шляхом вимірювання зсуву фаз  $\varphi_x$  огинаючих випромінюваного та відбитого від об'єкту світлових потоків за формулою

$$L_x = c\varphi_x / 4\pi f_m, \quad (1)$$

де  $c$  – швидкість світла;  $f_m$  – частота модуляції, яка може складати десятки мегагерц. У даному випадку мірою під час визначення  $L_x$  є довжина хвилі модульованого світлового випромінювання, яка, наприклад, за  $f_m = 25$  МГц складає  $\lambda = c/2f_m = 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot 25 \cdot 10^6 = 6000$  мм.

Згідно формули (1) похибка вимірювання відстані залежить від точності визначення  $c$ ,  $\varphi_x$  і  $f_m$ . Похибка  $c$  пов'язана зі швидкістю світла у вакуумі та складає  $4 \cdot 10^{-9}$ . Тому для заданої точності вимірювання відстані нею можна знехтувати. Встановлення частоти  $f_m$  можна забезпечити з похибкою не більше  $10^{-6}$  [2], яка, враховуючи довжину хвилі модульованого світлового випромінювання, є незначною. Домінуючою складовою похибки вимірювання відстані є похибка визначення фазового зсуву  $\Delta\varphi_x$  [2]. Відповідна похибка у вимірюванні відстані  $\Delta L_x$  складає

$$\Delta L_x = c\Delta\varphi_x / 4\pi f_m. \quad (2)$$

Аналіз формули (2) дає змогу зробити висновок, що  $\Delta L_x$  тим менше, чим вище частота модуляції  $f_m$ . Однак збільшення  $f_m$  обмежено, оскільки для однозначного визначення відстані подвійне значення цієї відстані не повинно перевищувати довжину хвилі модуляції. Крім того, збільшення  $f_m$

призводить до погіршення завадостійкості далекоміра за рахунок підвищення інтенсивності дробових шумів фотоприймача та відповідно випадкової похибки вимірювання відстані.

**Метою роботи** є оцінка ефективності застосування оптичної калібровки для підвищення точності вимірювання фазових зсувів у відомих розробках лазерних далекомірів і вдосконалення лазерних фазових методів з використанням оптичної калібровки для забезпечення заданої точності визначення відстані.

Відомо два фазових методи вимірювання відстані: з безпосереднім вимірюванням фазового зсуву та вимірювання з компенсацією фазового зсуву.

Найбільше розповсюдження отримали лазерні далекоміри з безпосереднім вимірюванням фазового зсуву, типова схема яких містить приймально-передавальну систему, вимірювальний і опорний канали, фазовий детектор з представленням даних про фазовий зсув в аналоговому чи цифровому вигляді, блок управління та обробки даних і відліковий пристрій. У таких приладах точність вимірювання  $\varphi_x$  суттєво залежить від фазових спотворень, що вносяться під час проходження оптичних сигналів через передавально-приймальну систему. Часові затримки, що призводять до фазових спотворень, виникають також під час проходження електричних сигналів у вимірювальному та опорному каналах, які містять масштабні та функціональні перетворювачі. При цьому вказані фазові спотворення в електричних ланцюгах обох каналів неоднакові та нестабільні із-за багатьох факторів (температура, вологість, тиск, радіація і т.п.). Крім того, на точність вимірювання  $\varphi_x$  впливає й похибка фазового детектора.

Задля зменшення впливу фазових спотворень у лазерних далекомірах з безпосереднім визначенням фазового зсуву часто використовується оптична калібровка приладу [2]. В цьому випадку в далекомірі комутаційним методом здійснюються два режими вимірювання: вимірювання невідомої відстані та контрольної каліброваної відстані. В режимі вимірювання контрольної відстані модульоване за інтенсивністю лазерне випромінювання за допомогою дзеркал, призм або світловодів направляється відразу до приймальної оптичної системи, оминаючи вимірювальну відстань. В цьому випадку зазначений вище вплив фазового дрейфу можна компенсувати через визначення різниці значень двох відстаней, причому тим ефективніше, чим коротше проміжок часу між вимірюваннями обох відстаней. Це пояснюється тим, що випадкові похибки від температурних та часових змін параметрів каналів далекоміра зменшуються з підвищенням частоти комутації. В принципі максимальна частота комутації режимів роботи далекоміра повинна вибиратися в залежності від максимальної адитивної фазової похибки  $\gamma_{\varphi_{\max}}$ , яка виникає через комутацію сигналів на вході вимірювального каналу, фазовий зсув між якими може змінюватися в межах  $0 \dots 360^\circ$  [3]

$$F_{\max} = 3f \cdot \gamma_{\varphi_{\max}}, \quad (3)$$

де  $f$  – частота вимірювальних сигналів на вході фазового детектору. Так, наприклад, якщо допустиме значення  $\gamma_{\varphi_{\max}} = 10^{-5}$  рад, що в одиницях довжини у разі  $\lambda = 6000$  мм складе приблизно 0,01 мм, то згідно (3) за  $f = 80$  кГц частота комутації  $F_{\max} = 2,4$  Гц.

Приклади практичної реалізації оптичної калібровки в фазових лазерних далекомірах можна знайти в [4, 5]. Слід відмітити, що в таких далекомірах навіть застосування оптичної калібровки не виключає впливу на точність вимірювання фазового зсуву похибки фазового детектору. Це пояснюється тим, що оптична калібровка здійснюється тільки в одній точці діапазону вимірюваних фазових зсувів, а вимірювання відстані проводиться в діапазоні фазових кутів, що відповідає повному фазовому циклу. Тому похибки фазового детектору в кожному із режимів роботи далекоміра неоднакові та не компенсуються в повній мірі під час використання оптичної калібровки.

Згідно результатів проведеного вище аналізу ефективності застосування оптичної калібровки авторами запропоновано вдосконалений спосіб вимірювання відстані, у разі реалізації якого визначення контрольної каліброваної відстані та невідомої відстані проводяться під час вимірювання однакових фазових зсувів, пропорційних вказаним відстаням. Це дає можливість із застосуванням відповідного алгоритму обробки даних компенсувати вплив похибки фазового детектору на точність вимірювання невідомої відстані.

На рис. 1 наведено схему фазового лазерного далекоміра для реалізації запропонованого способу вимірювання відстані. На схемі прийнято наступні умовні позначення: ДСЧ – двоканальний синтезатор частоти; ЛВ – лазерний випромінювач; ОК – оптичний комутатор; Дз1, Дз2 – дзеркала; Об – об'єктив; ФП – фотоприймач; Зм1, Зм2 – змішувачі сигналів; Гт – гетеродин; П1, П2 – підсилювачі;

ФД – фазовий детектор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БУОД – блок управління та обробки даних; ВП – відліковий пристрій; СВ – світловод.

Робота далекоміра здійснюється в декілька етапів.

Електричний сигнал модуляційної частоти  $f_m$  надходить від першого виходу синтезатора ДСЧ на вхід випромінювача ЛВ. Спочатку сфокусований та модульований за інтенсивністю світловий потік від випромінювача ЛВ через оптичний комутатор ОК, що управляється сигналом від блока БУОД, за допомогою дзеркал Дз1 і Дз2 через центр об'єктиву Об направляється на контрольований об'єкт. Відбитий від контрольованого об'єкту світловий потік знову проходить через об'єктив Об,

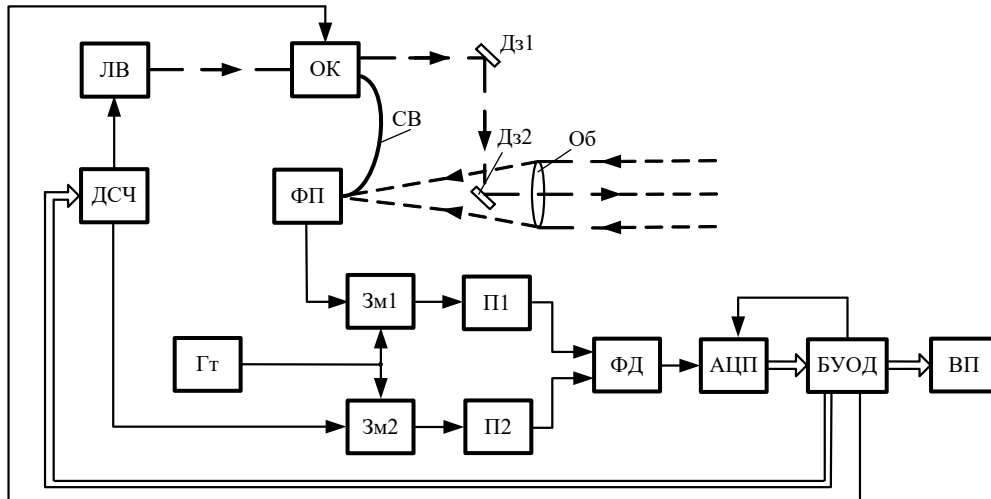


Рис. 1

фокусується ним і потрапляє на вхід фотоприймача ФП. Вимірювання різниці фаз випромінюваного та прийнятого світлових потоків здійснюється на проміжній частоті, отриманій в результаті гетеродинування. З цієї мети електричний сигнал з виходу фотоприймача ФП надходить на один з входів змішувача Зм1. Також на один із входів змішувача Зм2 подається сигнал з другого виходу синтезатора ДСЧ, який використовується як опорний. На другі входи змішувачів Зм1 і Зм2 надходить сигнал гетеродина Гт. Вихідні напруги змішувачів Зм1 і Зм2 після підсилювання за допомогою підсилювачів П1 і П2 надходять відповідно на входи фазового детектора ФД. В останньому здійснюється перетворення значення виміряного фазового зсуву  $\varphi_{в1}$  в постійну напругу. Ця напруга за допомогою АЦП перетворюється в числовий еквівалент, який представлено у вигляді коду  $N_1 = k\varphi_{в1}$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $\varphi_{в1} = \varphi_x + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$ ,  $\varphi_x$  – дійсне значення фазового зсуву, пропорційне вимірюваній відстані;  $\Delta\varphi_1$  – похибка вимірювання із-за фазового дрейфу;  $\Delta\varphi_2$  – сумарна похибка вимірювання ФД і АЦП. Далі  $N_1$  переноситься в блок БУОД і запам'ятовується в оперативній пам'яті.

Після цього в синтезаторі ДСЧ відповідним кодом, який подається з блоку БУОД, встановлюється фазовий зсув модуляційної напруги відносно опорної, який дорівнює  $\varphi_{в1}$ . В даному випадку це буде еталонним значенням  $\varphi_{ет}$ . При цьому сигналом з блоку БУОД комутатор ОК перемикається в положення, за якого світловий потік від випромінювача ЛВ направляється вже не на контрольований об'єкт, а одразу через світловод СВ на вхід фотоприймача ФП. Далі проводиться вимірювання фазового зсуву за алгоритмом, що вже описано вище. В результаті числовий еквівалент виміряного фазового зсуву (в цьому випадку  $\varphi_{в2}$ ) може бути представлено кодом  $N_2 = k\varphi_{в2}$ , де  $\varphi_{в2} = \varphi_{ет} + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$ . Треба відзначити, що похибка  $\Delta\varphi_2$  в обох випадках вимірювання фазового зсуву однакова, оскільки здійснюється перетворення приблизно однакових фазових зсувів. Кодове значення  $N_2$  переноситься в блок БУОД.

Далі в блоці БУОД проводиться обробка отриманих даних. Спочатку обчислюється різниця  $\Delta N = N_1 - N_2 = k(\varphi_x - \varphi_{ет})$ . Далі визначається сумарне кодове значення  $N = N_{ет} + \Delta N = k\varphi_{ет} + k(\varphi_x - \varphi_{ет}) = k\varphi_x$ . Таким чином, результат вимірювання  $\varphi_x$ , який відображається відліковим пристроєм ВП, не залежить не тільки від фазового дрейфу в передавально-приймальній системі та каналах далекоміра, але й від похибки ФД і АЦП. Ця обставина під час реалізації запропонованого способу дає можливість підвищити точність вимірювання відстані. Треба відзначити, що ефективність запропонованого способу залежить від точності установки фазового зсуву  $\varphi_{ет}$  у вихідній напрузі ДСЧ.

Сучасні технології створення синтезаторів частоти з прямим цифровим синтезом дають можливість отримати необхідну точність встановлення фазових зсувів вихідної напруги синтезатора [6].

Потенційно більш точним є фазовий метод вимірювання відстані з компенсацією фазового зсуву. Під час реалізації компенсаційних методів вимірювання фазові спотворення в каналах і похибка фазового детектора не впливають на результат вимірювання. Способи вимірювання з компенсацією фазового зсуву підрозділяються на способи з фіксованою частотою модуляції та способи зі змінною частотою модуляції. За фіксованої частоти модуляції для визначення фазового зсуву компенсаційним нульовим методом використовуються фазообертачі [1]. Однак застосування як фазообертача електричної лінії затримки сигналів через її недостатню точність і нестабільність, особливо на високих частотах (десятки мегагерц), не дає змоги отримати необхідну точність вимірювання відстані. Використання механічної оптичної калібрувальної лінії [1] як фазообертача істотно збільшує час вимірювання, а також значно ускладнює практичну реалізацію способу вимірювання відстані. Спосіб з компенсацією фазового зсуву з плавною зміною частоти модуляції в деякому діапазоні передбачає зі зміною частоти й зміну фазового зсуву, який визначають за частотою [1]. Недоліком цього способу є обмеження діапазону вимірювальних відстаней, яке залежить від значення  $L_x$ .

Прикладом реалізації компенсаційного способу вимірювання відстані зі зміною частоти модуляції є фазовий лазерний далекомір, описаний в [7]. В цьому далекомірі як високоточний фазообертач використовується калібрована світловолоконна лінія, яка забезпечує необхідний фазовий зсув у разі зміни частоти модуляції. У цьому випадку фазовий зсув, що вноситься, дорівнює

$$\varphi_{\text{FO}} = 2\pi L_0 f_{\text{M2}} \cdot c^{-1}, \quad (4)$$

де  $L_0$  – довжина оптичного шляху, який проходить світлове випромінювання через калібровану світловолоконну лінію;  $f_{\text{M2}}$  – частота модуляції, що перелаштовується.

Принцип роботи далекоміра полягає в наступному. Спочатку вимірюється відстань до контрольованого об'єкта. У цьому випадку модульований із заданою частотою  $f_{\text{M1}}$  світловий потік прямує на контрольований об'єкт і відповідно до (1) визначається фазовий зсув  $\varphi_x$  між світловим потоком, що випромінюється, та світловим потоком, що приймається. Потім на вхід тієї ж приймальної системи направляється модульоване випромінювання через калібровану світловолоконну лінію. Змінюючи частоту модуляції  $f_{\text{M2}}$  у виразі (4), добиваються рівності  $\varphi_{\text{FO}} = \varphi_x$ . Тоді значення вимірюваної відстані можна визначити за формулою

$$L_x = L_0 f_{\text{M2}} / 2f_{\text{M1}}. \quad (5)$$

Оскільки значення частоти  $f_{\text{M2}}$  під час її перелаштування може бути виставлено з високою точністю, наприклад, за допомогою цифрового синтезатора частоти, то застосування зазначеного фазообертача дає змогу істотно зменшити вплив похибки фазового детектора на результат визначення відстані. Але в далекомірі є залежність результату вимірювання відстані від похибки, обумовленої фазовими спотвореннями сигналів у високочастотних ланках вимірювального та опорного каналів, які залежать від частоти модуляції. Це обумовлено тим, що визначення фазового зсуву  $\varphi_x$ , пропорційного вимірювальній відстані, відбувається за фіксованого значення частоти модуляції  $f_{\text{M1}}$ , а умова  $\varphi_{\text{FO}} = \varphi_x$  у разі використання каліброваної лінії досягається через зміну частоти модуляції до значення  $f_{\text{M2}}$ , яке відрізняється від  $f_{\text{M1}}$ . Тому під час визначення відстаней у всьому діапазоні фазові спотворення у двох режимах будуть різні, і похибки вимірювання компенсуються не в повній мірі. Ця обставина суттєво зменшує діапазон вимірюваних відстаней. Покажемо це на прикладі.

Для цього з метою врахування інерційності високочастотних частин вимірювального та опорного каналів представимо їхні фазово-частотні характеристики (ФЧХ) в самому простому випадку функцією ФЧХ фільтра 1-го порядку зі смугою пропускання  $f_{\text{пр}}$ , яка дорівнює 100 МГц. Тоді фазовий зсув, який вноситься інерційними ланками кожного із каналів далекоміра, можна представити у вигляді

$$\varphi_{\text{вн}}(t) = \arctg \omega_m \tau, \quad (6)$$

де  $\omega_m$  – кутова частота модуляції;  $\tau$  – еквівалентна постійна часу високочастотної частини каналів,  $\tau = 1/2\pi f_{\text{пр}}$ . Звідси значення  $\varphi_{\text{вн1}}(t)$  при  $f_{m1}=25$  МГц дорівнює приблизно 0,24 рад. Якщо задатися неідентичністю параметрів каналів в режимі вимірювання відстані у 5%, то похибка вимірювання фазового зсуву складатиме  $\Delta\varphi_1=0,012$  рад. В режимі, коли випромінювання лазера направляєється на вхід фотоприймача через калібровану світловолоконну лінію, еквівалентна довжина якої  $L_0=18$  м, максимальна частота модуляції  $f_{m2}$  згідно формули (5) складатиме 16,67 МГц. Тоді фазовий зсув  $\varphi_{\text{вн2}}(t)$ , що вноситься компонентами каналів, наприклад, на частоті 8,33 МГц дорівнює 0,082 рад, а похибка вимірювання фазового зсуву складатиме  $\Delta\varphi_2=0,0041$  рад. Результуюча похибка вимірювання фазового зсуву під час реалізації алгоритму вимірювання відстані, що розглядається,  $\Delta\varphi_{\Sigma} = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 0,00565$  рад. Ця похибка в одиницях довжини складатиме  $\Delta L_x = 6000 \cdot 0,0079 / 6,28 = 7,55$  мм.

Із результату наведеного прикладу можна зробити висновок, що задля досягнення заданої точності вимірювання відстані в широкому діапазоні в розглянутому далекомірі необхідно підбирати компоненти обох каналів з допустимим розкидом характеристик. Це досить ускладнює практичну реалізацію розглянутого фазового методу вимірювання відстані. Крім того, невідомо, як поведуть себе характеристики компонентів каналів зі зміною температури та у часі.

У зв'язку з вищезазначеним з метою підвищення точності вимірювання та розширення діапазону вимірюваних відстаней автори запропонували вдосконалити описаний далекомір з компенсаційним вимірюванням фазового зсуву. Для цього в кожному із режимів роботи далекоміра додатково проводиться вимірювання внутрішньої контрольної відстані на заданій частоті модуляції. Результат вимірювання в кожному із випадків використовується для компенсації фазових спотворень, що виникають в каналах далекоміра під час його роботи.

На рис. 2 показано схему запропонованого фазового лазерного далекоміра, де: ГМН – генератор модуляційної напруги; ПГМН – генератор модуляційної напруги, що перелаштовується; ЛВ1, ЛВ2 і ЛВ3 – лазерні випромінювачі; Дз1 і Дз2 – дзеркала; Об – об'єктив; КО – контрольований об'єкт; ФП1 і ФП2 – фотоприймачі; СВ1, СВ2, СВ3 і СВ4 – світловоди; КСЛ – калібрована світловолоконна лінія; ШП1 і ШП2 – ширококутові підсилювачі; Зм1 і Зм2 – змішувачі; Гт – гетеродин; ПГт – гетеродин, що перелаштовується; К1 і К2 – комутатори; ФД – фазовий детектор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БУОД – блок управління, збору та обробки даних; ВП – відліковий пристрій.

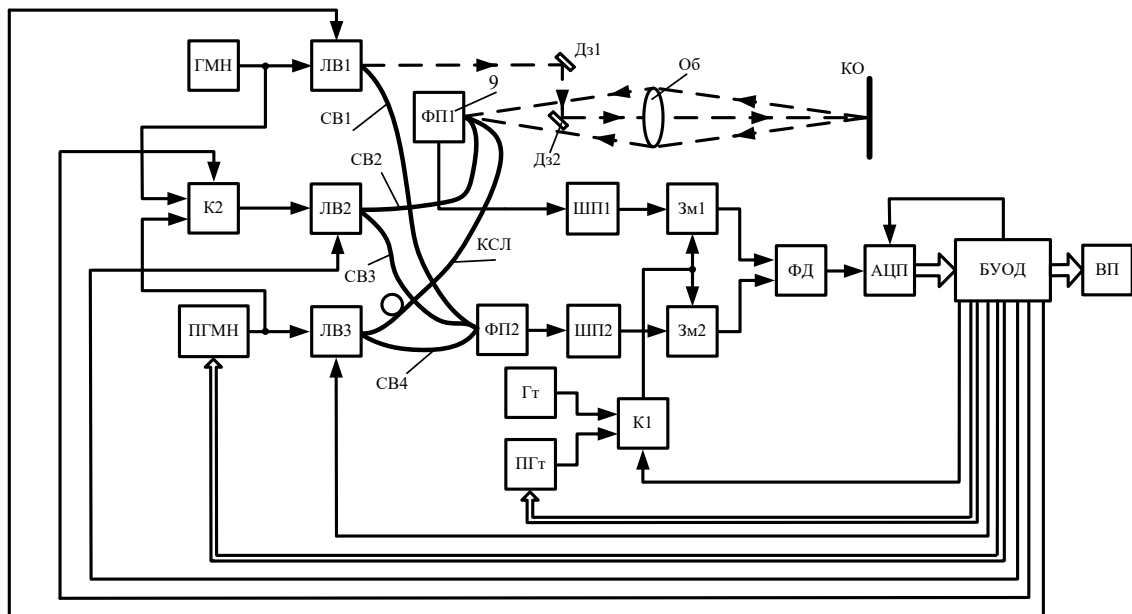


Рис. 2

Робота далекоміра здійснюється в декілька етапів.

Спочатку електричний сигнал модуляційної частоти  $f_{m1}$  надходить від генератора ГМН на вхід лазерного випромінювача ЛВ1. Модульований світловий потік від випромінювача ЛВ1 за допомогою дзеркал Дз1 і Дз2 через об'єктив Об у вигляді вузькоспрямованого світлового потоку направляєється на

контрольований об'єкт КО. Одночасно світловий потік від випромінювача ЛВ1 по світловоду СВ1 направляється на вхід фотоприймача ФП2 і використовується як опорний. Відбитий від КО світловий потік знову проходить через об'єктив Об, фокусується ним і потрапляє на вхід фотоприймача ФП1. Вимірювання різниці фаз випромінюваного і прийнятого світлових потоків, яка пропорційна відстані  $L_x$ , здійснюється на проміжній частоті, отриманій в результаті гетеродинування. З цією метою електричні сигнали з виходів фотоприймачів ФП1 і ФП2 після підсилення за допомогою підсилювачів ШП1 і ШП2 надходять на перші входи відповідно змішувачів Зм1 і Зм2. На другі входи цих змішувачів через комутатор К1 подається вихідний сигнал гетеродина Гт. Вихідні напруги змішувачів Зм1 і Зм2 надходять відповідно на першій і другий входи фазового детектора ФД. В останньому здійснюється перетворення значення виміряного фазового зсуву  $\varphi_{x1} = \varphi_x + \Delta\varphi_1$ , де  $\Delta\varphi_1$  – похибка через фазові спотворення в каналах далекоміра, в постійну напругу. Ця напруга за допомогою АЦП перетворюється в числовий код  $N_1 = k\varphi_{x1}$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності. Далі  $N_1$  переноситься в блок БУОД і запам'ятовується в оперативній пам'яті. Після цього відключається випромінювач ЛВ1 і включається випромінювач ЛВ2, на вхід якого через комутатор К2 надходить вихідна напруга генератора ГМН. Управління роботою випромінювачів ЛВ1 і ЛВ2 здійснюється шляхом включення або відключення їхньої напруги живлення, що подається командними сигналами, які надходять від блоку БУОД. В цьому випадку за частоти модуляції  $f_{m1}$  світлові потоки по світловодам СВ2 і СВ3 направляються на входи фотоприймачів відповідно ФП1 і ФП2. В такому режимі здійснюється вимірювання контрольної відстані  $L_k$ , що створюється за допомогою світловодів СВ2 і СВ3, через які випромінювання з ЛВ2 з різною часовою затримкою потрапляє на входи ФП1 і ФП2. Як світловоди доцільно в даному випадку задіяти оптоволоконні лінії. Часові затримки сигналу вибираються довжиною світловодів, при цьому довжина СВ2 вибирається більше ніж СВ3. Різниця довжин оптичних шляхів, які проходить світлове випромінювання через світловоди СВ2 і СВ3, буде відповідати контрольній відстані  $L_k$ . Значення  $L_k$  не повинно перевищувати чверті довжини хвилі модуляції. Далі за допомогою фазового детектору ФД у вигляді постійної напруги визначається фазовий зсув  $\varphi_{k1} = \varphi_{k1d} + \Delta\varphi_1$ , де  $\varphi_{k1d}$  – дійсне значення фазового зсуву. Напруга на виході ФД в АЦП перетворюється в числовий еквівалент у вигляді коду  $N_2 = k\varphi_{k1}$ . У блоці БУОД обчислюється і запам'ятовується різниця

$$\Delta N' = N_1 - N_2 = k(\varphi_x - \varphi_{k1d}). \quad (7)$$

На наступному етапі командами блоку БУОД відключається випромінювач ЛВ2 і включається випромінювач ЛВ3, на вхід якого надходить вихідна напруга генератора ПГМН, частота модуляції  $f_{m2}$  якого може перелаштовуватися. Світловий потік від випромінювача ЛВ3 по каліброваній світловолоконній лінії КСЛ направляється на вхід фотоприймача ФП1 вимірювального каналу далекоміра. Це ж саме випромінювання по світловоду СВ4 направляється на вхід фотоприймача ФП2 опорного каналу. Довжина  $L_0$  каліброваної світловолоконної лінії КСЛ вибирається кратною довжині хвилі модулюючої напруги лазерного випромінювання, що направляється на контрольований об'єкт КО. Далі, як це описано вище, визначається фазовий зсув між вихідними електричними сигналами фотоприймачів ФП1 і ФП2. У цьому випадку на другі входи змішувачів Зм1 і Зм2 через комутатор К1, переведений сигналом блоку БУОД в інше положення, подається напруга з виходу гетеродина ПГт, частота якого перелаштовується. Частоти генератора ПГМН і гетеродина ПГт змінюються синхронно таким чином, щоб проміжна частота була така ж сама, як і у разі вимірювання відстані до контрольованого об'єкта.

Спочатку частота генератора ПГМН встановлюється рівною  $f_{m2н} = f_{m2макс}/2$ , де  $f_{m2макс}$  – максимальне значення частоти перелаштування модулюючої напруги. Значення  $f_{m2макс}$  визначається фазовим зсувом, рівним  $2\pi$ , який встановлюється за допомогою застосованого фазообертача. Тоді, у відповідності до (4),  $f_{m2макс} = c/L_0$ , а  $f_{m2н} = c/2L_0$ . Перше вимірювання в цьому режимі роботи далекоміра здійснюється за допомогою ФД і АЦП шляхом перетворення фазового зсуву  $\varphi_{\varphi01} = \varphi_{\varphi0} + \Delta\varphi_2$ , де  $\Delta\varphi_2$  – похибка із-за фазових спотворень в каналах в цьому випадку, в числовий код  $N_3 = k\varphi_{\varphi01}$ . Далі  $N_3$  переноситься в блок БУОД і запам'ятовується в оперативній пам'яті.

Після цього відключається випромінювач ЛВ3 і включається випромінювач ЛВ2, на вхід якого через комутатор К2, який командою блока БУОД переводиться в інше положення, надходить вихідна напруга генератора ПГМН тієї ж частоти, що і під час визначення фазового зсуву, який вноситься каліброваною лінією КСЛ в останньому випадку. В цьому режимі здійснюється вимірювання контрольної відстані  $L_k$  і визначається фазовий зсув  $\varphi_{k2} = \varphi_{k2д} + \Delta\varphi_2$ , де  $\varphi_{k2д}$  – дійсне значення фазового зсуву. Останній за допомогою ФД і АЦП перетворюється в числовий еквівалент у вигляді коду  $N_4 = k\varphi_{k2}$ . У блоці БУОД обчислюється і запам'ятовується різниця

$$\Delta N'' = N_3 - N_4 = k(\varphi_{\text{ФО}} - \varphi_{k2д}). \quad (8)$$

Згідно принципу роботи запропонованого далекоміра потрібно забезпечити умову  $\Delta N' = \Delta N''$ . Для цього в блоці БУОД оцінюється різниця  $(\Delta N' - \Delta N'')$ , знак якої визначає напрямок зміни (зменшення або збільшення) частоти модуляції  $f_{m2}$ . Якщо умова  $\Delta N' = \Delta N''$  не виконується, то за сигналами блоку БУОД в режимах вимірювання фазових зсувів, які вносяться каліброваною лінією і контрольною відстанню, здійснюється перелаштування частоти генератора ПГМН і гетеродина ПГт до моменту, коли  $(\Delta N' - \Delta N'') = 0$ . При цьому фіксується поточне значення  $f_{m2}$ , а з урахуванням (7) і (8) маємо  $(\varphi_x - \varphi_{k1д}) = (\varphi_{\text{ФО}} - \varphi_{k2д})$ . Якщо, використовуючи (1) і (4), перевести фазові зсуви у відповідні відстані, будемо мати  $2L_x f_{m1} - L_k f_{m1} = L_0 f_{m2} - L_k f_{m2}$ . Звідси блоком БУОД обчислюється дійсне значення  $L_x$

$$L_x = (L_0 f_{m2} + L_k (f_{m1} - f_{m2})) / 2 f_{m1}, \quad (9)$$

яке в одиницях довжини висвічується на цифровому табло відлікового пристрою ВП. Значення  $L_0$ ,  $L_k$ ,  $f_{m1}$  і  $f_{m2}$  у формулі для обчислення  $L_x$  відомі з високою точністю [7].

Таким чином, згідно формули (9) у запропонованому далекомірі на результат вимірювання відстані на відміну від приладу, описаного в [7], не впливають фазові спотворення в передавально-приймальній системі та каналах далекоміру. Разом з тим на результат вимірювання відстані не впливає й похибка фазового детектору. Вказані обставини дають можливість забезпечити задану точність вимірювання відстані у всьому діапазоні вимірювальних відстаней, обумовленому довжиною хвилі основної модуляції.

**Висновки.** Проведена оцінка ефективності оптичної калібровки в високочастотних фазових далекомірах показала, що навіть у разі використання оптичної калібровки на точність вимірювання відстані впливає похибка фазового детектору, який входить до складу далекоміра. Авторами для мінімізації впливу цієї похибки запропоновано вдосконалений метод безпосереднього вимірювання фазового зсуву, під час реалізації якого визначення контрольної відстані та невідомої відстані проводяться шляхом вимірювання однакових фазових зсувів. Це дає можливість із застосуванням відповідного алгоритму обробки даних компенсувати вплив похибки фазового детектору на точність вимірювання невідомої відстані. Автори також запропонували вдосконалений варіант компенсаційного методу вимірювання фазового зсуву із зміною частоти модуляції. При його реалізації за рахунок використання додаткової оптичної калібровки забезпечується задана точність у всьому діапазоні вимірювальних відстаней, обумовленому довжиною хвилі модуляції.

*Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» (шифр «Параметр-Д»), державний реєстраційний номер теми 0122U000136, КПКВК 6541030.*

1. Михеєчев В.С. Геодезические светодальномеры. М.: Недра, 1979. 222 с.
2. Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогодезические и электрооптические измерения. М.: Недра, 1985. 303 с.
3. Скрипник Ю.А. Повышение точности измерительных устройств. Киев: Техніка, 1976. 264 с.
4. Fumio Ohtomo. Optical Range Finder. Patent of US No 4531833, 1985.
5. Renz K., Stierle J., Wolf P. Device and method for optical distance measurement. Patent of US No 7221435 B2, 2007.

6. AD9852 CMOS 300 MSPS Complete DDS. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9852.html> (дата доступу 15.05.2023)

7. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А. Применение компенсационного метода измерения фазового сдвига в лазерных дальномерах. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 75-80.

## EFFICIENCY OF OPTICAL CALIBRATION IN HIGH PRECISION LASER RANGEFINDERS

I.O. Brahynets, Yu.O. Masjurenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [masjuriv@ied.org.ua](mailto:masjuriv@ied.org.ua)

*The effectiveness of the use of optical calibration in high-precision phase laser rangefinders has been evaluated. In order to ensure the specified accuracy of distance determination in order to establish the optimal frequency of distance measurement modes and optical calibration, an appropriate formula is recommended for estimating the switching frequency of signals at the input of the range finder measuring channel. It has been established that even when using optical calibration, the accuracy of distance measurement is affected by the error of the phase detector, which is part of the rangefinder. To minimize the influence of this error, a new method for the direct measurement of the phase shift in a range finder is proposed, as well as the use of a compensation method for measuring the phase shift. The corresponding block diagrams of rangefinders are considered, in which the proposed methods for measuring phase slides are implemented, and analytical modeling of the processes that transform them is carried out. References 7, figures 2.*

**Keywords:** laser, phase rangefinder, optical calibration, phase detector, error minimization.

1. Mikheev V.S. Geodetic rangefinders. Moskva; Nedra, 1979. 222 p. (Rus)

2. Bolshakov V.D., Deimlikh F., Golubev A.N., Vasilev V.P. Radiogeodetic and electro-optical measurements. Moskva; Nedra, 1985. 303 p. (Rus)

3. Skripnik Yu.A. Increasing the accuracy of measuring devices. Kiev: Tekhnika, 1976. 264 p. (Rus)

4. Fumio Ohtomo. Optical Range Finder. Patent of US No 4531833, 1985.

5. Renz K., Stierle J., Wolf P. Device and method for optical distance measurement. Patent of US No 7221435 B2, 2007.

6. AD9852 CMOS 300 MSPS Complete DDS. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9852.html> (accessed at 15.05.2023).

7. Braginets I.O., Zaitsev E.O., Kononenko O.G., Masjurenko Yu.O. Applying of compensatory measuring method of phase shift for laser range finder. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 3. Pp. 75-80. (Rus)

Надійшла 25.05.2023

Остаточний варіант 15.06.2023