

ЛЕВИЦЬКИЙ Сергій

к.т.н., ст. дослідник,

МІНАКОВ Володимир

к.т.н.,

ТАРАНОВ Віктор

к.т.н.,

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова

Національної академії наук України (Київ, Україна)

ЛАЗЕРНА СИСТЕМА ЗАХИСТУ ВІД FPV-ДРОНІВ

Сучасне поле бою характеризується швидким розвитком технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), серед яких FPV-дрони займають особливе місце через свою доступність, маневреність та ефективність у виконанні розвідувальних і ударних завдань. Ці дрони, оснащені відеокамерами реального часу, дозволяють операторам проводити точні атаки на наземну техніку, особовий склад та об'єкти критичної інфраструктури, такі як енергетичні установки, транспортні вузли чи командні пункти. За даними аналізу сучасних конфліктів, FPV-дрони становлять до 70% загроз від повітряних засобів ураження в зонах ближнього бою, де традиційні системи ППО, такі як радіоелектронна боротьба (РЕБ) чи зенітні ракети, часто виявляються неефективними через високу швидкість дронів (до 200 км/год), малу радіолокаційну помітність та низьку вартість виробництва.

Проблема полягає в тому, що FPV-дрони експлуатують вразливість оптичних систем: їхні камери на базі CCD або CMOS датчиків забезпечують навігацію та наведення, але водночас є чутливими до зовнішнього оптичного впливу. Традиційні методи протидії, такі як механічне знищення чи електронне глушіння, вимагають значних ресурсів, включаючи дорогі боєприпаси чи складне обладнання, і не завжди гарантують успіх через швидкість та маневреність цілей. Тому актуальним є розробка інноваційних систем, які

використовують лазерне випромінювання для нейтралізації оптичних сенсорів дронів без фізичного контакту.

Метою даної доповіді є представлення модульної лазерної системи захисту LFNS (Laser FPV Neutralizer System), розробленої групою співробітників Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Система спрямована на оптичне засліплення (dazzling) та фізичне ураження (damage) фоточутливих матриць камер FPV-дронів, забезпечуючи енергоефективний та економічний захист. Розробка базується на експериментальних дослідженнях взаємодії лазерного випромінювання з напівпровідниковими датчиками, що дозволяє адаптувати систему до різних сценаріїв застосування.

Система LFNS інтегрує високоточний трекінг на базі штучного інтелекту (AI-ML) та електрооптичних/інфрачервоних сенсорів (EO/IR) з лазерними модулями нейтралізації. Вона призначена для захисту рухомих платформ (наприклад, безпілотних наземних транспортних засобів – UGV) та стаціонарних об'єктів у зоні 10–40 км від лінії розмежування. Основний метод – оптичне засліплення та руйнування фоточутливих елементів камер, без використання дорогих боєприпасів. Переваги включають модульність, високу швидкість реакції (до 200 мкс) та енергоефективність. Концепція передбачає три рівні захисту залежно від бюджету, дальності та потужності: ближній (до 200 м), середній та дальній (3–5 км).

Для ближнього захисту розроблено два варіанти модулів на базі оптичної нейтралізації. Варіант 1 (LNM) використовує лазерну світлодіодну матрицю з довжиною хвилі 455 нм (синій лазер) та загальною потужністю 268–500 Вт (для 4-х матриць). Він забезпечує осліплення камер до 200 м, є найбільш економічним, компактним та енергоефективним. Варіант 2 базується на імпульсному лазері з довжиною хвилі 532 нм (зелений лазер) та енергією до 1 Дж, дозволяючи осліплення та ураження до 200 м з високою піковою потужністю для гарантованого виведення з ладу. Прототипи обох варіантів створено та протестовано. Експерименти показали, що короткий імпульс (30 мкс) з енергією 30 мДж призводить до засвітки та пошкодження фоточутливого шару на відстані

до 150 м при пороговій щільності потужності ~ 15 Вт/мм². Зображення демонструють ефект: до впливу – чітке поле зору; після – повне засвічування або фізичні пошкодження матриці (спотворення, білі смуги).

Для далекого ураження (варіант 3) передбачено високопотужний лазерний комплекс на базі CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм та робочою потужністю понад 10 кВт. Він призначений для знищення не лише оптики, а й корпусу та функціональних елементів БПЛА на відстані 3–5 км. Поточний стан розробки: створено силову частину та дзеркальний елемент прототипу потужністю 1–1,4 кВт (IFN-2024/2, 2024 р.); проведено моделювання параметрів та експерименти з ураження камер на 150 м, що підтвердили порогові значення щільності потужності. Наступні етапи вимагають інвестицій у фокусуєчу оптику, оптико-прицільний модуль та систему 2D-позиціонування для точного наведення на рухомі цілі.

Короткий імпульс тривалістю 30 мкс з енергією 30 мДж викликає засвітку та пошкодження фоточутливого шару на відстані до 150 м. Порогова щільність потужності становить ~ 15 Вт/мм², що підтверджено тестами на камерах №1–3. Зображення демонструють ефект: до впливу – чітке поле зору з роздільною здатністю до 1080р; після – повне засвічування (білий екран) або пошкодження (білі смуги, спотворення). Для камери №3 з діаметром об'єктива 8 мм і фокусною відстанню 3–9 мм, енергія в імпульсі не перевищувала 30 мДж, з урахуванням втрат на оптиці (20%).

Експериментальні дослідження впливу лазерного випромінювання на датчики камер (CCD та CMOS) виявили ключові характеристики: довжина хвилі 300–1100 нм є найефективнішою через високу чутливість датчиків; потужність від 23,5 мВт для засліплення на коротких відстанях до 95 Вт для пошкодження; короткі імпульси (наносекунди) викликають нелінійні ефекти, а довгі – термічне нагрівання. Пороги лазерно-індукованого пошкодження (LIDT): для CCD – 1,6–2,7 Дж/см²; для CMOS (FSI) – ~ 10 Дж/см²; для BSI CMOS – до 103 Дж/см² при 532 нм. Тести на відстані 136 м підтвердили ефективність: осліплення синім лазером (455 нм, неперервний) та ураження зеленим (532 нм, імпульсний, енергія 21–25 мДж, щільність 0,2–0,3 мДж/см²). Фото пошкоджених матриць камер

ілюструють термічне руйнування та механічний пробій. Середня площа фокальної плями – 10^{-6} см², з урахуванням фокусної відстані об'єктивів (4–40 мм), що збільшує щільність променя. Спектральний аналіз фільтрів камер підтвердив оптимальність 532 нм та 1064 нм для проникнення.

Система LFNS демонструє потенціал для інтеграції в сучасні оборонні стратегії, забезпечуючи надійний захист від FPV-дронів. Подальші інвестиції дозволять завершити розробку та впровадження.

Список використаних джерел

1. Звіт про проміжні результати етапу робіт по «Засвітці» фоточутливих елементів систем наведення та спостереження / Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Київ, 2025.

2. Презентація «Протидія FPV-дронам: Модульні лазерні системи захисту» / Група співробітників Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Київ, 2025.