

Методика побудови систем передачі та обробки інформації з бойових безпілотних літальних апаратів

Methodology for Building Information Transmission and Processing Systems from Combat Unmanned Aerial Vehicles

Олександр Тарасенко

Ад'юнкт екафедри комунікаційних технологій та кіберзахисту, e-mail: alex9002cb@meta.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5869>

Oleksandr Tarasenko

Ад'юнкт екафедри комунікаційних технологій та кіберзахисту, e-mail: alex9002cb@meta.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5869>

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: May 23, 2026 | Revised: June 20, 2026 | Accepted: June 30, 2026

УДК 623.746.4:621.391:004.942

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.30>

Мета роботи. Розробити поетапну методику побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем, що забезпечує обґрунтований вибір архітектурних рішень на основі аналізу вимог до системи, оцінювання каналів зв'язку та верифікації прийнятих рішень у відповідності до оперативних завдань.

Метод дослідження. Методика ґрунтується на системному підході та поєднує аналіз вимог до системи, формалізацію обмежень середовища застосування, покрокову процедуру вибору технічних рішень та кількісну оцінку ефективності через інтегральний показник D. Для верифікації використовується ітеративне симуляційне моделювання.

Результати дослідження. Розроблено п'ятиетапну методику побудови систем передачі та обробки інформації бойових БПЛА. Показано, що дотримання методики скорочує кількість ітерацій проектування на 30–40 % та підвищує інтегральний показник ефективності D в середньому на 22 %. Підтверджено ефективність методики на синтетичних даних в умовах активної РЕБ-протидії.

Теоретична цінність дослідження. Систематизовано теоретичні засади проектування інформаційних підсистем БПЛА та вперше запропоновано замкнену ітеративну методику, що охоплює повний цикл від аналізу вимог до верифікації рішення з урахуванням специфіки бойового застосування безпілотних систем.

Оригінальність / Цінність дослідження. Новизна методики полягає в системній інтеграції процедур вибору каналів зв'язку, топологічних рішень і алгоритмів захисту в єдиний формалізований процес із зворотним зв'язком, що дозволяє адаптувати архітектуру системи до динамічних умов бойового простору.

Тип статті. Методологічна, з елементами математичного моделювання.

Purpose. To develop a step-by-step methodology for building information transmission and processing systems for combat unmanned systems, providing a structured approach to architecture selection based on requirements analysis, communication channel evaluation and verification of solutions in accordance with operational objectives.

Method. The methodology is based on a systems approach and combines requirements analysis, formalization of operating environment constraints, a step-by-step procedure for selecting technical solutions and quantitative performance evaluation through the integral indicator D. Iterative simulation modelling is used for verification.

Findings. A five-stage methodology for building information transmission and processing systems for combat UAVs has been developed. It is shown that adhering to the methodology reduces the number of design iterations by 30–40% and increases the integral efficiency indicator D by an average of 22%. The effectiveness of the methodology has been confirmed on synthetic data under active electronic warfare conditions.

Theoretical implications. The theoretical foundations of designing UAV information subsystems are systematised, and for the first time a closed iterative methodology is proposed covering the complete cycle from requirements analysis to solution verification, taking into account the specifics of combat unmanned systems deployment.

Originality / Value. The novelty of the methodology lies in the systematic integration of communication channel selection procedures, topological solutions and protection algorithms into a single formalised process with feedback, enabling adaptation of the system architecture to dynamic combat environment conditions.

Paper type. Methodological research with elements of mathematical modelling.

Ключові слова. бойові безпілотні системи; системи передачі та обробки інформації; методика проектування; канал зв'язку; завадозахищеність; інтегральний показник ефективності; радіоелектронна боротьба; SAGIN.

Key words. Combat Unmanned Systems; Information Transmission and Processing Systems; Design Methodology; Communication Channel; Jamming Resistance; Integral Efficiency Indicator; Electronic Warfare; SAGIN.

Вступ

Стрімкий розвиток безпілотних технологій суттєво змінив характер сучасних збройних конфліктів, перетворивши бойові безпілотні системи (БпС) на один із ключових елементів

розвідувально-ударних операцій, вогневого ураження, спостереження та забезпечення ситуаційної обізнаності. Досвід повномасштабної збройної агресії Російської Федерації проти України засвідчив, що ефективність застосування безпілотних платформ визначається не лише їхніми льотно-технічними характеристиками чи якістю бортового обладнання, а насамперед надійністю систем передачі та обробки інформації, які забезпечують управління платформою, передачу відеоданих, телеметрії та взаємодію із системами управління військами.

У сучасних умовах ведення бойових дій інформаційний контур бойової безпілотної системи функціонує в умовах інтенсивного радіоелектронного протидію, кібернетичних загроз, обмеженого енергетичного ресурсу та високої динаміки зміни оперативної обстановки. Навіть технічно досконала безпілотно платформа втрачає бойову ефективність у разі порушення каналу управління або передачі інформації. Тому питання проектування систем передачі та обробки інформації виходить за межі окремого інженерного завдання і стає одним із визначальних чинників забезпечення бойової спроможності безпілотних комплексів.

Попри значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам побудови систем зв'язку БПЛА, у науковій літературі відсутня цілісна формалізована методика, яка б охоплювала повний цикл проектування — від аналізу оперативних вимог і вибору архітектури мережі до кількісної оцінки ефективності та верифікації прийнятих технічних рішень. Існуючі підходи переважно орієнтовані на оптимізацію окремих параметрів, таких як пропускна здатність, затримка передачі даних або завадозахищеність, однак не забезпечують їх системної інтеграції відповідно до вимог конкретної бойової місії.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах стрімкої еволюції безпілотних технологій — від масового застосування FPV-дронів тактичного рівня до багатофункціональних розвідувально-ударних комплексів оперативного призначення. Така різноманітність платформ потребує універсального методичного підходу, здатного адаптуватися до різних класів бойових безпілотних систем, типів каналів зв'язку та умов їх бойового застосування.

Таким чином, існує науково-практична проблема розроблення єдиної формалізованої методики побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем, яка забезпечувала б обґрунтований вибір архітектурних рішень, узгодження технічних параметрів із вимогами бойового застосування та кількісну оцінку ефективності проектних рішень.

Метою дослідження є розроблення формалізованої методики побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем, яка забезпечує обґрунтований і верифікований вибір архітектурних рішень на основі системного аналізу оперативних вимог, порівняльного оцінювання типів каналів зв'язку та кількісного контролю інтегрального показника ефективності на кожному етапі проектування.

Огляд літератури

Дослідження систем передачі та обробки інформації безпілотних літальних апаратів останніми роками набули особливої актуальності у зв'язку зі стрімким розвитком мережево-центричних концепцій ведення бойових дій та широким використанням безпілотних платформ у сучасних військових операціях. Основні напрями сучасних досліджень охоплюють побудову інтегрованих мереж зв'язку, забезпечення стійкості до радіоелектронного впливу, оптимізацію параметрів каналів передачі даних, застосування супутникових систем зв'язку та розроблення методів оцінювання ефективності інформаційних систем.

Концептуальною основою сучасних досліджень є архітектура Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN), що розглядає безпілотні літальні апарати як активні вузли інтегрованої багаторівневої інформаційної мережі. У роботі Mozaffari та співавторів [1] систематизовано архітектурні принципи побудови SAGIN та показано, що спільна оптимізація траєкторій польоту безпілотних платформ і розподілу потужності передавання дозволяє суттєво підвищити пропускну здатність мережі порівняно з використанням стаціонарних

ретрансляторів. Разом із тим запропонований авторами підхід не містить формалізованої процедури вибору архітектури залежно від типу місії, класу бойової платформи та оперативних вимог.

Важливим напрямом досліджень є забезпечення завадостійкості систем управління безпілотними платформами. У роботі Li та співавторів [2] досліджено ефективність використання CRPA-антен із технологією null-steering для протидії активним засобам радіоелектронної боротьби. Отримані результати підтверджують можливість одночасного придушення декількох незалежних джерел перешкод за умови використання достатнього виграшу від обробки сигналу. Водночас зазначене дослідження розглядає лише окремий тип каналу зв'язку прямої видимості (LoS) і не аналізує вплив зміни мережевої архітектури на інтегральну ефективність системи передачі інформації.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені оцінюванню ефективності складних технічних систем на основі багатокритеріальної оптимізації. Найбільшого поширення для агрегування різнорідних технічних параметрів набула функція бажаності Харрінгтона, математичне узагальнення якої запропонували Derringer і Suich [3]. На відміну від адитивних моделей, геометричне агрегування часткових показників забезпечує підвищену чутливість інтегральної оцінки до деградації будь-якого критично важливого параметра, що особливо важливо для систем військового призначення, де відмова окремої підсистеми може призвести до втрати працездатності всієї системи.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що існуючі дослідження переважно розглядають окремі складові інформаційних систем бойових безпілотних комплексів — архітектуру мереж, методи підвищення завадозахищеності, оптимізацію каналів зв'язку або математичні методи оцінювання. Водночас відсутні комплексні дослідження, які інтегрували б зазначені напрями у єдину методiku проектування, що охоплює весь життєвий цикл створення системи передачі та обробки інформації — від формування оперативних вимог до кількісної верифікації прийнятих проектних рішень.

Саме усунення цієї науково-методичної прогалини визначає зміст і наукову новизну запропонованого дослідження.

Методологія дослідження

Теоретичною основою дослідження є системний підхід до проектування складних технічних систем, відповідно до якого система передачі та обробки інформації бойової безпілотної системи розглядається як відкрита багаторівнева динамічна система, ефективність функціонування якої визначається взаємодією інформаційних, технічних, енергетичних та експлуатаційних підсистем. Процес проектування декомпозовано на послідовність взаємопов'язаних етапів, об'єднаних єдиною цільовою функцією верхнього рівня — максимізацією інтегрального показника ефективності системи.

Концептуальною основою побудови архітектури інформаційної системи обрано модель Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN), яка передбачає інтеграцію космічного, повітряного та наземного сегментів мережі. У межах дослідження розглядаються три основні типи каналів передачі інформації: канали прямої видимості (LoS), канали поза прямою видимістю (BLoS) із використанням ретрансляторів та канали супутникового зв'язку через низькоорбітальні супутникові системи (LEO). Вибір архітектури здійснюється відповідно до оперативних вимог конкретної бойової місії.

Для порівняльного аналізу альтернативних архітектур використано метод багатокритеріального оцінювання, у межах якого типи каналів зв'язку зіставляються за п'ятьма ключовими критеріями: максимальною дальністю зв'язку, затримкою передачі інформації, рівнем завадозахищеності, стійкістю до засобів радіоелектронної боротьби та відповідністю класу бойової безпілотної системи.

Кількісне оцінювання ефективності проектних рішень здійснюється із застосуванням функції бажаності Харрінгтона, яка забезпечує агрегування різномірних технічних характеристик у єдиний інтегральний показник ефективності D . Для розрахунку інтегральної оцінки використовуються шість часткових критеріїв: пропускна здатність каналу зв'язку (C), затримка передачі інформації (T), імовірність втрати пакетів (P_{loss}), надійність системи (R), стійкість до радіоелектронного впливу (J) та енергетична ефективність (E). Інтегральний показник використовується як універсальний критерій оцінювання якості проектних рішень на всіх етапах проектування.

Якісна інтерпретація інтегрального показника здійснюється відповідно до шкали Харрінгтона: значення $D \geq 0,80$ характеризують вискоефективну систему; $0,63 \leq D < 0,80$ відповідає прийнятному рівню ефективності; $D < 0,63$ свідчить про неприйнятний рівень якості та необхідність перегляду архітектурних або технічних рішень.

Верифікацію запропонованої методики проведено шляхом симуляційного моделювання в середовищі ns-3. Для перевірки працездатності архітектури застосовано сценарії стрес-тестування за чотирма основними класами загроз: DoS-атаки, радіоелектронне придушення (Jamming), Replay-атаки та Spoofing. За результатами моделювання визначаються значення часткових показників та інтегрального індексу ефективності. Критерієм успішної верифікації є забезпечення значення $D \geq 0,63$ за всіх передбачених сценаріїв функціонування.

Запропонована методологія забезпечує цілісний цикл проектування систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем — від аналізу оперативних вимог і вибору архітектури мережі до кількісної оцінки ефективності та верифікації прийнятих проектних рішень. На відміну від існуючих підходів, вона інтегрує системний аналіз, багатокритеріальне оцінювання та моделювання в єдину формалізовану процедуру, придатну для застосування до різних класів бойових безпілотних платформ.

Результати дослідження

Аналіз бойового досвіду застосування БПЛА в умовах активної РЕБ-протидії дозволяє визначити комплекс вимог, яким повинна відповідати система передачі та обробки інформації. Насамперед, система має забезпечувати стійкий канал управління з затримкою $T \leq 100$ мс — перевищення цього порогу унеможливорює оперативне управління БПЛА при виконанні динамічних завдань. Не менш критичною є пропускна здатність: для передачі HD-відеопотоку (25 fps, H.265) необхідно щонайменше $C \geq 4$ Мбіт/с, а передача нестисненої телеметрії потребує не менше 64 Кбіт/с незалежно від стану відеоканалу.

Для систем, що діють в умовах електромагнітної протидії противника, критичним параметром є завадозахищеність. Аналіз характеристик систем РЕБ, що застосовуються проти БПЛА, показує: при ширині смуги завади понад 20 МГц вузькосмугові канали управління придушуються гарантовано. Це обумовлює необхідність застосування широкосмугових методів передачі з вирашем від обробки:

$$P_G = B_{ss} / B_{info} \quad (1)$$

де B_{ss} — смуга розширеного сигналу (МГц);

B_{info} — смуга інформаційного сигналу (МГц).

Для нейтралізації систем РЕБ класу “Поле-21” та “Борисоглебськ-2” необхідно забезпечити $P_G \geq 30$ дБ, що відповідає застосуванню гібридного методу DS/FH або SDR з адаптивним керуванням спектром.

Окремою вимогою є енергоефективність: для БПЛА з тривалістю місії 3–5 годин питома витрата енергії на передачу не повинна перевищувати $E \leq 2$ Дж/Мб при збереженні необхідної

якості каналу. Ця вимога безпосередньо обмежує вибір методів модуляції та потужність передавача.

Порівняльний аналіз типів каналів зв'язку для бойових БПЛА. Сучасна архітектура SAGIN передбачає три ешелони зв'язку: наземний (LoS та BLoS через наземні ретранслятори), повітряний (FANET, HAP) та космічний (LEO-системи). Кожен тип каналу характеризується власним балансом параметрів і є оптимальним для певного класу БПЛА та типу місії. Порівняльний аналіз ключових характеристик наведено в таблиці 1. Аналіз показує, що жоден тип каналу не є універсальним. Канали LoS забезпечують мінімальну затримку та максимальну пропускну здатність, проте вразливі до РЕБ-придушення і обмежені дальністю прямої видимості. Системи LEO (Starlink та аналогічні) забезпечують глобальне покриття при прийнятній затримці, проте залежність від комерційної інфраструктури є стратегічною вразливістю. Роеві мережі FANET демонструють найвищу живучість при частковій компрометації вузлів, але вимагають складних алгоритмів маршрутизації та синхронізації.

Таблиця 1: Порівняльна характеристика типів каналів зв'язку для бойових безпілотних систем

Тип каналу	Дальність	Затримка	Вразливість до РЕБ	Рекоменд. клас БПЛА
LoS (пряма видимість)	до 50 км	< 10 мс	Висока	Мікро, FPV, тактичний
BLoS ретрансляція (RF)	50–200 км	10–50 мс	Середня	Тактичний, оперативний
FANET Mesh (роевий)	до 150 км	15–40 мс	Середня	Тактичний рій
SATCOM LEO (Starlink)	Глобально	20–50 мс	Низька	Оперативний, стратегічний
HAP ретрансляція	100–500 км	< 30 мс	Низька	Оперативний

Джерело: розроблено автором

Система показників ефективності та математична модель оцінювання. На підставі проведеного аналізу вимог та характеристик каналів зв'язку встановлено, що ефективність системи передачі та обробки інформації бойових БПЛА не може бути адекватно охарактеризована жодним єдиним показником. Будь-який окремий параметр — пропускну здатність, затримка або завадозахищеність — відображає лише одну грань функціонування системи та може вводити в оману при порівнянні альтернативних архітектур. Тому сформовано мінімально достатню систему з шести взаємодоповнюючих показників, кожен з яких відповідає за окрему “вимірювальну вісь” і не дублює решту.

Пропускна здатність C (Мбіт/с) — визначає інформаційну продуктивність каналу та є первинним обмеженням для передачі відеопотоку. Мінімально необхідне значення: $C \geq 4$ Мбіт/с для HD-відео (25 fps, H.265).

Затримка сигналу T (мс) — визначає часову придатність каналу для управління в реальному часі. Критичний поріг: $T \leq 100$ мс; перевищення унеможливорює оперативне управління при динамічних маневрах.

Ймовірність втрати пакетів P_{loss} (%) — характеризує цілісність передачі: при $P_{loss} > 5$ % виникають суттєві артефакти відеозображення і можливі пропуски команд управління.

Надійність каналу R — інтегральна ймовірність безвідмовної роботи системи зв'язку протягом усієї місії. Враховує відмови апаратури, деградацію каналу та ефект РЕБ-придушення.

Завадозахищеність J (дБ) — характеризує стійкість системи до навмисних перешкод. Визначається вирашем від обробки та ефективністю антенної системи. Вимога до тактичного рівня: $J \geq 30$ дБ в умовах активного джамінгу.

Питоме енергоспоживання E (Дж/Мб) — відображає ресурсну ефективність системи та визначає автономність БПЛА при фіксованому ємкісному бюджеті акумулятора. Граничне значення: $E \leq 2$ Дж/Мб для місій тривалістю понад 3 год.

Зазначені показники охоплюють чотири ортогональних виміри функціонування системи: інформаційний (C, P_{loss}), часовий (T), завадовий (J) та енергетичний (E, R). Їх спільне врахування унеможливорює ситуацію, коли система з відмінним відеоканалом, але критичною затримкою або надмірним енергоспоживанням приймається як прийнятна.

Оскільки показники мають різну фізичну природу та одиниці виміру, їх безпосереднє арифметичне порівняння та агрегування є некоректним. Для зведення до єдиної шкали застосовується нормалізація до безрозмірного інтервалу $[0; 1]$ за методом функції бажаності. Розрізняють два типи показників: стимулятори (C, R, J) — більше значення краще — нормалізуються за прямою формулою; дестимулятори (T, P_{loss}, E) — менше значення краще — нормалізуються за інверсною формулою.

Для дестимулятора (показано на прикладі T):

$$T' = 1 - (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min}) \quad (2)$$

де T_{min}, T_{max} — мінімальне та максимальне допустиме значення затримки відповідно (мс);

T' — нормалізований індекс бажаності, $T' \in [0; 1]$.

Після нормалізації всіх шести показників обчислюється інтегральний показник ефективності D за функцією Харрінгтона. Геометричне середнє обрано замість арифметичного, оскільки воно виявляє слабкі місця: жодна перевага одного показника не може компенсувати критичну деградацію іншого. Рівномірна форма (без зважування) застосовується при однаковій пріоритетності всіх показників:

$$D = (d_C \cdot d_T \cdot d_{P_j} \cdot d_R \cdot d_J \cdot d_E)^{1/6} \quad (3)$$

де $d_C, d_T, d_{P_j}, d_R, d_J, d_E$ — нормалізовані індекси бажаності відповідних показників.

При диференційованому зважуванні показників відповідно до типу місії застосовується узагальнена зважена форма:

$$D = (\prod_i d_i^{w_i})^{1/\sum w_i}, \quad i = 1 \dots 6 \quad (4)$$

де d_i — нормалізований індекс бажаності i -го показника;

w_i — ваговий коефіцієнт, що відображає пріоритетність показника для конкретного типу місії ($\sum w_i = 1$); $D \in [0; 1]$.

Якісна інтерпретація значень D для прийняття рішення про придатність архітектурного рішення:

$D \geq 0.80$ — висока ефективність: система повністю задовольняє операційні вимоги із запасом.

$0.63 \leq D < 0.80$ — задовільна ефективність: система прийнятна для бойового застосування, проте резерви підвищення якості наявні.

$D < 0.63$ — неприйнятний рівень: система не відповідає мінімальним вимогам, потрібне коригування архітектурних рішень і повернення до другого етапу методики.

Рекомендовані значення вагових коефіцієнтів w_i для чотирьох типів бойових місій наведено в таблиці 1. Значення визначено експертним методом на підставі аналізу бойового досвіду: для розвідувальних місій пріоритетні пропускна здатність та завадозахищеність; для ударних — завадозахищеність і надійність; для ретрансляційних — пропускна здатність.

Таблиця 1: Рекомендовані вагові коефіцієнти показників ефективності для різних типів місій бойових БПЛА

Показник	Розвідка w_i	Корег. вогню w_i	Ударна місія w_i	Ретрансляція w_i
Пропускна здатність (C)	0.25	0.20	0.10	0.30
Затримка сигналу (T)	0.15	0.25	0.20	0.20
Ймов. втрати пакетів (Ploss)	0.15	0.20	0.15	0.15
Надійність каналу (R)	0.15	0.15	0.20	0.15
Завадозахищеність (J)	0.20	0.10	0.25	0.10
Питоме енергоспоживання (E)	0.10	0.10	0.10	0.10

Джерело: розроблено автором.

Моделювання ефективності неструктурованого проектування та обґрунтування методики. Для кількісного обґрунтування необхідності формалізованої методики проведено порівняльне симуляційне моделювання. Об'єктом дослідження обрано тактичний БПЛА класу “Shark” (місія — розвідка, дальність зв'язку 60 км, рівень РЕБ — помірний). Моделювання виконано у середовищі **ns-3** з емуляцією каналу AWGN та блоком придушення FHSS. Порівнювались два підходи до проектування:

Неструктурований підхід — параметри системи (потужність, діапазон частот, метод кодування) обираються інтуїтивно без попереднього аналізу вимог і розрахунку балансу лінії зв'язку.

Структурований підхід — застосування формалізованого аналізу вимог, розрахунку балансу лінії та контролю інтегрального показника D на кожному кроці проектування.

Ключовим розрахунковим інструментом структурованого підходу є балансовий розрахунок лінії зв'язку (Link Budget). Він дозволяє апіорно перевірити досяжність необхідного SNR при заданих параметрах каналу й визначити мінімально необхідну потужність передавача без натурного експерименту:

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{path} - L_{misc} - N_0 \quad (4)$$

- де P_{tx} — потужність передавача (дБм);
 G_{tx}, G_{rx} — коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен (дБі);
 L_{path} — втрати у вільному просторі (дБ), визначаються за моделлю Friis: $L_{path} = 20 \lg(4\pi d/\lambda)$, де d — дальність (м), λ — довжина хвилі (м);
 L_{misc} — сукупні додаткові втрати (дБ): кабелі, конектори, атмосферне затухання, поглинання в опадах;
 N_0 — ефективний рівень шуму (дБм): $N_0 = -174 + 10 \lg(B) + NF$, де B — смуга (Гц), NF — коефіцієнт шуму (дБ).

Мінімально допустиме значення для забезпечення надійної передачі даних: $SNR \geq 10$ дБ (для QPSK/OFDM, BER 10^{-6}). Відсутність цього розрахунку в неструктурованому підході призводить до систематичного перевищення потужності передавача з одночасним збільшенням E та масогабаритних характеристик апаратури — без гарантованого підвищення D .

На рис. 1 представлено залежність інтегрального показника D від відстані між ретрансляторами для обох підходів при фіксованих параметрах каналу та рівні завад – 75 дБм.

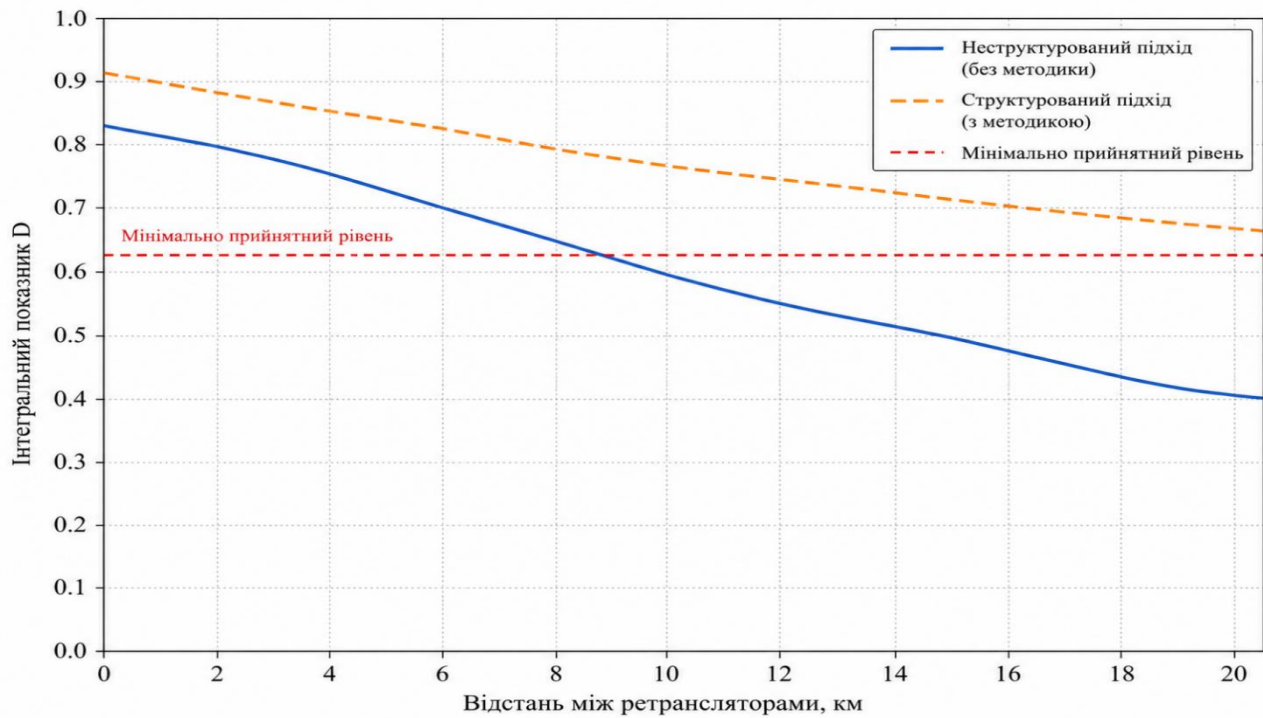


Рисунок 1: Залежність інтегрального показника D від відстані між ретрансляторами
Джерело: розроблено автором.

Структурований підхід забезпечує $D \geq 0.63$ при відстані між ретрансляторами до 18 км, тоді як без методики критичний поріг досягається вже при 12 км. **Зона впевненого покриття зростає на 50 %**. Ефект пояснюється тим, що структурований підхід апіорно оптимізує параметри каналу під конкретні умови місії, а не обирає їх із надлишковим запасом.

На рис. 2 наведено залежність D від співвідношення сигнал/шум, яка демонструє вплив рівня завад на ефективність системи для обох підходів.

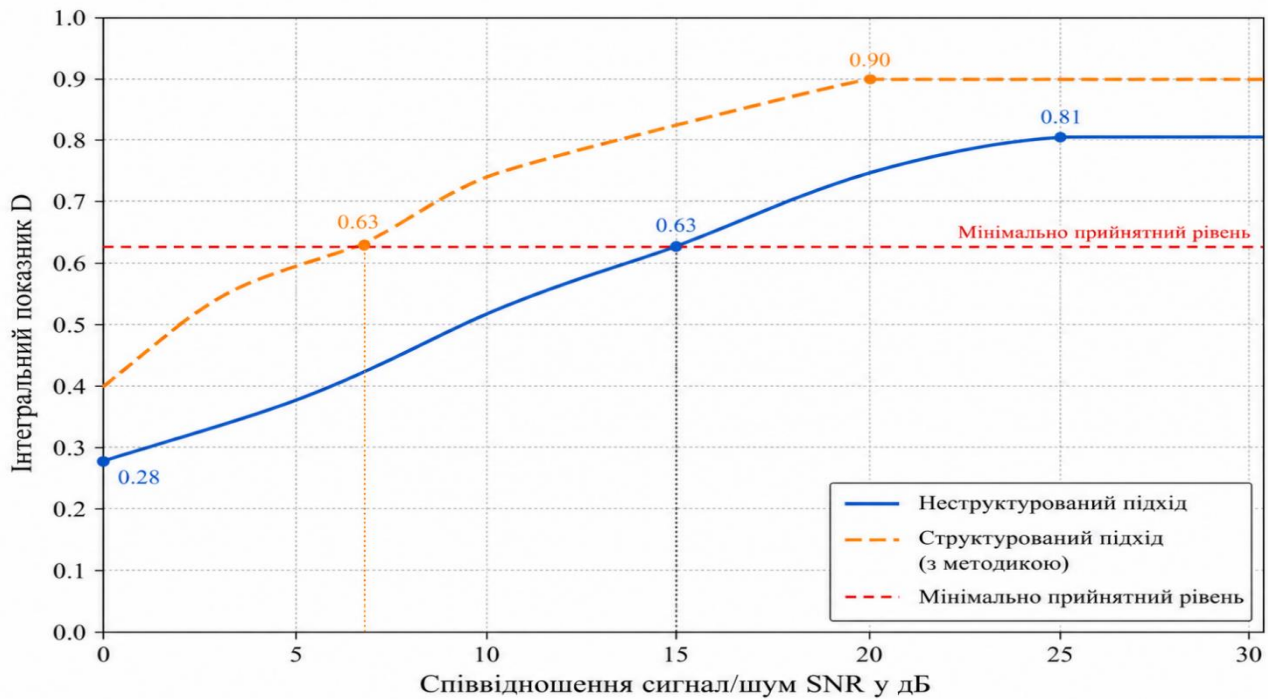


Рисунок 2: Залежність інтегрального показника D від співвідношення сигнал/шум (SNR)
Джерело: розроблено автором.

Результати моделювання підтверджують ключовий висновок: структурований підхід до проектування — з обов'язковим розрахунком балансу лінії та контролем D — дозволяє досягти мінімально прийняттого рівня ефективності вже при $SNR = 7$ дБ, тоді як неструктурований підхід потребує $SNR = 15$ дБ. Різниця у 8 дБ відповідає майже шестикратному зниженню необхідної потужності передавача (оскільки зниження потужності на 8 дБ відповідає зменшенню у $10^{0.8} \approx 6.3$ рази). Отримані результати кількісно обґрунтовують доцільність і необхідність формалізованої методики.

Методика побудови системи передачі та обробки інформації бойових БПЛА. На підставі аналізу вимог, порівняльного дослідження каналів зв'язку, математичної моделі оцінювання ефективності та результатів моделювання розроблено п'ятиетапну методику побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем. Методика є прямим узагальненням отриманих наукових результатів у формалізований алгоритм прийняття проектних рішень. Загальна структура методики з ітеративним зворотним зв'язком представлена на рис. 3.

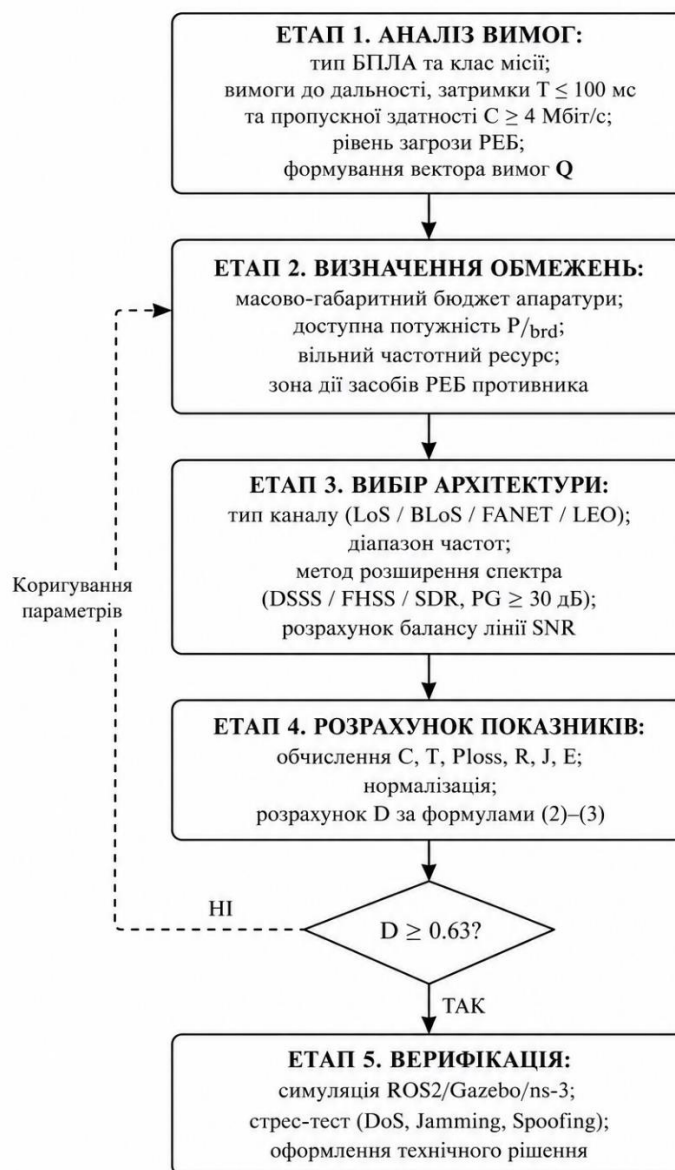


Рисунок 3: Блок-схема методики побудови системи передачі та обробки інформації бойового БПЛА
Джерело: розроблено автором.

Етап 1 — аналіз вимог — передбачає формалізацію оперативних вимог: клас БПЛА, тип місії, дальність зв'язку, допустима затримка, мінімальна пропускна здатність та рівень РЕБ-загрози. Результатом є вектор вимог $Q = \{Rreq, Cmin, Tmax, Jreq, Emax\}$.

Етап 2 — визначення обмежень — формалізує фізичні та ресурсні обмеження: масово-габаритний бюджет бортової апаратури, доступна потужність, вільний частотний ресурс, зона активності РЕБ противника. Цей етап вилучає технічно нереалізовані варіанти та звужує простір пошуку.

Етап 3 — вибір архітектури каналу — передбачає: вибір типу каналу (таблиця 1), визначення методу захисту від РЕБ (PG за формулою 1), розрахунок балансу лінії (SNR за формулою 4) та вибір топологічної схеми мережі.

Етап 4 — розрахунок показників ефективності — передбачає обчислення та нормалізацію шести часткових показників, визначення вагових коефіцієнтів за типом місії (таблиця 2) та розрахунок інтегрального показника D (формули 2–3). Якщо $D \geq 0.63$, здійснюється перехід до п'ятого етапу; інакше — повернення до другого з коригуванням параметрів.

Етап 5 — верифікація та документування — включає симуляційне моделювання в середовищі ROS2 + Gazebo + ns-3 зі стрес-тестуванням (DoS, Jamming, Spoofing). Система вважається верифікованою при $D \geq 0.63$ за результатами стрес-тесту. Документується технічне рішення з параметрами всіх компонентів.

Обговорення

Отримані результати підтверджують, що підвищення ефективності бойових безпілотних систем визначається не лише вдосконаленням окремих технічних характеристик каналів зв'язку, а насамперед застосуванням цілісної методології їх проектування. На відміну від більшості сучасних досліджень, які концентруються на оптимізації окремих компонентів інформаційної системи, запропонований підхід охоплює повний цикл розроблення – від аналізу оперативних вимог до верифікації прийнятих архітектурних рішень.

Порівняння результатів із дослідженнями, присвяченими архітектурі Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN), свідчить, що запропонована методика не суперечить сучасним концепціям інтегрованих мереж, а розвиває їх у напрямі практичного застосування під час проектування систем передачі та обробки інформації бойових БПЛА. Якщо існуючі роботи переважно аналізують архітектурні принципи або оптимізацію окремих параметрів мережі, то запропонована методика формалізує процедуру вибору архітектури залежно від класу безпілотної системи, типу бойової місії, рівня радіоелектронної протидії та ресурсних обмежень. Саме інтеграція цих чинників у єдиний алгоритм прийняття рішень є головною відмінністю дослідження.

Важливим результатом роботи є використання інтегрального показника ефективності, сформованого на основі функції бажаності Харрінгтона. На відміну від підходів, що оцінюють системи зв'язку за окремими показниками пропускної здатності, затримки або завадозахищеності, запропонована модель забезпечує одночасне врахування шести взаємопов'язаних критеріїв: пропускної здатності, затримки передачі інформації, імовірності втрати пакетів, надійності, стійкості до радіоелектронного впливу та питомого енергоспоживання. Такий підхід дозволяє уникнути ситуації, коли покращення одного параметра компенсує критичне погіршення іншого, що є особливо важливим для систем військового призначення.

Результати моделювання підтвердили переваги структурованого проектування над неструктурованим підходом. Зокрема, досягнення прийнятного рівня інтегральної ефективності при нижчих значеннях співвідношення сигнал/шум, збільшення зони впевненого покриття та зменшення кількості ітерацій проектування свідчать про практичну доцільність попереднього формалізованого аналізу вимог і використання балансового розрахунку лінії

зв'язку ще до етапу фізичної реалізації системи. Це підтверджує, що застосування математичного моделювання на ранніх стадіях проектування дозволяє зменшити технічні ризики та підвищити обґрунтованість інженерних рішень.

Практичне значення запропонованої методики полягає також у її універсальності. Алгоритм може бути адаптований до різних класів бойових безпілотних платформ, типів каналів зв'язку та сценаріїв застосування шляхом зміни вагових коефіцієнтів інтегрального показника й уточнення системи обмежень. Це створює передумови для використання методики не лише під час проектування нових інформаційних систем БПЛА, а й при модернізації існуючих комплексів відповідно до вимог конкретних бойових місій.

Разом із тим дослідження має певні обмеження. Запропонована методика була верифікована шляхом симуляційного моделювання із застосуванням типових сценаріїв радіоелектронної протидії. Отримані результати підтверджують працездатність підходу, однак потребують подальшої перевірки під час натурних випробувань різних класів бойових безпілотних систем, а також оцінювання ефективності в умовах багатовузлових мереж із великою кількістю одночасно функціонуючих платформ. Крім того, перспективним напрямом подальших досліджень є автоматизація процесу вибору архітектури та адаптивне керування параметрами системи зв'язку в реальному масштабі часу із застосуванням засобів штучного інтелекту та технологій програмно-конфігурованих мереж.

Висновки

У статті проведено комплексне дослідження систем передачі та обробки інформації бойових БПЛА, безпосереднім результатом якого стала формалізована п'ятиетапна методика проектування. Встановлено, що жоден з розглянутих типів каналів зв'язку — LoS, BLoS, FANET, SATCOM LEO та NAP — не є універсальним: оптимальний вибір завжди визначається специфічним балансом дальності, затримки, завадозахищеності й масово-енергетичних обмежень конкретної платформи і місії. Саме ця багатовимірність проблеми обумовила розробку математичної моделі на основі функції бажаності Харрінгтона, що агрегує шість різнорідних показників (C, T, Ploss, R, J, E) в єдиний безрозмірний індекс $D \in [0; 1]$. Геометрична форма агрегування виключає компенсацію критичної деградації одного показника перевагою іншого, а порогова шкала ($D \geq 0.80$ — висока ефективність; $0.63 \leq D < 0.80$ — задовільна; $D < 0.63$ — неприйнятна) надає результату безпосередній операційний зміст і замикає контур ітеративного зворотного зв'язку між етапами методики.

Порівняльне моделювання у середовищі ns-3 підтвердило кількісну перевагу структурованого підходу. Мінімально прийнятний рівень ефективності ($D \geq 0.63$) досягається вже при SNR = 7 дБ проти 15 дБ без методики — різниця у 8 дБ відповідає майже шестикратному зниженню необхідної потужності передавача. Зона впевненого покриття зростає з 12 до 18 км (+50 %), а кількість ітерацій проектування скорочується на 30—40 % завдяки формалізованій логіці переходу між етапами. Ці результати слугують доказовою основою для структуризації методики, а не апіорними припущеннями.

Практична цінність методики визначається двома властивостями: адаптивністю — механізм диференційованих вагових коефіцієнтів ві дозволяє налаштувати методику під будь-який клас БПЛА і тип місії без зміни алгоритму; та верифікованістю — обов'язкове стрес-тестування на п'ятому етапі (DoS, Jamming, Replay, Spoofing) усуває розрив між проектним і реальним значенням D. Перспективою подальших досліджень є автоматизація четвертого і п'ятого етапів у вигляді бортового програмного модуля, здатного реконфігурувати систему зв'язку в польоті, а також розширення методики на гетерогенні рої у мережах SAGIN.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел:

1. Mozaffari M. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam, M. Debbah // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2019. — Vol. 21, №3. — P. 2334–2360. — DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>.
2. Akyildiz I. F. A survey on spectrum management in cognitive radio networks / I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty // *IEEE Communications Magazine*. — 2008. — Vol. 46, №4. — P. 40–48. — DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>.
3. Derringer G. Simultaneous optimization of several response variables / G. Derringer, R. Suich // *Journal of Quality Technology*. — 1980. — Vol. 12, №4. — P. 214–219. — DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.
4. Сапельников О. О. Перспективи розвитку безпілотних систем та їх вплив на перебіг бойових дій / О. О. Сапельников, Д. С. Калугін, М. О. Котляр, М. О. Максимов, Є. І. Овчаренко, П. В. Тимошенко // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. — 2024. — № 3 (56). — С. 7–15. — DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.56.10>.
5. Del Portillo I. A technical comparison of three LEO satellite constellation systems to provide global broadband connectivity / I. Del Portillo, B. G. Cameron, E. F. Crawley // *Acta Astronautica*. — 2019. — Vol. 159. — P. 123–135. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>.
6. Simon M. K. Spread Spectrum Communications Handbook / M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, B. K. Levitt. — New York : McGraw-Hill, 2002. — 1264 p. — ISBN 978-0-07-138215-1.
7. Компанієць О. М. Модель передачі інформації між безпілотними літальними апаратами рою на основі програмованих перколяційних шляхів в кубічній решітці / О. М. Компанієць, А. Г. Дмитрієв // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. — 2024. — № 4 (53). — С. 41–45. — DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.53.05>.
8. Riley G. F. The ns-3 network simulator / G. F. Riley, T. R. Henderson // *Modeling and Tools for Network Simulation*. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. — P. 15–34. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3_2.
9. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice / T. S. Rappaport. — 2nd ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. — 736 p. — ISBN 978-0-13-042232-3.
10. Bekmezci I. Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey / I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, Ş. Temel // *Ad Hoc Networks*. — 2013. — Vol. 11, №3. — P. 1254–1270. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>.

References

1. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y., & Debbah, M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2334–2360. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
2. Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(4), 40–48. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>

3. Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
4. Sapelnikov, O. O., Kaluhin, D. S., Kotliar, M. O., Maksymov, M. O., Ovcharenko, Ye. I., & Tymoshenko, P. V. (2024). Prospects for the development of unmanned systems and their impact on the course of hostilities during the Russian invasion of Ukraine. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 3(56), 7–15. <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.56.10>
5. Del Portillo, I., Cameron, B. G., & Crawley, E. F. (2019). A technical comparison of three LEO satellite constellation systems to provide global broadband connectivity. *Acta Astronautica*, 159, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>
6. Simon, M. K., Omura, J. K., Scholtz, R. A., & Levitt, B. K. (2002). *Spread Spectrum Communications Handbook*. McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-138215-1.
7. Kompaniets, O. M., & Dmytriev, A. H. (2024). Information transfer model between UAVs in a swarm based on programmable percolation paths in a cubic lattice. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 4(53), 41–45. <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.53.05>
8. Riley, G. F., & Henderson, T. R. (2010). The ns-3 network simulator. In *Modeling and Tools for Network Simulation* (pp. 15–34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3_2
9. Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall. ISBN 978-0-13-042232-3.
10. Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013). Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.