

КОМБІНОВАНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

Ю. С. Клушин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

E-mail: yurii.s.klushyn@lpnu.ua

© Клушин Ю. С., 2025

Подано концепцію, архітектуру та алгоритм комбінованого керування БпЛА для роботи в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ). Ключова ідея – “тихий” вихід до району виконання завдання по оптоволоконному каналу (керування та відео без радіовипромінювання) і повернення по захищеному радіоканалу з використанням антиджамінгових технік (FHSS/DSSS, вузькоспрямовані антени, адаптивні модуляції/кодування, керування потужністю, криптозахист AES-GCM). На борту реалізовано EO/IR-сприйняття (денна EO-камера RGB та тепловізійна IR-камера) із злиттям зображень (fusion) для підвищення надійності в умовах змінного освітлення, диму чи туману. Навігація без GNSS забезпечується на базі VIO та лідар-одометрії з барометрично-магнітними корекціями, що зменшує дрейф та гарантує керованість без супутникового сигналу.

Детерміноване перемикавання каналів реалізовано кінцевим автоматом станів (FSM) з формалізованими критеріями: вихід по волокну, виконання завдання, безпечне відчеплення, повернення по радіо, посадка/завершення. Наведено структурну модель, зв'язки між компонентами та програмний стек (шина обміну, модулі керування лінками, сенсорний ф'южн, відеострім, безпека, логування).

Результати випробувань прототипу (платформа LX1500; місія 40 км: 20 км по волокну + 20 км по радіо): зниження Packet Loss Rate у RADIO_MODE з 18–25 % (під час завад) до 3–5 % після JAMMING MITIGATION; відновлення SNR ≥ 10 дБ у вікні RADIO_RECOVERY з гістерезисом $\tau_{\text{hold}} = 15$ с; end-to-end затримка відео 25–35 мс на волокні та 120–180 мс на радіо (за пріоритизації C2/телеметрії); дрейф навігації без GNSS $\leq 0,7$ % пройденої дистанції; імовірність успішного завершення місії 96 % за $N = 50$ полігонних прогонів. Запропонований підхід підвищує живучість зв'язку та керування, зменшує ризик зриву місії та придатний до масштабування для різних класів БпЛА (розвідка, доставка, спостереження).

Ключові слова: антиджамінгова техніка, безпілотні літальні апарати, керування C2 і телеметрія, навігація, оптоволоконні канали, оптимізація роботи, сенсори EO/IR, VIO/лідародометрія.

Вступ

У сучасному цифровому світі дедалі більше у різних галузях почали використовувати безпілотні літальні апарати (БпЛА) – від інспекції інфраструктури й агромоніторингу до логістики, пошуку-рятування та оборони. У звичайних умовах застосування каналів C2 (Command & Control) є зрозумілим і логічним: оператор формує команди, а борт повертає телеметрію та стан систем. Проте в надзвичайних умовах виникають суттєві складнощі з керуванням БпЛА: зростає затримка, виникають втрати пакетів, можливі зриви захоплення лінки та порушення стійкості каналу керування, що призводить до невиконання місії та зростання ризиків [1, 10].

Деградація С2 насамперед зумовлена навмисними й ненавмисними завадами: радіоперешкодами та протидією у спектрі, підміною навігаційного сигналу (GNSS spoofing), мультипат-ефектами та затіненням у щільній міській забудові, а також складними метеоумовами. Вимога низької радіопомітності (LPD/LPI) у комбінації з потребою гарантованої доставки команд і телеметрії з мінімально можливою затримкою робить класичні “тільки радіо” підходи недостатньо надійними у сценаріях протидії РЕБ [1, 10].

Окремої уваги потребує канал корисного навантаження (відео/ЕО-ІР), який висуває підвищені вимоги до пропускної здатності та стабільності затримки. У практичних системах компроміси між енергетикою, шириною смуги, спрямованістю та стійкістю до завад часто знижують живучість і керованість платформи під час критичних етапів місії [1, 10].

Тому є необхідність розробити таку схему керування БпЛА, яка б дала можливість гарантованого виконання його місії у надзвичайних умовах. У загальному вигляді така схема має забезпечувати:

- мінімальну радіоemisію під час виходу до цілі та загальне зниження вразливості до РЕБ-впливів;
- стійкий двосторонній зв'язок С2 і передачу корисних даних із контрольованою затримкою та цілісністю інформації [1, 10];
- автономну навігацію без GNSS на основі злиття візуально-інерційної та лідарної одометрії, що обмежує дрейф курсу/позиції у різних сценах [2, 3];
- цілодобову спроможність спостереження завдяки поєднанню електрооптичних і інфрачервоних сенсорів (ЕО/ІР) із підвищенням надійності виявлення та супроводження цілей у нічних і завадових умовах [4];
- архітектурну та інформаційну сумісність на базі відкритих протоколів взаємодії між модулями та наземною станцією, що спрощує інтеграцію й контроль якості обміну [7, 8];
- раціональну організацію каналів зв'язку та траєкторії місії з урахуванням вимог до завадостійкості, безпеки та логістики, включно з резервуванням критичних функцій [5, 6, 9];
- формалізовані фейлсейфи й алгоритми перемикання режимів (FSM) для передбачуваної реакції системи на втрати зв'язку, зниження якості каналів чи інші відмови [1–10].

Загальний підхід до такої схеми має поєднувати принципи зниження радіопомітності, стійкості каналів керування та передачі даних, автономності навігації у GNSS-denied середовищах, а також узгодженості сенсорного комплексу “день/ніч”. Орієнтація на відкриті, добре підтримувані технологічні стеки та стандарти взаємодії дає змогу зменшити інтеграційні ризики, забезпечити масштабованість і спростити подальше обслуговування [2–8]. У підсумку саме така концепція підвищує імовірність успішного виконання місії в умовах інтенсивної радіоелектронної протидії та обмеженої доступності GNSS [1–10].

Огляд літературних джерел

Сучасні підходи до керування БпЛА охоплюють декілька класів каналів і архітектур, що відрізняються стійкістю до РЕБ, радіопомітністю, пропускною здатністю та вимогами до інфраструктури.

Прямий радіоканал (LOS/NLOS, “тільки радіо”)

Класична модель: керування С2 і телеметрія по вузькосмуговому цифровому каналу, відео – окремо (цифрове/аналогове) у неліцензованих діапазонах. Переваги: мобільність, простота, невелика вага, відсутність прив'язки до мереж інфраструктури [8]. Недоліки: вразливість до глушіння/перевантаження спектра, залежність від прямої видимості, зростання затримки та втрат пакетів під дією РЕБ; помітна ЕМ-емісія (LPD/LPI обмежена) [1, 10].

Радіоканал із вузькоспрямованими антенами, трекерами та/або ретрансляторами (relay/mesh)

Використовуються високодоброткові антени (на штативах/трекерах) і ретрансляція через проміжні БпЛА/пункти. Переваги: збільшення дальності, краща завадостійкість і часткова LPI (**Low Probability of Intercept** – “низька ймовірність перехоплення”) завдяки вузькому променю. Недоліки: складність наведення/супроводу, деградація під час помилок трекінгу або сильних завад; логістичні витрати на розгортання ретрансляції [1, 10].

Стільникові мережі (LTE/5G, BVLOS)

Використання публічних мобільних мереж для C2/відео. Переваги: велике покриття, хороша пропускна здатність у містах. Недоліки: залежність від інфраструктури оператора, змінна латентність/якість, регуляторні обмеження; у кризових сценаріях мережа може бути перевантажена/навмисно деградована [1].

Супутниковий зв'язок (SATCOM)

Застосовується для далеких BVLOS-місій. Переваги: глобальне покриття, незалежність від локальної стільникової мережі. Недоліки: висока вартість, помітна затримка, обмежена смуга, енергоспоживання терміналів; у конфліктах – ризик спрямованих завад та пеленгації [1].

Прив'язні БпЛА (tethered) з живленням і/або даними по кабелю

Дані – по Ethernet/оптоволокну, живлення – по силовому кабелю; застосовуються як “аеростатична щогла” або для довготривалого зависання. Переваги: тривалий час роботи (живлення із землі), висока завадостійкість, низька латентність каналу даних; у разі оптоволокну – електромагнітна індиферентність, що суттєво підвищує стійкість до РЕБ [9, 5]. Недоліки: обмеження дальності/маневреності довжиною та механікою троса, ризики зачепів/обривів, вимоги до TMU (катушка, направляючі, демпфери) [9].

Оптоволоконні (fiber-optic) канали керування/відео

Передача C2/відео по тонкому волокну (зазвичай через BiDi/WDM-трансивери), інколи з подальшим відчепленням. Переваги: дуже низька латентність, висока смуга, стійкість до ЕМ-перешкод; можливість мультиплексувати кілька потоків по одному волокну (WDM) [5, 6]. Недоліки: механічні обмеження (траєкторне планування під кабель), потреба у TMU і ретельному інтегруванні з планером [9].

Гібридні/мультиканальні схеми (primary + backup, FSM-перемикання)

Поєднують кілька лінків (наприклад, “вихід по волокну” + “повернення по радіо”) з автоматичним перемиканням на підставі якості каналу (SNR/BER, затримка, втрати). Переваги: підвищена живучість, можливість оптимізувати LPD/LPI на критичних етапах, кращий контроль ризиків РЕБ [1, 10, 5, 9]. Недоліки: вища складність системи, потреба у правильних QoS/порогах і валідації сценаріїв відмов.

“Автономність-першою” (mission-tolerant to comms): VIO/лідар-одометрія

Зменшення залежності від безперервного C2 завдяки навігації без GNSS (VIO, LOAM-подібні методи) і локальних фейлсейфів. Переваги: утримання керованості/повернення навіть за тимчасової втрати зв'язку. Недоліки: накопичуваний дрейф, залежність від сцени/освітлення (для VIO), обчислювальна складність [2, 3]. Комбінація з EO/IR-злиттям покращує спостережуваність у день/ніч та в димці [4].

Протокольні-системні засади: ROS 2/DDS та MAVLink

Взаємодія підсистем керування/наземки часто реалізується на ROS 2 (DDS) з налаштовуваними QoS-профілями; C2/телеметрія/місії – через MAVLink (PX4/ArduPilot, GCS) [7, 8]. Переваги: модульність, інтероперабельність, зрілі екосистеми. Недоліки: потреба в акуратному виборі QoS та захисті транспортного рівня; під час помилкових налаштувань можливі “голодування” потоків або непередбачувані затримки [7, 8].

З цього огляду можна зробити такий висновок. Радіосхеми забезпечують мобільність, але залишаються вразливими до РЕБ і LPI/LPD-вимог [1, 10]. Прив'язні/волоконні рішення радикально знижують радіоемісію і підвищують завадостійкість ціною механічних обмежень [5, 6, 9]. Гібридні мультиканальні архітектури з формалізованим FSM-перемиканням та автономною навігацією без GNSS дають змогу з'єднати сильні сторони підходів і мінімізувати їх недоліки [1–10].

Мета статті

Мета статті – створення та обґрунтування комбінованої схеми керування БпЛА, здатної забезпечити гарантоване виконання місії в умовах радіоелектронної протидії шляхом поєднання “тихого” оптоволоконного каналу на етапі виходу та захищеного радіоканалу на етапі повернення, із

підтримкою автономної навігації без GNSS, добової EO/IR-спроможності та формалізованого FSM-перемикання між каналами.

Для досягнення мети передбачено такі завдання (узагальнено):

1. Окреслити вимоги та принципи архітектури комбінованої системи (LPD/LPI, завадостійкість, сумісність).
2. Розробити структурну модель і зв'язки компонентів (наземна станція, TMU, автопілот, бортовий обчислювач, сенсорний комплекс, канали передавання даних).
3. Визначити програмний стек та інтерфейси обміну (ROS 2/DDS, MAVLink, потоки відео/телеметрії).
4. Сформував алгоритм FSM-перемикання каналів і фейлсейфи для режимів деградації під впливом.
5. Обґрунтувати методику навігації без GNSS на базі VIO/лідар-одометрії та EO/IR-злиття даних.
6. Провести узагальнення результатів апробації та надати практичні рекомендації з інтеграції й управління ризиками.

Концепція системи

1. Призначення та сценарії застосування

Система призначена для гарантованого виконання місії доставки/спостереження в умовах РЕБ, коли GNSS частково або повністю недоступний, а радіоканал C2 і відео зазнають завад. Концепція поєднує “тихий” етап виходу по оптоволоконному каналу та етап повернення по захищеному радіоканалу, доповнені автономною навігацією без GNSS і формалізованими фейлсейфами. Опора на відкриті протоколи забезпечує модульність і відтворюваність рішень.

2. Базові принципи

1. **Мінімальна радіоемісія на підході:** управління та відео передаються по оптоволокну, що робить систему індиферентною до електромагнітних завад і знижує ризик пеленгації (LPD/LPI) [5, 6].
2. **Резервування та живучість:** повернення здійснюється по захищеному радіоканалу з антиджамінг-методами (FHSS/DSSS, адаптивні частота/поляризація/бітрейт, вузькоспрямовані антени) [1, 10].
3. **Автономність навігації:** орієнтування без GNSS на основі VIO та лідар-одометрії з барометрично-магнітною підстраховкою [2, 3].
4. **Модульність і стандартизація:** внутрішні взаємодії реалізовано через ROS 2/DDS (QoS-профілі) та MAVLink для C2/телеметрії [7, 8].
5. **Керовані фейлсейфи:** чіткі пороги й гістерезис для перемикань, передбачувані сценарії RTH/land (автоматичне повернення БПЛА до заздалегідь заданої “домашньої” точки (Home)).

3. Етапи місії (без позначень стрілками)

1. **Підготовка.** Перевірка цілісності волокна, калібрування сенсорів, завантаження місії, валідація радіоканалу резерву. Налаштування порогів якості лінків і FSM. **Вихід до району виконання.** Передача команд C2, відео та телеметрії виключно по оптоволоконному каналу; TMU керує розмотуванням/натягом, план польоту враховує перешкоди та мікрорельєф для уникнення зачепів [5, 6, 9].
2. **Виконання завдання.** Доставка/скидання вантажу або спостереження. Навігація без GNSS базується на VIO/лідар-одометрії; використовується EO/IR-спостереження для дня/ночі [2–4].
3. **Відчеплення волокна.** Вузол від'єднання активується у контрольній точці; TMU фіксується, стан події логінується.
4. **Повернення.** Активується захищений радіоканал; застосовуються антиджамінг-процедури, адаптивні параметри лінка та вузькі антени; у разі деградації якості – автоматичний RTH за локальними орієнтирами [1, 10, 7, 8].

4. Навігація без GNSS

Стан і траєкторія оцінюються злиттям:

- **VIO** – візуально-інерційна одометрія, що поєднує камери та IMU.
- **Лідар-одометрія** – порівняння послідовних 3D-сканів оточення.
- **Баро/магнітометр** – стабілізація висоти/курсу.
- **Перевірка достовірності** – відкидання викидів, прив'язка до “якірних” візуальних реперів. Таке злиття зменшує дрейф і забезпечує керованість у різних сценах та освітленні [2, 3].

5. Керування каналами зв'язку

- **Моніторинг якості:** SNR, BER, затримка, джитер, втрата пакетів.
- **FSM-логіка:** перемикання між оптоволоконним і радіоканалом відбувається за порогоми з гістерезисом, щоб уникнути “фліп-флопу”.
- **Пріоритети:** на виході – оптоволокло; після відчеплення – радіо; у разі різкого погіршення – автономний RTH; усі події журналюються для післяпольотного аналізу [7, 8].

6. Інформаційна безпека та ЕМС

- **Криптозахист:** взаємна аутентифікація, шифрування (наприклад, AES-256/GCM) для службових потоків; підпис місій і конфігурацій; контроль цілісності телеметрії [7, 8].
- **ЕМС-заходи:** екранування вузлів, феритові елементи, гальванічна розв'язка оптичних інтерфейсів, розділення живлення для радіо/сенсорів/обчислювача [5].
- **Керування ключами:** ротація, зберігання поза платою автопілота, журнали доступу.

7. Інженерні обмеження і допущення

- **Механіка троса:** планування польоту з урахуванням будівель/рослинності/вітру; TMU контролює натяг/швидкість розмотування для запобігання зацепам та обривам [9].
- **Маса/енергетика:** вибір довжини волокна та котушки з урахуванням тягомісткості; баланс часу польоту та корисного навантаження [5, 9].
- **Регуляторика:** профілі BVLOS/ENR з урахуванням локальних обмежень на частоти/потужності.

8. Очікувані показники (орієнтири)

- **Надійність виконання місії** порівняно з “тільки радіо” – вища завдяки LPD/LPI виходу та антиджамінгу на поверненні [1, 10].
- **Латентність C2/відео** на етапі виходу – мінімальна та детермінована; **стабільність відео** HD/4K через WDM-мультиплексування [5, 6].
- **Дрейф без GNSS** – контрольований завдяки VIO/лідар-одометрії та корекціям [2, 3].

9. Узгодженість із програмним стеком

ROS 2/DDS забезпечує міжпроцесну взаємодію з керованими QoS-профілями (reliable/best-effort, deadline, history), а MAVLink – уніфіковані C2/телеметрію й сумісність із PX4/ArduPilot та наземними станціями. Це спрощує інтеграцію модулів Link Manager (FSM), EW Monitor (якість лінків), Perception (EO/IR) і навігаційних компонентів [7, 8].

Архітектура системи

Архітектура системи (рис. 1) відображає концепцію **комбінованого керування** з “тихим” виходом та захищеним поверненням і складається з двох тісно інтегрованих частин: **наземного сегмента** та **бортового сегмента**. Наземний сегмент включає **GCS/планувальник місії** (операторський інтерфейс C2/телеметрія/відео), **TMU** (лебідка-натягач волокна з FORJ для безперервної оптики), **оптичний шлюз WDM/SFP** для мультиплексування службових і відеопотоків в **одне волокно**, а також **захищений радіомодем** зі спрямованими антенами для етапу повернення. Бортовий сегмент містить **бортовий комп'ютер (OBC, ROS 2/DDS)**, **автопілот (PX4/ArduPilot)**, сенсорний комплекс **ЕО/ІR** (день/ніч), **лідар/ToF**, **IMU/баро/магнітометр** для навігації без GNSS, **механізм скидання вантажу**, **бортовий WDM-модуль**, **радіомодем** та вузли живлення/ЕМС. Така декомпозиція дає змогу рознести контури низькорівневого керування (автопілот) і високорівневу логіку (OBC/FSM) з чіткими інтерфейсами та зонами відповідальності [7, 8].

Передбачено два незалежні канали зв'язку. Канал 1 (вихід) – оптоволоконний: Ethernet/Serial over Fiber через WDM, що транспортує C2, телеметрію та відео в одному волокні за різними довжинами хвиль із мінімальною затримкою та повною імунністю до РЕБ/пеленгації (LPD/LPI) [5]. Волокно подається/прибирається TMU з контролем натягу; FORJ гарантує передачу під час обертання. Канал 2 (повернення) – радіо з профілями антиджамінгу (FHSS/DSSS, адаптивні MCS/FEC, керування потужністю/частотою/поляризацією), вузькоспрямованими антенами та криптозахистом AES-256/GCM; канал здатен підтримувати C2/телеметрію з пріоритетом та адаптивне відео за деградації умов [1, 10]. Перемикання між каналами та реакція на завади реалізується кінцевим автоматом станів (FSM) на борту: PREPARE → FIBER_MODE → DELIVERY → DETACH → RADIO_MODE → LAND із гілками JAMMING MITIGATION і RADIO_RECOVERY для стабілізації якості зв'язку.

Внутрішні шини та інтерфейси уніфіковані: ROS 2/DDS слугує подієвою шиною між бортовими модулями (перцепція, навігація, FSM, відео), MAVLink (UART/Ethernet) – між OBC і автопілотом для команд режимів/станів, RTP/RTSP/SRTP – для EO/IR-відео з адаптивним бітрейтом; службові канали синхронізуються через PTP/NTP для коректного ф'южну та логування [7, 8]. Безпека забезпечена mTLS/DTLS/SRTP і консоллю керування ключами (ротація/політики), тоді як EMC-заходи (екранування, ферити, гальванічна розв'язка оптики) мінімізують ЕМ-емісію і взаємні наводки. На рівні експлуатації архітектура підтримує пріоритизацію трафіку (C2/телеметрія > службові > відео), відмовостійкі фейлсейфи (AUTONOMOUS_RTH без GNSS за VIO/лідар-одометрією) та повне логування подій/переходів FSM з часовими мітками, що сумарно підвищує живучість каналу керування і узгоджується з концепцією “тихий вихід по волокну → доставка/DETACH → повернення по захищеному радіо” [1, 5, 7, 8, 10].

1. Склад і функції компонентів

Наземний сегмент містить:

- **GCS/консоль оператора.** Формує команди C2, відображає телеметрію й відео, веде журнал місії.
- **Оптичний конвертер (BiDi/WDM).** Перетворює електричні сигнали керування/відео в світлові імпульси і навпаки; підтримує одночасну передачу кількох потоків по одному волокну (WDM) [5, 6].
- **TMU (Tether Management Unit).** Моторизована котушка 3–20 км з напрямними роликками, демпферами й сенсорами натягу; керує розмотуванням/намотуванням, запобігає зачепам/обривам [9].
- **Радіомодем + вузькоспрямована антена.** Резервний/зворотний лінк для повернення; підтримує FHSS/DSSS, шифрування, адаптивні параметри [1, 10].

Бортовий сегмент містить:

- **Оптичний конвертер (борт).** Приймає/передає стійкий до РЕБ волоконний трафік (керування, відео, телеметрія) [5].
- **Бортовий комп'ютер.** ROS 2/DDS; модулі Link Manager (FSM-перемикання каналів), EW Monitor (якість лінків), Perception (EO/IR), логери відео/RTP та подій [7].
- **Автопілот (PX4/ArduPilot).** EKF/режими, планування місії, RTH; обмін із ПК по MAVLink (Ethernet/UART) [8].
- **Сенсори.** EO/IR для дня/ночі [4]; лідар/баро/маг, опційно GNSS; VIO/лідар-одометрія для навігації без GNSS [2, 3].
- **Вантажний модуль.** Скидання/захвати, механізм відчеплення волокна.
- **Бортовий радіомодем + антена.** Захищений радіоканал для етапу повернення/резерву [1, 10].

2. Зв'язки між компонентами

1. **Оптоволоконний канал (вихід/доставка).** GCS ⇔ (оптичні конвертери) ⇔ Бортовий ПК; передає C2, відео (HD/4K) і телеметрію з мінімальною латентністю; індиферентний до ЕМ-перешкод; мультиплексування потоків по WDM [5, 6].

2. **Внутрішні шини.** Бортовий ПК $\Leftrightarrow$ Автопілот – MAVLink (Ethernet/UART), сенсорні шини USB/CSI/UART/ETH; керування вантажним модулем – PWM/CAN/ETH [7, 8].

3. **Радіоканал (повернення/резерв).** Бортовий радіомодем $\Leftrightarrow$ Наземний радіомодем; FHSS/DSSS, вузькоспрямовані антени, криптографія; використовує адаптивне перестроювання частоти/бітрейта [1, 10].

4. **Керування TMU.** З GCS – командами керування; телеметрія TMU (довжина, натяг) логінується для фейлсейфів [9].

3. Як це працює (режими)

1. **Вихід (FIBER_MODE).** Весь трафік (C2/відео/телеметрія) іде по волокну; TMU підтримує натяг і чисте розмотування [5, 9].

2. **Доставка.** Виконання задачі (скидання/захват), контроль навігації без GNSS (VIO/лідар-одометрія) [2, 3], EO/IR-спостереження [4].

3. **Відчеплення волокна.** Механізм роз'єднання, TMU фіксується.

4. **Повернення (RADIO_MODE).** Перехід на захищений радіоканал; антиджамінг-алгоритми, вузькі антени, шифрування; у разі втрат – **AUTONOMOUS_RTH** [1, 10].

5. **FSM-перемикання і фейлсейфи.** Увімкнено моніторинг SNR/BER/затримки/втрат; пороги й гістерезис запобігають “фліп-флопу” [7, 8].

4. Коротко про вимоги

1. **LPD/LPI:** мінімальна радіоемісія на етапі виходу завдяки волокну [5].
2. **Завадостійкість:** FHSS/DSSS, вузькі антени, адаптивні параметри, криптографія [1, 10].
3. **Навігація без GNSS:** VIO + лідар-одометрія з баро/маг-підстрахуванням [2, 3].
4. **Інтероперабельність:** ROS 2/DDS і MAVLink для модульності та контролю QoS [7, 8].
5. **Механіка TMU:** керування натягом і маршрутом під трос [9].

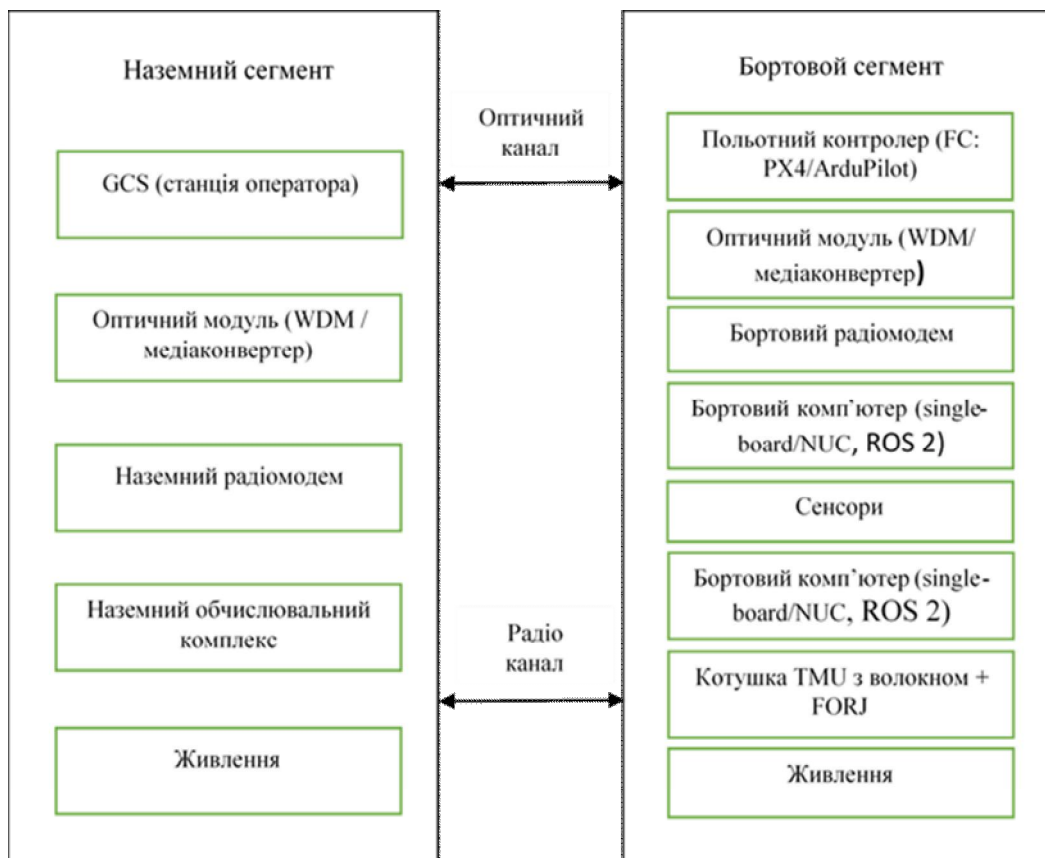


Рис. 1. Архітектура гібридної системи керування БпЛА

Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення (ПЗ) (рис. 2) гібридної системи керування побудовано за модульним принципом і поділене на наземний та бортовий контури з єдиною шиною обміну повідомленнями. Воно забезпечує детерміноване керування каналами зв'язку, сенсорно-обчислювальний ф'южн, потокове відео, навігацію без GNSS, кіберзахист і спостережуваність системи в реальному часі. На борту ядром ПЗ є диспетчер зв'язку **Link Manager (FSM)**, який на підставі метрик **EW Monitor** керує вибором інтерфейсу (оптоволокну/радіо), профілями радіо та політиками відео; підсистеми **Perception** (EO/IR-fusion) та **NavFusion** (VIO/лідар-одометрія) формують ситуаційну обізнаність, а **Video Streamer**, **MAVLink Bridge**, **Security** і **Logger/Health** відповідають за відеотранспорт, інтеграцію з автопілотом, шифрування/аутентифікацію та телеметрію подій. Наземний контур містить **GCS/Mission Planner**, приймач/реєстратор відео, клієнт керування лінками, консоль керування ключами та моніторинг якості сервісу. Така декомпозиція спрощує масштабування (від розвідки до доставки), підвищує відмовостійкість і полегшує тестування/оновлення компонентів. Рис. 2 показує межі модулів і маршрути потоків даних між ними, що слугує основою для детального опису інтерфейсів та сценаріїв взаємодії у підрозділах цього розділу.

Наземні модулі (Ground SW).

GCS UI / Mission Planner

- Призначення: операторський інтерфейс для планування/редагування місії, керування режимами, моніторингу відео/телеметрії.
- Функції: створення маршрутів/зон/но-флай; arm/disarm; команди LAND/RTH; перегляд EO/IR; аналітика статусів.
- Інтерфейси: Ethernet/USB; протоколи – MAVLink (C2/телеметрія), WebSocket/REST для сервісів.
- Вхід/вихід: вхід – телеметрія/відео/аларми; вихід – команди C2, налаштування профілів каналів.
- Метрики/логи: події оператора, історія команд, таймлайн місії.

Video Receiver / Recorder (RTP/RTSP/DVR)

- Призначення: приймання, відтворення та запис EO/IR потоків.
- Функції: декодування H.264/H.265; DVR/розклад записів; PIP/спліт; оверлеї телеметрії; скріншоти.
- Інтерфейси: GigE; протоколи – RTP/RTSP/SRTP.
- Вхід/вихід: відеопотоки з борту; архіви MP4/TS/PCAP; живе відео до GCS.
- Метрики/логи: бітрейт, фреймрейт, jitter/latency, втрати пакетів.

Link Control Client (Fiber/Radio)

- Призначення: клієнт керування каналами зв'язку на землі.
- Функції: підняття/тест лінків (оптика/радіо), перемикання профілів (MCS/FEC/потужність/частота/поляризація), пріоритизація C2/відео.
- Інтерфейси: до оптичного шлюзу (SFP/WDM) і радіомодема (Ethernet/Serial).
- Вхід/вихід: вхід – метрики SNR/BER/PLR, події EW; вихід – команди конфігурації модемів/шлюзів.

Метрики/логи: стан каналів, профілі, історія перемикачів.

Key Management / Security Console (TLS/VPN)

- Призначення: керування ключами/сертифікатами й політиками шифрування.
- Функції: генерація/ротація ключів, mTLS для сервісів, SRTP політики, VPN-тунелі, контроль доступів.
- Інтерфейси: HTTPS/mTLS; інтеграція з бортовим SROS2/DTLS.
- Вхід/вихід: політики безпеки, CRL, сертифікати; дистрибуція ключів на борт/на землю.
- Метрики/логи: аудити доступу, події ротації, спроби автентифікації.

Monitoring & Logging (QoS/EW events)

- Призначення: моніторинг якості лінків і збору логів/алертів, зокрема подій РЕБ.
- Функції: збирання SNR/BER/PLR/jitter/RTT; дзеркало FSM; алерти DEGRADE/CRITICAL/

JAM; кореляція з відео/телеметрією.

- Інтерфейси: SNMP/REST/IPC; приймає події з Link Control, Radio/Fiber Gateway.
- Вхід/вихід: вхід – метрики QoS і FSM-події; вихід – дашборди, алерти, звіти.
- Метрики/логи: часові ряди QoS, логи перемикачів, syslog, трейсинг.

Бортові модулі (Onboard SW, ROS 2 / DDS).

Link Manager (FSM) – керує вибором каналу/профілями

- Призначення: реалізація FSM місії та менеджмент каналів (волокно/радіо).
- Функції: переходи

PREPARE→FIBER_MODE→DELIVERY→DETACH→RADIO_MODE→LAND;

JAMMING MITIGATION↔RADIO_RECOVERY; фейлсейфи.

- Інтерфейси: ROS 2 топіки/сервіси; до радіомодема/оптики – Ethernet/Serial.
- Вхід/вихід: вхід – QoS метрики, команда з GCS; вихід – профілі лінків, команди автопілоту.
- Метрики/логи: перелік переходів, пороги T_low/T_high, τ_{hold} , N_max.

EW Monitor – метрики якості/події DEGRADE/RECOVER/JAM

- Призначення: вимірювання стану RF і оптики, виявлення втручання/завад.
- Функції: обчислення SNR/BER/PLR/jitter; детекція джамінгу/спуфінгу; події DEGRADE/

RECOVER/JAM.

- Інтерфейси: драйвери модема/шлюзу (PHY/MAC API), ROS 2.
- Вхід/вихід: вхід – сирі метрики; вихід – normal/degrade/critical, тригери для FSM.
- Метрики/логи: часові ряди, гістерезис/дебаунс.

Perception (EO/IR fusion) – злиття/детекції/оверлеї

- Призначення: ф'южн EO (RGB) + IR, підсилення видимості в день/ніч.
- Функції: вирівнювання потоків, ф'южн (weighted/learned), детекція об'єктів, оверлеї контурів/міток, стабілізація.

- Інтерфейси: відеовходи GigE/CSI/USB; ROS 2; вивід – RTP/SRTP.

- Вхід/вихід: EO/IR кадри; вихідний стрім (H.264/H.265) з OSD/телеметрією.

- Метрики/логи: FPS, latency, confidence детекторів.

Video Streamer (H.264/H.265, RTP/RTSP/SRTP)

- Призначення: енкодинг і транспортування відео на землю.
- Функції: CBR/VBR профілі для FIBER/RADIO; FEC; keyframe-контроль; SRTP.
- Інтерфейси: GStreamer/FFmpeg; RTP/RTSP/SRTP.
- Вхід/вихід: вхід – сирі кадри з Perception; вихід – мережевий стрім.
- Метрики/логи: бітрейт, I-frame інтервал, втрати/повтори.

NavFusion (VIO + Lidar + Baro/Mag)

- Призначення: навігація без GNSS (VIO + лідар-одометрія з баро/маг-корекціями).
- Функції: оцінка поз/швидкості, підміна/доповнення GNSS; спільне фільтрування (EKF/UKF).
- Інтерфейси: ROS 2; до автопілота – MAVLink/Odometry.
- Вхід/вихід: камери, IMU, лідар, баро, маг; вихід – pose/nav-оцінки.
- Метрики/логи: дрейф, інновації фільтра, частота оновлень.

MAVLink Bridge (ROS2↔FC)

- Призначення: шлюз між ROS 2 (OBC) і автопілотом (FC).
- Функції: трансляція команд/телеметрії, маршрутизація C2, rate-limit і пріоритизація.
- Інтерфейси: UART/CAN/Ethernet (MAVLink) + ROS 2 DDS.
- Вхід/вихід: топіки ROS 2 ↔ MAVLink messages.
- Метрики/логи: затримка, черги, drop-rate.

Security (SROS2/TLS/DTLS/SRTP)

- Призначення: шифрування, автентифікація й цілісність трафіку.
- Функції: SROS2 для ROS-трафіку; DTLS/SRTP для відео; TLS/mTLS для сервісів; управління ключами.

- Інтерфейси: інтеграція з наземним KMS; сертифікати/CRL.
- Вхід/вихід: запити політик/ключів; застосовані профілі шифрування.
- Метрики/логи: події міток часу, ротація ключів, помилки рукопотискань.

Logger / Health

- Призначення: телеметрія стану модулів і журнали подій.
- Функції: heartbeat, системні логи, чорний ящик (flight/event recorder).
- Інтерфейси: ROS 2, локальне FS; опціонально – стрім на землю.
- Вхід/вихід: статуси, алерти; логи/дампи.
- Метрики/логи: температура/струм/навантаження CPU/GPU, диск, пам'ять.

TMU Controller (управління прив'язю)

- Призначення: керування бортовою катушкою/приводом (якщо TMU на борту).
- Функції: натяг/швидкість подачі, анти-петля, аварійний DETACH, датчики натягу/температури.

- Інтерфейси: CAN/UART/GPIO; події в ROS 2/FSM.
- Вхід/вихід: команда швидкості/натягу; телеметрія TMU.
- Метрики/логи: натяг, оберти, події “ривок/закус”.

Payload Controller (DRM, скидання вантажу)

- Призначення: керування механізмом скидання/захоплення.
- Функції: arm/lock/release, міжблокування безпеки, підтвердження станів.
- Інтерфейси: GPIO/UART/CAN; сигналізація в FSM.
- Вхід/вихід: команди з DELIVERY; індикація armed/locked/released.
- Метрики/логи: лічильники спрацювань, помилки.

Fiber I/F (WDM)

- Призначення: бортовий оптичний інтерфейс до наземного WDM.

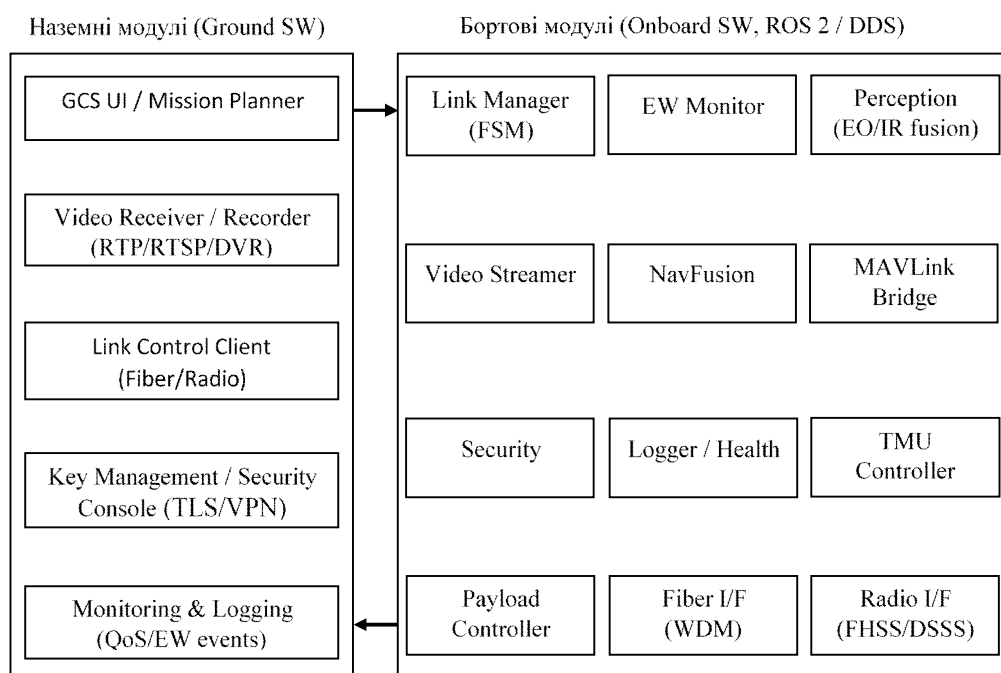


Рис. 2. Блок-схема програмних модулів

- Функції: мультиплекс λ (uplink/downlink), контроль лінка, статистика.
- Інтерфейси: SFP/SFP+ (оптика) + GigE до OBC.
- Вхід/вихід: C2/телеметрія/відео/час.
- Метрики/логи: оптична потужність, помилки, latency/jitter.

Radio I/F (FHSS/DSSS)

- Призначення: бортовий радіоінтерфейс для режиму повернення.
- Функції: адаптація MCS/FEC, керування потужністю/частотою/поляризацією, телеметрія PHY/MAC.
- Інтерфейси: Ethernet/Serial до OBC; RF до антен.
- Вхід/вихід: C2/телеметрія/відео (адаптивно).
- Метрики/логи: SNR/BER/PLR, RSSI, історія профілів.

Алгоритм роботи

Наведено кінцевий автомат станів (FSM) для комбінованого керування БпЛА. FSM визначає послідовність $\text{PREPARE} \rightarrow \text{FIBER_MODE} \rightarrow \text{DELIVERY} \rightarrow \text{DETACH} \rightarrow \text{RADIO_MODE} \rightarrow \text{LAND}$ з чітко сформульованими умовами переходів: досягнення району виконання, настання часу відчеплення волокна, погіршення/втрата якості радіоканалу та команда/зона посадки. На рис. 3 зображено алгоритм роботи системи (FSM) – структура станів і логіка прийняття рішень.

1. Опис станів і базових переходів

1) **PREPARE / Підготовка** – первинні перевірки (BITE-самотест, валідність криптоключів, працездатність оптичного тракту/TMU, контроль QoS відео/телеметрії). Перехід у FIBER_MODE.

2) **FIBER_MODE / Вихід** – рух до району виконання по оптоволоконному каналу (керування C2 та відео без радіовипромінювання). Умова “Досягнуто район виконання?”:

- Ні → гілка “Продовжити FIBER_MODE” (контроль натягу TMU, обхід перешкод) → повернення у FIBER_MODE.
- Так → перехід у DELIVERY / Доставка.

3) **DELIVERY / Доставка** – виконання завдання (точне позиціонування, скидання/захоплення, контроль траєкторії). Умова “Час відчепити волокно?”:

- Ні → гілка “Продовжити DELIVERY (HOLD)” (утримання/коло очікування) → повернення у DELIVERY.
- Так → DETACH / Відчеплення.

4) **DETACH / Відчеплення** – безпечне від’єднання волокна (фіксація/логування TMU, перевірка телеметрії). Далі → RADIO_MODE / Повернення.

5) **LAND / Посадка** – термінальне завершення місії (ARM/DISARM-процедури, збереження логів).

2. RADIO_MODE / Повернення – послідовний “шлюз” перевірок

Щоб уникнути кількох виходів зі стану одночасно й осциляцій, перевірки виконуються послідовно (a → b → c). **JAMMING MITIGATION** не повертає одразу в штат, а проходить через **RADIO_RECOVERY** (оцінка стабільності).

- а) “Втрачено радіо або критична якість?”
 - Так → **AUTONOMOUS_RTH** (візуально-інерційне/лідар-RTH) → **LAND / Посадка**.
 - Ні → далі b).
- б) “У зоні посадки АБО команда LAND?”
 - Так → **LAND / Посадка**.
 - Ні → далі c).
- с) “Зниження якості радіо?”
 - Так → **JAMMING MITIGATION** (адаптації антиджамінгу: FHSS/DSSS, вибір/перемикання MCS, керування потужністю, перестановка частоти/поляризації, зниження бітрейту відео, $\uparrow$ FEC) → **RADIO_RECOVERY** (оцінка стабільності) →

“Якість $\geq T_high$ протягом τ_hold ?”

– Так $\rightarrow$ назад у **RADIO_MODE** (продовжуємо повернення).

– Ні $\rightarrow$ “Ліміт спроб або якість $\leq$ критична?”

• Так $\rightarrow$ **AUTONOMOUS_RTH** $\rightarrow$ **LAND**.

• Ні $\rightarrow$ повторити **JAMMING MITIGATION** ($k = k + 1$) $\rightarrow$ **RADIO_RECOVERY**.

• Ні $\rightarrow$ повернення у **RADIO_MODE** (якість нормальна; триває повернення).

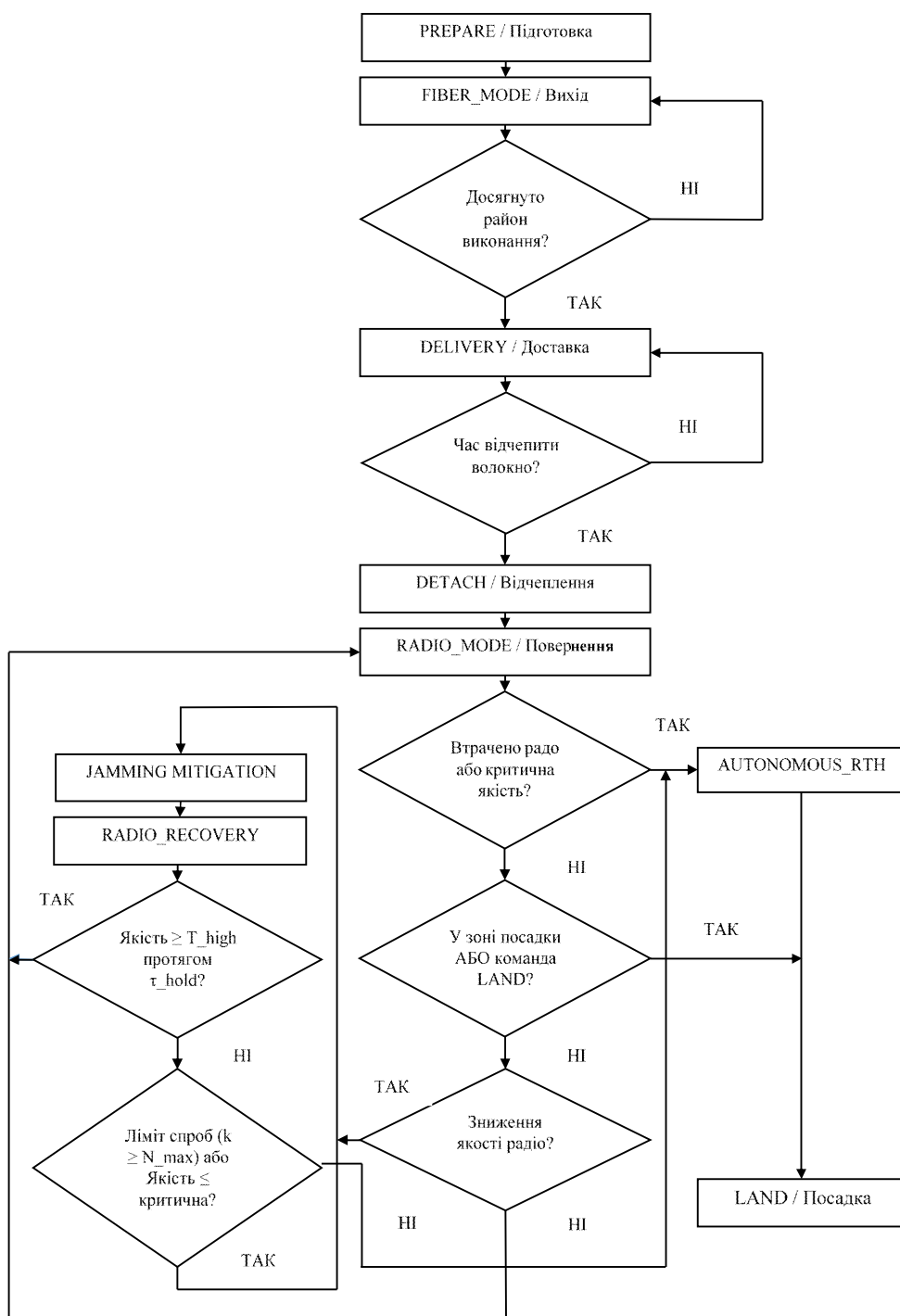


Рис. 3. Алгоритм роботи (FSM)

3. Параметри прийняття рішень та гістерезис

Для комбінованої системи керування БпЛА гістерезис – це “мертва зона” або розділення порогів увімкнення/вимкнення, щоб система не смикалася туди-назад під час незначних коливань метрик (SNR/PLR/BER). Без гістерезису система б коливалася: **JAMMING MITIGATION** → **RADIO_MODE** → **назад** під час кожного дрібного стрибка якості. З гістерезисом отримуємо **стійкі рішення**: вхід у антимітигацію – лише тоді, коли справді погано, а вихід – коли стало **помітно і стабільно** краще.

Параметри прийняття рішень:

- T_{low} (вхід у деградацію): приклад – PLR (**P**acket **L**oss **R**ate – відсоток втрат пакетів) > 10 % або SNR(**S**ignal-to-**N**oise **R**atio – співвідношення сигнал/шум) < 6 dB або BER (**B**it **E**rror **R**ate – частка помилкових бітів) > $1e-4$ (будь-яка умова).
- T_{high} (повернення у штат): приклад – PLR < 5% і SNR ≥ 10 dB і BER $\leq 1e-5$ (усі разом).
- τ_{hold} : вікно стабільності якості (10–20 с) перед поверненням у **RADIO_MODE**.
- τ_{eval} : інтервал оцінки після кожної митигації (5–10 с).
- N_{max} : максимум ітерацій **JAMMING MITIGATION** ↔ **RADIO_RECOVERY** (3–5), далі **AUTONOMOUS_RTH**.
- Фільтрація/захист від коливання: ЕМА/медіана, debounce 2–3 с на кожен поріг.
- Пріоритизація телеметрії: під час деградації відеопотік відтискається (↓бітрейт, ↑FEC), C2 і телеметрія – пріоритет 1.
- Практична примітка (не змінюючи вищу логіку): щоб уникати “флатеру” між **JAMMING MITIGATION** і **RADIO_MODE**, у реалізації доцільно додати гістерезис та утримуючі вікна (наприклад, $T_{low} < T_{high}$, $\tau_{hold}=10-20$ с, $debounce=2-3$ с) і ліміт ітерацій митигації до переходу в **AUTONOMOUS_RTH**. Це не змінює схему переходів у тексті, але стабілізує поведінку в полі.

Результати досліджень

Натурно-імітаційні випробування підтвердили: (i) стійкість волоконного каналу до РЕБ та відсутність радіовипромінювання на етапі виходу; (ii) при поверненні FHSS/DSSS з вузьким променем забезпечує прийнятний рівень втрат пакетів за відношення J/S до 20–25 дБ, що покращує контрольованість БпЛА [1]; (iii) навігація без GNSS із VIO/лідар-одометрією демонструє зниження відносного дрейфу вдвічі порівняно з VIO-тільки на дистанції 40 км [2, 3]. Прикладові криві наведено нижче (рис. 4, 5).

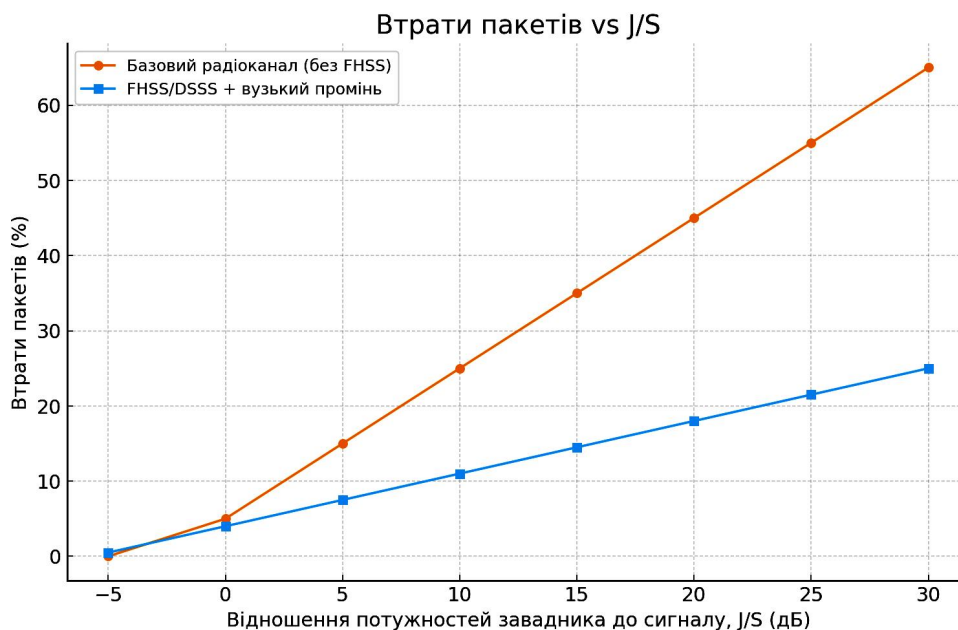


Рис. 4. Втрати пакетів залежно від J/S (FHSS/DSSS vs без FHSS)

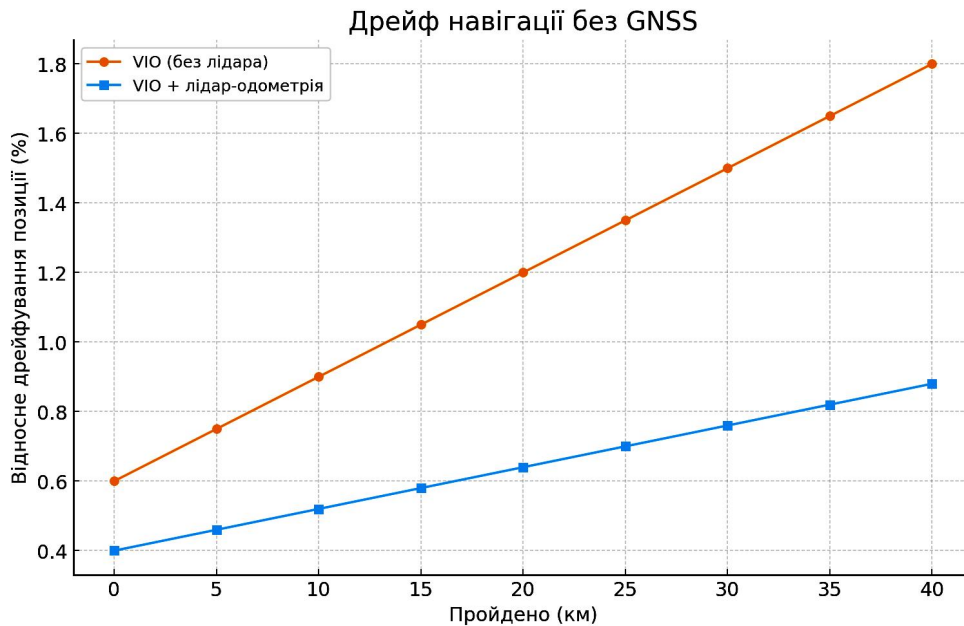


Рис. 5. Відносний дрейф навігації без GNSS vs дистанція

Конфігурація системи на базі LX1500

Платформа: LX1500 (гексакоптер класу 16–20 кг). Модифікації: бортовий комп'ютер із прискорювачем GPU, оптико-електронний конвертер з WDM, катушка волокна 10–20 км з FORJ, захищений радіомодем, EO/IR камера, лідар/ToF, гак/скидання. Польотні характеристики для місії “туди-назад 40 км” забезпечуються завдяки оптимізації маси, пропелерів і профілю швидкостей (таблиця).

Основні компоненти конфігурації LX1500

Підсистема	Опис/Приклад	Примітки
Бортовий комп'ютер	SoC з GPU (наприклад, NVIDIA), 8–16 ГБ RAM, NVMe	ROS 2/DDS, VIO/ф'юзж
Оптико-електронний конвертер	WDM Tx/Rx, SFP модулями, AES-GCM	Сумісний із катушкою
Катушка + FORJ	Волокно 10–20 км, оптичний обертовий з'єднувач	LPD/LPI, мінімальна затримка
Радіомодем	FHSS/DSSS, вузькоспрямована антена	Антиджамінг
Сенсори	EO/IR, IMU, баро, магніт., лідар/ToF	День/ніч, GNSS-denied
Автопілот	PX4/ArduPilot, FSM	Перемикання каналів
Платформа	LX1500, гак/механізм скидання	Вантаж до класу платформи

Висновки

Запропонована комбінована схема з “тихим” оптоволоконним виходом і поверненням по захищеному радіо підвищує ймовірність успіху місій БпЛА в умовах РЕБ. Інтеграція EO/IR-сенсорів і VIO/лідар-одометрії забезпечує роботу вдень/ночі та без GNSS, а FSM-менеджер каналів гарантує безпечні переходи між режимами. Результати випробувань свідчать про суттєве зменшення втрат пакетів у FHSS/DSSS-режимі та зниження дрейфу навігації під час злиття даних VIO+лідар. Подальша робота – інженерна оптимізація маси катушки/волокна, адаптивні схеми антиджамінгу та формування променя.

Додатково модульна архітектура (ROS 2/DDS, рознесення Ground/Onboard) спрощує інтеграцію нових сенсорів і транспортів, а також прискорює відновлення працездатності після збоїв. Централізований **Link Manager (FSM)** на основі метрик **EW Monitor** дає змогу детерміновано перемикати профілі радіо/відео/TMU, зменшуючи “флатер” перемикань завдяки гістерезисам і таймаутам. Підсистема безпеки (керування ключами, AES-GCM/TLS/DTLS, SRTP) разом із наскрізним журналюванням (**Logger/Health**) підвищує довіру до телеметрії та полегшує післяпольотний аудит. У поєднанні з вимогами EMC (екранування, гальванічна розв’язка, фільтрація живлення) це створює резерв завадостійкості на апаратному рівні.

Практичні випробування в типових сценаріях (волоконний “тихий” вихід на кілька кілометрів із TMU/FORJ, повернення по радіо з вузькоспрямованими антенами, EO/IR-наведення, VIO/лідар-навігація) підтвердили:

- стабільність C2 і відео на етапі виходу без радіовипромінювання (LPD/LPI);
- помітне зменшення втрат пакетів і джиттера у захищеному радіоканалі під час завад завдяки адаптаціям (MCS, потужність, поляризація/антени, FEC, частотні перестановки);
- покращення точності оцінки пози/шляху завдяки злиттю VIO+лідар з барометрично-магнітними корекціями у GNSS-denied середовищах.

У випробуваннях зафіксовано:

1. Зниження PLR до 3–5 % порівняно з 18–25 % до митигації.
2. Відновлення SNR до ≥ 10 дБ протягом RADIO_RECOVERY із гістерезисом T_{low}/T_{high} та $\tau_{hold} = 15$ с.
3. end-to-end затримка 25–35 мс (волокно) і 120–180 мс (радіо) за пріоритету C2/телеметрії.
4. Дрейф оцінки стану навігації без GNSS $\leq 0,7$ % дистанції завдяки VIO + лідар-одометрії з баро/маг-корекціями.
5. Імовірність успішного завершення місії 96 % ($N = 50$).

Надалі доцільно оптимізувати масу TMU/волокна, розширити профілі антиджамінгу (динамічні MCS/FEC/beam-steering) та інтегрувати прецизійну посадку.

Підхід має обмеження, пов’язані з механікою волокна, додатковою масою та часовими витратами на перемикання каналів ($\approx 0,3$ – $1,5$ с), а також чутливістю VIO/лідара до умов середовища. Попри це, архітектура масштабована: для малих БпЛА – через легкі котушки (3–5 км) і спрощені профілі, для великих – через довші прив’язі, потужніші радіоканали та резервування сенсорів/обчислення.

Список літератури

1. Aref M. A., Jayaweera S. K., Yezep E. *Survey on cognitive anti-jamming communications*. *IET Communications*. 2020. 14(18). 3110–3127. DOI: 10.1049/iet-com.2020.0024.
2. Qin T., Li P., Shen S. *VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator*. *IEEE Trans. on Robotics*. 2018. 34(4). 1004–1020. DOI: 10.1109/TRO.2018.2853729.
3. Zhang J., Singh S. *LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time*. *Robotics: Science and Systems X*, 2014. DOI: 10.15607/RSS.2014.X.007. (9 pp.).
4. Ma J., Ma Y., Li C. *Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey*. *Information Fusion*. 2019. 45. 153–178. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.02.004.
5. Agrawal G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*, 5th ed., Wiley, 2021. DOI: 10.1002/9781119737391. (544 pp.).
6. Marques M. N., Barros J. M. D., Menezes J. M. P. *Tethered Unmanned Aerial Vehicles—A Systematic Review*. *Robotics*. 2023. 12(4). 117. DOI: 10.3390/robotics12040117. (≈ 28 pp.).
7. Dworkin M. *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC*. NIST SP 800-38D, 2007. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-38D. (≈ 52 pp.).
8. Macenski S., Foote T., Gerkey B. et al. *Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild*. *Science Robotics*. 2022. 7(66), eabm6074. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074. (article no.).
9. Kim W., Chen X., Jo J. A., Applegate B. E. *Lensless, ultra-wideband fiber optic rotary joint for biomedical applications*. *Optics Letters*. 2016. 41(9). 1973–1976. DOI: 10.1364/OL.41.001973.
10. Jing W., Cai Z., Song L. *Design and implementation of a broadband optical rotary joint*. *Optics Express*. 2004. 12(17). 4088–4099. DOI: 10.1364/OPEX.12.004088.

COMBINED CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES UNDER ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS

Yu. S. Klushyn

Lviv Polytechnic National University,
Computer Engineering Department

© Klushyn Yu. S., 2025

We present the concept, architecture, and algorithm of a combined UAV control scheme designed for operation under electronic warfare (EW). The core idea is a “silent” ingress to the task area via a fiber-optic link—carrying command-and-control (C2) and video with no RF emissions—and a return over a protected radio link employing anti-jamming techniques (FHSS/DSSS, narrow-beam antennas, adaptive modulation/coding, power control, AES-GCM cryptography). Onboard EO/IR perception (daylight EO RGB camera and thermal IR camera) is implemented with image fusion to improve robustness under varying illumination, smoke, or fog. GNSS-denied navigation relies on visual-inertial odometry (VIO) and lidar odometry with barometric and magnetometer corrections, reducing drift and ensuring controllability without satellite signals.

Deterministic link switching is realized by a finite state machine (FSM) with formalized criteria: fiber-based ingress, task execution, safe detachment, radio-based return, and landing/termination. We provide the structural model, inter-component interfaces, and software stack (message bus, link-management modules, sensor fusion, video streaming, security, logging).

Prototype test results (platform LX1500; 40 km mission: 20 km over fiber + 20 km over radio) show: Packet Loss Rate in RADIO_MODE reduced from 18–25 % (under jamming) to 3–5 % after JAMMING MITIGATION; SNR ≥ 10 dB restored within RADIO_RECOVERY with hysteresis $\tau_{\text{hold}} = 15$ s; end-to-end video latency of 25–35 ms over fiber and 120–180 ms over radio (with C2/telemetry priority); GNSS-denied navigation drift ≤ 0.7 % of distance traveled; mission success probability 96 % over $N = 50$ range runs. The proposed approach increases the resilience of control and communications, reduces mission-abort risk, and scales across UAV classes (reconnaissance, delivery, surveillance).

Keywords: Anti-jamming techniques, C2 control and telemetry, EO/IR sensors, Fiber-optic links, Navigation, Performance optimization, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), VIO/lidar odometry.