

УДК 53.06:[681.84:004.04]

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІДАРНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ОПТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Кравченко Д.Н.

e-mail: daria.kravchenko@nure.ua

Науковий керівник – к.фіз.-мат.н., доц. Коваленко О.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

The work is devoted to the study of physical processes underlying the operation of modern optical lidar sensors. The text analyzes the principles of distance measurement and the structure of the main components of the system: laser sources and photodetectors. Particular attention is paid to the choice of operating spectral ranges from the perspective of safety for vision and minimizing background interference. The physics of the interaction of light with the environment is considered, in particular the mechanisms of elastic and inelastic scattering. The technological features of semiconductor materials and detector architectures that ensure effective processing of the reflected optical signal in noise conditions are described.

Термін LiDAR походить від англійського Light Detection and Ranging, що перекладається як «виявлення та вимірювання відстані за допомогою світла». Акронім для цього виду вимірювальної техніки вперше був введений Міддлтоном і Спілхаусом у 1953 році [1].

Принцип роботи лідара заснований на випромінюванні електромагнітних хвиль в оптичному та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль і прийомі відбитого сигналу назад [2]. Кожен такий пристрій містить три базові компоненти: джерело лазерного випромінювання, фотодетектор, що діє як приймач відбитих світлових сигналів, та систему формування та спрямування оптичного сигналу.

Конструкція лідара залежить від умов його експлуатації. Для автономного керування важливо швидко виявляти перешкоди на малих відстанях, тоді як атмосферні лідари розраховані на дистанції у декілька кілометрів для збору слабкого розсіяного світла. Тому в автомобільних сенсорах використовують компактні модулі із широким полем огляду, а атмосферні лідари потребують масивних приймальних об'єктивів, спрямованих у певну зону.

Залежно від способу обробки сигналу лідари поділяються на когерентні та прямі. Когерентний лідар змішує випромінюваний лазерний сигнал із відбитим, що дозволяє одночасно обчислювати дальність і миттєву швидкість об'єктів за ефектом Доплера. Попри високу точність та завадостійкість, частіше використовують метод direct time-of-flight (dToF), який базується на вимірюванні інтервалу між випромінюванням та

прийомом короткого світлового імпульсу [3]. Для розуміння роботи лідарів важливо розрізняти сегменти оптичного спектра, які поділяються на ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне випромінювання. Ультрафіолетове випромінювання (100–400 нм) застосовується переважно в наукових дослідженнях для аналізу складу атмосфери або виявлення забруднень.

Висока інтенсивність сонячного випромінювання у видимому спектрі (380–780 нм) знижує точність вимірювань. Саме тому, наприклад, лідари раманівського розсіювання використовують вночі, щоб фонове сонячне випромінювання не перекривало слабкий корисний сигнал. Більшість сучасних сенсорів працюють у ближній інфрачервоній області (від 780 нм до 1550 нм). Крім мінімізації сонячних перешкод, ІЧ-випромінювання невидиме для людського ока, що дозволяє пристроям працювати непомітно.

Фактор безпеки для зору є вирішальним при проєктуванні систем, що працюють у публічних просторах. Тому в автономному транспорті домінують дві хвилі: 905 нм та 1550 нм. Довжина хвилі 905 нм широко використовується завдяки доступності компонентів, проте має обмеження щодо потужності випромінювання, аби не пошкодити сітківку людського ока. Довжина хвилі 1550 нм, навпаки, вважається безпечною для очей, але вартість таких компонентів наразі залишається високою.

В основі роботи лідара лежить детектування фотонів, що змінили свій напрямок внаслідок взаємодії з частинками середовища. Коли лазерний промінь поширюється крізь атмосферу, може відбуватися кілька типів взаємодії з речовиною, але домінуючим явищем є розсіювання [4]. При пружному розсіюванні енергія і довжина хвилі фотона не змінюються, тому головне – виявити відбитий сигнал та правильно інтерпретувати його інтенсивність. Оскільки довжина хвилі не змінюється, приймальну систему лідара можна налаштувати на вузьку смугу пропускання довкола робочої довжини хвилі. Це дозволяє ігнорувати сторонні шуми оптичного спектра і фокусуватися на корисному сигналі.

До пружного типу належать релєївське розсіювання і розсіювання Мі. Релєївське розсіювання виникає, коли розмір частинки значно менший за довжину хвилі лазера. Інтенсивність розсіювання обернено пропорційна четвертому степеню довжини хвилі [5]. Ця залежність є одним із чинників вибору робочого діапазону лідарів: використання довшого інфрачервоного випромінювання дозволяє мінімізувати втрати енергії на розсіювання та покращити співвідношення сигналу до фонового шуму. Розсіювання Мі відбувається, коли довжина хвилі вхідного випромінювання має розмір, подібний до розміру атмосферних частинок. Причиною розсіювання Мі є аерозолі: дим, туман або пил. Високий рівень зворотного розсіювання від частинок біля лідара обмежує діапазон приймача. У таких умовах фотони розсіюються на частках туману, і повертаються в детектор раніше, ніж сигнал від перешкоди. Крім того, у густому тумані можливе багаторазове

розсіювання, що призводить до завищення значень відстані при використанні методу dToF. У випадку непружного розсіювання фотон передає частину своєї енергії молекулі, що призводить до зміни довжини хвилі відбитого сигналу.

Найвідомішим прикладом є раманівське розсіювання, яке використовується для вимірювання концентрації атмосферних газів. Лідар раманівського розсіювання не потребує специфічних довжин хвиль випромінювання або високої спектральної чистоти лазерного світла, проте необхідна висока середня потужність лазера та довжина хвилі випромінювання в діапазоні від 320 до 550 нм [1].

За сприйняття фотонів відповідають фотодетектори. Їх виготовляють із різних напівпровідникових матеріалів, вибір яких залежить від довжини хвилі лазера. Кремній (Si) – поширений і дешевий у виробництві напівпровідник, чутливий до видимого та ближнього інфрачервоного діапазону до 1000 нм. Для 1000-2500 нм використовують сполуки елементів III-V групи, наприклад арсенід галію-індію (InGaAs).

Окрім матеріалу, фотодетектори розрізняють за їхньою архітектурою та здатністю підсилювати сигнал. Лавинні фотодіоди (APD) є найпоширенішим типом датчиків в лідарах, і забезпечують помірний коефіцієнт посилення. Другий тип датчиків побудований на однофотонних лавинних діодах (SPAD), які мають дуже великий коефіцієнт посилення та здатні виробляти вимірюваний вихідний струм з кожного виявленого фотона. Кремнієві фотопомножувачі (SiPM) – це масиви кремнієвих SPAD, які мають додаткову перевагу – здатність розрізняти окремі фотони від кількох фотонів, дивлячись на амплітуду згенерованого сигналу [3].

Список використаних джерел:

1. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere /ed. by C. Weitkamp. New York : Springer-Verlag, 2005. 456 p.
2. McManamon P. F. LiDAR Technologies and Systems. Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2019. 499 p. URL: <https://doi.org/10.1117/3.2518254>.
3. Hadji B. Demystifying LiDAR: An In-Depth Guide to the Great Wavelength Debate. EE Times. URL: <https://www.eetimes.com/demystifying-lidar-an-in-depth-guide-to-the-great-wavelength-debate/> (date of access: 25.02.2026).
4. Kovalenko E.N., Gokov A.M., Tyrnov O.F., Buts Yu. V. Empirical modeling of variations of electron density in the undisturbed mid-latitude D-region of the ionosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2020.V. 79, № 4. P. 335-342.
5. Gimmetstad G. G., Roberts D. W. Lidar Engineering: Introduction to Basic Principles. Cambridge University Press. 2023. 366 p. <https://doi.org/10.1017/9781139014106>.