

АДАПТИВНІ СТРАТЕГІЇ РУХУ В LiDAR-СИСТЕМІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ БПЛА

V.O. Chyketa; V.L. Dunets Ph.D., Assoc. Prof.

ADAPTIVE MOTION STRATEGIES IN LiDAR SYSTEM FOR IMPROVED UAV DETECTION AND TRACKING

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) все ширше застосовуються у цивільній та військовій сферах, що породжує нові виклики безпеки. Зокрема, зловмисне використання БПЛА становить загрози приватності та суспільній безпеці, тому задача їх своєчасного виявлення є вкрай актуальною. Існує багато підходів до виявлення БПЛА – радіолокаційні та акустичні системи, оптичні камери, радіочастотний моніторинг,

тощо [1]. В цьому контексті перспективним є використання активних лазерних сенсорів LiDAR, які здатні забезпечувати високу точність виявлення БПЛА на дальності до кількох сотень метрів [2]. LiDAR (Light Detection and Ranging) – це метод дистанційного зондування, який використовує світло у формі імпульсного лазера для вимірювання змінної відстані до об'єкта або поверхні. На відміну від камер, LiDAR не залежить від освітлення і може точно визначати відстань до цілі [2]. Проте типовий LiDAR забезпечує обмежену роздільну здатність, ускладнюючи ідентифікацію типу об'єкта [1, 2]. Таким чином, для ефективного «протидронового» захисту доцільно поєднувати кілька сенсорів [1]. Тому виникає потреба зосередити увагу на вдосконаленні системи виявлення та відстеження БПЛА на основі LiDAR через оптимізацію стратегії руху сенсора.

Метою такого дослідження є підвищення точності та надійності виявлення та супроводу БПЛА шляхом використання LiDAR, встановленого на панорамній платформі, з адаптивними алгоритмами керування його скануванням. Для досягнення цієї мети було реалізовано LiDAR-орієнтовану систему виявлення з розширеними стратегіями руху. Зокрема, розроблено чотири режими сканування лазерного далекоміра: широке оглядове сканування, маятникове (коливальне) сканування навколо цілі, уповільнення обертання та зупинка сенсора. Застосування цих режимів дозволяє збільшити кількість кадрів LiDAR, що захоплюють БПЛА, і тим самим підвищити точність оцінювання траєкторії. Управління рухом платформи реалізовано за допомогою модулів на Robot Operating System (ROS), які отримують дані від LiDAR та динамічно змінюють напрямок і швидкість сканування. Для обробки даних використовуються методи машинного навчання: зокрема, CNN для аналізу хмар точок та класифікації цілей. Додатково впроваджено елементи сенсорної інтеграції – поєднання лідарних даних з показами оптичних камер та акустичних сенсорів – з метою підвищення достовірності виявлення в різноманітних умовах. Таким чином, запропонована методологія поєднує адаптивне керування сенсором та інтелектуальну обробку даних для ефективного відстеження БПЛА у реальному часі.

Основні результати. Розроблену систему протестовано в умовах наближених до реальних: здійснювалося відстеження БПЛА, що рухається, з використанням різних патернів сканування LiDAR. Аналіз ефективності показав, що серед випробуваних стратегій два режими забезпечують найкращі показники. Перший – маятникове

сканування («swinging»), при якому платформа безперервно коливає LiDAR навколо положення цілі. Ця стратегія виявилася найбільш ефективною з точки зору точності оцінки положення БПЛА: оцінки, отримані за допомогою розширеного фільтра Калмана (ЕКФ), максимально наближені до реальної траєкторії польоту [3]. Зокрема, при маятниковому режимі вдалося уникнути значного накопичення похибки навіть коли БПЛА віддалявся на граничну відстань (~30 м), тоді як при широкому оглядовому скануванні спостерігалось істотне зростання помилки ЕКФ на максимальних дистанціях [4, 5]. Другий результативний режим – зупинка сканування («stopping»), який полягає у тимчасовій зупинці повороту LiDAR для накопичення більшої кількості точкових хмар цілі. Ця стратегія дозволяє максимізувати число виявлення БПЛА за одиницю часу, що підвищує ймовірність захоплення швидкісних або маневрових цілей. Виявлено, що маятникова стратегія забезпечує найкращий баланс між частотою сканування і точністю відстеження цілі. Фокусування лазерного променя в області навколо БПЛА приводить до підвищення точності супроводу та зменшення невизначеності в оцінці координат. Використання поворотної платформи (PTU-E46) дало змогу реалізувати таке адаптивне сканування і утримувати БПЛА у полі зору сенсора протягом всього польоту. Розроблена ROS-архітектура забезпечила узгоджену роботу модулів виявлення, кластеризації та фільтрації даних, що покращило загальну продуктивність системи при відстеженні БПЛА в режимі реального часу. Отримані експериментальні дані підтверджують, що впровадження адаптивних рухових стратегій суттєво покращує показники трекінгу цілі: фільтр Калмана ефективніше знижує невизначеність оцінок траєкторії, постійно уточнюючи положення БПЛА на основі нових вимірювань. Під час польових випробувань встановлено, що система працює точно та надійно в реальних умовах, перевершуючи базові підходи зі статичним скануванням за здатністю своєчасно виявляти і стійко супроводжувати ціль.

Висновок. Проведене дослідження продемонструвало ефективність використання адаптивних рухових стратегій для LiDAR-системи виявлення БПЛА. Зокрема, встановлено, що маятниковий режим сканування сенсора забезпечує мінімальну похибку оцінювання траєкторії БПЛА завдяки концентрації вимірювань у зоні цілі. Визначено, що режим зупинки сканування дозволяє максимізувати кількість виявлення, що є корисним для фіксації швидкісних цілей. Аргументовано, що поєднання цих стратегій із реєстрацією даних у режимі реального часу та фільтрацією (ЕКФ) підвищує точність і надійність супроводу БПЛА. Розроблена система на основі поворотної платформи LiDAR, інтегрована в ROS, показала високу ефективність під час експериментів, що відкриває можливості для її практичного застосування у сфері захисту від несанкціонованих БПЛА. Подальший розвиток роботи може включати динамічні стратегії руху, що автоматично підлаштовуються під умови польоту БПЛА, та глибшу інтеграцію методів штучного інтелекту для прогнозування поведінки цілей.

Література

1. Lykou, G., Moustakas, D., & Gritzalis, D. (2020). Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies. *Sensors*, 20(12), 3537. <https://doi.org/10.3390/s20123537>.
2. Dogru S., Marques L. Drone Detection Using Sparse Lidar Measurements // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P. 3062–3069. – DOI: 10.1109/LRA.2022.3145498.
3. Alain Quentel. A scanning LiDAR for long range detection and tracking of UAVs. *Electronics*. Normandie Université, 2021.
4. Du, W., & Beltrame, G. (2024). LiDAR-based Real-Time Object Detection and Tracking in Dynamic Environments. *arXiv preprint arXiv:2407.04115*.