Ю. Ф. ВАКСМАН, В. І. САНТОНІЙ, Л. М. БУДІЯНСЬКА, І. О. ІВАНЧЕНКО

Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65026 Тел. 23-62-34; 714-44-94.

ВЛАСТИВОСТІ ВІДКРИТОЇ ІЧ-ОПТОПАРИ ЛАЗЕРНИЙ ДІОД—РІN—ФОТОДІОД У ФАЗОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ БЛИЖНЬОГО ДАЛЬНОМЕТРУВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Розглянута залежність технічних характеристик оптико-електронного далекоміра (ОЕД) від властивостей елементів оптопари — випромінювача та фотоприймача. З'ясовано взаємозв'язок між точністю вимірювання і нестабільністю частоти модуляції при застосуванні фазового методу дальнометрії. Проведено вибір елементів оптопари у відповідності з вимогами до ОЕД, заснований на узгодженні їх за основними характеристиками. Надані технічні параметри діючого макета ОЕД. Наведена градуювальна характеристика зразка пристрою з аналізом можливостей її лінеаризації. Описані оригінальні схемно-конструкторські засоби реалізації прямолічильного фазового метода вимірювання дистанції. Відзначено, що застосування цих засобів та якісне покращення оптико-електронної елементної бази дозволило підвищити точність дальнометрування у динамічних умовах функціонування ОЕД.

Особливості побудови та застосування лазерних локаційних систем у значній мірі визначаються властивостями таких основних елементів, як лазерний передавач і фотоприймач (ФП), що утворюють відкриту оптопару — складову частину вимірювача.

У оптико-електронних далекомірів (ОЕД) малого радіуса дії визначальними факторами є мале енергоспоживання, маса та габаритні розміри. Найбільш повно цим вимогам задовольняють такі випромінювачі (В), як напівпровідникові лазери, де активним елементом є кристал напівпровідника, та лазерні діоди. У ближній ІЧ-області ефективними ФП є фотодіоди, особливо кремнієві та германієві.

Застосування фазового методу у швидкісних далекомірних системах малих дистанцій сформувало проблему забезпечення високої точності при значному обмеженні часу вимірювань. Так, точність вимірювань ~1% для дистанцій менш 1 м відповідає декільком міліметрам. При швидкості руху вимірювача ~ 50 м/с такий відрізок долається за 20 мкс, що визначає час вимірювання дистанції з заданою похибкою. Підвищення рівня точності потребує високої швидкодії ОЕД поряд з забезпеченням потрібних енергетичних та оптичних рівнів.

Метою роботи є дослідження залежності технічних характеристик ОЕД малих дистанцій для динамічних систем від приймально-передавальних властивостей елементів оптопари.

При розробці ОЕД важливим є узгодження джерела і приймача випромінювання та їх оптичних систем за оптико-геометричними, спектрально-енергетичними та частотно-часовими характеристиками. Першочерговим етапом оптимізації швидкісних параметрів ОЕД є узгодження таких частотно-часових параметрів як частота модуляції, постійні часу елементів та всього пристрою, смуга пропускання частот.

Робота ОЕД заснована на фазовому методі вимірювання дистанції, який належить до числа

локаційних і базується на непрямому вимірюванні часу проходження оптичним випромінюванням подвійної відстані до об'єкта. Використовується безперервний локаційний сигнал з гармонічною модуляцією, оскільки біжуча фаза ф гармонічного коливання є лінійною функцією моменту часу t

$$\varphi = 2\pi f t + \varphi_0,$$

где ƒ — частота зондуючого сигналу, ϕ_0 — початкова фаза.

У даному методі проводиться вимірювання такого параметра сигналу як зсув фази. При цьому вимірювана дистанція S пов'язана зі зсувом фази $\Delta \phi$ основною формулою фазового методу вимірювання дистанції [1]

$$S = [\Delta \varphi / (2\pi)][c / (2f)], \qquad (1)$$

де *с* — швидкість світла у повітрі, *f* — частота зондуючого сигналу.

У фазових методах вимірювання малих дистанцій виходять із принципу забезпечення однозначності, відповідно котрого довжина півхвилі гармонічних коливань визначається максимальним значенням вимірюваної дистанції. За цієї умови фазовий цикл однозначного вимірювання $\phi_{\text{одн}}$ відповідає 2π , а значення частоти модуляції f_m зондуючого випромінювання визначається виразом

$$f_m = c / 2S. \tag{2}$$

При певній частоті модуляції аналітичний взаємозв'язок між точністю вимірювання дистанції ΔS і відносною нестабільністю частоти модуляції Δf_m має вигляд [2]

$$\Delta S / S = \Delta f_m / f_m. \tag{3}$$

Це означає, що мінімальна похибка оцінки дальності визначається помилкою вимірювання на самій високій частоті модуляції.

[©] Ю. Ф. Ваксман, В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, 2003

При переміщенні далекоміра вздовж вимірюваної дистанції зі швидкістю υ залежність точності вимірювань ΔS від її величини має вид

$$\Delta f_m = f_m(\upsilon \cdot t_b / S), \qquad (4)$$

де t_b — час проходження та вимірювання дистанції ΔS .

Рівняння (4) дозволяє визначати максимальну швидкість застосування далекоміра, а також вирішувати зворотну задачу — розрахунку частотних характеристик вимірювача, виходячи із заданого рівня точності вимірювань та швидкісного режиму. Звідси випливає, що чим вище швидкість руху вимірювача, тим нижче точність вимірювання дистанції ΔS , для підвищення котрої частоту модуляції f_m слід збільшувати. Крім того, з ростом частоти зменшується щільність у спектрі потужності шуму приймача. Таким чином, вимоги до точності далекоміра потребують модуляції випромінювання, що характеризується високою частотою, великою глибиною, стабільністю, малими втратами, і т. п.

Згідно з рівняннями (1)—(4) проведено ряд оцінок, що дозволяють одержувати точність вимірювань ОЕД порядку 1% при переміщенні зі швидкостями до 20 м/с у діапазоні дистанцій 0,3—10 м.

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

Ступінь узгодження оптопари 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 швидкодією або за одним з цих параметрів вважається оптопара світлодіод на основі GaAs та його сполук — Si-PIN-фотодіод [3].

Вибір ФП при побудові ОЕП у першу чергу визначається його спектральною чутливістю та можливістю спільно з оптичною системою вирішувати задачі оптимальної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на фоні перешкод. З відомих методів реалізації оптимального фільтра перевага віддається двом: спектральний діапазон визначається областю спектральної чутливості ФП, 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 фотоприймання та виключає необхідність спектральної фільтрації в оптичному блоці.

Енергетичні (амплитудні) співвідношення забезпечуються реалізацією в моделі основного закону оптичної дальнометрії — закону квадратів відстаней [3]

$$\Phi_{\rm dn} = \tau_c^{2l} \tau_0 \rho L D_{\rm Bn}^2 A_{\rm BX} A_2 \Omega / \pi l^2,$$

де l — вимірювана дистанція; τ_c — коефіцієнт ослаблення середи; τ_0 — коефіцієнт ослаблення оптичних систем В і ФП; ρ — коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта; L — яскравість В; $D_{\rm вл}$ діаметр оптичної системи В; $A_{\rm вх}$ — площа вхідної зіниці оптичної системи ФП; A_2 — видима із вхідної зіниці площа відбивальної поверхні об'єкта; Ω — тілесний кут випромінювання (за діаграмою спрямованості).

Потужність В регламентується необхідністю виключення впливу відбивальних властивостей поверхні об'єкта. Це передбачає генерацію рівня потужності, достатнього для реєстрації відбитого сигналу у каналі фотоприймання на протязі всього діапазону відстаней, тобто сигналу, що перевищує порогову чутливість ФП.

Синтез оптичного В 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 В при умові роботи на лінійній дільниці вольт-амперної характеристики.

Оптичний В працює у лінійному режимі з постійним стабілізованим струмом та заданою амплітудою. У схему В включено каскад регулювання рівня сигналу для організації петлі автоматичного регулювання посилення, що охоплює весь високочастотний тракт ОЕД.

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 модуляції оптичного сигналу. При цьому досягається нульовий фазовий зсув сигналу.

Задача зведення потоку випромінювання у межах всієї апертури та полю зору вирішена сумісним оптико-геометричним розрахунком елементів оптичної системи, включаючи В та ФП. Узгодження за апертурним кутом забезпечує повне використання випроміненої енергії та чутливості приймача. Зниження ефективної фонової 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 ОЕД, чим забезпечується більша роздільна здатність оптичної системи. Взаємозв'язок поля зору, роздільної здатності та фокусної відстані оптичної системи спрямовані на забезпечення енергетичних співвідношень необхідного рівня згідно з призначенням та умовами дії пристрою.

Для автоматизації процесів аналізу різних компонентів ОЕД розроблена модель оптичного каналу засобами пакету комп'ютерного моделювання радіоелектронних систем Design Lab 8.0 і ORCad 9. Це дозволило оцінити властивості середи і перешкодових впливів, оптико-електронних компонентів, оптичних вузлів, проводити дослідження різних варіантів принципових і структурних схем ОЕД, аналізувати його поведінку у динамічному режимі.

В основу моделі покладено використання електричної лінії затримки без втрат. Цим забезпечуються часові співвідношення, еквівалентні розповсюдженню оптичного випромінювання, характеристики якого ставляться у відповідність електричним сигналам у лінії затримки.

Проведена заміна абстрактного уявлення функціональних вузлів структурної схеми ОЕД практично реалізованими схемними вузлами з перевіркою кожної зміни за допомогою моделювання. Такий підхід надав можливість відстежувати джерела небажаних явищ в роботі пристрою.

Вибір джерела та приймача випромінювання виконаний з урахуванням узгодження їх за частотно-часовими, спектрально-енергетичними та оптико-геометричними характеристиками.

Вивчення сучасного ринку оптоелектроніки дозволило з оцінити прогнозні метрологічні характеристики вимірювача. Проаналізовано оптикоелектронні компоненти ведучих фірм-виробників. В якості В вибрано швидкісний GaAs-світлодіод SFH 495 Р фірми Siemens, а ФП — Si-фотодіод PİN-структури BPV-10F фірми Temic.

Характеристики обраних елементів, згруповані у відповідності з основними вимогами, наведені у табл. 1.

Дані табл. 1 дозволяють відзначити, що останне покоління GaAs-світлодіодів відрізняється від попередніх зразків більш високою квантовою ефективністю (Φ_e — 700 мВт). Також постійна часу PIN-Si-фотодіодів скорочена до декількох наносекунд, що еквівалентно ширині смуги пропускання порядку гігагерц.

На основі обраної оптопари створений діючий макет ОЕД з технічними характеристиками, наданими у табл. 2.

Визначення дистанції у розробленому ОЕД проводилося з використанням експериментально виміряної градуювальної характеристики ОЕД, що має вид функції $\Delta \phi = f(S)$ (рис.), тобто уявляє собою залежність вихідного інформаційного сигналу $\Delta \phi$ (фазового зсуву) від вхідного значення дистанції *S*.

Алгоритм вимірювання $\Delta \varphi$ включає вимірювання не тільки абсолютної величини часового інтервалу *t*, відповідного зсуву фази, але і тривалості вимірювального періоду *T*. Повний вимірювальний період включає як позитивний, так і негативний перепади синусоїдального сигналу в електронній схемі ОЕД. При цьому показником

	Тип та марка оптико-електронного елемента	
Характеристики	GaAs-світлодіод SFH 495 Р	Si-фотодіод PIN-структури BPV-10F
Спектрально- енергетичні	Максимум випромінювання λ_{max} — 940 нм; Спектральна смута частот $\Delta\lambda$ — 4 нм; Повний випромінюваний потік Φ_e — 700 мВт	Максимум чутливості $\lambda_{max} - 950$ нм; Струмова чутливість $S_A - 60$ мкА; (щільність потоку 1 мВт/см ²)
Оптико- геометричні	Ширина діаграми спрямованості ф — ± 30	Кут поля чутливості $\varphi - \pm 17,5^{\circ};$ Плоша фоточутливої поверхні $S_{\varphi\Pi} - 0,78 \text{ мм}^2$
Частотно-часові	Час перемикання $t_f - 7$ нс	Швидкодія t _f — 2,5 нс

Таблиця 2

Частота модуляції (основна)	7,5 мГц
Довжина вимірюваних відстаней: мінімальна максимальна	0,3 м 10,0 м
Відносна точність вимірювань	± 1,0%
Максимальна швидкість застосування	20 м/с
Час вимірювань за один прийом	0,15 мс
Маса	230 г
Габарити	$\emptyset = 60$ мм, h = 100 мм
Споживана потужність	1,5 Вт
Діапазон робочих температур	- 20 + 85°

відстані є не абсолютна величина *t*, а її відношення до довжини вимірювального періоду *T*. Це дозволило підвищити припустиму нестабільність частоти кварцових генераторів до рівня 10⁻⁹, що виключило необхідність їх термостатування.

Аналіз градуювальної характеристики виявив, що відхилення від лінійності у бік менших значень з'являються поблизу меж діапазону вимірюваних дальностей. Точність вимірювань або дисперсія, обмежена шумами та перешкодами, погіршується на дільницях нелінійності 0,3—0,5 м і більш 9,5 м, але не перевищує 1%.



Причинами виникнення нелінійних дільниць на градуювальній характеристиці є як зовнішні умови у виді змінного коефіцієнта відбиття поверхні об'єкта, так і внутрішні наводки від випромінювального блоку. Зменшення значення дисперсії досягалося збільшенням потужності локаційного оптичного сигналу та удосконаленням екранування підсилювача потужності у блоці В.

Таким чином, підтверджена принципова можливість підвищення точності вимірювань у швидкісних далекомірних системах малих дистанцій з застосуванням прямолічильного фазового методу. Практична реалізація таких вимірників досягається шляхом поліпшення якісних характеристик активних оптико-електронних елементів внаслідок використання новітньої елементної бази та оригінальних схемно-конструкторських засобів.

Литература

1. Костецкая Я. М. Свето- и радиодальномеры, Вища школа. Изд-во при Львовском государственном университете. — Львов, 1986. 2. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптико-

2. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптикоэлектронные системы ближней дальнометрии. — М.: Радио и связь, 1991.

3. Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Фазовый оптико-электронный дальномер малых дистанций. Сб. научных трудов по материалам 5-го Междунар. Молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». — Ч. 2. — Харьков, 2001. — С. 304—305.

