




*О. А. Кузык, О. В. Придатко*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0719-9118> – О. В. Придатко

 [ostap.kuzyk@gmail.com](mailto:ostap.kuzyk@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗОБРАЖЕНЬ ПРЕДМЕТІВ У ЗАДИМЛЕНОМУ ПРОСТОРИ

**Проблема.** В умовах обмеженої видимості, спричиненої наслідками пожежі, особовий склад рятувальних підрозділів постійно зіштовхується з проблемою орієнтації в просторі, пошуку потерпілих, виявлення джерела загоряння тощо. З практичного досвіду роботи рятувальних підрозділів встановлено, що для роботи в умовах задимлення використовують тепловізійні або інфрачервоні камери. Застосування тепловізійних пристроїв ускладнюється за наявності інтенсивних теплових потоків. Радіохвилі подібних засобів добре проникають крізь дим, однак радар не дає можливості здійснити побудову зображення високої роздільної здатності, з метою подальшого орієнтування в просторі. Практика застосування інфрачервоних камер вказує на їх недостатню ефективність за наявності задимлення.

**Мета.** Метою роботи є аналіз принципів роботи та технологій використання лідар-технологій для формування зображень предметів у задимленому просторі.

**Методи досліджень.** Методи аналізу та порівняння.

**Основні результати дослідження.** Альтернативою існуючим тепловізійним, інфрачервоним засобам та радарам є оптичні системи, робота яких заснована на лідар-технології. Вони працюють за принципом вимірювання відстані до поверхні за допомогою лазерного променя та дають можливість візуалізувати внутрішній простір неосвітлюваного приміщення. Проте на даний час недостатньо досліджено ефективність лідар-технологій для візуалізації внутрішнього простору приміщень за наявності диму, що впливає на їх роботу. Застосування лідарів в умовах задимлення залежить від довжини хвилі лазерного променя та є найбільш ефективним у ближньому інфрачервоному діапазоні. Лідари за технологіями поділяють на звичайні, однофотонні та поляризаційні.

**Висновки.** Без застосування методів обробки зображення ефективність роботи стандартних лідарів у задимленому середовищі є невисокою, зростаючи із збільшенням довжини хвилі в інфрачервоному діапазоні. Для побудови зображень предметів в умовах задимленого середовища найбільш ефективними є однофотонні лідари. Поляризаційні лідари можуть застосовуватися для роботи у задимленому середовищі крізь скло. Ефективність розпізнавання зображень, отриманих з лідара, зростає за застосування технологій оброблення зображень, зокрема гамма-розподілу, розподілу Пуассона та машинного навчання.

**Ключові слова:** активні оптичні системи, лідар, задимлене середовище, оптична щільність, інформаційні технології обробки даних

*О. А. Кузык, О. В. Придатко*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## USE OF ACTIVE OPTICAL SYSTEMS AND INFORMATION PROCESSING TECHNOLOGIES FOR CREATING IMAGES OF OBJECTS IN SMOKY SPACE

**Introduction.** In the conditions of limited visibility caused by the consequences of the fire, the personnel of the rescue units is constantly faced with the problem of orientation in space, search for victims, identification of the source of fire, etc. Based on the practical experience of rescue units, it has been established that thermal imaging or infrared cameras are used to work in smoky conditions. The use of thermal imaging devices is complicated in the presence of intense heat flows. Radio waves of such means penetrate well through smoke, but radar does not provide an opportunity to build a high-resolution image, for the purpose of further orientation in space. The practice of using infrared cameras indicates their insufficient effectiveness in the presence of smoke.

**Purpose.** The purpose of the work is to analyze the principles of operation and technologies of using lidar technologies to form images of objects in a smoky space.

**Methods.** Methods of analysis and comparison.

**Results.** An alternative to the existing thermal imaging, infrared means and radars are optical systems, the work of which is based on lidar technology. They work on the principle of measuring the distance to the surface using a laser beam,

and provide an opportunity to visualize the interior of an unlit room. However, at present, the effectiveness of lidar technologies for visualizing the interior space of premises in the presence of smoke, which affects their operation, has not been sufficiently investigated. The use of lidars in smoky conditions depends on the wavelength of the laser beam and is most effective in the near-infrared range. Lidars are divided by technology into conventional, single-photon and polarization.

**Conclusion.** Without the use of image processing methods, the efficiency of standard lidars in a smoky environment is low, increasing with increasing wavelength in the infrared range. Single-photon lidars are the most effective for building images of objects in a smoky environment. Polarization lidars can be used to work in a smoky environment through glass. The effectiveness of recognition of lidar images increases with the use of image processing technologies, including gamma distribution, Poisson distribution, and machine learning.

**Key words:** active optical systems, lidar, smoky environment, optical density, information technologies of data processing

**Вступ.** Під час проведення рятувальних робіт у задимлених приміщеннях за наявності осередків полум'я, рятувальники нерідко зіштовхуються з проблемою орієнтування в умовах недостатньої видимості. Це сповільнює роботу рятувальника, ускладнює пошук людей та збільшує ризики їх загибелі від факторів пожежі. Зважаючи на окреслену проблему гострої актуальності набуває питання пошуку технологій та способів їх застосування для візуалізації внутрішнього простору задимленого приміщення. На даний момент значного поширення набули тепловізійні системи, в основі яких використовуються інфрачервоні камери [1]. В умовах задимлення за різницею температур вони дають змогу досить ефективно бачити різноманітні предмети, конструктивні елементи будівлі, а також здійснювати пошук потерпілих.

Проте інфрачервоні камери не дають можливості забезпечувати ефективний огляд внутрішнього простору приміщення за наявності полум'я, яке є джерелом інтенсивного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та у випадку потрапляння в кадр стимулює до засвічування відеопотоку та ускладнює процес розпізнавання менш інтенсивних джерел випромінювання.

Для орієнтування у темряві за недостатньої видимості застосовують також лідари – пристрої, які будують зображення за допомогою технології лазерного сканування та вимірювання відстані. Здебільшого, на основі лідарів будують системи

внутрішнього позиціонування. Їх також використовують і в умовах недостатньої видимості. Однак практикою застосування активних оптичних пристроїв на основі лідар-технології не встановлено спроможності їх ефективного застосування рятувальними службами в умовах задимлення. Відтак актуальності набуває науково-прикладна задача з дослідження ефективності використання лідар-засобів для візуалізації внутрішнього простору приміщення з обмеженою видимістю за наявності диму. Очевидно, що існуючі підходи застосування лідар-технологій не адаптовані під окреслену задачу, тому одним із основних завдань є побудова ефективної інформаційної технології відтворення внутрішнього простору задимленого приміщення на основі даних, отриманих за допомогою лідар-технологій.

**Метою роботи** є аналіз принципів роботи та використання лідар-технологій для формування зображень предметів у задимленому просторі на основі обробки даних відеопотоку.

**Методи досліджень:** методи аналізу та порівняння

#### Результати досліджень

Активні оптичні системи на основі лідар-технології (лідари) (рис. 1) використовують у різних сферах діяльності (робототехніка, безпілотні літальні апарати, автомобілі з автопілотом, будівельна галузь та ін.) для сканування простору лазерним променем і визначення відстані до кожної точки.

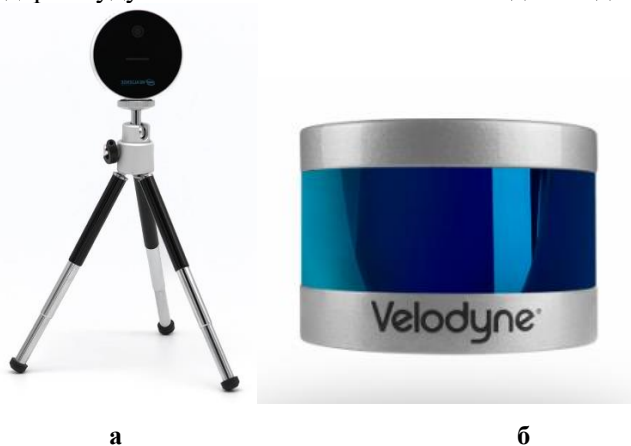


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд лідара: а – лідар Intel RealSense, б – Velodyne's Puck lidar sensor [32]

На основі даних сканування лідара за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення формують двовимірне або тривимірне зображення (двовимірні координати точки та відстань до неї) (рис. 2). У випадку

оптично прозорого середовища лідар дає змогу побудувати зображення предметів, на які потрапляє лазерний промінь. Відстань до предмета на сформованому зображенні часто описується відтінком кольору.



**Рисунок 2** – Зображення, побудоване за допомогою лідара Velodyne та програмного забезпечення VeloWiew [32]

За наявності диму або туману відбувається ослаблення лазерних променів внаслідок дисперсії. Лідар у такому випадку може неправильно вимірювати відстані до предметів або взагалі не візуалізувати їх. Тому для роботи лідарів в умовах задимленого простору та недостатньої видимості потрібно враховувати ці особливості. Лідари можуть застосовуватися для аналізу задимленого середовища, зокрема геометричних розмірів, концентрації часток та їх виду.

Лідар може успішно застосовуватися для визначення дисперсії диму над кронами дерев лісового масиву. Відповідний метод оцінювання параметрів шлейфу диму та його розсіювання наведений в [2]. У представлених дослідженнях фактично вимірюють відстані до часток, які утворюють хмару диму, на фоні просторового неба.

Дим від пожежі характеризується хімічним складом часток, їх розміром та концентрацією. Ці показники спричиняють формування кольору та оптичної щільності диму. Проникнення променів крізь дим залежить від матеріалу, що горить, частки продуктів горіння якого та їх концентрація спричиняють неоднакову проникність монохроматичних променів різної довжини хвилі. Результати досліджень оптичної щільності диму внаслідок горіння деревини та поліметилметакрилату у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, наведені в [3], вказують на залежність цього показника від виду горючого матеріалу. Зокрема спостерігається зниження оптичної щільності із збільшенням довжини хвилі, особливо понад 1200 нм. Але із збільшенням концентрації часток диму проникнення променів зменшується та спостерігається розсіювання.

Дослідженню аерозолі за допомогою поляризаційного лідара присвячена праця [4], у якій запропоновано розпізнавання його складу, зокрема диму та пилу, з використанням коефіцієнтів деполяризації на довжинах хвиль 532 нм і 1064 нм. Виявлено, що співвідношення коефіцієнтів деполяризації на двох довжинах хвиль має лінійну залежність від мікрофізичних властивостей аерозолів, зокрема аспектного співвідношення, ефективного радіуса і комплексного показника заломлення. На коротких довжинах хвиль цей показник можна використовувати для інвертування характеристик поглинання частинок, що покращує розпізнавальну здатність лідара.

У [5] проведено порівняння різноманітних сенсорів вимірювання відстаней в умовах високої температури і диму: лідарів, ультразвукових, нічного бачення, інфрачервоних та мікрохвильових. Виявлено, що використання лідарів з довжиною хвилі 905 нм є ефективним у випадку високих температур та незначного задимлення. В умовах сильного задимлення точність вимірювання зменшується на відстанях понад 8 м. Більш ранні дослідження цих авторів [6], проведені для інфрачервоних стереосистем на основі двох тепловізорів і лідара, також підтверджують зниження ефективності лідара із збільшенням відстані та зростанням шільності диму.

Деякі інші аспекти цієї проблеми наведені в роботі [7]. Автори експериментально встановили, що когерентне лазерне випромінювання у лідарах з довжиною хвилі 1560 нм може застосовуватися для виявлення рухомих і деформівних предметів

крізь полум'я. Процес вимірювання відстаней використовує гетеродинне детектування. Властивість домінування верхнього шару полум'я над кутовим відхиленням свідчить про можливість використання лідарів під час масштабних пожеж.

У роботі [8] проведено порівняння роботи лідара Velodyne [32] з довжиною хвилі 905 нм та радара у задимленому просторі із застосуванням алгоритмів одночасної локалізації та відображення, зокрема трансформації нормального розподілу карти зайнятості та Gmapping. Виявлено, що точність вимірювання відстаней з допомогою лідара є вищою порівняно з радаром, проте у задимленому просторі відстань, на якій здійснюється вимірювання, – значно меншою.

Дослідження ослаблення часток диму різного розміру описані в [9]. Виявлено, що коефіцієнт відбиття зменшується із зростанням довжини хвилі та зменшенням розміру частинок диму. Найменше ослаблення спостерігається для часток розміром 0,1 мкм у діапазоні хвиль від 300 до 1300 нм. У випадку часток більших розмірів відбиття буде більшим. Але навіть для часток розміром 0,4 мкм відбиття буде зменшуватися та становитиме 0,55 у ближньому інфрачервоному діапазоні порівняно зі значенням у видимому діапазоні 0,75.

Результати дослідження оптичних властивостей диму від палаючих і тліючих лісових горючих матеріалів наведено в [10]. Вони містять отримані значення альbedo від часток диму, який утворений не раніше, ніж через 4 хв. Ці значення мають тенденцію до зниження із збільшенням довжини хвилі та є вищими для випадку диму від тління порівняно з димом від горіння, що значно ускладнює видимість в умовах такого задимлення.

У [11] встановлено, що поглинання сонячного випромінювання деревним димом відбувається з високою спектральною вибірковою, а саме: із збільшенням довжини хвилі в ультрафіолетовому, видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах хвиль поглинання зменшується. При цьому дим розділено на органічний вуглець і сажу та встановлено, що органічний вуглець поглинає 14% сонячного світла, а сажа – 86%. Подальші дослідження [12] встановили таку ж залежність поглинання променів світла від довжини хвилі, зокрема для диму автомобільних двигунів така залежність описується як  $\lambda^{-1}$ , а для диму від горіння біомаси – як  $\lambda^{-2}$ . Також встановлено, що істотний вплив на зростання поглинання світла має органічний вуглець у видимому (менше 600 нм) та ультрафіолетовому діапазонах.

Видимість в умовах задимлення досліджувалася [13] і для інших довжин хвиль,

зокрема у терагерцовому діапазоні, які випромінює тіло людини і які розташовані між інфрачервоним (3000 нм) та мікрохвильовим (30 мкм) діапазонами хвиль. Отримано негативний результат, який не дає можливості бачити за допомогою камери, що працює на частоті 0,25 ТГц.

Під час гасіння пожеж водою у приміщеннях утворюються аерозолі, до складу яких входить дим і водяна пара [14]. Молекули та краплі води значно ослаблюють інфрачервоне випромінювання, та практично утворюють повністю непрозоре середовище у видимому діапазоні довжин хвиль. Встановлено, що середне пропускання інфрачервоних променів водяним туманом становить близько 12%, а для розпиленої спринклером води – 37%. Із зростанням довжини світлової хвилі у ближньому та середньому інфрачервоному діапазонах також відбувається зменшення поглинання частками диму інфрачервоних хвиль.

Ослаблення світлових променів у діапазоні 350-1100 нм у димовій камері досліджено в [15] і встановлено, що показник затухання залежить від довжини світлової хвилі та часу. У діапазоні 800-1100 нм ослаблення є меншим, ніж для видимого світла, і з часом відбувається незначне його підвищення, а у діапазоні 350-700 нм навпаки: відбувається зниження показника затухання з часом, особливо у короткохвильовій частині цього діапазону.

Проведений аналіз свідчить про те, що використання лідара, який працює у ближньому інфрачервоному діапазоні, підвищить ефективність огляду задимленого приміщення у порівнянні із звичайними засобами у видимому діапазоні. Наявність водяної пари чи крапель води під час гасіння призведе до зменшення прозорості середовища у інфрачервоному діапазоні та ускладнить застосування пристроїв у цьому діапазоні.

Однак частки диму не лише ослаблюють, але і розсіюють світло. Тому сфокусований лазерний промінь буде під час слідування до об'єкта сканування ослаблюватися і розсіюватися. Аналогічне явище буде спостерігатися з відбитим від поверхні світлом. Тому зображення від сканування буде ослабленим і розсіяним. Для його аналізу потрібно буде застосовувати цифрові методи покращення зображення.

Ще одним аспектом лазерного сканування у задимленому середовищі закритих приміщень є нерівномірний розподіл диму за висотою. Тому розташовувати лідар рекомендовано якомога нижче (для візуалізації області із меншою густиною диму). Він може розміщатися, наприклад, на поясі рятувальника, а зображення передаватися на дисплей в шоломі. У випадку

застосування для розвідки роботів, які переміщуються на незначній висоті над поверхнею, де задимленість буде нижчою, що забезпечить більшу відстань сканування.

Оскільки принципом роботи лідара є вимірювання відстаней, то сформоване ним зображення буде фактично мапою поверхні, що сканується. На відміну від камер у видимому діапазоні, лідар не потребує освітлення і працює ефективніше за його відсутності, оскільки у складі сонячного світла є хвилі, довжина яких збігається з довжиною хвилі лазера, який сканує простір. У випадку сильного задимлення лазерний промінь відбивається не лише від поверхонь, але й від часток диму, що ускладнить вимірювання відстані до об'єктів та може знизити цей показник. Оскільки пристрій постійно здійснює сканування, а задимлене середовище є неоднорідним та може динамічно змінювати свої оптичні властивості, вимірювання відстань може варіювати. У такому випадку потрібно вибирати максимальне значення цього показника для кожної точки простору.

Задля кращої побудови зображень лідари можна поєднувати із камерами, які працюють у видимому діапазоні. Для розпізнавання зображень застосовують аналіз результатів сканування у порівнянні з оптичними даними [16].

Існує також практика поєднання лідарів з радарми, зокрема для навігації роботів у задимленому просторі [17]. Лідар не дає можливості будувати карту приміщень та визначати позиціонування робота в диму чи тумані, на відміну від радара, але роздільна здатність лідара є значно вищою за відповідний показник радара і тому є доцільним поєднання цих пристроїв для орієнтування у приміщенні.

Для побудови тривимірних зображень використовують лідари, які базуються на імпульсних джерелах світла, та однофотонні лідари, огляд технологій побудови та функціонування яких, зокрема статистичну модель виявлення фотона, часовий фільтр і алгоритм оцінювання відбиття та глибини відстані, наведено у [18]. Але використання однофотонних лідарів у задимленому середовищі є ускладненим, оскільки у випадку поглинання та розсіювання фотон може не повернутися і значення відстані для такого пікселя не буде визначеним.

У [19] досліджувалося використання однофотонних лідарів для побудови зображень в умовах задимлення. Наведено модель розсіювання фотонів у часовій області, яка базується на гамма-розподілі та враховує параметри лідара і характеристики часток диму. Поглинання та розсіювання відбуваються одночасно у зв'язку із співвимірністю довжин хвилі лазера та розміру

часток і зумовлюють величину поглинальної відстані між лідаром та об'єктом. Із зростанням поглинання для великих відстаней кількість відбитих від цілі фотонів зменшується. На середнє розсіювання впливає потужність лазера, функція відгуку системи та тривалість дії перешкоди. В результаті отримано модель гамма-розподілу розсіювання від часток диму.

Такій же проблемі присвячена робота [20], у якій аналізується сигнал, відбитий від цілі та ослаблений туманом, для побудови тривимірних зображень. Наведено алгоритм побудови таких зображень, який містить блоки вимірювання кількості імпульсів у кожному пікселі, застосування гамма-перетворення, компенсацію накопичень, застосування другого гамма-перетворення та отримання глибини до кожної точки. Запропонований алгоритм дає змогу на відстані 1,4 км в умовах туману збільшити відношення сигналу до фону та підвищити розпізнавання зображення до 0,3088, що на 20,5% краще у порівнянні з традиційним алгоритмом, а відносну похибку вимірювання відстані зменшити на 28,2%.

Експериментальні дослідження побудови зображень предметів за допомогою лідара описані у [21]. За допомогою лідара отримано зображення предметів на відстані до 150 м із застосуванням однофотонного детектування. Між предметами та лідаром розташовано задимлене середовище товщиною 10 м. Довжина хвилі лазера становила 1550 нм та 637 нм. Для обробки інформації використані дані про координати точки та час затримки фотона. Застосовано розподіл Пуассона, що дало можливість отримати відстань, відкинувши шум, спричинений задимленням. Запропонований метод дає можливість спостерігати предмети та їх переміщення у режимі реального часу в задимленому середовищі.

Для вимірювання відстаней до точок поверхні в напівпрозорому середовищі використовують поляризаційні лідари, які дають змогу вимірювати глибину дна у воді від 10 см до 6 м. Отримані сигнали від двох поверхонь відділяються з використанням векторів Стокса та матриці Мюллера. Інформація про відстань отримується з використанням розподілу Пуассона. Результати розробки та дослідження роботи поляризаційного лідара наведено в [22]. Теоретичні основи використання поляризаційних лідарів для визначення відстаней у неглибокому середовищі з двома поверхнями описано і в [23]. Одна з поверхонь відбиває промінь світла практично без зміни поляризації, а друга поверхня, до якої визначають відстань, деполіризує його. Під час експерименту було визначено відстань до поверхні кризь скло та шар повітря.

У роботі [24] запропоновано метод зменшення похибки дистанційного проходження шляхом нерівномірного розподілу інтенсивності ехо-імпульсу на два. Промінь низької інтенсивності використовується для зменшення похибки проходження променя великої

інтенсивності. Без попереднього моделювання чи додаткової обробки метод здатний зменшити помилку вимірювання дальності в реальному часі.

Результати аналізу роботи лідарів за видами, діапазоном та довжиною хвилі наведені в таблиці 1.

**Таблиця 1**

Види лідарів, їх основні властивості та якість роботи у непрозорому середовищі

Вид технології лідара	Діапазон та довжина хвилі		Якість роботи	
	Видимий	Інфрачервоний	Максимальна відстань	Розпізнавання об'єктів
Звичайний лазер	532 нм	1064 нм	Не вказана, досягається на коротких довжинах хвилі	Не вказано
		905 нм	До 8 м	Не вказано
		1560 нм	Не вказана	Виявлено рухомі предмети крізь полум'я
		905 нм	До 100 м у прозорому середовищі та 0,3-0,4 м у задимленому	Не вказано
	300-750 нм	750-1300 нм	Не вказана, найменше ослаблення для часток розміром 0,1 мкм у видимому та інфрачервоному діапазонах, а для 0,4 мкм – більше відбиття у видимому діапазоні	Не вказано
	350-700 нм	800-1100 нм	Не вказана, ослаблення є меншим в інфрачервоному діапазоні	Не вказано
Однофотонний	Не вказано	Не вказано	1,4 км в умовах туману	Розпізнавання до 0,3088
	637 нм	1550 нм	150 м при товщині задимленого середовища 10 м	Побудова зображень предметів
Поляризаційний	Не вказано	Не вказано	10 см – 6 м, робота у воді	Виміряно глибину дна

Як видно з таблиці, ефективність роботи звичайних лідарів є вищою в інфрачервоному діапазоні. Перспективними є однофотонні лідари, які можуть працювати на значно більших відстанях: від сотень метрів до понад 1 км. Поляризаційні лідари використовують для роботи на межі середовищ, зокрема у воді. Це відкриває перспективу їх застосування для розпізнавання зображень у задимленому середовищі крізь скло. Недоліком є невелика відстань розпізнавання – до 10 м.

Для формування зображень від лідарів використовують різні методи. Динамічна

нерівномірність зображення, сформованого лідаром, потребує застосування технологій розпізнавання та покращення зображень, які базуються на різноманітних методах. Іноді ефект приносить об'єднання даних від лідарів та інших пристроїв, зокрема радарів, з використанням методу кластеризації даних лідара та подальшим порівнянням з інформацією від радара [25].

Виділення лінійних структур може здійснюватися із застосуванням машинного навчання [26]. З цією метою спочатку проводять аналіз зображень, на основі якого відбувається процес машинного навчання.



За проведеним аналізом літературних джерел виділено основні методи, які використовують

для формування зображення, отриманого з лідара (рис. 3).



**Рисунок 3** – Основні методи формування зображення за допомогою лідара

Без обробки зображень проводили дослідження роботи лідара у більшості проаналізованих джерел. Ефективність розпізнавання зображень є невисокою з причин ослаблення та дисперсії променя часточками диму. У цьому випадку вирішальне значення має діапазон довжини хвиль. Кращою є якість зображення в інфрачервоному діапазоні до 1500 нм.

Застосування статистичних методів обробки зображення, зокрема гамма-розподілу, використовують для однофотонних лідарів. Цей метод дає можливість врахувати розсіювання фотонів та будувати більш якісне зображення цілі. В окремих випадках застосування подвійного гамма-перетворення значно збільшить відстань, на якій можливе розпізнавання об'єктів.

Розподіли Пуассона та нормальний також відносять до статистичних методів, які застосовують для обробки зображень поляризаційних та звичайних лідарів.

Машинне навчання є перспективним та може бути використане не лише для розпізнавання лінійних структур, але і для об'єктів більш складної форми, зокрема рухомих та змінної форми.

#### **Висновки**

Лідар-технології успішно застосовують як доповнення або альтернативу тепловізійним, інфрачервоним чи радіолокаційним методам. Використання лідар-технологій для побудови зображень предметів є найбільш ефективним в оптично прозорому середовищі, а дим, туман та пил ускладнюють їх застосування, оскільки таке середовище спричиняє ослаблення і дисперсію лазерних променів, спотворюючи зображення. Без застосування методів обробки зображення ефективність роботи лідара у задимленому середовищі є невисокою, зростаючи із збільшенням довжини хвилі в інфрачервоному діапазоні. Для побудови зображень предметів в умовах задимленого середовища найбільш

ефективними є однофотонні лідари. Поляризаційні лідари можуть застосовуватися для роботи у задимленому середовищі крізь скло. Ефективність розпізнавання зображень, отриманих з лідара, зростає за умови застосування технологій обробки отриманих зображень, зокрема гамма-розподілу, розподілу Пуассона, нормального розподілу та машинного навчання.

#### **Список літератури:**

1. Луц В. І., Войтович Д. П., Лазаренко О. В., Штангрет Н. О. Розроблення методики оцінки параметрів пожежних тепловізорів. *Пожежна безпека*. 2019. №35. С. 41-48. <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.07>
2. Hitch A. L., Nappo C. J., Miller D. R. On the use of lidar images of smoke plumes to measure dispersion parameters in the stable boundary layer. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2006. 23. Pp. 1150-1154. <https://doi.org/10.1175/JTECH1896.1>
3. Julien Tissota J., Talbauta M., Yona J., Coppallea A., Besconda A. Spectral study of the smoke optical density in non-flaming condition. *Procedia Engineering*. 2013. 62. P. 821-828. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>
4. Huang Z., Shen X., Tang S., Zhou T., Dong O., Zhang S., Li M., Wang Y. Simulated depolarization ratios for dust and smoke at laser wavelengths: implications for lidar application. *Optics Express*. 2023. 31. Pp. 10541-10553. <https://doi.org/10.1364/OE.484335>
5. Starr J. W., Lattimer B. Y. Evaluation of navigation sensors in fire smoke environments. *Fire Technology*. 2014. 50. Pp. 1459-1481. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0356-3>
6. Starr J. W., Lattimer B. Y. A comparison of IR stereo vision and LIDAR for use in fire environments. *Sensors, 2012 IEEE*. (Taipei, October 28-31, 2012). Pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411591>

7. Mitchell E. W., Hoehler M. S., Giorgetta F. R., Hayden T., Rieker G. B., Newbury N. R., Baumann E. Coherent laser ranging for precision imaging through flames. *Optica*. 2018. 5(8). Pp. 988-995. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000988>
8. Mielle M., Magnusson M., Lilienthal A. J. A comparative analysis of radar and lidar sensing for localization and mapping. *European Conference on Mobile Robots (ECMR) : proceedings*. (Prague, September 4-6, 2019). Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ECMR.2019.8870345>.
9. Li S., Cheng X., Mei P., Lu S., Yang H., Zhang H. Multiple scattering of light transmission in a smoke layer. *Optik*. 2014. 125. Pp. 2185–2190. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.040>
10. Reid J. S., Hobbs P.V. Physical and optical properties of young smoke from individual biomass fires in Brazil. *Journal of geophysical research*. 1998. 103(D24). Pp. 32,013-32,030 <https://doi.org/10.1029/98JD00159>
11. Kirchstetter T.W., Thatcher T. L. Contribution of organic carbon to wood smoke particulate matter absorption of solar radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012. 12. Pp. 6067–6072. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6067-2012>
12. Kirchstetter T. W., Novakov T., Hobbs P. V. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of geophysical research*. 2004. 109. D21208. <https://doi.org/10.1029/2004JD004999>
13. Jung P. S., Karpierz M. A., Pałka N., Rurka E. The influence of smoke on THz imaging. 2012. *Photonics letters of Poland*. 4(3). Pp. 94-96. [doi.org/10.4302/photon.%20lett.%20pl.v4i3.336](https://doi.org/10.4302/photon.%20lett.%20pl.v4i3.336)
14. Parent G., Boulet P., Morlon R., Blanchard E. Radiation attenuation and opacity in smoke and water sprays. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. 197. Pp. 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.015>
15. Tissota J., Talbauta M., Yona J., Coppallea A., Bescond A. Spectral study of the smoke optical density in non-flaming condition. *Procedia Engineering*. 2013. 62(3). Pp. 821-828. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>
16. Chen L. C., Teo T. A., Shao Y. C., Lai Y. C., Rau J. Y. Fusion of LIDAR data and optical imagery for building modeling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2004. 35(B4). Pp. 732-737.
17. Fritsche P., Kueppers S., Briese G., Wagner B. Radar and LiDAR Sensorfusion in Low Visibility Environments. *13<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2016 : Proceedings*. (). 2. Pp. 30-36. <https://doi.org/10.5220/0005960200300036>
18. Yan Q., Li D., Wang Y., Yang Y., Tang L., Wang Y. Single-Photon Reflectivity and Depth Imaging by Continuous Measurement of Arrival Time of Photons. *IEEE Photonics Journal*. 2019. 11 (6). Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2945989>.
19. Zhang Y., Li S., Sun J., Jiang P., Zhou S., Zhang X., Hou Y., Zhang H. Estimation of smoke echo signal using single photon lidar. *Thirteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2022): Proc. 2022*. 124780E. <https://doi.org/10.1117/12.2647716>
20. Zhang Y., Li S., Sun J., Zhang X., Liu D., Zhou X., Li H., Hou Y. Three-dimensional single-photon imaging through realistic fog in an outdoor environment during the day. *Optics Express*. 2022. 30(19). Pp. 34497-34509. <https://doi.org/10.1364/OE.464297>
21. Tobin R., Halimi A., McCarthy A. et al. Robust real-time 3D imaging of moving scenes through atmospheric obscurant using single-photon LiDAR. *Scientific Reports*. 2021. 11. 11236. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90587-8>
22. Xu L., Yang X., Wu L., Jin C., Zhang Y. Dual Gm-APD Polarization Lidar to Acquire the Depth Image of Shallow Semitransparent Media With a Wide Laser Pulse. *IEEE Photonics Journal*. 2020. 12(5). 6803310. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3027378>
23. Mitchell S. E. Thayer J. P. Ranging through Shallow Semitransparent Media with Polarization Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. 31(3). Pp. 681–697. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00014.1>
24. Ye L., Gu G., He W., Dai H., Chen Q. A Real-Time Restraint Method for Range Walk Error in 3-D Imaging Lidar Via Dual Detection. *IEEE Photonics Journal*. 2018. 10(2). 3900309. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2816652>
25. Alejo, D., Rey, R., Cobano, J.A., Caballero, F., Merino, L. Data Fusion of RADAR and LIDAR for Robot Localization Under Low-Visibility Conditions in Structured Environments. In: Tardioli, D., Matellán, V., Heredia, G., Silva, M.F., Marques, L. (eds) ROBOT2022: Fifth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023: Springer. Vol. 590. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21062-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21062-4_25).
26. Laplaige C., Ramel J. Y., Rodier X., Ben-Rhima B. Extraction of linear structures from LIDAR images using a machine learning approach. *Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, IMEKO: proceedings*. 2016. Pp. 83-88.
27. Brock, J. C., Purkis S. J. 2009: The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management. *J. Coastal Res.*, 53, Pp. 1–5. <https://doi.org/10.2112/SI53-001.1>



28. Twardowski M.S., Boss E., MacDonald J. B., Pegau W. S., Barnard A. H., Zaneveld J., Ronald V. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. 06(C7). Pp. 14,129-14,142. <https://doi.org/10.1029/2000JC000404>

29. Mulholland G. Smoke Production and Properties, in "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. Society of Fire Protection Engineers. Boston, 2002. P. 2-258.

30. Coppalle A., Nedelka D., Bauer B. Fire Protection: Water Curtains. *Fire Safety Journal*. 1993. 20(3). Pp. 241

#### References:

1. Lushch, V. I., Voŷtovych, D. P., Lazarenko, O. V., Shtanhret, N. O. (2019). Rozroblennia metodyky otsinky parametriv pozhezhnykh teplovizoriv [Development of methods for evaluating the parameters of fire thermal imagers]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Safety*, 35, 41-48 <https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.07> [in Ukrainian]

2. Hitch, A. L., Nappo, C. J., Miller, D. R. (2006). On the use of lidar images of smoke plumes to measure dispersion parameters in the stable boundary layer. *Journal of atmospheric and oceanic technology. Journal of atmospheric and oceanic technology*, 23, 1150-1154. <https://doi.org/10.1175/JTECH1896.1>

3. Julien Tissota, J., Talbauta, M., Yona, J., Coppallea, A., Besconda, A. (2013). Spectral study of the smoke optical density in non-flaming condition. *Procedia Engineering*, 62, 821-828. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>

4. Huang, Z., Shen, X., Tang, S., Zhou, T., Dong, O., Zhang, S., Li, M., Wang, Y. (2023). Simulated depolarization ratios for dust and smoke at laser wavelengths: implications for lidar application. *Optics Express*, 31, 10541-10553. <https://doi.org/10.1364/OE.484335>

5. Starr, J. W., Lattimer, B. Y. (2014). Evaluation of navigation sensors in fire smoke environments. *Fire Technology*, 50, 1459-1481. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0356-3>

6. Starr, J. W., Lattimer, B. Y. (2012). A comparison of IR stereo vision and LIDAR for use in fire environments. *Sensors, IEEE*, 2012, (pp. 1-4). October 28-31, 2012. Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411591>

7. Mitchell, E. W., Hoehler, M. S., Giorgetta, F. R., Hayden, T., Rieker, G. B., Newbury, N. R., Baumann, E. (2018). Coherent laser ranging for precision imaging through flames. *Optica*, 5(8), 988-995. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000988>

8. Mielle M., Magnusson M., Lilienthal A. J. A comparative analysis of radar and lidar sensing for localization and mapping. *European Conference on Mobile Robots (ECMR) : proceedings*. (pp. 1-6). September 4-6, 2019, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1109/ECMR.2019.8870345>.

9. Li, S., Cheng, X., Mei, P., Lu, S., Yang, H., Zhang, H. (2014). Multiple scattering of light transmission in a smoke layer. *Optik*, 125, 2185–2190. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.040>

10. Reid, J. S., Hobbs, P.V. (1998). Physical and optical properties of young smoke from individual biomass fires in Brazil. *Journal of geophysical research*, 103(D24), 32,013-32,030. <https://doi.org/10.1029/98JD00159>

11. Kirchstetter, T.W., Thatcher, T. L. (2012). Contribution of organic carbon to wood smoke particulate matter absorption of solar radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 6067–6072. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6067-2012>

12. Kirchstetter, T. W., Novakov, T., Hobbs, P. V. (2004). Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of geophysical research*, 109, D21208. <https://doi.org/10.1029/2004JD004999>

13. Jung, P. S., Karpierz, M. A., Pałk,a N., Rurka, E. (2012). The influence of smoke on THz imaging. *Photonics letters of Poland*, 4(3), 94-96. [doi.org/10.4302/photon.%20lett.%20pl.v4i3.336](https://doi.org/10.4302/photon.%20lett.%20pl.v4i3.336)

14. Parent, G., Boulet, P., Morlon, R., Blanchard, E. (2017). Radiation attenuation and opacity in smoke and water sprays. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 197, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.015>

15. Tissot,a J., Talbauta, M., Yona, J., Coppallea, A., Bescond, A. (2013). Spectral study of the smoke optical density in non-flaming condition. *Procedia Engineering*, 62(3), 821-828. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.131>

16. Chen, L. C., Teo, T. A., Shao, Y. C., Lai, Y. C., Rau, J. Y. (2004). Fusion of LIDAR data and optical imagery for building modeling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(B4), 732-737.

17. Fritsche, P., Kueppers, S., Briese, G., Wagner, B. (2016). Radar and LiDAR Sensorfusion in Low Visibility Environments. *13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2016 : proceedings* (pp. 30-36). 2. July 29-31, 2016, Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.5220/0005960200300036>

18. Yan, Q., Li, D., Wang, Y., Yang, Y., Tang, L., Wang, Y. (2019). Single-Photon Reflectivity and Depth Imaging by Continuous Measurement of

- Arrival Time of Photons. *IEEE Photonics Journal*, 11(6). 1-14. doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2945989.
19. Zhang, Y., Li, S., Sun, J., Jiang, P., Zhou, S., Zhang, X., Hou, Y., Zhang, H. (2022). Estimation of smoke echo signal using single photon lidar. *Thirteenth International Conference on Information Optics and Photonics CIOP 2022: Proceedings*. (124780E). <https://doi.org/10.1117/12.2647716>
20. Zhang, Y., Li, S., Sun, J., Zhang, X., Liu, D., Zhou, X., Li, H., Hou, Y. (2022). Three-dimensional single-photon imaging through realistic fog in an outdoor environment during the day. *Optics Express*, 30(19), 34497-34509. <https://doi.org/10.1364/OE.464297>
21. Tobin, R., Halimi, A., McCarthy, A. et al. (2021). Robust real-time 3D imaging of moving scenes through atmospheric obscurant using single-photon LiDAR. *Scientific Reports*, 11. 11236. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90587-8>
22. Xu, L., Yang, X., Wu, L., Jin, C., Zhang, Y. (2020). Dual Gm-APD Polarization Lidar to Acquire the Depth Image of Shallow Semitransparent Media With a Wide Laser Pulse. *IEEE Photonics Journal*, 12(5), 6803310. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3027378>
23. Mitchell, S. E. Thayer, J. P. (2014). Ranging through Shallow Semitransparent Media with Polarization Lidar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(3), 681–697. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00014.1>
24. Ye, L., Gu, G., He, W., Dai, H., Chen, Q. (2018). A Real-Time Restraint Method for Range Walk Error in 3-D Imaging Lidar Via Dual Detection. *IEEE Photonics Journal*, 10(2), 3900309. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2816652>
25. Alejo, D., Rey, R., Cobano, J.A., Caballero, F., Merino, L. (2023). Data Fusion of RADAR and LIDAR for Robot Localization Under Low-Visibility Conditions in Structured Environments. In: Tardioli, D., Matellán, V., Heredia, G., Silva, M.F., Marques, L. (eds) *ROBOT2022: Fifth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 590. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21062-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21062-4_25).
26. Laplaige, C., Ramel, J. Y., Rodier, X., Ben-Rhima, B. (2016). Extraction of linear structures from LIDAR images using a machine learning approach. In *Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, IMEKO : proceedings*, (pp. 83-88). October 19-21, 2016, Torino, Italy.
27. Brock, J. C., Purkis S. J. (2009). The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management. *J. Coastal Res.*, 53, 1–5. <https://doi.org/10.2112/SI53-001.1>
28. Twardowski, Michael S., Boss, Emmanuel, MacDonald, Jacob B., Pegau, W. Scott, Barnard, Andrew H., Zaneveld, J. Ronald V. (2001). A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 106(C7), 14,129-14,142. <https://doi.org/10.1029/2000JC000404>
29. Mulholland, G. (2002). Smoke Production and Properties. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rded. Society of Fire Protection Engineers, Boston, 2-258.
30. Coppalle, A., Nedelka, D., Bauer, B. (1993). Fire Protection: Water Curtains. *Fire Safety Journal*. 20(3). 241-255. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90046-S)
31. Intel RealSense LiDAR Camera. (2024). URL: <https://www.intelrealsense.com/lidar-camera-1515/>
32. Velodyne lidar (2024). URL: <https://velodynelidar.com/products/puck/>

© О. Д. Кузик, О. В. Придатко, 2024.

**Оглядова.**

Надійшла до редакції 06.06.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.