

УДК 535.3:681.7+ 681.2:531.7

*М.В. Харченко, аспірант гр. ПБ-51ф, д.т.н., проф. Тимчик Г.С.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДОТІЛЬНИХ LiDAR У ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ МАШИННОГО ЗОРУ

Анотація. У роботі проаналізовано перспективи впровадження твердотільних LiDAR систем для навігації AMR у Industry 4.0. Обґрунтовано гібридну архітектуру, що поєднує Flash-модуль для швидкого глобального огляду та FMCW-OPA для детального аналізу зон інтересу. Запропонований підхід вирішує проблему «ефекту змазування» та забезпечує пряме вимірювання швидкості об'єктів, оптимізуючи енергоспоживання та обчислювальні ресурси завдяки адаптивному скануванню.

Ключові слова: автономні мобільні роботи (AMR), твердотільний LiDAR, Flash LiDAR, оптичні фазовані решітки (OPA), частотно-модульована неперервна хвиля (FMCW), фотонна інтегральна схема (PIC), кремнієва фотоніка (SiPh), адаптивне сканування.

ВСТУП

У контексті Industry 4.0 автономні мобільні роботи (AMR) потребують компактних і енергоефективних сенсорів, тоді як традиційні механічні LiDAR системи мають суттєві недоліки: послідовне сканування спричиняє «ефект змазування» (rolling shutter artifact), а наявність рухомих частин вимагає постійного обслуговування та калібрування. Ефективною альтернативою є твердотільні системи, зокрема Flash LiDAR, який фіксує всю сцену одним широким імпульсом без часових зсувів між точками, що є критичною перевагою для AMR у тісних динамічних приміщеннях (1–10 метрів).

Проте Flash LiDAR має обмеження дальності через розподіл енергії імпульсу на все поле зору. Оптичні фазовані решітки (OPA) не забезпечують миттєвого кадру, натомість пропонують програмне керування променем із довільним переміщенням по сцені та сумісність із методом FMCW, який додатково надає інформацію про швидкість цілі. Таким чином, Flash-архітектура є оптимальним рішенням для короткодіапазонної навігації без артефактів змазування, тоді як інтегровані FMCW-OPA системи формують універсальну платформу для середньо- та довгодіапазонного сприйняття з можливістю передбачення траєкторій руху.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є обґрунтування та аналіз гібридної твердотільної LiDAR архітектури для навігації AMR у середовищах Industry 4.0, яка поєднує Flash модуль для глобального огляду сцени та FMCW-OPA модуль для прецизійного аналізу виявлених зон інтересу (regions of interest, ROI).

НЕСУМІСНІСТЬ FLASH АРХІТЕКТУРИ ТА FMCW

Попри переваги Flash-лідарів у швидкості формування кадру, вони є концептуально несумісними з FMCW методом [1]. Flash системи за своєю природою є імпульсними (Direct ToF) і базуються на реєстрації часу приходу фотонів матрицею детекторів, натомість FMCW потребує когерентного змішування відбитого сигналу з опорним локальним осцилятором (LO) для інтеграції гетеродинного приймача в кожен піксель багатоелементної матриці, що б призвело до проблем з надмірним виділенням тепла, через підвищене

споживання енергії; деградації роздільної здатності, через збільшення площі пікселя. Крім того розподіл потужності лазера на всю сцену зменшує співвідношення сигнал/шум (SNR) та робить FMCW малоефективним.

ОПТИЧНІ ФАЗОВАНІ РЕШІТКИ (ОРА) ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОМЕНЕМ

На відміну від Flash-систем, ОРА забезпечують сканування шляхом фазового керування випромінювачами на напівпровідниковому чіпі. Принциповою перевагою ОРА над механічними системами сканування, які обмежені інерцією та фіксованою траєкторією руху дзеркал є програмне керування променем [2], що дозволяє миттєво переключатися між будь-якими двома кутами у полі зору без необхідності послідовного проходження всіх проміжних позицій, таким чином ОРА може пропустити неінформативні сегменти сцени та сконцентрувати щільність точок виключно у зоні інтересу (ROI). Фізична основа цього керування ґрунтується на принципі конструктивної інтерференції. Наприклад, для лінійної решітки з періодом d між сусідніми випромінювачами, кут відхилення головного променя θ від нормалі до площини решітки визначається наступним фундаментальним рівнянням [3]:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi \cdot d},$$

де λ – довжина хвилі, $\Delta\phi$ – фазовий зсув між антенами, d – період решітки (див. рис. 1). На практиці цей фазовий зсув реалізується за допомогою

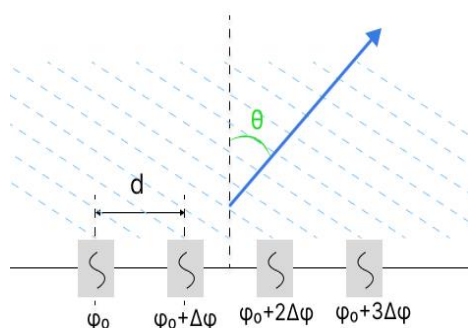


Рисунок 1. Схема керування променем лінійної фазованої решітки

інтегрованих на чіпі фазових модуляторів, які можуть бути термооптичними (керованими струмом, що нагріває хвилевід) або електрооптичними (керованими електричним полем) [3]. Шляхом динамічної зміни значень $\Delta\phi$ уздовж масиву, система може точно та швидко контролювати напрямок випромінювання. Крім того, сучасні дослідження, такі як робота з квазікоаксіальною Vernier ОРА на платформі SiN-on-SOI, демонструють, як цю базову концепцію можна розвинути для подолання

класичних обмежень ОРА, зокрема, проблеми зниження потужності променя при великих кутах відхилення. Використання синергії принципу Верньєра та спеціальної геометрії антен дозволяє досягти майже однорідної потужності променя в надзвичайно широкому полі зору до 160° [4, 5], що робить такі інтегровані ОРА-модулі ідеальним партнером для FMCW методу у складі повноцінних 4D-сенсорів.

СИНЕРГІЯ ОРА ТА FMCW НА ЄДИНОМУ ФОТОННОМУ ЧІПІ (PIC)

Індустріальний розвиток систем технічного зору для автономних застосувань останніми роками визначається чітким стратегічним зсувом у бік

монолітної фотонної інтеграції (Photonic Integrated Circuits, PIC). Цей підхід передбачає об'єднання всіх ключових компонентів інтегрально-оптичної системи на єдиній напівпровідниковій платформі, найчастіше на основі кремнієвої фотоніки (Silicon Photonics, SiPh) або гібридних структур типу SiN-on-SOI. Така монолітна інтеграція вирішує проблему фазової стабільності, яка є недосяжною для дискретних систем. У таких системах навіть мінімальні термічні деформації або механічні вібрації можуть порушити критичну фазову стабільність між опорним та відбитим від об'єкта сигналом, що робить використання FMCW неможливим або надмірно складним [6, 7].

На фотонному чіпі всі елементи жорстко пов'язані через інтегровані хвилеводи, забезпечуючи необхідну довгострокову стабільність оптичного шляху, що є передумовою для надійної роботи FMCW-системи. Використання FMCW у зв'язці з ОРА надає системі дві критичні переваги: пряме вимірювання радіальної швидкості об'єкта v_{rad} та завадостійкість. Вимірювання радіальної швидкості здійснюється через аналіз доплерівського зсуву, що необхідно для прогнозування траєкторій у Industry 4.0. Завадостійкість забезпечується природою когерентного змішування, адже при гетеродинуванні некогерентні відблиски, сонячне світло та хибні сигнали, що пройшли через декілька відбивань (MPI) ігноруються.

ГІБРИДНА СИСТЕМА (FLASH + ОРА)

Враховуючи виявлену концептуальну несумісність Flash-архітектури з методом FMCW, а також критичну потребу AMR у високій частоті оновлення кадрів без «ефекту змазування», пропонується розглянути архітектуру гібридної твердотільної системи, що базується на синергії Flash та FMCW-ОРА лідарів (див. рис. 2). Логіка такої пропозиції зумовлена необхідністю подолання стиснутого енергетичного бюджету Flash та обмежень швидкості послідовного

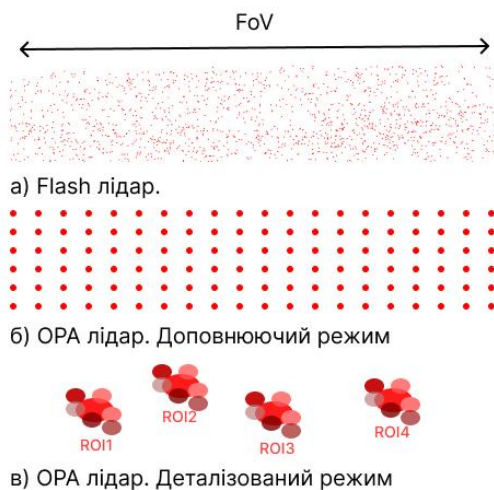


Рисунок 2. Просторовий розподіл енергії модулів Flash та ОРА

сканування ОРА систем. У такій комбінованій системі пропонується використовувати **Flash модуль як сенсор загального орієнтування**, оскільки він забезпечує майже миттєве сканування сцени. Тож пропонується використовувати його як первинне джерело даних для безперервного глобального огляду сцени, що дозволить системі миттєво фіксувати появу нових об'єктів у полі зору (FOV) без часових затримок, властивих будь-яким скануючим системам. Разом з тим, запропонована гібридизація дозволяє інтегрувати ефективний механізм

верифікації даних, оскільки вразливість Flash-модуля до MPI часто призводить до появи «фантомних» цілей. У цій схемі **FMCW-ОРА** виступає незалежним засобом валідації: система спрямовує когерентний промінь у визначені Flash-

датчиком координати, і оскільки за наявності МРІ-артефакту сигнал биття не формується, це дозволяє миттєво **класифікувати таку точку як хибну**. Далі **FMCW-ОРА функціонує як інтелектуальний доповнювач**: оскільки ОРА дозволяє програмно керувати променем, пропонується не використовувати його для суцільного сканування всієї сцени (що є енерговитратним і тривалішим за Flash). Натомість ОРА-модуль має працювати в режимі **адаптивного доповнювача**. У штатному режимі він виконує розріджене сканування для отримання базових векторів швидкості по всій сцені. Втім **при виявленні динамічного об'єкта** з високою радіальною швидкістю, система переключає ОРА-FMCW модуль у **режим детального сканування** цієї зони інтересу, звужуючи поле зору та фокусуючи всю обчислювальну потужність на об'єкті для отримання щільної прецизійної хмари точок динамічного об'єкта.

ВИСНОВКИ

Запропонована гібридна архітектура LiDAR системи та стратегія адаптивного сканування усуває необхідність постійного сканування всієї сцени з високою роздільною здатністю, що було б занадто дорогим з точки зору енергоспоживання та обчислювальних ресурсів.

Натомість, система «спить» у режимі глобального огляду, а «прокидається» для детального аналізу лише тоді, коли це справді необхідно, і лише там, де це критично важливо. Реалізація цієї концепції стала можливою завдяки досягненням у галузі фотонної інтеграції, зокрема завдяки розробці квазікоаксіальних Vernier ОРА на платформі SiN-on-SOI.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Riemensberger, J., Lukashchuk, A., Karpov, M., та ін. (2020). Massively parallel coherent laser ranging using soliton microcombs. *Nature*, 581(7807), 164—170. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2239-3>.
- [2] Zhou, J. (2022). A Review of LiDAR sensor Technologies for Perception in Automated Driving. *Academic Journal of Science and Technology*, 3(3), 255—261. <https://doi.org/10.54097/ajst.v3i3.2993>.
- [3] Guo, Y., Guo, Y., Li, C., та ін. (2021). Integrated Optical Phased Arrays for Beam Forming and Steering. *Applied Sciences*, 11(9), 4017. <https://doi.org/10.3390/app11094017>.
- [4] Dostart, N., Zhang, B., Brand, M., та ін. (2022). Vernier optical phased array lidar transceivers. *Optics Express*, 30(14), 24589. <https://doi.org/10.1364/OE.451578>
- [5] Wang, Z., Yu, L., Yang, Y., та ін. (2023). Wide field of view optical phased array with a high-directionality antenna. *Optics Express*, 31(13), 21192. <https://doi.org/10.1364/OE.492317>.
- [6] Lee, E.-S., Jin, J., Chun, K.-W., та ін. (2023). High-performance optical phased array for LiDARs demonstrated by monolithic integration of polymer and SiN waveguides. *Optics Express*, 31(17), 28112. <https://doi.org/10.1364/OE.499868>
- [7] Lei, Y., Zhang, L., Yu, Z., та ін. (2023). Si Photonics FMCW LiDAR Chip with Solid-State Beam Steering by Interleaved Coaxial Optical Phased Array. *Micromachines*, 14(5), 1001. <https://doi.org/10.3390/mi14051001>. [0]