

ПРИЛАДИ

УДК 535.4;621.373

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/05>**Доля Г.М.**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНОГО РЕТРОРЕФЛЕКТИВНОГО ДАТЧИКА РАНЬОГО ВІЯВЛЕННЯ ЗАГОРЯНЬ В УМОВАХ ПЕРЕШКОД

Стаття присвячена аналізу ефективності лазерного датчика на основі ретрорефлектора для раннього виявлення займання в середовищі, що має зовнішні завади.

В Україні з початком агресивної повномасштабної війни, яку розпочала Росія, різко зросла кількість пожеж. Це наслідок бомбардувань і обстрілів, які здійснює агресор по критичній і цивільній інфраструктурі, адміністративних, навчальних об'єктах. В зв'язку з цим виникає необхідність щодо підвищення рівня захищеності об'єктів; скоротити час з моменту початку пожежі до подачі датчиком задимленості сигналу, зменшити вплив сторонніх факторів на достовірність сигналу про початок пожежі. Такими факторами на поточний час є потужні вибухи, які в свою чергу визивають високоенергетичні звукові хвилі, вібрації будівель, яскраві спалахи. Як наслідок, під час вибухів пожежа може і не початися, а система пожежної сигналізації буде видавати сигнал про початок загоряння. Системи пожежної сигналізації, які використовуються в Україні, потребують модернізації шляхом покращення надійності і захисту від видачі хибного повідомлення.

Запропоновано методологію оцінки ефективності лазерного датчика для раннього виявлення займання в шумному середовищі на основі теорії статистичного прийняття рішень, критерію Неймана-Пірсона та аналізу кривих детектування. Показано, що для лазерного датчика раннього виявлення загорянь в шумному середовищі порогову потужність сигналу можна розглядати як важливий показник для виявлення джерела пожежі із заданими ймовірностями правильного виявлення та хибної тривоги. Запропоновано спосіб зниження рівня завад, створюваних вібрацією та зміщенням датчика, за рахунок використання двох приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), ПЗЗ – матриць.

Обговорюється експеримент, який підтверджує запропонований підхід. Показано, що вібраційні завади в такій схемі нівелюються, а корисні сигнали підсумовуються. Експериментально показана можливість зменшення інтерференційної складової, що означає таке ж зниження порогової потужності сигналу. Показано, що запропонований метод компенсації перешкод дуже ефективний для раннього виявлення пожеж.

Ключові слова: лазерний датчик, лазерна пляма, світловідбивач, виявлення пожежі, порогова потужність, вібраційні завади.

Постановка проблеми. Вдосконалення системи протипожежної безпеки є актуальною для будь-якої держави, і Україна не є винятком. Щороку в Україні виникало в середньому до 50 тис. пожеж, в яких гинула значна кількість людей і наносились відчутні матеріальні збитки. З початком повномасштабної війни ця проблема тільки загострилась. Протягом 2023 року за оперативними даними внаслідок цієї війни заги-

нуло 10 тис. 158 цивільних осіб (з них 570 дітей), 18 тис. 945 цивільних поранені (з них 1235 дітей). Окупантами зруйновано та пошкоджено понад 214 тисяч об'єктів інфраструктури, зокрема: 8 тис. 642 об'єкти життєзабезпечення, 1 тис. 592 об'єкти транспортної інфраструктури, 3 тис. 679 закладів освіти, 1 тис. 569 закладів охорони здоров'я, 185 тис. 392 житлових будинки, 889 адміністративних будівель. Пожежі, які виникають внаслідок

док обстрілів і бомбардувань, наносять значну частину збитків і людських втрат [1, с. 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характерною рисою сучасного науково-технічного прогресу є широке використання лазерних датчиків різного призначення. Відомі їх застосування для дослідження атмосфери землі, океану, промислові та технічні застосування [2, с. 28-29; 3, с. 124].

Функціонування таких датчиків полягає в опроміненні об'єкта дослідження і подальшому аналізі прийнятого випромінювання. Досить часто на опромінюваний об'єкт наносять світловідбиваюче покриття (ретрорефлектор), що істотно збільшує потужність сигналу, який приймають, а отже, і точність вимірювань, які проводяться [4, с. 3-4; 5, с. 109; 6, с. 5]. В якості такого покриття можуть бути використані плівки з просторовою решіткою мініатюрних тетраедричних світловідбивачів або хаотично розташованою сукупністю мікроскопульок. У першому випадку спостережується картина в площині приймання являє собою сукупність локальних максимумів інтенсивності, регулярно розташованих у просторі. У другому випадку спостерігається спекл-картина, що являє собою хаотично розташовану в просторі сукупність окремих світлових плям (спеклів).

У разі зміни в просторі положення об'єкта з нанесеним на його поверхню ретрорефлектором, його вібрації, поступальному або обертовому русі або у разі зміни властивостей середовища поширення, спостерігаються адекватні динамічні зміни просторового положення локальних максимумів.

Цю обставину покладено в основу принципу роботи датчиків зміни стану атмосфери, зумовленого або регулярними флуктуаціями густини середовища (акустичні коливання) [5, с. 110], або хаотичними змінами густини повітря завдяки спалахам у приміщеннях, що створюють турбулентні

збурення [6, с. 5]. Такі динамічні зміни положення локальних максимумів фіксуються за допомогою ПЗЗ матриці.

Найважливішим параметром таких датчиків є ефективність їхньої роботи, оцінювана за певним критерієм [6, с. 110].

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз ефективності функціонування лазерного датчика раннього виявлення загорянь (ЛДРВЗ) в різних умовах роботи.

Виклад основного матеріалу. Спрощену схему ЛДРВЗ представлено на рис. 1. Вона містить лазер 1, світлоділник 2, ділянку з тепловими збуреннями, що змінюють ступінь турбулентності повітря 3, ретрорефлектор 4, ПЗЗ матрицю 5. Під час опромінення ретрорефлектора на основі мікроскопульок у площині приймання, де розташована ПЗЗ матриця, формується спекла картина, зображена на рис. 2а.

У разі виникнення області турбулентності на трасі поширення променя локальні максимуми починають зміщуватися хаотичним чином, причому амплітуда відхилення довільного локального максимуму відносно його незворушного положення зростає зі зростанням ступеня турбулентності.

Випадкові відхилення відносно незворушного положення мають нормальний закон розподілу, а дисперсія флуктуацій для колімованого променя залежить від параметрів турбулентної траси наступним чином [7, с. 140]:

$$\sigma_{\alpha,\beta}^2 = 3,28 C_n^2 L L_0^{-1/3}, \quad (1)$$

де C_n^2 – структурна постійна флуктуацій показника заломлення, яка характеризує ступінь турбулентності, L – довжина траси, L_0 – зовнішній масштаб турбулентності, α, β – кутові відхилення в приймально-передавальній площині за координатами X і Y . Можна зазначити, що ця величина подвоюється при дзеркальному відбитті зонду

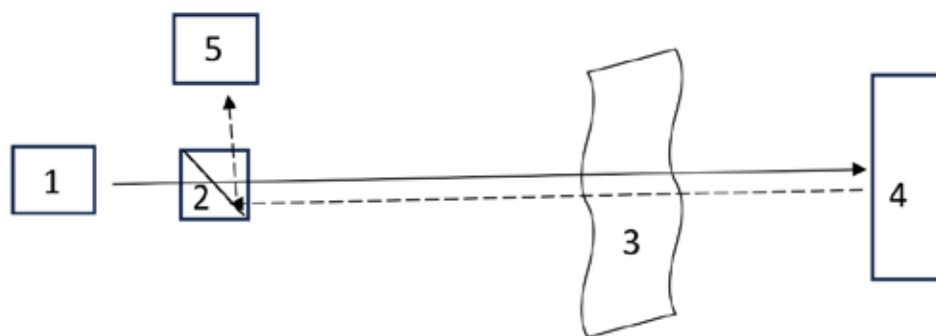


Рис. 1. Схема лазерного датчика раннього виявлення загорянь

вального променя і дворазового проходження турбулентної траси.

Флуктуації положення локального максимуму під впливом турбулентності атмосфери було зафіксовано експериментально, для чого як ПЗЗ матрицю використовували комп'ютерну мишу. Хаотичні рухи курсору на екрані монітора за наявності турбулентності представлені на рис. 2б. Оцифрування його координат давало змогу оцінювати ступінь турбулентності, що було метою роботи ЛДРВЗ.

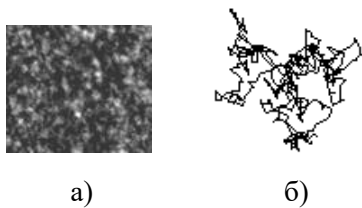


Рис. 2. Спекла картина (2а), хаотичні рухи курсору (2б)

У роботі [6, с. 111] було запропоновано найпростішу методику оцінки ефективності такого датчика. Вона полягала в обчисленні середньоквадратичного відхилення (СКВ) положення локального максимуму від відносно незворушеного положення у вертикальній і горизонтальній областях і розрахунку інтеграла ймовірності для визначення ймовірності виявлення осередку загоряння. Використання такого критерію дало змогу, зокрема, визначити ймовірності виявлення осередку загоряння за різних його положень на трасі поширення променя. Така методика є найпростішою, оскільки передбачає, що сигнал досить потужний, внутрішні шуми детектування ПЗЗ матриці надзвичайно малі, а зовнішні завади відсутні. Однак, як показують результати експериментальних досліджень такого датчика, процес змін кутового положення локального максимуму зазвичай супроводжується додатковими завадовими кутовими зсувами, зумовленими, наприклад, вібраціями об'єкта, на який нанесено світловідбивальну плівку, або іншими невеликими зсувами, і т. п. [8, с. 90; 9, с. 11-12].

У даному випадку правильне виявлення осередку загоряння може супроводжуватися хибними тривогами, відповідними до ситуації, коли хаотичні флуктуації, зумовлені турбулентністю атмосфери, відсутні, а датчик фіксує перевищення амплітуди зсуву курсору над пороговим значенням завдяки вібраціям, що виникають у промисловому приміщенні.

Інакше кажучи, крім ймовірності правильного виявлення осередку загоряння $P_{\text{виявл}}$ необхідно

враховувати також ймовірність помилкової тривоги $P_{\text{хт}}$. Зважаючи на випадкову природу фіксованих сигнальних і завадових відхилень положення курсору від незворушеного положення, подібні задачі розв'язуються за допомогою теорії ухвалення статистичних рішень.

Як правило ухвалення рішення, що максимізує $P_{\text{виявл}}$ за заданої величини $P_{\text{хт}}$ дуже часто використовують критерій Неймана-Пірсона [10, с. 112; 11, с. 4]. Використання цього критерію дає змогу побудувати криві виявлення (Probability of Detection Curves:), які подають у вигляді графіка, що містить сімейство кривих, які монотонно зростають від нуля до одиниці. Вони розраховуються на основі обчислення інтеграла ймовірності та ілюструють залежності $P_{\text{виявл}}$ від відношення сигнал/шум q , при цьому кожна криву в сімействі побудовано за певного значення ймовірності хибної тривоги $P_{\text{хт}}$ (рис. 3) [11, с. 3].

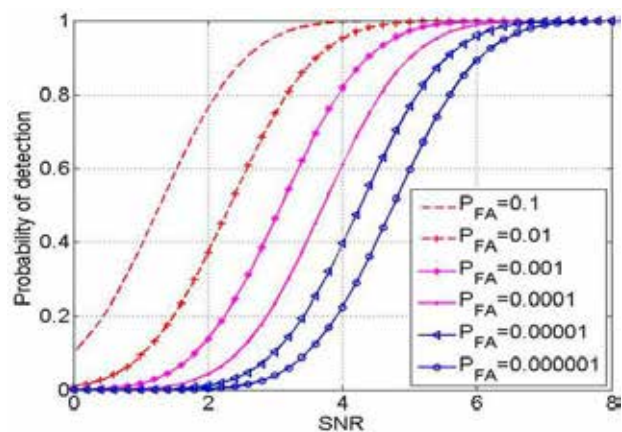


Рис. 3. Криві виявлення

Аналіз графіків кривих виявлення широко використовується в радіо-, акустичній та лазерній локації. Користуючись кривими виявлення, можна визначити пороговий сигнал, тобто сигнал, який може бути виявлений за заданими ймовірностями $P_{\text{виявл}}$ і $P_{\text{хт}}$. Пороговий сигнал можна розрахувати, знаючи відношення сигнал/шум q , величину якого можна визначити за кривими виявлення. Наприклад, користуючись даними на рис. 3 за кривими виявлення лазерного сигналу з ймовірністю $P_{\text{виявл}}=0,8$ за $P_{\text{хт}}=0,001$ необхідно забезпечити $q=4$. Звідси, зокрема, випливає, що для зменшення порогового сигналу в n разів необхідно відповідно в n разів зменшити рівень завад. І хоча наведений приклад стосується галузі лазерної локації, сформульований висновок має загальний характер для засобів виявлення, які оцінюються з використанням критерію Неймана-Пірсона. Цей параметр –

пороговий сигнал – можна вважати критерієм якості ЛДРВЗ, тому що він добре характеризує можливості датчика виявляти в умовах перешкод малі рівні корисного сигналу, тобто виявляти осередки загоряння на ранніх стадіях.

Стосовно ЛДРВЗ сформульований висновок можна інтерпретувати так. Для більш раннього виявлення осередку загоряння (зменшення потужності корисного сигналу – амплітуди кутового/просторового зсуву локального максимуму), необхідно зменшити рівень завадостійких зсувів, які спричиняються, наприклад, вібраціями. Іншими словами, необхідно розробляти завадозахищені ЛДРВЗ. Одну з подібних схем розглянуто в [12, с. 2] і представлено на рис. 4.

Вона містить лазер 1, світлорозподільники 2 і 5, область загоряння 3, ретрорефлектор 4, ПЗЗ матриці 6 і 7. Лазерний промінь розділяється на дві складові, які спрямовуються на ретрорефлектор за допомогою світлорозподільників 2 і 5. Відбиті промені направляються на відповідні ПЗЗ матриці. Необхідною умовою є те, що зондувальні промені мають бути рознесені в просторі таким чином, щоб флуктуації показника заломлення атмосфери в каналах були некорельованими, тобто рознесення променів має бути більшим за радіус кореляції турбулентної атмосфери [7, с. 143, 482]. У цьому випадку сигнали, які були отримані в кожному каналі, стають статистично незалежними на відміну від завадоподібних сигналів, які однакові в обох каналах, оскільки зумовлені вібраціями одного й того самого об'єкта.

Тоді зміщення локального максимуму в дифракційній картині, яка створюється першим променем, зумовлене двома факторами і являє собою суму

$$\Delta^I_{x,y} = \delta^I_{x,y} + a_{x,y}. \quad (2)$$

Перший доданок зумовлений впливом неоднорідностей атмосфери, а другий – вібраціями поверхні. Можна вважати, що перший доданок характеризує сигнал, а другий – перешкоду (шум).

Аналогічно можна записати для другого зондувального променя

$$\Delta^{II}_{x,y} = \delta^{II}_{x,y} + a_{x,y}. \quad (3)$$

Як уже зазначалося, складові, зумовлені флуктуаціями повітря, різні та статистично незалежні у двох каналах, а складові, зумовлені вібраціями, будуть однаковими в обох каналах. Оцифровані дані про величину відхилення в кожному каналі визначаються з частотою опитування кадру. Під час їх віднімання доданок, зумовлений вібраціями, зникає.

$$\Delta^I_{x,y} - \Delta^{II}_{x,y} = \delta^I_{x,y} - \delta^{II}_{x,y}. \quad (4)$$

Потім слід піднести до другого ступеня елементи масиву даних, провести усереднення і обчислити дисперсію (СКВ).

$$\begin{aligned} (\Delta^I_{x,y} - \Delta^{II}_{x,y})^2 &= (\delta^I_{x,y} - \delta^{II}_{x,y})^2 = \\ &= (\delta^I_{x,y})^2 - 2\delta^I_{x,y}\delta^{II}_{x,y} + (\delta^{II}_{x,y})^2 \\ \sigma^2_{xy} &= \langle (\delta^I_{x,y})^2 \rangle - \langle 2\delta^I_{x,y}\delta^{II}_{x,y} \rangle + \\ &+ \langle (\delta^{II}_{x,y})^2 \rangle = \langle (\delta^I_{x,y})^2 \rangle + \langle (\delta^{II}_{x,y})^2 \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Доданок $\langle 2\delta^I_{x,y}\delta^{II}_{x,y} \rangle$ обертається на нуль, оскільки випадкові відхилення в каналах незалежні, знакозмінні та мають середнє значення, що дорівнює нулю. Таким чином, результат обчислень характеризує тільки корисний сигнал, тобто рівень флуктуацій показника заломлення за рахунок прогрівання повітря осередком загоряння.

Теоретично в такий спосіб можна звести вплив завад до нуля і забезпечити ймовірність виявлення осередку загоряння до одиниці, тому що відношення сигнал/шум наблизитиметься до нескінченності. Однак на практиці реалізувати повне придушення перешкод не вдається, що було підтверджено експериментально.

Для зниження ступеня впливу перешкод в експериментальній установці, побудованій на основі схеми на рис. 3 як ПЗЗ матриць використовували дві однакові комп'ютерні миші, встановлені в просторі дзеркально одна до одної, так що їхні

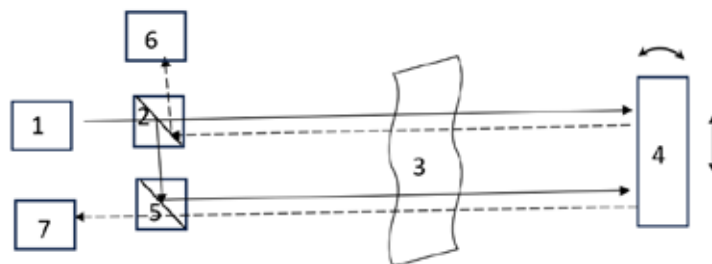


Рис. 4. Схема завадозахищеного ЛДРВЗ

координатні осі X_1 , Y_1 і X_2 , Y_2 були протилежно спрямовані. За допомогою механічного приводу штучно створювали періодичні кутові відхилення ретрорефлектора, що імітують вібрації. Зміщення курсорів двох мишей, одночасно під'єднаних до комп'ютера, були майже однаковими за амплітудою, але протилежно спрямованими, практично компенсуючи один одного, так як це було показано вище під час теоретичного аналізу.

Незважаючи на те, що в умовах експерименту використовували однакові миші, повної компенсації вібрацій об'єкта досягти не вдалося, тобто не вдалося забезпечити повну нерухомість курсору. Це зумовлено, вочевидь, можливим неузгодженням осей мишей, а також дещо різною їхньою чутливістю до зміщень. Проте, в результаті експериментальних досліджень вдалося забезпечити амплітуду результуючого зсуву курсора після компенсації впливу вібрацій на рівні 10-15% від початкового рівня.

За даної методики оцінювання ефективності ЛДРВЗ такий результат означає зменшення потужності завади в 7-9 разів, а отже, і зменшення порогової потужності датчика в таку саму кількість

разів у разі забезпечення заданого рівня ймовірності правильного виявлення осередку загоряння та ймовірності хибної тривоги.

Висновки. У роботі розглянуто методику оцінювання ефективності ЛДРВЗ на основі теорії ухвалення статистичних рішень, критерію Неймана-Пірсона та аналізу кривих виявлення. З погляду цільового призначення датчика важливим показником можна вважати порогову потужність сигналу для виявлення осередку загоряння із заданими ймовірностями правильного виявлення та хибної тривоги.

Запропоновано й експериментально перевірено метод зниження рівня завад, створюваних вібраціями та зміщеннями датчика, завдяки використанню двох ПЗЗ матриць. Вібраційні перешкоди в такій схемі взаємно знищуються, а корисні сигнали підсумовуються. Експериментально показано можливість зменшення завадової складової в 7-9 разів, що означає таке ж зменшення порогової потужності сигналу. Ця обставина робить запропонований метод компенсації перешкод досить ефективним для раннього виявлення загорянь.

Список літератури:

1. Звіт про основні результати діяльності ДСНС у 2023 році. <https://surl.li/eogyzy>. (Дата звернення 4.12.2024).
2. K. R. Nambiar. Lasers: Principles, Types and Applications. New Age International, 2006. 570 p.
3. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar, FL: Krieger Publishing, 1992. 510 p.
4. Світловідбивні датчики. <https://www.omch.co/retroreflective-sensors/> (Дата звернення 1.12.2024).
5. G.N. Dolya, E.S. Litvinova. Retroreflective laser detector of acoustic oscillations. *Proceedings of 12th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2016)*. Sept. 15–18. Odessa, Ukraine. Pp.108–111.
6. Г.М. Доля, А.В. Кочин, О.С. Чудовська. Методика оцінки ефективності телевізійного датчика для раннього виявлення загорянь. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2009. Вип. 2/5(38). С. 4–7.
7. Joseph W. Goodman Statistical optics, Wiley. 1985. 549 p.
8. Г.М. Доля, А.М. Катунін, А.В. Кочин, О.С. Чудовська. Щодо заважаючого впливу вібрацій на роботу датчика для виявлення джерел загорянь. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. Вип 2(10). С. 89–91.
9. Gregory Dolya, Olena Lytvynova, 2017. Modeling the Method of Laser Doppler Speckle-Velocimetry for Flat Objects with Retroreflective Surface, *Asian Engineering Review, Asian Online Journal Publishing Group/* vol. 4(2). Pp. 7–13.
10. Skolnik M., Introduction to Radar Systems, New York, McGraw-Hill, 3rd Edition. 2001. 153 p.
11. Rang Liu, Dejiang Wang, Ping Jia, He Sun. An Omnidirectional Morphological Method for Aerial Point Target Detection Based on Infrared Dual-Band Model. *Remote. Sens.* 2018. 10(7). 1054 p. <https://doi.org/10.3390/rs10071054>.
12. Лазерний датчик раннього виявлення загорянь. Патент України на корисну модель № 148977. 2021. 6 с.

Dolya G.M., Romaniuk V.A., Starodubtsev S.O. EFFICIENCY OF RRS BASED LASER SENSOR FOR EARLY IGNITION DETECTION IN A NOISY ENVIRONMENT

The paper is devoted to the analysis of efficiency of retroreflector based laser sensor for early ignition detection in an environment that has external interference.

In Ukraine with the start of an aggressive full-scale war, which was started by Russia, the number of fires increased sharply. This is the result of bombings and shelling carried out by the aggressor on critical and civil infrastructure, administrative and educational facilities. In this regard, there is a need to increase the level of security of objects; to reduce the time from the moment of the start of the fire until the signal is given by the smoke sensor; to reduce the influence of extraneous factors on the reliability of the signal about the start of the fire. Such factors at the present time are powerful explosions, which in turn cause high-energy sound waves, vibrations of buildings, and bright flashes.

As a result, during explosions, the fire may not start, but the fire alarm system will give a signal about the beginning of the fire. The fire alarm systems, which are used in Ukraine need to be modernized by improving reliability and protection against issuing a false alarm.

A Methodology for assessing the effectiveness of laser sensor for early ignition detection in a noisy environment is proposed based on the theory of statistical decision making, the Neyman-Pearson criterion and analysis of detection curves. It is shown that for the laser sensor for early ignition detection in a noisy environment the threshold signal power can be considered, as an important indicator for detecting a fire source with given probabilities of correct detection and the probability of a false alarm.

A method has been proposed to reduce the level of interference created by vibrations and displacements of the sensor through the use of two CCD matrices. Experiment that proves proposed approach is discussed. It is shown that vibrational interference in such a schema cancels out and the useful signals are summed up. The possibility of reducing the interference component has been experimentally shown, which means the same reduction in the threshold signal power. Proposed interference compensation method is shown to be very effective for early detection of fires.

Key words: *laser sensor, laser spot, reflector, fire detection, threshold power, vibration interference.*