

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Open Access under [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License

У статті представлено підхід до побудови математичної моделі прогнозування пропускної здатності каналів зв'язку безпілотних літальних апаратів на основі телеметричних даних. Запропонований метод враховує динамічну природу інформаційних потоків, варіативність інтервалів між телеметричними пакетами, рівень втрат, та інші параметри, що визначають стійкість каналу в умовах змінного навантаження. У роботі виділено ключові характеристики, які впливають на якість зв'язку. Розглянуто взаємодію між бортовими, наземними та комунікаційними елементами системи управління, що дають змогу формалізувати поведінку каналу та здійснювати прогнозування його подальшого стану.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, математична модель, потоки даних, пропускна здатність, телеметрія, SITL, інформаційні потоки, канал зв'язку, деградація каналу, стійкість передачі даних.

© С.О. Кашкевич, Н.Б. Марченко,
Ю.В. Дегтяр, 2026

УДК 004.056.5

DOI:10.34229/2707-451X.26.1.10

С.О. КАШКЕВИЧ, Н.Б. МАРЧЕНКО, Ю.В. ДЕГТЯР

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

Вступ. Сучасні безпілотні авіаційні комплекси активно застосовуються для моніторингу місцевості, розвідки, картографування, виконання логістичних задач і прийняття підтримки рішень у режимі реального часу. Ефективність виконання цих функцій визначається не лише точністю навігації та якістю бортових сенсорів, а й стабільністю каналів зв'язку, через які передаються телеметричні дані, команди управління та службова інформація. Пропускна здатність каналу є одним із базових параметрів, що впливають на затримку реалізованих команд, частоту оновлення телеметричних даних, стійкість керування та загальну надійність виконання польотної місії. У реальних умовах експлуатації канали зв'язку зазнають впливу завад, змін умов середовища, коливань рівня сигналу, нерівномірності потоків даних і пікових навантажень, що призводить до зменшення пропускної здатності та, відповідно, до погіршення якості керування безпілотним літальним апаратом (БпЛА).

Проблема полягає у тому, що більшість існуючих систем управління БпЛА функціонують реактивному режимі: вони фіксують погіршення стану каналу зв'язку лише після виникнення втрат пакетів, різних зростають затримки або деградації частоти надходження телеметрії. Такий підхід не дає змогу завчасно прогнозувати орієнтовну пропускну здатність каналу та адаптувати параметри обміну даними до моменту критичного зниження якості зв'язку. Відсутність прогнозу складової створює додаткові ризики під час виконання складних місій, особливо за умов високої інтенсивності інформаційного обміну або використання множинних сенсорних потоків, що генерують нерівномірні за обсягом пакети даних.

Перспективним напрямком розв'язання зазначених проблем є застосування телеметричних логів, які формуються під час симуляційних польотів. Розроблення методу прогнозування пропускної здатності каналу зв'язку на основі аналізу телеметричних логів є важливим науковим і практичним завданням.

Виклад основного матеріалу

Пропускна здатність каналу зв'язку БПЛА визначає максимальний обсяг інформації, який може бути переданий між бортовою системою та наземною станцією за одиницю часу. Цей параметр впливає на затримку команд, стабільність каналу керування, точність отримання телеметричних даних і якість прийняття рішень у режимі реального часу. У структурі інформаційного обміну БПЛА можна виділити три основні типи потоків даних: командний, телеметричний і корисний (payload). Кожен із цих потоків має вкладені характеристики та вимоги до частоти оновлення, розміру пакетів і рівня пріоритетності, що ускладнює прогнозування загального навантаження на канал зв'язку [1–3].

У більшості сучасних систем керування БПЛА канали зв'язку реалізуються на основі протоколів MAVLink або його модифікацій. Ці протоколи використовують пакетну модель передавання даних, у якій кожен пакет містить службову, телеметричну та навігаційну інформацію. За умов нерівномірних інформаційних потоків або пікових навантажень (наприклад, під час маневрування, зміни режимів польоту або зростання кількості активних сенсорів) виникають короточасні перевантаження каналу. Вони проявляються у вигляді втрат пакетів, зростання затримок їх надходження або зниження частоти передавання даних. Такі процеси мають стохастичний характер, що суттєво ускладнює їх передбачення за допомогою традиційних методів моніторингу.

Прогнозування пропускної здатності каналів зв'язку в умовах реального польоту ускладнюється через низку чинників серед яких мінливість умов середовища, наявність радіоперешкод, взаємодію із зовнішніми мережами, а також обмежені можливості вимірювання внутрішніх параметрів каналу. У зв'язку з цим для дослідження та моделювання інформаційних процесів доцільним є використання середовища Software-in-the-Loop (SITL), яке забезпечує створення контрольованих, відтворюваних умов експерименту та дає змогу отримувати повний обсяг телеметричних даних без ризику для реальних апаратів.

Під час роботи SITL формує детальні телеметричні логи, що містять часові мітки, інформацію про швидкість обміну даними, затримки, кількість переданих і втрачених пакетів, інтенсивність потоків та їх структуру. Аналіз таких логів дає змогу виявляти приховані закономірності зміни пропускної здатності каналів її залежність від фази польоту, маршруту, режимів роботи автопілота, обертів двигунів, кількості активних сенсорів або величини навігаційних похибок. На відміну від реальних експериментів, SITL дає змогу багаторазово відтворювати однакові сценарії для порівняльного аналізу поведінки каналу за різних налаштувань у системі [4–6].

З теоретичної точки зору пропускну здатність каналу зв'язку БПЛА доцільно розглядати як динамічний процес, що характеризується часовою зміною інтенсивності передавання даних і впливом зовнішніх чинників. За умов нерівномірних потоків фактична пропускна здатність змінюється в часі, утворюючи часовий ряд зі стохастичними коливаннями. Аналіз таких часових рядів [7] дозволяє здійснювати прогнозування на основі методів згладжування, регресійного аналізу або класифікації аномальних ділянок. Це у свою чергу дозволяє оцінити, моменти та умови каналу наближення до критичних станів, за яких імовірно зростання втрат пакетів або затримок передавання даних [8, 9]. Важливу роль відіграють внутрішні механізми автопілота, що впливають на структуру даних: буферизацію, пріоритетизацію телеметричних потоків та адаптивне зниження частоти передавання у разі деградації каналу. Саме ці механізми формують складні нелінійні залежності між навантаженням на канал і його фактичним станом, що зумовлює необхідність застосування методів прогнозування, здатних працювати з реальними даними. У цьому контексті телеметричні логи SITL виступають практично необмеженим джерелом вхідних параметрів для побудови моделей, прогнозування оскільки містять значно ширший набір даних порівняно з тим, що доступно під час реальних польотів. Таким чином, теоретичні передумови для розроблення методу прогнозування

пропускної здатності каналу зв'язку БпЛА ґрунтуються на аналізі динаміки інформаційних потоків, структурних особливостях пакетної телеметрії MAVLink, можливостей симуляційних середовищ та застосування методів часових рядів для отримання прогнозних оцінок. Це створює основу для практичної реалізації моделі, яка дозволяє оцінювати майбутній стан каналу зв'язку та адаптувати параметри інформаційного обміну з метою запобігання деградації зв'язку під час польоту.

Для отримання прогнозних значень пропускну здатність каналу необхідно представити у вигляді часового ряду, визначити релевантні ознаки з телеметричних логів, виокремити критичні параметри, що впливають на процес зниження пропускної здатності, та сформулювати алгоритм, прогнозування умов функціонування майбутнього стану каналу. Такий підхід забезпечує можливість адаптації системи управління до змін та створює передумови для підвищення стійкості каналу зв'язку.

В дослідженні сформовано покрокову математичну модель прогнозування пропускної здатності каналу зв'язку БпЛА, яка поєднує етапи збору, перетворення, аналізу та прогнозування телеметричних логів у середовище SITL.

Крок 1. Формування вхідного часового ряду

Телеметричні логи SITL формують послідовність вимірювань параметрів каналу зв'язку, які можна подати у вигляді вектора:

$$D(t) = \{R(t), \Delta t(t), L(t), J(t)\},$$

де $R(t)$ – кількість отриманих пакетів у момент часу t ; $\Delta t(t)$ – інтервал між сусідніми пакетами; $L(t)$ – кількість втрачених пакетів; $J(t)$ – варіація інтервалів.

Пропускна здатність каналу визначається як: $C(t) = \frac{R(t) \cdot S}{\Delta t(t)}$, де S – середній розмір пакета у

байтах.

Крок 2. Нормалізація та фільтрація ряду

Часовий ряд пропускної здатності можна представити як $C(t) = f(C(t))$, де f – оператор фільтрації: $f(C(t)) = \frac{1}{k}(t-i)$.

Крок 3. Виділення ключових параметрів

Вектор ознак: $X(t) \left[C(t) \frac{dC(t)}{dt}, L(t), J(t), R(t) \right]$, де перша похідна показує швидкість деградації каналу зв'язку: $\frac{dC(t)}{dt} \approx C(t) - C(t-1)$.

Крок 4. Модель пропускної здатності як процесу часових рядів

Пропускна здатність описується залежністю: $C(t+1) = F(C(t), C(t-1), \dots, C(t-n), X(t))$, де F – оператор прогнозування.

У простій лінійній моделі: $C(t+1) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i C(t-i) + bX(t)$.

У моделі ковзного згладжування: $C(t+1) = \alpha C(t) + (1-\alpha)C(t)$, де $C(t)$ – локальне середнє значення.

Крок 5. Прогноз критичного стану каналу

Визначаємо критичний поріг пропускної здатності каналу: C_{crit} . Ризик деградації каналу визначається за умовою:

$$P(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C(t+1) < C_{crit} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Це дозволяє передбачити момент, коли система має адаптувати частоту телеметрії.

Крок 6. Показник ймовірності втрати зв'язку

З телеметричних логів оцінюється ймовірність втрати пакетів:

$$pL(t) = \frac{L(t)}{R(t) + L(t)}.$$

Очікувана пропускна здатність з урахуванням втрат: $C_{eff}(t) = C(t) \cdot (1 - pL(t))$.

Крок 7. Фінальна модель прогнозування

Таким чином, прогноз пропускної здатності записується у вигляді:

$$C(t+1) = F\left(C(t), \frac{dC(t)}{dt}, J(t), L(t), R(t)\right),$$

відповідно, ефективна прогнозована пропускна здатність визначається як:

$$C_{eff}(t+1) = C(t+1) \cdot (1 - pL(t)).$$

Експериментальна перевірка моделі

Для перевірки запропонованої математичної моделі було проведено серію симуляційних польотів у середовищі Mission Planner з використанням SITL. У рамках експерименту сформовано базовий маршрут польоту у форматі *.plan*, який складався з 12 маршрутних точок (waypoints) на висоті 50 м і прямолінійними переходами між ними. Маршрут виконувався у режимі AUTO, що забезпечувало відтворюваність експериментальних умов. Для підвищення наближеності до реальних умов у SITL було змодельовано змінні атмосферні впливи, зокрема пориви вітру до 7–10 м/с, незначний вертикальний зсув (turbulence) та періодичні коливання швидкості.

Під час польоту система автопілота генерувала телеметричні логи у форматах *.log* та *.bin*, які містили часові ряди параметрів інформаційного каналу: частоту пакетообміну, інтервали Δt між пакетами, кількість втрачених пакетів, рівень джитера та часові мітки. Для підвищення інтенсивності обміну змінено параметр частоти оновлення телеметрії на 5 Гц, 10 Гц і 15 Гц у різних запусках, що дозволило оцінити поведінку каналу за різних сценаріїв навантаження.

У моделюванні встановлювалися також додаткові обмеження: штучне періодичне погіршення каналу (збільшення packet loss), моделювання коливань SNR та накладання короткочасних завад. Для цього використовувалися вбудовані інструменти Mission Planner, які дозволяють контролювано викликати деградацію каналу в SITL. Такі умови дали можливість зафіксувати ділянки із різкою зміною пропускної здатності, що є критичними для подальшого аналізу та прогнозування.

Отримані логи було експортовано та оброблено з використанням мови програмування Python. З часових рядів сформовано ключові параметри, передбачені математичною моделлю: пропускна здатність $C(t)$, джитер $J(t)$, швидкість деградації каналу та інтенсивність втрат $pL(t)$. Для кожного експерименту побудовано окремі ряди спостережень, після чого визначено прогнозоване значення пропускної здатності $C(t+1)$ та порівняно його з фактичними даними з логів.

У результаті проведеного моделювання встановлено закономірність, що зі збільшенням частоти передавання телеметрії понад 10 Гц спостерігається зростання нестабільності інформаційного потоку, що негативно впливає на пропускну здатність каналу зв'язку (рис. 1). Додатково встанов-

лено, що перед виникненням пікових втрат пакетів відбувається різке зменшення похідної $dC(t)/dt$, що підтверджує доцільність її використання як предиктора прогнозової моделі.

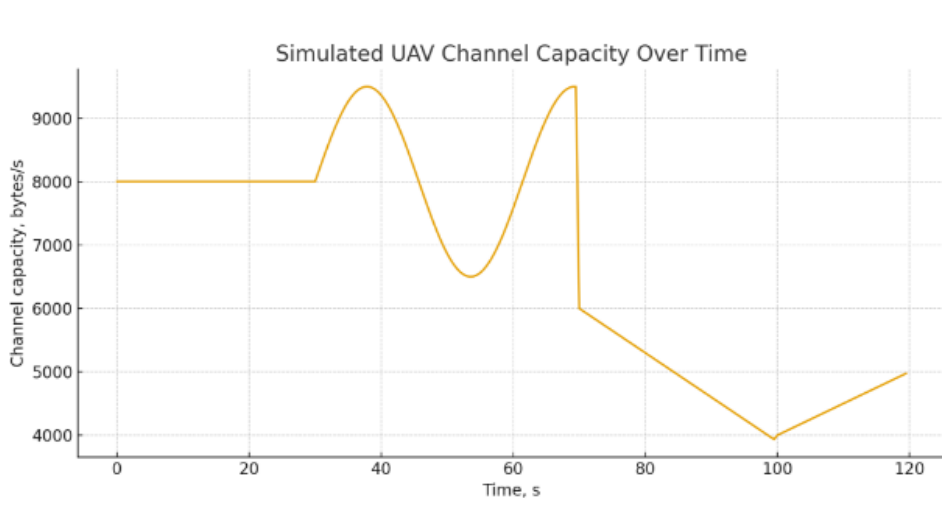


РИС. 1. Графік результатів моделювання пропускної здатності каналу

На даному рисунку показано часовий ряд пропускної здатності, отриманий у результаті моделювання польоту в SITL. Вісь X відповідає часу польоту (у секундах), а вісь Y – пропускна здатність каналу зв'язку (байт/с). На графіку простежуються ділянки стабільної передачі даних, також сегменти різкої деградації, що відповідають моментам зростання навантаження на канал або моделювання завад у каналі зв'язку.

На початковому етапі польоту (0–30 с) пропускна здатність зберігає стабільне значення. Після входу в центральну частину маршруту (30–65 с) фіксується серія коливань, пов'язаних із підвищеною активністю сенсорів та збільшенням частоти пакетів. У часовому інтервалі 70–90 с спостерігається суттєве зниження пропускної здатності, що відповідає штучно внесеним у SITL перешкодам (wind + packet loss). Заключна частина графіка демонструє відновлення каналу зв'язку і поступове повернення до номінального рівня.

Отримані результати підтверджують суттєву залежність пропускної здатності каналу зв'язку від динаміки інформаційних потоків і умов польоту. Встановлено, що за частоти оновлення телеметрії 10 Гц канал працює стабільно лише за відсутності зовнішніх завад та коливань інтенсивності. При підвищенні навантаження на канал спостерігаються короткочасні періоди різкого зростання інтервалів між пакетами та помітне зменшення пропускної здатності.

Аналіз похідної пропускної здатності показав, що перед появою пікових втрат пакетів її значення набуває від'ємних величин, що є важливим сигналом для прогнозової моделі. Це підтверджує ефективність використання даного параметра як предиктора оцінювання майбутнього стану каналу зв'язку.

Значення ймовірності втрат пакетів зафіксовано в інтервалах зниження пропускної здатності. На цих ділянках спостерігається найбільша різниця між фактичною пропускною здатністю $C(t)$ та ефективною $C_{eff}(t)$, що свідчить про зростання впливу завад на нестабільність каналу. Відповідно, модель прогнозування здатна завчасно виявити наближення критичного стану, за якого зв'язок може стати нестабільним або перерватися.

Узгодженість прогнозних значень із фактичними даними підтверджує коректність сформованої математичної моделі. Похибка прогнозування залишається мінімальною на ділянках стабільної роботи каналу і збільшувалася лише за умов різкої деградації, що відповідає фізичній природі досліджуваного процесу.

На рис. 2 показано фрагмент інтерфейсу середовища Mission Planner з відображенням маршруту польоту БПЛА над центральною частиною міста. Маршрут автоматично сформовано шляхом завантаження файлу з командами типу *WAYPOINT*, згенеровано в межах запропонованої інформаційної технології. Жовта лінія відображає замкнений контур польоту з послідовністю поворотних точок, а зелені маркери позначають окремі точки маршруту, для яких задано координати та висоту польоту (у дослідженні прийнято стали висоту 50 м).

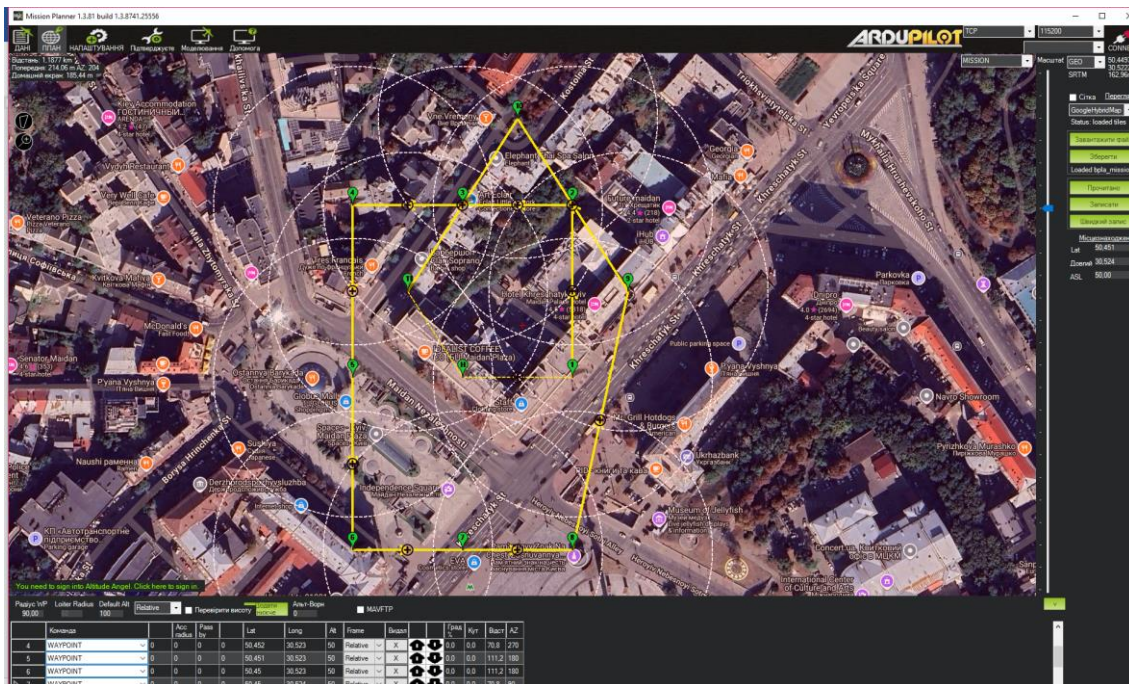


РИС. 2. Маршрут польоту БПЛА

Такий формат задання місії забезпечує відтворюваність умов експерименту: кожен запуск SITL виконує одну й ту саму траєкторію польоту, що дозволяє порівнювати параметри каналу зв'язку між різними серіями моделювання. Отримані під час проходження маршруту телеметричні логи (координати, режими польоту, параметри зв'язку) у подальшому використовуються як вхідні дані для математичної моделі прогнозування пропускної здатності каналу зв'язку БПЛА.

Висновки. У статті запропоновано математичну модель прогнозування пропускної здатності каналу зв'язку БПЛА на основі аналізу телеметричних логів SITL, що враховує динаміку інформаційного потоку, нерівномірність інтервалів між пакетами, швидкість деградації каналу та ймовірність втрат даних. Проведене моделювання польоту у Mission Planner підтвердило ефективність використання сформованого вектора ознак, а також доцільність застосування похідної пропускної здатності як предиктора критичних станів каналу.

Результати експериментів у SITL демонструють відповідність прогнозних значень пропускної здатності фактичним даним, що підтверджує працездатність моделі та її потенціал для інтеграції у

системи адаптивного управління інформаційними потоками БПЛА. Запропонований підхід дозволяє коригувати частоту телеметрії, пріоритезацію потоків та конфігурацію каналу ще до досягнення критичних значень, що підвищує надійність виконання польотних місій і знижує ризик втрати зв'язку.

References

1. Kashkevich S. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. 202. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>
2. Nechyporuk O.P., Kashkevich S.O., Dehtiar Yu.V. Research and analysis of channel capacity in telecommunications. In *XX International Scientific and Practical Conference "Technologies, Innovative and Modern Theories of Scientists"*, Graz, Austria. 2023. P. 495–499.
3. Nechyporuk V.V., Kashkevich S.O., Holeho N.M. Method of decentralized management of network resources of information and communication networks. In *XIX International Scientific and Practical Conference "Innovative Approaches to Solving Scientific Problems"*, Tokyo, Japan. 2023. P. 454–458.
4. Pliekhova H.A., Neronov S.M., Kostikova M.V., Kashkevich S.O. Improvement of the secure routing model in software-defined networks. *Bionics of Intelligence*. (Kharkiv National University of Radio Electronics), 2024. 1. P. 50–57. [https://doi.org/10.30837/bi.2024.1\(100\).07](https://doi.org/10.30837/bi.2024.1(100).07)
5. Tamer K.A., Sova O., Shaposhnikova O., Yashchenok V., Stanovska I., Shostak S., Rudenko O., Petruk S., Matsyi O., Kashkevich S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, No. 4 (127). P. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>
6. Owaid S.R., Miahkykh H., Odarushchenko E., Kashkevich S., Shyshatskyi A., Plekhova G., Hrymud A., Petruk S., Shaposhnikova O., Stryhun V. Development of a method for detecting cyber attacks on information systems based on artificial intelligence technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 3, Iss. 9 (135). P. 33–39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329258>
7. Owaid S.R., Kashkevich S., Shyshatskyi A., Radzivilov H., Sova O., Zarubenko A., Veretnov A., Lazuta R., Noskov O., Voznytsia A. Development of heterogeneous data processing method in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1, Iss. 4 (133). P. 64–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322629>
8. Mohammed B.A., Stanovska I., Kashkevich S., Lebedynskyi A., Vakulenko Y., Protas N., Klyuchak O., Lastivka O., Semeniuk A., Kivshar O. Development of a methodological approach for assessing the condition of complex organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2, Iss. 3 (134). P. 47–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326468>
9. Terzi D. On the Solution of the Traveling Salesman Problem by a Modification of the Hungarian. Method. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2025. 4. P. 5–11. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.4.1>

Received/Одержано 23.11.2025

Accepted/Прийнято 03.03.2026

Published/Надруковано 27.03.2026

Кашкевич Світлана Олександрівна,

старший викладач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем

Державного університету «Київський авіаційний інститут»,

<https://orcid.org/0009-0007-2406-8535>

svitlana.kashkevych@npp.kai.edu.ua

Марченко Надія Борисівна,

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем

Державного університету «Київський авіаційний інститут»,

<https://orcid.org/0000-0001-5008-4116>

Дегтяр Юрій Віталійович,

старший викладач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем

Державного університету «Київський авіаційний інститут»,

<https://orcid.org/0000-0001-5615-2474>

UDC 004.056.5

Svitlana Kashkevych *, Nadiia Marchenko, Yurii Dehtiar

Method for Predicting the Communication Channel Capacity of Unmanned Aerial Vehicles Based on Telemetry Data

*State University "Kyiv Aviation Institute", Ukraine** Correspondence: svitlana.kashkevych@npp.kai.edu.ua

The article presents an approach to constructing a mathematical model for predicting the throughput capacity of unmanned aerial vehicle communication channels based on the analysis of SITL telemetry logs. The proposed methodology takes into account the dynamic nature of the information flow, the unevenness of the intervals between packets, the probability of losses, and the fluctuations in channel parameters under the influence of external and internal factors. The paper identifies the key characteristics that affect channel stability: packet arrival rate, amount of useful information, loss rate, and throughput degradation rate. The structure of information flows in the UAV control system is considered and the relationships between channel parameters are formalised, which allows predicting its future state.

The purpose develop a mathematical model for predicting the throughput capacity of the UAV communication channel using SITL telemetry logs to ensure early detection of channel degradation and improve data exchange reliability.

Results. Based on the analysis of packet protocols and channel behaviour in different load modes, a mathematical model was developed to describe the temporal dynamics of throughput and the relationship between current parameters and predicted values. The model includes data normalisation, time series smoothing, estimation of the local rate of change in throughput, and determination of the expected effective throughput, taking into account packet loss. Modelling was performed in Mission Planner, which implemented various load scenarios: changes in telemetry frequency, artificial interference, SNR fluctuations, and increased traffic intensity. The results of the experiments showed that the forecast data corresponded to the actual values and confirmed that the model is capable of detecting the approach of the channel to a critical state in advance. The derivative throughput indicator, which decreases sharply before the onset of peak losses, proved to be particularly informative.

Conclusions. The results obtained show that mathematical forecasting of the UAV communication channel bandwidth based on telemetry logs allows for early identification of critical channel conditions and increases the efficiency of information system resource utilisation. The proposed model can be integrated into real-time systems to adapt telemetry parameters, increase the stability of communication channels, and ensure the reliability of information transmission even in unstable environments and under variable loads.

Keywords: unmanned aerial vehicle, mathematical model, data flows, bandwidth, telemetry, SITL, information flows, communication channel, channel degradation, data transmission stability.