

УДК 004.7:[629.7.04:004.9

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.060501

Д. В. ШПОРТ, аспірант,

ORCID: 0009-0000-1376-2010

К. Г. ЛАВРІНЕЦЬ, канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0009-0000-4846-3977

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ МУРАШИНОЇ КОЛОНІЇ - ANTHOSNET ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ У FANET

FANET (Flying Ad-Hoc Networks) – це різновид бездротових мереж, які формуються групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), здатних взаємодіяти між собою без централізованого управління.

Однією з ключових властивостей FANET є їхня здатність до самоорганізації, що дозволяє мережі адаптуватися до змін топології та забезпечувати безперервний обмін даними між БПЛА. Такі мережі можуть швидко змінювати маршрути передачі інформації залежно від розташування вузлів, що особливо актуально для пошуково-рятувальних операцій, моніторингу середовища, збору розвідувальної інформації та інших завдань, які вимагають оперативного охоплення великих територій та обробки даних. Крім того, FANET здатні забезпечувати зв'язок у надзвичайних ситуаціях, коли традиційні засоби комунікації недоступні або пошкоджені. Інтеграція штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання може значно підвищити ефективність маршрутизації та сприяти адаптації мережі до змін в реальному часі. Це створює передумови для розробки ще більш автономних та ефективних рішень, які підвищують стабільність і продуктивність мереж.

Через високу мобільність вузлів і постійні зміни топології маршрутизація в FANET є вкрай складним завданням. Традиційні протоколи маршрутизації, які застосовуються в стаціонарних або наземних мережах, виявляються неефективними для FANET, оскільки вони не враховують постійних змін у координатах і швидкості вузлів. Для забезпечення стабільної та надійної передачі даних створюються спеціалізовані алгоритми, які враховують тривимірну динаміку руху та забезпечують високу ефективність навіть за умов високої швидкості руху вузлів.

У даній статті представлені результати дослідження, спрямованого на вдосконалення маршрутної взаємодії в мережах FANET. Особливу увагу приділено використанню мурашиних алгоритмів для вирішення задач маршрутизації. Проведені експерименти підтвердили, що протокол AntHocNet, заснований на принципах роботи мурашиних колоній, значно покращує якість передачі даних у FANET. Отримані результати відкривають нові можливості для створення інтелектуальних і адаптивних систем бездротового зв'язку.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, FANET, однорангові мережі, маршрутизаційні протоколи, ройовий інтелект, мурашині алгоритми, моделювання мереж, імітаційні методи.

Вступ

FANET (Flying Ad-Hoc Network) є типом мереж, що базується на принципах мобільних однорангових мереж MANET (Mobile Ad-Hoc Network) і автомобільних однорангових мереж VANET (Vehicular Ad-Hoc Network). До складу FANET входять безпілотні літальні апарати (БПЛА), які виконують роль вузлів мережі (рис. 1) [1]. Основні відмінності та характеристики зазначених Ad-Hoc мереж представлені у таблиці [2].

Мережі FANET надають значний потенціал для використання в цивільних цілях. Вони

є ефективними не лише для завдань моніторингу та спостереження, але також можуть застосовуватись для координації транспортних потоків, підвищення рівня безпеки руху (наприклад, для запобігання аварійним ситуаціям), а також для виконання інших важливих функцій [3].

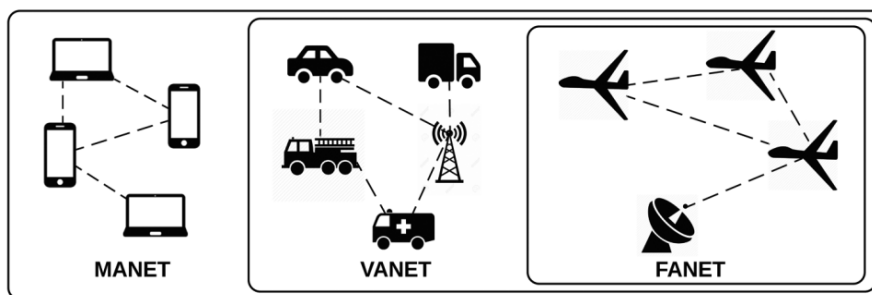


Рис. 1. MANET, VANET та FANET

Порівняльна характеристика типів Ad Hoc мереж

Критерії	Види Ad Hoc мереж		
	FANET	VANET	MANET
Мобільність вузлів	Висока	Середня	Низька
Модель переміщення мережних вузлів	Зазвичай наперед визначені, використовуються спеціальні моделі	Постійне	Довільне
Щільність розміщення вузлів	Низька	Середня	Висока
Зміна топології	Вкрай висока	Середня	Повільна
Поширення радіохвиль	Високо над землею, пряма видимість (Line of Sight, LoS) доступна в більшості випадків	Близько землі, LoS доступна	Дуже близько до землі, LoS недоступна
Потужність і термін служби мережі	Критично для міні БПЛА	Некритично	Використання енергоефективних протоколів
Обчислювальні ресурси	Високі	Середні	Обмежені
Визначення розташування	GPS, AGPS, DGPS, IMU	GPS, AGPS, DGPS	GPS

Мережі FANET вирізняються високою мобільністю вузлів, постійно змінною топологією та рухом у тривимірному просторі. Ці особливості створюють значні труднощі в організації зв'язку та потребують застосування спеціалізованих протоколів. Робота вузлів обмежується такими факторами, як доступні частотні ресурси, енергетичні можливості пристроїв, а також умови поширення радіосигналу. Передача даних між відправником і кінцевим отримувачем відбувається через випадковий ланцюжок проміжних вузлів. У результаті вузли не лише отримують інформацію, але й виконують роль маршрутизаторів, сприяючи доставці даних до проміжних точок. На рис. 2 наведено схематичне зображення структури мережі FANET.

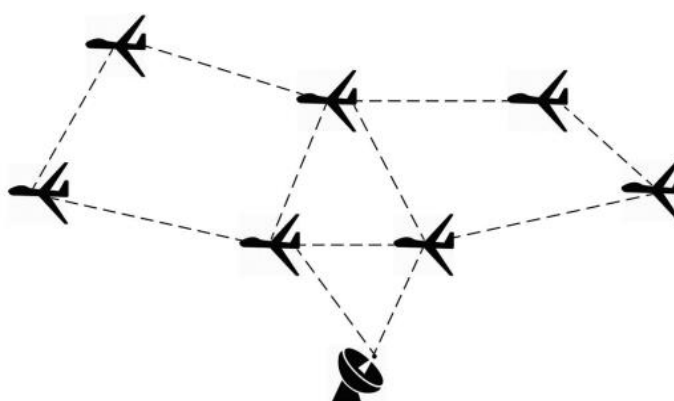


Рис. 2. Мережа, що самоорганізується, на основі БПЛА (FANET)

Враховуючи унікальні характеристики мереж FANET, процес маршрутизації даних між вузлом-відправником, вузлом-одержувачем і проміжними транзитними вузлами постає як надзвичайно складна задача. Це зумовлено постійною динамікою мережі, її тривимірною топологією, високою мобільністю вузлів та іншими технічними факторами, які впливають

на передачу інформації.

У статті проведено детальний аналіз можливостей застосування мурашиних алгоритмів для оптимізації маршрутизації в мережах FANET. Результати були отримані в ході експериментального імітаційного моделювання, яке дозволило оцінити ефективність цих алгоритмів у вирішенні зазначених завдань.

Класифікація протоколів динамічної маршрутизації у мережі FANET

Алгоритми маршрутизації використовуються для визначення оптимального шляху передачі даних від вузла-джерела до вузла-призначення, забезпечуючи максимальну ефективність і мінімізацію витрат. Вони є ключовою складовою будь-якого протоколу маршрутизації.

Вибір відповідного протоколу для FANET є складним завданням, яке потребує врахування різноманітних факторів і критеріїв.

Існує п'ять основних категорій таких протоколів [2]: проактивні, реактивні, гібридні, ієрархічні та географічно-орієнтовані (гео маршрутизація).

Проактивні протоколи базуються на регулярному оновленні інформації про топологію мережі, що здійснюється через ширококомовну передачу повідомлень. Усі маршрути зберігаються у пам'яті кожного вузла, що дозволяє створити граф зв'язності, завдяки якому забезпечується швидкий пошук найкоротшого маршруту..

Реактивні протоколи створюють маршрути виключно в момент їхньої необхідності, тобто перед початком передачі даних.

Гібридні протоколи поєднують властивості проактивних і реактивних підходів, використовуючи їх сильні сторони для підвищення ефективності.

Окрему групу складають протоколи, які базуються на інформації про географічне положення вузлів мережі. Їх перевагою є відсутність необхідності зберігати дані про маршрути на транзитних вузлах, що дозволяє оптимізувати процес передачі інформації завдяки точним даним про місцезнаходження вузлів.

Ієрархічні протоколи маршрутизації є ще одним підходом до вирішення задачі масштабованості мереж FANET. У таких мережах вузли об'єднуються у кластери (групи, шари або домени), де кожен кластер має головний вузол, шлюзи та внутрішні вузли. Основною перевагою такого підходу є можливість ефективної організації великих мереж, хоча його недоліком є висока складність реалізації та специфіка схеми адресації.

Загальні положення алгоритму мурашиної колонії

Принципи функціонування біологічних систем управління, які забезпечують здатність живих організмів пристосовуватися до змін навколишнього середовища, активно досліджуються у провідних наукових установах. Значну увагу приділяють методам ройового інтелекту, які отримали особливий розвиток. Термін "ройовий інтелект" (Swarm Intelligence) вперше був запропонований Херардо Бені та Ван Цзіном у 1989 році [4]. Ройовий інтелект визначають як самоорганізовану систему, що складається з множини агентів. Вони діють за простими правилами взаємодії з навколишнім середовищем, а їхня спільна діяльність забезпечує колективну адаптацію. У результаті така колективна поведінка формує ройовий інтелект.

Мурашиний алгоритм (Ant Colony Optimization – ACO) є одним із метаевристичних підходів ройового інтелекту, який вважається ефективним методом для вирішення задач комбінаторної оптимізації. Зокрема, він використовується для задачі комівояжера (Travelling Salesman Problem – TSP) та інших завдань, що моделюються графовими структурами [5].

Цей алгоритм базується на дослідженнях поведінки мурах

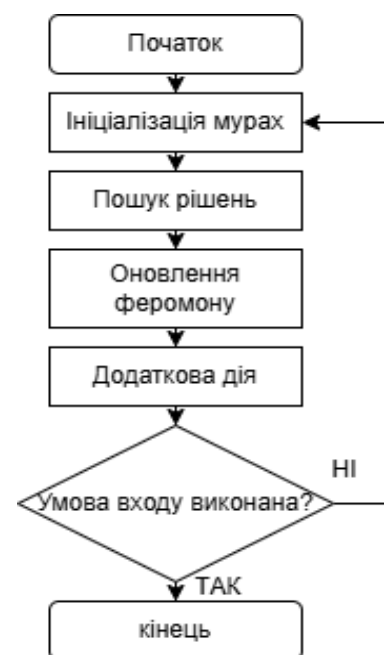


Рис. 3. Блок-схема мурашиного ACO алгоритму

у природних умовах. Виділяють два основні типи взаємодії між особинами:

- **пряма взаємодія**, яка включає обмін їжею, хімічний або візуальний контакт;
- **непряма взаємодія**, відома як стигмергія (Stigmergy), коли одна особина змінює навколишнє середовище, а інша реагує на ці зміни.

У природі непряма взаємодія забезпечується через феромони – спеціальні хімічні речовини, що залишаються на поверхні під час пересування мурах. Висока концентрація феромонів на певному маршруті приваблює більше мурах, які рухаються цим шляхом. Згодом феромони випаровуються, що дозволяє комахам динамічно змінювати поведінку відповідно до умов середовища.

На рис. 3 представлена блок-схема мурашиного алгоритму.

Протоколи маршрутизації на основі алгоритму мурашиної колонії

Підхід, що лежить в основі алгоритму мурашиної колонії, виявив свою високу ефективність у розв'язанні завдань оптимізації для розподілених динамічних систем, які можуть бути представлені у вигляді графових моделей. Нижче розглянуто кілька реалізацій протоколів маршрутизації з використанням принципів АСО.

Алгоритм ABC. Одним із перших методів, створених для розв'язання задачі балансування навантаження в телекомунікаційних мережах, став алгоритм ABC [6]. У цьому підході мережа моделюється у вигляді графа, де вузлами виступають телекомунікаційні станції, а ребрами – лінії зв'язку між ними.

Кожен вузол у мережі має феромонну таблицю, яка складається з $N - 1$ колонок та N_k рядків, де N – загальна кількість вузлів у мережі, а N_k – кількість вузлів, безпосередньо пов'язаних із вузлом k .

З певною періодичністю кожен вузол ініціює запуск мурах, які спрямовуються до випадкових вузлів-приймачів. У процесі руху мурахи обирають проміжні вузли, спираючись на інформацію з феромонної таблиці. Наприклад, якщо j – це вузол-приймач, тоді ймовірність того, що мураха перейде до сусіднього вузла i позначається як P_{ij} . Коли мураха досягає чергового проміжного вузла, відбувається оновлення феромонної таблиці цього вузла, що враховує нові дані для подальшого маршрутизаційного вибору:

$$\begin{cases} P'_{n,src} = \frac{P_{n,src} + \Delta P}{1 + \Delta P} \\ P'_{j,src} = \frac{P_{j,src}}{1 + \Delta P}, i = 1..N_k, i \neq n \end{cases} \quad (1)$$

де n – вузол, з якого прибула мураха; src – вузол-джерело, що ініціював створення мурахи;

$P_{n,src}$, $P'_{n,src}$ – старе і нове значення осередків у феромонній таблиці відповідно; ΔP – приріст феромону.

Коли мураха досягає кінцевого вузла призначення, вона знищується.

Вік мурахи, що дорівнює кількості вузлів, пройдених нею під час маршруту, позначається як age . Цей показник безпосередньо впливає на значення ΔP :

$$\Delta P = \frac{0,08}{age} + 0,005 \quad (2)$$

На вибір маршруту найбільший вплив мають мурахи, які знаходять найкоротший і менш завантажений шлях. Це пояснюється тим, що такі мурахи швидше досягають кінцевого вузла, мають менший вік, а отже, їхній вплив на значення ΔP є більшим. У результаті дані передаються маршрутами, які характеризуються мінімальною довжиною та найнижчим рівнем завантаженості, що сприяє досягненню балансування навантаження в мережі [7].

Алгоритм AntNet. Алгоритм AntNet [8] використовує агентів (мурах) для аналізу стану мережі шляхом застосування ймовірнісних правил вибору маршрутів. Завдяки цьому підходу вдається зменшити ризик перевантаження мережі.

Агенти AntNet представлені спеціальними пакетами, що містять інформацію про стан каналів мережі, якими вони проходять. Мурахи поділяються на два типи:

F-мурахи (Forward ants), які рухаються від вузла-джерела до вузла призначення,

В-мурахи (Backward ants), що повертаються назад від вузла призначення до вузла-джерела. Обидва види агентів мають однакову структуру, але виконують різні функції у мережі. F-мурахи збирають статистичні дані про стан мережі, оновлюючи таблиці маршрутизації під час проходження вузлів. Коли F-мураха досягає кінцевого вузла, на її основі створюється В-мураха, яка отримує всю зібрану інформацію. Після цього F-мураха видаляється. В-мурахи, рухаючись зворотнім шляхом, оновлюють таблиці маршрутизації вузлів, через які проходять. Кожен вузол мережі періодично, з інтервалом Δt , ініціює запуск F-мурах.

Кожен вузол мережі містить таблицю маршрутизації T_k та локальну модель трафіку M_k . Таблиця T_k представлена у вигляді матриці, де кожен рядок відповідає окремому вузлу мережі, а кожен стовпець – мережевому інтерфейсу вузла. Для кожного потенційного вузла d та кожного сусіднього вузла n таблиця T_k зберігає ймовірність P_{nd} що визначає вибір вузла n за умови, що вузлом-приймачем є d :

$$\sum_{n \in N_k} P_{nd} = 1, d \in [1, N]$$

$$N_k = \{k \text{ node neighbors}\} \quad (3)$$

Структура M_k представлена як масив, що описує локальну параметричну модель трафіку з точки зору вузла k .

Ця модель має адаптивний характер і створюється для кожного вузла d . Вона включає математичне очікування μ_d та дисперсією σ_d часу обходу мережі агентами, а також масив ковзного вікна спостережень W_d . У момент прибуття В-мурахи до вузла k , час досягнення вузла d з вузла k позначений як $o_{k \rightarrow d}$ додається до масиву W_d . Для визначення характеристик алгоритму застосовується експоненційна модель:

$$\mu_d := \mu_d + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d), \quad (4)$$

$$\sigma_d^2 := \sigma_d^2 + \eta(o_{k \rightarrow d} - \mu_d)^2 - \sigma_d^2, \quad (5)$$

де η - ваговий коефіцієнт.

Масив ковзного вікна спостережень W_d використовується для обчислення значення W_{std} , що є експериментальною оцінкою нижньої межі часу досягнення вузла d із поточного вузла k .

Множини $\{T_k\}$ і $\{M_k\}$ формують локальну пам'ять вузлів. Модель M_k забезпечує абсолютні оцінки часу або відстані до всіх вузлів мережі, тоді як таблиця маршрутизації T_k зберігає відносні ймовірнісні оцінки корисності для кожної пари "лінія зв'язку – вузол-приймач".

Мурахи адаптують свої траєкторії відповідно до змін у розподілі трафіку даних. Вибір вузлів-приймачів для F-мурах здійснюється залежно від трафіку. Якщо $f_{sr,d}$ – позначає величину потоку даних (у бітах або кількості пакетів) між вузлом s до вузла d , тоді ймовірність створення у вузлі src F-мурахи з вузлом-приймачем d :

$$p_d = \frac{f_{sr,d}}{\sum_{d'=1}^N f_{sr,d'}} \quad (6)$$

У кожному вузлі k F-мураха обирає проміжний вузол n з множини тих вузлів, які ще не були відвідані. Якщо агент уже відвідав усі суміжні вузли, пов'язані з вузлом k , то вибір вузла n із суміжних здійснюється з ймовірністю:

$$P'_{nd} = \frac{P_{nd} + \alpha \cdot l_n}{1 + \alpha(N_k - 1)}, \quad (7)$$

де P_{nd} - елемент таблиці маршрутизації; α – ваговий коефіцієнт; l_n враховує довжину в бітах черги q_n до лінії зв'язку між вузлами k і n :

$$l_n = 1 - \frac{q_n}{\sum_{n'=1}^{|N_k|} q_{n'}} \quad (8)$$

Якщо в стеку F-мураха виявлено цикл, тобто вона повертається до вже відвіданого вузла, вся інформація про вузли, які входять до цього циклу, видаляється зі стека.

В-мурахи використовують пріоритетні черги для максимально швидкого поширення між вузлами даних, зібраних F-мурахами.

Коли В-мураха досягає вузла k із сусіднього вузла f , у вузлі k відбувається оновлення моделі трафіку M_k та елементів таблиці маршрутизації T_k , які відповідають вузлу-приймачу d . Модель M_k коригується відповідно до формул (4) та (5).

У таблиці T_k підвищується значення ймовірності P_{fd} (ймовірності вибору сусіднього вузла f якщо вузол-приймач d) і пропорційно зменшуються інші ймовірності P_{nd} шляхом нормалізації:

$$P_{fd} := P_{fd} + r(1 - P_{fd}) \tag{9}$$

$$P_{nd} := P_{nd} - rP_{nd}, n \in N_k, n \neq f, \tag{10}$$

де $r \in [0,1]$ - коефіцієнт стабілізації, який виконує роль аналога феромонів.

Застосування алгоритму з використанням ймовірнісних маршрутних таблиць дозволяє підвищити продуктивність мережі на 30–40 % [7].

Застосування протоколів маршрутизації на основі алгоритму мурашиної колонії в самоорганізованих мережах.

Алгоритми мурашиної оптимізації суттєво відрізняються від більшості традиційних підходів до маршрутизації. Для вирішення задач маршрутизації в мережах, здатних до самоорганізації, було розроблено низку алгоритмів ACO, таких як AntNet, ANTMANET, ARA, AntNet-RSLR, ACODV, MRAA, AntHocNet, ANT-DSR, ANT-DYMO, HOPNET тощо.

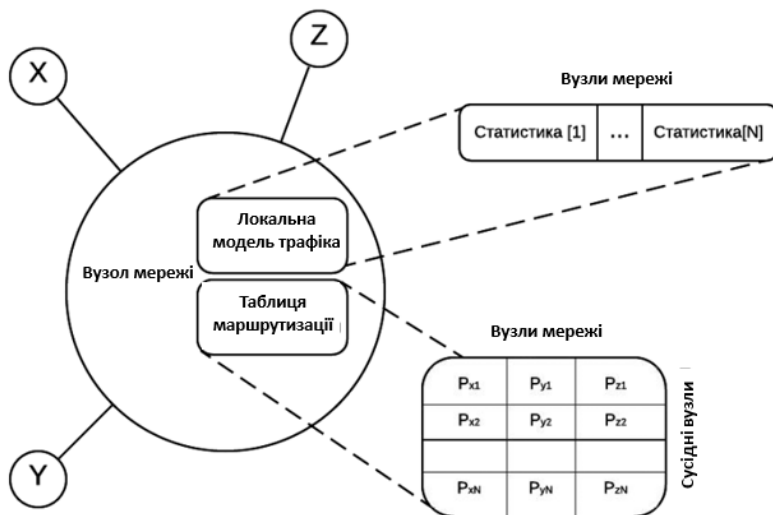


Рис. 4. Структура феромонної таблиці

Маршрутна інформація зберігається у феромонних таблицях, що мають форму двовимірних матриць типу "дистанція-вектор". У природі аналогічну функцію виконують феромони. Контрольні пакети й дані пересилаються стохастично, використовуючи ці таблиці (рис. 4). Кожен вузол мережі, наприклад, може мати як сусідів вузли X, Y і Z, а вузли-приймачі представлені всіма вузлами мережі. Загалом мережа включає N вузлів.

Мурашині алгоритми здійснюють збір маршрутної інформації шляхом багаторазового семплювання можливих шляхів між вузлом-джерелом та вузлом-приймачем, використовуючи спеціальні контрольні пакети, відомі як мурахи.

У високомобільних мережах, таких як FANET, для підвищення надійності та ефективності застосовуються механізми побудови резервних маршрутів, що виключають використання спільних мережевих вузлів. Крім того, використовуються процедури відновлення маршрутів, за якими передавалися дані, у разі розриву з'єднання, та інші подібні підходи.

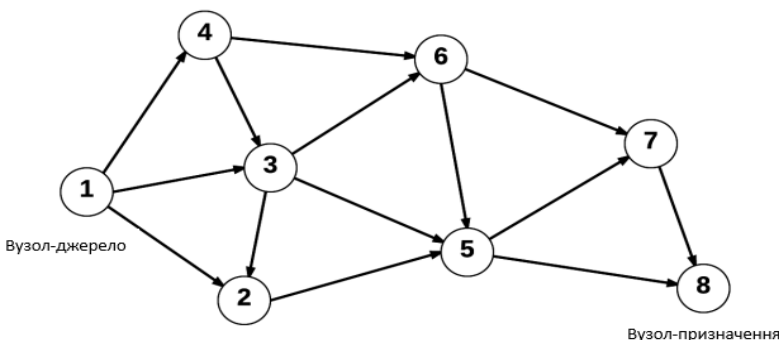


Рис. 5. Установлення реактивного з'єднання. RF-мураха здійснює пошук маршруту до вузла призначення

Найвищу ефективність показали гібридні алгоритми. Розглянемо приклад гібридного багатопляхового алгоритму AntHocNet. Цей алгоритм використовує три типи мурах: реактивні RF-мурахи (reactive forward ants), проактивні PF-мурахи (proactive forward ants) (рис. 5) та В-мурахи (backward ants). Реактивні RF-мурахи виконують пошук маршруту до вузла

призначення. Досягнувши його, вони перетворюються на В-мурахи, які повертаються до початкового вузла для оновлення таблиць маршрутизації. Під час передачі даних запускаються проактивні RF-мурахи, які контролюють якість використовуваних маршрутів. Ці агенти, з низькою ймовірністю, можуть бути відправлені широкомовною розсилкою для виявлення нових потенційно ефективних шляхів.

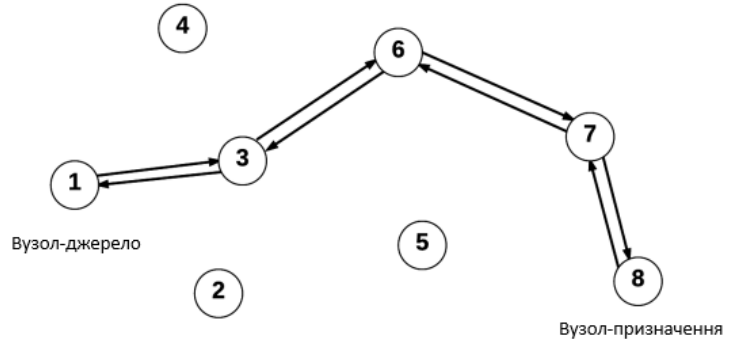


Рис. 6. Трансформація RF-мурахи в В-мурахи. RF-мураха змінюється на В-мурахи для повернення до вузла-джерела

Шлях $Path$, пройдений RF-мурахою, зберігається у стеку та використовується В-мурахою для повернення до вузла-джерела (рис. 6). В-мураха покроково визначає час \hat{T}_{Path} , який потрібен для доставки пакета даних до вузла призначення через маршрут $Path$. Отримане значення використовується для оновлення записів у таблиці маршрутизації:

$$\hat{T}_{Path} = \sum_{i=1}^{n-1} \hat{T}_{i \rightarrow i+1}, i \in Path, \quad (11)$$

де, $\hat{T}_{i \rightarrow i+1}$ – локальна оцінка часу передачі між вузлом i і вузлом $i + 1$ яка визначається за формулою:

$\hat{T}_{i \rightarrow i+1} = (Q_{mac}^i + 1) \cdot \hat{T}_{mac}^i$; \hat{T}_{mac}^i – середній час відправки одного пакета, а Q_{mac}^i – поточна кількість пакетів у черзі для передачі на MAC-рівні.

Середній час \hat{T}_{mac}^i обчислюється як ковзне середнє значення, що визначає проміжок між моментом надходження пакета на MAC-рівень і завершенням його успішного відправлення:

$$\hat{T}_{mac}^i = \alpha \hat{T}_{mac}^i + (1 + \alpha) t_{mac}^i, \quad (12)$$

де $\alpha \in [0, 1]$, t_{mac}^i – коефіцієнт, що задає вагу попередньої оцінки, а t_{mac}^i – час, витрачений на відправку пакета з вузла i .

У кожному проміжному вузлі $i \in Path$ В-мураха налаштовує маршрут до вузла-приймача d , додаючи або оновлюючи записи T_{nd}^i у таблиці маршрутизації. Після прибуття до вузла i із сусіднього вузла n мураха створює запис у таблиці маршрутизації T_i , позначаючи вузол n як наступний ретрансляційний етап для досягнення вузла d . У записі таблиці міститься значення феромону T_{nd} , яке відображає корисність маршруту до вузла d через вузол n . Якщо $\hat{T}_{i \rightarrow d}$ час проходження, отриманий мурахою, а h – кількість ретрансляційних етапів, значення феромону визначається за такою формулою:

$$\tau_{id} = \left(\frac{(\hat{T}_{i \rightarrow d} + h T_{hop})}{2} \right)^{-1}, \quad (13)$$

де T_{hop} – фіксоване значення часу проходження однієї ретрансляційної ділянки у незавантаженому стані. Якщо таблиця T_i вже містить запис T_{nd}^i , його значення оновлюється за формулою зваженого середнього:

$$T_{nd}^i = \gamma T_{nd}^i + (1 - \gamma) \tau_{id}, \gamma \in [0, 1], \quad (14)$$

де γ визначає вагу попереднього значення.

У протоколі AntHocNet вузли здійснюють маршрутизацію даних стохастично. Якщо для вузла d вузол k має кілька можливих ретрансляційних ділянок n , одна з них вибирається з ймовірністю P_{nd} визначеною як:

$$P_{nd} = \frac{T_{nd}^2}{\sum_{i \in Nd} T_{id}^2}, \quad (15)$$

де Nd – множина всіх можливих ретрансляційних ділянок для вузла d .

Проактивні RF-мурахи використовуються для регулярного контролю якості маршрутів

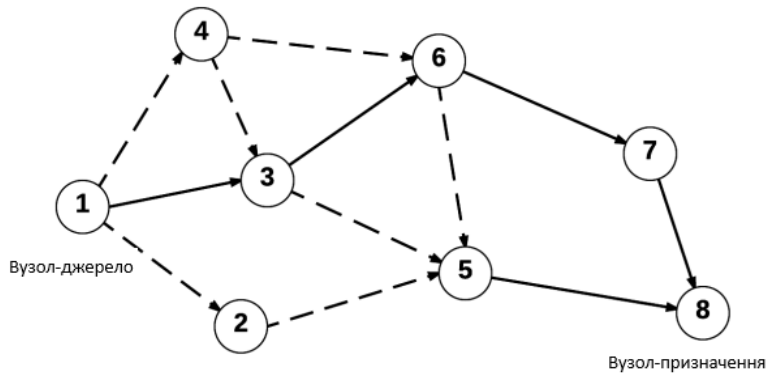


Рис. 7. Контроль якості маршрутів за допомогою проактивних PF-мурах

вуються Hello-пакети. Ці пакети дозволяють вузлам збирати інформацію про поточних сусідів і зберігати її у феромонних таблицях. Якщо вузол-приймач є сусіднім, мураха направляє до нього без необхідності використання ширококомовної розсилки.

Вузли також здатні виявляти відмови ліній зв'язку. Лінія вважається «важливою», якщо вона часто використовувалася для передачі даних або якщо до сусіднього вузла немає альтернативних маршрутів. У таких випадках вузол ініціює спробу відновлення маршруту.

Після виявлення відмови вузол ініціює відправлення відновлювальної мурахи (route repair ant) через ширококомовну розсилку. Ця мураха рухається до вузла-мети, подібно до RF-мурахи, використовуючи наявну маршрутну інформацію, якщо це можливо. У разі її відсутності застосовується ширококомовна розсилка.

Вузол очікує повернення відновлювальної мурахи протягом часу, що дорівнює $5 \cdot T_{k \rightarrow d}$, де $T_{k \rightarrow d}$ – остання відома оцінка часу, необхідного для досягнення вузла d із вузла k .

Якщо відновлювальна мураха не повертається у встановлений термін, робиться висновок, що знайти альтернативний маршрут неможливо. У цьому випадку запис про втрачений маршрут або вузол видаляється з таблиці маршрутизації [7].

Імітаційне моделювання

Проведення порівняльного аналізу протоколів маршрутизації ускладнюється через велику кількість чинників, які впливають на процес передачі даних у самоорганізованих Ad Hoc мережах. Багато з цих чинників є випадковими та слабо піддаються строгому математичному аналізу.

Моделювання протоколів маршрутизації здійснюється за допомогою спеціалізованих програмних симуляторів мереж, таких як ns-2, ns-3, RIVERBED MODELER, OMNET++, QualNet.

У даній роботі дослідження протоколів маршрутизації виконувалося за допомогою мережевого симулятора ns-2. Для моделювання використовувалася версія 2.35 із встановленим протоколом AntHocNet. Порівняння проводилося з іншими протоколами, моделі яких реалізовані в ns-2: AODV, DSDV, DSR.

Параметри, використані для імітаційного моделювання, які наведені в табл. 2, були однаковими для всіх протоколів маршрутизації.

Для оцінки продуктивності протоколів маршрутизації AODV, DSDV, DSR і AntHocNet були використані такі параметри:

1. Відсоток доставлених пакетів (Packet Delivery Ratio – PDR). Цей параметр розраховується як співвідношення кількості пакетів, успішно отриманих вузлом-приймачем, до кількості пакетів, надісланих вузлом-джерелом:

$$PDR = \frac{R_x}{T_x} \quad (16)$$

де R_x - кількість пакетів, отриманих вузлом-приймачем, а T_x - кількість пакетів, надісланих вузлом-джерелом [9].

2. Наскрізна затримка (End-to-End delay): це часова різниця між моментом відправлення першого байта та отриманням останнього байта. Вона охоплює затримку під час передачі,

рис. 7). Ці агенти переміщуються по маршрутах, відмічених феромонами, тим же шляхом, що й пакети даних. Крім того, вони можуть бути відправлені шляхом ширококомовної розсилки, кількість якої обмежується двома. Якщо F-мураха не знаходить маршрутної інформації в межах двох ретрансляційних ділянок, вона видаляється з мережі.

Для покращення ефективності маршрутизації RF- і PF-мурах у протоколі AntHocNet використо-

затримки в чергах процесів і затримки, пов'язані з поширенням сигналу [10].

3. Пропускна здатність (Throughput): параметр, що визначає швидкість успішної передачі пакетів через канал зв'язку. На рівень пропускної здатності впливають такі фактори, як обсяг і тип трафіку, а також час затримки між вузлом-джерелом і вузлом-приймачем [11].

4. Корисна пропускна здатність (Goodput): цей показник відображає ефективність використання смуги пропускання каналу, з урахуванням втрат трафіку на створення сеансів, підтвердження передачі та інкапсуляцію даних [12].

5. Накладні витрати на маршрутизацію (Routing Overhead): включають витрати, пов'язані з пошуком маршрутів і формуванням таблиць маршрутизації [13].

Параметри імітаційного моделювання

Параметри	Значення
Simulated area	1500 × 1500 м
Mobility model	Random waypoint (пауза 0 с)
UAV number	10, 20, 50, 100
Simulation runs	10
Simulation duration	100 с
Maximum nodes velocity	30 м/с
Traffic type	CBR
CBR packets per second	10
MAC layer protocol	802.11
Connections number	10, 20, 25, 50
Signal Propagation Model	Friis
Data links antenna	Omni
Transport Protocol	UDP
Packet size	512 Bytes

Висновки

Маршрутизація у FANET є складним завданням через постійні зміни топології та високу мобільність вузлів. Розглянуті методи маршрутизації демонструють різні підходи до організації обміну даними. Використання мурашиних алгоритмів, які базуються на ймовірнісних правилах і евристичних параметрах, дозволяє зменшити ризики відмов і перевантажень у мережі, що було підтверджено проведеним дослідженням.

Протокол AntHocNet перевершує AODV і DSDV за такими параметрами, як відсоток доставки пакетів і час затримки, особливо за умов великої кількості вузлів. Водночас DSR і AntHocNet демонструють кращу продуктивність за високої мобільності вузлів. Однак слід зазначити, що AntHocNet має значні накладні витрати.

Розробка гібридного алгоритму, який поєднує принципи мурашиних і бджолиних методів, є актуальним напрямком для підвищення ефективності роботи мереж та зменшення накладних витрат.

Список літератури

1. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel S. Flying Ad Hoc Networks (FANETs) // A Survey. Ad Hoc Netw. 2013. Vol. 11. No. 3. Pp. 1254–1270.

2. Tareque M.H., Hossain M.S., Atiquzzaman M. *On the Routing in Flying Ad Hoc Networks // Proc. of the Federated Conf. on Computer Science and Information Systems*. 2015. Vol. 5. Pp. 1–9.
3. Vasiliev D.S., Meitis D.S., Abilov A. *Simulation-based Comparison of AODV, OLSR and HWMP Protocols for Flying Ad Hoc Networks // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. 2014. Vol. 8638. Pp. 245–252.
4. Beni G., Wang J. *Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. Robots and Biological Systems // Towards a New Bionics*. 1993. Pp. 703–712.
5. Blum C. *Ant colony optimization: Introduction and recent trends // Phys. Life Rev.* 2005. Vol. 2. No. 4. Pp. 353–373.
6. Schoonderwoerd R., Holland O.E., Bruten J.L., Rothkrantz L.J.M. *Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks // Adapt. Behav.* 1997. Vol. 5. No. 2. Pp. 169–207.
7. Ладженський Ю.В., Мурецька В.А., Мурецький О.В. Застосування мурашиних алгоритмів для розв'язання задачі маршрутизації в комп'ютерних мережах // *Наукові Праці Донецького Національного Технічного Університету*. 2007. № 8(120). С. 178–192.
8. Di Caro G., Dorigo M. *AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks // J. Artif. Intell. Res.* 1998. Pp. 317–365.
9. Gulati M.K., Kumar K. *Performance Comparison of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols // Int. J. Comput. Netw. Commun.* 2014. Vol. 6. No. 2. Pp. 127–142.
10. Liu J., Jiang X., Nishiyama H., Kato N., Shen X. *End-to-end Delay in Mobile Ad Hoc Networks with Generalized Transmission Range and Limited Packet Redundancy // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* 2012. Pp. 1731–1736.
11. de Moraes R.M., Sadjadpour H.R., Garcia-Luna-Aceves J.J. *Throughput-Delay Analysis of Mobile Ad-Hoc Networks with a Multi-Copy Relaying Strategy // Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. 1st Annual IEEE Communications Society Conf.* 2004. Pp. 200–209.
12. Seddik-Ghaleb A., Ghamri-Doudane Y., Senouci S.-M. *Effect of Ad Hoc Routing Protocols on TCP Performance within MANETs // 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 2006. Vol. 3. Pp. 866–873.
13. Jacquet P., Viennot L. *Overhead in Mobile Ad-Hoc Network Protocols // Research Report-3965. INRIA, France, 2000.*

D. Shport, K. Lavrinets

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING THE ANT COLONY ALGORITHM - ANTHOCNET TO SOLVING THE ROUTING PROBLEM IN FANET

FANET (Flying Ad-Hoc Networks) represents a type of wireless network composed of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) that can interact with each other without centralized control.

One of the most important characteristics of FANET is self-organization, which enables the network to adapt to topology changes and maintain continuous communication between UAVs. Such networks are capable of dynamically adjusting data transmission routes based on the positions of nodes. This feature is highly relevant in scenarios such as search-and-rescue missions, environmental monitoring, intelligence gathering, or other cases requiring the coverage of large areas and rapid data processing. FANET can also ensure communication in emergency situations where traditional infrastructure is unavailable or damaged. Integrating artificial intelligence and machine learning algorithms can further enhance routing efficiency and provide real-time adaptation to changing conditions. This opens opportunities for developing more autonomous and effective solutions that enhance the resilience and performance of such networks.

The high mobility of nodes and the dynamic nature of topology make routing in FANET a challenging task. Conventional routing protocols designed for stationary or terrestrial networks are inefficient in FANET due to their inability to account for constant changes in node coordinates and velocities. To ensure reliable and uninterrupted data transmission, specialized algorithms

have been developed that consider the unique aspects of three-dimensional movement and can maintain high performance even at high node speeds.

This paper presents the results of research aimed at improving routing efficiency in FANET. In particular, it examines the potential of ant colony optimization algorithms for solving this problem. Experimental results demonstrate that the AntHocNet protocol, based on the principles of ant colonies, significantly improves the quality of data transmission in FANET. The findings open new perspectives for developing smarter and more adaptive wireless communication systems.

Keywords: UAV peer-to-peer network, FANET, unmanned aerial vehicle, UAV, routing protocols, swarm intelligence, ant colony optimization algorithm, network simulation.
