

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ДАЛЕКОМІР

Білинський Й.Й., Юкиш С.В., Юкиш М.Й.

Вінницький національний технічний університет

E-mail: yukish@svitonline.com

**Abstract**

*Bilynskyi Y.Y., Yukysh S.V., Yukysh M.Y. Optic-electronic distance meter. The structure of a new optic-electronic distance meter for short distance measurements is considered in the article. A conversion function of the distance into the displacement of the light spot on the photodetector of the distance meter is derived. The theoretical static metrological characteristics of the distance meter are developed. The advantages and disadvantages of the distance meter are analyzed.*

**Актуальність.** Для успішного рішення вимірювальних задач необхідно мати точну кількісну інформацію про геометричні розміри, форму і просторове розміщення різних об'єктів. Найчастіше ця проблема постає у робототехніці, геодезії, будівництві, транспорті, машинобудівництві, військовій справі та інших сферах [1].

Системи ближньої далекометрії дозволяють вирішувати багато задач дистанційного контролю просторової форми об'єктів, які пов'язані з вимірюванням відстані.

Остання технологія в галузі вимірювання відстані – це безвідбивні далекоміри [1, 2], які дозволяють точно виміряти віддалений об'єкт без необхідності встановлення призми безпосередньо у точку вимірювання, що відкриває нові можливості для вимірювань, значно збільшує продуктивність і якість робіт.

**Аналіз відомих рішень.** На сьогоднішній день існують два типи далекомірів: імпульсні – засновані на принципі безпосереднього вимірювання часу проходження сигналу до об'єкту й назад, і фазові, що працюють за методом визначення зсуву фаз [1, 2]. Недоліком далекомірів першого типу є необхідність точного вимірювання часу проходження імпульсу до об'єкта і назад, що вимагає точного визначення фронту імпульсів і вносить суттєву похибку в результат вимірювання, а фазових – висока чутливість до зовнішніх факторів, які спричиняють помітний вплив на результат вимірювань і вносять похибку.

**Мета роботи.** Розробка нового оптико-електронного пристрою для вимірювання невеликих відстаней до об'єктів з покращеними метрологічними характеристиками.

**Викладення основного матеріалу.** В основу приладу покладена ідея вимірювання відстані до об'єкта шляхом визначення зміщення відносно головної оптичної осі зображення лазерної плями, відбитої від об'єкта без попереднього фокусування.

Для виведення рівняння перетворення розглянемо хід променів в оптичній системі (рис. 1). Нехай об'єкт, відстань до якого необхідно виміряти, розташований на відстані  $d$  від оптичної системи з фокусною віддалю  $F$ , відстань від фотоприймального пристрою до оптичної системи становить  $z$ , а відстань від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється –  $b$ . Тоді відстань від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою буде  $l$ , а від сфокусованого зображення до оптичної системи –  $f$ .

З подібності трикутників  $ABC$  і  $A''BC'$  можна записати:

$$\frac{AC}{A''C'} = \frac{CB}{BC'} \text{ або } \frac{d}{z} = \frac{b}{k}, \quad (1)$$

де  $k$  – відстань від оптичної осі до енергетичного центра світлової плями на фотоприймальному пристрої.

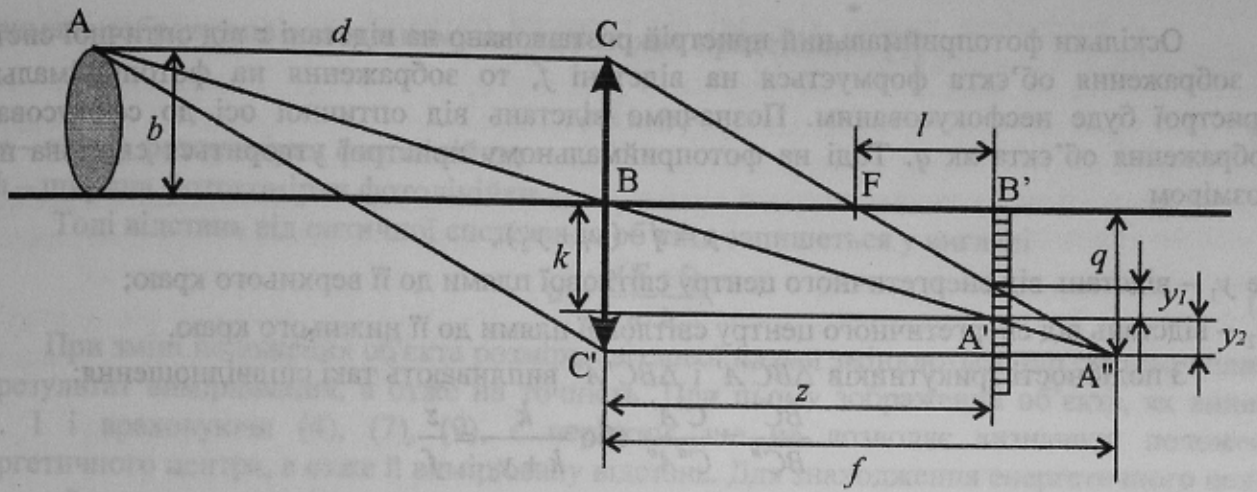


Рисунок 1. – Хід променів в оптичній системі

З подібності трикутників  $ABC$  і  $A''BC'$  можна записати:

$$\frac{AC}{A''C'} = \frac{CB}{BC'} \text{ або } \frac{d}{z} = \frac{b}{k}, \quad (2)$$

де  $k$  – відстань від оптичної осі до енергетичного центра світлової плями на фотоприймальному пристрої.

Тоді відстань від оптичної осі до енергетичного центра світлової плями на фотоприймальному пристрої зв'язана з відстанню від об'єкта до оптичної системи співвідношенням

$$k = \frac{b \cdot z}{d} = \frac{b(F+l)}{d}, \quad (3)$$

де  $z = F+l$ .

Вираз (3) є функцією перетворення відстані до об'єкта у зміщення світлової плями на фотоприймальному пристрої. На рис. 2 наведено теоретичну статичну характеристику зміщення світлової плями від відстані до об'єкта, побудовану для трьох значень фокусної віддалі  $F_1 = 30$  мм,  $F_2 = 50$  мм,  $F_3 = 100$  мм.

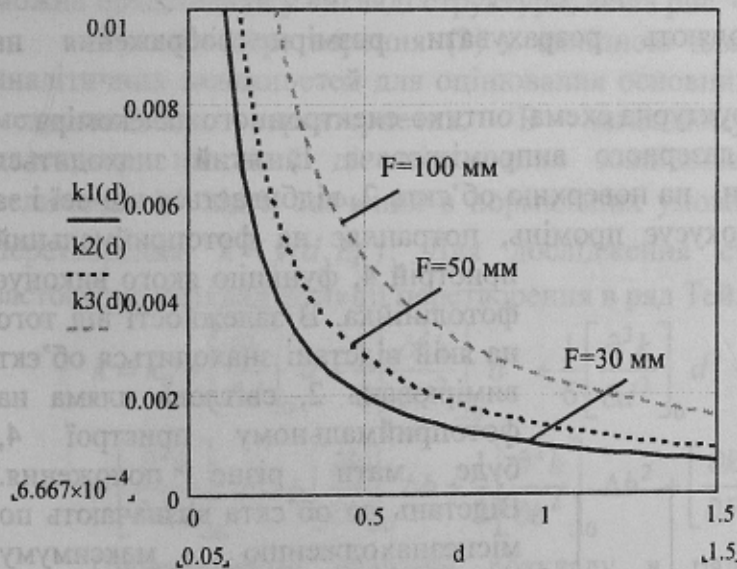


Рисунок 2. – Теоретична статична характеристика зміщення світлової плями від відстані до об'єкта  $k = f(d, F)$

фотоприймальному пристрою  $l$  та відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється  $b$  дозволяє досягнути необхідної точності та чутливості.

Збільшення фокусної віддалі оптичної системи і відстані від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою веде до збільшення зони нечутливості і звуження діапазону вимірювань.

Теоретична статична характеристика є нелінійною, що і визначає область застосування даного вимірювального пристрою. Обмеження верхньої межі вимірювань до 1 м дозволяє працювати на більш лінійній ділянці статичної характеристики.

Підбір оптимального співвідношення значень фокусної віддалі  $F$ , відстані від точки  $F$  до

Оскільки фотоприймальний пристрій розташований на відстані  $z$  від оптичної системи, а зображення об'єкта формується на відстані  $f$ , то зображення на фотоприймальному пристрої буде несфокусованим. Позначимо відстань від оптичної осі до сфокусованого зображення об'єкта як  $q$ . Тоді на фотоприймальному пристрої утвориться світлова пляма розміром

$$y = q - (y_1 + y_2), \tag{4}$$

де  $y_1$  – відстань від енергетичного центру світлової плями до її верхнього краю;

$y_2$  – відстань від енергетичного центру світлової плями до її нижнього краю.

З подібності трикутників  $\Delta BC'A'$  і  $\Delta BC''A''$  випливають такі співвідношення:

$$\frac{BC'}{BC''} = \frac{C'A'}{C''A''} \text{ або } \frac{k}{k + y_2} = \frac{z}{f}. \tag{5}$$

Відстань від енергетичного центра світлової плями до її нижньої границі можна записати як

$$y_2 = \frac{k \cdot f - z \cdot k}{z}. \tag{6}$$

Використавши формулу тонкої лінзи підставимо  $f$  в (5) і отримаємо

$$y_2 = k \cdot \left( \frac{d - F}{z \cdot (d \cdot F)} - 1 \right). \tag{7}$$

Для знаходження відстані від енергетичного центру світлової плями до її верхньої границі розглянемо подібні трикутники  $\Delta CBF$  і  $\Delta A'B'F$ , для яких можна записати такі співвідношення:

$$\frac{BC}{B'A'} = \frac{BF}{B'F} \text{ або } \frac{b}{k - y_1} = \frac{F}{l}. \tag{8}$$

Тоді відстань від енергетичного центра світлової плями до її верхньої границі можна записати як

$$y_1 = k - \frac{b \cdot l}{F}. \tag{9}$$

Вирази (4), (7) і (9) дозволяють розрахувати розміри зображення на фотоприймальному пристрої.

На рис. 3. наведена узагальнена структурна схема оптико-електронного далекоміра.

Промінь світла потрапляє від лазерного випромінювача 1, який знаходиться паралельно головній оптичній осі системи, на поверхню об'єкта 2, відбивається від неї і за допомогою оптичної системи 3, яка фокусує промінь, потрапляє на фотоприймальний пристрій 4, функцію якого виконує фотолінійка. В залежності від того на якій відстані знаходиться об'єкт вимірювань 2, світлова пляма на фотоприймальному пристрої 4, буде мати різне положення. Відстань до об'єкта визначають по місцезнаходженню максимуму світлової плями за допомогою обчислювального пристрою 5 [3].

Вихід оптичної системи зв'язаний з входом фотолінійки, на яку випромінювання поступає після проходження оптичної системи.

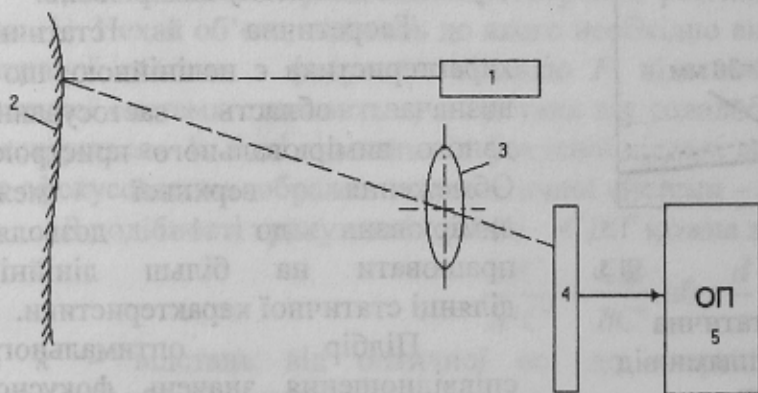


Рисунок 3. – Структурна схема оптико-електронного далекоміра

Отримане зображення в загальному вигляді можна представити [4]

$$k = n \cdot h, \tag{10}$$

де  $n$  – номер фотокомірки фотолінійки;  
 $h$  – ширина фотокомірки фотолінійки.

Тоді відстань від оптичної системи до об'єкта запишеться у вигляді

$$d = \frac{b(F+l)}{n \cdot h}. \tag{11}$$

При зміні положення об'єкта розміри світлової плями змінюються, що суттєво впливає на результат вимірювання, а отже на точність. При цьому зображення об'єкта, як видно з рис. 1 і враховуючи (4), (7), (9), є нерізким, що не дозволяє визначити положення енергетичного центра, а отже й вимірювану відстань. Для знаходження енергетичного центра світлової плями, положення якої може слугувати точкою відліку для знаходження відстані, пропонується використовувати методику згідно ГОСТ 26086-84.

Вимірювання енергетичного центра світлової плями полягає у визначенні діаметра кола, в якому міститься задана доля енергії лазерного випромінювання. Центр цього кола повинен відповідати точці перетину пучка лазерного випромінювання, який співпадає з енергетичним центром відносного розподілення густини енергії. Згідно даної методики похибка вимірювань складає половину відстані між фотокомірками. Оптико-електронний далекомір з фокусною віддалю  $F = 30$  мм, відстанню від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою  $l = 20$  мм та базовою відстанню  $b = 20$  мм, побудований на фотолінійці з розміром фотокомірки 8 мкм, дозволяє отримати чутливість вимірювання відстані порядку 0,6 мм в діапазоні 0,1 – 1,5 м.

В робочих умовах оптико-електронний далекомір здійснює функціональне перетворення відстані до об'єкта  $d$  у зміщення світлової плями  $k$  на фотоприймальному пристрої. Крім інформативного параметру на такий засіб вимірювання діють впливні величини  $f = (b, F, l)$ , які мають зв'язок з вихідною величиною і спричиняють виникнення похибки. В цьому випадку вимірювальний перетворювач (ВП) можна представити у вигляді структури, як на рис. 4.

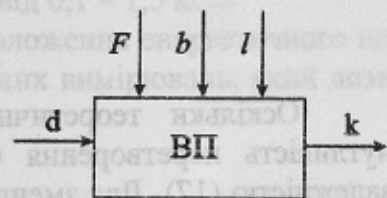


Рисунок 4. – Узагальнена структурна схема ВП

Функція перетворення (3) є вихідною для отримання аналітичних залежностей для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик. В загальному випадку далекомір, на який діє відхилення зовнішньої впливної величини  $\Delta f$  від її значення в нормальних умовах  $f_0$ , описується аналітичною функцією перетворення  $k = y(d, \Delta f)$ . Для дослідження статичних метрологічних характеристик застосуємо розклад функції перетворення в ряд Тейлора [5]

$$k = k_0 + \left[ \frac{\partial k}{\partial d} \right]_0 d + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d^2} \right]_0 d^2 + \frac{1}{6} \left[ \frac{\partial^3 k}{\partial d^3} \right]_0 d^3 + \dots + \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial b} \right]_0 d \Delta b + \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial F} \right]_0 d \Delta F + \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial l} \right]_0 d \Delta l + \left[ \frac{\partial k}{\partial b} \right]_0 \Delta b + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial b^2} \right]_0 \Delta b^2 + \left[ \frac{\partial k}{\partial F} \right]_0 \Delta F + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial F^2} \right]_0 \Delta F^2 + \dots \tag{12}$$

Проаналізуємо складові розкладу в ряд Тейлора (12). Оскільки на процес перетворення впливає не одна зовнішня величина, а декілька, то доданки виразу (12) матимуть такий вигляд:

– коефіцієнт впливу фокусної віддалі на вихідний параметр

$$\beta'_{0F} = \left[ \frac{\partial k}{\partial F} \right]_0 = \frac{b}{d}; \tag{13}$$

– коефіцієнт впливу відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється, на вихідний параметр

$$\beta'_{ob} = \left[ \frac{\partial k}{\partial b} \right]_0 = \frac{F+l}{d}; \quad (14)$$

– коефіцієнт впливу відстані від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою на вихідний параметр

$$\beta'_{ol} = \left[ \frac{\partial k}{\partial l} \right]_0 = \frac{b}{d}; \quad (15)$$

– чутливість і зміна чутливості по діапазону вимірювання

$$S_0 = \left[ \frac{\partial k}{\partial d} \right]_0 = -\frac{b(F+l)}{d^2}; \quad (16)$$

$$S'_0 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d^2} \right]_0 = \frac{b(F+l)}{d^3}, \quad S''_0 = \frac{1}{6} \left[ \frac{\partial^3 k}{\partial d^3} \right]_0 = -\frac{b(F+l)}{d^4}; \quad (17)$$

– коефіцієнт впливу фокусної віддалі на номінальну чутливість

$$\alpha_{0F} = \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial F} \right]_0 = -\frac{b}{d^2}; \quad (18)$$

– коефіцієнт впливу відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється, на номінальну чутливість

$$\alpha_{0b} = \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial b} \right]_0 = -\frac{F+l}{d^2}; \quad (19)$$

– коефіцієнт впливу відстані від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою на номінальну чутливість

$$\alpha_{0l} = \left[ \frac{\partial^2 k}{\partial d \partial l} \right]_0 = -\frac{b}{d^2}; \quad (20)$$

Оскільки теоретична статична характеристика далекоміра є нелінійною, то і чутливість перетворення є нерівномірною і змінюється по діапазону вимірювання за залежністю (17). Для зменшення нелінійності функції перетворення доцільно застосовувати представлений вимірювальний перетворювач для вимірювання невеликих відстаней (до 1 м).

На рис. 5 і 6 представлені тривимірні залежності зміщення світлової плями зображення об'єкта на фотоприймальному пристрої від неінформативних параметрів.

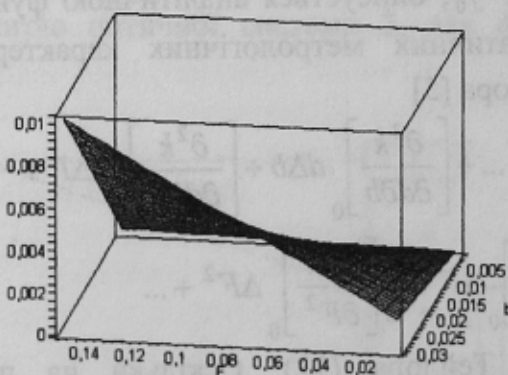


Рисунок 5. – Залежність зміщення світлової плями зображення об'єкта від фокусної віддалі  $F$  і відстані від головної оптичної осі до об'єкта  $b$

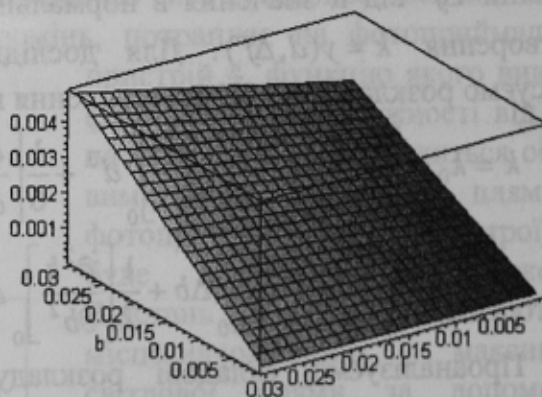


Рисунок 6. – Залежність зміщення світлової плями зображення об'єкта від відстані  $l$  і відстані від головної оптичної осі до об'єкта  $b$

На рис. 5 представлено залежність зміщення світлової плями зображення об'єкта на фотоприймальному пристрої від відстані між фокусною віддаллю і фотоприймальним пристроєм  $l$  і відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється,  $b$ .

На рис. 6 представлено залежність зміщення світлової плями зображення об'єкта на фотоприймальному пристрої від фокусної віддалі  $F$  і відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється,  $b$ .

Як видно з рис. 5 і 6 на нелінійність функції перетворення значно більше впливає відстань від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється,  $b$ , ніж фокусна віддаль  $F$  і відстань від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою  $l$ .

### Висновки

1. В даній роботі запропоновано оптико-електронний далекомір, який дозволяє вимірювати відстань до об'єктів шляхом визначення зміщення відносно головної оптичної осі зображення лазерної плями відбитої від об'єкта в результаті проходження її через оптичну систему. До переваг такого вимірювального перетворювача можна віднести простоту конструкції, а саме відсутність механічних частин, що дозволяє уникнути похибок рухомих механізмів, а також малу інерційність.

2. Досліджено вплив неінформативних параметрів на вимірювальне перетворення відстані до об'єкта у зміщення світлової плями на фотоприймальному пристрої. Встановлено, що зі збільшенням фокусної віддалі оптичної системи і відстані від фокусної віддалі до фотоприймального пристрою зужується діапазон вимірювання відстані та збільшується зона нечутливості. Зменшення відстані від головної оптичної осі до точки на об'єкті, що реєструється збільшує нелінійність статичної характеристики. В результаті математичного моделювання було встановлено, що запропонований оптико-електронний далекомір, побудований на основі фотолінійки з розміром фотокомірнки 8 мкм, дозволяє вимірювати відстань до об'єкта з точністю 0,6 мм в діапазоні від 0,1 – 1,5 м.

3. Для подальшого підвищення точності визначення положення енергетичного центру світлової плями пропонується використати метод субпіксельних вимірювань, який дозволяє підвищити точність вимірювань відстані на порядок.

### Література

1. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение. – М.: ДОСААФ, 1988. – 190 с.
2. Ермаков Б.А., Возницкий М. В. Получение и обработка информации в импульсных лазерных дальномерах// Оптический журнал № 10, 1993.
3. Пат. № 50240А Україна, МКІ G01C3/06, Лазерний пристрій для вимірювання відстані / Гречановський В.О., Білинська М.Й., Білинський В.Й. – № 2001128241, Заявлено 03.12.2001; Опубл. 15.10.2002, бюл. №10 – 3 с.
4. Источники и приемники излучения / Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А.Л. – С-Пб.: Политехника, 1991. – 240 с.
5. Воловик Г.С. Основы теории инвариантных измерений. – Севастополь: "Севпол", 1995. – 160 с.