

МЕТОД ПОБУДОВИ МАСШТАБНО-ІНВАРІАНТНОЇ ТОПОЛОГІЇ МАГІСТРАЛЬНОГО РІВНЯ MESH МЕРЕЖІ

У статті запропоновано метод побудови масштабно-інваріантної топології магістрального рівня безпроводової mesh мережі. Доведено, що розподіл степеня зв'язності вузлів у моделі мережі, яку побудовано за даним методом, підпорядковується степеневому закону, тому вона має кращі показники відмовостійкості при однакових значеннях енергетичних витрат на організацію зв'язку або однакових імовірностях випадкових відмов вузлів порівняно з іншою топологією без масштабно-інваріантних властивостей із близькими середніми значеннями степеня зв'язності.

Постановка проблеми. Безпроводові mesh мережі (Wireless Mesh Networks, WMNs), що складаються з мереж доступу, з'єднаних безпроводовою магістраллю, останнім часом набули широкого поширення. Порівняно з оптоволоконними мережами WMNs мають значно нижчу вартість організації і можуть бути швидко розгорнуті. Безпроводова інфраструктура самоорганізовується, самооптимізується і стійка до відмов. Це дозволяє розширити IP-зв'язок у важкодоступних районах, що неможливо реалізувати за допомогою будь-якої іншої технології одиночного доступу. Ряд таких компаній, як Nokia, Microsoft, Motorola та Intel активно просувають безпроводові mesh мережі як можливість повнозв'язної IP-телефонії. Результати тестових випробувань показали потенційну перевагу WMNs і їх привабливу ринкову вартість [1].

Не дивлячись на швидкий розвиток безпроводових технологій передачі, пропускна здатність безпроводових з'єднань залишається обмеженою порівняно з проводовими технологіями (LANs, оптичні тощо). На продуктивність мережі впливають умови середовища передачі даних та інтерференція між безпроводовими каналами зв'язку. Для забезпечення якості обслуговування користувачів ефективне управління ресурсом залишається основною проблемою у безпроводових мережах.

Враховуючи, що в WMNs поєднуються різні традиційні і перспективні безпроводові технології, включаючи технології стільникових (WWANs), мобільних випадкових (MANETs) і сенсорних (WSNs) мереж, у WMNs з'явилась комбінація відповідних проблем управління живленням автономних джерел абонентських пристроїв, урахування мобільності абонентів, виділення каналу, мультитранзитної маршрутизації, а також проблеми мережевої конфігурації і розгортання, що відома у літературі як задача управління топологією (topology control).

Актуальність вирішення завдання управління топологією полягає у тому, що, з одного боку, занадто розріджена мережева топологія вразлива за ознакою мережевої зв'язності, з іншого, – щільна мережева топологія призводить до надмірного споживання енергії внаслідок пересічних областей дії вузлів і збільшує витрати на обслуговування мережі [4, 5].

Огляд останніх досліджень у публікацій. Аналіз сучасної літератури свідчить, що управління топологією у WMNs (динамічна настройка потужності передавачів для підтримки зв'язності мережі, мінімізації енергоспоживання або поліпшення якості

зв'язку) реалізується для того, щоб забезпечити зв'язність мережі і покриття, збільшити ефективність протоколів управління доступом носіїв і протоколів маршрутизації, оптимізувати таблицю маршрутизації, збільшити "час життя" і стійкість мережі тощо.

Формуванню мереж з ефективною топологією присвячено багато робіт, які відрізняються використовуваними моделями мереж, критеріями якості та обмеженнями, яким повинна відповідати мережа [1, 6].

Однією із поширених вимог до функціонування мережі є вимога зв'язності або k -зв'язності для забезпечення відмовостійкості. Іншою вимогою може бути максимально допустима довжина шляхів між будь-якими двома вузлами або до шлюзу. Проте останнім часом при розширенні мереж виникає проблема масштабованості, що не можливо вирішити традиційними методами.

У результаті розвитку теорії складних мереж стало можливим використання нових ідей для побудови топології у WMNs. Дослідження складних мереж є новим підходом, що враховує нетривіальні топологічні характеристики існуючих мереж [2, 7]. Відомо багато спільних характеристик між WMNs і типовими моделями складних мереж: мережі містять велику кількість вузлів і мають нетривіальні топологічні функції, вузли у мережі з'єднуються один з одним через транзитні шляхи. Такі типові складні мережеві моделі, як "small-world" [1, 7–8] і "free-scale" [2], мають характеристики, що актуальні для WMNs. "Small-world" мережі дозволяють отримати шляхи мінімальної середньої довжини між парами вузлів, що ефективно для збереження енергії при побудові топології і маршрутизації у WMNs [3, 4]. "Free-scale" мережі мають ефективні розподіли степенів зв'язності вузлів з погляду споживання живлення і показують гарантовану стійкість в умовах випадкових відмов вузлів [5, 7]. Випадкові відмови несуттєво впливають на продуктивність безмасштабної мережі [1]. Проте, якщо складні мережі подають зв'язними графами, вузли в яких напряму з'єднуються відповідно до своїх логічних зв'язків, то WMNs описують просторово рознесеними графами, в яких існування зв'язків залежить від розміщення вузлів і їх радіочастотного діапазону [3].

Деякі спроби їх використання були запропоновані для опису безпроводових мереж неоднорідними мережами з характеристиками "small-world" або "free-scale". Так, метод побудови мережевої топології у вигляді спрямованого кругового графа (UDG), що враховує всі зв'язки в діапазоні передачі вузлів, є базовим для WSNs [1]. Проте модель UDG має високу концентрацію зв'язків, що зменшує залишкову енергію джерел живлення абонентських вузлів під час періодичного обслуговування топології мережі і процесу вибору маршруту. Тому такий спосіб побудови топології для WMNs є неефективним.

Майже всі інші способи побудови топології у WSNs створюють часткову топологію з UDG. На основі реалізованого механізму побудови топології вони можуть бути класифіковані в однорангові мережі або ієрархічні мережі із кластеризацією [3–5].

В однорангових мережах всі вузли, зазвичай, виконують однакову роль у топології і мають однакові функції. Типовими методами побудови таких топологій мереж є [1, 2]: алгоритм k -найближчих вузлів, TopDisc, евклідове мінімальне кістякове дерево, граф триангуляції Делоне, "конусний" алгоритм управління топологією тощо.

Вузли в ієрархічних мережах з кластеризацією є функціонально неоднорідними, оскільки ними керує контролер кластера. LEACH є типовою ієрархічною мережевою моделлю топології, в якій мережа кластеризується і періодично оновлюється. Контролери кластерів відповідають за з'єднання зі шлюзом (стоком) для решти вузлів. Вузли

самостійно випадковим чином обирають кому бути контролером кластера, враховуючи значення залишку запасу енергії передавача і чи був він контролером кластера в попередніх r періодах.

У роботі [2] запропоновано метод побудови мережі (модель Barabasi-Albert, BA) для генерації безмасштабних мереж, що описується таким чином:

(1) ініціалізація: початкова мережа сформована з повнозв'язної мережі невеликого розміру із m_0 вузлів і $m_0(m_0 - 1) / 2$ зв'язків;

(2) збільшення: додається новий вузол;

(3) правило приєднання: новий вузол приєднується до m ($m \leq m_0$) доступних вузлів, відповідно до ймовірностей $\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$, де k_i – степінь вузла (кількість топологічних зв'язків) i і j , що знаходяться в множині доступних вузлів у поточний момент;

(4) зупинка: повторюються кроки (2) і (3), поки всі вузли і зв'язки не будуть додані до мережі.

У моделі BA розподіл степенів вузлів підпорядковується степеневому розподілу $P(k) = k^{-\gamma}$, де масштабна експонента $\gamma = 3$, $\sum_j k_j$ – сума степенів усіх існуючих вузлів на кожному кроці. Таким чином, механізм пріоритетного приєднання в моделі BA працює глобально. Тому BA є глобальною моделлю побудови топології, яку неможливо застосувати для великих розподілених телекомунікаційних мереж.

Більшість інших методів побудови безмасштабних моделей реалізують процедуру збільшення мережі і правило пріоритетного підключення вузлів аналогічно до моделі BA [2]. Основні відмінності між цими методами полягають у тому, що вони використовують різні правила приєднання, що призводить до різних значень масштабуючої експоненти γ в розподілі степенів вузлів та інших безмасштабних властивостей.

У роботі [7] запропоновано метод побудови топології мережі із “small-world” властивостями. Так само, як і в моделі BA, метод реалізується за чотири кроки: ініціалізації, збільшення, пріоритетного приєднання і зупинки. По-іншому реалізується механізм пріоритетного приєднання вузлів: новий вузол вибирає у довільному порядку із усіх існуючих M вузлів, розглядаючи їх як свої можливі “локальні світи”. Ймовірність пріоритетного приєднання нового вузла до існуючих вузлів i в інтервалі t розраховується як

$$\Pi_i = \Pi' (i \in local - world) \frac{k_i}{\sum_{j \in local - world} k_j}, \quad (1)$$

де $\Pi' [i \in local - world] = M / (m_0 + t)$; M – кількість вузлів, що обираються для приєднання у довільному порядку;

local – world (локальна область) – множина вузлів, яку розміщено в діапазоні передачі нового вузла;

Використання множини *local – world* показує, що метод побудови мережі розподілений, проте просторові зв'язки між вузлами не розглядаються. Тому такий метод побудови топології мережі не може бути використаний для бездротових телекомунікаційних мереж.

Кілька методів були запропоновані для створення WMNs з безмасштабними властивостями [1, 2, 8]. Ці методи використовують таку характеристику складних мереж, як зростання, пріоритетне приєднання, деякі з них враховують властивості локальної області вузлів у WMNs.

У [2] запропоновано один із таких методів побудови топології мережі на основі методів масштабно-інваріантної теорії. У цій моделі кожен вузол для балансування споживання енергії має максимальне значення степеня зв'язності вузла k . Новий вузол у мережі має ймовірність P_e , тому що він несправний у момент підключення. Ймовірність того, що новий вузол буде з'єднаний з існуючим вузлом i , розраховується таким чином:

$$P_i = (Pd_{iv} \leq r)(1 - P_e) \frac{k_i}{\sum_{j \in total-network} k_j - qk_{max}}, \quad (2)$$

де d_{iv} – відстань між новим вузлом v та існуючим вузлом i ;

r – діапазон передачі;

q – кількість вузлів, що вже досягли максимального значення насичення k ;

$total - network$ – множина всіх вузлів, що доступні для з'єднання;

ймовірність $P(d_{iv} \leq r) = \pi r^2 / S$, де S – вся зона обслуговування WMNs.

Одним із основних недоліків методу [2] є те, що сума P_i набагато менша за 1, тому масштабуюча експонента $\gamma = 1 + 2S / (\pi r^2)$ набагато більша за 3, що нераціонально у реальних мережах.

У роботі [1] автори пропонують, щоб метод побудови безмасштабної топології був довільним. Усі вузли у мережі послідовно з'єднуються із випадковою кількістю вузлів X , що визначаються законом розподілу $\rho(x) = Ax^{-\theta}$, де $\theta > 1$ і $A = \int_{min}^{max} \rho(x) dx = 1$.

Вирівнювання споживання енергії між вузлами мережі цим методом не передбачено. Існує можливість, що вузол з меншим запасом енергії має більшу вагу x , тому має більший пріоритет для використання, що в результаті збільшує споживання енергії.

Метод побудови топології, що враховує витрати енергії в WSNs запропоновано у [8]. Відповідно до цього методу пропонується, що ймовірність P_i , з якою новий вузол з'єднується з існуючим вузлом i , залежить від його степеня зв'язності k_i і залишку енергії джерела живлення вузла E :

$$P_i = \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in local-area} f(E_j)k_j}, \quad (3)$$

де i – вузол, що включено до топології;

j – вузол з множини вузлів $local - area$, що мають достатній рівень енергії джерела живлення для підключення до топології мережі у поточному такті;

E_i, E_j, k_i, k_j – значення залишку енергії і степеня зв'язності відповідних вузлів;

$f(E)$ – функція, що визначається як відношення між залишком енергії та ймовірністю того, що її буде достатньо для організації зв'язку.

Функція $f(E)$ повинна бути зростаючою: чим більше енергії у вузлі, тим більша ймовірність того, що він з'єднається із новим.

У виразі (3) ймовірність P_i менша за 1 і масштабуюча експонента γ степеневого розподілу дорівнює 1, що також нераціонально в реальних мережах.

Таким чином, методи теорії складних мереж не можуть бути безпосередньо застосовані у WMNs, але підходи, що в них використовуються, дозволяють реалізувати необхідні топологічні властивості в реальних мережах.

Постановка завдання. Відповідно до визначення WMNs вузли магістрального рівня mesh мережі розподілені у певній області і малорухливі (або знаходяться у статичному положенні). Для організації опорної мережі між ними створюються з'єднання.

Нехай задано початкову повнозв'язну мережу із m_0 вузлів (точок безпроводового доступу) і $m_0(m_0 - 1)/2$ зв'язків між ними. Усі вузли мають прямі зв'язки із мережевим шлюзом.

Необхідно побудувати масштабно-інваріантну топологію магістрального рівня mesh мережі, що складається з m вузлів (точок доступу) із врахуванням залишку енергії вузлів E , що визначено мінімальним і максимальним енергетичними рівнями передавачів E_{min} , E_{max} та максимальним значенням зв'язності вузла k . Розподіл енергії E описується

$$\text{законом } \int_{E_{min}}^{E_{max}} \rho dE = 1.$$

Метою статті є розробка методу оптимального з'єднання безпроводових точок доступу магістрального рівня mesh мережі за критерієм масштабно-інваріантності.

Виклад основного матеріалу. Процес побудови топології визначимо за два етапи: на першому етапі вузли розподіляються у довільному порядку. Для цього задамося множиною *непідключених вузлів* як вузлів, що мають доступ до мережевої топології протягом усього процесу її побудови, як показано на рис. 1. Довільний вузол, відмічений як вузол b , отримує інформацію від усіх інших вузлів у своєму діапазоні передачі за допомогою обміну HELLO-повідомлень і розглядає ці вузли як свої *потенційні найближчі (сусідні) вузли*. Після чого на другому етапі побудова топології розпочинається з приймача (шлюзу), зростає за правилом пріоритетного приєднання і зупиняється, коли всі вузли будуть додані у мережу.

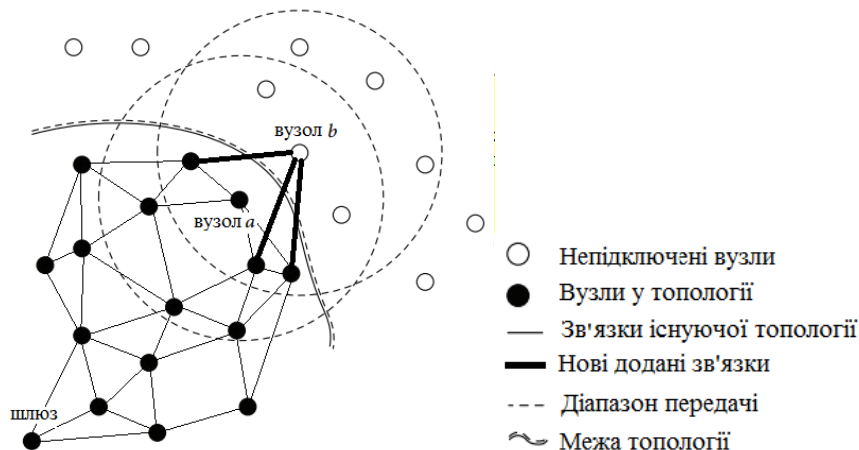


Рис. 1. Підключення вузла b до мережі

Метод побудови топології магістрального рівня WMNs запропоновано реалізувати відповідно до таких кроків.

Крок 1. Вузли розподілені випадковим чином в області S . Кожен вузол отримує інформацію про свої потенційні найближчі вузли в діапазоні передачі через HELLO-повідомлення. На даний момент топологія мережі не сформована, мережа не є зв'язною.

Крок 2.

2.1. Побудова топології розпочинається з приймача і його $m_0 - 1$ потенційних, граничних з ним вузлів та e_0 випадкових зв'язків між ними.

2.2. На кожній ітерації додається новий вузол до мережі. Для цього визначається з m_0 вузол, що має найбільшу кількість доступних у своєму найближчому оточенні вузлів, і зазначається як вузол a . Обраний у довільному порядку новий вузол із найближчого оточення вузла a зазначається як вузол b . Відповідно до такого підходу мережа "розростається" у бік непідключених вузлів і покриває область S із доступною швидкістю.

2.3. Довільним чином обираються m вузлів, які вже включені у топологію, є потенційними найближчими вузла b і з'єднуються з ним. Якщо кількість потенційних найближчих вузлів вузла b буде меншою за m , то всі ці вузли будуть з'єднані з новим вузлом. Вузол b з'єднується із вузлом i з m потенційних найближчих вузлів на основі правила пріоритетного приєднання:

$$P_i = P_i^* (i \in local - area) \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in local - area} f(E_j)k_j - qk_{max}}, \quad (4)$$

де k_{max} – визначена верхня межа значення степеня зв'язності вузла;

q – кількість вузлів, що вже мають максимальний степінь k ;

$f(E)$ – функція енергетичних витрат вузла для організації зв'язку, що використовується у моделі (коли степінь вузла досягає значення k_{max} , до нього не може бути додано інших зв'язків).

2.4. Повторюються кроки (2.1–2.3), доки всі вузли не будуть додані до топології.

Таким чином, топологія магістрального рівня мережі формується покроково шляхом додавання нових вузлів і їх з'єднання з іншими вузлами у діапазоні передачі за допомогою пріоритетного правила приєднання. Однією із умов вибору нового вузла є те, що розподілений вузол знаходиться у діапазоні передачі, щонайменше, хоча б одного вузла, що належить до топології мережі. Тому, як тільки непідключений вузол з'єднується з іншими вузлами, він буде з'єднаний, щонайменше, з одним вузлом відповідно до запропонованого алгоритму.

У виразі (4), $P_i^* (i \in local - area)$ належить до множини найближчих вузлів вузла i у діапазоні його передачі на інтервалі t :

$$P_i^* (i \in local - area) = \frac{n\phi}{(m_0 + t)}. \quad (5)$$

Передбачається, що лише мала кількість вузлів досягне верхньої межі k_{max} , таким чином, qk_{max} – незначне. Тому в області *local-area* маємо

$$\sum_{local-area} f(E_j)k_j - qk_{max} \approx \sum_{local-area} f(E_j)k_j = \overline{M}\overline{E}\langle k \rangle, \quad (6)$$

де \overline{M} – очікувана кількість вузлів в обмеженій області нового вузла, що дорівнює $n\phi$, як і очікувана кількість вузлів у діапазоні передачі у моделі UDG;

\overline{E} – математичне сподівання $f(E)$;

$\langle k \rangle = 2(mt + e_0) / (m_0 + t)$ – середнє значення степенів вузлів у мережі на інтервалі t , де m_0 і e_0 визначаються як кількість вузлів і зв'язків, отриманих на початку формування мережі відповідно.

Продиференціюємо вираз (4) за k_i :

$$\begin{aligned} \frac{dk_i}{dt} &= m\Pi_i^* (i \in local-area) \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in local-area} f(E_j)k_j - qk_{max}} = \\ &= m \frac{n\phi}{m_0 + t} \frac{f(E_i)k_i}{n\overline{E}(2(mt + e_0) / (m_0 + t))} = \frac{mf(E_i)k_i}{2\overline{E}(mt + e_0)}. \end{aligned} \quad (7)$$

У мережі великого розміру e_0 можна відкинути, тоді отримаємо

$$\frac{dk_i}{dt} \approx \frac{f(E_i)k_i}{2\overline{E}t}. \quad (8)$$

Враховуючи, що $f(E)$ – збільшувана функція, встановимо $f(E_i)k = E$, тому

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{Ek_i}{2\overline{E}t}. \quad (9)$$

Відповідно до початкового степеня вузла i на інтервалі t_i , $k_i(t_i) = m$ отримаємо

$$k_i = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^\beta, \text{ де } \beta = E / 2\overline{E}. \quad (10)$$

Імовірність того, що степінь вузла i менший від k , визначається як

$$P(k_i(t)) < k = 1 - P\left(t_i < t \left(\frac{m}{k}\right)^{1/\beta}\right) = 1 - \frac{t(m/k)^{1/\beta}}{m_0 + t}, \quad (11)$$

Отримаємо щільність ймовірності степеня вузла з енергією E як

$$P(k_E) = \frac{dp(k_i(t) < k)}{dk} = \frac{1}{\beta} m^{1/\beta} \frac{t}{m_0 + t} k^{-(1+1/\beta)} \approx \frac{1}{\beta} m^{1/\beta} k^{-(1+1/\beta)}, \quad (12)$$

де $\beta \in (E_{min} / 2\bar{E}, E_{max} / 2\bar{E})$;

E_{min}, E_{max} – граничні значення енергії E .

Тому розподіл $P(k_E)$ має бути описаний степеневим законом із значеннями степеня $\gamma = (1 + 1/\beta)$.

Відповідно до цього отримаємо щільність ймовірності залишку енергії E :

$$P(k) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \rho P(k_E) dE = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \rho \frac{1}{\beta} m^{1/\beta} k^{-(1+1/\beta)} dE, \quad (13)$$

де ρ – є розподіл енергетичних витрат E із межами E_{min}, E_{max} , що визначається виразом

$$\int_{E_{min}}^{E_{max}} \rho dE = 1.$$

Приклад. Необхідно побудувати масштабно-інваріантну топологію магістрального рівня mesh мережі, що складається із 1000 вузлів; кількість вузлів початкової топології, $m_0 = 10$; кількість зв'язків початкової топології, $e_0 = 10$; кількість зв'язків, що додаються на кожній ітерації, $m = \{1, 3, 5, 10\}$; нижня межа енергії $E_{min} = 0.5E$; верхня межа енергії

$$E_{max} = E; \text{ верхня межа зв'язності вузла, } k = 30; \text{ закон розподілу енергії } E : \int_{E_{min}}^{E_{max}} \rho dE = 1.$$

Ймовірність того, що степінь вузла i менший за $k = 30$, визначається як:

$$P(k_i(t) < 30) = 1 - \frac{t(m/30)^{1/\beta}}{10+t} \text{ для різних значень } m = 1, 3, 5, 10.$$

Відповідно до початкових даних щільність імовірності степеня вузла з енергією E (11) із зменшенням граничного значення E_{min} зростає, а це означає, що зростає ймовірність залишку енергії E (рис. 2).

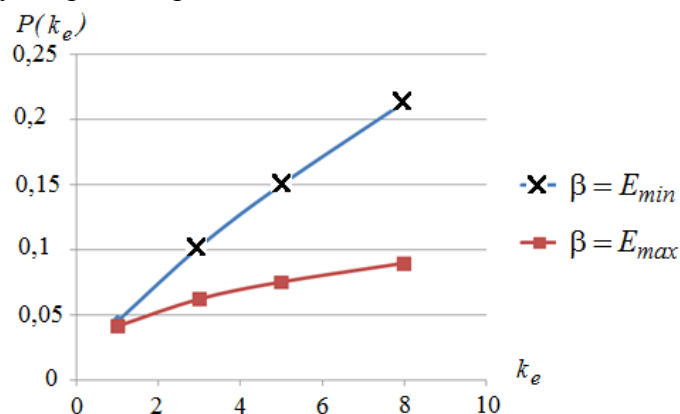


Рис. 2. Залежність імовірності залишку енергії вузла $P(k_E)$ від степеня зв'язності k_E для різних значень мінімально необхідної для організації зв'язку потужності β

Відповідно до (12) розподіл імовірності степеня зв'язності вузла з енергією E із збільшенням покриття мережі (кількості вузлів, включених у топологію) має безмасштабні властивості (рис. 3) і наближається до розподілу степенів моделі ВА. Значення степенів повинні бути більшими, ніж у моделі ВА (кожен вузол має щонайменше m зв'язків), у той час, коли існують вузли із степенем зв'язності, меншим за m . Це обумовлено тим, що в запропонованій мережі вузол може мати потенційних найближчих вузлів менше за m . Якщо це відбувається, степінь такого вузла дозволяє забезпечити низьку вартість його обслуговування, що можливо за рахунок просторово рознесеної структури mesh мережі.

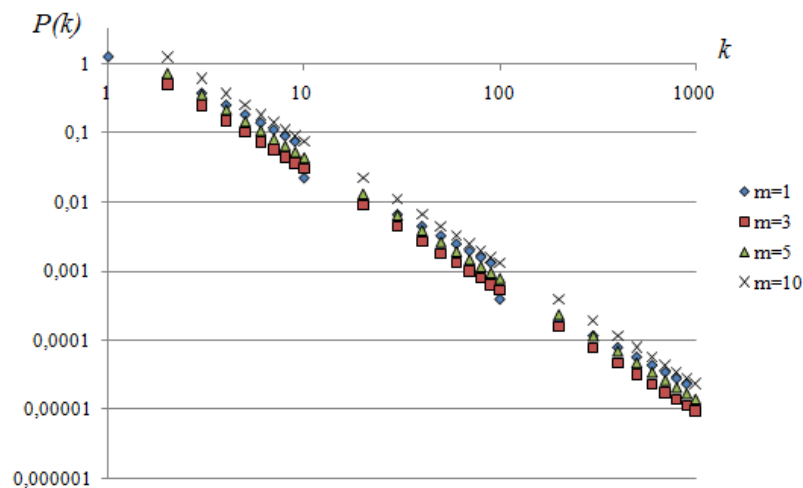


Рис. 3. Степеневий розподіл зв'язності вузлів мережі для $m=1, 3, 5, 10$

Висновки. Управління топологією є однією із основних проблем ефективного використання ресурсів WMNs. У статті запропоновано метод побудови масштабно-інваріантної топології мережі, що використовує локальну інформацію. Процес побудови топології розділено на два етапи. На першому етапі вузли розподілено у довільному порядку в обмеженій області. На другому етапі побудова топології розпочинається зі шлюзу, зростає відповідно до правила пріоритетного приєднання і зупиняється, коли всі вузли будуть додані до мережі.

Запропонований підхід дозволяє отримати теоретичний розподіл степеня зв'язності вузлів у мережі, близькій до моделі ВА. При умові $k \geq m$ розподіл степеня зв'язності описується степеневим законом, тому така модель має кращі показники відмовостійкості при однакових значеннях енергетичних витрат або ймовірності випадкових відмов вузлів порівняно з іншою топологією без масштабно-інваріантних властивостей із близькими середніми значеннями степеня зв'язності.

Перспективою подальших досліджень вважається врахування при побудові топології мережі ймовірності відмови вузлів і зв'язків у результаті руйнуючих зовнішніх і внутрішніх факторів, що мають місце під час роботи оперативних служб і підрозділів тактичної ланки в екстремальних ситуаціях, під час виконання спеціальних завдань тощо. Це дасть можливість прогнозувати, автоматично визначати вихід із ладу окремих елементів мережі і здійснювати миттєве спрямування трафіка в обхід пошкоджених ділянок по вільних каналах зв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cui L. Y. Complex networks: an engineering view / L. Y. Cui, S. Kumara, R. Albert // IEEE Circuits and Systems Magazine, 2010. – Vol. 10, no. 3. – P. 10–25.
2. A scale-free topology construction model for wireless sensor networks / Lurong Jiang, Xinyu Jin, Yongxiang Xia, Bo Ouyang, Duanpo Wu and Xi Chen // International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014. – Vol. 1. – P. 15–23.
3. Ландэ Д. В. Интернетика: Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы / Д. В. Ландэ, А. А. Снарский, И. В. Безсуднов. – М. : Книжный дом “Либерком”, 2009. – 264 с.
4. Воротников В. В. Энергоэффективная иерархическая маршрутизация в самоорганизующихся динамических сетях / В. В. Воротников, Ю. А. Кулаков // УСИМ. – 2014. – № 1. – С. 70–76.
5. Пат. 107528 Україна, МПК H04N 20/00 (2008.01). Спосіб формування кластерів вузлів мобільної мережі для ієрархічної маршрутизації / В. В. Воротников, Ю. О. Кулаков, О. С. Бойченко ; заявник і патентовласник В. В. Воротников, Ю. О. Кулаков, О. С. Бойченко. №а 2013 09911; заявл. 09.08.2013; опубл. 12.01.2015, бюл. “Промислова власність”, № 1. – К. : ДП УІПВ. – 2015.
6. Uster H. Integrated topology control and routing in wireless sensor networks for prolonged network lifetime / H. Uster, H. Lin // Ad Hoc Networks, 2011. – Vol. 9, no. 5. – P. 835–851.
7. Helmy A. “Small worlds in wireless networks” / A. Helmy // IEEE Communications Letters, 2003. – Vol. 7, no. 10. – P. 490–492.
8. Ishizuka M. The reliability performance of wireless sensor networks configured by power-law and other forms of stochastic node placement / M. Ishizuka, M. Aida // IEICE Transactions on Communications, 2004. – Vol.87, no. 9. – P. 2511–2520.

Подано 22.09.2015

В. В. Воротников

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНОЙ ТОПОЛОГИИ МАГИСТРАЛЬНОГО УРОВНЯ MESH СЕТИ

В статье предложен метод построения масштабно-инвариантной топологии магистрального уровня беспроводной mesh сети. Доказано, что распределение степени связности узлов подчиняется степенному закону, поэтому такая топология имеет лучшие показатели отказоустойчивости при одинаковых значениях энергетических затрат на организацию связи или одинаковых вероятностях отказов узлов по сравнению с другой топологией, не обладающей масштабно-инвариантными свойствами, с близкими средними значениями степени связности.

V. V. Vorotnikov

METHOD OF CONSTRUCTION OF A SCALE-INVARIANT TOPOLOGY BACKBONE LAYER MESH NETWORK

This paper proposes a method for constructing a scale-invariant topology backbone layer Wireless mesh network. It is proved that the distribution of the degree of connectivity nodes obeys a power-law, so this topology has the best indicators of resiliency for the same values of energy costs for the organization of communication or the same probability of failure of nodes compared to other topology that does not have the scale-invariant properties with similar average values of the degree of connectivity.