

**М.І. Дзюбенко^{1,2,3}, І.В. Колєнов¹,
В.П. Пелипенко¹, М.Ф. Дахов¹, А.В. Дегтярьов¹**

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
4, пл. Свободи, Харків, 61022, Україна

³ Харківський національний університет радіоелектроніки
14, просп. Науки, Харків, 61166, Україна
E-mail: mid41@ukr.net

Лазерний далекомір відносно безпечного для зору діапазону довжин хвиль

Предмет і мета роботи. Метою цієї роботи є розроблення і виготовлення експериментального зразка лазерного далекоміра, що працює у спектральній області 1,50...1,70 мкм. Цей діапазон довжин хвиль привабливий для розробників і споживачів лазерних приладів перш за все відносно безпекою випромінювання для зору людини.

Методи і методологія роботи. У роботі застосовано параксіальну схему побудови далекоміра, в якій було використано програмно-кероване джерело живлення лазерного випромінювання і методи адаптації його до умов функціонування, що змінюються. Для юстування приймального і передавального каналів використовувалися методи, засновані на візуалізації лазерного променя.

Результати роботи. Розроблено і створено імпульсний лазерний далекомір, що працює на довжині хвилі 1,54 мкм. До складу далекоміра входять передавальний і приймальний канали, а також канал візуалізації для наведення на об'єкт. Як джерело випромінювання використовувався імпульсний лазер на ітербій-єрбієвому склі з напівпровідниковим діодним накачуванням і модульованою добротністю. Лазер забезпечував енергію 6 мДж в імпульсі тривалістю ~25 нс при розходженні випромінювання ~5 мрад. Для формування плями лазерного випромінювання необхідної апертури в далекомірі застосовано телескопічну систему Галілея. Як фотоприймач відбитого випромінювання використовувався пін-фотодіод з діаметром фоточутливої площадки 0,3 мм і часовим розділенням 2,5 нс. Розроблено та виготовлено модуль оброблення ехо-сигналу, що дозволяє з високою точністю фіксувати часову затримку між стартовим і відбитим імпульсами. Запропоновано і реалізовано ефективний метод юстування всіх трьох каналів далекоміра з використанням ПЗЗ-матриці і LCD-монітора. Далекомір працює в одноразовому або в імпульсно-періодичному режимі з частотою проходження зондувальних імпульсів 1 Гц.

Висновок. Експериментальний зразок імпульсного лазерного далекоміра працює у відносно безпечній для зору області спектра. Проведені натурні випробування показали, що створений далекомір дозволяє вимірювати дальність до різних об'єктів, що знаходяться в діапазоні відстаней 140...7 000 м з похибкою вимірювання, яка не перевищує 3 м. Лл. 5. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: ітербій-єрбієвий лазер, діодне накачування, приймальний і передавальний канали, канал візуалізації, юстування каналів.

На цей час для вимірювання відстані до різних об'єктів цивільного та військового призначення застосовуються різноманітні далекоміри. Для вимірювання відстаней від одиниць до декількох десятків кілометрів використовуються ім-

пульсні лазерні далекоміри. Основними перевагами цих приладів є відносно висока енергія світлових імпульсів і їх мала тривалість, а також висока спрямованість лазерного променя. Мала тривалість лазерних імпульсів забезпечує

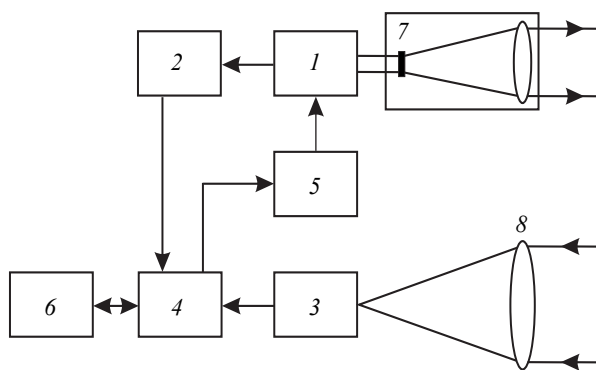


Рис. 1. Функціональна схема імпульсного лазерного далекоміра: 1 – лазер; 2 – модуль фотоприймача стартового імпульсу; 3 – приймач поверненого об’єктом випромінювання з вузькосмуговим світлофільтром на довжині хвилі підсвічування; 4 – модуль керування лазером і вимірювання відстані; 5 – модуль живлення лазера; 6 – індикатор дальності; 7 – формувач оптичної системи передавального каналу; 8 – об’єктив приймального каналу

високу точність визначення дальності до об’єкта, а мала розбіжність лазерного променя – високу точність його просторового положення.

Як джерела випромінювання в далекомірах найчастіше використовуються лазери на основі алітмієвого гранату з домішкою тривалентних іонів неодиму. Ці лазери працюють на довжині хвилі 1,06 мкм і випромінюють імпульси тривалістю близько 10 нс з енергією від кількох десятків міліджоулей до приблизно 150 мДж [1, 2]. В останні 15–20 років в імпульсних далекомірах все частіше застосовують твердотільні джерела лазерного випромінювання, що генерують у спектральній області 1,5...1,7 мкм [3, 4].

В Україні в основному використовуються активні оптико-локаційні системи на базі неодимових лазерів. Головним недоліком цих систем є небезпека мікронного випромінювання для зору людини, що вимагає застосування додаткових заходів безпеки. Актуальність розробки цього далекоміра з твердотільним джерелом лазерного випромінювання обумовлена цілим рядом причин. Зокрема, добре відомо, що спектральна область 1,50...1,70 мкм приваблива для розробників і споживачів лазерних приладів перш за все відносною безпекою випромінювання для зору обслуговуючого персоналу. Допустима в цій спектральній області поверхнева щільність енергії опромінення рогівки ока майже на п’ять порядків перевищує відповідні значення для видимої і мікронної

областей спектра [5]. Така особливість пояснюється високим коефіцієнтом поглинання півторамікронного випромінювання рогівкою ока і водою, яка міститься в біологічних тканинах, що перешкоджає потраплянню випромінювання на чутливу сітківку ока. Земна атмосфера, незважаючи на наявність в ній водяної пари, має вікно прозорості в цій області спектра, яка, таким чином, виявляється дуже зручною для роботи лазерних локаторів і далекомірів [6, 7]. Цьому сприяє також наявність дуже чутливих неохолоджуваних фотоприймачів – германієвих та індій-арсенід-галієвих (InGaAs) фотодіодів. Крім того, спектральна область 1,50...1,70 мкм сприятлива з точки зору проходження лазерного випромінювання при зниженій прозорості атмосфери і в димах. Випромінювання з вказаною довжиною хвилі менше послаблюється, а отже можна використовувати джерело з меншою енергією випромінювання при збереженні тактико-технічних характеристик далекоміра. У цій статті наведено результати роботи, спрямованої на розробку і виготовлення експериментального зразка лазерного далекоміра, що працює у півторамікронному діапазоні довжин хвилі.

1. Опис далекоміра. Принцип роботи імпульсного далекоміра, як відомо [8], заснований на вимірюванні часових інтервалів між моментами випромінювання зондуєчого світлового імпульсу (старт-імпульс) і моментом реєстрації світлового імпульсу, відбитого від об’єкта (ехо-імпульс). Дальність до зондованого об’єкта може бути розрахована за допомогою такого виразу:

$$L = ct / 2,$$

де L – відстань до об’єкта; c – швидкість світла; t – час проходження імпульсу до об’єкта і назад. Тут передбачається сталість швидкості поширення випромінювання і його пряmolінійність.

У цій роботі застосовувалася параксіальна схема [8] побудови далекоміра, в якій приймальний і передавальний канали не використовують загальних оптичних елементів. Функціональну схему лазерного далекоміра наведено на рис. 1. Імпульсний лазерний далекомір складається з джерела випромінювання 1, модуля фотоприймача стартового імпульсу 2, формуючої оптичної системи передавального

каналу 7, оптичної системи приймального каналу 8, модуля фотоприймача 3, модуля керування лазером і вимірювання відстані 4, індикатора дальності 6, джерела живлення лазера 5. В якості джерела випромінювання використовувався розроблений і створений авторами ітербій-єрбієвий лазер з діодним накачуванням [9, 10]. Цей лазер забезпечує генерацію на довжині хвилі 1,535 мкм і випромінює імпульси з енергією 6 мДж, тривалістю близько 25 нс при розбіжності променя ~ 5 мрад і діаметрі променя 1 мм. Формуюча оптична система була розроблена на основі телескопічної системи Галілея. Вона забезпечувала десятиразове зменшення розходження лазерного променя і збільшення його апертури. Модуль фотоприймача складався з пін-фотодіода серії G8941-03 фірми *Hamamatsu* (діаметр фоточутливої площадки 0,3 мм) і попереднього підсилювача.

Похибка вимірювання дальності до об'єкта, в основному, визначається похибкою вимірювання часового інтервалу між моментами надсилання і приймання випромінювання зондуєчого імпульсу [8]. Похибка вимірювання часового інтервалу, у свою чергу, визначається такими факторами: системною похибкою, викликану різною величиною часової затримки сигналу в каналах стартового і ехо-імпульсів; дискретністю вимірювання часових інтервалів; похибкою визначення часу проходження лазерного променя до зондованого об'єкта і назад, пов'язаною з відмінністю амплітуд ехо-сигналів.

Вплив перших двох чинників може бути мінімізовано шляхом вимірювання відомої відстані до об'єкта і використання тактового генератора з необхідною частотою проходження імпульсів. Третя ж похибка не є систематичною. Як видно з рис. 2, вона пов'язана з прийманням ехо-сигналу. Інтенсивність цього сигналу може змінюватися на кілька порядків залежно від дальності до об'єкта і його відбиваючих властивостей. Крім того, на ехо-сигнал накладаються шуми приймального каналу і завади в середовищі поширення. Все це призводить до сильних спотворень форми ехо-сигналу, а отже, до похибки у визначенні часу надходження імпульсу пороговим пристроєм. Далі розглянемо більш докладно принцип фіксації положення в часі ехо-імпульсу.

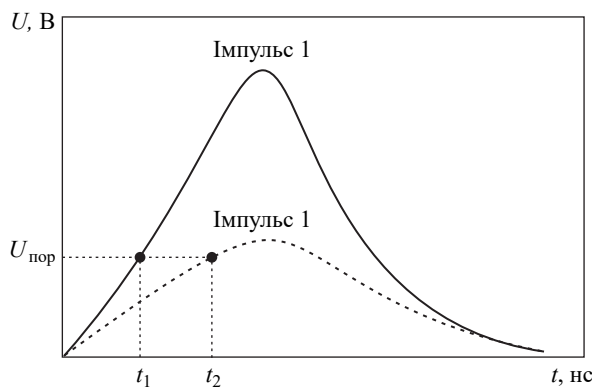


Рис. 2. Часова фіксація ехо-імпульсу за рівнем (t_1, t_2 – моменти фіксації відбитих сигналів; $U_{\text{пор}}$ – поріг спрацювання)

Фіксація моменту надходження відбитого імпульсу здійснюється пороговим пристроєм за обраним рівнем. В якості порогового пристрою зазвичай використовується швидкодіючий компаратор. У цьому випадку момент приходу ехо-імпульсу відповідає точці перетину інтенсивності ехо-імпульсу з пороговим рівнем напруги на часовій шкалі (рис. 2). Момент фіксації залежить як від тривалості переднього фронту зондуєчого імпульсу, так і від усіх параметрів приймального каналу та середовища поширення світлового випромінювання. При незмінній формі ехо-сигналу похибка вимірювання моменту фіксації дорівнює тривалості фронту зондуєчого імпульсу. З метою підвищення точності вимірювання в далекомірах використовуються лазери з тривалістю імпульсів 10 нс і менше. У нашому випадку тривалість імпульсу перевищує 10 нс і для вирішення цієї проблеми використовується метод, описаний нижче.

Для керування лазером і оброблення сигналів використовується спеціально розроблений модуль керування лазером та вимірювання відстані, функціональну схему якого представлено на рис. 3. Основним завданням блока керування є вимірювання часової затримки між стартовим імпульсом і ехо-імпульсом. Обидва ці сигнали приймаються фотоприймачами з попередніми підсилювачами (на схемі не показано). Далі сигнали надходять на логарифмічні підсилювачі, які виконують функції масштабування сигналу. Варто зазначити, що відбитий імпульс може бути досить слабким, отже підсилювач повинен мати широкий динамічний

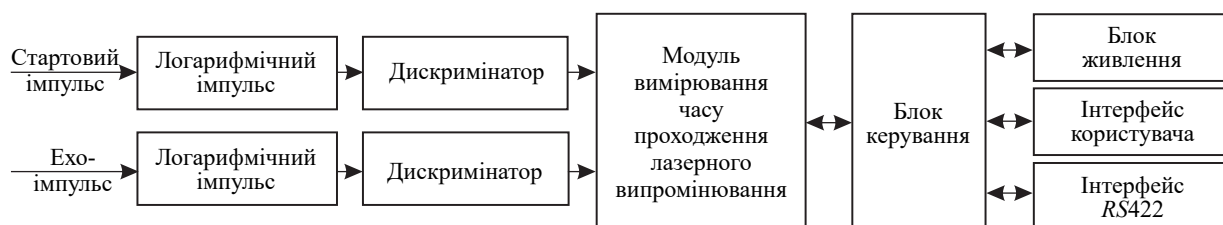


Рис. 3. Функціональна схема модуля керування лазером та вимірювання відстані

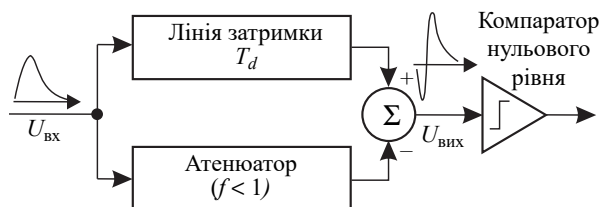


Рис. 4. Загальна схема дискримінатора

діапазон підсилення. Експериментально було встановлено, що динамічний діапазон повинен становити не менше 80 дБ, тому логарифмічний підсилювач побудований на мікросхемі логарифмічного підсилювача виробництва компанії *Analog Devices AD8309*, що забезпечує динамічний діапазон до 100 дБ зі смугою до 500 МГц.

Одна з проблем розробки системи вимірювання затримки між імпульсами полягає в точному визначенні положення імпульсу в часі. У першу чергу це стосується ехо-імпульсу, інтенсивність якого може сильно варіюватися. Тому використання компаратора з фіксованою опорною напругою може вносити досить великі похибки (до декількох метрів) залежно від прийнятого сигналу. Для вирішення цього питання ми використовували часовий дискримінатор для імпульсних лазерних систем [11, 12]. Загальну схему дискримінатора наведено на рис. 4. Дискримінатор містить лінію затримки з часом T_d і атенюатор, який зменшує амплітуду сигналу. Далі зміщений у часі і зменшений за амплітудою сигнали подаються на вхід суматора, де зі зміщеного у часі сигналу віднімається зменшений за амплітудою сигнал. На виході утворюється сигнал з переходом через 0, який вже детектується компаратором. Після цього сигнал стає логічним (амплітуда 3,3 В) і подається на вхід вимірювача затримки між імпульсами. Основою вимірювача є мікросхе-

ма *TDC7200*, яка дозволяє вимірювати затримку до 8 мс з дискретністю 55 пс, що більш ніж достатньо для поставленого завдання. Далі виміряна затримка в цифровому вигляді зчитується блоком керування по інтерфейсу *SPI* і перераховується у відстань. Інформація виводиться на інтерфейс користувача або може бути прочитана зовнішнім пристроєм за допомогою інтерфейсу *RS422*.

Функцією блока керування лазером є також забезпечення і підтримання струму світлодіодної лінійки, за якого відбувається генерація імпульсу випромінювання. Відразу після подачі струму на пристрій блока живлення подається сигнал про видачу імпульсу струму на лазерну лінійку. При цьому блок живлення генерує імпульс струму заданої початкової величини (50 А, параметр налаштовується). Якщо блок керування не отримує стартового імпульсу від лазера, то він не видає сигнал блоку живлення, що відсутня генерація. Наступний імпульс струму збільшується на 1 А, і так до отримання генерації (тобто стартового імпульсу), після чого на інтерфейсі користувача видається сигнал «Готовий».

2. Юстування далекоміра. Одним із найважливіших завдань при розробці та створенні далекоміра є юстування паралельності осей передавального і приймального каналів, а також каналу спостереження і візуалізації, якщо він є [13, 14]. Завданням юстування є виставлення паралельності осей всіх трьох каналів і суміщення фоточутливої площадки фотоприймача з фокальною точкою об'єктива приймального каналу на робочій довжині хвилі лазера. Функціональну схему юстування далекоміра представлено на рис. 5. Методика юстування полягає в такому. Твердотільний ербієвий лазер 2 і оптична система формувача променя 3 утворюють передавальний канал далекоміра. Вони

монтувалися в корпусі далекоміра у вигляді єдиного блока. Перед установкою в ньому було проведено юстування телескопічної системи для отримання мінімального розходження випромінювання (приблизно 0,5 мрад на довжині хвилі 1,54 мкм). Орієнтація передавального каналу далекоміра у подальшому не змінюється та приймається за базову. Тому при юстуванні паралельності осей передавального і приймального каналів юстується саме приймальний канал. Приймальний канал містить оптичну систему реєстрації відбитого від об'єкта випромінювання (об'єktiv 5 і вузькосмуговий фільтр 6) і діафрагму 7 діаметром 0,3 мм, яка розташована в оправі і встановлена в області фокальної площини об'єктива 6. Приймальний канал був також виготовлений у вигляді єдиного блока.

Корпус далекоміра з вмонтованими в нього блоками передавального і приймального каналів встановлювався на юстувальний стенд. Змінюючи положення діафрагми і об'єктива в площині, перпендикулярній оптичній осі, можна змінювати орієнтацію осі приймального каналу. Стенд (рис. 5) містив допоміжний напівпровідниковий лазер видимого діапазону 1, послаблювач 4, призму повного внутрішнього відбиття 5, ПЗЗ-матрицю 10, монітор 11, модуль фотоприймача 8 і осцилограф 12. Для юстування передавального і приймального каналів необхідно повернути випромінювання передавального каналу на 180° і направити його в приймальний канал, в якому випромінювання фокусується у фокальній площині об'єктива приймального каналу. Для повороту випромінювання сформованого лазерного пучка нами була використана зрізана 90° призма 5 [15]. За допомогою допоміжного лазера, що випромінює в червоній області спектра, з'юстованого з променем основного лазера і формувачем пучка, через поворотну призму 5 і об'єktiv приймального каналу 6 формується зображення на діафрагму 7. У корпусі лазерного далекоміра є гвинтовий механізм, що дозволяє переміщати приймальний об'єktiv з діафрагмою у взаємно перпендикулярних напрямках і тим самим здійснювати юстування паралельності оптичних осей каналів. Коли випромінювання допоміжного лазера через діафрагму потрапляє на ПЗЗ-матрицю, на моніторі 11 виникає засвічена пляма на тлі обрисів діафрагми. Після ю-

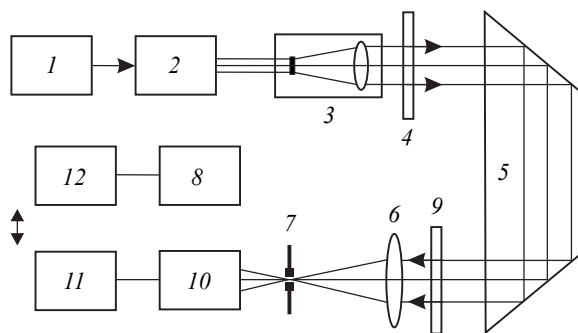


Рис. 5. Функціональна схема стенда для юстування імпульсного лазерного далекоміра: 1 – допоміжний лазер; 2 – лазер далекоміра; 3 – формувач пучка передавального каналу; 4 – послаблюючий світлофільтр; 5 – призма; 6 – об'єktiv приймального каналу; 7 – діафрагма; 8 – фотоприймач випромінювання; 9 – вузькосмуговий світлофільтр; 10 – матриця; 11 – монітор; 12 – осцилограф

тування слід зафіксувати положення приймального об'єктива.

Далі треба визначити положення фокуса ербієвого лазера. Відомо, що мінімальний діаметр плями сфокусованого випромінювання і його положення залежать від довжини хвилі лазерного випромінювання. Послаблюючи світлофільтром 4 випромінювання робочого лазера і переміщаючи діафрагму 7 уздовж осі об'єктива, знаходимо мінімальний розмір засвіченої плями на тлі обрисів діафрагми і фіксуємо її положення. Далі замість діафрагми встановлюється фотоприймач 8 і вузькосмуговий світлофільтр 9 (смуга пропускання 20 нм на довжині хвилі 1,54 мкм) і проводиться корекція положення приймача за максимальним рівнем сигналу. Контроль його проводиться за рівнем сигналу на осцилографі 12. Потім, підбираючи пропускання послаблюючим світлофільтром 4, встановлюється чутливість підсилювача приймача на мінімальний рівень сигналу ~ 10 мВ (рівень шумів ~ 4 мВ).

В імпульсних лазерних далекомірах для полегшення наведення на ціль широко використовуються візирі (системи спостереження і націлювання). Вимірювання дальності до виявленого об'єкта далекоміром проводиться в момент, коли на об'єкт наведено прицілну мітку. Тому точність узгодження оптичних осей передавального і візирного каналів є однією з важливих складових, яка істотно впливає на похибку вимірювання дальності. У сучасних лазерних далекомірах з дальністю роботи до

5...10 км розходження випромінювання становить приблизно 0,5 мрад, а в більш точних системах – 0,3 мрад і менше. Звідси випливає, що узгодження каналу візуалізації з віссю передавального каналу лазерного далекоміра має становити не гірше 0,3...0,5 мрад.

У нашому далекомірі система візуалізації була виконана у вигляді окремого блока. Вона складалася з довгофокусного об'єктива (фокусна відстань 200 мм, межа фокусування від 100 м) з ПЗЗ-матрицею. Сигнал з ПЗЗ-матриці надходить на блок обробки і відображається на 10-дюймовому LCD-моніторі з роздільною здатністю 1091×1300 пікселів. Для фіксації положення прицільної марки екран монітора був забезпечений сіткою. Блок візуалізації конструктивно кріпився до корпусу далекоміра і мав можливість юстування осі системи прицілювання з віссю передавального каналу. Крім того, в разі необхідності, його можна було зняти і встановити без додаткового юстування лазерного далекоміра.

Юстування осі прицілювання з віссю передавального каналу здійснювалося з застосуванням кутового відбивача. Відбивач являє собою пристрій у вигляді тригранного кута з взаємно перпендикулярними металевими або скляними відбиваючими площинами. Випромінювання, що потрапило в кутовий відбивач, як відомо, відбивається в строго зворотному напрямку. Нами був виготовлений кутовий відбивач з трьох мідних полірованих прямокутних трикутників зі стороною біля основи 290 мм.

Знаючи розміри трикутника відбивача і розходження каналу випромінювання, можна розрахувати відстань до кутового відбивача, за якої все випромінювання потраплятиме у відбивач. У нашому випадку ця відстань становила 278 м.

Далекомір спрямовується візуально за допомогою додаткового лазера видимого діапазону спектра на кутовий відбивач, що знаходився на відстані 280 м. Потім ослаблений додатковими світлофільтрами сигнал основного лазера реєструвався через вузькосмуговий світлофільтр ($\lambda = 1,54$ мкм) фотодіодом на екрані монітора. За допомогою тонкого юстування далекоміра по азимуту і куту місця досягали максимального значення сигналу. Після установки далекоміра юстували систему наведення таким чином, щоб маркер на сітці екрана збігався з центром

кутового відбивача. Далі, для перевірки всієї системи, налаштовували далекомір по маркеру на екрані монітора на кутовий відбивач, який встановлювали на різних напрямках і відстанях не більше 280 м.

Керування роботою далекоміра виконувалося за допомогою пульта. На пульті є кнопка запуску і дисплей, на який виводиться інформація про готовність далекоміра до роботи, а також результат вимірювання відстані до об'єкта в метрах. Далекомір може працювати в одноразовому або в імпульсно-періодичному режимі з частотою проходження зондувальних імпульсів 1 Гц.

Перевірка працездатності створеного далекоміра здійснювалася шляхом вимірювання відстаней до натурних об'єктів, що знаходилися на різних відстанях. Зазвичай, в якості цілі часто задають квадрат $2,3 \times 2,3$ м з коефіцієнтом яскравості 0,3 (стандарт НАТО) [16]. Така ціль на дальності 5 км має кутові розміри близько 0,5 мрад. Оскільки використовувати стандартну ціль не було можливості, тому в якості натурних об'єктів були обрані житлові будинки і димохідні труби котельень, що знаходилися на відстанях 330...7000 м. Відстані до обраних об'єктів були попередньо виміряні промисловим імпульсним лазерним далекоміром, що працює на довжині хвилі 1,06 мкм. В якості мішеней на житлових будинках були обрані ліфтові будки, розмір яких становить приблизно 2,5...3,0 м. Далекомір наводився на обрані цілі за допомогою візира по прицільній мітці. В умовах метеорологічної дальності видимості 20...25 км були проведені вимірювання до об'єктів на відстані до 7 км. Похибка вимірювання відстані не перевищувала 3 м. Проведені вимірювання відстані до невеликих об'єктів, що знаходяться на відстані більше 5 км, показали впевнене наведення лазерного далекоміра по маркеру.

Висновки. Розроблено та виготовлено експериментальний зразок імпульсного лазерного далекоміра, що працює у відносно безпечній для зору півторамікронній області спектра. У далекомірі використаний лазерний випромінювач на основі ітербій-єрбієвого скла з діодним накачуванням. Лазер генерує на довжині хвилі 1,54 мкм і забезпечує вихідну енергію 6 мДж в імпульсі тривалістю близько 25 нс при розходженні випромінювання $\sim 0,5$ мрад (піс-

ля 10-разового збільшення) і частоті повторювання імпульсів 1 Гц. Для далекоміра розроблено пристрій оброблення ехо-сигналу, який дозволяє з високою точністю фіксувати часову затримку між стартовим і відбитим імпульсами. Запропоновано та реалізовано ефективний метод юстування приймального каналу да-

лекоміра і каналу спостереження та візуалізації. Проведено натурні випробування лазерного далекоміра. Показано, що створений далекомір дозволяє вимірювати дальність до різних об'єктів, що знаходяться в діапазоні відстаней 140...7 000 м, з похибкою вимірювання, яка не перевищує 3 м.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аснис Л.А., Васильев В.П., Волконский В.Б., Ключин Е.Б., Кулясов А.Г., Мейгас К.Б., Попов Ю.В., Хинрикус Х.В., Яковлев В.В. *Лазерная дальнометрия*. Под ред. В.П. Васильева и Х.В. Хинрикуса. Москва: Радио и связь, 1995. 256 с.
2. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Магдич Л.Н., Погонишев О.О., Садовский П.И., Семенов В.П. Малогабаритный эрбиевый лазерный излучатель с диодной накачкой и акустооптической модуляцией добротности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 5. С. 14–30. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-14-30.
3. Крылов А.А., Бученков В.А., Усков А.В. Компактный Yb:Er-лазер, работающий с частотой следования импульсов 10 Гц в режиме модуляции добротности. *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48, № 7. С. 607–610.
4. Искандаров М.О., Никитичев М.А., Сverdlov М.А., Тер-Мартirosyan А.Л. Твердотельный лазер безопасного для глаза спектрального диапазона с диодной накачкой. *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25, № 3. С. 124–126.
5. Рудницкий Ю.П., Шачкин Л.В., Залевский И.Д. О кинетике безызлучательного переноса энергии в фосфатных Yb-Er-стеклах, возбуждаемых диодным лазером. *Квантовая электроника*. 2002. Т. 32, № 3. С. 197–201.
6. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем. *Докл. БГУИР*. 2003. Т. 1, № 2. С. 59–65.
7. Mierczyk Z. "Eye-safe" laser systems. *Proc. SPIE*. 2000. Vol. 4237. P. 177–188. DOI: doi.org/10.1117/12.402873.
8. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В., Животовский И.В., Сахаров А.А., Семенов В.П. *Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие*. Под ред. В.Е. Карасика. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 92 с.
9. Дзюбенко М.И., Коленов И.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Лазер на эрбиевом стекле с диодной накачкой. *Радиотехника: межвед. науч.-техн. сб. ХНУРЭ*. Харьков, 2019. № 199. С. 104–109. DOI: https://doi.org/10.30837/rt.2019.4.199.13.
10. Дзюбенко М.И., Коленов И.В., Пелипенко В.П., Дахов М.Ф. Импульсный источник питания твердотельных лазеров с диодной накачкой. *Радиотехника: межвед. науч.-техн. сб. ХНУРЭ*. Харьков, 2020. № 201. С. 186–193. DOI: https://doi.org/10.30837/rt.2020.2.201.18.
11. Zheng R. & Wu G. Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding. *Front. Optoelectron*. 2012. Vol. 5, Iss. 2. P. 182–186. DOI: 10.1007/s12200-012-0229-2.
12. Kilpelä Ari, Ylitalo Juha, Määttä Kari, and Kostamovaara Juha. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser ranging measurements. *Rev. Sci. Instrum*. 1998. Vol. 69, Iss. 5. P. 1978–1984. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1148884.
13. Кувшинов Н.Г., Нужин А.В., Пронин В.В. Юстировка приемного канала импульсного лазерного дальномера. *Оптический журнал*. 2017. Т. 85, вып. 2. С. 67–71.
14. Белойван П.А., Назаров В.Н., Латыев С.М., Салогубова И.С., Пашкевич М.Л. Автоматизированная юстировка параллельности энергетической оси передающего канала и оси приемного канала лазерного дальномера. *Современные проблемы науки и образования*. 2016. № 2, Ч. 2. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22779
15. *Устройство контроля, юстировки и сведения оптических осей каналов многоканальных приборов и широкополосных излучателей в видимом и ИК-диапазонах спектра*: пат. 2511204 Российская Федерация: МПК G01B11/27, G01M11/00 / А.Н. Подкатилин, А.Ю. Чистяков. № 2012124515/28; заявл. 13.06.2012; опубл. 10.04. 2014, Бюл. № 10. 8 с.
16. Вильнер В., Волобуев В., Ларюшин А., Рябокуль А. Достоверность измерений импульсного лазерного дальномера. *Фотоника*. 2013. № 3. С. 127–136.

Стаття надійшла 11.06.2020

REFERENCES

1. Vasiliev, V.P., and Hinrikus, H.V. ed., 1995. *Laser ranging*. Moscow: Radio and communication Publ. (in Russian).
2. Bondarenko, D.A., Karasik, V.E., Magdich, L.N., Pogonyshchev, O.O., Sadovskiy, P.I., Semenov, V.P., 2017. Compact erbium-glass diode pumping laser emitter with acousto-optic Q-switching. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Instrum. Eng.*, 5, pp. 14–30. DOI: 10.18698/0236-3933-2017.
3. Krylov, A.A., Buchenkov, V.A. and Uskov, A.V., 2018. Compact Q-switched Yb-Er laser with a pulse repetition rate of 10 Hz. *Quantum Electron.*, **48**(7), pp. 607–610. (in Russian).
4. Iskandarov, M.O., Nikitichev, A.A., Sverdlov, M.A., Ter-Martirosyan, A.L., 2015. Diode pumped solid state eye safe laser. *Sci. Instrum.*, **25**(3), pp. 124–126 (in Russian).
5. Rudnitskii, Y.P., Shachkin, L.V., Zalevskii, I.D., 2002. On the kinetics of nonradiative energy transfer in Yb-Er phosphate glass excited by a diode laser. *Quantum Electron.*, **32**(3), pp. 197–201 (in Russian).

6. Stavrov, A.A., Pozdnykov, M.G., 2003. Pulse laser Rangefinders fo Optical Locating Systems. *Doklady BGUIR*, **1**(2), pp. 59–65 (in Russian).
7. Mierczyk, Z., 2000. "Eye-safe" laser systems. *Proc. SPIE*, **4237**, pp. 177–188.
8. Karasik, V.E. ed., 2012. *Laser devices and methods of measuring range: textbook*. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (in Russian).
9. Dzyubenko, M.I., Pelipenko, V.P., Kolenov, I.V., Dahov, N.F., 2019. Laser on erbie glass with diode pumping. In: *Radiotekhnika*. Kharkov: NURE Publ. 199, pp. 104–109 (in Russian).
10. Dzyubenko, M.I., Kolenov, I.V., Pelipenko, V.P., Dahov, N.F., 2020. Pulse power supply of diode-pumped solid-state lasers. In: *Radiotekhnika*. Kharkov: NURE Publ. 201, pp. 186–193 (in Russian).
11. Zheng, R. & Wu, G., 2012. Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding. *Front. Optoelectron.*, **5**(2), pp. 182–186. DOI: 10.1007/s12200-012-0229-2.
12. Kilpelä, Ari, Ylitalo, Juha, Määttä, Kari, and Kostamovaara, Juha, 1998. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinding measurements. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**(5), pp. 1978–1984. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1148884>.
13. Kuvshinov, N.G., Nugin, A.V., Pronin, V.V., 2017. Alignment of the receiving channel of a pulsed laser rangefinder. *J. Opt. Technol.*, **85**(2), pp. 115–118. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000115>.
14. Beloyvan, P.A., Nazarov, V.N., Latiev, S.M., Sologubova, I.S., Pashkevich, M.L., 2016. Automatic adjustment of parallelism of theenergy axis of the transmission channel and the axis of the receiving channel of a laser rangefinder. *Mod. Problems Sci. Educ.*, 2 (pt. 2) (in Russian). Available from: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22779>
15. Podkatilin, A.N., Chistyakov, A.Yu., 2014. *Apparatus for inspecting, adjusting and converging optical axes of channels of multichannel devices and broadband radiator in visible and infrared regions*. Russian Federation. Pat. 2511204 (in Russian).
16. Vilner, V., Volobuev, V., Larjushin, A., Ryabokul, A., 2013. Reliability of measurements of a pulsed laser range finder. *Photonics*, 3, pp. 127–136 (in Russian).

Received 11.06.2020

M.I. Dzyubenko^{1,2,3}, I.V. Kolenov¹, V.P. Pelipenko¹, N.F. Dakhov¹, A.V. Degtyarev¹

¹ O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

² V.N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³ Kharkiv National University of Radio Electronics
14, Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

LASER RANGEFINDER OF RELATIVELY EYE-SAFE WAVELENGTH RANGE

Subject and Purpose. The development and prototype making of a laser rangefinder operating in the 1.50...1.70 μm spectral region is reported. This wavelength region is attractive to both laser producers and laser users for, first of all, relative eye-safety of radiation.

Methods and Methodology. The paraxial scheme of rangefinder construction is used, involving a software-controlled power supply of laser radiation with technical arrangements providing its adaptation to varying operating conditions. The alignment of the transceiver channels is provided with laser beam visualization methods.

Results. A pulsed laser rangefinder operating at a 1.54 μm wavelength has been developed, a prototype has been made. The rangefinder essentially consists of the transmitting and receiving channels and the visual channel for targeting. The radiation source is a pulsed laser on ytterbium-erbium glass with semiconductor diode pumping and modulated Q -factor. The laser provides a 6 mJ power pulse of ~25 ns duration and ~5 mrad radiation divergence. A laser light spot of a required aperture is formed using a Galilean telescope system. For the photodetector of the reflected radiation, a pin-photodiode with a photosensitive area diagonal of 0.3 mm and a 2.5 ns time resolution is used. The echo signal processing module has been developed and performed, providing a high-precision registration of a time delay between the starting and reflected pulses. An effective method with the use of a charge-coupled device and an LCD monitor has been proposed and implemented for the alignment of all the three rangefinder channels. The rangefinder can operate in a single-pulse or repetitive-pulse mode with a probing pulse repetition rate of 1 Hz.

Conclusion. A pulsed laser rangefinder operating in a relatively eye-safe spectrum region has been developed, a prototype has been made. The field tests have shown that the created rangefinder measures an object distance within 140...7000 m with a measurement error no worse than 3 m.

Key words: ytterbium-erbium laser, diode pumping, transceiver channels, imaging channel, channel alignment.