

УДК 538.945

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>

Ігор МАШЕВСЬКИЙ

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Машевський, І. (2025). Мультиспектральні лідари та їх використання. *Фізика та освітні технології*, 1, 62–68, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ЛІДАРИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

У статті висвітлено теоретичні засади функціонування мультиспектральних лідарних (МСЛ) систем, їхню апаратну реалізацію, методологічні підходи до збору та обробки даних, а також охарактеризовано ключові напрями практичного застосування цієї технології. Розглянуто принципову архітектуру МСЛ, яка включає джерела випромінювання на різних довжинах хвиль, сканувальні механізми, приймальні оптичні модулі, фотодетекторні системи, а також допоміжні елементи навігаційного забезпечення (GPS/IMU). Окрему увагу приділено використанню суперконтинуумних лазерів і методам подвоєння частоти для розширення спектрального діапазону. Зазначено, що основною перевагою МСЛ є можливість одночасного отримання просторової та спектральної інформації при збереженні високої просторової роздільної здатності.

Проаналізовано потенціал МСЛ у забезпеченні точного спектрального розрізнення матеріалів та структурних елементів на основі спектрально-чутливих відбитих сигналів. Описано алгоритми цифрової обробки сигналів, включаючи методи радіометричної калібровки, компенсації атмосферних спотворень, а також машинного навчання, які застосовуються для класифікації, сегментації та візуалізації багатовимірних даних. Наведені емпіричні результати свідчать про високу точність розпізнавання об'єктів за даними МСЛ, що істотно перевищує показники традиційних лідарних систем і пасивних мультиспектральних зображень.

У роботі окреслено основні прикладні напрями використання мультиспектрального лідара, зокрема: агромоніторинг, лісознавство, геодезія та картографія, екологічний моніторинг, урбаністика, геологія і археологія. Показано, що синергія просторово-спектральних даних відкриває нові можливості в інтерпретації складних природних і антропогенних систем.

Проаналізовано ринкові тенденції, які свідчать про зростання інвестицій у сферу МСЛ-технологій та інфраструктури для їх інтеграції у мультисенсорні платформи. Зокрема, очікується суттєве зростання світового ринку лідарних систем, що також охоплює мультиспектральний сегмент.

Ключові слова: мультиспектральний лідар, дистанційне зондування, спектральна рефлектансія, хмара точок, цифрова обробка сигналів, геоінформаційні системи, машинне навчання, екологічний моніторинг.

Igor MASHEVSKY

Postgraduate Student at the Svidzinsky Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Mashevsky, I. (2025). Multyspektralni lidary ta yikh vykorystannya [Multispectral LiDAR Systems and Their Applications]. *Physics and Educational Technology*, 1, 62–68, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>

MULTISPECTRAL LIDAR SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS

The article presents the theoretical foundations of the functioning of multispectral LiDAR (MSL) systems, their hardware implementation, methodological approaches to data acquisition and processing, as well as outlines the key areas of practical application of this technology. The fundamental architecture of MSL is considered, which includes radiation sources operating at various wavelengths, scanning mechanisms, optical receiving modules, photodetector systems, and auxiliary navigation components (GPS/IMU). Particular attention is paid to the use of supercontinuum lasers and frequency doubling techniques to expand the spectral range. It is emphasized that a key advantage of MSL is the capability of simultaneous acquisition of both spatial and spectral information while maintaining high spatial resolution.

The potential of MSL in providing accurate spectral discrimination of materials and structural elements based on spectrally sensitive reflected signals is analyzed. The article describes digital signal processing algorithms, including radiometric calibration, atmospheric distortion compensation, and machine learning techniques applied for classification, segmentation, and visualization of multidimensional data. Empirical results indicate a high object recognition accuracy

using MSL data, which significantly exceeds the performance of traditional single-wavelength LiDAR systems and passive multispectral imagery.

The study outlines the main applied directions for the use of multispectral LiDAR, including agro-monitoring, forestry, geodesy and cartography, environmental monitoring, urban planning, geology, and archaeology. It is demonstrated that the synergy of spatial and spectral data opens new possibilities for interpreting complex natural and anthropogenic systems.

Market trends are also analyzed, highlighting a steady increase in investments in the field of MSL technologies and the infrastructure needed for their integration into multisensor platforms. In particular, significant growth of the global LiDAR market is anticipated, which also encompasses the multispectral segment.

Key words: multispectral LiDAR, remote sensing, spectral reflectance, point cloud, digital signal processing, geographic information systems, machine learning, environmental monitoring.

Вступ. Технології дистанційного зондування набувають дедалі більшого значення як інструмент отримання інформації про поверхню Землі без фізичного контакту (Leah A. Wasser, 2024). Ці технології є критично важливими для широкого спектру застосувань, включаючи моніторинг навколишнього середовища, управління ресурсами та міське планування. У сучасній практиці дистанційного зондування спостерігається тенденція до поєднання геометричної інформації, яку традиційно збирають лідарні датчики, з спектральною інформацією, що отримується з оптичних зображень (Takhtkeshha, 2024). Такий підхід дозволяє досягти значно точніших результатів у різноманітних задачах, що свідчить про зростаючу потребу в збагачених наборах даних, які інтегрують просторові та спектральні виміри.

Поява мультиспектральних лідарних (МСЛ) систем, що працюють на різних довжинах хвиль, стала революційним кроком у сфері одночасного отримання інформації про висоту та інтенсивність відбиття (Takhtkeshha, 2024). Ця одночасність є ключовою перевагою МСЛ над методами, які отримують просторові та спектральні дані окремо, оскільки дозволяє уникнути потенційних невідповідностей та забезпечує узгоджені умови навколишнього середовища під час збору даних. Технологія МСЛ вже успішно застосовується для великомасштабного картографування у різних галузях (Takhtkeshha, 2024), що підкреслює її універсальність та ефективність у наданні детальної інформації для різних застосувань.

Дослідження показали, що використання даних МСЛ забезпечує значно вищу точність класифікації об'єктів. В одному з досліджень точність класифікації з використанням даних МСЛ досягла 88,7%, що на 9,8%–39,2% перевищувало показники однохвильового лідара та на 4,2% – мультиспектральних зображень (Gong,

2015). Ці кількісні дані підтверджують вищу ефективність МСЛ у розрізненні об'єктів. МСЛ пропонує активну спектроскопію, що дозволяє проводити вимірювання навіть у постійно затінених областях або безпосередньо аналізувати склад поверхні (Jonathan, 2005). На відміну від пасивного мультиспектрального зображення, МСЛ не залежить від сонячного освітлення та відбивної здатності поверхні, забезпечуючи стабільні дані незалежно від умов освітлення (Fleming, 2015). Крім того, МСЛ здатний надавати спектральні дані з високою просторовою роздільною здатністю (на рівні листя) у великих масштабах (до рівня насаджень), що раніше було складно досягти без руйнівного відбору проб (Kaasalainen, 2019). Це відкриває нові можливості для неінвазивних та широкомасштабних екологічних досліджень.

Різні галузі промисловості, включаючи сільське господарство, лісове господарство та землеустрій, можуть отримати значну вигоду від додаткової інформації, яку фіксує мультиспектральне зображення і яка часто залишається непоміченою для людського ока або стандартних камер. Це підкреслює зростаюче визнання цінності детальної спектральної інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Зростаючий інтерес до сприйняття та оцифрування навколишнього середовища покладається на відповідні методи дистанційного збору даних, і мультиспектральний лідар є перспективним рішенням для одночасного доступу до геометричної інформації та інформації про матеріали (Han, 2022). Це свідчить про зростаючий попит на технології, які можуть забезпечити всебічне цифрове представлення світу.

Сучасні тенденції розвитку мультиспектральних лідарних систем свідчать про поступове досягнення технічної зрілості наземних мультиспектральних лідарних інструментів для комерційного застосування (Kaasalainen,

2019). Це засвідчує перехід від науково-дослідних інструментів до більш доступних та зручних у використанні комерційних систем. Спостерігається тенденція до поєднання лідарів з іншими датчиками, такими як системи позиціонування та пасивні камери, для створення мультисенсорних екосистем з метою покращення ситуаційної обізнаності, особливо для автономних транспортних засобів (Kaasalainen, 2019). Це вказує на те, що МСЛ розглядається не як окреме рішення, а як компонент у ширшому наборі сенсорних технологій. Ринок лідарних технологій демонструє значне зростання, з прогнозами досягнення 7,94 мільярда доларів США до 2030 року (LiDAR Market Size, 2022) та 15,83 мільярда доларів США до 2034 року (LiDAR Market Size, 2025). Хоча ці цифри представляють загальний ринок лідарів, вони вказують на сильну тенденцію до зростання, яка, ймовірно, включає і мультиспектральний сегмент. Ринок мультиспектральних камер також зростає і, за оцінками, досягне 2,2 мільярда доларів США до 2028 року (Multispectral Camera Market by Application, 2023), що свідчить про ширший інтерес та інвестиції в мультиспектральні сенсорні технології, які доповнюють МСЛ.

Принцип дії мультиспектральних лідарів.

Мультиспектральна лідарна система зазвичай включає джерело лазерного випромінювання, що генерує імпульси на кількох довжинах хвиль, скануючий механізм для спрямування лазерного променя, оптичний приймальний блок для збору розсіяного назад світла та блок детектування з фотодіодами та оцифровувачем для реєстрації інтенсивності відбитих сигналів на кожній довжині хвилі (Kaasalainen, 2019). Система також містить GPS для отримання інформації про місцезнаходження та інерціальний вимірювальний блок (IMU) для визначення орієнтації датчика (Leah, 2024). У деяких перетворених системах використовуються волоконні підсилювачі для генерації лазерних імпульсів на певних довжинах хвиль, таких як 1064 нм та 1570 нм. Методи подвоєння частоти можуть розширити діапазон довжин хвиль у видимій частині спектра (Jonathan, 2005).

Технологія LiDAR працює за принципом випромінювання лазерних імпульсів та вимірювання часу, за який відбите світло повертається до датчика (принцип часу прольоту)

(Leah, 2024). Цей час прольоту використовується для розрахунку відстані до цілі. Також реєструється інтенсивність відбитого світла на кожній довжині хвилі, що надає інформацію про відбивну здатність цілі в цих конкретних спектральних діапазонах (Takhtkeshha, 2024). Мультиспектральний лідар розширює цей принцип, використовуючи кілька довжин хвиль лазерного випромінювання (зазвичай у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі) для зондування цілі (Takhtkeshha, 2024). Вибір довжин хвиль є критично важливим, оскільки різні матеріали по-різному відбивають та поглинають світло в різних частинах спектра.

У мультиспектральних лідарних системах можуть використовуватися кілька окремих лазерів, кожен з яких випромінює на певній довжині хвилі, або суперконтинуумний лазер, який генерує широкий спектр світла, з якого за допомогою фільтрів або інших оптичних компонентів вибираються конкретні довжини хвиль (Takhtkeshha, 2024). Використання кількох лазерів забезпечує простоту та порівняльну безпеку для очей і співвідношення сигнал/шум, подібне до традиційних лідарів, але може обмежувати масштабованість та ускладнювати вирівнювання (Kaasalainen, 2019). Суперконтинуумні лазери можуть охоплювати більші спектральні діапазони та забезпечувати одночасні вимірювання на кількох довжинах хвиль, але стикаються з проблемами досягнення безпечних для очей рівнів потужності для дистанційних вимірювань (Kaasalainen, 2019). Детектування зазвичай здійснюється за допомогою фотодіодів (таких як лавинні фотодіоди – APD), які перетворюють прийняте світло в електричний сигнал, та швидких оцифровувачів для запису форми хвилі імпульсів, що повертаються, на кожній довжині хвилі (Kaasalainen, 2019).

Під час збору даних МСЛ-система одночасно реєструє відстань до цілі та інтенсивність розсіяного назад світла на кожній зі своїх робочих довжин хвиль (Takhtkeshha, 2024). Це призводить до створення тривимірної хмари точок, де кожна точка має пов'язані значення спектральної інтенсивності (Kaasalainen, 2019). Для отримання точної інформації про відстань та інтенсивність використовуються методи обробки сигналів для аналізу форми хвилі імпульсів, що повертаються (Kaasalainen,

2019). Радіометрична калібровка та корекція є важливими етапами обробки для врахування системних спотворень, змін висоти рельєфу, атмосферного поглинання та впливу відстані й кута падіння на дані інтенсивності, забезпечуючи точне відображення спектральної відбивної здатності цілі значеннями інтенсивності (Kaasalainen, 2019). Реєстрація спектральних даних забезпечує точне вирівнювання спектральної інформації з різних довжин хвиль з просторовими даними. Передові методи обробки, включаючи алгоритми машинного навчання, дедалі частіше використовуються для таких завдань, як сегментація хмари точок, класифікація та вилучення ознак на основі як просторових, так і спектральних характеристик (Gong, 2015).

Застосування мультиспектральних лідарів. Сільське господарство: Мультиспектральне зображення, часто в поєднанні з лідаром, використовується для точного моніторингу посівів, виявлення дефіциту поживних речовин, ранніх ознак стресу, а також спалахів хвороб або шкідників (Altmann, 2015). Це дозволяє своєчасно вживати цільових заходів. Лідар забезпечує точне 3D-картографування сільськогосподарських угідь, допомагаючи в аналізі рельєфу, нівелюванні земель, аналізі ґрунтів та плануванні зрошення (Kexin Zheng, 2023). Поєднання мультиспектральних даних з лідаром дозволяє оптимізувати зрошення та управління водними ресурсами шляхом виявлення зон водного стресу та розуміння потоку води на основі топографії (Altmann, 2015). МСЛ може допомогти прогнозувати врожайність шляхом точного вимірювання висоти рослин, щільності пологів та розподілу біомаси (Altmann, 2015). Технологія підтримує стале сільське господарство, забезпечуючи точне внесення добрив та пестицидів, зменшуючи відходи та вплив на навколишнє середовище (Kexin Zheng, 2023).

Екологія та лісове господарство: Мультиспектральне зображення допомагає розрізняти різні види рослин та типи лісів на основі їхніх спектральних властивостей відбиття (Han, 2022). Лідар використовується для моніторингу лісового вуглецю, екосистем та ресурсів, надаючи дані про висоту пологів, покриття, біомасу та структуру (Olsen, 2017). Мультиспектральний лідар дозволяє одночасно спостерігати як структурні, так і відбивні властивості, що дає

змогу відокремлювати деревні та листяні елементи пологів та потенційно допомагає у класифікації лісів за станом та видами (Takhtkeshha, 2024). Його можна використовувати для картографування фотосинтетичної здатності та здоров'я рослин шляхом визначення вмісту хлорофілу за спектральними індексами (Kaasalainen, 2019). МСЛ може допомогти виявляти та контролювати зміни в лісах з часом, такі як поширення хвороб або наслідки вирубки (Han, 2022).

Картографія та геодезія: Лідар є революційною технологією в аналізі рельєфу, забезпечуючи високоточні топографічні дані для створення детальних 3D-карт та моделей (Kexin Zheng, 2023). Мультиспектральний лідар кардинально змінює одночасне отримання інформації про висоту та інтенсивність, що є критично важливим для великомасштабного картографування в різних галузях (Takhtkeshha, 2024). Лідар здатний проникати крізь густу рослинність, щоб виявити справжню топографію землі під нею, що є важливим для точного картографування в заліснених районах. Висока точність лідарних даних є важливою для планування інфраструктури, управління ресурсами та різних геодезичних застосувань.

Моніторинг навколишнього середовища: Мультиспектральний лідар покращує завдання класифікації, надаючи детальну інформацію про різні екологічні умови та склад різних матеріалів. Його можна використовувати для розрізнення забруднення в снігу, виявлення замаскованих цілей та відокремлення штучних об'єктів від рослинності (Kaasalainen, 2019). Лідарні системи є ефективними інструментами для моніторингу екологічних змін у великих масштабах, включаючи ідентифікацію зсувів, картографування під час надзвичайних ситуацій та моніторинг ерозії. Мультиспектральне зображення допомагає оцінювати рослинний покрив, контролювати зміни у землекористуванні та виявляти інвазивні види у чутливих екосистемах (Binhui Wang, 2020). Його також можна використовувати для моніторингу параметрів якості води, таких як концентрація хлорофілу, та виявлення джерел забруднення (Binhui Wang, 2020).

Міське планування та інфраструктура: Лідар надає детальні 3D-моделі міського середовища, підтримуючи ініціативи розумних міст, цифрові двійники та планування

інфраструктури. Мультиспектральне зображення може оцінювати стан міських зелених зон, виявляти теплові острови та контролювати стан інфраструктури, такої як дороги та мости (Olsen, 2017). Лідар можна використовувати для оцінки висоти стоячої води на дорогах, що важливо для досліджень руйнування дорожнього покриття (Shi, 2021). Він також допомагає в управлінні комунальними та енергетичними лініями, виявляючи заростання рослинності (Kashani, 2015).

Геологія та гірнича справа: Лідар ефективний для оцінки стійкості скельних порід та збору інформації про геометрію поверхні скель (Vierhub-Lorenz, 2022). Мультиспектральний лідар можна використовувати для автоматизованої віртуальної геології оголень, допомагаючи в ідентифікації типів порід та картографуванні вмісту мінералів. Він має потенціал замінити візуальну ідентифікацію при розділенні мінералів від пустої породи на шахтах (Kaasalainen, 2019). Гіперспектральне зображення, часто інтегроване з лідаром, дозволяє проводити детальну розвідку та картографування корисних копалин (Kaasalainen, 2019).

Археологія та культурна спадщина: Лідар став важливим інструментом для виявлення та документування прихованих археологічних об'єктів, споруд та артефактів під поверхнею Землі, особливо під лісовим покривом.

Мультиспектральне зображення допомагає виявляти поховані споруди та артефакти, аналізуючи ледь помітні відмінності у рослинності та ґрунті (Olsen, 2017). Поєднання лідара з мультиспектральними даними може забезпечити більш повне розуміння археологічних ландшафтів. Лідар може створювати 3D-моделі археологічних об'єктів та історичних пам'яток з високою роздільною здатністю (Kashani, 2015).

Висновки. Мультиспектральні лідари являють собою передову технологію дистанційного зондування, яка поєднує високу точність просторових вимірювань з інформацією про спектральні властивості об'єктів. Здатність одночасно отримувати ці два типи даних відкриває широкі можливості для різноманітних застосувань у сільському господарстві, екології, картографії, моніторингу навколишнього середовища, міському плануванні, геології, гірничій справі та археології. Постійний розвиток технологій МСЛ, зростаюча комерційна доступність та тенденція до інтеграції з іншими сенсорами свідчать про значний потенціал цієї технології для майбутніх досліджень та практичного використання. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення точності, розширення спектральних діапазонів та розробку ефективних методів обробки даних для розкриття повного потенціалу мультиспектральних лідарів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Leah A. Wasser. The Basics of LiDAR – Light Detection and Ranging – Remote Sensing. NSF NEON. 2024. URL: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics> (дата звернення 26.03.2025).
2. Takhtkeshha N., Mandlbürger G., Remondino F., Hyypä J. Multispectral Light Detection and Ranging Technology and Applications: A Review *Sensors*. 2024. Vol.24 № 5. 1669. <https://doi.org/10.3390/s24051669>.
3. Gong W., Sun J., Shi S., Yang J., Du L., Zhu B., Song S. Investigating the Potential of Using the Spatial and Spectral Information of Multispectral LiDAR for Object Classification. *Sensors* 2015. Vol.15. № 9. P. 21989–22002. <https://doi.org/10.3390/s150921989>.
4. Jonathan A. R., Kujawski J., Obland M., Ott M. Multi spectral lidar (MSL). Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing. Edited by Singh, Upendra N. Proceedings of the SPIE. 2005. Vol. 5984. p. 132–139. <https://doi.org/10.1117/12.627148>.
5. Fleming S., Woodhouse I. H., Cottin A. Bringing Colour to Point Clouds. *Hip International*. 2015. Vol. 29 № 2. p. 22–25 URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84923250731&origin=inward&txGid=874135284f3f1efb22a59f85bcb0972>.
6. Kaasalainen, S. 2019. The Multispectral Journey of Lidar. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/the-multispectral-journey-of-lidar> (accessed on 26.03.2025).
7. Han Y., Salido-Monzú D., Wieser A. Comb-based multispectral LiDAR providing reflectance and distance spectra. *Opt. Express*. 2022. Vol. 30, p. 42362–42375. <https://doi.org/10.1364/OE.473466>
8. LiDAR Market Size, Growth, Share, Analysis, Forecast, 2023-2030. *Fortune Business Insights*. 2022. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/light-detection-and-ranging-lidar-market-101969> (accessed on 26.03.2025).
9. LIDAR Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. 2025. *Precedence Research*. URL: <https://www.precedenceresearch.com/lidar-market> (accessed on 26.03.2025).

10. Multispectral Camera Market by Application. Industry Report. 2023. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/multispectral-camera-market-142623484.html> (accessed on 26.03.2025).
11. Altmann Y., Wallace A., McLaughlin S. Spectral Unmixing of Multispectral Lidar Signals. *IEEE transactions on signal processing*. 2015. Vol. 63. № 20. P. 5525–5534. DOI:10.1109/TSP.2015.2457401
12. Kexin Zheng, Hongze Lin, Xuekai Hong, Hao Che, Xiaorui Ma, Xiaopeng Wei, Liang Mei. Development of a multispectral fluorescence LiDAR for point cloud segmentation of plants. *Opt. Express*. 2023. Vol. 31. p. 18613–18629. <https://doi.org/10.1364/OE.490004>
13. Olsen R. C., Metcalf J. P. Visualization and analysis of lidar waveform data. 2017. Proceedings Vol. 10191, Laser Radar Technology and Applications XXII; 101910I. <https://doi.org/10.1117/12.2276657>
14. Binhui Wang, Shalei Song, Wei Gong, Xiong Cao, Dong He. Zhenwei Chen, Xin Lin, Faquan Li, Jia Sun. Color Restoration for Full-Waveform Multispectral LiDAR Data. *Remote Sens*. 2020, 12(4), 593. <https://doi.org/10.3390/rs12040593>
15. Shi S., Bi S., Gong W., Chen B., Chen B., Tang X., Qu F., & Song S. Land Cover Classification with Multispectral LiDAR Based on Multi-Scale Spatial and Spectral Feature Selection. 2021. *Remote Sensing*, Vol.13. № 20. p. 4118. <https://doi.org/10.3390/rs13204118>
16. Kashani A.G., Olsen M.J., Parrish C.E., Wilson N. A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors (Basel)*. 2015. Vol.15. № 11. p. 28099–28128. doi:10.3390/s151128099
17. Vierhub-Lorenz V, Kellner M, Zipfel O, Reiterer A. A Study on the Effect of Multispectral LiDAR Data on Automated Semantic Segmentation of 3D-Point Clouds. *Remote Sensing*. 2022. Vol.14. № 24. p.6349. <https://doi.org/10.3390/rs14246349>

REFERENCES:

1. Leah, A. (2024). *Wasser. The Basics of LiDAR – Light Detection and Ranging – Remote Sensing*. NSF NEON. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
2. Takhtkeshha, N., Mandlbürger, G., Remondino, F., & Hyypä, J. (2024). Multispectral Light Detection and Ranging Technology and Applications: A Review. *Sensors*, 24(5), 1669. <https://doi.org/10.3390/s24051669>
3. Gong, W., Sun, J., Shi, S., Yang, J., Du, L., Zhu, B., & Song, S. (2015). Investigating the Potential of Using the Spatial and Spectral Information of Multispectral LiDAR for Object Classification. *Sensors*, 15(9), 21989–22002. <https://doi.org/10.3390/s150921989>
4. Jonathan, A. R., Kujawski, J., Obland, M., & Ott, M. (2005). Multi spectral lidar (MSL). In U. N. Singh (Ed.), *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing* (Vol. 5984, pp. 132–139). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.627148>
5. Fleming, S., Woodhouse, I. H., & Cottin, A. (2015). Bringing Colour to Point Clouds. *Hip International*, 29(2), 22–25. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84923250731>
6. Kaasalainen, S. (2019). *The Multispectral Journey of Lidar*. GIM International. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.gim-international.com/content/article/the-multispectral-journey-of-lidar>
7. Han, Y., Salido-Monzú, D., & Wieser, A. (2022). Comb-based multispectral LiDAR providing reflectance and distance spectra. *Optics Express*, 30, 42362–42375. <https://doi.org/10.1364/OE.473466>
8. Fortune Business Insights. (2022). *LiDAR Market Size, Growth, Share, Analysis, Forecast, 2023–2030*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.fortunebusinessinsights.com/light-detection-and-ranging-lidar-market-101969>
9. Precedence Research. (2025). *LIDAR Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.precedenceresearch.com/lidar-market>
10. Markets and Markets. (2023). *Multispectral Camera Market by Application*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/multispectral-camera-market-142623484.html>
11. Altmann, Y., Wallace, A., & McLaughlin, S. (2015). Spectral Unmixing of Multispectral Lidar Signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(20), 5525–5534. <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2457401>
12. Zheng, K., Lin, H., Hong, X., Che, H., Ma, X., Wei, X., & Mei, L. (2023). Development of a multispectral fluorescence LiDAR for point cloud segmentation of plants. *Optics Express*, 31, 18613–18629. <https://doi.org/10.1364/OE.490004>
13. Olsen, R. C., & Metcalf, J. P. (2017). Visualization and analysis of lidar waveform data. *Laser Radar Technology and Applications XXII, Proceedings of SPIE*, 10191, 101910I. <https://doi.org/10.1117/12.2276657>
14. Wang, B., Song, S., Gong, W., Cao, X., He, D., Chen, Z., Lin, X., Li, F., & Sun, J. (2020). Color Restoration for Full-Waveform Multispectral LiDAR Data. *Remote Sensing*, 12(4), 593. <https://doi.org/10.3390/rs12040593>

15. Shi, S., Bi, S., Gong, W., Chen, B., Chen, B., Tang, X., Qu, F., & Song, S. (2021). Land Cover Classification with Multispectral LiDAR Based on Multi-Scale Spatial and Spectral Feature Selection. *Remote Sensing*, 13(20), 4118. <https://doi.org/10.3390/rs13204118>
16. Kashani, A. G., Olsen, M. J., Parrish, C. E., & Wilson, N. (2015). A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors*, 15(11), 28099–28128. <https://doi.org/10.3390/s151128099>
17. Vierhub-Lorenz, V., Kellner, M., Zipfel, O., & Reiterer, A. (2022). A Study on the Effect of Multispectral LiDAR Data on Automated Semantic Segmentation of 3D-Point Clouds. *Remote Sensing*, 14(24), 6349. <https://doi.org/10.3390/rs14246349>