
OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

УДК 621.396:621.375

ПРЯМОВІДЛІКОВИЙ ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ДИСТАНЦІЙ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМ СЕНСОРОМ У ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України,
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

ПРЯМОВІДЛІКОВИЙ ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ДИСТАНЦІЙ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМ СЕНСОРОМ У ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко

Анотація. Розроблено алгоритм роботи і структурна схема високоточних вимірювань дистанцій оптико-електронним сенсором в ближній зоні. Сенсор побудовано на засаді прямокутного фазового методу оптичної локації. Використано відкриту оптичну пару – лазерний випромінювач і фотоприймач. Досягнута динамічна точність вимірювання поточної відстані у діапазоні вимірювань не гірше 3 мм.

Ключові слова: оптична локація, оптико-електронний сенсор, фазовий метод, дистанція

DIRECT MEASURING PHASE METHOD OF SMALL DISTANCES MEASURING BY OPTOELECTRONIC SENSORS IN DYNAMIC CONDITIONS

Ya. I. Lepikh, V. I. Santoniy, V. V. Janko, L. M. Budyanska, I. O. Ivanchenko

Abstract. The algorithm and the block diagram of the distances high-precision measurements by optoelectronic sensor in the near region have been developed. The sensor is constructed on the principle

© Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, 2015

of optical directmeasuring phase method of location. The open optoelectronic couple – emitter laser and photodetector has been used. The dynamic accuracy of the running distance measurement in the range of measurement is distance not worse than 3 mm has been obtained.

Keywords: optical location, opto-electronic sensor, phase method, distance

ПРЯМОУСЧЕТНЫЙ ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ДИСТАНЦИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ СЕНСОРОМ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Я. И. Лепих, В. И. Сантоний, В. В. Янко, Л. М. Будиянская, И. А. Иванченко

Аннотация. Разработан алгоритм работы и структурная схема высокоточных измерений дистанций оптико-электронным сенсором в ближней зоне. Сенсор построен на основе прямоусчетного фазового метода оптической локации. Использована открытая оптопара - лазерный излучатель и фотоприемник. Достигнутая динамическая точность измерения текущего расстояния в диапазоне измерений не хуже 3 мм.

Ключевые слова: оптическая локация, оптико-электронный сенсор, фазовый метод, дистанция

Вступ

Застосування оптичної локації для дистанційних вимірювань у ближній зоні стикається з труднощами, обумовленими специфічними особливостями їх роботи [1, 2]. До них, зокрема, належать дефіцит часу обробки інформації, широкий діапазон зміни параметрів робочих сигналів, функціонування в складних умовах експлуатації тощо. Це перешкоджає застосуванню відомих локаційних методів та робить актуальним створення нових, з урахуванням динаміки параметрів відбитого оптичного випромінювання. У випадку високоточних дистанційних вимірювань на коротких трасах перевага віддається оптико-локаційним системам з безперервним випромінюванням, в яких вимірювання часу проводиться непрямым методом, шляхом використання фазових співвідношень прямого та відбитого променів [3].

У ближній зоні, у межах відповідних ділянок використовуються проекційно-геометричні, інтерференційні та фазові методи вимірювань. Максимальною точністю володіють фазові методи, засновані на вимірюванні фазових співвідношень між випроміненим та відбитим оптичним сигналами, що забезпечують вимірювання дистанцій [4].

Розробка і дослідження методу і системи

Фазовий метод належить до числа локаційних та базується на непряму вимірюванні часу прольоту оптичним випромінюванням подвійної відстані до об'єкта. У методах цього класу вимірюється такий параметр сигналу як зсув фази. Основною формулою фазового методу вимірювання дистанції в оптичній локації є [5].

$$l = [\Delta\varphi / (2\pi)] \cdot [c / (2f)], \quad (1)$$

де l – вимірювана дистанція, $\Delta\varphi$ – зсув фази, c – швидкість світла у повітрі, f – частота сигналу.

Вимірювання параметрів швидкісних процесів з похибкою $\leq 0,5\%$ потребує високої точності при значному обмеженні часу вимірів, що виключає дискретизацію зонduючого світлового потоку. За таких умов перевага віддана використанню безперервного локаційного сигналу з гармонічною модуляцією, біжуча фаза φ якого є лінійною функцією часу t

$$\varphi = 2\pi f_m t + \varphi_0, \quad (2)$$

де f_m – частота модуляції сигналу; φ_0 – початкова фаза.

Для вимірювання малих дистанцій оптико-електронним сенсором (ОЕС) у динамічних умовах розроблено структурну схему прямовідлікового фазового методу вимірювання дальності на низькій проміжній частоті (рис. 1.).

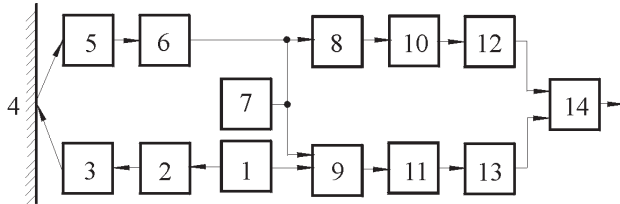


Рис. 1. Структурна схема прямовідлікового фазового методу вимірювання дальності.

Схема включає два канали – вимірювальний (блоки 2, 3, 5, 6, 8, 10, 12) і опорний (блоки 9, 11, 13), різниця фаз вихідних сигналів яких прямопропорційна величині вимірюваної дистанції. ВЧ-сигнал з опорного генератора 1 через підсилювач потужності 2 поступає на випромінювач 3. Модульований ВЧ-сигналом світловий потік випромінювача 3, відбившись від поверхні об'єкту 4, поступає на фотоприймач 5. Електричний сигнал фотовідповіді з виходу фотоприймача 5, посилений підсилювачем 6, поступає на вхід перемножувача 8. В той же час на вхід перемножувача 9 ВЧ-сигнал поступає безпосередньо з опорного генератора 1.

Таким чином, сигнал з опорного генератора 1 поступає на вхід перемножувача 8 через часову лінію затримки, утворену елементами відкритого оптичного каналу далекоміра, а на вхід перемножувача 9 – напряму.

Вимірювальний сигнал з виходу перемножувача 8 і опорний сигнал з виходу перемножувача 9, перемножені з сигналом гетеродина 7, поступають на входи фільтрів низької частоти 10 і 11 відповідно. З виходів фільтрів НЧ-складові опорного і вимірювального сигналів через підсилювачі-обмежувачі 12 і 13 поступають на вхід вимірника різниці фаз 14, де проводиться аналіз часових зсувів опорного і відбитого сигналів і обчислення поточної вимірюваної відстані. На виході вимірника різниці фаз 14 формується напруга, величина якої прямо пропорційна різниці фаз і, відповідно, вимірюваній дистанції.

Алгоритм функціонування схеми наступний.

У випромінювальному блоці за допомогою лазерного діода, відповідних генеруючих і підсилювальних елементів формується оптичний ВЧ-сигнал нормованої потужності. Підсилювальна частина випромінювального блоку містить високоомний буферний підсилювач на виході генератора 1 і підсилювач потужності 2 типу «перетворювач напруга-струм», безпосередньо навантажений на випромінювач 3. Підбором елементів схеми досягається максимальний рівень лінійності в роботі випромінювача, забезпечуючий мінімальні гармонійні спотворення модуляційного сигналу, що дозволяє істотно підвищити точність вимірювання дистанції.

Відбитий оптичний сигнал реєструється і перетворюється фотоприймачем 5, який навантажується на резонансний контур, налаштований на модуляційну частоту.

Опорний сигнал формується гетеродином 7 в перемножувачі 8. Гетеродинне перетворення частоти вимірювального і опорного сигналів здійснюється з використанням загального кварцового резонатора 7, що визначає частоту гетеродинного сигналу кожного каналу. Високий ступінь стабільності ВЧ-сигналів опорного генератора 1 і гетеродина 7 досягається за допомогою кварцових резонаторів, частоти яких відрізняються на необхідну величину проміжної частоти. Виділення проміжної низької частоти здійснюється в результаті ВЧ-фільтрації обох сигналів за допомогою фільтрів низької частоти 10 і 11.

Таким чином, створюються умови для вимірювання різниці фаз на низькій проміжній частоті, що забезпечують високу точність вимірювань. Модифікований метод локаційних вимірювань дозволяє покращити оперативну обробку сигналу у широкому динамічному діапазоні та розширити можливості відомих оптичних методів дальнометрії.

Особливості побудови та застосування лазерних локаційних систем значною мірою визначаються властивостями таких основних елементів, як лазерний випромінювач (ЛВ) і фотоприймач (ФП), що утворюють відкриту оптичну частину вимірювача.

У ОЕС малого радіуса дії визначальними факторами є мале енергоспоживання, маса та

габаритні розміри. Найбільш повно цим вимогам задовольняють такі випромінювачі, як напівпровідникові лазери, де активним елементом є кристал напівпровідника, та лазерні діоди. У ближній ІЧ-області ефективними ФП є фотодіоди, особливо кремнієві та германієві.

Підвищення точності вимірювань малих дистанцій пов'язано із зменшенням тривалості зондуєчих імпульсів та підвищенням потужності випромінювання. Досягнення даного рівня точності можливо у мегагерцовому частотному діапазоні, що формує високі вимоги до швидкодії елементів оптико-електронного блоку сенсора. Час переключення ЛВ та час розсмоктування основних носіїв ФП повинні бути не більше 10 нс. Використання *pin*-структур дозволило скоротити постійну часу фотодіодів до декількох наносекунд, що еквівалентно ширині смуги пропускання порядку гігагерц з одночасним зменшенням вихідної ємності.

Ступінь узгодження оптопар по спектру, який визначає збіг довжини хвилі випромінювання світлодіода та максимуму спектральної чутливості фотодіода, у добре узгоджених пар перевищує 0,9. Для спектральної області 0,9...1,0 мкм оптимальними за спектром та швидкістю або за одним з цих параметрів вважається оптопара світлодіод на основі GaAs та його сполук – Si-*pin*-фотодіод [3].

Вибір ФП при побудові ОЕС у першу чергу визначається його спектральною чутливістю та можливістю спільно з оптичною системою вирішувати задачі оптимальної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на фоні завад. З відомих методів реалізації оптимального фільтра перевага віддається двом: спектральний діапазон визначається областю спектральної чутливості фотоприймача та функції фільтра виконуються елементами ФП. Ці методи реалізуються у ФП, корпус якого виконаний із матеріалу з властивостями смугового спектрального фільтра для робочих довжин хвиль, що покращує співвідношення сигнал/шум у каналі фотоприйому та виключає необхідність спектральної фільтрації в оптичному блоці.

Потужність ЛВ регламентується необхідністю виключення впливу відбивальних властивостей поверхні об'єкта. Це передбачає ге-

нерацію рівня потужності, достатнього для реєстрації відбитого сигналу у каналі фотоприйому на протязі всього діапазону відстаней, тобто сигналу, що перевищує порогову чутливість ФП.

Синтез ЛВ проведено у напрямку досягнення високої міри лінійності (відсутності значних гармонічних спотворень) в формі модуляції оптичного променя. Підбором елементів схеми досягається максимальний розмах змінної складової струму через ЛВ при умові роботи на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики. ЛВ працює у лінійному режимі з постійним стабілізованим струмом та заданою амплітудою. У схему ЛВ включено каскад регулювання рівня сигналу для організації петлі автоматичного регулювання посилення, що охоплює весь високочастотний тракт ОЕС.

У структуру ФП включається резонансний підсилювач сигналів. Від міри стабільності його фазочастотної характеристики в умовах зміни температури, напруги живлення та напруги управління залежить точність вимірювання. ФП включений безпосередньо у вхідний контур підсилювача, що робить структуру нечутливою до низькочастотних і постійних перешкодових засвітлювань. Вхідний і вихідний контури підсилювача настроюються точно на частоту оптичного сигналу. При цьому досягається нульовий фазовий зсув сигналу.

Задача зведення потоку випромінювання у межах всієї апертури та поля зору вирішена сумісним оптико-геометричним розрахунком елементів оптичної системи, включаючи ЛВ та ФП. Узгодження за апертурним кутом забезпечує повне використання випроміненої енергії та чутливості приймача. Зниження ефективної фонові освітленості ФП досягається за рахунок зменшення його апертурного кута до величини апертури оптичної системи.

При узгодженні активних елементів з оптичною системою максимально використані можливості ФП. Зокрема, розміри фоточутливої площадки ФП мінімальні для покращення фокусування енергії випромінювання при заданому полі зору ОЕС, чим забезпечується більша роздільна здатність оптичної системи. Взаємозв'язок поля зору, роздільної здатності та фокусної відстані оптичної системи спрямований на забезпечення енергетичних спів-

відношень необхідного рівня згідно з призначенням та умовами дії пристрою.

Висновки

Проведений розрахунок для мінімальної вимірюваної дистанції 0,3 м ОЕС і при відповідній точності вимірювання показав, що час проходження відстані 3 мм з максимальною швидкістю 20 м/с складає 150 мкс, що визначає мінімальний час вимірювань в діапазоні вимірюваних малих дистанцій. Це означає, що за апаратний час вимірювання поточної дистанції величина взаємного переміщення ОЕС і об'єкта вимірювання не викличе зсуву фази зондуючого ВЧ-сигналу, що перевищує 1 % точності вимірювань. Звідси витікає, що абсолютна динамічна точність вимірювання поточної відстані у всьому діапазоні дистанцій буде не гіршою 3 мм.

Список використаної літератури

1. Gryazin G. N. Optiko-elektronnyye sistemy dlya obzora prostranstva. L. Mashinostroenie, 1988, 224 s.
2. Holst Ger. Electrooptical Imaging System Performance JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press. Bellingham, WA, 1995, 468 p.
3. Miroshnikov M. M. Teoreticheskie osnovy optiko-elektronnykh priborov: Uchbn. posobie. 3-e izd. SPb: Lan', 2010. 704 s.
4. Malashin M. S., Kashinskiy R. P., Borisov Yu.B. Osnovy proektirovaniya lazernykh lokatsionnykh sistem. M.: Vyssh. shk., 1983. 207 s.
5. Kostetskaya Ya. M. Sveto i radio-dal'nomery. - L'vov.: Vysch shkola 1986.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2015 р.

UDC 621.396 : 621.375

DIRECT MEASURING PHASE METHOD OF SMALL DISTANCES MEASUREMENT BY THE OPTOELECTRONIC SENSOR IN DYNAMIC CONDITIONS

Ya. I. Lepikh, V. I. Santoniy, V. V. Janko, L. M. Budiyanska, I. O. Ivanchenko

Interdepartmental scientific-educational physico-technical centre of MES and HAS of Ukraine, The Odessa I. I. Mechnikov National University
E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

Statement of a task

The work is devoted to development and researches of a method the small distances precision contactless measurement for creation of the optoelectronic sensor working in dynamic conditions.

Technique of researches

At realization of calculations the computer facilities and the software of a high level is used, physical and computer methods with a mathematical equipment are used.

For precision remote measurements on short routes the advantage is given to optical-location systems with continuous radiation in which time measurements carried out by an indirect method, by use of phase relationship of the direct and reflected beam.

For measurement of small distances in dynamic conditions the modified method of location measurements which allows to improve the operative signal processing in a wide dynamic range and to expand the opportunities of known optical methods of ranging is developed. The functioning algorithm

and the block diagram directmeasuring phase method of distance measurement is developed, conditions for phase difference measurement on low intermediate frequency which provide high accuracy of measurements are created.

Discussions of results

Increase of small distances measurements accuracy is connected to reduction of probing pulses duration and increase of radiation capacity. To achieve the given level of accuracy it is possible in megacycle frequency range which forms high requirements to quick-action of the sensor optoelectronic block elements. Use of *pin*-structures has allowed to reduce photo diodes time constant up to several nanoseconds, that is equivalent to passband width of the order of gigahertz with simultaneous reduction of initial capacity. The choice of a photodetector is determined by its spectral sensitivity and an opportunity simultaneously with the optical system to solve tasks of an optimum spectral filtration at signal extraction on a background of nuisance. Capacity of a laser radiator is regulated by necessity of influence of object surface reflecting properties elimination.

Conclusions

The carried out calculation for the minimal measured distance of 0,3 m and the appropriate measurement accuracy has shown, that absolute dynamic accuracy of measurement of in-line distance in all range of distances will be not worse than 3 mm.

Keywords: optical location, opto-electronic sensor, phase method, distance

УДК 621.396: 621.375

ПРЯМОВІДЛКОВИЙ ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ДИСТАНЦІЙ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМ СЕНСОРОМ У ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, В. В. Янко, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України,
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
E-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Постановка задачі

Робота присвячена розробці і дослідженням методу високоточного безконтактного вимірювання малих відстаней для створення оптико-електронного сенсора, що працює в динамічних умовах.

Методика досліджень

При проведенні розрахунків використана обчислювальна техніка та програмне забезпечення високого рівня, використані фізичні та комп'ютерні методи з математичним забезпеченням.

Для високоточних дистанційних вимірювань на коротких трасах перевага віддається оптико-локаційним системам з безперервним випромінюванням, в яких вимірювання часу проводиться непрямим методом, шляхом використання фазових співвідношень прямого та відбитого променя.

Для вимірювання малих дистанцій у динамічних умовах розроблено модифікований метод локаційних вимірювань, що дозволяє покращити оперативну обробку сигналу у широкому ди-

намічному діапазоні та розширити можливості відомих оптичних методів дальнометрії. Розроблено алгоритм функціонування та структурну схему прямокутного фазового методу вимірювання дальності, створено умови для вимірювання різниці фаз на низькій проміжній частоті, що забезпечують високу точність вимірювань.

Обговорення результатів

Підвищення точності вимірювань малих дистанцій пов'язано із зменшенням тривалості зондуючих імпульсів та підвищенням потужності випромінювання. Досягнення даного рівня точності можливо у мегагерцовому частотному діапазоні, що формує високі вимоги до швидкодії елементів оптико-електронного блоку сенсора. Використання *pin*-структур дозволило скоротити постійну часу фотодіодів до декількох наносекунд, що еквівалентно ширині смуги пропускання порядку гігагерц з одночасним зменшенням вихідної ємності. Вибір фотоприймача визначено його спектральною чутливістю та можливістю спільно з оптичною системою вирішувати задачі оптимальної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на фоні завад. Потужність лазерного випромінювача регламентується необхідністю виключення впливу відбивальних властивостей поверхні об'єкта.

Висновки

Проведений розрахунок для мінімальної вимірюваної дистанції 0,3 м і відповідній точності вимірювання показав, що абсолютна динамічна точність вимірювання поточної відстані у всьому діапазоні дистанцій буде не гіршою 3 мм.

Ключові слова: оптична локація, оптико-електронний сенсор, фазовий метод, дистанція