

DOI: 10.18372/2310-5461.69.20952
УДК 004.738.5:004.725

Б. С. Чумаченко,

Київський авіаційний інститут, Київ
<https://orcid.org/0000-0002-0354-2206>
e-mail: body21033@gmail.com;

С. С. Чумаченко,

Київський авіаційний інститут, Київ
<https://orcid.org/0009-0003-8755-5286>
e-mail: serjek2@gmail.com;

Д. І. Бахтіяров,

Київський авіаційний інститут, Київ
<https://orcid.org/0000-0003-3298-4641>
e-mail: denys.bakhtiarov@npp.kai.edu.ua;

Д. М. Швець,

Державний університет інформаційно-
комунікаційних технологій, Київ
<https://orcid.org/0009-0007-9059-7064>
e-mail: goldens96@gmail.com;

О. С. Бондарєв,

Київський авіаційний інститут, Київ
<https://orcid.org/0009-0006-5391-8829>
e-mail: alexbondarev1990@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА СТАБІЛЬНОСТІ МАРШРУТІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Вступ

Сьогодні мобільні мережі, що самоорганізуються (MANET), відіграють важливу роль у багатьох сферах, від військових операцій до цивільних комунікацій. У багатьох реальних сценаріях рух об'єктів усередині групи, таких як автомобілі в колоні (VANET), група дронів (FANET) або пішоходи на тротуарі, залишається відносно стабільним та організованим. У таких ситуаціях кожен об'єкт намагається зберегти своє положення відносно інших, і знайти приклади абсолютно хаотичного руху в нашому оточенні набагато складніше. Це підкреслює важливість розробки такої архітектури мережі, яка б враховувала специфіку групової мобільності та вимагала мінімальних переконфігурацій.

Постановка проблеми

При побудові мережі для групи мобільних об'єктів надзвичайно важливо вибрати правильну архітектуру та підхід до аналізу маршрутів, особливо якщо розглядати мережу як систему ad hoc. Головним викликом є те, що рух вузлів безпосередньо впливає на якість комунікації, що може призвести до втрати зв'язку та необхідності онов-

лення логічної структури мережі. Цей процес потребує значних ресурсів для реконструкції маршруту, що знижує якість обслуговування трафіку. Якщо переміщення вузлів стає інтенсивним, часті зміни конфігурації мережі ускладнюють швидку доставку даних.

Отже, при побудові мережі між мобільними об'єктами ключовим завданням є забезпечення максимальної стабільності її структури. Стабільність залежить не тільки від мобільності вузлів, але й від інших факторів, проте в цій статті увага зосереджена саме на аспекті, пов'язаному з рухом. Будь-які зміни в структурі, спричинені коригуванням відносного розташування вузлів, знижують її стабільність, тому існує необхідність у розробці методів, що мінімізують вплив цих змін.

Аналіз досліджень і публікацій

Ранні дослідження в галузі мобільних мереж ad hoc, відображені у роботах [1, 2], дозволили ефективно вирішити базові проблеми, пов'язані з визначенням конфігурації мережі, однак вони не завжди враховували складність та багатомірність відносного руху вузлів. Було показано, що класичні алгоритми маршрутизації та їх адаптації [3, 4], орієнтовані на пошук лише найкоротших

шляхів, є неефективними в динамічних середовищах. На противагу цьому, маршрут з більшою кількістю транзитних вузлів або більшою довжиною може виявитися значно стабільнішим.

Для побудови мереж з мобільними вузлами необхідно використовувати протоколи, що дозволяють мережі динамічно змінювати свою структуру. Вибір маршруту в таких мережах залежить від певних критеріїв, які можуть змінюватися залежно від протоколу та інших факторів, зокрема географічних координат вузлів. Дослідження, присвячені мережам з організованим рухом, таким як автомобільні колони чи рої дронів, підтверджують важливість визначення архітектури, що демонструє достатню стабільність за певного ступеня відносного зміщення вузлів.

Хоча зазначені публікації розглядають різні аспекти стабільності, залишається відкритою проблема розробки комплексного методу, який би пов'язував стохастичні характеристики руху вузлів із кінцевою ймовірністю стабільності маршруту та дозволяв звести задачу вибору до класичних алгоритмів оптимізації.

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі для оцінки стабільності маршрутів, яка встановлює взаємозв'язок між ймовірністю втрати з'єднання та ймовірнісними характеристиками випадкового зміщення вузлів від їх початкових позицій, а також створення на її основі методу вибору найбільш стабільних маршрутів у мережах з мобільними об'єктами.

Виклад основного матеріалу

Модель функціонування мобільної мережі

Фундаментальним припущенням даного дослідження є визначення стабільності маршруту як його здатності безперервно передавати трафік, що вимагає постійної зв'язності всіх його сегментів. Для формалізації аналізу мережа представляється у вигляді графової моделі $G(N, A)$, де множина вершин N відповідає вузлам мережі, а множина ребер A — потенційним з'єднанням між ними. Хоча в загальному випадку такий граф може бути орієнтованим, розгляд його як неорієнтованого не зменшує загальності отриманих висновків, тому саме ця модель використовується в подальшому. При цьому кожна вершина графа характеризується початковими координатами (a_i, b_i) .

Припустимо, що коло з радіусом R може показувати, як далеко вузол може здійснювати зв'язок. Ми також припустимо, що на якість каналу зв'язку впливає тільки відстань між вузлами, ігноруючи перешкоди ззовні та зсередини мережі, а також вплив втрати сигналу на відстань [5]. Якщо відстань між вузлами i та j менша за радіус зв'язку

вузла $r_{ij} < R$, між ними в цьому графі існує ребро. Загалом, мережа, яку можна описати за допомогою зв'язного графа, має щонайменше $k^2 - k$ маршрутів.

Припустимо, що $k^2 - k$ маршрутів відповідають певним критеріям (наприклад, вони є оптимальними в конкретному контексті) і використовуються для передачі трафіку. Стабільність будівлі буде залежати від стабільності цих маршрутів. Щоб визначити стабільність (незмінність) маршруту, ми повинні запропонувати поняття ймовірності зміни маршруту p_r .

Припустимо, що кожен вузол мережі може випадково змінювати свої координати, зміщуючись на випадкове значення від початкових координат.

Розглянемо модель шляху між вузлами s і t , що складається з $k-1$ сегментів, де k — загальна кількість вузлів на шляху, включаючи вузли s і t . Кожен сегмент між вузлами i і j визначається відстанню r_{ij} між ними. Якщо ця відстань перевищує значення R , зв'язок між вузлами i і j порушується, що призводить до повної відмови маршруту. Отже, для порушення зв'язку достатньо, щоб відстань між будь-якими двома сусідніми вузлами вздовж шляху перевищувала значення R [6].

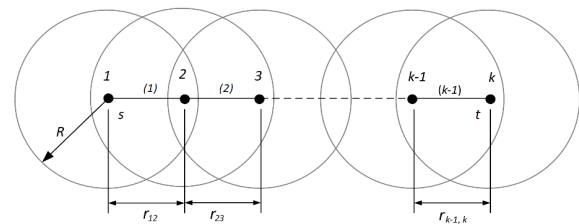


Рис. 1. Схема маршруту з k вузлами

Переміщення транзитного вузла призводить до одночасної зміни відстаней між двома сусідніми вузлами, що робить ймовірність втрати зв'язку в сусідніх сегментах взагалі взаємозалежною. Для спрощення задачі припустимо, що ймовірності зв'язку на $k-1$ сегментах маршруту ϕ_{ij} є незалежними, розглядаючи кожен сегмент як незалежну сусідню пару вузлів (вершин). Ймовірність втрати зв'язку вздовж маршруту, що складається з n вузлів, можна виразити як:

$$p = 1 - \prod_{m=1}^{k-1} (1 - p_r) \quad (1)$$

де $p_r = 1 - \phi_r$ — ймовірність втрати зв'язку на r -му сегменті.

Розглянемо модель зв'язності двох сусідніх вузлів маршруту, як показано на рис. 2. Припустимо, що система координат пересувається разом із групою об'єктів, що розглядаються, а її рух ви-

значається векторною сумою індивідуальних рухів кожного об'єкта в групі, а саме зі швидкістю та в напрямку руху групи [7]. Мобільність така, що початкові координати вузлів у цій системі можна вважати стаціонарними. Ми також припустимо, що кожен вузол може рухатися випадково від своїх початкових координат, і ми будемо характеризувати цей рух величиною зміщення в кожній координаті Δa та Δb (для двовимірної моделі). Далі ми припустимо, що $A1$ та $A2$ є випадковими змінними, які слідуєть нормальному розподілу з середнім значенням 0 та стандартними відхиленнями μ_a та μ_b відповідно.

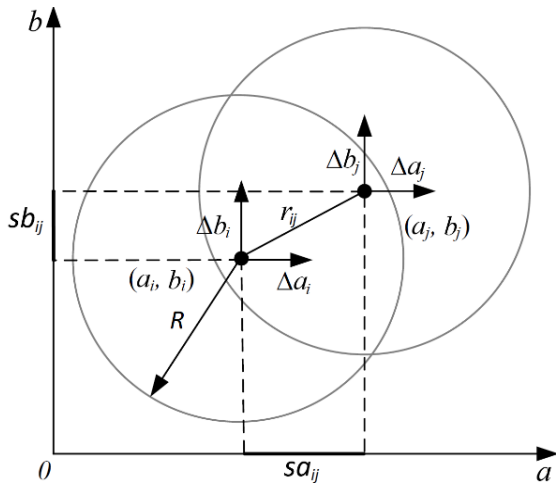


Рис. 2. Принцип формування ланки зв'язку між вузлами

Відстань між початковими положеннями вузлів i та j у декартовій системі координат можна визначити як:

$$r_{ij} = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}. \quad (2)$$

Відстань між вузлами з урахуванням випадкових зміщень вузлів i та j можна виразити як:

$$\tilde{r}_{ij} = \sqrt{\left(a_i + \Delta a_i - a_j - \Delta a_j \right)^2 + \left(b_i + \Delta b_i - b_j - \Delta b_j \right)^2} = \sqrt{sa^2 + sb^2}, \quad (3)$$

де проекції на осях a і b : $sa = a_i + \Delta a_i - a_j - \Delta a_j$ і $sb = b_i + \Delta b_i - b_j - \Delta b_j$ є випадковими числами, що підлягають нормальному розподілу з математичними очікуваннями $\lambda a_{ij} = a_i - a_j$, $\lambda b_{ij} = b_i - b_j$ і дисперсією $\mu a_{ij}^2 = 2\mu_a^2$ $\mu b_{ij}^2 = 2\mu_b^2$ відповідно.

У загальному випадку, якщо у виразі (3) поряд із значеннями sa та sb містяться додаткові випадкові величини, що підпорядковуються нормальному розподілу з математичними очікуваннями

λa_{ij} , λb_{ij} та дисперсіями $\mu_{ij}^2 = \mu a_{ij}^2 = \mu b_{ij}^2$, то значення \tilde{r}_{ij} демонструє розподіл k -вимірною випадкового вектора з відповідною щільністю ймовірності [8].

$$h(a) = \frac{1}{2^{\frac{k}{2}-1} \mu^k \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} a^{k-1} e^{-\frac{a^2}{2\mu^2}}, \quad a > 0, \quad (4)$$

де $\Gamma(a)$ — гамма-функція. k — кількість випадкових змінних.

У особливому випадку при $\mu = 1$ приймає форму χ -розподілу Пірсона [9].

Функція розподілу ймовірностей:

$$H(a) = \frac{\Gamma\left(\frac{a^2}{k\mu^2}, \frac{k}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} = I\left(\frac{a^2}{2\mu^2}, \frac{k}{2}\right), \quad a > 0 \quad (5)$$

де $I(a, b) = \Gamma(a, b) / \Gamma(b)$ — коефіцієнт неповної гамма-функції.

У цьому сценарії, при $k=2$ і ненульових математичних очікуваннях, розподіл проявляється як розподіл Райса, що характеризується наступною функцією щільності ймовірності [10]:

$$h(a)_{k=2} = \frac{a}{\mu^2} e^{-\frac{a^2+v^2}{2\mu^2}} I_0\left(\frac{av}{\mu^2}\right), \quad (6)$$

$$v = \sqrt{sa^2 + sb^2}, \quad a > 0$$

де $I_0(x)$ — модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку [11]. Розподіл Рейлі має середнє значення нуль, тоді як розподіл Максвелла відповідає $k=3$ [12].

Функція для розподілу Райса:

$$H(a) = 1 - P\left(\frac{v}{\mu}, \frac{a}{\mu}\right), \quad a > 0, \quad (7)$$

де $P_1 - P$ — функція Маркума.

$$P_M(a, b) = 1 - e^{-\frac{a^2}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{2}\right)^k \frac{P\left(M+k, \frac{b^2}{2}\right)}{k!}. \quad (8)$$

На рис. 3 та 4 показано емпіричні гістограми, отримані в результаті моделювання, а також наведено опис їх функції щільності ймовірності та функції розподілу Райса.

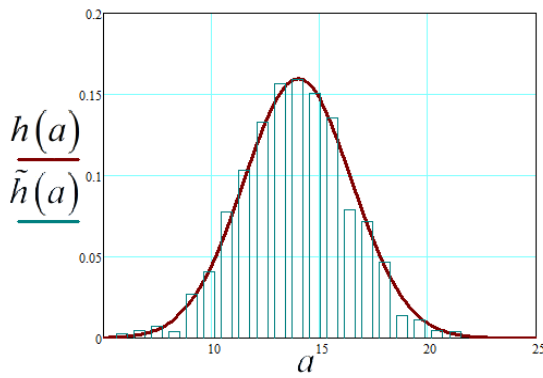


Рис. 3. Ймовірнісна модель відстані між суміжними вузлами

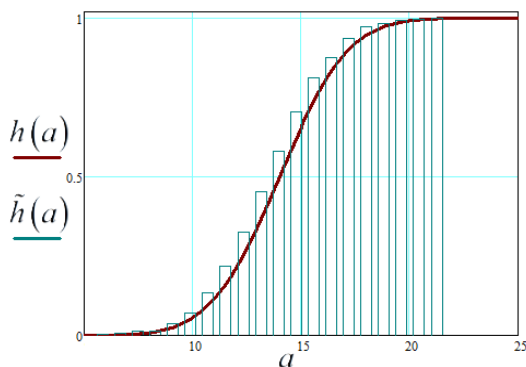


Рис. 4. Розподіл відстані між вузлами

Ймовірність втрати зв'язку між двома вузлами можна кількісно оцінити як ймовірність того, що відстань між ними не перевищить значення R , яке, згідно з (7), буде визначено як:

$$\phi_{ij} = \Phi(r_{ij} < R) = H(R) = 1 - P_1\left(\frac{\nu}{\mu}, \frac{R}{\mu}\right), \quad (9)$$

де $\nu = \sqrt{sa^2 + sb^2}$.

Ймовірність порушення зв'язку на ділянці $p_{ij} = 1 - \phi_{ij}$.

Отже, на основі (1) і з урахуванням (8) можна визначити ймовірність згуртованості (або порушення згуртованості) для всього маршруту, що служить показником його стабільності.

Наближена оцінка. Обчислення виразу (9) вимагає оцінки функції Маркума (8), що може становити певні труднощі через обмеженість обчислювальних ресурсів. Розглянемо можливість наближення функції розподілу за допомогою більш сигмоїдальної кривої [13].

$$\tilde{H}(a) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{a-\nu}{\mu/2}}}. \quad (10)$$

На рисунку 5 показано криві $H(a)$ та $\tilde{H}(a)$ отримані відповідно до виразів (9) та (10), а також відносну похибку апроксимації, отриману як:

$$\eta(a) = \frac{|H(a) - \tilde{H}(a)|}{H(a)}. \quad (11)$$

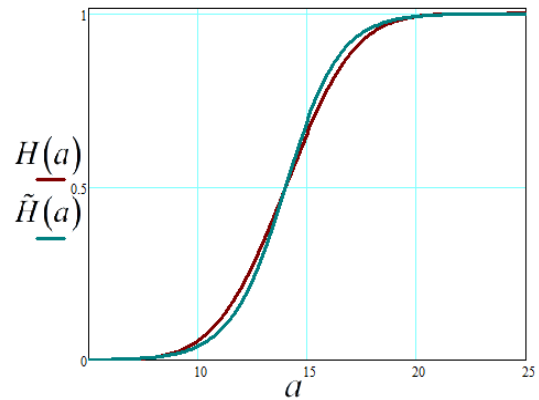


Рис. 5. Порівняння емпіричної функції розподілу $\eta(a)$ та її апроксимації

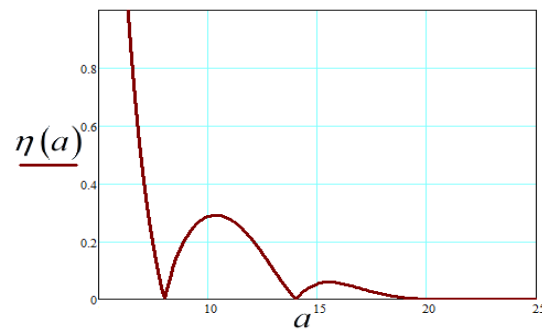


Рис. 6. Відносна похибка в обчисленнях

Рисунки 5 та 6 демонструють, що наближення S -кривої до $H(a)$ (10) дає прийнятну неточність для відносно високих значень ймовірності. У точці $a = 0$ значення S -функції є додатним, але $H(a) = 0$. Отже, відносна похибка при нулі наближається до нескінченності, і похибка залишається істотною в області значень ймовірності, що значно перевищують 0,03. Для значень $H(a)$, більших за 0,03, відносна похибка залишається нижче 12%.

Це наближення можна використовувати для пошуку стабільних маршрутів, оскільки робочий діапазон значень зазвичай перевищує це число.

Наступним кроком є з'ясування, як використовувати цей показник для пошуку найкращого маршруту.

Аналіз підходів до маршрутизації в мобільних ad hoc мережах

Виходячи з вищезазначеного, очевидно, що ймовірність порушення зв'язку є важливою характеристикою маршруту, що свідчить про його стабільність. Отже, якщо метою є підвищення стабільності маршруту, процес вибору маршруту спрощується до визначення маршруту (маршрутів) у наборі потенційних маршрутів Q , які демонструють найвищу ймовірність з'єднання $\phi = 1 - p$, де p представляє ймовірність порушення зв'язку, як описано в (1).

$$\max_Q(\phi) = \min_Q(\phi) \quad (12)$$

Мережа може бути представлена як модель зваженого графа, тому завдання зводиться до визначення найкоротшого шляху (шляхів) у графі, використовуючи логарифми ймовірностей зв'язності як коефіцієнти ваги ребер [14]:

$$\omega_{ij} = -\lg \phi_{ij} \quad (13)$$

де значення ϕ_{ij} визначається відповідно до (8).

Пошук найкоротшого шляху вирішує проблему мінімізації сукупних коефіцієнтів ваги ребер:

$$\min_Q \left(\sum_{i=1}^k \omega_{ij} \right). \quad (14)$$

Для вирішення задачі (14) можна використовувати будь-який відомий алгоритм визначення найкоротшого шляху в графі.

Важливо підкреслити, що при використанні методів, що застосовують операцію «три місця» (наприклад, алгоритм Флойда [15]), вирішення проблеми (14) може бути досягнуто шляхом виконання цієї операції наступним чином:

$$\phi_{ij} = \max \{ \phi_{ij}, \phi_{ik}, \phi_{kj} \} \quad (15)$$

де ϕ_{ij} представляє ймовірність з'єднання між сегментами мережі, як зазначено в початковій матриці ваг.

Запропонований підхід до визначення найбільш стабільного шляху включає наступні кроки.

1. Збір попередніх даних. На цьому етапі встановлюється наступне:

– матриця початкових координат вузлів мережі

$P = \{(a_i, b_i)\}$, $i = 1 \dots m$, де m — кількість вузлів у мережі. Рекомендується вибрати один із вузлів мережі як початок координат;

– ступінь мобільності для кожного вузла встановлюється відносно початкових координат за допомогою стандартного відхилення μ , в результаті чого отримуємо матрицю $z = \{\mu\}$, $i = 1 \dots m$.

– Встановлено радіус зв'язку вузла R .

2. Обчислення ймовірності з'єднання $\Phi = \{\phi_{ij}\}$, $i, j = 1 \dots m$.

$\phi_{ij} = H(r_{ij})$ для заданого значення R і стандартного відхилення, рівного $\lambda = \sqrt{\lambda_i^2 + \lambda_j^2}$, де $H(a)$ встановлюється на основі (9) або з використанням наближеної моделі (10), а r_{ij} представляє відстань між вузлами, як визначено в (2).

3. Побудова матриці ваг.

Використовуючи матрицю ймовірності зв'язку Φ , ми обчислюємо матрицю коефіцієнтів ваги ребер $\Omega = \{\omega_{ij}\}$, $i, j = 1 \dots m$ де:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} -\lg(\phi_{ij}) & r_{ij} < R \\ 0 & r_{ij} \geq R \end{cases}. \quad (16)$$

Ця матриця є базовою матрицею для наступного етапу.

4. Пошук найкоротшого шляху (шляхів). Для вирішення задачі можна використовувати будь-який алгоритм, що знаходить найкоротший шлях.

На рисунках 7–12 показано приклади результатів моделювання та те, як описаний вище метод було використано для пошуку найбільш «стабільного» шляху в мережі зі 100 вузлами, випадково розкиданими на площі 200×200 м, з радіусом зв'язку між вузлами $R = 50$ м. Для пошуку найкоротших шляхів (крок 4) ми використовували алгоритм Флойда [15]. На рисунку 7 показано найкоротший шлях, знайдений за критерієм мінімальної загальної довжини шляху. На рисунках 8, 9 і 10 показано шляхи, знайдені за критерієм максимальної стабільності (14) для різних стандартних відхилень: $\mu = 0,1$ м, $\mu = 1$ м і $\mu = 5$ м відповідно.

Приклади показують, що із збільшенням стандартного відхилення (дисперсії) випадкових відхилень вузлів від їхніх початкових положень уздовж шляху, заданого критерієм максимальної стабільності, кількість транзитних ділянок (стрибків) також зростає. Алгоритм пошуку «стабільного» шляху надає пріоритет «коротким» сегментам, як показано в (8) і (10), що свідчить про те, що ці сегменти мають більшу ймовірність бути з'єднаними, ніж «довгі» сегменти.

Багато хто з нетерпінням чекає на цей результат. Однак, оскільки стандартне відхилення продовжує зростати, воно зрештою наближається до точки, де відбувається протилежне, як показано на рисунках 11 і 12 для значень стандартного відхилення відповідно $\mu = 10$ м та $\mu = 50$ м. Цей результат не є дуже чітким, але легко зрозуміти, що при великій варіації (коли стандартне відхилення наближається до радіусу зв'язку вузлів) надійність ділянок настільки низька, що кількість ділянок є важливішою за стабільність всього маршруту. Маршрут, показаний на рисунку 12, дуже схожий на маршрут, обраний на рисунку 7 на основі критерію довжини.

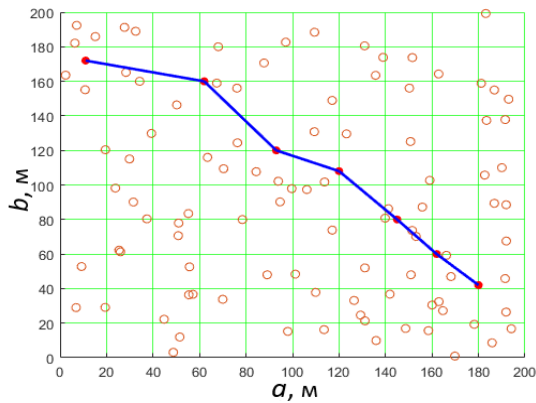
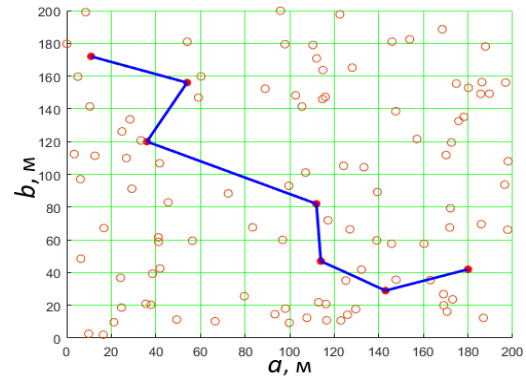
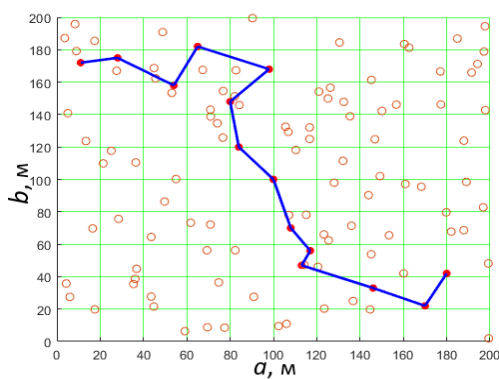
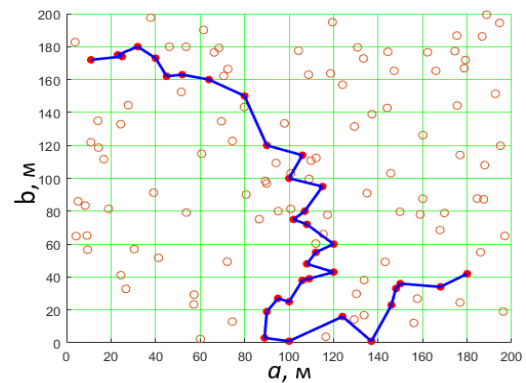
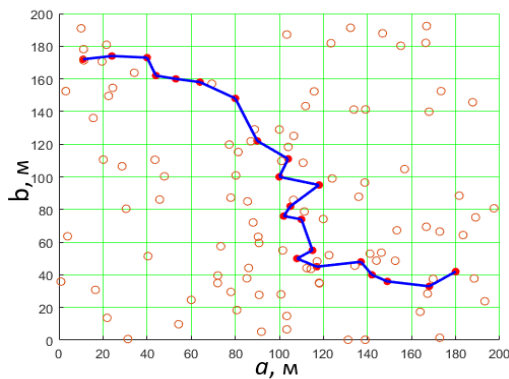
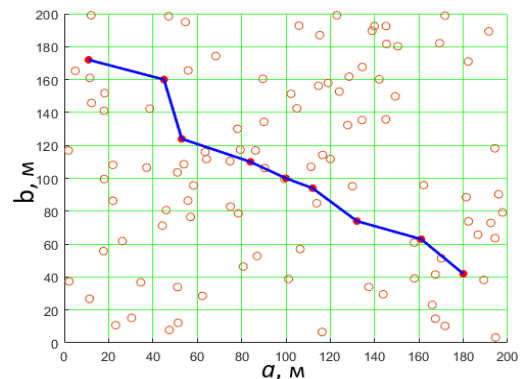


Рис. 7. Найкоротший маршрут за мінімальною довжиною

Рис. 8. Шлях за критерієм максимальної стабільності для $\mu = 0,1$ Рис. 9. Шлях за критерієм максимальної стабільності для $\mu = 1$ Рис. 10. Шлях за критерієм максимальної стабільності для $\mu = 5$ Рис. 11. Шлях за критерієм максимальної стабільності для $\mu = 10$ Рис. 12. Шлях за критерієм максимальної стабільності для $\mu = 50$

Як результат проведеного дослідження, можна зробити висновок, що вибір маршруту на основі критерію стабільності є обґрунтованим за умови, що рухливість вузлів мережі відносно їхніх початкових положень є мінімальною, зокрема, стандартне відхилення їхніх позицій не повинно перевищувати радіус зв'язку вузлів. У протилежному випадку, результат пошуку буде схожим на результат пошуку маршруту, що орієнтований на мінімізацію кількості переходів [16, 17, 18]. Цей метод є корисним для організації мережі рухомих

об'єктів, оскільки зазначені критерії є універсальними для більшості застосувань, як було вказано у вступній частині.

Основними складовими цього методу є модель маршруту, правила генерації вихідних даних та метод пошуку шляху. Кожен з елементів цієї методики працює самостійно, що дозволяє адаптувати її до різних сценаріїв. У рамках цього дослідження була представлена модель, яка дозволяє чітко визначити «стабільність» маршруту (ймовір-

ність його зв'язності) на основі характеристик мережі, а також методологія генерації вихідних даних для задачі пошуку маршруту. Цей підхід можна застосовувати в поєднанні з іншими моделями для вирішення задач, таких як пошук найменш завантаженого маршруту, маршруту з мінімальними втратами або встановлення чітких стандартів стабільності.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було розглянуто та проаналізовано основні фактори, що впливають на стабільність маршрутів у мережах з мобільними вузлами. Виявлено, що стабільність маршруту залежить не тільки від характеристик фізичного рівня та зони зв'язку вузлів, але й від статистичних параметрів їхнього відносного руху, що безпосередньо впливає на стабільність сегментів маршруту.

Показано, що у випадках стохастичного руху вузлів, коли їхні позиції підкоряються нормальному розподілу, ймовірність збереження зв'язності вздовж сегмента маршруту може бути виражена через функцію розподілу його довжини, зокрема за допомогою розподілу Райса для двовимірних випадків.

Задачу визначення стабільного маршруту було зведено до класичної задачі пошуку найкоротшого шляху у зваженому графі, де вага ребер визначається логарифмами ймовірності з'єднання. Аналіз результатів моделювання показав, що збільшення стандартного відхилення переміщення вузлів від їх початкових позицій є важливим чинником, що впливає на кількість «надійних» сегментів маршруту. Проте подальше збільшення стандартного відхилення призводить до зменшення кількості транзитних ділянок маршруту.

Запропонована модель для оцінки стабільності маршрутів та підхід до визначення стабільного шляху дозволяють ефективно порівнювати різні маршрути, а також зменшують необхідність частих коригувань конфігурації мережі, що виникають через втрату зв'язку. Розроблені підходи можуть бути використані для побудови надійних комунікаційних мереж між мобільними об'єктами, що має важливе значення для застосувань у військових, цивільних та інших сферах, де стабільність і надійність зв'язку є критичними.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. IETF, 1999. RFC 2501.
- [2] Toh C.-K. A novel distributed routing protocol to support ad hoc mobile computing. Proceedings of the 1996 IEEE Fifteenth Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications. 1996. P. 480–486.
- [3] Kaushik B., Kesarwani A. A deep insight into the geographical routing protocols of MANETs. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. 2021. V. 33(9). P. 1090–1102.
- [4] Al-Zubaidi A. H., Taha A. M., Al-Ghamdi S. A. AODV-AD: an adaptive AODV routing protocol for VANETs based on a dynamic detection mechanism. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2021. V. 2021. Art. 48.
- [5] Ali K., Nguyen T. N., Ha D., et al. A novel stable and energy-efficient routing protocol for UAV networks. IEEE Access. 2021. V. 9. P. 119532–119548.
- [6] Salau O. A., Kishk M. A., Mohamed A. Performance evaluation of reactive routing protocols for multi-UAV ad-hoc networks. 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). 2022. P. 1318–1323.
- [7] Kumar V., Kumar S., Kumar A. DE-CS: a hybrid routing scheme for FANETs using differential evolution and cuckoo search. Soft Computing. 2022. V. 26. P. 13197–13214.
- [8] Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. John Wiley & Sons, 2021. 768 p.
- [9] DeGroot M. H., Schervish M. J. Probability and Statistics. 5th ed. Pearson, 2023. 960 p.
- [10] Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 6th ed. McGraw-Hill, 2022. 1184 p.
- [11] Abramowitz M., Stegun I. A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. National Bureau of Standards, 1964. 1046 p.
- [12] Чумаченко С. С., Чумаченко Б. С., Малосєд М. М. та ін. Моделювання М2М трафіку сучасних мереж зв'язку. *Наукоємні технології*. 2024. Т. 63(3). С. 390–400. DOI: 10.18372/2310-5461.63.18947
- [13] Chien T. V., Tran H. T., Voznak M., Kaddoum G. Novel Tight Approximations for the Gaussian Q-Function and Its Application in Nakagami-m Fading Channels. IEEE Wireless Communications Letters. 2022. V. 11(11). P. 2355–2359.
- [14] Zhang Y., Zhang H., Wang J., et al. A routing algorithm for maximizing link reliability of LEO satellite networks based on deep reinforcement learning. Applied Sciences. 2023. V. 13(15). Art. 8981.
- [15] Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. 4th ed. MIT Press, 2022. 1312 p.
- [16] Чумаченко С. С., Чумаченко Б. С., Малосєд М. М. та ін. Метод маршрутизації в бездротових мережах IoT із високою щільністю пристроїв. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Т. 80, № 4. DOI: 10.18372/2073-4751.80.19778
- [17] Chumachenko S., Chumachenko B., Odarchenko R., et al. Model of Network Configuration for IoT Devices. Lecture Notes in Networks and Systems.

2025. V. 1473. P. 438–449. DOI: 10.1007/978-3-031-94845-9_36

[18] Чумаченко С. С., Чумаченко Б. С., Малоєд М. М. та ін. Модель інтернет мережі з урахуван-

ням мережевого розташування. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. № 2(78). DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18970>

Чумаченко Б. С., Чумаченко С. С., Бахтіяров Д. І., Швець Д. М., Бондарев О. С. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА СТАБІЛЬНОСТІ МАРШРУТІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Розвиток безпроводових мобільних мереж, зокрема мереж ad hoc, ставить нові виклики, пов'язані із забезпеченням стабільності зв'язку в умовах постійного руху вузлів. Традиційні протоколи маршрутизації, що орієнтовані на пошук найкоротшого шляху, часто виявляються неефективними, оскільки найкоротший маршрут може бути найменш стабільним через динамічні зміни в топології мережі. У зв'язку з цим, значна увага дослідників приділяється розробці критеріїв та алгоритмів, що враховують стабільність маршруту як ключовий параметр для підвищення якості обслуговування.

У статті запропоновано математичну модель для оцінки стабільності маршрутів, що базується на аналізі ймовірності розриву зв'язку між вузлами. Модель враховує стохастичний характер руху вузлів, описуючи їх відхилення від початкових позицій за допомогою нормального розподілу, та виводить ймовірність зв'язності через розподіл Райса для двовимірного випадку. На основі моделі задача вибору найстабільнішого маршруту зводиться до класичної задачі пошуку найкоротшого шляху у зваженому графі, де ваги ребер визначаються логарифмами ймовірностей з'єднання. Наведено результати імітаційного моделювання, що демонструють ефективність запропонованого підходу за різних рівнів мобільності вузлів та підтверджують теоретичні висновки.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних алгоритмів маршрутизації, що підвищують надійність мереж зв'язку між рухомими об'єктами (VANET, FANET) та зменшують службовий трафік, пов'язаний з переконфігурацією маршрутів.

Ключові слова: стабільність маршруту; мобільні ad hoc мережі; ймовірність розриву зв'язку; розподіл Райса; зважений граф; групова мобільність; протоколи маршрутизації, оброблення даних.

Chumachenko B., Chumachenko S., D. Bakhtiarov, D. Shvets, O. Bondarev. MODELING AND EVALUATION OF ROUTE STABILITY IN WIRELESS MOBILE NETWORKS

The development of wireless mobile networks, particularly ad hoc networks, poses new challenges related to ensuring communication stability under conditions of constant node movement. Traditional routing protocols focused on finding the shortest path often prove to be ineffective, as the shortest route can be the least stable due to dynamic changes in the network topology. In this regard, significant research attention is being paid to the development of criteria and algorithms that consider route stability as a key parameter for improving the quality of service.

The paper proposes a mathematical model for evaluating route stability based on an analysis of the link failure probability between nodes. The model accounts for the stochastic nature of node movement by describing their deviations from initial positions using a normal distribution and derives the connectivity probability through the Rice distribution for the two-dimensional case. Based on the model, the task of selecting the most stable route is reduced to the classic problem of finding the shortest path in a weighted graph, where the edge weights are determined by the logarithms of the connection probabilities. The paper also presents simulation results that demonstrate the effectiveness of the proposed approach at different levels of node mobility and confirm the theoretical conclusions.

The obtained results can be used to develop adaptive routing algorithms that increase the reliability of communication networks between mobile objects (VANET, FANET) and reduce the overhead traffic associated with route reconfiguration.

Keywords: route stability, mobile ad hoc networks, link failure probability, Rice distribution, weighted graph, group mobility, routing protocols, data processing.

Дата першого надходження: 18.10.2025 р.

Дата прийняття до друку: 10.03.2026 р.

Дата публікації: 27.04.2026 р.