

Чумаченко С.С.,

orcid.org/0009-0003-8755-5286,

e-mail: serjek2@gmail.com,

Чумаченко Б.С.,

orcid.org/0000-0002-0354-2206,

e-mail: body21033@gmail.com,

Малоєд М.М.,

orcid.org/0000-0001-5468-9729,

e-mail: maryna.maloied@npp.nau.edu.ua,

Одарченко Р.С.,

orcid.org/0000-0002-7130-1375,

e-mail: roman.odarchenko@npp.nau.edu.ua,

Хавікова Ю.І.,

orcid.org/0000-0003-1017-3602,

e-mail: pirogova0303@gmail.com

МОДЕЛЬ ІНТЕРНЕТ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ МЕРЕЖЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

Національний авіаційний університет

Вступ

З появою Інтернету речей стали поширеними мережі з високою щільністю вузлів [1]. Під час дослідження таких мереж було виявлено ряд особливостей, серед яких важливим фактором є робота вузлів в умовах відносно низького співвідношення сигнал/шум (*SNR*) [2].

Це обумовлено внутрішньо каналними перешкодами, що виникають через значну кількість вузлів, розташованих у безпосередній близькості один до одного. Низький *SNR* призводить до збільшення кількості транзитів на шляху між вузлом-джерелом та вузлом-одержувачем. Відповідно, це призводить до збільшення середньої довжини такого шляху, який вимірюється кількістю транзитів.

Наукові дослідження мереж з високою щільністю [3-7] довели, що багато з них можуть бути ефективно представлені за допомогою двовимірних моделей. Це особливо стосується мереж, де вузли розташовані на одному рівні, наприклад, відкритих просторах або одноповерхових будівлях.

У міських умовах більшість вузлів *IoT* знаходяться в житлових та офісних приміщеннях [7-10], де використовуються

технології "розумного будинку", системи контролю доступу, системи безпеки та інше. У таких мережах вузли можуть взаємодіяти як на одному рівні (поверсі), так і між різними рівнями. Ці мережі розподілені у багаторівневих будівлях та зазвичай мають тривимірну структуру.

Структура таких мереж визначається параметрами будівель, в яких вони розміщені. Дослідження [4] показали, що розподіл вузлів мережі на одному рівні може мати властивості самоподібності, що пояснюється властивостями приміщень на відповідному поверсі будівлі.

Розповсюдження радіосигналів у середині будівель значною мірою залежить від архітектурного дизайну та матеріалів, використаних для стін і підлог. Це значно ускладнює моделювання мереж Інтернету речей порівняно з попередніми підходами, зокрема з моделями, представленими в [4] та [5].

Модель з [4] не враховує бар'єри у вигляді стін та підлог, що робить її непридатною для моделювання мереж Інтернету речей у приміщеннях. Модель з [5], хоча і враховує двовимірний розподіл вузлів, але не може моделювати складні тривимірні структури будівель.

З цього виходить, що у найбільш загальному випадку мережа Інтернету речей розташована у тривимірному просторі і складається з різних мережевих компонентів, таких як абонентські пристрої, точки доступу чи ретранслятори. Ці компоненти можна розглядати як вузли мережі.

Зв'язок між елементами мережі може бути різним і визначатися такими фундаментальними структурами, як "точка-точка", "зірка", "дерево" або гібридна архітектура. Найбільш поширеним типом є гібридна структура, яка охоплює всі варіації мережевої конфігурації. Характеристики мереж високої щільності можуть суттєво відрізнятися в залежності від конкретних завдань та вимог.

З дослідження [6] видно, що у мережах з високою щільністю, таких як мережі Інтернету речей, часто використовується узгоджена організація (регулярна структура). Ця структура складається з вузлів мережі, які пов'язані між собою визначеним чином. Завдяки цій структурі можна ефективно встановлювати маршрути передачі даних між будь-якими двома вузлами мережі.

На характеристики мереж високої щільності в першу чергу впливає їх фізична структура, а в другу – широкий спектр можливостей для вибору логічної структури.

Основними характеристиками фізичної структури є значна кількість вузлів мережі та вплив навколишнього середовища на їх роботу. Навколишнє середовище має значний вплив на фізичну конфігурацію мережі. Наприклад, навколишнє середовище може охоплювати різні аспекти, такі як побудовані стіни і підлоги, будівлі і споруди, тунелі, ліси, природні особливості рельєфу, а також рухомі або нерухомі об'єкти, такі як рух транспортних засобів, які потенційно можуть перешкоджати проходженню радіосигналів.

Ці фактори також впливають на розміщення вузлів мережі, яке в більшості випадків є випадковим. Це може бути обумовлено низкою факторів, таких як

обмеження простору, доступність ресурсів та необхідність гнучкості.

Випадкове розміщення вузлів може мати як позитивні, так і негативні наслідки. З одного боку, таке розміщення може зробити мережу більш стійкою до відмов, оскільки будь-який вузол може потенційно виконувати роль маршрутизатора. З іншого боку, таке розміщення може призвести до нерівномірного розподілу трафіку та погіршення продуктивності мережі.

Мета

Метою даного дослідження є доведення корисності висновків теорії перколяції для оцінки зв'язності мережі Інтернету речей. Ймовірність наявності маршруту між двома парами вузлів визначає зв'язність мережі. Коли ця ймовірність наближається до одиниці, мережу вважають зв'язною. Наприклад, можна використовувати пошук найкоротших шляхів між усіма парами вузлів (вершинами графа, що описує мережу) для оцінки зв'язності в конкретній ситуації. Дві причини ускладнюють розв'язання цієї проблеми. По-перше, обчислювальний ресурс, необхідний для цього, зростає пропорційно до n^3 , де n – кількість вершин графа. По-друге, існуючі аналітичні підходи зазвичай спрямовані на конкретні випадки, а не на велику кількість вузлів.

Основна частина

На підставі попередніх досліджень встановлено, що структура мереж Інтернету речей, розташованих у багатоповерхових будівлях та спорудах, суттєво відрізняється від двовимірних моделей. Ця відмінність, пояснюється наявністю третього виміру та неоднорідностями, що виникають під час розповсюдження радіосигналів у таких середовищах. Присутність стін, міжповерхових перекриттів та інших елементів конструкції будівель ускладнює процес передачі сигналів та має значний вплив на топологію мережі.

Багатоповерхові будівлі, як правило, мають регулярну структуру, яку можна описати як фрактальну самоподібну систему. В межах одного приміщення вузли

мережі розташовуються таким чином, що перебувають в зоні прямої видимості один від одного, але на дуже коротких відстанях. Використання моделі [7] для опису зони покриття мережі в таких умовах може призвести до значних помилок, оскільки не враховує вплив стін та інших перешкод.

Згідно з дослідженням [8], сигнал радіочастотного зв'язку у сучасних будівлях значно послаблюється через бетонні стіни та підлогу, що може призводити до втрат від 9 до 28 дБ, залежно від частоти сигналу та конкретного типу будівлі.

Для аналізу функціонування мережі в будь-якій будівлі, надзвичайно важливо забезпечити взаємодію між вузлами, що розташовані в різних приміщеннях. Це дозволяє спростити модель, припускаючи, що всі вузли в кімнаті можуть бути замінені одним вузлом.

Пропонована на рис. 1. прямокутна решітка відображає топологію мережі всередині будівлі, де вузли решітки відповідають вузлам мережі, а ребра решітки – зв'язкам між ними.

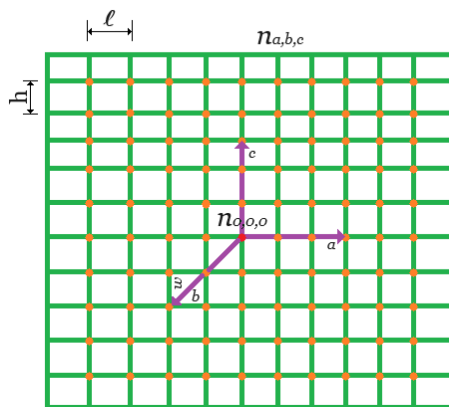


Рис. 1. Модель мережі, яка описана прямокутною сіткою

За певних умов цю структуру можна розглядати як базову кубічну решітку [9].

Функціонування такої мережі описується маршрутизацією повідомлень від вузла-джерела ns до вузла-приймача nt . Така доставка можлива лише тоді, коли існує принаймні один маршрут між цими вузлами. На приведеній на рис. 1 решітці зв'язки існують лише між сусідніми вузлами, тобто вузлами, що розташовані в сусідніх приміщеннях. Це припущення буде

виправдане, коли потрібно оцінити нижні межі функціональності мережі.

Для опису моделі взаємодії вузлів у мережі, необхідно оцінити рівень послаблення сигналу перешкодами (ПСП) у конкретному місці розташування вузла. Тому, необхідно зосередитись на тому, що рівень потужності завади буде значно вище, а ніж рівень природнього теплового шуму, де останнім можна знехтувати в даному аналізі.

Для оцінки згасання в приміщенні краще обрати емпіричну модель згасання, рекомендовану в роботі [11].

$$\lambda(\Delta) = 20 \ln F + n \lg \Delta + \lambda_F(\psi) - 27.9 \text{dB}, \quad (1)$$

де, Δ – відстань (м), F – частота (МГц), n – коефіцієнт втрат потужності, λ_F – коефіцієнт втрат через проходження сигналу через перешкоду (дБ), ψ – кількість перешкод.

За аналогією з [12] опишемо аналітичну модель формування завадового сигналу виразом для трьох вимірів

$$\pi_{oi} = \tilde{\Delta} \iiint_s \alpha(x, y, z), \quad (2)$$

де, змінна $\tilde{\Delta}$ – це потужність інтерференції, що генерується на одиницю об'єму (Вт/м³), коефіцієнт $\alpha(x, y, z) = \alpha(a, b, c)$ – визначає, як потужність завади в точці O , залежить від координат джерела завади, s – визначає площу, яка розглядається.

Посилаючись на модель (2), а також модель аналізованої мережі, можна отримати наступний вираз для залежності коефіцієнта, вираженого через відстань до джерела завади Δ :

$$\alpha(\Delta) = \frac{Q}{F^2 \Delta^a \Lambda(\psi)}, \quad (3)$$

де, Δ – відстань між точкою спостереження і джерелом завад, a – коефіцієнт, який залежить від умов поширення сигналу, F – частота сигналу (МГц), Q – постійна величина (відповідно до моделі (1), $Q = 10^{2.8}$), $\Lambda(\psi)$ – ослаблення сигналу, викликане перешкодами, ψ – кількість перешкод.

Модель (3) описує поведінку системи у неперервному просторі, тоді як на рис. 1 представлено дискретне представлення цієї системи, яке складається з окремих вузлів. Зважаючи на дискретну структуру, рівняння (2) можна перетворити на суму по трьох вимірах, що стане важливим кроком у чисельному моделюванні цієї системи:

$$\pi_{oi}(a, b, c) = \Delta_0 \sum_{a=-\infty}^{\infty} \sum_{b=-\infty}^{\infty} \sum_{c=-\infty}^{\infty} \alpha(a, b, c), \quad (4)$$

де, π_{oi} – потужність передавача у вузлі мережі (Вт).

Припустимо, що в даній моделі решітка простягається нескінченно в кожному вимірі, а точка спостереження знаходиться у вузлі $n_{0,0,0}$. Таким чином, значення індексів можуть відноситись до будь-якого вузла решітки, а також, приймати цілі значення $a, b, c = -\infty, \dots, \infty$.

Якщо в моделі показаній на рис. 1, розміри елементарної комірки (дорівнюють висоті “ h ”, ширині “ w ” та довжині “ l ”), то відстань Δ , між точкою спостереження та будь-яким вузлом решітки можна описати так:

$$\Delta(a, b, c) = \sqrt{(al)^2 + (bw)^2 + (ch)^2}, \quad (5)$$

Відповідно до моделі (2), згасання сигналу від перешкод, можна визначити наступним чином:

$$\Lambda(\psi) = A\psi, \quad (6)$$

де, A – це коефіцієнт, який вимірює ступінь ослаблення сигналу бар'єром. Модель (1) показує, що значення A для бетонної стіни або плити перекриття може коливатися від 7,9 (9 дБ) до 631,0 (28 дБ). У цьому документі для ілюстрації використовується рекомендоване значення 10 (10 дБ) для житлових будинків на частоті 2,4 ГГц.

У даній моделі ми припускаємо, що сигнал поширюється прямолінійно вздовж прямої лінії, що з'єднує точку спостереження з вузлом $n_{a,b,c}$. Кількість перешкод у цьому напрямку дорівнює кількості вертикальних і горизонтальних площин, що перетинаються центрами ребер, які з'єднують вузли решітки. Це число дорівнює

сумі абсолютних значень індексів a, b та c . Тоді:

$$\Lambda(a, b, c) = A(|a| + |b| + |c|) \quad (7)$$

Тоді вираз (3) для коефіцієнта зниження потужності можна виразити через індекси наступним чином:

$$\alpha(a, b, c) = \frac{q}{F^2 \sqrt{(al)^2 + (bw)^2 + (ch)^2} A(|a| + |b| + |c|)}, \quad (8)$$

Розглядаючи рівняння (5) і (6), можна виразити рівняння (2) з використанням індексів вузлів решітки. Решітка демонструє регулярність і симетрію відносно центру спостереження. Тому для спрощення аналізу можна зосередитися виключно на додатних значеннях індексів, які відповідають одній восьмій частині решітки. Цього можна досягти, ввівши в формулу відповідний множник. Аналогічно [4], введемо пороговий рівень потужності P_m у точку прийому, при перевищенні якої, сигнал не сприймається, як завада. Вираз для потужності завади в місці спостереження можна сформулювати наступним чином:

$$\pi_{oi} = q8 \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m \sum_{c=1}^m I_A(P_{a,b,c}) P_{a,b,c}, \quad (9)$$

де, $P_{a,b,c}$ – потужність завади, що генерується вузлом a, b, c в точці спостереження, q – інтенсивність навантаження, m – кількість вузлів мережі.

$$P_{a,b,c} = P_0 \frac{q}{F^2 \sqrt{(al)^2 + (bw)^2 + (ch)^2} + A(a+b+c)}, \quad (10)$$

$I_A(P_{a,b,c})$ – це індикаторна функція, яка гарантує, що підсумовуються лише потужності сигналів, які сприймаються як завади.

$$I_A(P_{a,b,c}) = \begin{cases} P_{a,b,c} & P_{a,b,c} < P_m \\ 0 & P_{a,b,c} \geq P_m \end{cases}. \quad (11)$$

На рис. 2 показано залежність рівня потужності завад у вузлі від кількості вузлів у мережі та інтенсивності трафіку. Виглядає наступним чином:

$$\tilde{\pi}_{oi} = 10 \ln \left(\frac{\pi_{oi}}{1 \cdot 10^{-3}} \right) \quad (12)$$

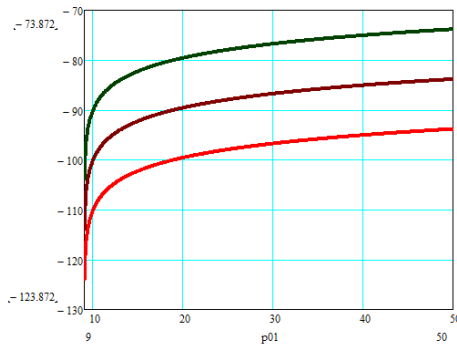


Рис. 2. Залежність рівня потужності завади від кількості вузлів решітки

Попередній графік ілюструє залежність рівня потужності завад у точці спостереження від кількості вузлів, що підтверджується рівнянням (8). Проте цей процес зростання значно уповільнюється через швидке приглушення сигналів завад, яке викликане більшою відстанню та збільшеною кількістю перешкод на шляху поширення сигналу. При цьому збільшення інтенсивності трафіку прямо відповідає зростанню рівня потужності завад.

Послаблення сигналу перешкодами в точці спостереження можна отримати наступним чином:

$$SNR = \tilde{\pi}_{os} - \tilde{\pi}_{oi}, \quad (13)$$

де $\tilde{\pi}_{os}$ – рівень потужності сигналу в точці спостереження (дБм), $\tilde{\pi}_{oi}$ – рівень потужності завади в точці спостереження (дБм), визначений завдяки (12).

$$\tilde{\pi}_{os} = 10 \ln \left(\alpha(a.b.c) \frac{P_0}{1 \cdot 10^{-3}} \right), \quad (14)$$

Залежність ПСП від кількості вузлів та інтенсивності трафіку показано на рис. 3.

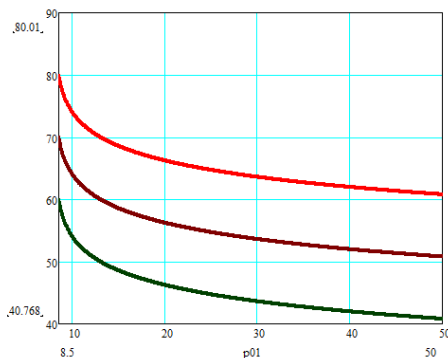


Рис. 3 Залежність ПСП від кількості вузлів мережі та інтенсивності навантаження

Графік демонструє, що при наближенні до реальних значень кількості вузлів та інтенсивності трафіку, послаблення сигналу перешкоди для сусідніх вузлів мережі досягає мінімального значення 20 дБ. У більшості випадків цей рівень забезпечує достатньо високу якість радіоканалу. При використанні стандарту *IEEE 802.11ac*, при такому відношенні сигнал/шум (СШ), в даному випадку ПСП, з'являється можливість роботи на максимально можливій швидкості.

Оцінка впливу теорії перколяції на якість функціонування мережі

Теорія перколяції виникає з постановки задач, які описують фізичні процеси проникнення рідини або газу через пористі матеріали, а також задач, що описують фазові переходи в різних матеріалах внаслідок зміни молекулярної структури [13-18].

В теорії перколяції досліджуються різноманітні структури, зокрема, різні типи решіток, які використовуються для моделювання середовища, для прикладу, кристалічні решітки.

Основна мета теорії перколяції полягає в розумінні критеріїв виникнення "протікання" у середовищі, наприклад, руху рідини. Ці критерії часто називають умовами утворення перколяційного кластера, який складається з сусідніх елементарних комірок решітки, що виконують роль каналів для рідини або інших речовин. Така теорія застосовна не лише до вищезгаданих процесів, але і до таких як електричний пробій в діелектриках, утворення гелю внаслідок зміни концентрації речовини або температури, і багатьох інших.

Якісною характеристикою решітки є її здатність пропускати або сприяти проходженню інформації. В моделюванні часто використовуються нескінченні решітки, тобто ті, що мають необмежену кількість вузлів і зв'язків. Виникнення перколяції пояснюється створенням перколяційного кластера всередині середовища. При побудові моделі решітки припускається, що

комірки решітки можна розділити на два типи:

- перший тип – здатний сприяти перколяції (білі комірки);
- другий тип – не здатний цьому сприяти (чорні комірки).

Пропускна здатність, яка розглядається, кількісно характеризується параметром, відомим як поріг перколяції, позначений як P_c . Для решітки скінченного розміру величина P_c є стохастичною [7] і знаходиться в межах діапазону s . Проте зі збільшенням кількості комірок N у решітці цей діапазон стає вузьким.

Для числової характеристики цієї здатності використовується параметр, який називається порогом перколяції який чисельно відповідає частці комірок, здатних виконувати функцію "протікання".

Для решітки скінченного розміру величина P_c є випадковою [8], і її значення знаходяться в інтервалі s , проте зі збільшенням кількості комірок N у решітці цей інтервал стає вузьким:

$$s(N) \approx \frac{k}{R\sqrt{N}} \quad (15)$$

де, k – константа ($k \approx 0.5$), R – показник радіуса кореляції, що залежить від розмірності задачі (для тривимірної задачі $R \approx 0.8...0.9$).

$$P_c = \lim_{N \rightarrow \infty} (P_c(N)) \quad (16)$$

Значення P_c є критичним порогом частки "провідних" вузлів, що вказує на перехідний стан решітки з непровідного в провідний. Це значення змінюється для різних типів кристалічних ґраток. Перехід середовища з непровідного в провідний стан відбувається за мінімальної зміни P_c , яка є точкою, в якій відбувається фазовий перехід, коли частка провідних комірок наближається до P_c . Цей перехід відбувається у вузькому діапазоні значень P_c . Для значень, які нижче критичного тиску P_c – середовище є непроникним, тоді як для значень вище P_c воно стає проникним.

Даний опис моделі вказує на її формальний характер, що робить її придатною для широкого спектру застосувань.

У вищезгаданій моделі мережі *IoT* в багатоповерховій структурі, мережа зображена у вигляді сітки. Вузли всередині цієї сітки є вузлами комунікаційної мережі, які можуть складатися з окремих вузлів або груп вузлів, розташованих в різних приміщеннях по всій багатоповерховій будівлі. Зв'язки між вузлами – це канали, які можуть бути встановлені між сусідніми вузлами мережі.

У реальній мережі такі зв'язки можуть не обмежуватися лише сусідніми вузлами. Однак, як показав аналіз якості каналу, згаданий вище, з'єднання з сусідніми вузлами забезпечують найвищу якість каналу і найвищу швидкість передачі даних, що визначається відношенням сигнал/завада (СЗ). Запропонована модель мережі, представлена у вигляді решітки, слугує логічною основою для структурування зв'язків між вузлами, розташованими в різних приміщеннях. Форма решітки контролюється плануванням будівлі.

Моделювання комірки в кімнаті класифікується як "біла" або провідна, якщо в ній присутній працюючий вузол зв'язку мережі, і як "чорна" або непровідна, якщо такого вузла немає. Передбачається, що з'єднання створюються виключно між сусідніми вузлами, тобто вузлами, які знаходяться в сусідніх кімнатах. Для того, щоб будівля мала зв'язну мережу, в ній повинен існувати перколяційний кластер, що складається з суміжних "білих" комірок.

Точні аналітичні розв'язки наразі відомі лише для обмеженої кількості конкретних прикладів двовимірних решіток. Для дослідження поведінки різних типів решіток застосовуються методи моделювання.

Існує значна кількість чисельних результатів, отриманих в результаті моделювання на різних типах решіток. Наприклад, поріг перколяції для базової кубічної решітки, яка зазвичай використовується в мережевому моделюванні, позначається як $P_c = 0,31$ [9]. У досліджуваній моделі ця

величина може інтерпретуватися як мінімальна частка приміщень у багатоповерховому будинку, де повинні бути розміщені робочі вузли мережі (білі комірки), щоб забезпечити зв'язок між усіма вузлами мережі, тим самим, забезпечити зв'язність мережі.

Пороги перколяції для певних форм тривимірних решіток, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Пороги перколяції для деяких типів тривимірних решіток

	Тип решітки	Поріг перколяції
1	Проста кубічна	0,31
2	Об'ємно-центрована кубічна	0,243
3	Гранецентрована кубічна	0,195
4	Гексагональна	0,2

- Проста кубічна решітка складається з вузлів, розташованих у вершинах куба;
- Об'ємно-центрована кубічна решітка має додатковий вузол в основі куба;
- Гранецентрована кубічна решітка має вузли, розташовані в центрах кожної грані куба;
- Гексагональна решітка складається з комірок, основою яких є шестикутник.

Моделі кубічних решіток відповідають за представлення структури мережі всередині багатоповерхових будівель. Окрім порогу перколяції, існують й інші атрибути, які можна використовувати для зображення структури мережі.

Одним з таких атрибутів є довжина кореляції, позначена як ξ . Ця характеристика відображає просторовий масштаб, на якому спостерігається певний патерн або характеристичний розмір кластера заблокованих клітин при залежності $P < P_c$, або порожнечі, при залежності $P > P_c$.

$$\xi(P) = |P - P_c|^{-R} \quad (17)$$

де, P – частка білих комірок, P_c – поріг перколяції, R – індекс радіуса кореляції.

Якщо розмір області менший за кореляційну довжину ξ , то кластер має фрактальну структуру, і його фрактальна розмірність визначається як:

$$D_F = D - \frac{\delta}{R} \quad (18)$$

де, D – розмірність задачі, δ – параметр порядку для тривимірної задачі ($\delta \approx 0,4$), R – показник радіуса кореляції.

Поблизу порогу перколяції перколяційний кластер виявляє властивості самоподібності з фрактальною розмірністю $D_F = 2,54$.

Наведені параметри можуть бути використані для оцінки ефективності мережі IoT, розгорнутої в багатоповерховому будинку за моделлю кубічної решітки. Довжина кореляції визначає просторову протяжність, на якій спостерігається певний порядок або характерний розмір кластера недосяжних вузлів мережі. Фрактальна розмірність кластера дозволяє описати форму структур, створених вузлами мережі, зокрема їх складність і геометрію.

Дослідження структури мережі за допомогою методів перколяції

Метод теорії перколяції, розглянутий у статті, може бути використаний для визначення ролі працюючих вузлів у мережі зв'язку, що описується структурою простої кубічної решітки, при якій досягається зв'язність мережі (існування гігантської компоненти). У теорії перколяції методи імітаційного моделювання використовувалися для створення більшості тривимірних решіток. Незважаючи на відсутність аналітичних розв'язків при типових конструкціях, є доступними чисельні розв'язки.

Застосування теорії випадкових графів привертає увагу відомими моделями, що дозволяють швидко знайти правильні рішення. Теорема Ердеша-Реньї застосовується до теорії випадкових графів на вирішення завдання оцінки зв'язності для мережі, організованої випадковим чином. Ця теорема дозволяє визначити граничну (порогову) величину ймовірності зв'язності

між сусідніми вузлами, яка визначає стан мережі, яка є майже зв'язаною. Ця величина визначається так:

$$P_{th} = \frac{\ln n}{n}, \quad (19)$$

де, n – загальна кількість вузлів у мережі.

Величина (19) не залежить від властивостей мережі, а залежить лише від кількості присутніх у ній вершин. Ця оцінка застосовна до моделі випадкового графа, де взаємне розташування вершин не має значення. Єдиним важливим фактором у графі є ймовірність зв'язків (ребер або дуг) між вершинами, і ці ймовірності, як правило, не пов'язані одна з одною.

Ця модель може бути прийнята для пояснення бездротової мережі зв'язку лише з певними припущеннями. У практичних сценаріях вузли можуть спілкуватися лише в межах певної відстані, відомої як зона зв'язку, тоді як за межами цього діапазону зв'язок стає неможливим. Ця модель не включає і не враховує цю особливість. Імітаційне моделювання було використано для демонстрації того, що ця модель точно відображає бездротову мережу, коли кількість вузлів перевищує певний поріг, як показано в [10].

У цій статті розглядається конфігурація мережі, представленої базовою кубічною решіткою. Технічно кажучи, ця структура не є випадковою, а скоріше закономірною. Тому для того, щоб застосувати теорему з теорії випадкових графів, згадану вище, необхідна вагома причина.

Для обґрунтування використовуються наступні докази:

1. У завданнях, де використовують теорію перколяції, часто використовується теорія випадкових графів. Ці теорії описують подібні явища за допомогою різних підходів і мають відмінне походження та історію розвитку.

2. У вихідних умовах задачі враховується, що решітка мережі містить випадково розміщені несправні вузли, що призводить до того, що структура мережі є неповністю визначеною (її структура є випадково спотвореною).

3. Відсутність аналітичних інструментів, які можна використовувати для оцінки зв'язності в таких мережах.

Хоча перші два докази можуть бути недостатньо переконливими, але відсутність альтернативних аналітичних підходів дозволяє розглядати можливість застосування теорії випадкових графів для вирішення цієї проблеми.

Ймовірність зв'язності вузла мережі з його сусідами у випадковому графі визначається співвідношенням вузлів у зоні зв'язності вузла мережі.

$$P_n = \frac{\bar{n}_{cp}}{n}, \quad (20)$$

де, \bar{n}_{cp} – середня кількість вузлів, які потрапляють у зону зв'язку.

У випадку простої кубічної решітки на зв'язність впливає наявність вузлів, які можуть бути відсутніми через несправності. Припустимо, що ймовірність того, що вузол не функціонує, позначена як Q_F , а ймовірність того, що він функціонує: $P_F = 1 - Q_F$.

Враховуючи ймовірність працездатності вузла, середня кількість вузлів у зоні зв'язку буде еквівалентна:

$$\bar{n}_{cp} = P_F \cdot n_{cp}, \quad (21)$$

де, n_{cp} – це кількість вузлів, з якими є зв'язок, коли всі вузли мережі справні (для простої кубічної решітки це константа $n_{cp} = 6$), рис. 4.

Виходячи з вищезазначених результатів, поріг перколяції P_c для зв'язності мережі в цій структурі визначається на рівні 0,32. Це означає, що зв'язність мережі досягається, якщо кількість доступних вузлів дорівнює або перевищує 32%. Значення " P_c " представляє ймовірність існування вузла решітки.

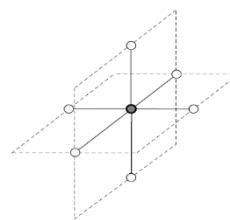


Рис. 4. Модель зв'язності вузлів у простій кубічній решітці

У цьому порівнянні значення P_F – розглядається, як частка вузлів, що працюють.

Тоді, середня кількість вузлів всередині зони зв'язку буде еквівалентна:

$$\bar{n}_{cp} = P_F \cdot n_{cp} = 0.32 \cdot 6 = 1.92. \quad (22)$$

Припускаючи випадковий розподіл вузлів і загальну кількість вузлів $n = 1000$, ймовірність зв'язку вузла з його сусідами може бути визначена за допомогою наступного рівняння:

$$\tilde{\pi}_{sr} = \frac{\bar{n}_{cp}}{n} \approx 1.9 \cdot 10^{-3}. \quad (23)$$

Це число є значно меншим за порогове значення (2,19), яке розраховане для $n=1000$ та $P_0 \approx 6.9 \cdot 10^{-3}$.

Це свідчить про те, що в таких ситуаціях можна отримати помилкове судження про незв'язний стан графа. Це означає, що оцінки відрізняються більш ніж у 3,5 раза.

Якщо не припускати, що вузли розміщені випадковим чином в структурі решітки, то оцінка ймовірності зв'язності між вузлами-сусідами може бути розрахована по-іншому:

$$\tilde{\pi}_{mr} = 1 - m_0 = 1 - (1 - P_c)^{n_{cp}} = 0.89. \quad (24)$$

де, m_0 – ймовірність того, що вершина не має жодного сусіда, тобто всі шість сусідніх вершин не функціонують.

Отримана за допомогою рівняння (24) ймовірність зв'язності між вузлами залишається постійною і не залежить від загальної кількості вузлів та інших факторів. Це пояснюється тим, що ця ймовірність визначається лише структурою мережі та часткою функціонуючих вузлів. Отримане значення суттєво перевищує порогові значення, які можуть бути отримані з рівняння (19) для будь-яких значень n .

Висновки

Основними характеристиками фізичної структури є значна кількість вузлів мережі та вплив навколишнього середовища на їх роботу. Навколишнє середовище має значний вплив на фізичну конфігурацію мережі.

Запропонована модель мережі, представлена у вигляді решітки, слугує логічною основою для структурування зв'язків між вузлами, розташованими в різних приміщеннях. Форма решітки контролюється плануванням будівлі.

Отримана модель дозволяє оцінити ефективність каналу зв'язку за допомогою оцінки ПСП та загального відношення СШ для вузлів мережі. Використання моделі дозволяє впевнено стверджувати, що в сучасній багатоповерховій структурі, якщо вузли стратегічно розміщені в кожній кімнаті, цілком можливо створити бездротову мережу зв'язку. Крім того, якість радіоканалу дозволяє використовувати швидкості передачі даних, які відповідають найвищим стандартам сучасних технологій.

Принципи теорії перколяції можуть бути використані для пояснення тривимірної моделі мережі в багатоповерховій структурі або інших подібних структурах. Важливо зазначити, що принципи цієї теорії також можуть бути застосовані для створення двовимірних моделей, які не обговорювалися в цьому дослідженні. Фундаментальні властивості, які визначені для перколяційної структури, також можуть бути використані для аналізу властивостей комунікаційної мережі.

Рівняння (19) в даному сценарії дає консервативну оцінку критичного (порогового) значення, що призводить до переоцінки підключення до мережі більш ніж у 100 разів. В даному конкретному сценарії не доцільно використовувати критерій зв'язності для випадкового графа. Помилка порогової ймовірності в цьому випадку перевищує фактичне значення більш ніж у 3,5 рази.

Література

1. Perera, C. et al. Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. Vol. 16(1). P. 414–454.
2. Wang X. et al. Multipath TCP: Topology and Performance in High-Density IoT. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53(12). P. 140–147.

3. Bielsa G., Jukan A., Vujcic B. Wireless Network Modeling: From Delay to Performance Prediction. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55(10). P. 30–36.
4. Rangan S., Krishnan K., Goyal V. K. Millimeter-Wave Wireless Networks: A Survey. *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52(12). P. 56–63.
5. Bianchi G., Tinnirello I. IEEE 802.11ac in the Unlicensed Band: A Survey on Its Coexistence with IEEE 802.11af. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19(2). P. 757–794.
6. Mehta N. B., Patel N. P., Shah M. A Survey on Channel Bonding Techniques in Wireless Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18(3). P. 1948–1973.
7. Zhang C. et al. A Survey on Software-Defined Wireless Networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17(1). P. 559–580.
8. Cui T., Zhang R., Cui J. H. A Survey on Indoor Localization with Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. Vol. 16(1). P. 10–27.
9. Chen M. et al. Internet of Things (IoT) and Its Applications in Smart Agriculture. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 16241–16258.
10. Duan L., Chen C., Xie X. A Survey on Data Center Networking for Cloud Computing. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19(2). P. 1157–1179.
11. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : University Press, 2005. 250 p.
12. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge : University Press, 2005. 564 p.
13. Baccarelli E. et al. Optimal and energy-efficient distribution of virtual machines for cloud computing. *Future Generation Computer Systems*. 2011. Vol. 28(1). P. 147–154.
14. Akyildiz I. F., Wang X. Wireless Mesh Networks. Chichester : John Wiley & Sons, 2009. 324 p.
15. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. Rev., 2nd ed. London : Taylor & Francis, 1994. 181 p.
16. Sahimi M. Applications of Percolation Theory. London : Taylor & Francis, 1994. 258 p.
17. Grimmett G. Percolation. 2nd ed. Berlin : Springer, 1999. 444 p.
18. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1957. Vol. 53(3). P. 629–641.

Чумаченко С.С., Чумаченко Б.С., Малоєд М.М., Одарченко Р.С., Хавікова Ю.І.

МОДЕЛЬ ІНТЕРНЕТ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ МЕРЕЖЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

Метою даного дослідження є доведення корисності висновків теорії перколяції для оцінки зв'язності мережі Інтернету речей. Ймовірність наявності маршруту між двома парами вузлів визначає зв'язність мережі. Коли ця ймовірність наближається до одиниці, мережу вважають зв'язною. Наприклад, можна використовувати пошук найкоротших шляхів між усіма парами вузлів (вершинами графа, що описує мережу) для оцінки зв'язності в конкретній ситуації. Дві причини ускладнюють розв'язання цієї проблеми. По-перше, обчислювальний ресурс, необхідний для цього, зростає пропорційно до n^3 , де n – кількість вершин графа. По-друге, існуючі аналітичні підходи зазвичай спрямовані на конкретні випадки, а не на велику кількість вузлів.

У статті запропонована модель мережі у вигляді решітки, яка слугує логічною основою для структурування зв'язків між вузлами, розташованими в різних приміщеннях. Форма решітки контролюється плануванням будівлі. Отримана модель дозволяє оцінити ефективність каналу зв'язку за допомогою оцінки ПСП та загального відношення СШ для вузлів мережі. Використання моделі дозволяє впевнено стверджувати,

що в сучасній багатопверховій структурі, якщо вузли стратегічно розміщені в кожній кімнаті, цілком можливо створити бездротову мережу зв'язку. Крім того, якість радіоканалу дозволяє використовувати швидкості передачі даних, які відповідають найвищим стандартам сучасних технологій.

Ключові слова: структура мережі; Інтернет речей; послаблення сигналу перешкодами; відношення сигнал/шум; прямокутна решітка; перколяція; теорія графів; імітаційне моделювання.

Chumachenko S.S., Chumachenko B.S., Maloied M.M., Odarchenko R.S., Khavikova Y.I.
INTERNET NETWORK MODEL WITH ACCOUNT OF NETWORK LOCATION

The purpose of this research is to prove the usefulness of the conclusions of the percolation theory for the assessment of the connectivity of the Internet of Things network. The probability that there is a route between two pairs of nodes determines the connectivity of the network. When this probability approaches unity, the network is considered connected. For example, finding the shortest paths between all pairs of nodes (the vertices of the graph describing the network) can be used to assess connectivity in a particular situation. Two reasons make this problem difficult to solve. First, the computational resource required for this grows proportionally to n^3 , where n is the number of vertices of the graph. Second, existing analytical approaches are usually focused on specific cases rather than on a large number of nodes.

The article proposes a network model in the form of a lattice, which serves as a logical basis for structuring connections between nodes located in different rooms. The shape of the grid is controlled by the layout of the building. The obtained model makes it possible to evaluate the efficiency of the communication channel using the estimation of the PSP and the general ratio of the SS for the nodes of the network. The use of the model allows us to confidently state that in a modern multi-story structure, if the nodes are strategically placed in each room, it is quite possible to create a wireless communication network. In addition, the quality of the radio channel allows you to use data transfer rates that meet the highest standards of modern technologies.

Keywords: network structure; Internet of Things; signal attenuation by interference; signal/noise ratio; rectangular lattice; percolation; graph theory; simulation modeling.