

Корнага В.І.¹, Пекур Д.В.¹, Сорокін В.М.¹, Ніколаєнко Ю.Є.²,
Олійник О.С.¹, Бистрицький Г.В.¹, Турукало А.В.³,

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,

² Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

³ Факультет інформаційних технологій та математики Київського столичного університету імені Бориса Грінченка 04212, Україна, м.Київ, вул. Левка Лук'яненка, 13-Б

Анотація

У статті проаналізовано перспективи застосування оптоелектронних технологій для навігації та позиціонування рухомих об'єктів, зокрема безпілотних літальних апаратів, в умовах обмеженого або відсутнього доступу до сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. З огляду на зростаючу вразливість традиційних радіочастотних систем до електромагнітних завад, таких як глушіння, підміна або природні перешкоди, актуалізується потреба в альтернативних, стійких до завад каналах передачі навігаційної інформації. Одним із шляхів подолання цієї проблеми є використання оптичних каналів зв'язку для навігації та позиціонування, що функціонують у видимому або інфрачервоному спектральних діапазонах.

У роботі розглянуто оптоелектронні технології оптичного зв'язку, що можуть бути використані для позиціонування рухомих об'єктів, зокрема оптичного зв'язку у вільному просторі, оптоелектронних систем передачі інформації на основі світлодіодів видимого світла, навігація в замкнених просторах на основі випромінюючих оптичних точок («optical point») та провідні оптоволоконні системи. Проведено порівняльний аналіз їх технічних характеристик, переваг, обмежень і можливостей впровадження в умовах української промислової бази. Показано, що найбільший потенціал для масштабного застосування в Україні мають оптоелектронні системи на основі світлодіодів видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання, які базуються на доступній компонентній базі та не потребують надскладної інфраструктури при їх експлуатації.

Завдяки високій точності, енергоефективності та стійкості до електромагнітних завад, оптоелектронні системи навігації можуть забезпечити автономне позиціонування об'єктів у специфічних умовах, включаючи з підземні приміщення, урбанізовані середовища, тощо. Системи оптичного позиціонування з оптимізованими алгоритмами модуляції сигналів й бортовими апаратними прискорювачами штучного інтелекту забезпечують високу точність позиціонування без використання глобальних навігаційних супутникових систем, можливості масштабування і високу автономність, пропонуючи життєздатну альтернативу радіочастотним методам у складних умовах. Обґрунтовано стратегічну доцільність розвитку оптоелектронної навігаційної інфраструктури в Україні.

Ключові слова: світлодіоди, лазери, зв'язок, електромагнітні завади, глобальні навігаційні системи, дистанційно керовані рухомі об'єкти, оптоелектронні системи позиціонування.

1. Вступ

У сучасному світі, де автономні та дистанційно керовані рухомі об'єкти, зокрема безпілотні літальні апарати (БПЛА), набувають дедалі більшого значення у цивільній, промисловій, а також у спеціальній сферах, питання їхнього надійного та точного позиціонування постає як одна з найактуальніших проблем. Для ефективного виконання своїх функцій, незалежно від місії – чи то доставка вантажів, моніторинг інфраструктури, картографування територій, чи виконання спеціальних завдань – ці об'єкти потребують

© Корнага В.І., Пекур Д.В., Сорокін В.М., Ніколаєнко Ю.Є.,
Олійник О.С., Бистрицький Г.В., Турукало А.В., 2025

безперервної та високоточної інформації про своє місцезнаходження у просторі. Завдяки можливості визначення свого положення у просторі такі рухомі об'єкти можуть функціонувати з мінімальним втручанням оператора, а часто їх повернення на початкові позиції відбувається за тим самим маршрутом в повністю автономному режимі. Їх управління здебільшого базується на традиційних радіоканалах Wi-Fi, 4G/5G або спеціалізованих вузькосмугових радіочастотних протоколах [1]. Домінуюча технологія, що забезпечує їх позиціонування базується на глобальних навігаційних супутникових системах (GNSS) [2], таких як GPS, Galileo, BeiDou тощо. Такі системи позиціонування працюють, використовуючи прийом радіочастотних сигналів від супутників, що дозволяє з високою точністю визначати координати приймача на Землі. Однак, незважаючи на їхню повсюдність, відносну доступність та вражаючу точність у стандартних умовах, GNSS-приймачі є вразливими до електромагнітних завад (ЕМЗ), а їх використання у замкнених чи обмежених просторах ускладнено. При наявності електромагнітних перешкод, радіоелектронної протидії, відсутності сигналу супутникових систем або їх заміні фальшивими сигналами (GPS Spoofing [2]), ефективність навігаційної підтримки різко знижується, а можливість налагодження радіозв'язку для управління рухомими об'єктами часто стає практично неможливою. Такі перешкоди можуть мати різне походження: від природних явищ, таких як сонячна активність або атмосферні розряди, до штучно створених джерел, зокрема потужних індустриальних шумів або, що особливо критично, навмисних дій у вигляді глушіння та імітації сигналів. У результаті такі рухомі об'єкти втрачають можливість позиціонування та нерідко змушені працювати в «автономному режимі» без можливості супутникової орієнтації, що часто призводить до їх втрати.

Стійким і перспективним рішенням для забезпечення надійної роботи рухомих об'єктів є системи зв'язку на основі оптоволоконних технологій [4], які дають змогу передавати відеоінформацію, що дозволяє оператору частково ідентифікувати об'єкти при ручному керуванні з певним рівнем точності. Такі системи забезпечують високу пропускну здатність та захищеність від електромагнітних завад. Існуючі рішення передачі інформації до БПЛА по оптичному волокну хоч і мають значні перспективи використання (зокрема дають можливість передавати окрім інформації і електроживлення [5]) мають в своїй будові велику кількість дороговартісних компонентів, які не тільки не виробляються в Україні, а і в не достатній кількості представлені на вітчизняному та світовому ринках. Тому їх використання повинно бути максимально ефективним.

З огляду на активний розвиток технологій створення радіоелектронних завад, наукова та інженерна спільнота інтенсивно працює над пошуком і розробленням альтернативних методів позиціонування, які характеризуються підвищеною стійкістю до впливу електромагнітних перешкод. Серед таких перспективних методів важливе місце посідають оптоелектронні системи, що використовують принципи використання світла для передачі інформації. Ці системи, функціонуючи у видимому або інфрачервоному діапазонах спектра, забезпечують стійкість до ЕМЗ, оскільки оптоелектронні прилади не чутливі до випромінювання радіочастотного діапазону, що робить їх надзвичайно перспективними для застосування в таких умовах.

Метою даної роботи є аналіз принципів функціонування, виявлення ключових переваг та недоліків, перспектив розвитку доступних оптоелектронних систем передачі даних та можливості їх використання для навігації та позиціонування рухомими об'єктами, включаючи середовища з наявністю електромагнітних завад та перешкод для прийому сигналів GNSS, а також обговорено потенціал впровадження таких оптоелектронних систем на промислових об'єктах України.

2. Оптиелектронні технології навігаційного забезпечення

Сучасні БПЛА можуть функціонувати в середовищах з високими електромагнітними завадами у автоматичному або ручному режимах, проте зазвичай без наявності навігаційних сигналів їх використання менш ефективно або навіть неможливе, а часто – небезпечно.

Ефективним методом зв'язку та позиціонування БПЛА є технологія оптичного зв'язку у вільному просторі (Free Space Optics (FSO)), яка забезпечує надійні можливості передачі даних з використанням, як наземної інфраструктури, так і приладів приймання-передачі сигналів розташованих у найближчому космосі [5-7]. Незважаючи на переваги, системи FSO вразливі до впливів стану середовища, що потребує додаткових резервних механізмів і складних алгоритмів відстеження для підтримання стабільності з'єднання та, при необхідності, визначення координат рухомих об'єктів.

Для розв'язання проблеми позиціонування рухомих об'єктів в умовах неможливості надійного прийому супутникових сигналів позиціонування активно розвиваються альтернативні методи передачі навігаційних сигналів, зокрема бездротові оптичні системи передачі інформації за широко відомими принципами. Розміщення оптичних передавачів у вигляді стаціонарних орієнтирів або маркерів, а також використанню детекторів, здатних точно реєструвати інтенсивність, спектральний склад і кут прийому випромінювання, такі системи можуть бути застосовані не лише для зв'язку, а й для високоточного позиціонування та навігації рухомих об'єктів у просторі. Оптичні сигнали, заздалегідь структуровані у вигляді кодування координат або просторової ідентифікації, дозволяють визначати положення об'єкта відносно відомих джерел світла, що відкриває можливості для реалізації оптичної навігації навіть в умовах повної відсутності GNSS. Проте такі системи вимагають прямої видимості між приймачем і передавачем [8-11], що обмежує їх застосування в динамічно змінних умовах та на великій відстані. Ускладненням роботи бездротових систем є можливість наявності оптично непрозорих завад у вигляді диму, пилу, опадів або інших перешкод.

Ключовим елементом всіх цих рішень є використання твердотільних джерел випромінювання (світлодіодів та/або напівпровідникових лазерів) як ефективних передавачів інформації на частотах до сотень мегагерц. Особливу увагу привертають світлодіоди своєю енергоефективністю, компактністю, механічною стійкістю, широкою лінійкою спектральних варіантів і доступністю компонентної бази.

Системи на подібному принципі сьогодні використовуються для реалізації локальної навігації, демонструючи високу завадозахищеність, гнучкість у налаштуванні та стійкість до різноманітних форм стороннього випромінювання і використовуються для навігації у підземних приміщеннях та тунелях [12] або в закритих просторах [13-16] на основі випромінюючих оптичних точок («optical point»). В умовах зростаючих загроз, пов'язаних із можливим порушенням доступу до глобальних супутникових навігаційних систем унаслідок радіоелектронного впливу або геополітичних факторів, потреба у створенні незалежних, автономних і стійких до завад альтернатив навігаційного забезпечення стає нагальною – особливо у контексті критично важливих або спеціальних застосувань. Досвід використання оптиелектронних систем є одним із перспективних напрямів вирішення цих проблем. Вони демонструють здатність забезпечувати високоточне позиціонування та надійний обмін інформацією в умовах відсутності або блокування сигналів супутникових навігаційних систем, зберігаючи працездатність у складних середовищах з високим рівнем електромагнітних завад.

Відповідність таких систем сучасним алгоритмам цифрової обробки сигналів та можливість інтеграції з інерціальними навігаційними системами дає змогу реалізувати безперервну навігацію навіть за умов періодичних втрат зв'язку або часткових

перешкод. Крім того, застосування оптичних каналів зв'язку забезпечує стійкість до радіочастотного придушення та зменшує ризики, пов'язані з радіоелектронною боротьбою, що є особливо важливим при спеціальних застосуваннях.

Таким чином, оптоелектронні технології зв'язку та навігації є важливою складовою сучасних рішень, спрямованих на підвищення автономності, завадостійкості та точності керування рухомими об'єктами в умовах, де традиційні GNSS-системи є ненадійними або недоступними.

З огляду на зростаючу вразливість традиційних супутникових систем позиціонування до радіоелектронного впливу, виникає гостра потреба у впровадженні альтернативних, стійких до завад технологій для забезпечення безперервного позиціонування рухомих об'єктів. Особливо це актуально для безпілотних літальних апаратів, які діють у складних умовах, зокрема у підземних або урбанізованих середовищах, а також у місцях, де сигнали GNSS блокуються природними або штучними перешкодами. Одним з перспективних напрямів у цьому контексті є оптоелектронні системи зв'язку та навігації, що не покладаються на радіочастотні сигнали та здатні забезпечувати високу точність і надійність у складних умовах.

Для порівняння наявних рішень основних класів оптичних технологій реалізації навігації при використанні випромінювачів оптичного діапазону та розробок з передачі інформації, що потенційно можуть бути використані для позиціонування та зв'язку з рухомими об'єктами, було підготовлено Таблицю 1, де узагальнено ключові характеристики кожного підходу з точки зору технічної ефективності та промислової придатності в українських умовах. Ці технології розрізняються за типом сигналу, фізичними принципами передавання інформації, архітектурними обмеженнями, а також рівнем складності впровадження.

Таблиця 1 – Порівняння основних оптичних технологій для зв'язку та позиціонування рухомих об'єктів

Технологія	Тип зв'язку / дальність	Основні переваги	Ключові недоліки	Можливість впровадження в промислове виробництво в Україні
Оптичний зв'язок у вільному просторі (FSO) [5-7]	Двосторонній зв'язок у видимому або ІЧ-діапазоні / до 1–5 км (до 100 км з ретрансляторами)	<ul style="list-style-type: none"> - Висока швидкість передачі - Відсутність радіочастотного випромінювання - Можливість використання у космічних та надатмосферних платформах 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока залежність від погодних умов (туман, дощ, сніг) - Потреба в точному наведенні та стабілізації - Висока вартість і складність оптичного устаткування 	Обмежено можливе у спеціалізованих проектах; широкомасштабне виробництво в Україні малоймовірне через технологічні та інфраструктурні бар'єри
Бездротові оптичні системи передачі інформації (VLC) [8-11]	Односторонній або двосторонній зв'язок у видимому діапазоні / до 100-300 м	<ul style="list-style-type: none"> - Висока енергоефективність - Можливість використання існуючих LED-систем - Простота апаратної реалізації 	<ul style="list-style-type: none"> - Необхідна пряма видимість - Низька ефективність при наявності диму, пилу, опадів - Обмежений радіус дії 	Високий потенціал для локального виробництва: наявна елементна база, LED-компоненти широко доступні в Україні
Оптична навігація у закритих / обмежених просторах [12-16]	Позиціонування за інтенсивністю та кутом до джерела сигналу / до 30-100 м	<ul style="list-style-type: none"> - Надвисока точність (до 1 см) - Гнучкість у налаштуванні - Автономність (може працювати без GNSS) - Простота обслуговування 	<ul style="list-style-type: none"> - Потреба у попередньому встановленні інфраструктури - Залежність від внутрішнього середовища - Локальність дії 	Повністю придатна до реалізації на українських підприємствах; широке застосування в логістиці, складських та індустріальних приміщеннях

Найбільш придатними до впровадження в умовах локального виробництва виявилися бездротові оптичні системи VLC, які можна також використовувати як системи оптичної навігації. Їхні переваги включають енергоефективність, простоту апаратної реалізації, можливість адаптації до наявної елементної бази та високу точність визначення координат у короткому радіусі дії. Вони не потребують складної інфраструктури, мають низькі експлуатаційні витрати й можуть бути інтегровані з вже існуючими системами управління. Це робить їх особливо привабливими для впровадження в промислових, логістичних, спеціальних або пошуково-рятувальних системах, а їх подальше удосконалення з використанням світлодіодів ближнього інфрачервоного діапазону дозволить підвищити завадостійкість, зменшити візуальну помітність і розширити спектр умов експлуатації.

Натомість такі технології, як FSO, хоч і забезпечують високу пропускну здатність і стабільність у сприятливих умовах, мають суттєві обмеження щодо мобільності, вартості та інфраструктурної підтримки. FSO-технології є високочутливими до атмосферних явищ, потребують високоточної системи наведення та стабілізації, а також часто залежать від наддорогих космічних або спеціалізованих компонентів.

3. «Оптичні маркери» як основа перспективної архітектури оптоелектронних навігаційних мереж

У перспективній архітектурі навігаційних мереж передавачі бездротових оптичних систем зв'язку можна застосувати як активні маркери, що не лише випромінюють навігаційний сигнал, а й одночасно передають службові дані про власне становище. У цьому випадку рухомий об'єкт визначає лише напрямок до кожного «детектованого» маркера за світловою плямою, тоді як відстань обчислюється опосередковано: її отримують із службової інформації, що передається у прийнятому «кадрі» від маркера та шляхом триангуляції між кількома такими маркерами. Світловий потік маркера модулюється на швидкості десятки кілобіт за секунду, чого досить, щоб у кожному «кадрі» передавати ідентифікатор, координати маркера, напрямок випромінювання маркера, додаткову службову інформацію, зокрема перевірочний код безпеки CRC, при цьому можливий імпульсний режим випромінювання, що утримує споживання всіх світлодіодів маркера в межах 1-2 Вт при миттєвій потужності 20 Вт і більше.

Така конфігурація суттєво знижує енергетичні та апаратні вимоги до маркера, адже для вимірювання часового відліку непотрібні наносекундні синхронізатори. Завдяки відсутності жорстких вимог до часу імпульсу спрощується і електроніка керування світлодіодом: достатньо контролерів з тактовою частотою від 20 МГц, що генерують кодову послідовність, а також є можливість використання малогабаритної апертури діаметром 20-30 мм. На відстані до 500 м при довжині хвилі 850 нм та запасі відношення сигнал/шум 25 дБ оптичні маркери? забезпечують кутову невизначеність не гіршу за $0,05^\circ$, що відповідає просторовій похибці визначення координат менше десяти сантиметрів на кожні сто метрів віддалення.

Додатковою перевагою виступає масштабованість: у складському приміщенні, тунелі або міському «каньйоні» можна розмістити десятки таких «світильників»-маркерів без ризику виникнення конфлікту по дальності, адже кожний з них може працювати в окремій оптичній «комірці», а інформаційні пакети можуть розрізнятися за частотною модуляцією або спектром випромінювання. Для підвищення завадостійкості в умовах пилу, диму чи туману випромінювання може бути переведено з видимого діапазону на ближнє інфрачервоне «вікно» 850-940 нм, що покращує баланс сигнал/шум за тих самих енергетичних витрат.

Актуальними завданнями розвитку оптичних навігаційних мереж є підвищення щільності адресного простору за рахунок модуляції сигналів та їх оптимального кодування. Іншим напрямом розвитку цієї технології є інтеграція вбудованих обчислювальних модулів, зокрема, із апаратним прискоренням штучного інтелекту (AI-прискорювачами) при прийманні сигналів, що дає змогу прямо на борту рухомих об'єктів ідентифікувати маркер у кадрі та прогнозувати його траєкторію з низькою латентністю та підвищити точність визначення координат рухомого об'єкта. Розглядаються й автономні енергетичні рішення для їх живлення, зокрема прототипи маркерів з живленням від сонячних елементів які можуть роками автономно функціонувати у літніх умовах України без потреби у заміні елементів живлення. В перспективі це відкриває шлях до створення розгалуженої, енергоефективної та стійкої оптичної навігаційної інфраструктури, що здатна доповнити або навіть локально замістити GNSS у складних експлуатаційних середовищах.

4. Висновки

Підсумовуючи вищенаведене, можна стверджувати, що оптоелектронні системи позиціонування є надзвичайно перспективною альтернативою традиційним радіочастотним методам, особливо в умовах інтенсивних електромагнітних завад. Їхня природна несприйнятливість до радіочастотного глушіння та складнощі імітації сигналів є фундаментальною перевагою, що відкриває широкі можливості для застосувань у критично важливих сферах, де функціонування GNSS-систем є скомпрометованим або неможливим. Завдяки потенціалу для досягнення високої точності, можливості інтеграції з існуючою освітлювальною інфраструктурою та енергоефективності, ці системи можуть стати ключовим елементом реалізації надійної навігаційної інфраструктури, що використовує в якості носія інформації оптичне випромінювання визначеного спектрального складу.

Оптоелектронні технології навігації, зосереджені на видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні спектра, що використовують як джерела випромінювання світлодіоди, мають найкращий баланс між точністю, стійкістю до завад і реалістичністю впровадження в умовах України. Їх можна розглядати як ефективну складову у створенні автономних навігаційних систем нового покоління, здатних діяти в умовах інформаційного супротиву, геопросторових обмежень та відсутності супутникового зв'язку. Саме ці рішення варто розглядати як базові для розгортання інфраструктури позиціонування в контексті критично важливих застосувань.

У світлі актуальних геополітичних та технологічних викликів, пов'язаних із зростаючою загрозою радіоелектронного придушення, активний розвиток та впровадження оптоелектронних систем позиціонування є не лише перспективним науковим напрямком, а й стратегічною необхідністю. Подальші дослідження повинні зосереджуватися на підвищенні дальності дії, стійкості до оптичних завад, оптимізації алгоритмів обробки сигналу та злиття даних, а також на мініатюризації компонентів. З огляду на ці перспективи, оптоелектронні системи відіграватимуть дедалі важливішу роль у забезпеченні автономності, надійності та безпеки рухомих об'єктів у майбутньому.

Запропонована система позиціонування на основі оптичних маркерів із багатонасійною модуляцією та вбудованими AI-прискорювачами на борту рухомих об'єктів забезпечує високу точність та зберігає працездатність у середовищах без GNSS, підтримує масштабування до десятків маркерів в одному просторі й може забезпечувати високу автономність, що робить її практичною альтернативою радіочастотним навігаційним рішенням для складних цивільних і спеціальних сценаріїв використання.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2025.06/0017)

Kornaha V.I., Pekur D.V., Sorokin V.M., Nikolaienko Yu.Ye., Oliinyk O.S., Bystrytskyi H.V., Turukalo A.V.

OPTOELECTRONIC POSITIONING SYSTEMS FOR MOVING OBJECTS UNDER ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

Abstract

This paper analyzes the prospects for the use of optoelectronic technologies in the navigation and positioning of moving objects, particularly unmanned aerial vehicles (UAVs), under conditions of limited or absent access to global navigation satellite system (GNSS) signals. Given the increasing vulnerability of conventional radio-frequency systems to electromagnetic interference, such as jamming, spoofing, or natural obstructions, the demand for alternative and interference-resilient channels for navigation data transmission has become critical. One promising approach to addressing this challenge is the use of optical communication channels for navigation and positioning, operating within the visible and near-infrared spectral ranges.

The study examines optoelectronic optical communication technologies that can be applied to the positioning of moving objects, including free-space optical communication, visible light communication (VLC) based on LEDs, indoor navigation using emitting optical points ("optical point"), and guided fiber-optic systems. A comparative analysis of their technical characteristics, advantages, limitations, and the feasibility of implementation within the Ukrainian industrial infrastructure is provided. The results indicate that optoelectronic systems based on visible and near-infrared LED emitters have the greatest potential for widespread application in Ukraine, as they rely on accessible components and require no complex infrastructure for deployment.

Due to their high accuracy, energy efficiency, and immunity to electromagnetic interference, optoelectronic navigation systems can ensure autonomous positioning in specialized environments, including underground facilities and highly urbanized areas. Optical positioning systems with optimized signal modulation algorithms and onboard hardware-accelerated artificial intelligence (AI) processors provide precise localization without GNSS, offering scalability, high autonomy, and a viable alternative to radio-frequency methods in challenging conditions. The strategic rationale for the development of optoelectronic navigation infrastructure in Ukraine is substantiated.

Keywords: LED, lasers, communication, electromagnetic interference, global navigation systems, remotely operated moving objects, optoelectronic positioning systems.

Література

- [1] G. Sonugür, "A Review of quadrotor UAV: Control and SLAM methodologies," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 161, 2022, Art. no. 104342, doi: 10.1016/j.robot.2022.104342.
- [2] D. Egea-Roca et al., "GNSS User Technology: State-of-the-Art and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 39939–39968, Jan. 2022, doi: 10.1109/access.2022.3165594.
- [3] M. Kang, S. Park, and Y. Lee, "A survey on Satellite Communication System Security," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2897, May 2024, doi: 10.3390/s24092897.
- [4] Y. Zhang et al., "FSO system for UAV command and control," *Photonics*, vol. 8, no. 5, 2021, Art. no. 163, doi: 10.3390/photonics8050163.
- [5] H. Takano et al., "Visible Light Communication on LED-equipped Drone and Object-Detecting Camera for Post-Disaster Monitoring," in *Proc. IEEE 93rd Veh. Technol. Conf. (VTC2021-Spring)*, Helsinki, Finland, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448902.
- [6] A. Gupta et al., "UAV-based FSO links: review," *Opt. Eng.*, vol. 63, no. 4, 2023, Art. no. 041204, doi: 10.1117/1.oe.63.4.041204.
- [7] X. Zhang et al., "Performance Analysis of Multiple UAV-Based Hybrid Free-Space Optical/Radio Frequency Aeronautical Communication System in Mobile Scenarios," *Drones*, vol. 8, no. 12, 2024, Art. no. 729, doi: 10.3390/drones8120729.
- [8] D. Latka, M. Aggarwal, and S. Ahuja, "Performance analysis of UAV-enabled dual-hop mixed RF-FSO communication systems with user scheduling," *J. Opt. Commun.*, Dec. 2024, doi: 10.1515/joc-2024-0254.
- [9] N. Shindo et al., "Optically powered drones using fibers," *Photonics*, vol. 9, no. 11, 2022, Art. no. 882, doi: 10.3390/photonics9110882.
- [10] Ekagrata and M. Bhutani, "VLDL: Localization of Drones using Visible Light Communication," *Zenodo*, Mar. 2023, doi: 10.5281/zenodo.7751720.
- [11] R. A. Hernández, T. Xu, Y. Huang, and M. A. Z. Zamalloa, "Firefly: Localizing Drones with Visible Light Communication and Sensor Fusion," in *Proc. 19th Int. Conf. Distrib. Comput. Smart Syst. Internet Things (DCOSS-IoT)*, 2023, pp. 217–221, doi: 10.1109/dcross-iot58021.2023.00045.

- [12] S. Jiang et al., "Vehicle positioning in tunnels: review," *Complex Intell. Syst.*, vol. 11, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s40747-024-01744-1.
- [13] L. Chassagne, B. Bechadergue, O. Barrois, B. Cagneau, H. A. Satai, and P. Riaux, "Optical wireless positioning by modulation of the optical source orientation," *Opt. Express*, Nov. 2024, doi: 10.1364/oe.544146.
- [14] S. Li, L. Qin, D. Zhao, and X. Hu, "Indoor positioning system for single LED light based on deep residual shrinkage network," *Opt. Commun.*, vol. 559, Feb. 2024, Art. no. 130366, doi: 10.1016/j.optcom.2024.130366.
- [15] G. Li, S. Sun, Y. Gao, A. Li, and K. Zhu, "Research and development of indoor positioning technology based on visible light communication," *Urban Lifeline*, vol. 1, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1007/s44285-023-00011-y.
- [16] G. Cossu and E. Ciaramella, "A 3D indoor positioning system based on common visible LEDs," *Phys. Commun.*, vol. 54, Aug. 2022, Art. no. 101843, doi: 10.1016/j.phycom.2022.101843.

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України,
41, проспект Науки, 03028 Київ, Україна

Отримано: 18.08.2025

²Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

³ Факультет інформаційних технологій та математики
Київського столичного університету імені
Бориса Грінченка 04212, Україна, м.Київ,
вул. Левка Лук'яненка, 13-Б