

АВТОНОМНА РОБОТОТЕХНІЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗБОРУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ВІДХОДІВ

Вступ. Сучасні військові конфлікти дедалі активніше супроводжуються використанням високотехнологічних систем, зокрема безпілотних літальних апаратів. У ході російсько-української війни безпілотні комплекси стали одним із ключових інструментів ведення бойових дій. Останніми роками на фронті почали широко застосовуватися FPV-дрони з волоконно-оптичним керуванням, які забезпечують стабільний канал зв'язку між оператором і безпілотником та є стійкими до засобів радіоелектронної боротьби.

Особливістю таких систем є використання тонкого волоконно-оптичного кабелю, який під час польоту дрона розмотується зі спеціальної котушки та залишається на поверхні землі. У результаті цього на значних територіях, особливо у прифронтових районах, формуються великі скупчення волоконно-оптичних ниток, що вкривають ґрунт, рослинність та дерева. З часом ці матеріали накопичуються у навколишньому середовищі, утворюючи новий тип техногенного забруднення, через що ця проблема набуває значного екологічного та практичного значення та потребує вирішення.

Мета. Метою роботи є розроблення концепції та принципів функціонування автономної системи для виявлення, збору та подальшої передачі волоконно-оптичних відходів на спеціалізовану обробку або утилізацію, що накопичуються у ґрунтах і природних екосистемах внаслідок використання волоконно-керованих безпілотних літальних апаратів.

Матеріали забруднень. Основним джерелом досліджуваного забруднення є волоконно-оптичні кабелі, що застосовуються у системах керування безпілотними літальними апаратами. Під час роботи кабель поступово розмотується з котушки, утворюючи на поверхні ґрунту значні скупчення тонких волокон.

У подібних системах використовуються два основних типи оптичних волокон. Перший тип — скляне оптичне волокно (Glass Optical Fiber, GOF), яке характеризується високою пропускнуою здатністю сигналу, але є відносно крихким і чутливим до механічних пошкоджень. Другий тип — полімерне оптичне волокно (Polymer Optical Fiber, POF), виготовлене переважно з поліметилметакрилату (PMMA). Полімерні волокна є більш гнучкими, легкими та стійкими до механічних навантажень, тому саме вони найчастіше використовуються у польових умовах. Через невеликий діаметр, відсутність масивної захисної оболонки та прозорість такі кабелі є складними для виявлення у природному середовищі. З часом вони можуть накопичуватися на поверхні ґрунту або у рослинності, що створює передумови для довготривалого забруднення екосистем.

Важливою особливістю волоконно-оптичних кабелів є їх механічна поведінка під час деформації. Незважаючи на високу міцність волокна при

розтягуванні вздовж осі, його стійкість суттєво знижується при наявності вигину. При перевищенні критичного радіуса вигину або формуванні локального кута (злому) волокно втрачає свою цілісність і може руйнуватися. Під час збору необхідно мінімізувати різкі вигини та локальні навантаження, щоб запобігти подальшому руйнуванню кабелю та утворенню дрібніших частин, які складніше вилучити з навколишнього середовища.

Використання світла для детекції. Перспективним підходом є застосування оптичних методів виявлення. Волоконно-оптичні кабелі мають характерні властивості відбивання та заломлення світла. Застосування спрямованого освітлення або лазерних джерел дозволяє підвищити контрастність тонких волокон на поверхні ґрунту.

Важливим фактором є вибір кута падіння світла та кута спостереження. Оскільки полімерні волокна мають частково прозору структуру та специфічні оптичні властивості, ефективність їх виявлення значною мірою залежить від геометрії освітлення. При малих кутах падіння, тобто використовуючи ковзаюче світло (англ. *grazing illumination*) тонкі волокна можуть створювати більш виражені відблиски, що підвищує їх видимість на фоні ґрунту. Тому доцільним є експериментальний підбір оптимальних кутів освітлення та спостереження залежно від типу поверхні та умов навколишнього середовища. Перспективним підходом може бути попереднє зволоження волоконно-оптичного кабелю або поверхні ґрунту. Наявність вологи змінює показник заломлення середовища та може підсилювати контраст між волокном і фоном, а також сприяти появі більш стабільних оптичних ефектів (відблисків або дифузного розсіювання). Це потенційно підвищує ефективність детекції, особливо для полімерних волокон, які є малопомітними у сухому стані.

Детекція за допомогою методів штучного інтелекту. Комбінування алгоритмів комп'ютерного зору з керованим освітленням дозволить суттєво підвищити ефективність детекції. Зокрема, використання освітлення під оптимальними кутами сприяє формуванню відблисків і контрастних лінійних структур, що покращує якість вхідних даних для нейронних мереж. У таких умовах моделі можуть більш точно виділяти тонкі волокна на складному фоні ґрунту та рослинності. Камери високої роздільної здатності можуть використовуватися для отримання зображень поверхні ґрунту, після чого нейронні мережі аналізують структуру зображення та визначають наявність характерних лінійних об'єктів.

Механічний збір. Найбільш очевидним методом є механічний збір волокон за допомогою спеціальної котушки, що намотує кабель під час руху системи. Для забезпечення стабільного намотування використовується механізм натягування, який підтримує необхідну силу натягу та запобігає заплутуванню кабелю. Такий підхід дозволяє ефективно збирати значні обсяги волоконно-оптичного матеріалу для подальшої обробки.

Для мінімізації пошкоджень волокна та запобігання утворенню заломів доцільно попередньо піднімати кабель над поверхнею землі (приблизно на 2–3 м), що забезпечує більш рівномірне намотування. Важливою умовою є дотримання допустимого радіуса вигину волокна. Його перевищення може призводити до пошкодження матеріалу, тому механізм збору повинен забезпечувати плавну траєкторію руху кабелю без різких перегинів.

Використання статичного заряду. Оскільки полімерні волокна можуть накопичувати електростатичний заряд, можливим є застосування електростатичних методів збору. Полімерні матеріали, зокрема поліметилметакрилат (РММА), мають діелектричні властивості та здатні заряджатися внаслідок тертя об поверхню ґрунту, рослинність або елементи конструкції під час переміщення. Це створює передумови для їх ефективного взаємодії з електростатичними полями. Це дозволяє використовувати електростатичні колектори або заряджені поверхні для притягання та утримання волокон під час руху роботизованої системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Plastic pollution from fibre optic drones may threaten wildlife for years. Conflict and Environment Observatory (CEOBS). URL: <https://ceobs.org/plastic-pollution-from-fibre-optic-drones-may-threaten-wildlife-for-years/>
2. Штучна павутина: Як використання оптоволоконних дронів на фронті впливає на довкілля. Ukraine War Environmental Consequences Work Group. URL: <https://uwecworkgroup.info/fiber-optic-web-how-the-use-of-drones-on-the-frontlines-impacts-the-environment/>
3. Tian-Gui Cai, Da Lin, Bang Ni, Tian-Lun Zhang, Yi-Fei Wang, Dong Zhu. Microplastic Diversity as a Potential Driver of Soil Denitrification Shifts. *Environmental Science & Technology*. 2025 Vol. 59, issue 36. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c04981>