
СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

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

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при ОНУ імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

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

Анотація. Розроблено установку фізичного моделювання процесів лазерної локації з урахуванням аерозольних завадових явищ природного і штучного походження та активного фонового засвічення. Установка моделює процеси виявлення і розпізнавання об'єкта лазерною інформаційно-вимірювальною системою (ЛІВС) в умовах зовнішніх дестабілізуючих чинників та перешкод в атмосферному каналі.

Ключові слова: фізичне моделювання, лазерна інформаційно-вимірювальна система, атмосферний канал, об'єкт, дестабілізуючі чинники.

INSTALLATION FOR PHYSICAL SIMULATION OF LASER LOCATION PROCESSES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, V. V. Yanko, L. M. Budiynskaya, I. A. Ivanchenko, A. P. Balaban

Abstract. A device for physical modeling of laser ranging processes has been developed, taking into account aerosol interference phenomena of natural and artificial origin and active background illumination. The installation simulates the processes of object detection and recognition by a laser information-measuring system (LIMS) under conditions of external destabilizing factors and obstacles in the atmospheric channel.

Keywords: physical modeling, laser information-measuring system, atmospheric channel, object, destabilizing factors.

УСТАНОВКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

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

Аннотация. Разработана установка физического моделирования процессов лазерной локации с учетом аэрозольных помеховых явлений природного и искусственного происхождения и активной фоновой засветки. Установка моделирует процессы обнаружения и распознавания объекта лазерной информационно-измерительной системой (ЛИВС) в условиях внешних дестабилизирующих факторов и препятствий в атмосферном канале.

Ключевые слова: физическое моделирование, лазерная информационно-измерительная система, атмосферный канал, объект, дестабилизирующие факторы

Мета - розробка та створення інформаційно-вимірювальної установки для встановлення порогової чутливості, ймовірності та граничної точності безконтактного високоточного виявлення, а також вимірювання дальності до об'єкта високоточною локаційною ЛІВС в умовах завод різного типу та дестабілізуючих чинників методами оптичної локації.

Вступ

Проведення натурних вимірювань виявлення в умовах різних завод природного та штучного походження для різних цілей являє собою дуже складне і занадто затратне та коштовне завдання. На сучасному етапі є неоднозначний опис як вхідних, так і вихідних сигналів з використанням різних фізико-математичних підходів [1]. Установка створена для дослідження можливостей і ефективності роботи ЛІВС в складі системи виявлення і розпізнавання об'єктів, з урахуванням параметрів зондуючого пучка, відбивних характеристик поверхні та впливу атмосфери з дрібнодисперсними включеннями і іншими факторами навколишнього середовища. Необхідним є визначення ефективності ЛІВС при аналізі відбитих від об'єкта сигналів, що приймає фотоприймальний пристрій. Аналізуючи адитивну суміш сигналу від об'єкту та заводових складових ЛІВС проводить високоточне вимірювання параметрів за рахунок удосконалення методів обробки сигналів оптико-електронної системи. У розробленій установці використані взаємно доповнюючі методи фізичного і математичного

модельовання відбивних властивостей об'єктів. В ЛІВС опромінення об'єкту нестационарно, тому що використовуються короткі зондуючі імпульси, що дозволяє досягати високої роздільної здатності локаційної системи, але робить невідомими форму і тривалість відбитих від об'єктів імпульсів, що виключає класичну узгоджену фільтрацію сигналів. Суть активної лазерної локації полягає в отриманні інформації про об'єкт локації (цілі) по відбитому сигналу зондуючого випромінювання. Для раціонального проектування ЛІВС і оцінки їх можливостей необхідно:

- вивчення закономірностей проходження, поглинання і розсіяння оптичного випромінювання на шляху джерело-середовище-об'єкт-середовище-фотоприймач і формування реєстрованих приймальною системою сигналів, створених відбитим від об'єктів і фонів (поверхонь, ландшафтних утворень, середовища) випромінюванням;

- отримання даних про перешкоди для заданих умов локації, виявлення і оцінки інформативності характерних ознак об'єктів і фонів (завод);

- оптимізації формування полів зондуючого і прийому (обробки) відбитого випромінювання на тлі шумів і перешкод;

- виявлення, вимірювання параметрів і розпізнавання об'єктів вимагає досить повного і адекватного реальним умовам локації опису відбитих від об'єктів і фонів сигналів.

Наявні в літературі дані по відбивним характеристикам об'єктів і фонів з урахуванням умов лазерної локації відносяться в основному

до інтегральних амплітудних характеристик на довжинах хвиль видимого та ближнього інфрачервоного діапазону [2] і однопозиційних умов локації. Однак, навіть таких відомостей по амплітудним, а також часовим, просторовим і іншим відбивним характеристикам об'єктів і фонів для всього різноманіття параметрів систем і умов локації недостатньо [3, 4]. При цьому експериментальні дані, отримані, як правило, розробниками систем в процесі їх випробувань, не завжди методично і метрологічно обґрунтовано. Відомі математичні моделі не забезпечують прийнятну точність визначення відбивних характеристик об'єктів і фонів складної конфігурації з направлено - розсіючими і бликуючими (дзеркальними) покриттями [5, 6]. Відмінні ознаки об'єктів і фонів, що містяться в реалізаціях реєстрованих сигналів і перешкод, покладаються в основу рішення локаційних завдань, визначають структуру, правила прийняття рішення та вихідні характеристики систем [7, 8].

Виявлення характерних ознак об'єктів і фонів в реєстрованих сигналах та оцінка їх інформативності необхідне для забезпечення вирішення завдань виявлення, вимірювання і розпізнавання з максимальною ефективністю в заданих умовах застосування [9, 10]. Дослідження в забезпеченні вирішення зазначених проблем, незважаючи на їх актуальність і практичну значимість, не знайшли в літературі досить повного висвітлення [11, 12].

Проведено аналіз можливих експериментальних і розрахункових методів досліджень відбивних об'єктів, визначена їх узагальнена структура і фізичні аспекти, які повинні бути враховані при моделювальних і натурних дослідженнях для отримання на їх основі сигналів, адекватних реальним умовам локації [13, 14].

Важливо застосування сучасних цифрових систем керування технологічними процесами випробувань, потужних вимірювально-обчислювальних комплексів обробки та отримання інформаційних даних, що дозволяють скоротити загальну тривалість експериментального відпрацювання ЛІВС, більш точно відтворювати реальні умови і підвищити якість створюваних систем [15].

Результати розробки і їх обговорення

Розроблена установка для досліджень ЛІВС основних характеристик – точність і завадозахист оптико-електронних систем, що функціонують в умовах рухливих світлових завод. Установка являє собою по суті автоматизоване робоче місце, яке дозволяє здійснювати функції відтворення фоноцільової та заводої обстановки, а також умов поширення оптичного випромінювання і впливу на ЛІВС наступних штучних перешкод:

- маскуючих, що знижують потужність лазерного випромінювання;
- імітуючих, що створюють помилковий об'єкт, що дезінформує;
- потужне фонове засвічення фотоприймального пристрою лазерним випромінюванням імітатора перешкоди.

Установка включає наступні елементи: первинні перетворювачі, апаратура реєстрації і аналізу; система управління; джерела живлення, об'єкт випробування, контрольно-вимірювальна апаратура; апаратура перевірки функціонування випробуваного об'єкта; допоміжні пристрої і пристосування. Установка використовується для створення нових технічних рішень і розробки алгоритмів при створенні ЛІВС.

Моделювання роботи ЛІВС демонструє їх стійкість до збурень, працездатність в різний час доби, в складних метеоумовах, а також можливість селекції імпульсів випромінювання від помилкових об'єктів, володіти ступенем адаптації до умов фоноцільової ситуації. Тому при проектуванні і дослідженні перспективних ЛІВС велику роль відіграють методи імітаційного моделювання, які дозволяють відтворити процес функціонування системи і визначити її ймовірно - часові характеристики.

При проектуванні ЛІВС особлива увага приділялася заводостійкості. Для повноцінного дослідження різних характеристик ЛІВС методом імітаційного моделювання проводилися експерименти в умовах максимально наближених до реальності.

При різних видах випробувань установка дозволяє методом напівнатурного моделювання проводити оцінку заводостійкості та точнос-

ті вимірювань ЛІВС в складних атмосферних умовах (туман, дощ, задимлення, входження в хмарність), коли необхідно боротися з завадами зворотного розсіювання при відсутності апріорної інформації про характеристики перешкод [16, 17]. Установка дозволяє перевіряти функціонування макета високоточного ЛІВС при виявленні об'єктів в лабораторних умовах за складної фоноцільової обстановки.

Проведено дослідження поведінки відбитого сигналу при одночасній наявності різних видів поверхні, а також впливу параметрів зондуючого випромінювання на точність виявлення об'єкта. Випробування макета ЛІВС показали, що він забезпечує видачу командного сигналу на фіксованій дистанції 3,5 м від поверхні об'єкта локації з точністю 0,001 м при використанні оптичного випромінювання з довжиною хвилі 905 нм. Виявлення і подальший аналіз поведінки поверхні об'єкта починається з відстані 4,5 м.

Інформаційно-вимірювальна система включає до свого складу: блоки реєстрації та обробки зворотного сигналу, блок управління для взаємодії всіх вузлів ІВС, а також блок формування параметрів зондуючого пучка лазерного випромінювання. Для ефективного функціонування ЛІВС важливе значення мають параметри зондуючого пучка, який формується лазерними випромінювачами, потужність випромінювання, діапазон довжин хвиль, діаметр пучка, частота генерації, шпаруватість імпульсів і т.д. Більшість подібних завдань вимагає поряд з даними параметрами виконання специфічних умов, як перебудови частоти випромінювання, високої стабільності енергії імпульсів випромінювання та інших. Ці умови накладають суттєві обмеження на вибір типу лазера.

Основними завадовими впливами в даному оптичному діапазоні в реальних умовах є щільні дим і туман, сильний дощ, негусті гілки з листям дерев і чагарників, тобто рознесені, не суцільні завади, штучні потужні імпульсні і постійні світлові засвічення, а також відблиски сонця, відбиті від поверхні води або інших дзеркальних об'єктів.

Виходячи з дальності порога чутливості ЛІВС установка, що моделює рознесені не су-

цільні завади, засвічення з величиною світлового потоку до 11000 Лм, виконана у вигляді ізолюваного від зовнішнього середовища відсіку (тунелю) довжиною 5 м. Тілесний кут діаграми спрямованості приймального об'єктива ЛІВС становить 10° , отже на відстані спрацьовування 4,5 м діаметр поля зору оптичної системи складає 0,45 м, що визначає поперечний перетин тунелю у вигляді прямокутної трапеції з габаритними розмірами 0,6 x 0,5 x 0,4 м. Структура установки наведена на рисунку 1.

Для зручності спостереження за становищем та дотримання єдності всіх пристроїв та засобів, що використовуються у вимірах, передня стінка тунелю виготовлена зі скла, всі інші стінки непрозорі. Випробуваний макет ЛІВС встановлюється у середині правої стінки тунелю. Імітована поверхня об'єкту локації виконана у вигляді вертикального плоского екрану, розташованого перпендикулярно осі тунелю. Екран встановлено на пересувний майданчик, який за допомогою тросового механізму пересувається уздовж осі тунелю. Поточна відстань від екрану до макета ЛІВС контролюється візуально за допомогою стрічки рулетки, яка закріплена зовні тунелю. Зовнішній вигляд установки представлено на фото рисунку 2.

Номери позицій елементів, що входять до складу установки, наведені нижче:

1 - герметичний тунель довжиною 5,0 м, 2 - основа тунелю, 3 - верхня кришка, 4 - пересувний екран, 5 - повітропровід системи вентиляції круглого перетину, 6 - повітропровід системи вентиляції прямокутного перетину, 7 - осьовий вентилятор, що відкачує повітря з установки, 8 - впускне вікно витяжної вентиляційної системи, 9 - комп'ютер, 10 - цифровий USB-осцилограф DSQ-5200A фірми Hantek, 11 - набір знімних панелей для пересувного екрану з відомими коефіцієнтами відбиття, 12 - цифровий вимірювач прозорості (ВП) аерозольних утворень, 13 - лабораторний блок живлення (БЖ) макета ЛІВС, 14 - повітряний компресор, 15 - лабораторний блок живлення повітряного компресора, 16 - ІЧ-відеокамера, що призначена для візуалізації проходження випромінювання макета ЛІВС в середовищі, що моделюється, і визначення положення поля зору В на пересувному екрані, 17 - стрічка

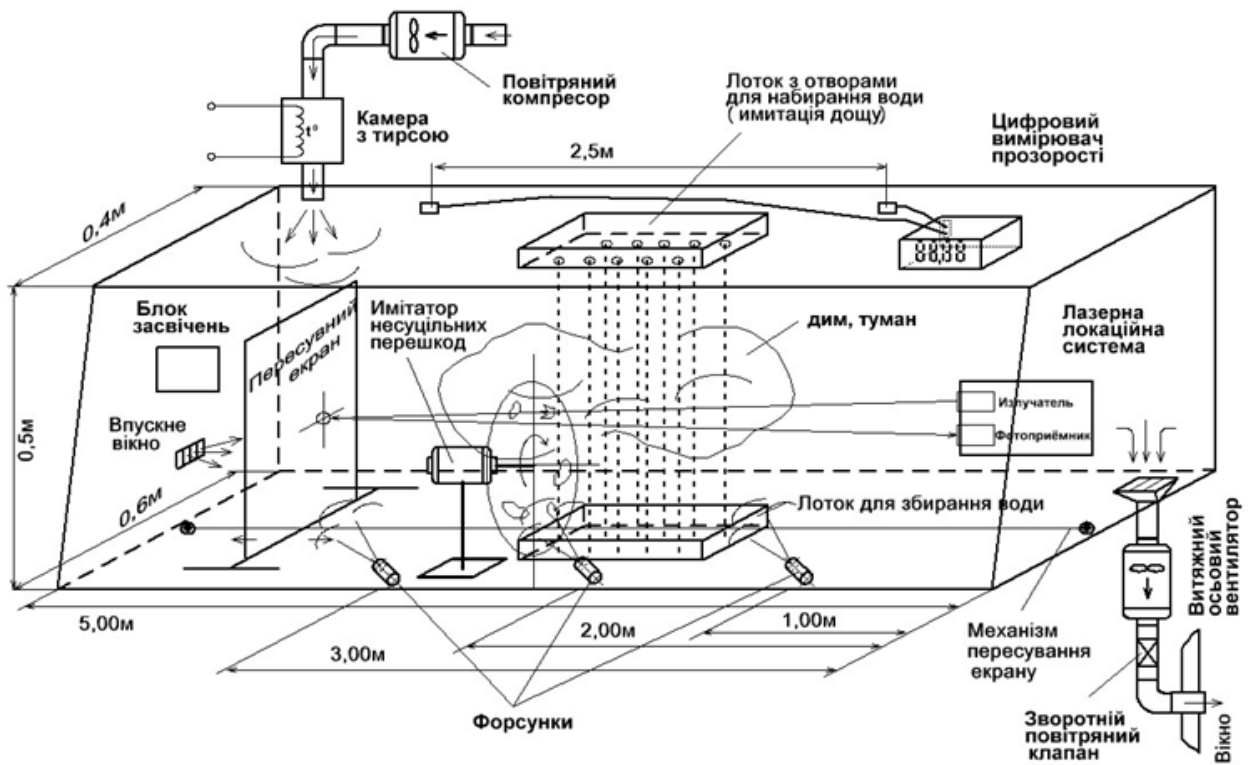


Рис. 1. Структура вимірювальної установки



Рис. 2. Зовнішній вигляд установки

рулетки (відстань від макета до пересувного екрану), 18 - зображення внутрішнього простору тунелю виміральної установки, що надходить з відеокамери на монітор вимірального комп'ютера в ІЧ-діапазоні.

Наявність аерозольних утворень (дим, туман, дощ) в атмосферному каналі призводить до поглинання або розсіювання випромінювання, що зондує ЛІВС. Для заповнення білим або чорним димом тунелю установки, що моделює, розроблено генератор диму, який представлено на фото рисунку 3.



Рис.3. Генератор диму

Методика моделювання і випробувань ЛІВС

Задимлення внутрішнього простору моделюючої установки проводиться таким чином. Одночасно включаються повітряний компресор і витяжний вентилятор. Повітряний компресор нагнітає повітря з приміщення лабораторії в камеру з тирсою. Для утворення білого диму використовується суміш зволоженої березової тирси і соломи у співвідношенні 1:1. Для утворення чорного диму зволоженою сосновою тирсу перемішують з машинним маслом. подача напруги на встановлену в камері спіраль, що нагрівається, призводить до утворення диму в масі зволоженої тирси. Разом з потоком повітря від компресора дим переноситься всередину установки, заповнює внутрішній обсяг і з іншого боку тунелю видаляється з установки за допомогою витяжного вентилятора. Продуктивність витяжного вентилятора регулюється і підбирається таким чином, щоб

усередині установки створювалося невелике розрідження, що перешкоджає виходу диму в приміщення лабораторії. Для видалення задимлення після проведення вимірювань установка обладнана витяжною вентиляційною системою.

Створення туману всередині моделюючої установки проводиться за допомогою трьох форсунок, розташованих на відстанях 1,0 м, 2,0 м і 3,0 м від макета ЛІВС. До трьох форсунок по силіконових трубках самопливом підводиться попередньо підігріта до 60° вода з одного накопичувального бачка. Одночасно до всіх трьох форсунок під тиском компресора надходить повітря. Конструкція застосованих форсунок дозволяє отримати дрібнодисперсну суспензію водних крапель у повітрі, аналогічну щільному туману. При проведенні вимірювань характеристик макета в тумані непрозорі стінки тунелю установки закриваються поліетиленовою плівкою, а на дно вкладається кілька шарів гігроскопічного матеріалу.

Імітація короткочасного сильного дощу в установці реалізується за допомогою двох лотків довжиною 1,0 м, шириною 0,4 м і глибиною 0,08 м, з'єднаних між собою металевими стійками. У верхньому лотку просвердлено 160 отворів діаметром 4 мм. При проведенні випробувань вода подається у верхній лоток по шлангу з крана в обсязі 25 л і через отвори самопливом стікає в нижній лоток, утворюючи в полі зору макета ЛІВС потік хаотично мигтливих крапель. Нижній лоток призначений для збору з верхнього лотка води, що стікає. Залежно від мети випробувань система лотків може встановлюватися, зніматися і переміщатися уздовж усього тунелю випробувальної установки.

Природними не суцільними (рознесеними) завадами, що впливають на точність визначення заданої дистанції спрацьовування ЛІВС до поверхні цілі, є чагарники і невисокі дерева з рідкою кроною, які присутні на місцевості. Для моделювання такої завади розроблено імітатор, наведений на рисунку 4.

Випробувальна установка укомплектована двома такими імітаторами, які встановлюються в поле зору макета ЛІВС на різних дистанціях. Імітатор являє собою диск з органічного



Рис. 4. Імітатор моделювання несуцільних завад

скла, встановлений на вісь електродвигуна. На поверхню диска наклеєні в довільному хаотичному порядку непрозорі шматки паперу різного кольору і форми, що імітують листяний покрив. Двигун закріплений на пересувній підставці, яка дозволяє переміщати його на певну відстань відносно макета ЛІВС і виставляти необхідну висоту над поверхнею підстави моделюючої установки. При подачі напруги живлення на електродвигун прозорий диск обертається із заданою швидкістю, що дозволяє перекривати поле зору макета ЛІВС на різний час, імітуючи тим самим листя і гілки, що миготять. Встановлені на різних відстанях два імітатори одночасно моделюють протяжні не суцільні завади. Площина диска імітатора встановлюється під деяким кутом до осі поля зору макета, що виключає дзеркальне відбиття лазерного випромінювання ЛІВС в поле зору

об'єктива ФП. На рисунку 4 демонструється взаємне розташування імітатора моделювання несуцільних завад та макета ЛІВС в тунелі установки. Обертання диска з різною швидкістю дозволяє імітувати рух макета ЛІВС відносно несуцільних завад з лінійною швидкістю до 100 м/с.

Для аналізу роботи ЛІВС в умовах аерозольних утворень різного походження, як природних, так і штучних необхідно проводити безперервний контроль та вимірювання оптичної щільності або прозорості середовища.

Оцінка щільності аерозольних утворень проводиться різними методами. Найбільш придатними для швидких вимірювань у складі імітаційної установки є методи визначення оптичної щільності (прозорості) середовища та масової концентрації частинок. Прилади, призначені для визначення оптичної щільності середовища, ґрунтуються на законі Бугера-Ламберта-Бера про ослаблення монохроматичного променя світла при проходженні крізь середовище, яке поглинає. Для визначеності необхідно привести формули перерахунку величини загасання в відсотках у величину загасання M в децибелах (дБ) і назад:

$$M [\text{дБ}] = 10 \lg [100 / (100 - \Delta)],$$

$$\Delta [\%] = 100 - 100 / 10^{M/10}.$$

Для загального уявлення деякі значення загасання M у відсотках та децибелах, а також величина коефіцієнта передачі $K_{\text{п}}$ в «разах», наведені в таблиці 1, де

$$K_{\text{п}} = 1 - \Delta / 100,$$

$$\Delta = 100 (1 - K_{\text{п}}).$$

Для визначення питомої оптичної щільності оптичного середовища m в [дБ/м] і d в %/м, необхідно величину затухання M [дБ] розділити на величину довжини оптичного променя в метрах. Результати розрахунків оптичної щільності середовища надано в таблиці 2 і на рис. 6.

Таблиця 1

Величини загасання сигналу у відсотках та децибелах

$\Delta, \%$	10	15	20	25	30	40	50	60	70	90	95	99
$K_{\text{п}}$	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1	0,05	0,01
$M, \text{дБ}$	0,46	0,71	0,97	1,25	1,55	2,22	3,01	3,98	5,23	10	13,01	20

Таблиця 2

Величини питомої оптичної щільності в %/м і дБ/м

d, %/м	0,5	1	2	3	4	5	7	10	15	20
m, дБ/м	0,022	0,044	0,088	0,132	0,177	0,223	0,315	0,458	0,706	0,969

Для контролю оптичної щільності середовища установка оснащена розробленим та виготовленим цифровим вимірником прозорості (ВП), принцип дії якого засновано на вимірі відношень напруги, пропорційних потокам випромінювання, що попадають на блок ФП при відсутності диму і в задимленому середовищі. Структурна схема ВП, що дозволяє описати алгоритм вимірювання поточного значення оптичної щільності середовища, представлена на рисунку 5.

Алгоритм роботи наступний. При включенні блоку живлення електричний сигнал типу «меандр» задаючого генератора ЗГ, надходить на калібратор К. Калібратор складається із змінного багатооборотного прецизійного резистора і двох узгоджувальних каскадів. З калібратора через вихідний каскад ВК посилений по струму сигнал подається на лазерний випромінювач. Сфокусований за допомогою передавального об'єктива промінь світла, пройшовши через середовище, що моделюється, надходить у приймальний об'єктив і потім на фотоприймач (ФП). З ФП сигнал надходить на резонансний підсилювач (РП). Посилена по амплітуді і виділена з сигналів завад перша гармоніка вимірювального сигналу надходить на точний випрямляч (ТВ). Випрямлений сигнал, що оцифровано за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), потім відображається на індикаторі (ІНД). Необхідна точність і стабільність вимірювання поточного значення амплітуди сигналу, що пройшов через середовище, досягається застосуванням температурно-стабільного резонансного підсилювача та ТВ змінного струму. ТВ забезпечують вихідний сигнал, рівний абсолютній величині вхідного, але без втрати напруги, що виникає при зміщенні випрямляючого діода в прямому напрямку, дозволяючи використовувати їх у діапазоні мілівольт.

В зоні вимірювання ВП визначає значення оптичної щільності середовища. Розрахунок

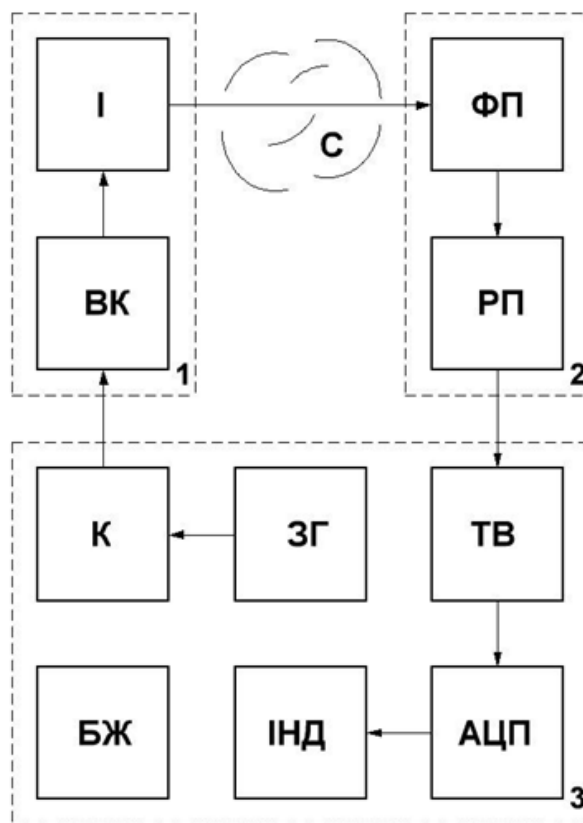


Рис. 5. Структурна схема вимірювача прозорості.

- 1 - передавальний блок; 2 - приймальний блок; 3 - блок вимірювання та індикації;
- Л - лазерний випромінювач (довжина хвилі 905 нм); ВК - струмовий вихідний каскад; К - калібратор (вузол прецизійного регулювання рівня сигналу, що зондує);
- ЗГ - генератор, що задає 100 кГц;
- ФП - фотоприймач; РП - резонансний підсилювач; ТВ - точний випрямляч;
- АЦП - аналогово-цифровий перетворювач; ІНД – індикатор

оптичної щільності диму D проведено за формулою:

$$D = 10 \log \frac{U_0}{U_i}, \text{Дб},$$

де: U_0 – напруга, пропорційна потоку випромінювання при відсутності диму, В; U_1 – напруга, пропорційна потоку випромінювання в задимлене середовище, В.

Для збільшення завадостійкості і зменшення дрейфу величини шуканого параметра від впливу температури, а також природних і штучних, постійних та імпульсних засвічень, використана модуляція опорного світлового потоку сигналом типу «меандр» з частотою 100 кГц. Показання в мілівольтах ВП можна прирівняти до величини пропускання середовища в відсотках. Проведено калібрування ВП шляхом установки перед приймальним об'єктивом нейтральних світлофільтрів з набору зразків кольорових оптичних стекел з відомими коефіцієнтами передачі на робочій довжині хвилі світла випромінювача. Калібрування значення загасання, рівного 1,0, за відсутності середовища, що моделюється, і відповідних значень при внесенні світлофільтрів проводиться через 2 години після вологого прибирання приміщення лабораторії. Зовнішній вигляд ВП представлено на фото рисунку 6.



Рис. 6. Зовнішній вигляд вимірювача прозорості

Вимірник є стаціонарним приладом постійної дії, працездатний при фоновій освітленості до 500 л, яку створюють природні або штучні джерела освітлення. Конструктивно він знаходиться в блоці управління та забезпечує вимірювання в діапазоні хвиль 850-950 нм.

До складу ВП входять: блок вимірювання та індикації, встановлений на верхній кришці установки, а також приймальний (рисунок 7) і передавальний (рисунок 8) блоки, встановлені всередині тунелю уздовж задньої стінки установки.



Рис. 7. Розміщення приймального блоку



Рис. 8. Розміщення передавального блоку

Юстирування передавального та приймального блоків, поєднання полів зору їх об'єктивів, розташованих уздовж однієї оптичної осі проводяться за допомогою рухомого кріплення передавального блоку. Відстань між передавальним і приймальним блоками всередині установки становить 3,5 м. До складу принципової схеми ВП не введено обчислювальні вузли. На індикаторі пристрою в безперервному режимі виводиться поточне значення амплітуди сигналу, що пройшов через середовище з аерозолем, в мілівольтах. Розрахунок поточного значення оптичної щільності середовища і подальше внесення отриманих величин в таблиці результатів проводиться вручну. Обчислювальний та індикаторний блоки ВП встановлені поза відсіком установки на її верхній кришці. Блоки В і ФП цифрового ВП з'єднані з блоком індикації за допомогою дротів. Поля зору блоків В і ФП цифрового ВП зорієнтовані уздовж однієї оптичної осі назустріч один одному.

На створеній установці проведено експериментальні дослідження роботи макета ЛІВС на засаді лабораторних випробувань, метою яких є оцінка точності спрацьовування (визначення дальності до поверхні цілі) в умовах впливу рознесених (не суцільних) завад, інтенсивного дощу, густого туману, диму, інтенсивних постійних та імпульсних світлових завад (засвічень) і сонячних відблисків, тобто перевірка завадо захисту макету ЛІВС.

Для спостереження за поширенням зондуючого випромінювання в середовищі, яке моделюється, а також фіксації положення поля зору оптичної системи макета ЛІВС на пересувному екрані, використовується ІЧ-відеокамера 16. Чутливість відеокамери в ІЧ-діапазоні отримана за рахунок видалення з її оптичної системи світлофільтру жовтого кольору. Спостереження за формою сигналів в схемі приймально-передавальних каналів макету ЛІВС проведено за допомогою цифрового USB-осцилографа DSQ-5200A фірми Nantek. Застосовані в оснащенні установки осцилограф та ІЧ-відеокамера представляють отримані дані через USB-порт. Для візуалізації переданих відеокамерою зображень і використання програмного забезпечення осцилографа

використаний комп'ютер HP Compaq DC7200, позиція 9.

Джерелом постійної завади (засвічення) є світлодіодна матриця Epistar ARPL-100W-3500K з однолінзовим об'єктивом, яка випромінює світловий потік величиною до 11000 Лм в зону приймального об'єктива ЛІВС. Для отримання інтенсивної імпульсної завади струм, що проходить через світлодіодну матрицю, промодульовано сигналом типу «меандр» з частотою 1,0 кГц. Оцінка точності вимірювання дальності макетом ЛІВС до поверхні цілі, проведена в умовах потужних імпульсних і постійних світлових завад (засвічень), джерело яких встановлено всередині тунелю вимірювальної установки (рисунок 1) на оптичній осі ФП за межами зони чутливості макета ЛІВС (4,0 м).

Перед проведенням серії вимірювань проводиться калібрування середовища ВП. Працездатність макета ЛІВС визначається за допомогою відеокамери за наявністю зображення В на поверхні пересувного екрану і появи сигналу спрацьовування при пересуванні екрану в межах робочої зони.

Пересувний екран за допомогою тросового механізму встановлюється в початкове положення на відстані 4,0 м поза зоною чутливості макета ЛІВС. Подається напруга на ВП та генератор диму. Залежно від необхідного кольору диму в камеру генератора диму завантажуються та чи інша суміш вологої деревної тирси. При досягненні необхідної оптичної щільності диму, значення якої контролюється за допомогою ВП, генератор диму відключається. Через деякий час, необхідний для рівномірного розподілу диму по всьому об'єму установки проводяться вимірювання дистанції спрацьовування макета ЛІВС в зазначених умовах.

Після проведення вимірювань вентиляційна система відкачує з об'єму вимірювальної установки дим попереднього експерименту. Повне очищення контролюється за допомогою ВП. Відстань від макета ЛІВС до поверхні пересувного екрану контролюється за допомогою стрічки рулетки. Положення зображення поля зору на поверхні пересувного екрану протягом

всіх вимірювань контролюється на моніторі комп'ютера за допомогою інфрачервоної відеокамери.

Перевірка точності спрацьовування і завадозахисту макета ЛІВС проводиться для трьох значень оптичної щільності диму (білого і чорного).

Вимірювання проводяться в наступній послідовності:

- тунель вимірювальної установки заповнюється димом до заданого певного значення рівня оптичної щільності (контролюється по індикатору ВП);

- пересувний екран, що імітує поверхню цілі, розташовується за межами зони чутливості макета ЛІВС і протягом 10 хвилин проводиться реєстрація можливого помилкового спрацьовування макета ЛІВС (контролюється по включенню світлодіода, підключеного замість спіралі електрозапальника);

- пересувний екран за допомогою тросового механізму з дистанції більше 4,0 м повільно наближається до макета ЛІВС до моменту спрацьовування датчика;

- отримане значення дистанції виявлення поверхні цілі макетом ЛІВС для поточних умов заноситься в таблицю результатів вимірювань;

- дана послідовність дій проведена для макета ЛІВС і трьох екранів з різними відомими значеннями коефіцієнта відбиття поверхні.

Аналогічно перевірено точність спрацьовування і завадозахист макета ЛІВС від впливу дощу і туману різної оптичної щільності.

Оцінка точності вимірювання дальності ЛІВС в умовах наявності інтенсивних постійних і імпульсних світлових завад (засвічень) проведено таким чином: випромінювання джерела інтенсивного сигналу засвічення, що встановлено всередині тунелю вимірювальної установки, за допомогою однолінзового об'єктива проектувалося в зону приймального об'єктива макета ЛІВС. Випробування проведено при температурі +23°C і штучному освітленні світлодіодними лампами сумарної освітленістю 400 люмен.

У ЛІВС використано лазерний діод SPLPL 90-3 виробництва OSRAM Opto Semiconductors. Випромінювання діода моно-

хроматичне на довжині хвилі 905 нм. Тіло світіння діода являє собою три смуги розмірами 2x200 мкм, розташованими одна над одною з зазором 3 мкм. На поверхні цілі на відстані спрацьовування макета ЛІВС, двоопукла лінза, яка використовується в передавальному об'єктиві, формує зображення з розмірами 85x5 мм. На пересувному екрані вимірювальної установки спостерігається зображення тіла світіння лазерного діода, отримане з ІЧ-відеокамери, яке через велику яскравість має розширену еліпсоподібну форму. Для демонстрації форми сигналів, що протікають в макеті ЛІВС в залежності від оптичної щільності модельованих аерозольних середовищ, в макеті передбачено вивід з виходу фотоприймального каналу.

На рисунку 9 наведено фото фрагментів випробувань макету ЛІВС на моделюючій вимірювальній установці в умовах димових завад, отримані за допомогою ІЧ-відеокамери всередині тунелю.



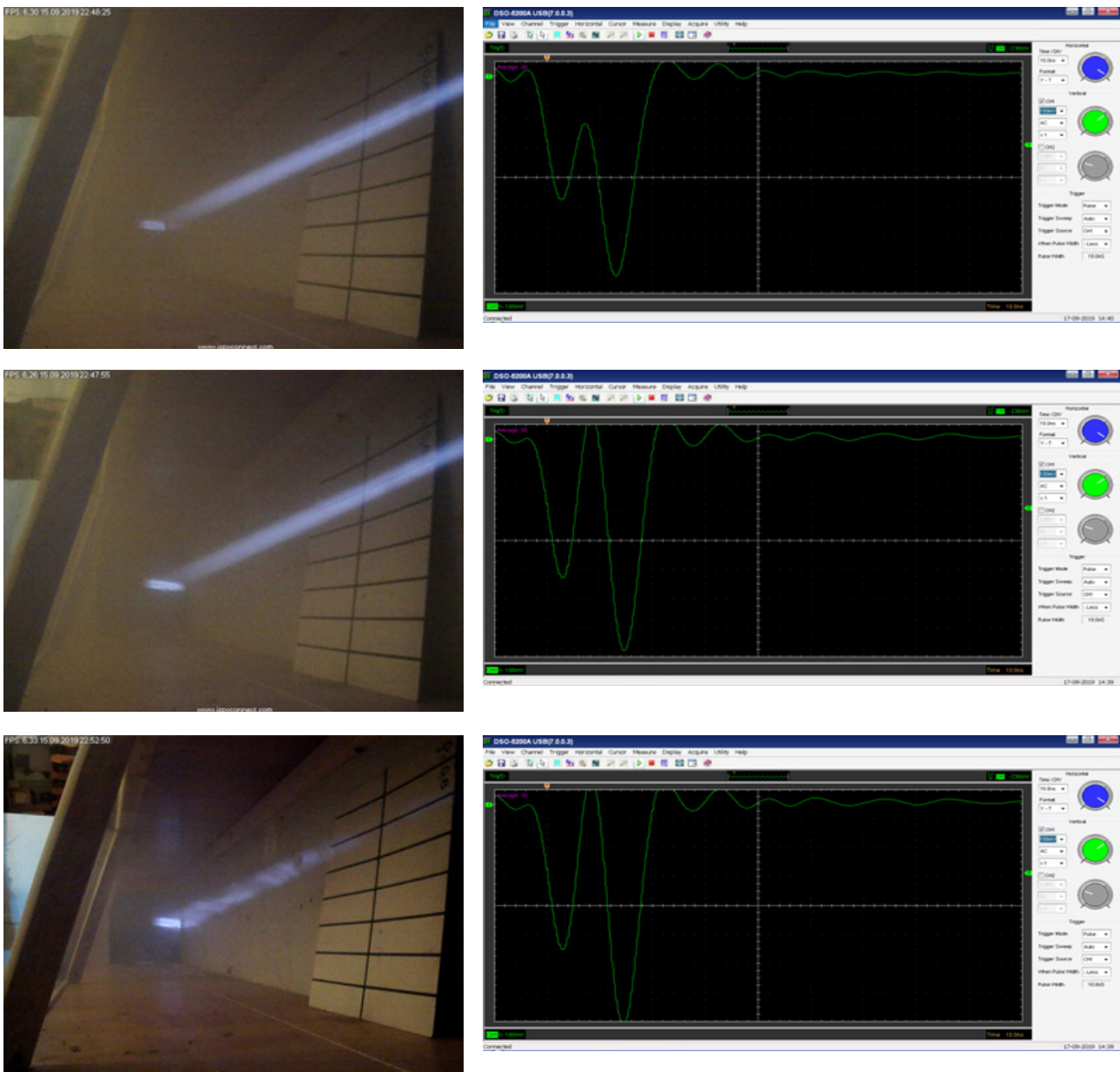
Рис. 9. Фрагменти ЛІВС в умовах димових завад

Коефіцієнт передачі повітряно-димової суміші збільшується зверху вниз і становить наступні вимірні величини: $K_{\text{п}1} = 0,3$; $K_{\text{п}2} = 0,6$; $K_{\text{п}3} = 0,9$.

Для контролю форми напруги на виході фото приймального каналу використано цифровий USB-осцилограф DSQ-5200A фірми Hantek, який дозволяє вимірювати мінімальне значення тривалості електричних сигналів, що протікають в схемах макета ЛПВС, величиною до 2,0 нс при роботі одного з вхідних каналів. Фронти імпульсів електричних процесів, що

протікають в макеті ЛПВС, досягають величини декількох сотень наносекунд, тому на екрані осцилографа прямокутні імпульси спотворюються і мають дзвоноподібну форму.

На рисунку 10 наведено зображення поверхні об'єкта (дистанції спрацьовування) макета ЛПВС, отримані всередині тунелю вимірювальної установки за допомогою ІЧ-відеокамери, і відповідні епюри напруг на екрані осцилографа, зняті з блоку ФП для різної оптичної щільності диму .



Рис, 10 Дистанції виявлення поверхні завади ЛПВС і відповідні епюри напруг на екрані осцилографа для різної оптичної щільності диму

На епюрах напружень наочно видно зміни амплітуди і часових співвідношень сигналів в залежності від оптичної щільності аерозольного утворення, що моделюється. Для кожного із значень оптичної щільності аерозольного середовища, наведених на рисунках, представлено зображення форми сигналу на виході фотоприймального каналу. Точність візуального визначення часу між фронтами випромінюваного і прийнятого імпульсів, рівного часу поширення світла до поверхні цілі і назад, визначається на екрані осцилографа на рівні 0,5 амплітуди сигналу.

Для оцінки максимуму викривальної здатності макета ЛІВС коефіцієнт відбиття поверхні екрану (цілі) обраний мінімальним ($\rho=0,13$, чорна тканина).

Результати вимірювань дистанції спрацювання ЛІВС в диму від екранів з різним коефіцієнтом відбиття наведені в таблиці 3.

На рисунках 11 і 12 наведені зображення випробувань макету ЛІВС в умовах щільного туману, отримані за допомогою ІЧ-відеокамери всередині тунелю установки і збоку зовні, а також відповідні епюри напруг з виходу фотоприймального каналу на екрані осцилографа.

Оптична щільність всіх аерозольних утворень (диму, туману, дощу), для наочності порівняння величин дистанції спрацювання ЛІВС, має однакові значення. Результати вимірювань в тумані та у дощу від екранів з різною відбивною здатністю наведені в таблиці 4.

Таблиця 3

Характеристики ЛІВС в диму

Характеристики середовища	Дистанція спрацювання, м					
	Білий дим			Чорний дим		
$M, \text{ дБ}$	0,46	2,22	5,23	0,46	2,22	3,98
$\Delta, \%$	10	40	70	10	40	60
$K_{\text{п}}$	0,9	0,6	0,3	0,9	0,6	0,4
$\rho = 0,8$	2,60	2,60	2,58	2,60	2,58	2,56
$\rho = 0,56$	2,57	2,56	2,55	2,54	2,53	2,52
$\rho = 0,13$	2,55	2,54	2,53	2,52	2,51	2,50

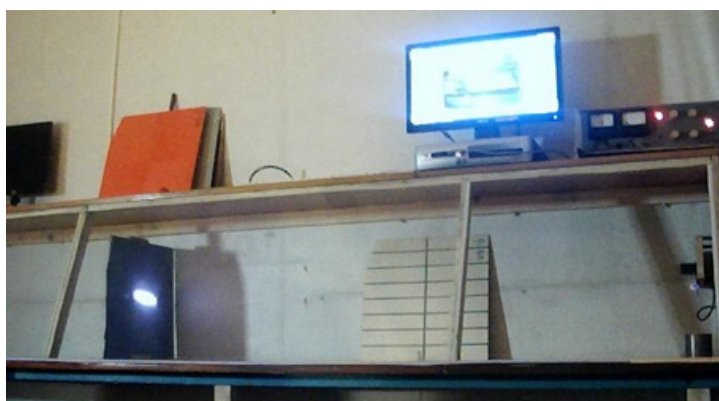


Рис. 11. Перевірка характеристик ЛІВС в тумані

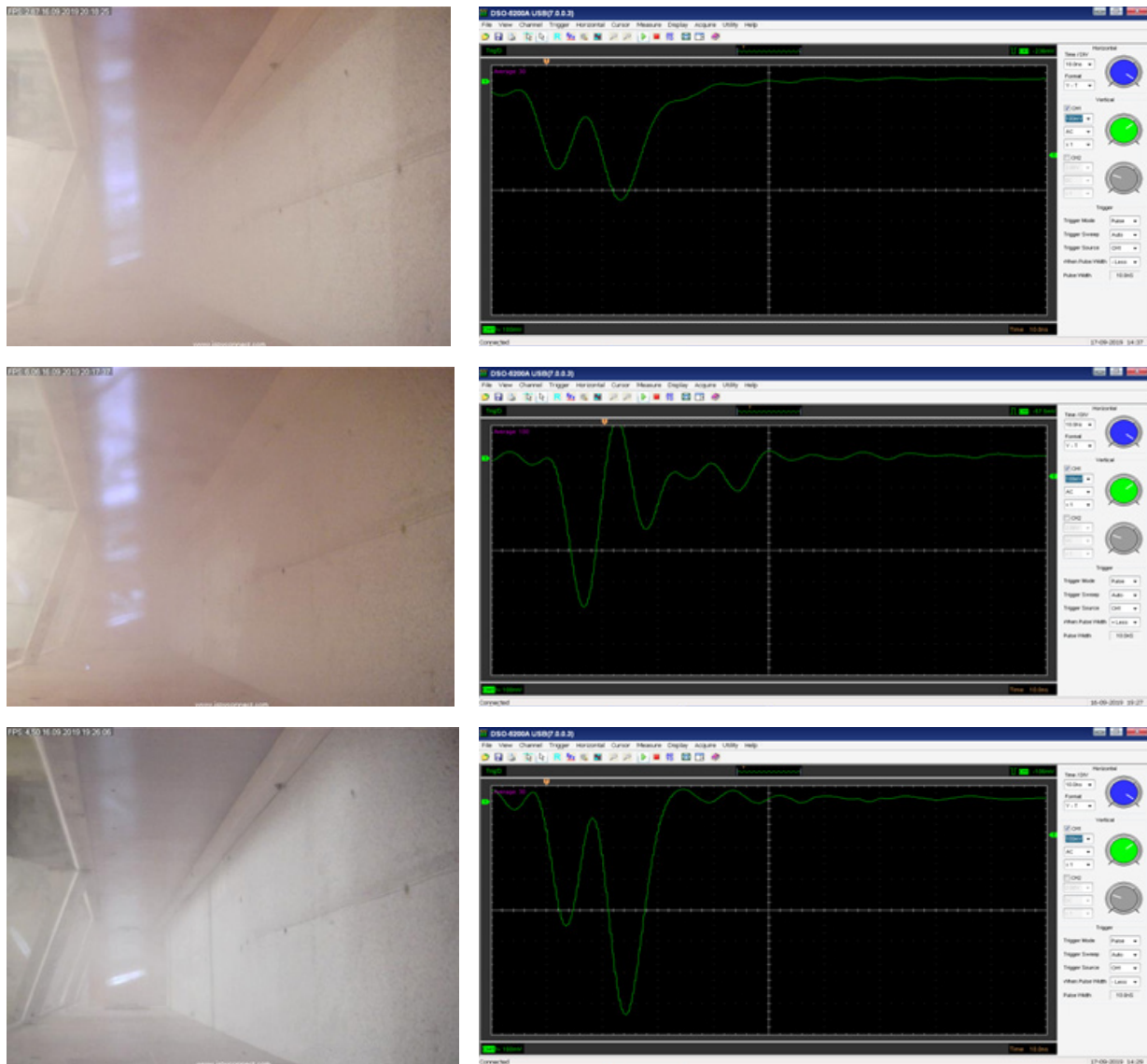


Рис. 12. Сигнал з блоку фотоприймача для різної оптичної щільності туману

Таблиця 4

Характеристики ЛІВС в тумані та у дощу

Характеристики середовища	Дистанція спрацювання ЛІВС, м			
	в тумані			
$M, \text{дБ}$	0,46	2,22	5,23	$\Delta = 40\%$.
$\Delta, \%$	10	40	70	$\Delta = 40\%$.
$K, \text{п}$	0,9	0,6	0,3	$\Delta = 40\%$.
$\rho = 0,8$	2,60	2,58	2,56	2,60
$\rho = 0,56$	2,58	2,57	2,55	2,58
$\rho = 0,13$	2,56	2,55	2,54	2,56

Результати вимірювань дистанції спрацювання ЛІВС при імітації дощу проведено для одного отриманого середнього значення $\Delta = 40\%$.

Проведено випробування макета ЛІВС на відсутність помилкових спрацювань від завад типу листя і гілки за допомогою розробленого та виготовленого імітатора моделювання не суцільних (рознесених) завад в складі вимірювальної установки. Для цього прозорий диск пристрою з наклеєним «листям» встановлюється в поле зору макета ЛІВС на відстані, меншій дистанції спрацювання. Швидкість обертання диска підбирається так, щоб зазори між «листям» перебували в полі зору оптичної системи ЛІВС протягом часу > 200 мкс.

Ідентифікація не суцільних (рознесених) завад розробленим макетом ЛІВС заснована на часовому аналізі знаходження поверхні цілі в поле зору оптичної системи. Якщо за часовий проміжок 2 мс, пропорційний прольоту дистанції 0,4 м на швидкості 200 м / с, ЛІВС реєструє наявність поверхні завади без розривів, видається команда на спрацювання. Коли в цей часовий проміжок поверхня об'єкту локації зникає на час, більший 200 мкс, процес аналізу скидається і підрахунок часу перебування поверхні об'єкту в полі зору ЛІВС починається спочатку.

Розмір поля зору макету ЛІВС на дистанції спрацювання 2,5 м становить 8,5x0,5 см, тобто це смуга з поперечними розмірами 0,5 см. Середній розмір листя чагарників і невеликих дерев становить 5 ... 10 см. При мінімальному зазорі між листям 1,0 см, їх зникнення з поля зору ЛІВС на штатній швидкості буде призводити до блокування видачі сигналу на спрацювання. Результати вимірювань показали, що перебування несучільної завади, що миготіє, в полі зору ЛІВС, що випробовується, з заданими часовими параметрами не призводить до помилкового спрацювання. При впливі постійної і імпульсної оптичних завад на протязі 10 хвилин на досліджуваний ЛІВС не зареєстровані зміни світлодіодного індикатора спрацювання.

Результати випробування ЛІВС засвідчили, що в робочому діапазоні дистанцій 2,5 м \pm 0,5 м зареєстрована надійна реєстрація

поверхні об'єкта при кутах підходу, близьких до 90 °. З наведених епюр напруги на виході фотоприймального каналу видно, що при мінімальній відбивній здатності поверхні пересувного екрану і мінімальному коефіцієнті передачі аерозольних утворень макет ЛІВС надійно реєструє відбитий сигнал, і його положення в часі візуально не змінюється, що забезпечує необхідну точність спрацювання.

Імітовані аерозольні утворення будь-якого виду з величиною загасання до 70 % не викликають пропуску поверхні об'єкта і не впливають на точність визначення дистанції спрацювання ЛІВС. Випробування макету ЛІВС на вплив несучільних завад підтвердили відсутність помилкових спрацювань. Вимірювання поточного становища поверхні об'єкта в робочому діапазоні дистанцій ЛІВС, при впливі джерел потужної постійної і імпульсної засвічень, не призвело до втрати відбитого сигналу або неточних показань величини відстані до поверхні екрану.

Випробування, проведені на створеній установці показали, що ЛІВС дозволяє надійно виявляти та з високою точністю вимірювати відстань до поверхні об'єкта при кутах підходу близьких до 90 ° незалежно від стану і характеру поверхні перепони. Застосування сумісного впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів навколишнього середовища в атмосферному каналі, такі як перешкоди та завади з дрібно-дисперсними включеннями (дим, туман, дощ), наявність несучільних завад, а також потужні імпульсні і постійні засвічення з величиною світлового потоку становить порядку 11000 Лм в фотоприймальному каналі не призводять до втрати і пропуску поверхні об'єкту ЛІВС.

Висновки

Створена вимірювально-випробувальна установка фізичного моделювання завад в оптичному каналі для перевірки працездатності ЛІВС в процесі їх розробки в умовах складної фоноцільової обстановки та дестабілізуючих чинників, показала високу ефективність. За результатами досліджень ЛІВС встановлено, що імітовані аерозольні утворення будь-якого виду (інтенсивний дощ, туман,

чорний і білий дими), несущільні (рознесені) перешкоди, а також потужні постійні та імпульсні засвічення як природні, так і активні організовані штучні, не викликають пропуску поверхні цілі і не впливають на точність визначення дистанції спрацьовування ЛІВС.

Встановлено, що в робочому діапазоні дистанцій $3,5 \pm 0,5$ м незалежно від значень кутів підходу до об'єкта локації, стану і характеру поверхні, зареєстрована надійна реєстрація об'єкту на всій траєкторії підходу до об'єкту, тобто повна відсутність помилкових спрацьовувань та відсутність втрати і пропуску поверхні об'єкту, що гарантує високоточне його виявлення в заданій просторовій робочій зоні.

Установка дозволяє моделювати і проводити імітаційні експерименти з урахуванням параметрів пучка ЛІВС, який зондує, що дозволяє виявляти об'єкти в ситуаціях з різними параметрами навколишнього середовища, і може проводити їх ідентифікацію. Установка дозволяє розробляти нові, високоточні ЛІВС, принцип дії яких буде засновано на нових способах і методах локації та сучасній елементній базі оптоелектроніки.

Список використаної літератури

[1]. Labunec, L. V. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie perekhodnyh karakteristik 3D-ob"ektov v odnopozicionnoj sisteme opticheskoy lokacii / L. V. Labunec // Radiotekhnika i elektronika. – Т. 47. – 2002. – №3. – С. 308-321 (*in Russian*).

[2]. Suzuki, T. Phase-shifting laser diode interferometer using pulse modulation. T. Suzuki, T. Adachi, O. Sasaki and S. Choi. // Applied Optics, 2012, Vol. 51, Issue 18, p. 4109-4112.

[3]. Patent 94697 RF, МПК G01J1/00, G06F17/00. Ustanovka dlya izmereniya otrazhatel'nyh karakteristik materialov / I. M. Hmarov. – №2010105346/22; zayavl. 17.02.2010; opubl. 27.05.2010. Byul. №15 (*in Russian*).

[4]. Georgiev, Georgi T. Comparison between laboratory and airborne BRDF measurements for remote sensing / Georgi T. Georgiev, Charles K. Gatebe, James J. Butler, Michael D. King // Proc. of SPIE, 2006, Vol. 6296, 629603 34.

[5]. Nepogodin, I. A. Kriterii i metod ocenki informativnosti priznakov ob"ektov v zadachah lazernoj lokacii / I. A. Nepogodin // Opticheskij zhurnal: nauchno-tehnicheskij zhurnal. – S. -P. : Gosudarstvennyj opticheskij institut im. S. I. Vavilova; Opticheskoe obshchestvo. – Т. – 2007. – №1. – С. 55-64 (*in Russian*).

[6]. Korovin R. A., Levshin E. A. Eksperimental'naya ocenka effektivnosti skhem pomekhozashchity lazernyh sledyashchih sistem // PERSPEKTIVA-2013: sb. statej po mat-lam dokladov XXIII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh: VVA, 2013. S. 101–104 (*in Russian*).

[7]. Pavlov P. V., Goryunov A. E. Apparatno-programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya. Trudy MAI. 2015. Vypusk 80 (*in Russian*).

[8]. Pavlov P. V., Malov A. N., Kolesov S. S., Vol'f I. E. Programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya na osnove ispol'zovaniya metoda spekl-struktur opticheskogo izlucheniya. Svid. o gos. Regis. No2014617227. Zareg. 15.07.2014 g. (*in Russian*).

[9]. Gorjunov A. E., Pavlov P. V., Petrov N. V. Evaluating the effectiveness of correlation digital speckle photography method for non-destructive testing of rough surfaces. Journal of Physics: Conference Series. 2014. т. 536.

[10]. Pavlov P. V., Goryunov A. E. Apparatno-programmnyj kompleks nerazrushayushchego kontrolya. – Trudy MAI. 2015. Vypusk 80 (*in Russian*).

[11]. Pavlov P. V., Popov F. N. Informacionno-diagnosticskij kompleks defektoskopicheskogo kontrolya. Sbornik nauchnyh statej konferencii, «Problemy ekspluatacii aviacionnoj tekhniki v sovremennyh usloviyah» CNII VVS Minoborony Rossii. 2016. S. 257–262 (*in Russian*).

[12]. Krishna Myneni, Thomas A. Barr, and Billy R. Reed. High-precision ranging using a chaotic laser pulse train // J. Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 78, No 11. – P. 1496–1498.

[13]. K. Nakamura; T. Hara; M. Yoshida; T. Miyahara; H. Ito. Optical frequency domain ranging by a frequency-shifted feedback laser // IEEE J. Quantum Electron. – 2000. – Vol. 36. No 3. – P. 305–316.

[14]. Lepikh Ya., Santoniy V., Yanko V., Budi-yanska L., Ivanchenko I. Computer and mathematic modeling of the development and creation of high-precision location optoelectronic measuring systems // Kioto, Yaponiya. Pp-94-102. :URL <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-4-6-noyabrya-2020-goda-kioto-yaponiya-arhiv/>.

[15]. Vaksman Yu. F., Santonii V. I., Budi-ianska L. M., Ivanchenko I. O. Vlastyvosti vidkrytoi ICh-optopary lazernyi diod–pin–fotodiod u fazometrychnykh systemakh blyznoho dalnometruvannia dynamichnoho pryznachennia // Fotoelektronika. – 2003. – N0 12. – S. 102–106 (in Ukrainian).

[16]. Lepikh Ya., Budi-yanska L. Ivanchenko I. Method for detecting aerosol formations with optical location sensor // The world of science and innovation. Abstracts of the 3rd Internation-

al scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2020. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-oktyabrya-2020-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>

[17]. Lepikh Ya., Santoniy V., Yanko V. Modeling Method of Optoelectronic Sensors Functioning in Dynamic Mode // The world of science and innovation. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2020. Pp. 134-139. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-oktyabrya-2020-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>

Стаття надійшла до редакції 24.02.2021 р.

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

INSTALLATION FOR PHYSICAL SIMULATION OF THE LASER LOCATION PROCESSES

V. I. Santoniy, Ya. I. Lepikh, V. V. Yanko, L. M. Budi-yanskaya, I. A. Ivanchenko, A. P. Balaban

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Summary

A device for physical modeling of laser ranging processes has been developed, taking into account aerosol interference phenomena of natural and artificial origin and active background illumination. The installation simulates the processes of object detection and recognition by a laser information-measuring system (LIMS) under conditions of external destabilizing factors, obstacles in the atmospheric channel.

The description of the structure, operation principle and technical characteristics of the installation what was created for LIMS research is given. The results of the amplitude, space-time optical characteristics of a number of typical equipment objects with various coatings at a wavelength of 905 nm are presented. Experimental measurements of the LIMS accuracy characteristics for remote object sondage by pulsed laser radiation have been carried out, and the LIMS operation efficiency has been estimated. In the installation, the scattering indicatrix is determined taking into account interference phenomena during remote sondage and the statistical amplitude distribution of the signal reflected from the object is estimated. The installation makes it possible to create a database on the object reflective

characteristics, spatially distributed obstacles, atmosphere transparency and turbulence, as well as on the LIMS elements and their operation mode parameters, including the type of signal modulation.

Keywords: physical modeling, laser information-measuring system, atmospheric channel, object, destabilizing factors.

UDC 528.021.7:681.78

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.1.227414>

УСТАНОВКА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ

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

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України
при ОНУ імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, 65082, Одеса,
e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

Реферат

Розроблено установку фізичного моделювання процесів лазерної локації з урахуванням аерозольних завадових явищ природного і штучного походження та активного фонового засвічення. Установка моделює процеси виявлення і розпізнавання об'єкта лазерною інформаційно-вимірною системою (ЛІВС) в умовах зовнішніх дестабілізуючих чинників, перешкод в атмосферному каналі.

Наведено опис структури, принципу дії та технічні характеристики установки, що створена для досліджень ЛІВС. Представлено результати амплітудних, просторово-часових оптичних характеристик ряду типових об'єктів техніки з різними покриттями на довжині хвилі 905 нм. Проведено експериментальні вимірювання точностних характеристик ЛІВС дистанційного зондування об'єктів імпульсним лазерним випромінюванням та дано оцінку ефективності роботи ЛІВС. В установці проводиться визначення індикатриси розсіяння з урахуванням завадових явищ при дистанційному зондуванні та оцінка статистичного розподілу амплітуди сигналу, відбитого від об'єкту. Установка дозволяє створити базу даних по відбивним характеристикам об'єктів, просторово-розподілених перешкодам, прозорості і турбулентності атмосфери, а також по елементам ЛІВС і параметрам режимів їх роботи, включаючи тип модуляції сигналів.

Ключові слова: фізичне моделювання, лазерна інформаційно-вимірною системою, атмосферний канал, об'єкт, дестабілізуючі чинники.