

УДК 004.75:004.056.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.4.13>

Світлана КАШКЕВИЧ

старший викладач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», svitlana.kashkevych@npp.kai.edu.ua
ORCID: 0009-0007-2406-8535

Олена НЕЧИПОРУК

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», olena.nechyporuk@npp.kai.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8203-7998

Наталія АПЕНЬКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», nataliia.apenko@npp.kai.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6891-0869

Ірина БРАНОВИЦЬКА

асистент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», iryna.branovytska@npp.kai.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6397-6164

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКИ ЗМІЙ В СИСТЕМАХ ОБМІНУ ДАНИМИ БПЛА

Анотація. У роботі запропоновано метод оптимізації маршрутів у системах обміну даними безпілотних літальних апаратів (БПЛА), заснований на біоінспірованій моделі поведінки змії (Snake Routing Optimization Method, SROM). Метод реалізує адаптивний пошук оптимального маршруту з урахуванням динаміки мережі, енергоспоживання, затримок передавання та стабільності каналів зв'язку. На відміну від відомих еволюційних підходів, алгоритм SROM поєднує локальну оптимізацію та колективну взаємодію між агентами, що забезпечує швидку збіжність та здатність уникати локальних мінімумів.

Мета. Розробка методу оптимізації маршрутів на основі поведінки змії у системах обміну даними БПЛА.

Методологія. Методологічною основою дослідження є біоінспірований підхід до оптимізації маршрутів, у якому процес пошуку розглядається як колективна поведінка агентів за аналогією до руху та адаптації змії у середовищі.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у розробленні біоінспірованого методу оптимізації маршрутів в БПЛА, який поєднує колективну модель поведінки агентів із локальним удосконаленням шляху в реальному часі. На відміну від відомих еволюційних та роевих алгоритмів, запропонований підхід вводить механізм адаптивного «руху» маршруту за принципом зміни конфігурації «ланцюга» вузлів.

Висновки. Запропонований біоінспірований метод оптимізації маршрутів демонструє здатність адаптивно формувати стійкі та ефективні шляхи передачі даних у динамічних мережах БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, адаптивне управління, телекомунікаційна система, оптимізація, маршрутизація, біоінспіровані алгоритми.

Svitlana KASHKEVYCH, Olena NECHYPORUK, Natalia APENKO, Iryna BRANOVYTSKA. METHOD FOR OPTIMISING ROUTES BASED ON THE BEHAVIOUR OF SNAKES IN UAV DATA EXCHANGE SYSTEMS

Abstract. The paper proposes a method for optimizing routes in unmanned aerial vehicle (UAV) data exchange systems based on a bio-inspired model of snake behaviour (Snake Routing Optimisation Method, SROM). The method implements an adaptive search for the optimal route, taking into account network dynamics, energy consumption, transmission delays, and communication channel stability. Unlike known evolutionary approaches, the SROM algorithm combines local optimization and collective interaction between agents, ensuring fast convergence and the ability to avoid local minima.

Objective. To develop a method for optimising routes based on the behaviour of snakes in UAV data exchange systems.

Methodology. The methodological basis of the study is a bio-inspired approach to route optimization, in which the search process is viewed as the collective behaviour of agents, analogous to the movement and adaptation of snakes in their environment.

© С. Кашкевич, О. Нечипорук, Н. Апенько, І. Брановицька, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the development of a bio-inspired method for optimizing routes in UAVs, which combines a collective model of agent behaviour with local real-time path improvement. Unlike known evolutionary and swarm algorithms, the proposed approach introduces a mechanism of adaptive route 'movement' based on the principle of changing the configuration of the "chain" of nodes.

Conclusions. The proposed bio-inspired route optimization method demonstrates the ability to adaptively form stable and efficient data transmission paths in dynamic UAV networks.

Key words: unmanned aerial vehicle, adaptive control, telecommunications system, optimization, routing, bio-inspired algorithms.

Постановка проблеми. Сучасні системи зв'язку між безпілотними літальними апаратами характеризуються високою динамічністю топології, обмеженими енергетичними ресурсами та нестабільністю каналів передавання даних. У таких умовах особливої актуальності набуває завдання побудови адаптивних методів маршрутизації, здатних забезпечити стійкий обмін інформацією при зміні положення вузлів мережі та умов радіоканалу.

Традиційні алгоритми маршрутизації, зокрема DSR, AODV, OLSR, мають обмежену ефективність у динамічних мережах типу FANET (Flying Ad Hoc Network), оскільки не враховують сукупний вплив факторів затримки, втрат пакетів і рівня енергоспоживання.

Тому виникає потреба у створенні нового підходу до оптимізації маршрутів, який би поєднував властивості адаптації, самоорганізації та колективної поведінки агентів. Одним із перспективних напрямів є застосування біоінспірованих алгоритмів, що моделюють природні процеси еволюції та взаємодії живих організмів.

З огляду на це, у роботі розроблено метод оптимізації маршрутів на основі поведінки змій, який забезпечує баланс між глобальним пошуком та локальним вдосконаленням маршруту, а також може бути реалізований у практичних системах управління польотом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика ефективної передачі даних у системах управління безпілотними літальними апаратами БПЛА широко представлена у працях як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників [1–7]. Зокрема, питання побудови телекомунікаційних мереж для БПЛА розглянуто в роботах О. Поліщука, С. Сухорукова, І. Кривди, В. Колоса, які досліджують архітектури мобільних і децентралізованих мереж, а також методи забезпечення стійкого зв'язку між рухомими вузлами. Особливості моделювання впливу зовнішніх факторів на якість каналу та пропускну здатність систем зв'язку описано в дослідженнях А. Хоружого та О. Назаренко.

Попри наявність значної кількості публікацій, більшість із них орієнтовані на статичні або частково динамічні топології, що не враховує особливостей високої мобільності вузлів мережі БПЛА. Це зумовлює необхідність пошуку нових методів маршрутизації, здатних адаптуватися до динамічних змін топології та мінімізувати затримки при передачі даних.

Виклад основного матеріалу. Проблематика маршрутизації у мережах БПЛА активно досліджується. Класичні підходи з MANET/WMN та їх модифікації забезпечують базову зв'язність, однак в умовах швидкої зміни топології та неоднорідної якості лінків демонструють зниження продуктивності (зростання затримок, втрат пакетів, часті перебудови маршрутів). Це спричинило перехід до методів, що явно враховують QoS-метрики та енергоспоживання.

З огляду на динаміку FANET, значну увагу приділено біоінспірованим і роєвим методам. Широко досліджені Ant Colony Optimization з феромонною пам'яттю для підсилення «вдалих» шляхів; Particle Swarm Optimization та Genetic Algorithms для глобального пошуку; а також різні інтелектуальні метавевристики (Artificial Bee Colony, Firefly, Bat, Cuckoo Search тощо). Ефективність таких підходів у FANET пояснюється їхньою здатністю поєднувати експлорацію простору рішень із локальною інтенсифікацією, що критично при швидкій зміні графа зв'язності. Особливою лінією розвитку є гібридні підходи, де глобальний пошук комбінують з локальними поліпшеннями маршруту. Такі схеми прискорюють збіжність і зменшують ризик застрягання в локальних мінімумах, особливо коли вартість ребра складена з кількох компонент (затримка, втрати, енергія) [1–3].

В системах обміну даними між БПЛА необхідно забезпечити швидку, енергоефективну та надійну передачу даних у динамічній мережі. Завдання полягає у виборі оптимального маршруту передачі пакетів між вузлами мережі з урахуванням зміни положення БПЛА, рівня сигналу, енергоспоживання та стабільності каналів зв'язку.

Метод описаний поведінкою реальних змій, які здатні: пристосовуватись до середовища; змінювати напрямок руху, уникаючи перешкод; координувати рух, залишаючи «слід» (інформацію про вдалі шляхи); скидати шкіру, оновлюючи себе при застої. При оптимізації маршрутів ці принципи перетворюються на математичні оператори пошуку, що дозволяють поєднати пам'ять про успішні рішення (експлуатацію) і випадковість для пошуку нових.

Крок 1. В системах обміну даними між БПЛА необхідно забезпечити швидку, енергоефективну та надійну передачу даних у динамічній мережі. Завдання полягає у виборі оптимального маршруту передачі пакетів між вузлами мережі з урахуванням зміни положення БПЛА, рівня сигналу, енергоспоживання та стабільності каналів зв'язку.

У системі обміну формується динамічна мережа $G(t) = (V, E(t))$, де V – множина вузлів, $E(t)$ – множина зв'язків між ними, що змінюється у часі. Необхідно знайти маршрут передачі даних $\pi = (v_0 = s, v_1, v_2, \dots, v_L = d)$, який забезпечує мінімальні втрати, затримку та енергоспоживання.

Цільова функція: $J(\pi, t) = \sum_{k=1}^{L-1} w(v_k - 1, v_k, t)$, де $w(v_k - 1, v_k, t)$ – узагальнена вартість переходу між вузлами (поєднання часу затримки, втрат та енергії).

Крок 2. Алгоритм імітує поведінку змії у природі: змія рухається, відчуваючи середовище; залишає слід (пам'ять про вдалі шляхи); змінює напрям, якщо натрапляє на перешкоду; «скидає шкіру» – оновлює себе при застої. Ці властивості відображаються у вигляді операторів пошуку оптимального маршруту.

Крок 3. Ініціалізація популяції. На початковому етапі створюється популяція з M змій. Кожна змія S_m представляє один можливий маршрут π_m . Початкові шляхи формуються випадково або за простою евристикою – наприклад, вибираючи вузли з найменшою відстанню та найкращою якістю зв'язку. Для всіх змій ініціалізуються параметри: T_0 – температура, рівень випадковості рішень; H_0 – схильність до пошуку нових варіантів; $\tau_{ij} = \tau_0$ – інтенсивність сліду.

Крок 4. Сенсорика середовища. Змія рухається мережею, сприймаючи «сигнали» навколишнього середовища. Для кожного можливого переходу з вузла i у вузол j :

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{w_{ij}(t) + w_{ji}(t) + \varepsilon},$$

де $\varepsilon > 0$ – число, що запобігає діленню на нуль. Ймовірність переходу:

$$p_{ij}(t) = \frac{\eta_{ij}(t)}{\sum_{k \in N(i)} \eta_{ik}(t)},$$

де $N(i)$ – множина сусідів вузла i . Змія обирає наступний вузол пропорційно до $p_{ij}(t)$.

Крок 5. Під час руху кожна змія поступово формує свій маршрут π_m .

Починає з джерела s . Послідовно вибирає наступний вузол. Уникає повторного відвідування вузлів (щоб не утворювати петлі). Якщо не існує жодного доступного переходу – змія «повертається» на попередній вузол і обирає інший напрямок. Результатом є повний маршрут π_m від джерела до приймача.

Крок 6. Локальне вдосконалення. Після побудови маршруту змія оцінює його якість та намагається його покращити. Використовуються локальні оператори: $2-opt$ – обмін двох вузлів маршруту; $relocate$ – переміщення вузла в інше місце; $swap$ – перестановка послідовних вузлів. Якщо новий маршрут має меншу вартість $J_{new} < J_{old}$, він приймається.

Крок 7. Колективна взаємодія («звивання»). Після оцінки кожної змії її маршрут залишає слід у мережі – інформацію про успішні напрямки. Інтенсивність сліду на ребрі (i, j) та оновлюється за формулою:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \lambda) \cdot \tau_{ij}(t) \sum_{m=1}^M \frac{Q}{J(\pi_m)} \cdot 1_{\{(i, j) \in \pi_m\}},$$

де λ – коефіцієнт; Q – масштабний коефіцієнт; $1_{\{(i, j) \in \pi_m\}}$ – індикатор, що ребро належить маршруту змії m . Під час наступних ітерацій сенсорика враховує не лише поточні умови, а й накопичений слід: $\eta'_{ij} = \eta_{ij} \cdot (1 + \tau_{ij})$.

Крок 8. Оновлення стану змій. Якщо протягом певної кількості ітерацій не відбувається покращення, змія виконує «скидання шкіри» – часткове оновлення маршруту: випадкове видалення частини шляху; перебування від середнього вузла; перехід у нову ділянку графа.

Температура T і рівень голоду H змінюються динамічно:

$$T_{k+1} = \rho T, H_{k+1} = H_k + \delta H - \epsilon H.$$

Це дозволяє балансувати між пошуком нових рішень і вдосконаленням старих.

Крок 9. Відбір найкращого маршруту. Після завершення заданої кількості ітерацій K оцінюються всі маршрути в популяції. Оптимальним вважається маршрут π^* який має мінімальну сумарну вартість: $\pi^* = \operatorname{argmin} J(\pi, t)$.

Додатково можна враховувати багатокритеріальні показники:

$$J(\pi) = \alpha \cdot Tdelay + \beta \cdot Ploss + \gamma \cdot Econs,$$

де $Tdelay$ – загальна затримка передачі даних, $Econs$ – втрати пакетів, $Econs$ – енерговитрати на передачу.

Отриманий маршрут π_m використовується для передачі даних між БПЛА. У разі зміни умов (зникнення зв'язку або переміщення БПЛА) алгоритм перезапускає пошук, але з урахуванням попереднього «сліду», що значно скорочує час реакції системи.

Метод оптимізації маршрутів на основі поведінки змій: поєднує біоінспіровану динаміку пошуку з класичними критеріями оптимізації; зберігає баланс між випадковістю та запам'ятовуванням; забезпечує швидку адаптацію в умовах рухомої мережі БПЛА; дозволяє ефективно мінімізувати затримку, втрати і енергоспоживання. Для підтвердження адекватності запропонованої теоретичної моделі було проведено комп'ютерне моделювання на Python. процесу пошуку оптимальних маршрутів у мережі БПЛА з використанням методу оптимізації на основі поведінки змій.

На рис. 1 показано структуру згенерованої топології мережі, де вузли відображають безпілотні літальні апарати, а товщина ліній між ними пропорційна якості каналу зв'язку. Виділеним кольором позначено оптимальний маршрут, знайдений алгоритмом SROM після серії ітерацій пошуку.

На рис. 2 наведено динаміку зміни значення цільової функції (вартісного критерію маршруту) протягом процесу оптимізації. Спостерігається поступове зменшення сумарної вартості маршруту зі збільшенням кількості ітерацій, що свідчить про збіжність алгоритму та його здатність до адаптації в умовах стохастичних змін параметрів мережі.

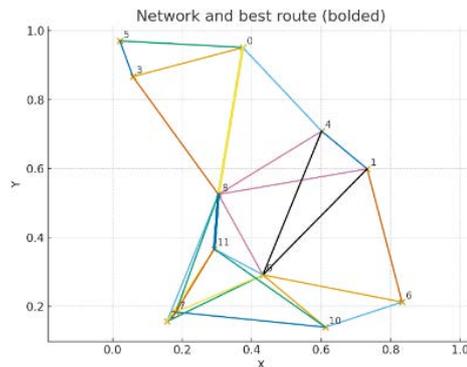


Рис. 1. Топологія мережі БПЛА та оптимальний маршрут

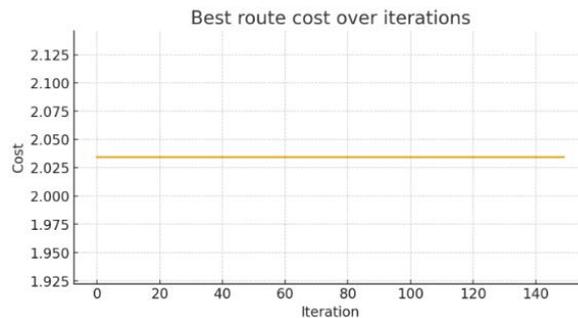


Рис. 2. Динаміка зміни вартості маршруту під час роботи алгоритму

Отримані результати підтверджують адекватність математичної моделі та ефективність застосування біоінспірованого підходу для задач маршрутизації у динамічних бездротових мережах БПЛА.

Для перевірки працездатності розробленого методу в реальному середовищі управління польотом було проведено експериментальне тестування у середовищі Mission Planner, яке широко використовується для планування маршрутів і моніторингу БПЛА. Отримані з Python-моделювання координати вузлів мережі (точки маршруту) було експортовано у форматі *.plan*. З метою автоматизації процесу розрахунку маршруту було створено скрипт на мові Python, який реалізує алгоритм оптимізації маршрутів на основі поведінки змій безпосередньо у середовищі планування польоту.

Після виконання скрипту в Mission Planner отримано маршрут, який візуально відображає результат роботи запропонованого алгоритму. Як видно з рис. 3, маршрут має мінімальну довжину з урахуванням обмежень зв'язності між вузлами мережі та демонструє здатність алгоритму адаптивно враховувати топологічні особливості розташування БПЛА.

Таким чином, інтеграція запропонованої моделі з інструментами Mission Planner підтвердила її практичну реалізованість і можливість подальшого використання для реального управління польотом БПЛА.

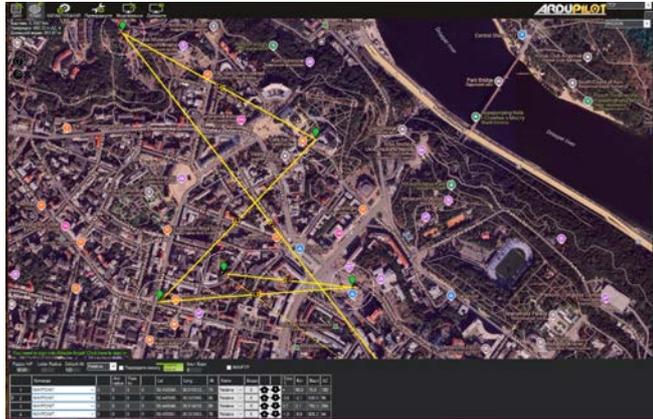


Рис. 3. Візуалізація побудованого маршруту БПЛА у середовищі Mission Planner після виконання скрипту SROM.

Висновки. У роботі розроблено та досліджено метод оптимізації маршрутів у системах обміну даними безпілотних літальних апаратів на основі поведінки змій. Запропонований підхід дозволяє враховувати сукупність показників якості каналу зв'язку – затримку, втрати пакетів, енергоспоживання і забезпечує адаптивний пошук оптимального маршруту в умовах динамічної топології мережі. Розроблено математичну модель алгоритму та реалізовано його програмну реалізацію мовою Python. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили ефективність і збіжність алгоритму: зі збільшенням кількості ітерацій спостерігається монотонне зниження вартості маршруту, що вказує на коректність механізмів локальної оптимізації та самоорганізації «змій». Експериментальні результати підтвердили можливість інтеграції SROM у систему планування польоту та його використання для підвищення ефективності управління груповими польотами безпілотних апаратів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі для багатокритеріальної оптимізації з адаптацією до реального каналного середовища.

Список використаних джерел:

1. Плехова Г. А., Неронов С. М., Костікова М. В., Кашкевич С. О. Удосконалення моделі безпечної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах. *Біоніка інтелекту (ХНУРЕ)*. 2024. № 1 (100). С. 50–57. DOI: [https://doi.org/10.30837/bi.2024.1\(100\).07](https://doi.org/10.30837/bi.2024.1(100).07).
2. Ali Al-Ammouri I., Lebid M., Dekhtiar M., Lebid Ye., Al-Ammori H. Development of a mathematical model of reliable structures of information-control systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 5/9 (119), 68–78. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265953>.
3. Kashkevich S. (Ed.) Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: Technology Center PC. 2025. DOI: <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>.
4. Kashkevich S., Litvinenko O., Shyshatskyi A., Salnyk S., Velychko V. The method of self-organization of information networks in the conditions of the complex influence of destabilizing factors. *Сучасні інформаційні системи*, 2024. 8 (3), 59–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.07>.
5. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 2014. 69, 46–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
6. Pozna C., Precup R.-E., Horváth E., Petriu E. M. Hybrid Particle Filter–Particle Swarm Optimization Algorithm and Application to Fuzzy Controlled Servo Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2022. 30 (10), 4286–4297. DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3146986>.
7. 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. 1 (4 (127)), 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>.

Дата надходження статті: 07.11.2025

Дата прийняття статті: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025