

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-2>

УДК 528.51

Каріна ЛАЗАРЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-1174-8191>

e-mail: [karinalisnak97@gmail.com](mailto:karinalisnak97@gmail.com)

Ігор ЧИЖ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-9565-1951>

e-mail: [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com)

## ПРИНЦИПИ ДІЇ ТАСУЧАСНІ ЗАСОБИ ОПТИЧНОЇ ДАЛЕКОМЕТРІЇ

*В роботі наведені результати огляду і порівняльного аналізу принципів дії та технічних засобів реалізації класичних і сучасних оптичних далекомірів. Головна увага приділена параметрам далекомірів: діапазону вимірювань та точності вимірювань дальності. Запропоновано принцип дії автоматизованого далекоміру нитяного типу зі змінним в широких межах паралактичним кутом з метою суттєвого розширення діапазону вимірювань.*

*Ключові слова: активні далекоміри, пасивні далекоміри, принципи оптичної далекометрії, діапазон і точність вимірювань дальності*

Karyna LAZARENKO, Igor CHYZH

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## PRINCIPLES OF OPERATION AND MODERN MEANS OF OPTICAL RANGEFINDER

*The work presents the results of a review and comparative analysis of the principles of operation and technical means of implementing classical and modern optical rangefinders. The main attention is paid to the parameters of rangefinders: the range of measurements and the accuracy of distance measurements. The principle of operation of an automated thread-type rangefinder with a widely variable parallax angle is proposed in order to significantly expand the range of measurements. Presents the classification of currently known optical rangefinders. Active or passive mode of action, methods of using the geometric parameters of the measuring triangle, and methods of using the laws of geometric optics that determine the mutual location of the planes of objects and their images relative to the cardinal points of the optical system were chosen as signs for classification. The principle of operation of interferometric rangefinders, pulse and phase laser, monocular and binocular visual and photoelectric stereoscopic rangefinders, focusing rangefinders using Newton's formula from the theory of an ideal optical system, visual thread rangefinders with a fixed and variable parallax angle is considered. The proposed modernization of the thread rangefinder, which consists in significantly expanding the range of measurements of distances to the object due to the use of a zoom-zoom and shifting the performance of the operator to an automated system for measuring the distance to the object. To create a zoom-zoom, a four-lens zoom-afocal system is proposed as an addition to a fixed lens. The formulas for calculating the parameters of the zoom-zoom based on the conditions for ensuring the desired range of change of its focal length are given.*

*Key words: active rangefinders, passive rangefinders, principles of optical ranging, range and accuracy of range measurements*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Оптична далекометрія має давню історію, проте інтерес до її розвитку, пошуку нових принципів дії та вдосконаленню не послаблюється до цього часу. Зараз існує велика кількість популярних серед користувачів моделей лазерних далекомірів імпульсного, особливо фазового принципу дії. Фазові лазерні далекоміри стали навіть побутовими приладами. Доступ до їх отримання на відкритому ринку мають громадяни, у яких є легальна зброя. Проте, не зважаючи на їх переваги, що полягають в достатній точності і зручності використання, вони все ж мають суттєвий недолік. Робота лазерного далекоміра демаскує присутність оператора [1]. Якщо це неважливо в звичайних мирних обставинах, то використання військами таких приладів під час бойових дій, особливо на передовій, можуть мати для них дуже негативні наслідки [2]. Тому знову актуальною постає задача створення далекомірів, що не потребують опромінення ворога. Це тип так званих пасивних далекомірів. Така потреба повертає розробників до традиційних принципів і методів пасивної далекометрії типу стереоскопічних або нитяних, але з використанням сучасних досягнень фотоніки, мікроелектроніки та мікропроцесорної техніки, що дозволяє максимально розвантажити оператора від вимірювальних процедур, особливо на стадії вимірювальних дій за участю його зорового апарату. Вказана тенденція на основі результатів детального огляду досягнень в цій галузі мотивувала авторів до розробки сучасного автоматизованого далекоміра пасивного типу.

### Огляд відомих принципів дії оптичних далекомірів

Відомі на цей час принципи дії оптичної далекомірів засновані на використанні законів хвильової та геометричної оптики. На рис. 1 показана класифікація далекомірів, в яких інформацію про відстань до об'єкту надає або час розповсюдження світла від далекоміра до об'єкту та в зворотному напрямку, або кількість довжин хвиль, які вкладаються у вимірювану відстань, або геометричні співвідношення в паралактичному трикутнику, вершина якого знаходиться на об'єкті, або закони теорії ідеальної оптичної системи – формули Ньютона, Гаусата інше

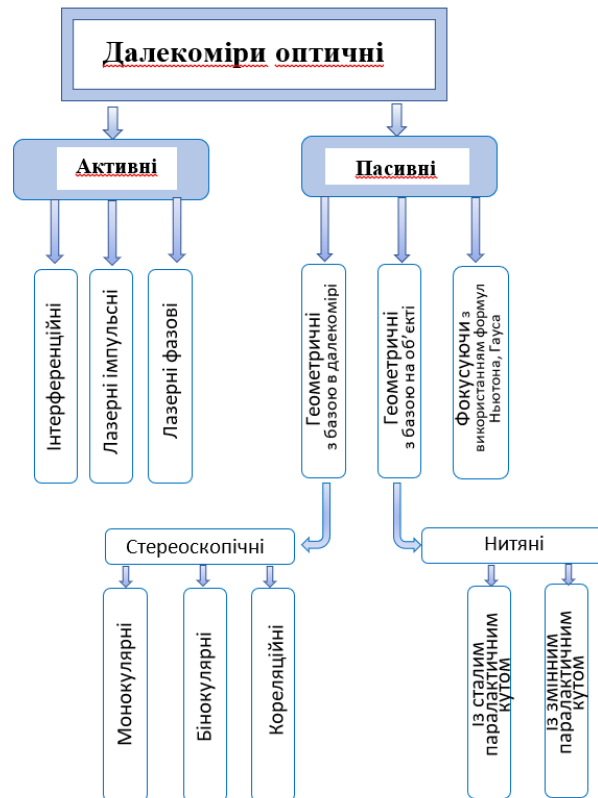


Рис.1. Класифікаційна схема оптичних далекомірів

Всі відомі оптичні далекоміри розділяються на дві групи – пасивні та активні. Активні далекоміри спрямовують власне світло на об'єкт і вимірюють параметри світлового відлуння від них. Їм потрібно в своїй структурі мати джерело когерентного чи некогерентного випромінювача світла з спектральним складом – монохроматичне або поліхроматичне. Для роботи пасивних далекомірів власне джерело не потрібне. В них використовується випромінювання, яке надходить від самого об'єкта і забезпечує формування оптичною системою далекоміра зображень цього об'єкта. Геометричні параметри одного чи декількох зображень об'єкта дозволяють визначати відстань до нього.

#### Активні далекоміри

**Інтерференційні далекоміри.** Найбільш точними вимірювачами лінійних дистанцій є інтерференційні далекоміри, які дозволяють вимірювати дистанції з похибками на рівні часток довжини електромагнітної хвилі оптичного діапазону. Це долі мікрометрів. Типовим представником такого далекоміру є інтерферометр Майкельсона, [3], рис.2.

Площина R і дзеркало 3 знаходяться на однаковій оптичній відстані від точки, де оптична вісь на світлоділдінику розділяється на два взаємно перпендикулярні напрямки. На світлоділдінику хвильовий фронт розділяється на два когерентні фронти, один з яких прямує на дзеркало 3, а другий – на рухоме дзеркало 4, яке переміщується або разом з об'єктом, або до об'єкту, до якого вимірюється дистанція S. Відбиті на обох дзеркалах світлові хвилі за допомогою світлоділдіника 2 складаються і спрямовуються на фотоприймач 5. Оскільки вказані хвилі – когерентні, то вони утворюють інтерференцію.

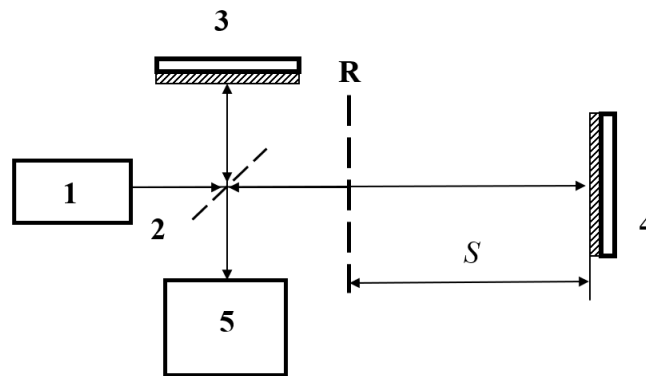


Рис.2. Схема інтерферометра Майкельсона : 1 – джерело монохроматичного колімованого с плоским хвильовим фронтом лазерного випромінювання; 2 – світлоділник; 3 – плоске нерухоме дзеркало; 4 – плоске рухоме дзеркало; R – референтна площина; 5 – фотоприймач з щілинною апертурою.

Якщо площина дзеркала 3 має невелику неперпендикулярність до оптичної осі, то в площині апертури фотоприймача виникає інтерференційна картина паралельних світлих і темних смуг. При переміщенні дзеркала 4 вздовж оптичної осі в площині апертури фотоприймача інтерференційні смуги рухаються. Через це фотоприймач генерує періодичний електричний сигнал. Кожний період цього сигналу свідчить про те, що дзеркало 4 пересунулося вздовж оптичної осі на половину довжини хвилі випромінювання лазера. Початком рахування максимумів періодичного електричного сигналу є момент, коли дзеркало 4 своєю поверхнею знаходиться в референтній площині R. На фотоприймачі знаходиться при цьому світла смуга – нульовий максимум інтерференційної картини. Лічильник світлих смуг, що переміщуються в площині апертури фотоприймача, дозволяє визначати дистанцію S за формулою:

$$S = N \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де  $N$  – порядковий номер інтерференційної смуги ( $N = 0$  у референтній площині),  $\lambda$  – довжина хвилі, що випромінює лазер.

Робочий діапазон далекоміра  $S_{\max}$  обмежується довжиною просторової когерентності випромінювання лазера. Тому він складає від декількох метрів до декількох десятків метрів, що істотно обмежує застосування таких далекомірів. Переважно вони використовуються в якості високоточного лабораторного вимірювального обладнання.

До інтерференційних також відносять далекомір на основі ітербієвого волоконного самоскануючого лазера [4]. Принцип роботи далекоміра заснований на використанні залежності частоти модуляції сигналу інтерференції від вимірювальної відстані до об'єкту. Джерелом випромінювання в даному типі далекоміра є волоконний ітербієвий лазер. Даний тип лазера генерує імпульсне вузькосмугове випромінювання, тобто послідовність мікросекундних імпульсів, які складаються із однієї повздовжньої моди. З кожним новим імпульсом частота зменшується суворо на одну міжмодову відстань. Ширина області самосканування в ітербієвих волоконних лазерах може перевищувати 20 нм. Вимірювання відстані до об'єкта здійснюється інтерферометром Маха-Цендера, який в оптичній схемі представлений волоконними розгалужувачами. Даний тип далекоміра має невелику дальність вимірювання, приблизно 11 м.

**Лазерні імпульсні далекоміри** Цими далекомірами дистанція  $S$  вимірюється через визначення інтервалу часу, який потрібен імпульсу лазерного випромінювання для подолання дистанції від далекоміра до об'єкта і назад [5-9]. На рис. 3 показана спрощена функціональна схема такого далекоміра. Сформований лазерний імпульс на світлоділнику 2 розділяється на два потоки. Один з них спрямовується на формувач стартового електричного імпульсу 3, другий направляєється в сторону об'єкта. Відбитий від об'єкта потік лазерного випромінювання через оптичну систему далекоміра (на рис. 3 ця система не показана) попадає на формувач фінішного електричного імпульсу 5. Стартовий імпульс запускає лічильник тактових імпульсів, які виробляє спеціальний генератор, фінішний імпульс припиняє підрахунок тактових імпульсів.

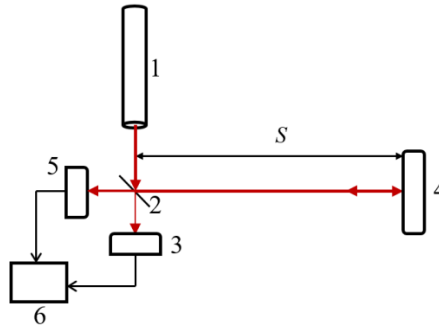


Рис. 3. Спрощена функціональна схема імпульсного лазерного далекоміра: 1 – лазерний випромінювач колімованого пучка променів; 2 – світлоділник; 3 – формувач стартового електричного імпульсу; 4 – об’єкт; 5 – формувач фінішного електричного імпульсу; 6 – генератор і лічильник тактових імпульсів

Визначена в такий спосіб кількість тактових імпульсів  $N_{imn}$ , помножена на інтервал часу  $\tau$  – період тактових імпульсів, дозволяє визначити час проходження лазерного імпульсу від далекоміра до об’єкту і в зворотному напрямку  $t = N_{imn} \tau$ , а потім розрахувати дистанцію  $S$ , через швидкість світла в повітрі  $V$ :

$$S = v \cdot t = \frac{v N_{imn} \tau}{2} \quad (2)$$

Оскільки швидкість світла в повітрі  $v \approx 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ , то 1 метр дистанції світло пробігає за час  $t = \frac{1M}{3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}} = 3.33 \cdot 10^{-9} c$ . А це означає, що для забезпечення достатньої точності функціонування такого

далекоміра на невеликих відстанях до об’єктів потрібно мати прецизійні формувачі стартових та фінішних імпульсів, генератор тактових імпульсів з гігагерцовою, а іноді із терагерцовою частотою, з відповідним прецизійним лічильником тактових імпульсів. Все це є складною в реалізації технічною і технологічною задачею.

Імпульсні далекоміри використовують для роботи з об’єктами, віддаленими на кілометри, коли допустимі похибки вимірювання дальності можуть складати одиниці і десятки метрів. Потрібно також відмітити, що збільшення максимальної робочої дистанції імпульсного далекоміра супроводжується суттєвим зростанням габаритів і ускладненням його оптичної системи, а також потребує більшої потужності лазера.

**Лазерні фазові далекоміри.** Як і в імпульсному фазовий далекомір також вимірює інтервал часу, що потрібен для проходження світла від далекоміра до об’єкту та назад. Проте цей інтервал вимірюється не прямо, а опосередковано через вимірювання різниці фаз амплітудно модульованого лазерного потоку на виході з далекоміра та на вході в далекомір після відбиття потоку від об’єкту [9-11]. На рис. 4 показана спрощена функціональна схема фазового далекоміра.

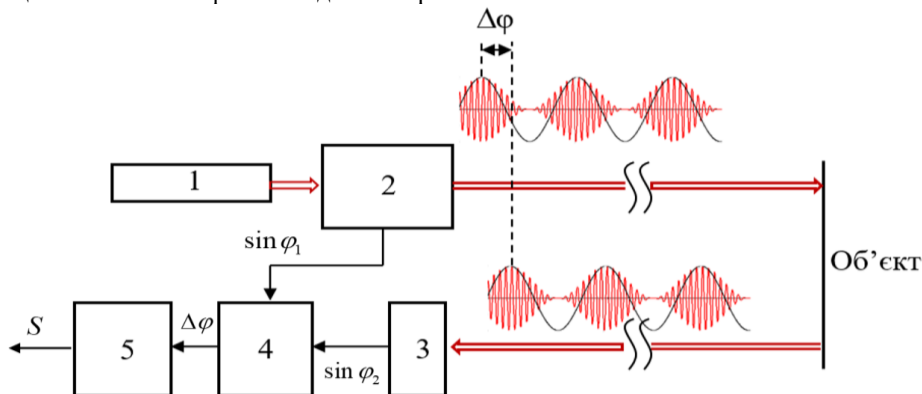


Рис.4. Спрощена функціональна схема фазового далекоміра: 1 – джерело колімованого лазерного випромінювання; 2 – амплітудний модулятор; 3 – фотоприймачевий пристрій, 4 – цифровий синхронний детектор; 5 – обчислювальний пристрій

Джерело лазерного випромінювання 1 випромінює в постійному режимі монохроматичні хвилі. Проходячи через амплітудний модулятор 2, який може бути реалізованим на електрооптичних кристалах з комірною Поккельса або Керра, потік випромінювання періодично змінюється в часі за синусоїдальним законом:

$$\Phi(t) = \frac{\Phi}{2} \left[ 1 + \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right], \quad (3)$$

де  $\Phi$  – потік випромінювання на виході з модулятора;  $t$  – поточний час,  $\frac{2\pi}{T}t = \varphi(t)$  – поточна фаза модуляції,  $T$  – період модуляції. Величина, зворотна періоду  $\nu_m = \frac{1}{T}$ , є частотою модуляції, яка визначається робочим діапазоном далекоміра. Так при модуляції світлового потоку лазера однією частотою  $\nu_m$  інтервал часу для переміщення світлового потоку від далекоміра до об'єкту і назад до далекоміра (дистанція  $2S$ ), не повинен бути меншим за один період модуляції  $T = \frac{1}{\nu_m}$ . У протилежному випадку зміна фази синусоїдального сигналу перевищить  $2\pi$  або  $360^\circ$ , що призведе до неможливості визначити кількість періодів і, як наслідок, до неможливості визначити дистанції до об'єкту.

Якщо в момент початку сеансу вимірювання дистанції час має значення  $t_1$ , а в кінці сеансу –  $t_2$  то стартова фаза модуляції  $\varphi_1 = \frac{2\pi}{T}t_1$ , а кінцева фаза  $\varphi_2 = \frac{2\pi}{T}t_2$ . При цих значеннях фаз  $t_1 = \frac{T}{2\pi}\varphi_1$ ,  $t_2 = \frac{T}{2\pi}\varphi_2$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{T}{2\pi}(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{T}{2\pi}\Delta\varphi.$$

За час  $\Delta t$  світлова хвиля зі швидкістю  $v$  пробігає подвійну дистанцію до об'єкта і назад тому  $2S = v \cdot \Delta t$ ,

$$\text{звідки :} \quad S = \frac{vT}{4\pi}\Delta\varphi \quad (4)$$

При робочому діапазоні далекоміра від 0 до 500 м згідно (4) потрібно мати частоту модуляції  $\nu_m$  випромінювання лазера не більшу ніж 30 КГц.

Відбите від об'єкту світло потрапляє на вхід фотоприймачевого пристрою 3, на якому воно перетворюється в електричний сигнал з частотою  $\nu_m$ , але з поточною фазою  $\varphi_2$ . Далі з цією фазою він подається на другий вхід цифрового синхронного детектора 4, куди одночасно на перший вхід від модулятора подається електричний сигнал з фазою  $\varphi_1$ . На виході синхронного детектора виробляється сигнал, пропорційний різниці фаз  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ , який потім використовується обчислювальним пристроєм 5 для розрахунку дистанції  $S$  за формулою (4).

Для підвищення точності вимірювання дистанції  $S$  використовується додаткова частота модуляції, і навіть дві додаткових, які крім того дозволяють визначити кількість повних періодів різниці фаз  $\Delta\varphi$ .

Досягнення в галузі фазометрії створюють передумови для досягнення високої точності лазерної фазової далекометрії. В них похибки визначення дистанції до об'єкта можуть становити до  $\pm 0.5$  мм. Проте у фазових далекомірів є суттєвий недолік. Потрібний для їх функціонування безперервний режим випромінювання лазера накладає обмеження на потужність лазера. Вона істотно менша ніж у лазерів імпульсного типу. А це не дозволяє використовувати їх для вимірювань великих дистанцій через поглинання світла в атмосфері. До того ж вимірювання різниці фаз з великою точністю потребує часу, що обмежує швидкість приладу.

### Пасивні далекоміри

Серед оптичних далекомірів найбільший різновид складають пасивні далекоміри, для функціонування яких достатньо первинного чи вторинного випромінення самих об'єктів, до яких вимірюється дистанція. В цьому полягає їх головна перевага перед активними далекомірами, оскільки вони забезпечують маскування роботи далекоміра, що дуже важливо у військовій справі.

В пасивних далекомірах інформація про дистанцію до об'єкту міститься в оптичному зображенні об'єкта – в його кутовому чи лінійному розмірі, в його положенні вздовж оптичної осі відносно кардинальних точок оптики далекоміра, у ракурсах, під яким об'єктспостерігається з різних точок простору [12-14].

Дистанція до об'єкта, розмір об'єкта, параметри оптичної системи далекоміра є геометрично пов'язаними. Серед них обов'язково присутній базовий геометричний елемент, про розміри якого існують точні дані.

Переважає кількість пасивних далекомірів для визначення дистанції до об'єкту використовують геометричну фігуру – трикутник [12]. Розташування вершини трикутника відносно об'єкту або далекоміру визначає принцип його дії приналежність до відповідного типу. Сторона трикутника, що розташована напроти його вершини, є базою далекоміра. Якщо вершина трикутника знаходиться на об'єкті, далекоміри відносяться до стереоскопічних. В них базовий елемент знаходиться в самому далекомірі. У випадку розташування вершини трикутника в передньому фокусі об'єктива далекоміра, тобто в самому далекомірі, базовий елемент навпаки знаходиться на об'єкті. Такий далекомір відноситься до типу нитяного. Ці ознаки використані в класифікаційній схемі, представленій на рис. 1

**Стереоскопічні монокулярні далекоміри.** Всі стереоскопічні далекоміри в якості бази використовують дистанцію між двома точками простору, з яких спостерігається об'єкт [12-14], рис. 5.

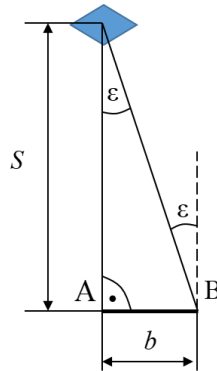


Рис. 5. Далекомірний трикутник  $AB = b$  – база далекоміра;  $\varepsilon$  – паралактичний кут;  $S$  – дистанція до об'єкту

З трикутника на рис. 5 дистанція

$$S = b \operatorname{ctg}(\varepsilon) = \frac{b}{\operatorname{tg}(\varepsilon)} \approx \frac{b}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Оптична система найпростішого монокулярного далекоміру складається з двох дзеркал, рознесених на відстань бази  $b$ , рис. 6а), [13].

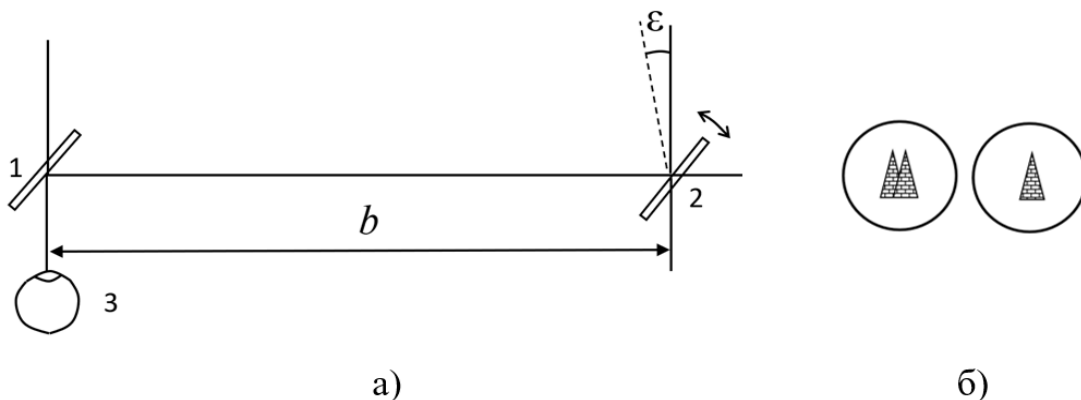


Рис. 6. Оптична схема стереоскопічного далекоміру: 1 – нерухоме напівпрозоре дзеркало; 2 – рухоме поворотне дзеркало; 3 – око оператора

Око оператора бачить два зображення об'єкту, якщо дзеркало 2 не спрямовує зображення об'єкту у напрямку оптичної осі між дзеркалами, рис. 6 б), вигляд поля зору показане зліва. Механізм, що дозволяє змінювати кутове положення дзеркала 2 для зміни кута  $\varepsilon$ , має шкалу дистанцій. В момент, коли при повороті дзеркала 2, рис. 6 б, вигляд поля зору справа, обидва зображення об'єкту поєднуються в одне, оператор зі шкали знімає показання дистанції  $S$ .

Така система приладу, хоча і є найпростішою, проте вона не забезпечує високої точності визначення дистанції через обмежену можливість зорового органу людини точно поєднувати два зображення в одне.

На рис.7 показана оптична система більш досконалого монокулярного далекоміра, яка у порівнянні з попередньою дозволяє набагато підвищити точність вимірювання дистанції до об'єкту [14-15].

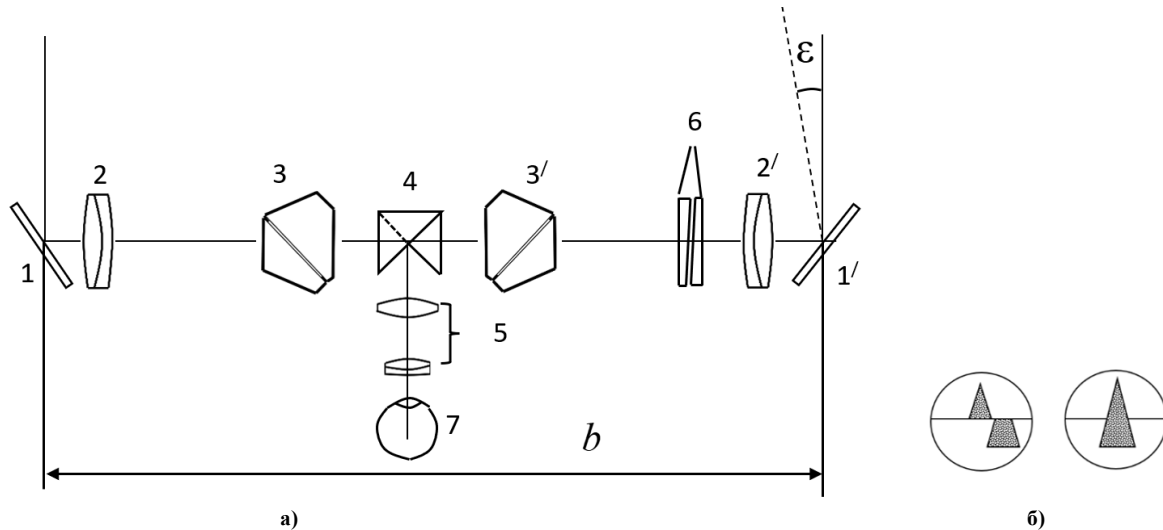


Рис.7 Оптична схема монокулярного стереоскопічного далекоміра:

- а) 1, 1' - плоскі відбивальні дзеркала; 2, 2' - об'єктиви зорових труб; 3, 3' - призмкові обертальні системи; 4 - відбивачі; 5 - окуляр зорових труб; 6 - клини; 7 - око оператора;  
б) зліва - вигляд об'єкту в окулярі до вимірювання дистанції; справа - вигляд об'єкту при визначенні дистанції до об'єкту

Оптична система монокулярного стерео далекоміра має два оптичні канали, представлені зоровими трубами системи Кеплера. Труба складаються з об'єктивів 2, 2', призмкових обертальних систем 3, 3', потрібних для отримання прямого зображення об'єкту (на рисунку показані призми Пехана), двох відбивачів 4, складених із двох дзеркал або із двох прямокутних призми, у яких зовнішня поверхня гіпотенузної грані дзеркальною, причому відбивачі по вертикалі розташовані в контакті одна над однієї. Вихідним елементом оптичної системи є окуляр 5, загальний для обох зорових труб.

Задній фокус обох об'єктивів та передній фокус окуляра знаходяться в одній точці на лінії перетину (при вигляді зверху) дзеркальних граней призми. Оптичні осі лівого та правого каналу далекоміра встановлені паралельно одна одній.

Відбивачі 4, при вказаному їм розташуванні в системі Кеплера, ділять зображення об'єкту, що сформовані об'єктивами, на дві частини - верхню та нижню, рис. 7 б). Якщо об'єкт знаходиться на безкінечності, то оператор бачить об'єкт як цілий, рис. 6 б), вигляд зображення праворуч. При кінцевій відстані до об'єкту у правому каналі далекоміра зображення об'єкту розділяється на дві частини. Оператор бачить в окуляр розсунуті по горизонталі верхню і нижню частини зображення, рис. 7 б), поле зору ліворуч. Для отримання зображення об'єкту до не розділеного вигляду оператор за допомогою спеціального механізму обертає клин 6 навколо оптичної осі строго в протилежних напрямках. Вони утворюють сумарний клин із плавно змінним кутом при вершині, який компенсує кутове зміщення об'єкту в правому каналі відносно оптичної осі об'єктиву 2' на кут  $\varepsilon$ . Механізм обертання клинів 6 має шкалу, на якій вказується відстань  $S$  до об'єкту при його нерозділеному зображенні.

Похибка  $\delta S$  визначення дистанції монокулярним стереоскопічним далекоміром при точно визначеному розмірі бази  $b$  в основному залежить від похибки вимірювання паралактичного кута  $\varepsilon$ . У відповідності з диференційованою по  $\varepsilon$  формулою (5)

$$\delta S = \frac{-b}{\varepsilon^2} \delta \varepsilon = -S \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (6)$$

де  $\delta \varepsilon$  - похибка вимірювання паралактичного кута  $\varepsilon$ .

Нормальний зоровий орган оператора дозволяє йому при сприятливих умовах реагувати на не суміщення розділених частин зображення до  $10''$ . З урахуванням кутового збільшення  $\gamma$  зорової труби, цей кут в просторі об'єктів дорівнює  $\frac{10''}{\gamma}$ . При кутовому збільшенні зорової труби  $\gamma=10$  похибка визначення паралактичного кута  $\delta\varepsilon = \frac{10''}{\gamma} = 1'' = 4.85 \cdot 10^{-6}$ . Якщо у далекоміра база  $b = 300 \text{ м}$ , дистанція  $S = 500 \text{ м}$ , то  $\varepsilon = \frac{b}{S} = \frac{300}{500000} = 6 \cdot 10^{-4}$ . Із формули (6), після взяття з неї похідної по  $\varepsilon$ , абсолютне значення похибки

$$|\delta S| = \frac{b}{\varepsilon^2} \delta\varepsilon = S \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} = 500 \frac{4.85 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-4}} = 4.04 \text{ м}, \text{ що становить } \frac{4.04 \text{ м}}{500 \text{ м}} \cdot 100\% = 0.81\% \text{ дистанції.}$$

Як видно з наведених розрахунків, підвищення точності вимірювань дистанції  $S$  забезпечують зорові труби. Чим більшим є їх кутове збільшення  $\gamma$ , тим меншою буде похибка вимірювання паралактичного кута. Але при  $\gamma > 10$  зображення стає надто рухомим через тремор рук оператора, що заважає точному поєднанню розсунутих половинок зображення. В таких випадках далекомір необхідно встановлювати на штативі. Підвищення точності далекоміра за рахунок збільшення бази  $b$  супроводжується зростанням габаритів приладу, що також є не завжди допустимим. В цьому полягають недоліки такого типу далекоміра.

**Стереоскопічні бінокулярні далекоміри.** Головна відмінність бінокулярного далекоміра від монокулярного полягає в принципово іншому використанні особливостей зорового органу людини, а саме – в здатності людини сприймати глибину простору завдяки функціонуванню двох очей [14-15]. Між двома очима людини є дистанція – база  $b = (50 \div 70)$  мм, через яку положення зображення об'єкту на сітківці правого ока відрізняється від положення зображення того самого об'єкту на сітківці лівого ока. Ця відмінність обробляється мозковим центром зорового органу так, що людина відчуває дистанцію до кожного з об'єктів, які знаходяться в діапазоні стереоскопічного зору. Поріг чутливості мозку до наявності паралактичного зсуву вказаних зображень на сітківках при спостереженні об'єкта двома очима складає приблизно  $\varepsilon_{\text{пор}} \approx 10'' = 4.85 \cdot 10^{-5}$  радіан. При цьому радіус стереоскопічного зору згідно формули (5) становить

$$R = \frac{b}{\varepsilon_{\text{пор}}} = \frac{50 \div 70}{4.85 \cdot 10^{-5}} = (1031 \div 1444) \text{ м}.$$

Значення  $R$  можна суттєво збільшити, якщо штучно збільшити базу  $b$ , озброївши око оптичною системою, рис.8.

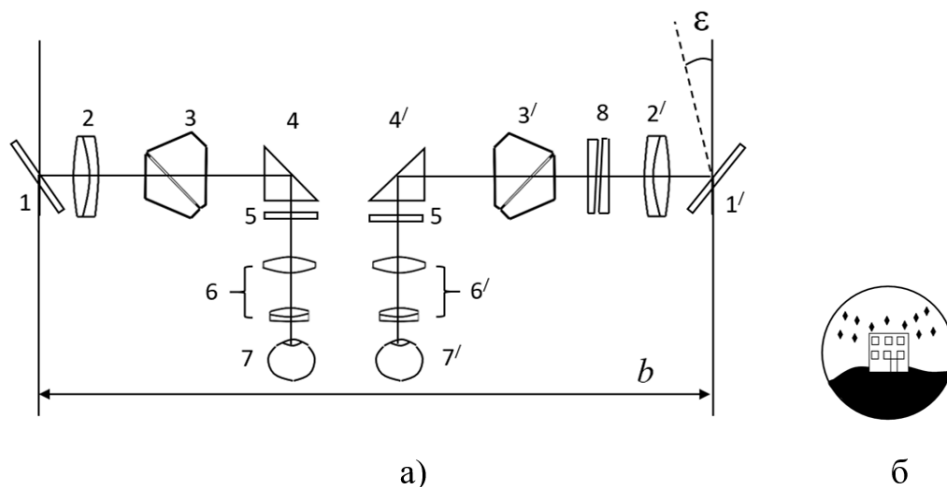


Рис. 8. Оптична схема стереоскопічного бінокулярного далекоміра:

а) 1, 1' – плоскі відбивальні дзеркала (або системи дзеркал чи призми); 2, 2' – об'єктиви зорових труб; 3, 3' – призмові обертальні системи; 4 – відбивальні призми; 5 – плоскопаралельні пластини з марками 6, 6', – окуляри зорових труб; 7, 7' – ліве і праве око оператора; 8 – клиновий компенсатор паралактичного кута; б) зображення, що спостерігає оператор через далекомір



До тих пір, поки візирні осі обох каналів не перетинаються на об'єкті, оператор сприймає через окуляри зображення об'єкту і зображення марок на різних від себе відстанях. Обертаючи в протилежні сторони клини кутового клинового компенсатора 8 за допомогою спеціального механізму із шкалою дистанцій, оператор фіксує дальність до об'єкту, коли зображення об'єкту і зображення марок суб'єктивно сприймаються на однаковій віддаленості від оператора.

Похибка вимірювання дистанції бінокулярним стереоскопічним далекоміром ідентична похибці монокулярного, тому вона описується формулою (6).

**Кореляційні стереоскопічні далекоміри.** За принципом дії такі далекоміри не відрізняються від попередніх бінокулярних, але в них функцію зорового органу людини виконує оптико-електронний корелятор [16]. На рис. 9 показана функціональна схема такого далекоміра. В його склад входять два оптико-електронні канали, які в свою чергу складаються з ідентичних цифрових відеокамер у складі об'єктивів 1, 1' та матричних фотоприймачів 2, 2'. Оптичні осі каналів розташовані паралельно. Відстань між ними є базою  $b$  далекоміра.

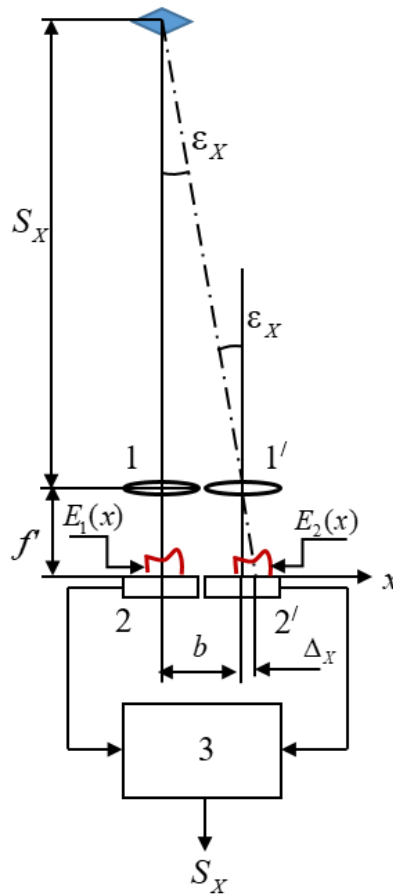


Рис. 9 Кореляційний стереоскопічний далекомір: 1, 1' – об'єктиви, 2, 2' – матричні фотоприймачі, 3 – мікрокомп'ютер

Об'єктиви відеокамер формують зображення об'єкту кожний на своєму фотоприймачі. Коли об'єкт знаходиться на кінцевій відстані від далекоміра, то зображення на фотоприймачах мають неоднакове положення, як це має місце на сітківках очей.

Визначення зсуву між двома зображеннями на матрицях фотоприймачів 2, 2' є досить точним, оскільки здійснюється з точністю до десятих часток розміру одного пікселя фотоприймача.

Відрізок  $\Delta_x$  – паралактичний зсув одного зображення відносно іншого на фотоприймачах вздовж горизонтальної осі  $OX$ , що пропорційний фокусній відстані  $f'$  об'єктива та паралактичному куту  $\epsilon_x$ :

$$\Delta_x = f' \epsilon_x.$$

Визначивши значення  $\Delta_X$ , можна розрахувати паралактичний кут

$$\epsilon_X = \frac{\Delta_X}{f'},$$

а потім і дистанцію  $S_X$  з використанням формули (5).

Величину зсуву  $\Delta_X$  визначають за допомогою кореляційної функції:

$$K(\Delta_X) = \int_{-X}^{+X} E_1(x) \cdot E_2(x - \Delta_X) dx, \quad (7)$$

де  $E_1(x)$  та  $E_2(x)$  – електричні сигнали з пікселів матриць обох каналів, які є сумою сигналів від пікселів-стовпців паралельних осі ОУЗ координатою  $X$  вздовж осі ОХ. Функція (7) розраховується мікрокомп'ютером 3 для дискретної послідовності значень  $\Delta_X$ . Те значення  $\Delta_X$ , при якому апроксимована кореляційна функція  $K(\Delta_X)$  досягає максимуму, є шуканим і необхідним для розрахунку дистанції  $S_X$  мікрокомп'ютером 3, що входить у склад далекоміра.

**Пасивні фокусуючі далекоміри.** Принцип діятих далекомірів заснований на використанні формул теорії ідеальної оптичної системи [16], а саме формули Ньютона:  $z \cdot z' = f \cdot f'$  або формули Гауса:  $\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1$ . На рис. 10. показані відрізки, що пов'язані цими формулами.

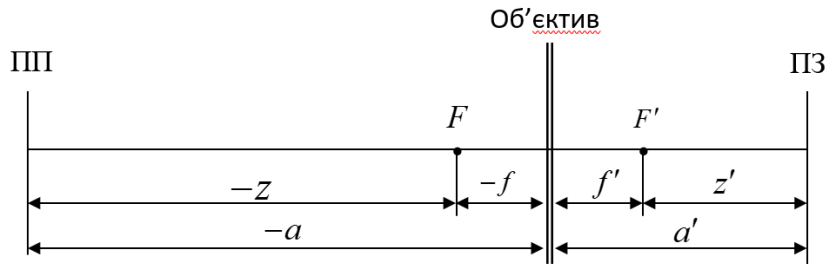


Рис. 10 До формул Ньютона та Гауса: ПП – площина предметів, прив'язана до об'єкту; ПЗ – площина зображень;  $f, f'$  – передня та задня фокусні відстані об'єктиву відповідно

Відрізок  $-z$  визначається з формули Ньютона  $-z = \frac{f \cdot f'}{z'}$ . Якщо перед і за об'єктивом однакове оптичне середовище, наприклад повітря, то

$$-z = \frac{(f')^2}{z'}. \quad (8)$$

При точно виміряній фокусній відстані об'єктиву  $f'$  для визначення дистанції  $-z$  до об'єкту залишається лише вимірювати відрізок  $z'$  і використовувати його для підрахунку відстані  $-z$  за формулою (8).

Відрізок  $z'$  наближається до нуля по мірі наближення відрізка  $-z$  до безкінечності, тому чим далі знаходиться об'єкт, тим точніше потрібно вимірювати довжину вказаного відрізка. На рис. 11 показано функціональну схему далекоміра такого типу [16]. Оптична система цього далекоміра має два візуальні канали. Перший – зорова труба (поз. 1–4), яка потрібна оператору для наведення на об'єкт і точного фокусування. Другий канал (поз. 5–8) дозволяє оператору одночасно другим оком через лупу на цифроіндекаторній панелі бачити результати вимірювання дистанції. Фокусування зображення об'єкту здійснюється зсувом об'єктива і зорової труби разом із освітленою щілиною вздовж оптичної осі відносно

окуляру 4. Зсув фіксується за допомогою мультискана 5 у вигляді спеціального багатоелементного фотоприймача – лінійки, яка здатна відчувати переміщення світлової щілини на 0.2 мкм по елементах лінійки. Інформація щодо положення освітленої зони лінійки обробляється блоком керування 6, який обчислює за формулою (8) дистанцію до об'єкту і результат виставляє на цифроіндекаторі 7.

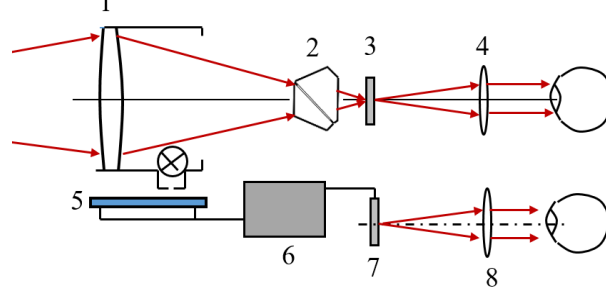


Рис. 11. Функціональна схема пасивного фокусуєчого далекоміра: 1 – об'єктив зорової труби, 2 – оберտальна призма, 3 – сітка, 4 – окуляр зорової труби, 5 – мультискан, 6 – блок керування цифроіндекатором, 7 – цифроіндекатор, 8 – лупа

Похибка далекоміра залежить від можливостей оператора отримувати максимально «різке» зображення об'єкту, та від похибок функціонування ланки системи (5–6). Вказані фактори призводять до похибки  $\Delta z'$  вимірювання відрізка  $z'$ , яка в свою чергу викликає похибку  $\Delta z$  вимірювання дистанції до об'єкту:

$$\Delta z = \left( \frac{f'}{z'} \right)^2 \Delta z'. \quad (9)$$

Формула (9) свідчить про зріст похибки  $\Delta z$  до безкінечності при наближенні  $z'$  до нуля. Цей факт можна вважати суттєвим недоліком далекоміра.

**Нитяні далекоміри із сталим паралактичним кутом.** Вважається, що найбільш простими за принципом дії є так звані нитяні далекоміри [12, 17]. Їх принциповою відмінністю від інших пасивних є те, що база далекомірного трикутника знаходиться на самому об'єкті, а вершина трикутника – в передньому фокусі  $F$  об'єктива далекоміра, рис. 12.

Основою візуального далекоміра є зорова труба, що складається з об'єктива та окуляра. В передній фокальній площині окуляра знаходиться скляна пластина з нанесеними на ній контрастними паралельними лініями – «нитями». Відстань між нитями  $p$  точно виміряна і слугує робочою мірою приладу. Горизонтальні ниті використовуються для вимірювань вертикального розміру зображення бази чи її фрагментів, вертикальні ниті – для вимірювань розміру бази в горизонтальній площині.

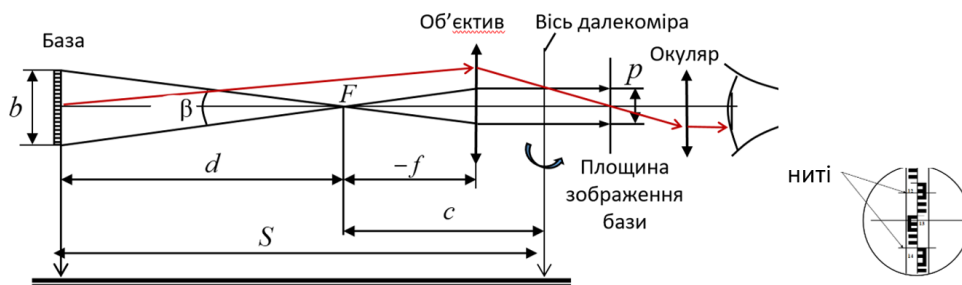


Рис. 12. До принципу дії нитяного далекоміра:  $b$  – розмір фрагменту об'єкту чи розмір всього об'єкту, що знаходиться в полі зору зорової труби далекоміра і слугує базою;  $\beta$  – паралактичний кут;  $f$  – передня фокусна відстань об'єктива зорової труби,  $p$  – відстань між «нитями», справа – зображення в окулярі фрагменту лінійки з накладеними на неї нитями

Роль бази виконує або геодезична (нівелірна) метрична лінійка, яка знаходиться поруч з об'єктом, або відомий вертикальний чи горизонтальний розмір самого об'єкта (зріст людини, висота чи довжина автомобіля, розміри корпусу плавзасобу, тощо).

В далекомірі сталий паралактичний кут  $\beta = 2\arctg \frac{p}{2f}$  забезпечується сталим значенням фокусної відстані об'єктиву  $f$  і незмінною відстанню  $p$  між нитями.

Дистанція до об'єкту  $S$  в таких далекомірах вимірюються від вертикальної осі, навколо якої повертається прилад, тому :

$$S = d + c = \frac{f \cdot b}{p} + c . \quad (10)$$

Формула відрізка  $d$  витікає з співвідношень між сторонами подібних трикутників на рис. 12.

Похибка вимірювання  $S$ , як видно з (10), залежить від точних даних про розмір бази  $b$ , а також від дисторсії об'єктиву, та від точності, з якою зображення бази вписується між нитями. Останнє означає, що через абераційне спотворення зображення бази та невірне спряження нитей і зображення бази фактичний розмір зображення буде відрізнятися від значення параметру  $p$  на деяку величину  $\Delta p$ , тому

$$\Delta S = \left| \frac{f \cdot b}{p^2} \Delta p \right|. \quad (11)$$

Вимірювання дистанції  $S$  є можливим, поки розмір  $b'$  зображення всієї лінійної шкали бази перекриває відстань або дорівнює відстані  $p$  між нитями. По іншому повинна виконуватися умова  $b' \geq p$ . Максимальна вимірювальна відстань  $S_{\max}$  визначається при  $b' = p$ .

Із теорії ідеальної оптичної системи лінійне збільшення зображення об'єкту  $\beta_{oc} = -\frac{f}{d}$ , тому величина зображення лінійної шкали:

$$b'_{\max} = b_{\max} \beta_{oc} = b_{\max} \frac{f}{d},$$

де  $b_{\max}$  – розмір всієї лінійної шкали. Якщо  $b'_{\max} = p$ , то

$$d_{\max} = \frac{b_{\max} f}{p}. \quad (12)$$

Згідно (12) при реальних значеннях параметрів, наприклад,  $b_{\max} = 2000$  мм,  $p = 20$  мм та  $|f| = 400$  мм максимальна межа вимірювального діапазону такого далекоміру:

$$d_{\max} = \frac{b_{\max} f}{p} = \frac{2000 \cdot 400}{20} = 40000 \text{ мм} = 40 \text{ м}.$$

Зрозуміло, що в багатьох випадках (наприклад, при військовому використанні далекомірів) такий робочий діапазон приладу є надто малим, і це вимагає його суттєвого збільшення.

**Нитяні далекоміри із змінним паралактичним кутом.** Принципово ці далекоміри не відрізняються від попередніх, але з метою більш точного вимірювання зображення бази об'єктив зорової труби в них наділяють можливістю змінювати в невеликих межах фокусну відстань  $f$ , або штучно змінювати кутовий розмір зображення бази [12, 19]. Ці прийоми дозволяють мати варіації паралактичного кута  $\beta$  в невеликих межах. Для цього також використовують спеціальні компенсатори – оптичні насадки на об'єктив з клиновими компенсаторами або з телескопічними системами, значення кутового збільшення яких може змінюватися в невеликих межах навколо одиниці [12].

**Автоматизований нитяний далекомір із розширеним діапазоном вимірювань дистанції до об'єкту.** На завершення огляду пропонується система далекоміру, який має ознаки нитяного із змінним паралактичним кутом, але при тому дозволяє суттєво розширювати діапазон вимірювань за рахунок використання об'єктива трансфокатора та використання в якості робочої міри матричного фотоприймача.

Нехай при використанні нитяного далекоміру потрібно мати діапазон вимірювань до 500 метрів.

З виразу (12) для  $d_{\max}$  видно, що збільшити цей параметр до вказаних 500 м можна або збільшенням фокусної відстані об'єктиву до 5 м, або суттєвим зменшенням відстані між нитями до 0.4 мм. І перше, і друге не є реалістичним.

Якщо в далекомірах нитяного типу око оператора і окуляр замінити відеокамерою з матричним фотоприймачем, то параметр  $p$  буде визначатися вже не розмірами окулярної сітки, яка не може мати малий діаметр, а розмірами матриці. Згідно формули (12) для отримання більших значень  $d_{\max}$  потрібні матриці з меншими форматами.

Розглянемо приклад використання нитяного далекоміра в тепловізорі, якому додається функція виміру дистанції до об'єкту. В сучасних тепловізорах використовуються неохолоджувані мікроболометричні матриці, розміри та кількість пікселів яких наведені в таблиці:

Компанія	Матеріал болометра	Формат матриці	Розмір пікселя [мкм]	Формат матриці [мм]
BAE (США)	a-Si/aSiGe	320x240 1024x768	17	5.44x4.08 17.41x13.06
Raytheon (США)	VOx	320x240 640x480	17	5.44x4.08 10.88x8.16
ULIS (Франція)	a-Si	320x240	12	3.84x2.88
NEC (Японія)	VOx	640x480	12	7.68x5.76

Оскільки матриця виконує також роль робочої міри довжини, то для підвищення точності вимірювань логічно зменшувати відносне значення ціни поділки такої міри за рахунок використання матриці з більшою кількістю пікселів на сторону матриці.

Вимірювання дистанцій до об'єктів також буде більш точним, якщо зображення об'єкту займає всю сторону матриці, а крайні рядки або стовпці пікселів будуть виконувати функцію нитей. Але при цьому потрібен об'єктив із змінною фокусною відстанню. Максимальна та мінімальна значення фокусної відстані об'єктиву згідно (12) можна розрахувати за формулами (13), (14):

$$f_{\max} = \frac{p d_{\max}}{b} \quad (13)$$

$$f_{\min} = \frac{p d_{\min}}{b} \quad (14)$$

Для прикладу, при використанні в тепловізійному далекомірі французької матриці ULIS забезпечення робочого діапазону далекоміру [500÷50] м потребує, згідно (13) та (14), зміни значень фокусної відстані об'єктиву в діапазоні  $f = [720 \div 72]$  мм. При цьому нитяний далекомір із таким об'єктивом відноситься до типу нитяних із змінним паралактичним кутом  $\beta$ , рис.13.

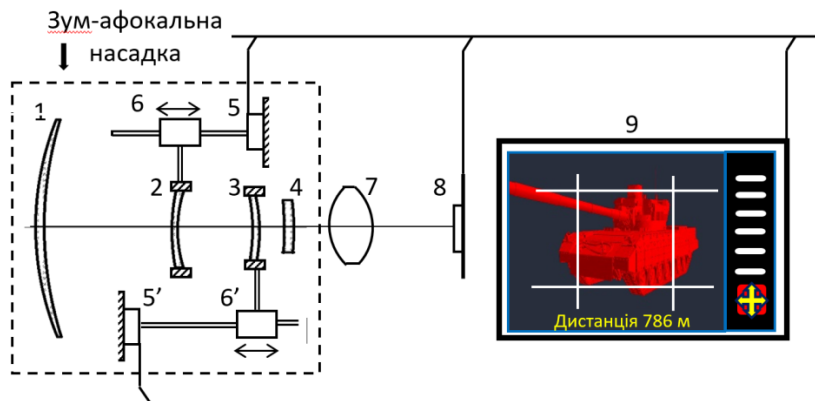


Рис. 13. Функціональна схема нитяного далекоміра із змінним паралактичним кутом: 1-4 лінзи зум-афокальної системи; 5, 5' – кроковий двигун; 6, 6' – механізм зсуву лінз зум-афокальної системи; 7 фікс-об'єктив; 8 – матричний фотоприймач; 9 – мікрокомп'ютер із сенсорним екраном

Лінзи 1 – 4 утворюють зум-афокальну насадку до об'єктива 7 з фіксованим значенням фокусної відстані  $f'_{об}$ . Подібна система має назву зум-трансфокатор. Його фокусна відстань розраховується за формулою

$$f' = \gamma f'_{об}, \quad (15)$$

де  $\gamma$  – кутове збільшення зум-афокальної системи.

За допомогою крокових двигунів запрограмоване переміщення внутрішніх лінз цієї системи дозволяє змінювати  $\gamma$  в потрібному інтервалі значень.

На рис. 13 показана чотири лінзова афокальна система, яка є симетричною, а тому має можливість змінювати кутове збільшення в інтервалі від  $\gamma_{max}$  до  $\gamma_{min} = \frac{1}{\gamma_{max}}$ , переходячи через значення  $\gamma = 1$ , при якому згідно (15)  $f' = f'_{об}$ , [20, 21].

Формули (13), (14) дозволяють визначати потрібний інтервал значень кутового збільшення  $\gamma$ . Оскільки  $f'_{max} = \gamma_{max} f'_{об}$  а  $f'_{min} = \frac{1}{\gamma_{max}} f'_{об}$ , то з цих двох рівнянь неважко знайти невідомі  $f'_{об}$  та  $\gamma_{max}$  або  $\gamma_{min}$ :

$$f'_{об} = \sqrt{f'_{max} f'_{min}}, \quad (16)$$

$$\gamma_{max} = \sqrt{\frac{f'_{max}}{f'_{min}}}, \quad (17)$$

$$\gamma_{min} = \sqrt{\frac{f'_{min}}{f'_{max}}}. \quad (18)$$

При  $f'_{max} = 720$  мм,  $f'_{min} = 72$  мм, згідно (16), (17), (18)  $f'_{об} = \sqrt{720 \cdot 72} = 227.68$  мм,

$$\gamma_{max} = \sqrt{\frac{720}{72}} = 3.16, \quad \gamma_{min} = \sqrt{\frac{72}{720}} = 0.316.$$

Вимірювання дальності до об'єкту потребує наявності в пам'яті мікрокомп'ютера розмірів типових об'єктів. Це можуть бути висота, ширина, довжина танків та іншої броньованої техніки противника, середній ріст людини, інше. Оператор на сенсорному екрані обирає вручну типовий об'єкт. Далі він наводить далекомір на об'єкт і, спостерігаючи зображення об'єкту на екрані монітора в автоматичному чи ручному режимі керує кроковими двигунами, які переміщують лінзи зум-трансфокатора до тих пір, поки зображення настане вписаним у межі всього кадру чи у визначений заздалегідь «нитяний» фрагмент кадру. Роботою крокових двигунів керує мікрокомп'ютер, який водночас інформує електричну систему про значення кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи, яке потрібне для розрахунку дистанції. Після завершення процедури обрамлення зображення об'єкту оператор сам подає команду початку обчислення дистанції до об'єкту, або обчислення починається автоматично. Для цього використовується формула

$$S = \frac{f'_{об} \gamma b}{N \cdot \Delta}, \quad (19)$$

де  $\gamma$  – поточне значення кутового збільшення зум-афокальної системи;  $b$  – розмір об'єкту, який виконує роль бази,  $N$  – кількість пікселів, на яку накладається зображення об'єкту,  $\Delta$  – розмір пікселю. Результат розрахунку  $S$  виводиться на екран монітора.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Вимогам до маскуваності дії, широкого діапазону вимірювань дальності, автоматизації вимірювальних процедур, мінімізації габаритів, а також меншій залежності функціонування від погодних умов одночасно і у великій мірі задовольняють нитяні далекоміри.

2. Нитяні далекоміри не мають обмежень щодо використання різних ділянок спектрального діапазону випромінювання, включаючи ультрафіолетовий, видимий, а також близький, середній та дальній інфрачервоний діапазони.

3. Багатократному збільшенню діапазону вимірювань дальності до об'єкту, або адаптуванню діапазону вимірювань до умов використання далекоміра, сприяє можливість в нитяних далекомірах мати змінний в широких межах паралактичний кут, що реалізується додаванням до фіксованого об'єктиву комп'ютерно-інтегрованої зум-афокальної оптичної системи.

4. Автоматизація вимірювальних процедур, яку дозволяє здійснити використання сучасних досягнень в галузях оптико-електроніки та мікропроцесорної техніки, забезпечує далекометрії нитяного типу перехід від архаїчного до сучасного ефективного засобу далекометрії з широкими перспективами до подальшого розвитку і вдосконалення.

## References

1. Effectiveness of passive optoelectronic and laser rangefinders / Vladimir Cech, Jiri Jevicky [Elektronnyy resurs]. –Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/290087785\\_Effectiveness\\_of\\_passive\\_optoelectronic\\_and\\_laser\\_rangefinders](https://www.researchgate.net/publication/290087785_Effectiveness_of_passive_optoelectronic_and_laser_rangefinders)
2. Primeneniye lazernykh dal'nomerov v voyennom dele / N. N. Bardachevskiy, V. A. Litovchenko, D. V. Grishayev // Interekspo Geo-Sibir'. – 2016. – №8 – S.78-83
3. Ynterferometr Maykel'sona : shcho tse take, pryntsyp roboty, formuly, zastosuvannya [Elektronnyy resurs] / V.Korotun. – Rezhym dostupu: <https://www.asutpp.ru/interferometr-maykelsona.html>
4. Dal'nomer na osnove itterbiyevogo volokonnoho lazera s samoskanirovaniyem dliny volny/ A.M. Volikova, N.N. Smolyaninov, I.A. Lobach, S.I. Kablukov // Prikladnaya fotonika. –2020. –T.7.–№ 3. – S.90-101
5. Active Rangefinder and Range Image Processing./ YukioSato [Elektronnyy resurs] . –Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/269738955\\_Active\\_Rangefinder\\_and\\_Range\\_Image\\_Processing](https://www.researchgate.net/publication/269738955_Active_Rangefinder_and_Range_Image_Processing)
6. A Review Solid-state Laser Rangefinders/ N.Mansharamani [Elektronnyy resurs]. –Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/268338279\\_A\\_Review\\_Solid-state\\_Laser\\_Rangefinders](https://www.researchgate.net/publication/268338279_A_Review_Solid-state_Laser_Rangefinders)
7. Measuring properties of laser rangefinders/ Detlef Ehlert, Rolf Adamek [Elektronnyy resurs]. –Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/289178444\\_Measuring\\_properties\\_of\\_laser\\_rangefinders](https://www.researchgate.net/publication/289178444_Measuring_properties_of_laser_rangefinders)
8. Lazernyye pribory i metody izmereniya dal'nosti : ucheb. posobiye / V.B. Bokshanskiy, D.A. Bondarenko, M.V. Vyazovkyh, I.V. Zhivotovskiy, A.A. Sakharov, V.P. Semenkov ; pod red. V.Ye. Karasika. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2012. – 92, [4] s. : il.
9. Dal'nomery.Prinsip lazernoy dal'nometrii [Elektronnyy resurs]. –Rezhym dostupu: [https://opticdevices.ru/article\\_24.html](https://opticdevices.ru/article_24.html)
10. Kratkiy obzor impul'snykh i fazovykh dal'nomerov/Antonenko K.O.,Mukarev // Akademicheskaya publitsistika. –2021. –№4. –S.22-29
- 11.Prinsip raboty fazovogo dal'nometra [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: [https://www.laser-portal.ru/content\\_1268](https://www.laser-portal.ru/content_1268)
12. Plotnikov B.C. Geodezicheskiye pribory: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Nedra, 1987. – 396 s.: il
- 13.Sovremennyye podkhody k sozdaniyu passivnykh dal'nomerov/ Medvedev A.V., Grinkevich A.V., Knyazeva S.N. // Fotonika. –№ 8. –68. –2017.–С. 30-37.
14. Dal'nomery [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: <https://azbukametalla.ru/entsiklopediya/d/dalnomery.html>
15. Volkonskiy V. B., Gill' I. L. / DAL'NOMER // Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya. – Moskva –Tom 8., – 2007– S. 265
16. Passivnyye dal'nomery: ot opticheskikh sistem k optiko-elektronnyy / A. V. Medvedev, A. V. Grinkevich, S. N. Knyazeva // Fotonika . – T.14. –№4. –2020. – S.344-358
17. Opticheskiy dal'nomer s postoyannym parallakticheskim uglom i izmeryayemoy bazoy [Elektronnyy resurs] . –Rezhym dostupu: <https://greleon.ru/lektsiya-opticheskij-dalnomer-s-postoya>
18. Opticalrangingtransducer/ R. E. Daniels, R. J. Sinkey [Elektronnyy resurs] .— Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/255326925\\_OPTICAL\\_RANGING\\_TRANSDUCER](https://www.researchgate.net/publication/255326925_OPTICAL_RANGING_TRANSDUCER)
- 19.Opticheskiye dal'nomery.Nityanoy dal'nomer. [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: <https://helpiks.org/7-40636.html>
- 20.Patent na korysnu model' № 151469 Ukrayiny. MPK (2006.01) G02B 13/12. Zum-afokal'na optychna systema transfokatora dlya infrachervonoho diapazonu / Chyzh I.H., Lazarenko K.S. ; zayavnyk i patentovlasnyk Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny "Kyivskyy politekhnichnyy instytut Ihorya Sikors'koho". – № u 2022 01140 ; zayav. 08.04.2022 ; opubl. 27.07. 2022, Byul. № 30.
- 21.Chyzh I.H., Lisnyak K.S. // Chotyrykomponentni linzovi zum-afokal'ni systemy// Naukovi visti KPI, –№5-6. – 2019.– S.80-86