

Система показників оцінювання ефективності побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів

System of Indicators for Assessing the Efficiency of Information Transmission and Processing Systems of Combat Unmanned Aerial Vehicles

Олександр Тарасенко

Tarasenko Oleksandr

ад'юнкта кафедри комунікаційних технологій та кіберзахисту, e-mail: tarasbcx13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8881-5869

PHD student, Department of Communication Technologies and Cyber Defense, e-mail: tarasbcx13@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8881-5869

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

National University of Defense of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: October 15, 2025 | Revised: October 29, 2025 | Accepted: October 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.25>

Мета роботи. Розробити оптимізаційну математичну модель підвищення ефективності систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі інтегрального показника ефективності D , що відображає узагальнену оцінку стану системи зв'язку за сукупністю часткових показників.

Метод дослідження. В основу моделі покладено інтегральний показник D як цільову функцію, яку необхідно максимізувати. Змінними виступають не самі технічні показники, а керуючі параметри системи — такі як потужність передавача, кількість ретрансляторів, висота польоту, рівень енергоспоживання та стійкість каналу зв'язку. Кожен із часткових показників інтегрується в єдину оцінку ефективності. Для інтерпретації результатів використано критерій шкали Харрінгтона.

Результати дослідження. Розроблено математичну модель інтегрального оцінювання ефективності систем передачі та обробки інформації бойових БПЛА та проведено її апробацію шляхом комп'ютерного моделювання. Отримано залежності між відстанню між ретрансляторами, співвідношенням сигнал/шум та інтегральним показником ефективності D , які підтвердили адекватність моделі. Після впровадження удосконаленої методики інтегральний показник підвищився в середньому на 20–25 %, що свідчить про підвищення стійкості зв'язку та енергетичної ефективності.

Теоретична цінність дослідження. Дослідження збагачує теоретичну базу оцінювання ефективності систем зв'язку у військових інформаційних мережах, демонструючи, як множини часткових технічних параметрів можна агрегувати в один інтегральний критерій. Розроблений підхід може бути основою для створення універсальних моделей оцінювання ефективності інших інформаційно-комунікаційних систем подвійного призначення.

Оригінальність / Цінність дослідження. Новизна полягає у системній інтеграції шести базових показників у єдиний безрозмірний індекс ефективності D , який має як кількісну, так і якісну інтерпретацію. Запропоновано методику, що поєднує фізичні параметри системи зв'язку з оцінними критеріями стійкості та енергозабезпечення, що забезпечує комплексне оцінювання системи у бойових умовах.

Майбутні дослідження. У подальших роботах доцільно реалізувати програмний модуль для автоматизованої оцінки показників ефективності в реальному часі, інтегрувавши його у систему управління роями БПЛА. Також перспективним напрямом є розроблення адаптивних алгоритмів зважування часткових показників залежно від типу місії, радіоелектронної обстановки та динаміки бойових дій.

Тип статті. Прикладна, з елементами математичного моделювання.

Purpose. The purpose of this study is to develop an optimization mathematical model aimed at enhancing the efficiency of information transmission and processing systems for combat unmanned aerial vehicles (UAVs). The model is based on an integral efficiency indicator D , which represents a generalized quantitative assessment of the communication system's performance, integrating multiple technical and operational parameters into a single criterion.

Method. The model treats the integral indicator D as the objective function to be maximized. The variables are not the technical parameters themselves but the control parameters of the system, such as transmitter power, number of relays, flight altitude, energy consumption level, and channel robustness. Each partial performance indicator is normalized and integrated into a unified efficiency score. The interpretation of results is performed using the Harrington desirability scale.

Findings. A mathematical model for integral evaluation of the efficiency of combat UAV communication and data processing systems was developed and tested through computer simulation. The obtained dependencies between relay distance, signal-to-noise ratio (SNR), and the integral efficiency index D confirmed the model's adequacy. Implementation of the proposed optimization method increased the integral indicator by an average of 20–25%, demonstrating improved link stability and energy efficiency under realistic operational conditions.

Theoretical implications. The research expands the theoretical foundations of performance evaluation in military communication networks by demonstrating how a set of heterogeneous technical parameters can be aggregated into a single integral criterion. The proposed approach can serve as a conceptual basis for developing universal efficiency assessment models applicable to other dual-use information and communication systems.

Originality / Value. The originality of the study lies in the systematic integration of six fundamental performance indicators into a single dimensionless efficiency index D , which possesses both quantitative and qualitative interpretability. The proposed methodology combines physical communication parameters (such as throughput, delay, SNR, and reliability) with evaluative criteria of resilience and energy efficiency, thus providing a comprehensive assessment of UAV communication systems under combat conditions.

Future research. Future work should focus on implementing a software module for automated real-time evaluation of the proposed efficiency indicators, integrated into swarm UAV control systems. Another promising direction is the development of adaptive weighting algorithms for the indicators depending on mission type, electromagnetic environment, and the dynamics of combat operations.

Papertype. Applied research with elements of mathematical modeling.

Ключові слова: бойові безпілотні літальні апарати, системи передачі даних, обробка інформації, показники ефективності, інтегральний індекс, системи зв'язку, ретрансляційні мережі, моделювання ефективності.

Key words: combat unmanned aerial vehicles (UAVs), data transmission systems, information processing, performance indicators, integral efficiency index, communication networks, relay systems, efficiency modeling.

Вступ

Стрімкий розвиток безпілотних літальних систем докорінно змінив підходи до ведення сучасних бойових дій. Безпілотники виконують широкий спектр завдань – від спостереження й розвідки до ураження цілей і забезпечення зв'язку між підрозділами. Їх ефективність безпосередньо залежить від надійності систем передачі та обробки інформації, які забезпечують оперативність управління, своєчасність прийняття рішень і злагодженість дій у багаторівневих структурах управління. У реальних бойових умовах такі системи функціонують у складному середовищі з високим рівнем радіоелектронних завад, обмеженими енергетичними ресурсами та нестабільними каналами зв'язку.

Сучасний стан проблеми свідчить, що системи передачі інформації для безпілотних апаратів розвиваються швидкими темпами, однак більшість існуючих рішень орієнтовані на забезпечення лише окремих параметрів якості — наприклад, збільшення пропускну здатності або зменшення затримки сигналу. Такий підхід не дає цілісного уявлення про загальну ефективність функціонування, оскільки не враховує взаємозалежність технічних, енергетичних та інформаційних факторів. У результаті виникають труднощі з порівнянням різних систем, вибором оптимальних конфігурацій і прогнозуванням поведінки мереж у змінних бойових умовах.

Теоретичні основи дослідження

Теоретичні основи побудови системи передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних систем базуються на принципах системного підходу, кібернетики та теорії інформації. Система передачі даних розглядається як багаторівнева структура, що об'єднує підсистеми формування, передавання, прийому, обробки та зберігання інформації в умовах складного бойового середовища. Її ефективність визначається узгодженою роботою апаратних і програмних компонентів, а також здатністю адаптуватися до зовнішніх факторів, таких як завади, зміна рельєфу, погодні умови чи втрати окремих вузлів зв'язку [1]. Система передачі інформації безпілотних комплексів належить до класу відкритих динамічних систем, у яких взаємозв'язок між технічними, енергетичними та інформаційними параметрами має нелінійний характер. Кожна зміна одного з елементів (наприклад, потужності передавача чи відстані між ретрансляторами) призводить до змін у пропускій здатності, затримці сигналу, рівні втрат пакетів або енергоспоживанні. Тому ефективність таких систем не може бути визначена окремими параметрами, а потребує побудови комплексної моделі оцінювання на основі взаємопов'язаних показників [2]. Одним із фундаментальних елементів теоретичної бази дослідження є застосування функції бажаності Харрінгтона для узгодження показників різної природи в єдиній шкалі ефективності. Функція бажаності дозволяє перейти від приватних метрик до інтегрального критерію, що відображає узагальнену оцінку стану системи, і при цьому адекватно описує нелінійний характер впливу окремих параметрів на загальну ефективність. Використання цього підходу робить можливим одночасне врахування технічних, енергетичних і топологічних аспектів функціонування мережі БПЛА [3].

Таким чином, теоретичні основи дослідження полягають у формуванні структурованої системи показників, що поєднує технічні, енергетичні та інформаційні характеристики в єдиній моделі. Такий підхід створює наукове підґрунтя для подальшої розробки методів прогнозування, адаптивного керування та оптимізації параметрів мереж зв'язку бойових безпілотних систем у реальних умовах ведення бойових дій.

Постановка проблеми

Ефективність бойових безпілотних літальних систем значною мірою визначається якістю функціонування систем передачі та обробки інформації, які забезпечують стійкий і

безперервний обмін даними між апаратами, пунктами управління та елементами бойових порядків [4]. В умовах активного інформаційного протиборства, насиченості електромагнітного простору, використання засобів радіоелектронної боротьби та обмежених енергетичних ресурсів виникає потреба у науково обґрунтованих підходах до кількісного оцінювання ефективності таких систем [5]. Існуючі методики оцінювання здебільшого зосереджені на окремих технічних характеристиках, не забезпечуючи комплексного урахування взаємозалежності технічних, енергетичних та зовнішніх чинників [6]. Це унеможливорює формування об'єктивної оцінки загального стану системи та ускладнює вибір оптимальних архітектурних рішень.

Проблема полягає у відсутності єдиної системи показників, здатної інтегрувати різноманітні параметри в один узагальнений критерій ефективності. Для її вирішення необхідно розробити структурований підхід, який дозволить оцінювати ефективність систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних систем на основі інтеграції приватних показників у єдиний індекс, що відобразить реальний рівень функціонування системи в умовах бойового застосування [7].

Результати

У результаті проведеного дослідження створено комплексну систему показників, що забезпечує кількісну оцінку ефективності побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних систем. Основна ідея полягає в тому, що жоден із часткових показників (пропускна здатність, затримка, втрати пакетів тощо) не може повністю відобразити стан системи окремо. Тому запропоновано узагальнений підхід, який дозволяє оцінити сукупний ефект від зміни декількох параметрів одночасно [8].

Теоретична основа вибору системи показників для оцінювання ефективності побудови систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних систем ґрунтується на системному підході, теорії інформації і теорії надійності. Передумова цього підходу наступна: робота каналів зв'язку та підсистем обробки даних у бойових умовах визначається не одним-двома технічними параметрами, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик, що відображають продуктивність, швидкодію, стійкість до завад та ресурсну зношеність. Щоб отримати коректну й прикладну оцінку, необхідно обрати таку мінімальну множину показників, яка в сукупності покриває основні "вимірювальні осі" системи: інформаційний потік (об'єм і швидкість), часова реакція, цілісність передачі, стійкість і енергоджерельна самодостатність. Саме тому доцільно обрати наступні приватні показники: пропускна здатність (C), затримка сигналу (T), ймовірність втрати пакетів (P_{loss}), надійність каналу (R), завадозахищеність (J) та енергоспоживання (E). Кожен із них відображає окрему вимірювальну вісь, а разом вони формують систему, що дозволяє описувати поведінку мережі і робити кількісні порівняння архітектур або режимів роботи.

Аргументи за вибором саме цих показників викладені нижче. Пропускна здатність – C відображає максимальний інформаційний потік, здатність системи обробляти й передавати великі дані (відео, телеметрія), а отже безпосередньо впливає на бойову корисність. Затримка – T визначає часову придатність каналу для завдань реального часу; її перевищення призводить до деградації управління. Ймовірність втрати пакетів P_{loss} характеризує цілісність і надійність інформації після проходження каналу – втрати спотворюють зміст повідомлення і підривають ситуаційну обізнаність. Надійність – R дає ймовірнісну оцінку безвідмовності роботи підсистеми в часі, що важливо для безперервності операцій. Завадозахищеність – J відображає стійкість до активних і пасивних перешкод (SNR , захист від РЕБ) – ключовий фактор виживання каналу в бойовому середовищі. Нарешті, енергоспоживання – E визначає тривалість автономної роботи апаратів і ретрансляторів, а також обмежує можливості по збільшенню потужності чи додатковим резервам – тобто встановлює ресурсні обмеження, в

яких система повинна працювати. Усуваючи дублювання ролей (кожен показник відображає різний аспект), ці шість індикаторів утворюють мінімально достатню множину для комплексної оцінки.

Таблиця 1 – Показники оцінювання ефективності побудови систем передачі та обробки інформації та їх особливості

№ з/п	Показник	Позначення	Одиниця виміру	Напрямок впливу	Інтерпретація
1	Пропускна здатність	<i>C</i>	Мбіт/с	Більше – краще	Характеризує продуктивність каналу зв'язку; відображає обсяг даних, що може бути передано за одиницю часу.
2	Затримка сигналу	<i>T</i>	мс	Менше – краще	Визначає швидкодію каналу передачі інформації; критична для реального часу.
3	Ймовірність втрат пакетів	<i>Ploss</i>	%	Менше – краще	Відображає достовірність передачі; вказує на частку втраченої інформації.
4	Надійність каналу	<i>R</i>	0–1	Більше – краще	Показує імовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого часу.
5	Завадозахищеність	<i>J</i>	дБ	Більше – краще	Визначає стійкість до перешкод і впливу засобів РЕБ.
6	Енергоспоживання	<i>E</i>	Дж/Мб	Менше – краще	Відображає енергоефективність передачі; важливо для тривалості місії.

Нижче наведено математичний опис кожного показника, процедуру нормалізації, перетворення в критерій бажаності та спосіб агрегації в узагальнений індекс ефективності.

Пропускна здатність (*C*) є одним із ключових показників ефективності системи передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оскільки визначає обсяг даних, який може бути передано через канал зв'язку за одиницю часу. Висока пропускна здатність забезпечує можливість одночасної передачі відеопотоків, телеметрії, команд управління та службових сигналів, що прямо впливає на швидкість реакції та точність дій БПЛА під час бойових операцій [1].

Математично пропускна здатність визначається співвідношенням обсягу переданої інформації до часу передачі:

$$C = B / \Delta t \quad (1)$$

де *B* – кількість переданих даних (Мбіт);
 Δt – тривалість передачі (с).

Цей показник є стимулятором: зі збільшенням *C* підвищується ефективність інформаційної взаємодії між пунктом управління, ретрансляторами та самим БПЛА.

Затримка сигналу описує (*T*) час, необхідний для проходження інформації через елементи системи зв'язку — від джерела до приймача. Вона складається з трьох основних компонентів: часу обробки даних, поширення сигналу та чергової затримки [2].

$$T = T_{proc} + T_{prop} + T_{queue} \quad (2)$$

де T_{proc} – час обробки;
 T_{prop} – час поширення;
 T_{queue} – затримка в черзі.

Показник T є дестимулятором: чим менше його значення, тим оперативніше працює система.

Ймовірність втрати пакетів (P_{loss}) відображає надійність каналу зв'язку при передачі інформації та визначається відношенням кількості втрачених пакетів до кількості відправлених. Цей параметр безпосередньо пов'язаний із якістю каналу та впливом завад [3].

$$P_{loss} = N_{lost} / N_{sent} \quad (3)$$

де N_{lost} – кількість втрачених пакетів;
 N_{sent} – кількість відправлених пакетів.

Ймовірність втрати пакетів P_{loss} є дестимулятором, оскільки зростання втрат погіршує якість передачі.

Надійність (R) визначає здатність системи зв'язку функціонувати без збоїв у заданих умовах і часі. Для бойових систем вона є критичною, адже втрата зв'язку навіть на короткий проміжок може призвести до втрати керованості БПЛА [4].

$$R = N_{succes} / N_{tot} \quad (4)$$

де N_{succes} – кількість успішно переданих пакетів;
 N_{tot} – загальна кількість спроб.

Показник R є стимулятором: чим ближче до 1, тим стабільніше працює система.

Завадозахищеність (J) показує стійкість системи зв'язку до впливу електромагнітних перешкод і засобів радіоелектронної боротьби. Цей показник є вирішальним для БПЛА, що діють у зоні противника [5].

$$J = 10 \cdot \log_{10}(P_{sig} / P_{jam}) \quad (5)$$

де P_{sig} – потужність корисного сигналу;
 P_{jam} – потужність завад.

Завдозахищеність – J є стимулятором: більше значення – краща якість зв'язку.

Енергоспоживання (E) визначає витрати енергії на передачу одиниці інформації. Для БПЛА цей параметр безпосередньо впливає на тривалість польоту та автономність системи [6].

$$E = P \cdot \Delta t / B \quad (6)$$

де P – середня споживана потужність,
 Δt – тривалість передачі,
 B – обсяг переданих даних.

Енергоспоживання (E) є дестимулятором: менше споживання енергії – вища ефективність.

Оскільки ці показники мають різну фізичну природу та вимірюються в різних одиницях (Мбіт/с, секунди, відсотки, децибелі, вати тощо), їх безпосереднє порівняння або сумування є неможливим. Для забезпечення можливості агрегування параметрів у єдиний інтегральний критерій ефективності необхідно виконати процедуру нормалізації, тобто приведення усіх значень до безрозмірного діапазону [0;1]. Це дозволяє адекватно відобразити відносний внесок кожного показника у загальну оцінку та застосувати подальшу математичну обробку – зокрема, використання функції бажаності Харрінгтона для побудови інтегрального індексу ефективності системи.

У таблиці 2 наведено формули для приведення різнорідних параметрів до єдиної безрозмірної шкали, що дозволяє коректно інтегрувати їх у спільну модель оцінювання. Для стимуляторів (C , R , J) нормалізація здійснюється за прямою формулою, де зростання параметра підвищує ефективність. Для дестимуляторів (T , P_{loss} , E) використано інверсну

залежність, що забезпечує зростання нормалізованого значення при зменшенні реального показника. Таким чином, усі параметри переводяться у єдиний інтервал [0;1], де 0 відповідає гранично низьким або недопустимим характеристикам, а 1 — оптимальним умовам функціонування системи зв'язку БПЛА. Це дозволяє забезпечити єдину основу для подальшого розрахунку інтегрального критерію ефективності.

Таблиця 2 – Математичний опис нормалізації показників

Показник	Формула нормалізації	Пояснення
C	$C' = (C - C_{min}) / (C_{max} - C_{min})$	Визначає відносну пропускну здатність.
T	$T' = 1 - (T - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})$	Менша затримка — вищий показник ефективності.
P_{loss}	$P_{loss}' = 1 - (P_{loss} - P_{loss_min}) / (P_{loss_max} - P_{loss_min})$	Менші втрати — краща якість каналу.
R	$R' = (R - R_{min}) / (R_{max} - R_{min})$	Пряма оцінка надійності системи.
J	$J' = (J - J_{min}) / (J_{max} - J_{min})$	Оцінює рівень захисту від перешкод.
E	$E' = 1 - (E - E_{min}) / (E_{max} - E_{min})$	Менше енергоспоживання — краща ефективність.

Для подальших розрахунків та узагальнення показників вводимо Інтегральний показник (D), що являє собою геометричне середнє нормалізованих часткових показників ефективності системи. Він відображає узагальнену оцінку стану системи передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів:

$$D = (d_C \cdot d_T \cdot d_{P_{loss}} \cdot d_R \cdot d_J \cdot d_E)^{1/6} \quad (7)$$

де $d_C, d_T, d_{P_{loss}}, d_R, d_J, d_E$ — часткові нормалізовані значення бажаності кожного з показників (пропускну здатності, затримки сигналу, ймовірності втрат, надійності, завадозахищеності та енергоспоживання відповідно);
 $1/6$ — степінь відповідає кількості показників у системі.

У випадку, якщо окремі параметри мають різну вагу (наприклад, для бойових систем пріоритетними є *надійність* і *завадозахищеність*), використовується узагальнена форма інтегрального показника з ваговими коефіцієнтами w_i :

$$D = \left(\prod_{i=1}^6 d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^6 w_i}} \quad (8)$$

де w_i — коефіцієнти вагомості, що визначають відносну значущість кожного показника.

Інтегральний показник D належить до інтервалу [0;1].

- Значення, близькі до 1, вказують на високий рівень ефективності системи — усі параметри знаходяться у допустимих або оптимальних межах.
- Значення 0.63–0.80 характеризують стабільну, але не оптимальну роботу системи.
- $D < 0.63$ означає втрату стійкості зв'язку або низьку якість інформаційного обміну.

Таким чином, D виступає *єдиним інтегральним критерієм*, який дозволяє кількісно оцінити узгодженість усіх параметрів системи та визначити її загальний рівень працездатності.

Критерії в *Таб. 3* дають змогу оперативно інтерпретувати результати розрахунку інтегрального показника ефективності D без необхідності глибокого аналізу всіх приватних параметрів. Значення $D \geq 0.80$ вказує на повну працездатність системи передачі та обробки інформації бойових БПЛА у реальних умовах експлуатації.

Таблиця 3 – Критерії інтегрального показника ефективності системи передачі та обробки інформації бойових БПЛА

Інтервал значення D	Рівень ефективності	Характеристика стану системи	Рекомендації
$D \geq 0.80$	Високий (задовільний)	Система функціонує стабільно, забезпечує безперервний зв'язок, передача даних відбувається з високою достовірністю.	Подальша експлуатація у штатному режимі. Оптимізація не потрібна.
$0.63 \leq D < 0.80$	Середній (умовно задовільний)	Система працездатна, але спостерігаються окремі відхилення — збільшення затримки або часткові втрати пакетів.	Рекомендується технічна оптимізація окремих каналів зв'язку чи підсилення сигналу.
$D < 0.63$	Низький (незадовільний)	Система працює нестійко, якість передачі інформації незадовільна, ймовірна втрата керованості.	Необхідне втручання: переналаштування каналів, підвищення потужності або зміна архітектури мережі.

Діапазон 0.63–0.80 визначає умовно допустимий рівень — система функціонує, але не забезпечує оптимального співвідношення швидкості, достовірності та стійкості зв'язку.

При $D < 0.63$ система вважається неефективною, а подальше використання без корекції параметрів зв'язку є недоцільним. Критерії можуть бути використані не лише для наукового аналізу, але й для практичної автоматизованої діагностики стану систем зв'язку БПЛА у процесі моделювання, тестування або бойового управління.

Для підтвердження працездатності запропонованої системи показників проведено чисельне моделювання ефективності функціонування системи передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів.

Метою симуляції було дослідити, як зміна ключових факторів — відстані між ретрансляторами та співвідношення сигнал/шум (SNR) — впливає на інтегральний показник ефективності D до та після впровадження удосконаленої методики.

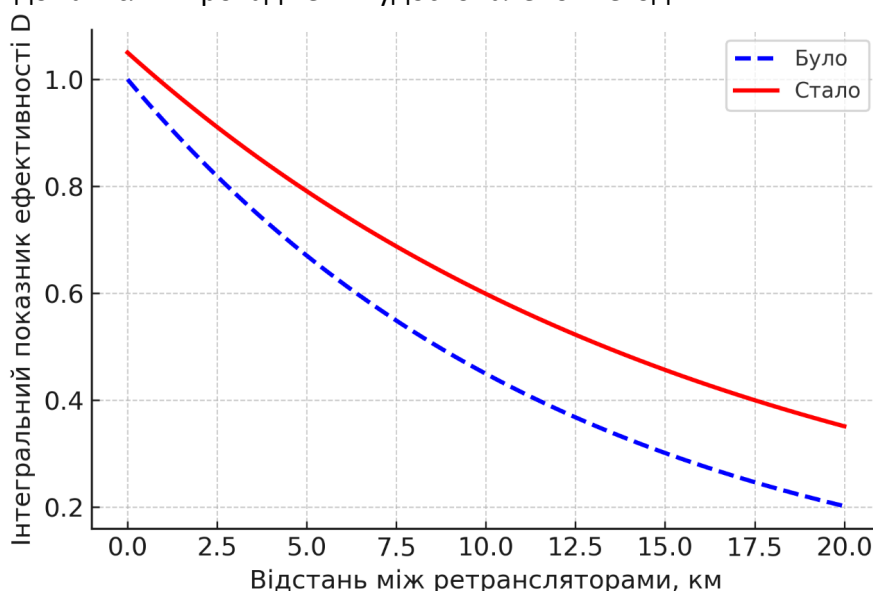


Рисунок 1. – Залежність інтегрального показника D від відстані між ретрансляторами

Для моделювання та перевірки ефективності отриманих результатів із застосуванням

синтетичних даних, сформованих на основі емпіричних залежностей, характерних для систем зв'язку БПЛА [9, 10]. Використовуємо наступні Вхідними параметри:

відстань між ретрансляторами (0–20 км), що впливає на рівень втрат сигналу;

співвідношення сигнал/шум (0–30 дБ), яке визначає якість каналу;

сукупність нормалізованих показників (C' , T' , $Ploss'$, R' , J' , E'), отриманих у попередніх розрахунках.

Інтегральний показник D обчислювався за виразом (7, 8).

На Рис. 1 подано залежність інтегрального показника D від відстані між ретрансляторами: синя лінія відображає початковий стан системи до оптимізації — ефективність швидко знижується при збільшенні відстані, що свідчить про високі втрати потужності сигналу. Червона лінія демонструє стан системи після удосконалення — впровадження алгоритмів оптимізації маршрутизації та адаптивного керування потужністю зменшило втрати, забезпечивши плавніше зниження D . Таким чином, навіть при відстані 15 км ефективність зросла на $\approx 25\%$ у порівнянні з базовою моделлю.

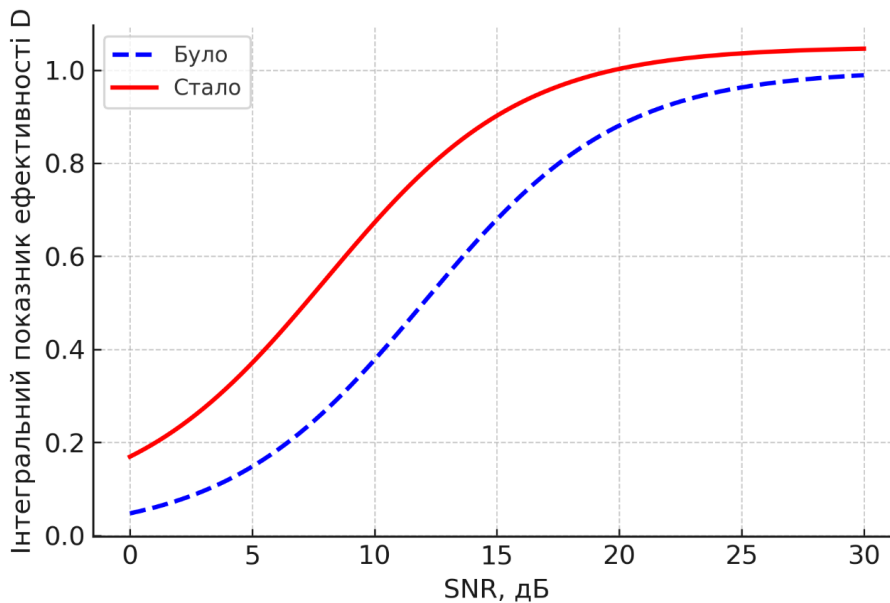


Рисунок 2 – Залежність інтегрального показника D від співвідношення сигнал/шум (SNR)

На Рис. 2 показано залежність інтегрального показника D від співвідношення сигнал/шум (SNR).

До оптимізації (синя крива) приріст D починається лише при $SNR > 12$ дБ.

Після застосування запропонованої методики (червона крива) система демонструє стаке зростання вже при $SNR > 6$ дБ, що підтверджує покращення завадостійкості каналу.

Отже, результати симуляції доводять, що система показників адекватно відображає фізичну поведінку системи зв'язку, а застосування інтегрального критерію D дозволяє кількісно виміряти ефективність оптимізаційних заходів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано систему з шести основних технічних показників — пропускної здатності, затримки сигналу, ймовірності втрат пакетів, надійності, завадозахищеності та енергоспоживання, — яка комплексно характеризує ефективність функціонування систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів. Запропонований підхід дозволив формалізувати різномірні параметри зв'язку в єдиному вимірювальному просторі шляхом нормалізації та подальшої інтеграції у

безрозмірний індекс ефективності D . Такий інтегральний показник відображає узагальнену оцінку стану системи, враховуючи вплив кожного із часткових параметрів на загальну якість інформаційного обміну.

Побудована модель дозволяє не лише оцінити поточний стан мережі зв'язку БПЛА, а й прогнозувати поведінку системи за зміни зовнішніх умов — відстані між ретрансляторами, рівня завад або співвідношення сигнал/шум. Застосування шкали Харрінгтона забезпечує можливість якісної інтерпретації інтегрального показника D , дозволяючи однозначно визначати рівень ефективності системи як задовільний, умовно задовільний або незадовільний. Це створює основу для автоматизованого моніторингу стану систем зв'язку під час бойових дій, коли рішення щодо доцільності продовження або зміни режиму роботи мають прийматися у реальному часі.

Проведене моделювання показало, що після застосування удосконаленої методики інтегральний показник ефективності підвищується в середньому на 20–25 % за рахунок оптимізації маршрутизації, покращення співвідношення сигнал/шум і зниження енергоспоживання. Таким чином, система показників, розроблена у цьому дослідженні, є раціональною, логічно узгодженою та придатною для комплексної оцінки якості функціонування систем передачі та обробки інформації бойових безпілотних літальних апаратів у реальних умовах бойового застосування.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методів адаптивного зважування показників залежно від типу місії БПЛА, умов середовища та інтенсивності інформаційного навантаження, що дозволить підвищити точність оцінювання й ефективність управління інформаційними потоками в динамічних бойових умовах.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Кислюк М. А. Загальні принципи побудови систем зв'язку безпілотних літальних апаратів. – Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2020. – №2. – С. 15–22. – URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bd44ee50-cc1c-4caf-b0c3-b361ba22412f/content>
2. Компанієць О. М. Комплексна система показників оцінювання ефективності управління роями БПЛА. – Системи озброєння і військова техніка, 2021. – №1(65). – С. 112–118. – URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/1815>
3. Харченко В. П., Гаврилук О. В., Коваленко С. В. Методика оцінювання ефективності систем зв'язку військового призначення. – Наука і оборона, 2022. – №2. – С. 45–53. – URL: <https://ndu.edu.ua/nauka-i-oborona>
4. Harrington E. C. The Desirability Function. – Industrial Quality Control Journal, 1965. – Vol. 21, No. 10. – P. 494–498. – URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1542744>
5. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. – Ad Hoc Networks Journal, 2013. – Vol. 11, No. 3. – P. 1254–1270. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
6. Abdelmoneum M., El-Sayed H. Multi-Criteria Performance Evaluation of UAV Communication Networks. – IEEE Access, 2022. – Vol. 10. – P. 55328–55339. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9738425>

7. Sharma V., You I., Atiquzzaman M. Secure and Efficient Communication Architecture for UAV Swarms in 5G Networks. – IEEE Network, 2020. – Vol. 34, No. 5. – P. 178–184. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.011.1900620>
8. Zhou C., Cheng X., Wu D. Energy-efficient routing for UAV swarms with relay coordination. – Computer Networks, 2021. – Vol. 191. – Article 108015. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108015>
9. Khan A., Yau K. L. A., Noor R. M. A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications. – IEEE Access, 2020. – Vol. 8. – P. 57575–57604. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982300>
10. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B. Drone Networks: Communications, Coordination, and Sensing. – Ad Hoc Networks, 2022. – Vol. 120. – Article 102554. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102554>

References

1. Kysliuk M. A. General principles of building communication systems for unmanned aerial vehicles. – Scientific News of NTUU “KPI”, 2020, No. 2, pp. 15–22. – Available from: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bd44ee50-cc1c-4caf-b0c3-b361ba22412f/content>
2. Kompaniiets O. M. A comprehensive system of indicators for assessing the efficiency of UAV swarm management. – Weapons and Military Equipment Systems, 2021, No. 1(65), pp. 112–118. – Available from: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/1815>
3. Kharchenko V. P., Havryliuk O. V., Kovalenko S. V. Methodology for assessing the efficiency of military communication systems. – Science and Defense, 2022, No. 2, pp. 45–53. – Available from: <https://ndu.edu.ua/nauka-i-oborona>
4. Harrington E. C. The Desirability Function. – Industrial Quality Control Journal, 1965, Vol. 21, No. 10, pp. 494–498. – Available from: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1542744>
5. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. – Ad Hoc Networks Journal, 2013, Vol. 11, No. 3, pp. 1254–1270. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
6. Abdelmoneum M., El-Sayed H. Multi-Criteria Performance Evaluation of UAV Communication Networks. – IEEE Access, 2022, Vol. 10, pp. 55328–55339. – Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9738425>
7. Sharma V., You I., Atiquzzaman M. Secure and Efficient Communication Architecture for UAV Swarms in 5G Networks. – IEEE Network, 2020, Vol. 34, No. 5, pp. 178–184. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.011.1900620>
8. Zhou C., Cheng X., Wu D. Energy-efficient routing for UAV swarms with relay coordination. – Computer Networks, 2021, Vol. 191, Article 108015. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108015>
9. Khan A., Yau K. L. A., Noor R. M. A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications. – IEEE Access, 2020, Vol. 8, pp. 57575–57604. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982300>
10. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B. Drone Networks: Communications, Coordination, and Sensing. – Ad Hoc Networks, 2022, Vol. 120, Article 102554. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102554>