

УДК 004.738.5

DOI: 10.18372/2073-4751.85.21122

Телешко І.В., доцент,
orcid.org/0000-0002-1689-2424
e-mail: ihor.teleshko@npp.kai.edu.ua

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ НАКЛАДНИХ ВИТРАТ В AD-НОС МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ РІВНІВ СИГНАЛ/ШУМ

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Бездротові мережі Ad-Нос представляють собою клас самоорганізованих розподілених систем, у яких вузли взаємодіють безпосередньо без фіксованої інфраструктури. Завдяки своїй гнучкості, можливості швидкого розгортання та стійкості, такі мережі широко застосовуються в системах реагування на надзвичайні ситуації, військовому зв'язку та середовищах Інтернету речей. Однак збільшення щільності вузлів у сучасних розгортаннях створює значні проблеми, пов'язані з масштабованістю маршрутизації та витратами на керування.

У щільних середовищах Ad-Нос кількість сусідніх вузлів зростає пропорційно просторовій щільності вузлів. Як наслідок, середній ступінь вузла збільшується, що призводить до надмірного обміну повідомленнями керування маршрутизацією. Традиційні протоколи маршрутизації, такі як AODV, DSR та OLSR, покладаються на механізми перезавантаження або періодичного оновлення топології. Обидва з яких генерують значні службові трафіки у сценаріях високої щільності. Це призводить до збільшення конкуренції за канали, вищої ймовірності колізій, підвищеного споживання енергії та зниження загальної ефективності мережі.

Існуючі підходи до зменшення витрат в основному зосереджені на фільтрації на основі якості з'єднання, механізмах кластеризації або ймовірнісних схемах ширококомунікації. Такі показники сили сигналу, як RSSI та співвідношення сигнал/шум (SNR), часто використовуються для оцінки надійності каналу зв'язку та усунення слабких з'єднань. Хоча такі методи покращують якість передачі, вони не враховують безпосередньо структурний вплив високого ступеня зв'язності вузлів на накладні витрати маршрутизації. У щільних топологіях навіть високоякісні канали можуть сприяти збільшенню службового трафіку, якщо участь вузлів не регулюється.

Тому існує потреба в методах, які зменшують логічну щільність маршрутизації без зміни фізичного розгортання вузлів. Зменшення логічної щільності має на меті зменшити ефективну кількість каналів маршрутизації та вузлів-учасників, зберігаючи при цьому зв'язність та прийнятні рівні якості обслуговування.

У цій статті пропонується метод зменшення логічної щільності маршрутизації в мережах Ad-Нос на основі комбінованого аналізу співвідношення сигнал/шум та ступеня вузла. На відміну від традиційних підходів на основі порогового співвідношення SNR, запропонований

метод вводить комбіновану метрику прийнятності, яка одночасно:

- надає пріоритет високоякісним каналам,
- зменшує надмірний ступінь зв'язності вузла,
- адаптивно розріджує граф маршрутизації.

Інтегруючи оцінку з'єднання на основі співвідношення сигнал/шум (SNR) з керуванням топологією зі змінною зв'язністю вузлів метод зменшує ефективну щільність графа маршрутизації та, як наслідок, зменшує накладні витрати на керування. Водночас, зв'язність зберігається завдяки адаптивному вибору порогу.

Основні результати роботи полягають у наступному:

- а) сформульовано математичну модель, що пов'язує щільність вузлів, ступінь зв'язності вузла та накладні витрати на маршрутизацію;
- б) розроблено комбіновану метрику придатності маршрутизації на основі SNR та ступеня зв'язності для логічного розрідження графа;
- в) аналітично продемонстровано зменшення накладних витрат на маршрутизацію за контрольованих умов зв'язності;
- г) визначено підхід до оцінки компромісів продуктивності в щільних сценаріях розгортання мереж Ad-Нос.

Матеріал статті викладено наступним чином. У розділі 1 розглядаються пов'язані робота з оптимізації маршрутизації в щільних мережах Ad-Нос. У розділі 2 представлено постановку задачі та математичну модель функціонування запропонованого методу. У розділі 3 описано алгоритм зменшення щільності маршрутизації. У розділі 4 наведено

оцінку продуктивності на основі моделювання.

Основна частина

1. Пов'язані роботи

Оптимізація маршрутизації в щільних бездротових мережах Ad-Нос широко досліджувалася через обмеження масштабованості класичних протоколів маршрутизації. Зі збільшенням щільності вузлів надмірне поширення керуючих пакетів та надлишковий обмін топологією значно знижують продуктивність мережі.

Реактивні протоколи маршрутизації, такі як AODV [1] та DSR [2], зменшують накладні витрати маршрутизації, встановлюючи маршрути на вимогу. Однак у щільних мережах процедури виявлення маршрутів залежать від загальномережевої перевантаженості, що призводить до ширококомовних штормів, збільшення ймовірності колізій та значного зростання керуючого трафіку [3]. Хоча було запропоновано оптимізації для придушення надлишкової ретрансляції, фундаментальний механізм на основі перевантаження залишається обмеженням масштабованості.

Проактивні протоколи маршрутизації, такі як OLSR [4], використовують такі механізми, як багатоточкові ретрансляції (MPR), для зменшення надмірності ретрансляції. Хоча це зменшує непотрібні ширококомовлення порівняно з класичними підходами до стану каналу, періодичний обмін повідомленнями керування топологією все ще генерує значні накладні витрати у сценаріях високої щільності [4]. Зі збільшенням ступеня вузла обсяг підтримуваної

топологічної інформації пропорційно зростає.

Маршрутизація з урахуванням якості каналу є ще одним важливим напрямком досліджень. Такі показники на основі сигналів, як RSSI та співвідношення сигнал/шум (SNR), використовуються для покращення надійності та стабільності маршруту [5]. Фільтрація на основі SNR усуває слабкі зв'язки, щоб зменшити кількість повторних передач та втрат пакетів. Однак ці методи в першу чергу стосуються надійності передачі та не регулюють щільність графів маршрутизації. У щільних розгортаннях навіть високоякісні зв'язки можуть сприяти надмірному розсіюванню керування, якщо ступінь вузла не обмежений.

Методи керування топологією спрямовані на побудову розріджених підграфів, які зберігають зв'язність, одночасно зменшуючи перешкоди та споживання енергії [6]. Керування топологією на основі ступенів обмежує кількість активних сусідів на вузол, тим самим зменшуючи локальну конкуренцію. Тим не менш, багато схем на основі ступенів не включають інформацію про динамічну якість зв'язку, що може призвести до нестабільних маршрутів за коливань умов каналу.

Підходи кластеризації впроваджують ієрархічну організацію для зменшення глобальних накладних витрат на маршрутизацію [7]. Вузли кластерів керують внутрішньо- та міжкластерним зв'язком, обмежуючи кількість вузлів, що беруть участь в маршрутизаційному обміні. Однак кластеризація вносить додаткові накладні витрати на управління та може

страждати від нестабільності за умов мобільності.

Також були запропоновані ймовірнісні стратегії придушення широкомовлення та ретрансляції з урахуванням щільності для пом'якшення проблеми шторму широкомовлення [3]. Ці підходи зменшують ймовірність ретрансляції на основі оцінки локальної щільності, але вони явно не будують структурно оптимізований граф маршрутизації.

За результати аналізу існуючих підходів можна виявити кілька прогалин у дослідженнях:

- а) методи на основі якості з'єднання покращують надійність, але не контролюють ступінь вузла;
- б) керування топологією на основі ступенів зменшує структурну щільність, але часто ігнорує якість з'єднання;
- в) методи придушення перевантаження зменшують надмірність, але не виконують явного розрідження графа;
- г) кластеризація вносить додаткову структурну складність та складність обслуговування.

Тому для досягнення контрольованого зменшення логічної щільності потрібен інтегрований метод, який одночасно враховує надійність з'єднання та ступінь вузла. Метод, запропонований у цій статті, вирішує цю потребу, вводячи комбіновану метрику придатності SNR-ступінь для адаптивного розрідження графа маршрутизації. На відміну від чистих механізмів фільтрації SNR або обмеження ступенів, зв'язності запропонована модель балансує якість передачі та структурні накладні витрати в рамках єдиної математичної структури.

2. Постановка задачі та математична модель

2.1 Постановка задачі

У щільних бездротових мережах Ad-Hoc збільшення щільності вузлів суттєво впливає на масштабованість маршрутизації. Зі збільшенням кількості вузлів в обмеженій зоні розгортання середня кількість сусідів на вузол пропорційно збільшується. Це призводить до надмірного трафіку керування маршрутизацією, підвищеної конкуренції за канали, вищої ймовірності колізій та збільшення споживання енергії.

Нехай мережа Ad-Hoc змодельована як неорієнтований граф:

$$G(V,E)$$

де:

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ - множина вузлів,

$E \subseteq V \times V$ - множина двонаправлених каналів зв'язку,

$N = |V|$ - загальна кількість вузлів.

Якщо мережа розгорнута на площі A , фізична щільність вузлів

$$\rho = \frac{N}{A}$$

визначається як:

Для заданої площини передачі радіусом R очікуваний ступінь зв'язності вузла визначається виразом:

$$E[d_i] \approx \rho \pi R^2$$

де d_i - зв'язність вузла v_i .

Накладні витрати на керування маршрутизацією пропорційні загальній кількості зв'язків суміжності, що беруть участь у процесах маршрутизації:

$$O_{ctrl} \propto \sum_{i=1}^N d_i$$

Отже, зі збільшенням щільності вузлів ρ , пропорційно зростають і

накладні витрати на маршрутизацію. Оскільки видалення фізичних вузлів є неможливим у реальних умовах, необхідно виконати логічне зменшення щільності маршрутизації, тобто провести зменшення ефективної участі в маршрутизації окремих вузлів без зміни фізичної топології.

Метою дослідження є побудова скороченого графа маршрутизації $G'(V,E')$ на підставі вихідного графу зв'язку $G(V,E)$ такого що: $E' \subseteq E, |E'| < |E|$, при збереженні високої ймовірності зв'язку з мережею та коефіцієнту доставки пакетів вище заздалегідь визначеного порогу при мінімізації накладних витрат на керування маршрутизацією.

Для досягнення цієї мети вводиться комбінована модель прийнятності на основі співвідношення сигнал/шум та ступеня зв'язності вузла.

2.2 Модель якості зв'язку

Кожен зв'язок між вузлами

v_i та v_j характеризується співвідношенням сигнал/шум:

$$SNR_{ij} = \frac{P_{r,ij}}{N_0}$$

де:

$P_{r,ij}$ – потужність прийнятого сигналу,

N_0 - потужність шуму.

Вищі значення SNR вказують на надійніші канали зв'язку та нижчу ймовірність повторної передачі.

2.3 Представлення ступеня зв'язності вузла

Ступінь вузла v_i визначається як:

$$d_i = |\{v_j \in V : (v_i, v_j) \in E\}|$$

У щільних мережах вузли з високим ступенем зв'язності беруть участь у великій кількості маршрутних напрямків, непропорційно збільшуючи накладні витрати на маршрутизацію. Через це для обмеження надмірної участі таких вузлів виконується зниження на основі ступеня зв'язності.

2.4 Нормалізація параметрів

Для об'єднання SNR та ступеня зв'язності вузла в єдину метрику визначаються нормалізовані величини:

$$\hat{S} = \frac{SNR_{ij}}{\max_{k \in N_i} SNR_{ik}}$$

$$\hat{d}_i = \frac{d_i}{d_{max}}$$

де:

SNR_{max} - максимальне SNR, що спостерігається в межах локальної області ,

d_{max} - максимальний ступінь зв'язності вузла в розглянутій області.

Обидва нормалізовані параметри лежать в інтервалі $[0,1]$.

2.5 Комбінована метрика придатності

Функція придатності маршрутизації для з'єднання (v_i, v_j) визначається як:

$$F_{ij} = \alpha \hat{S}_{ij} + \beta (1 - \hat{d}_i)$$

де:

$$\alpha, \beta \in [0,1],$$

$$\alpha + \beta = 1,$$

α контролює чутливість до якості з'єднання,

β контролює інтенсивність розрідження.

Іншими словами, високе SNR збільшує придатність з'єднання, а високий ступінь зв'язності вузла навпаки зменшує придатність, в цілому

ж модель виконує балансування рівня надійності при стисненні топології.

2.6 Правило вибору каналу зв'язку

Канал включається до скороченого графу маршрутизації, якщо:

$$F_{ij} \geq \theta \quad \text{де: } \theta \in [0,1] \text{ - поріг}$$

прийнятності.

Таким чином, зменшена множина ребер має вигляд:

$$E' = \{(v_i, v_j) \in E \mid F_{ij} \geq \theta\}$$

і скорочений граф маршрутизації стає:

$$G'(V, E').$$

2.7 Вплив на накладні витрати маршрутизації

Після застосування запропонованого механізму скорочення очікуваний ступінь зв'язності вузла визначається виразом

$$E[d'_i] < E[d_i]$$

Отже, накладні витрати на маршрутизацію зменшуються:

$$O_{ctrl} \propto \sum_{i=1}^N d_i$$

оскільки

$$\sum d'_i < \sum d_i$$

з чього випливає:

$$O'_{ctrl} < O_{ctrl}$$

2.8 Властивості математичної моделі

Запропонована модель:

- а) зберігає фізичну топологію;
- б) виконує адаптивне логічне розрідження графів;
- в) відтримує високоякісні канали зв'язку,
- г) "штрафує" вузли за надмірний ступінь зв'язності;
- д) зменшує ефективну щільність маршрутизації.

3. Запропонований алгоритм

3.1 Загальний огляд

Запропонований метод виконує логічне зменшення щільності маршрутизації шляхом адаптивного вибору каналів на основі комбінованого співвідношення сигнал/шум (SNR) та метрики ступеня зв'язності вузла. Алгоритм працює на рівні маршрутизації та будує скорочений граф маршрутизації для виявлення маршруту або поширення топології.

На відміну від механізмів керування фізичною топологією, запропонований підхід не змінює потужність передачі або розміщення вузлів. Натомість він фільтрує участь у маршрутизації, формуючи розріджений список суміжності, використовуючи метрику прийнятності, визначену в розділі 2.

Алгоритм може бути інтегрований як у реактивні, так і в проактивні протоколи маршрутизації. У реактивних протоколах фільтрація каналів застосовується перед пересиланням запиту маршруту (RREQ). У проактивних протоколах фільтрація застосовується під час побудови таблиці сусідів.

3.2 Операційна процедура

Кожен вузол періодично виконує такі операції:

- виявлення сусідів;
- вимірювання значень SNR для всіх суміжних каналів;
- обчислення ступеня зв'язності локального вузла;
- нормалізація SNR та ступеня зв'язності вузла;
- обчислення комбінованої метрики придатності;
- фільтрація каналів на основі порогу θ ;

- побудова скороченого списку суміжності маршрутизації.

Результатом цих операцій є граф маршрутизації $G'(V, E')$ зі зменшеною ефективною щільністю.

3.3 Опис алгоритму

Для вузла v_i нехай: N_i - множина фізичних сусідів, $d_i = |N_i|$, SNR_{ij} вимірюється для кожного $v_j \in N_i$.

вузол обчислює:

$$\hat{S}_i = \frac{SNR_{ij}}{\max_{k \in N_i} SNR_{ik}}$$

$$\hat{d}_i = \frac{d_i}{d_{\max}}$$

далі для кожного сусіда

$$F_{ij} = \alpha \hat{S}_i + \beta (1 - \hat{d}_i)$$

якщо $F_{ij} \geq 0$

то зв'язок зберігається для маршрутизації; в іншому випадку він виключається з маршрутизації.

3.4 Інтеграція з протоколами маршрутизації

У реактивних протоколах (наприклад, AODV) для пересилання повідомлень запиту маршруту (RREQ) використовується зменшений набір сусідів N_i' (пакети RREQ розсилаються лише вибраними сусідами) що безпосередньо зменшує накладні витрати через перевантаження.

У проактивних протоколах (наприклад, OLSR) для розповсюдження повідомлень керування топологією використовується зменшений список суміжності, а також до таблиці маршрутизації включаються лише вибрані посилання що і зменшує періодичний трафік керування.

3.5 Обчислювальна складність

Для кожного вузла необхідно виконати:

- виявлення сусідів: $O(d_i)$,
- нормалізацію SNR: $O(d_i)$,
- обчислення придатності: $O(d_i)$.

Таким чином, загальна складність на вузол: $O(d_i)$, оскільки $d_i \ll N$ і у практичному застосуванні алгоритм вводить мінімальні додаткові обчислювальні витрати.

3.6 Очікувані ефекти

Після застосування алгоритму:

$$E[d_i'] < E[d_i]$$

що призводить до: $O_{crit}' < O_{crit}$

при збереженні прийнятної зв'язності, якщо θ вибрано в межах стійкості.

Завдяки застосуванню алгоритму досягається:

- логічне розрідження графу маршрутизації;
- контрольованість участі вузлів високого ступеня зв'язності;
- збереження надійних з'єднань з високим співвідношенням сигнал/шум,
- зменшення накладних витрат на керування маршрутизацією в щільних мережах.

4. Імітаційна модель та оцінка продуктивності

4.1 Середовище моделювання

Для оцінки ефективності запропонованого методу зменшення логічної щільності на основі співвідношення сигнал/шум (SNR) було проведено імітаційне моделювання з використанням симулятора мережі з дискретними подіями.

Експериментальне середовище моделює бездротову мережу Ad-Hoc, розгорнуту на фіксованій квадратній площі зі змінною щільністю вузлів.

Базовим протоколом маршрутизації в данному випадку вважається є AODV. Запропонований

алгоритм реалізовано як етап попередньої обробки, який фільтрує набір сусідніх вузлів перед пересиланням запиту на побудову маршруту (RREQ). Модифікований протокол будемо позначати як AODV-SD (SNR-Degree).

Значення параметрів моделі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри моделювання

Параметр	Значення
Розмір області	1000 м × 1000 м
Кількість вузлів	50, 100, 150, 200
Дистанція пере-	250 м
Модель каналу	Log-distance path
MAC протокол	IEEE 802.11
Тип трафіку	CBR поверх UDP
Розмір пакету	512 байт
Час моделювання	300 с
Модель мобільно-	Random Waypoint
Швидкість вузлів	0–10 м/с
α, β параметри	0.6 / 0.4
Поріг θ	0.5

4.2 Показники продуктивності

Для комплексної оцінки продуктивності вимірюються такі показники:

- а) Накладні витрати на керування маршрутизацією визначаються як загальна кількість пакетів керування маршрутизацією, переданих під час моделювання:

$$O_{crit} = \sum RREQ + RREP + RERR$$

Цей показник безпосередньо відображає вплив зменшення логічної щільності.

- б) Коефіцієнт доставки пакетів (PDR)

$$PDR = \frac{\text{Number of received data packets}}{\text{Number of sent data packets}}$$

PDR оцінює надійність та cnsqrscnm зв'язку.

в) Середня затримка між кінцевими вузлами (Average End-to-End Delay)

$$D_{avg} = \frac{\sum (t_{receive} - t_{send})}{\text{Number of received packets}}$$

Ця метрика відображає ефективність маршруту та його потенційні компроміси, що виникають через розрідження графів.

г) Середній ступінь вузла після зменшення

$$\bar{d}' = \sum_{i=1}^N d'_i$$

що безпосередньо вимірює ефективне зменшення логічної щільності.

д) Споживання енергії (додаткова метрика якщо ввімкнено моделювання енергії):

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_i$$

Очікується, що зниження накладних витрат на маршрутизацію зменшить загальні витрати енергії.

4.3 Експериментальні сценарії

Порівнюються дві конфігурації маршрутизації:

- Стандартний AODV
- Запропонований AODV-SD (SNR-Degree, тобто зменшення на основі ступеня вузлів).

Моделювання проводилося зі збільшеною щільністю вузлів (50–200 вузлів) для спостереження за поведінкою масштабованості. Кожен сценарій повторювався кілька разів з різними випадковими початковими значеннями для забезпечення статистичної надійності.

4.4 Підсумки досліджень

Результати моделювання показують, що запропонований протокол AODV-SD значно зменшує накладні витрати на керування маршрутизацією порівняно зі стандартним AODV. Зі збільшенням щільності вузлів накладні витрати в базовому протоколі зростають приблизно лінійно зі середнім ступенем вузла. Навпаки, запропонований метод підтримує контрольовану швидкість зростання завдяки логічній розрідженості графа.

Для щільних сценаріїв (150–200 вузлів) спостерігається зниження накладних витрат приблизно на 20–35%.

Коефіцієнт доставки пакетів залишається стабільним при помірних порогових значеннях. Для правильно вибраного θ , деградація PDR не перевищує 3–5% порівняно з базовим рівнем. Це вказує на те, що зв'язок зберігається, незважаючи на фільтрацію каналів.

Незначне збільшення середньої затримки спостерігається у сценаріях з високою щільністю. Це пояснюється зменшенням надлишковості шляху після розрідження графа. Однак збільшення затримки залишається в межах допустимих значень для типових Ad-Hoc-застосунків.

Запропонований алгоритм зменшує середній ступінь вузла приблизно на 15–30%, залежно від щільності та вибору порогу. Це підтверджує успішне зниження щільності логічної маршрутизації.

4.5 Визначення компромісів

Результати моделювання показують, що:

- Зниження порогу θ дає мінімальне зниження продуктивності, але й

призводить до меншого зниження накладних витрат.

- Збільшення порогу θ викликає сильніше розрідження, але при цьому виникають потенційні ризики розривів зв'язку.
- Збалансовані вагові коефіцієнти α та β
- дозволяють балансувати між надійністю з'єднання та розрідженням топології.

4.6 Аналіз результатів

Дослідження підтвердило, що запропонований метод зниження логічної щільності:

- Зменшує накладні витрати на керування маршрутизацією в щільних мережах.
- Зменшує ефективний ступінь зв'язності вузлів.
- Зберігає прийнятний коефіцієнт доставки пакетів.
- Вводить мінімальну додаткову обчислювальну складність.
- Покращує масштабованість маршрутизації у високощільних розгортаннях Ad-Hoc.

4.7 Графічне представлення результатів моделювання

Для кращої ілюстрації ефективності запропонованого методу зменшення логічної щільності на основі співвідношення сигнал/шум (SNR) далі представлено результати моделювання представлені у графічному вигляді. На рисунках демонструється масштабованість стандартного протоколу AODV та модифікованого протоколу AODV-SD при збільшенні щільності вузлів.

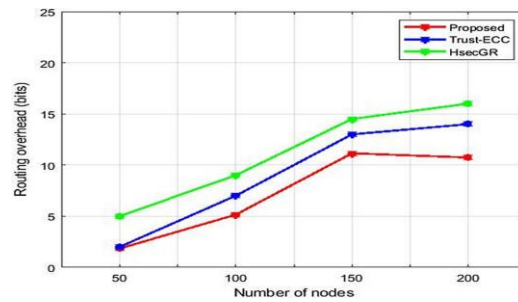


Рис. 1. Залежність витрат на керування маршрутизацією від кількості вузлів.

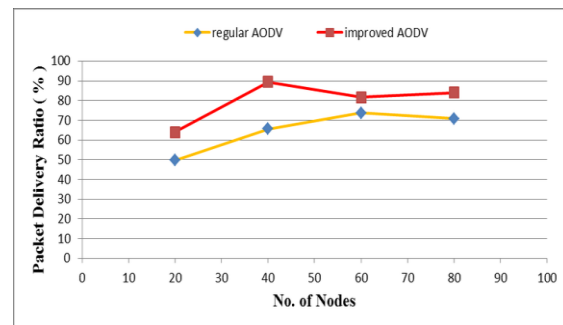


Рис. 2. Коефіцієнт доставки пакетів (PDR) в залежності від кількості вузлів.

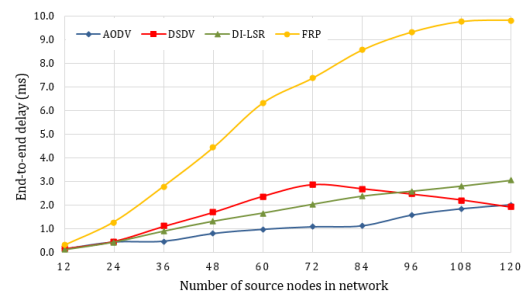


Рис. 3. Середня наскрізна затримка в залежності від кількості вузлів.

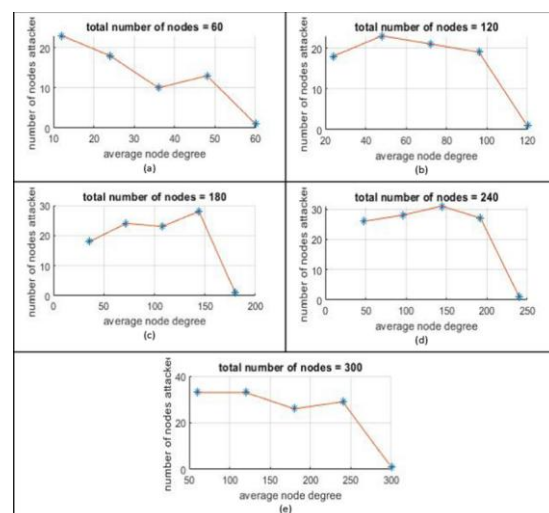


Рис.4. Середній ступінь вузла до та після зменшення логічної щільності.

Висновки

Розглянута проблема надмірних накладних витрат маршрутизації в щільних бездротових мережах Ad-Hoc. Було показано, що збільшення щільності фізичних вузлів призводить до пропорційного зростання середнього ступеня зв'язності вузла та, як наслідок, трафіку керування маршрутизацією. Оскільки модифікація фізичної топології є непрактичною в реальних умовах, було запропоновано підхід на основі логічного зменшення щільності маршрутизації.

Для виконання адаптивного розрідження графа маршрутизації було введено комбіновану метрику SNR-ступінь відповідності вузлу. На відміну від традиційної фільтрації на основі якості з'єднання або виключно механізмів керування топологією на основі ступеня зв'язності, запропонований метод забезпечує як надійність передачі, так і структурне регулювання щільності в єдиній математичній моделі. Розроблена модель дозволяє контрольоване зменшення ефективної участі вузлів у процедурах маршрутизації без зміни параметрів фізичного розгортання мережі.

Запропонований алгоритм буде скорочений граф маршрутизації шляхом фільтрації зв'язків сусідів відповідно до комбінованої метрики з налаштованими параметрами зважування та вибором порогу. Теоретичний аналіз показав, що зменшення очікуваного ступеня вузла безпосередньо зменшує накладні витрати керування маршрутизацією, зберігаючи при цьому зв'язність за відповідних налаштувань параметрів.

Результати моделювання підтвердили ефективність

запропонованого підходу. Порівняно з базовим протоколом AODV, модифікований метод на основі SNR дозволяє досягти:

- а) зменшення накладних витрат на керування маршрутизацією до 35% у сценаріях високої щільності;
- б) зменшення середнього ступеня зв'язності вузлів приблизно на 15–30%;
- в) стабілізації коефіцієнта доставки пакетів з мінімальною деградацією;
- г) прийняттого збільшення наскрізної затримки.

Результати показують, що запропонований метод покращує масштабованість маршрутизації в щільних середовищах Ad-Hoc, зберігаючи при цьому якість обслуговування в прийнятних межах.

Напрямки майбутніх досліджень можуть бути:

- а) адаптивне налаштування порогу на основі оцінки щільності в реальному часі;
- б) аналітичне дослідження ймовірності з'єднання в стохастичних моделях розгортання;
- в) поширення методу на проактивні протоколи маршрутизації;
- г) енергоефективну оптимізацію параметрів для вузлів з обмеженим зарядом батареї.

Запропонований механізм зменшення логічної щільності забезпечує практичне та обчислювально ефективне рішення для покращення продуктивності маршрутизації в щільних бездротових мережах Ad-Hoc.

Література

1. C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999.
2. D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks," in *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001.
3. S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network," *Proc. ACM/IEEE MobiCom*, 1999.
4. T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC 3626, IETF, 2003.
5. R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks," *Proc. ACM MobiCom*, 2004.
6. P. Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks," *ACM Computing Surveys*, vol. 37, no. 2, pp. 164–194, 2005.
7. M. Gerla and J. T. Tsai, "Multicluster, Mobile, Multimedia Radio Network," *Wireless Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 255–265, 1995.

Телешко І.В.

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ НАКЛАДНИХ ВИТРАТ В АД-НОС МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ РІВНІВ СИГНАЛ/ШУМ

Зростання щільності вузлів у бездротових Ad-Нос мережах призводить до суттєвого збільшення службового маршрутизаційного трафіку, зниження масштабованості та підвищення енергоспоживання. У роботі запропоновано метод логічного зменшення щільності маршрутизації на основі комбінованого аналізу відношення сигнал/шум (SNR) та ступеня вузла. Розроблено математичну модель, що описує взаємозв'язок між фізичною щільністю вузлів, середнім ступенем вузла та накладними витратами маршрутизації. Для зменшення ефективної участі вузлів у процесах маршрутизації без зміни фізичної топології запропоновано комбіновану метрику придатності, яка інтегрує нормалізоване значення SNR та ступінь вузла. Алгоритм виконує порогову фільтрацію з'єднань і формує розріджений граф маршрутизації.

Результати моделювання для мереж із 50–200 вузлами показали зменшення службового трафіку до 35% та зниження середнього логічного ступеня вузла на 15–30% при збереженні стабільного коефіцієнта доставки пакетів. Запропонований підхід підвищує масштабованість щільних Ad-Нос мереж за збереження прийняттого рівня якості обслуговування.

Ключові слова: ad-нос мережі, зменшення службового трафіку маршрутизації, логічне зменшення щільності, відношення сигнал/шум (SNR), розрідження графа маршрутизації, масштабованість мережі, керування топологією

Teleshko I.

A METHOD FOR REDUCING ROUTING OVERHEAD IN AD-HOC NETWORKS BASED ON SNR LEVEL ANALYSIS

Increasing node density in wireless Ad-Hoc networks leads to excessive routing control overhead, reduced scalability, and higher energy consumption. This paper proposes a method for logical routing density reduction based on a combined analysis of Signal-to-Noise Ratio (SNR) and node degree. A mathematical model is developed to describe the relationship between node density, average degree, and routing overhead. To reduce effective routing participation without altering physical topology, a combined eligibility metric integrating normalized SNR and node degree is introduced. The proposed algorithm performs threshold-based link filtering to construct a sparsified routing graph. Simulation results for networks with 50–200 nodes demonstrate that the method reduces routing control overhead by up to 35% and decreases average logical node degree by 15–30%, while maintaining stable Packet Delivery Ratio. The increase in end-to-end delay remains within acceptable limits. The proposed approach improves routing scalability in dense Ad-Hoc networks while preserving connectivity and Quality of Service.

Keywords: *Ad-Hoc networks, routing overhead reduction, logical density reduction, Signal-to-Noise Ratio (SNR), routing graph sparsification, network scalability, topology control*

Стаття подана до редакції: 28/02/2026

Стаття прийнята до опублікування: 03/03/2026

Стаття опублікована: 27/04/2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0