

УДК 004.02

DOI: 10.18372/2073-4751.80.19778

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,

Фесенко В.О.,

orcid.org/0000-0002-8933-9291,

e-mail: fes_vlad@ukr.net

МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ ІоТ ІЗ ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПРИСТРОЇВ

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Просторове розташування мережевих елементів є критично важливим аспектом моделювання бездротових мереж зв'язку. Розміщення таких компонентів, як точки доступу та базові станції, зазвичай визначається на етапі проектування мережі, що вирішує частину завдань планування. Це рішення ґрунтується на вхідних даних для стратегічного планування, які повинні містити інформацію про користувачів та навколишнє середовище, в якому передбачається функціонування мережі.

Модель просторового точкового процесу є корисною для опису випадкового розташування користувачів (користувацького обладнання) в мережах мобільного зв'язку, коли кількість користувачів настільки велика, що їх неможливо розглядати індивідуально. У мережах Інтернету речей (ІоТ), які можуть включати комірчасті мережі високої щільності, елементами моделі можуть виступати самі вузли мережі.

Використання точкового процесу для випадкового розподілу мережевих вузлів у просторі спрощує моделювання потенційних структур мережі. Цей підхід дозволяє аналітично описувати

характеристики мережі за допомогою відомих моделей точкових процесів. Наприклад, застосування пуассонівського поля і певних припущень дає змогу легко обчислити наближену ймовірність зв'язності мережі в комірчастих мережах. Порівняння між пуассонівським полем і найпростішим потоком у теорії масового обслуговування дозволяє використовувати точні розв'язки для оцінки середнього часу очікування.

Постановка задачі

У цьому дослідженні розглядається точковий процес як модель для конкретної прикладної області. Однак наведені визначення не є вичерпними або універсальними; вони достатні для чіткої та однозначної інтерпретації розв'язків, що обговорюються в межах цієї роботи.

Точковий процес, або точкове поле, в контексті статистики та теорії ймовірностей являє собою сукупність випадково розподілених математичних точок у математичному просторі, такому як дійсна пряма або евклідовий простір.

У рамках цього дослідження термін «точковий процес» застосовується до методу випадкового розподілу точок між відрізками дійсної прямої або

прямокутниками (чи гіперпрямокутниками) в d -вимірному евклідовому просторі.

Подія в контексті теорії точкових процесів позначає наявність об'єкта в певній точці простору. Можна провести аналогію між кількома аспектами просторових точкових процесів і часових випадкових процесів як з точки зору термінології, так і концепції. Ці моделі широко використовуються в теорії комунікації. Зокрема, у випадку останньої зазвичай (хоча й не завжди) подія (окрема точка) визначається однією координатою – її положенням на часовій осі.

Припустимо, що точковий процес D визначено в певній області простору S . Тоді кількість подій $k_\beta(D)$, що відбуваються в заданій області $D \in S$, є змінною непередбачуваного або довільного розміру чи протяжності. Тому даний процес можна охарактеризувати набором багатовимірних функцій розподілу $\{k_\beta(D_1), \dots, k_\beta(D_g)\}$ для $g = 1, 2, \dots, m$.

Просторовий процес вважається стаціонарним, якщо його характеристики залишаються незмінними при зсуві областей у просторі. Іншими словами, ймовірність появи подій у будь-якій області простору не залежить від позиції цієї області.

Якщо процес демонструє інваріантність при обертанні досліджуваних областей відносно певної точки простору, він називається ізотропним. Це означає, що властивості процесу не змінюються при будь-якому обертанні просторових координат.

Ергодичний процес – це процес, у якому середнє значення, обчислене в окремих реалізаціях, збігається з середнім значенням, обчисленим по всьому діапазону можливих реалізацій. Тобто, у ергодичному процесі статистичні властивості, оцінені для конкретного випадку процесу, є репрезентативними для статистичних властивостей усього процесу.

Виклад основного матеріалу

Властивості точкових процесів традиційно класифікуються за порядками, що дозволяє розрізняти різні аспекти їх поведінки. Інтенсивність є ключовим атрибутом, що характеризує ці процеси. У даному випадку інтенсивність визначається наступним чином:

$$\mu = \lim_{D_\omega \rightarrow 0} \frac{E(k_\beta(\omega))}{D_\omega},$$

де, $k_\beta(\omega)$ – кількість подій в околиці певної точки, де ω – околиця цієї точки, а D_ω – площа околиці.

Якщо інтенсивність точкового процесу не залежить від просторового положення, процес вважається однорідним. У протилежному випадку процес є неоднорідним. Крім того, можливе визначення інтенсивностей вищих порядків. Наприклад, інтенсивність другого порядку характеризується наступним чином:

$$\mu_2 = \lim_{x_\omega y_\omega \rightarrow 0} \frac{E(k_\beta(\omega_x)k_\beta(\omega_y))}{x_\omega y_\omega},$$

де ω_x та ω_y представляють околиці навколо точок x та y відповідно, x_ω та y_ω позначають площі цих околиць.

Інтенсивність другого порядку, яка часто представлена як коефіцієнт варіації, відображає кореляцію між двома величинами. Виходячи з інтенсивності другого порядку, можна оцінити стаціонарність і ізотропію процесу на цьому рівні. Властивості другого порядку включають парну кореляційну функцію:

$$d(x, y) = \frac{\mu_2(x, y)}{\mu(x)\mu(y)}.$$

Якщо події, що відбуваються в точках x і y , є незалежними, то коефіцієнт кореляції між ними дорівнює 1, тобто $d(x, y) = 1$. Для опису характеристик другого порядку ізотропного процесу може використовуватися функція Ріплі:

$$L(s) = \frac{E(k_\beta(D_s))}{\mu}.$$

Значення цієї функції прямо пропорційне середньому числу точок, які потрапляють у область, обмежену колом радіусом s . L -функція Бесага може бути використана як модифікація L -функції.

$$M(s) = \sqrt{\frac{L(s)}{\pi}} - s. \quad (1)$$

Функція розподілу відстані до найближчої точки часто використовується для характеристики точкових процесів.

$$H(s) = P(T < s).$$

Також можна використовувати функцію розподілу відстані від випадкової обраної точки до найближчої події.

$$J(s) = P(V < s).$$

Для порівняння функцій $H(s)$ та $J(s)$ використовується наступна функція:

$$K(s) = \frac{1 - H(s)}{1 - J(s)}.$$

Значення $K(s) < 1$ вказує на явище агрегації подій, коли події притягуються одна до одної. При значенні $K(s) > 1$, навпаки, події мають тенденцію відштовхуватися одна від одної.

Математичні моделі точкових процесів

У контексті точкових процесів можна виділити кілька ключових типів, кожен з яких має свої унікальні характеристики та застосування в моделюванні. До таких процесів відносяться однорідні та неоднорідні точкові процеси Пуассона, процеси Кокса, процеси Неймана-Скотта (включаючи процес Матерна та процес Томаса) та процеси Гіббса.

У цьому випадку розглядаються дві різні моделі: однорідний пуассонівський процес, іноді відомий як пуассонівське поле, і модель повної просторової рандомізації (CSR). Метафорично CSR можна порівняти з найпростішою моделлю потоку в теорії масового обслуговування. Однорідний пуассонівський процес є стаціонарним і ізотропним.

Ілюстрацію точкового пуассонівського процесу можна побачити на рисунку 1. На рисунку 1а показано точковий процес на відрізку прямої, а на рисунку 1б – в обмеженій області на площині.

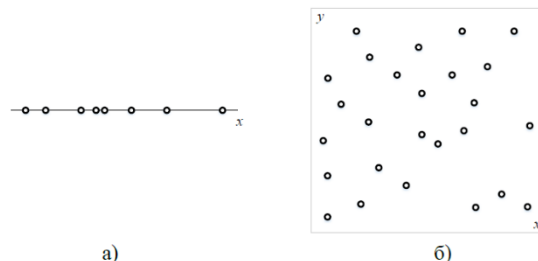


Рис. 1. Точкові процеси в одновимірному та двовимірному просторах

Наведені приклади отримані шляхом використання рівномірного розподілу точок. У цьому випадку координати точок генеруються як випадкові числа, що підпорядковуються рівномірному розподілу в межах заданого діапазону значень координат.

$$f(\beta) = \begin{cases} 1 & A_{\min} \leq \beta < A_{\max} \\ 0 & \beta < A_{\min} \vee A_{\max} < \beta \end{cases}, \quad (2)$$

$$f(\gamma) = \begin{cases} 1 & B_{\min} \leq \gamma < B_{\max} \\ 0 & \gamma < B_{\min} \vee B_{\max} < \gamma \end{cases}$$

Точковий процес (або поле) має властивість, що ймовірність появи k точок на заданому відрізку, площині або об'ємі визначається розподілом Пуассона. Ця ймовірність залежить тільки від розміру обраної області (довжини відрізка, площі площини або об'єму фігури) та не залежить від конкретного розташування або розподілу точок в межах цієї області.

$$q_k(D) = \frac{(\mu D)^k}{k!} e^{-\mu D},$$

Цю модель можна вважати універсальним прикладом, який є корисним для порівняння з іншими конкретними моделями. Вона доцільна для використання у випадках, коли немає достатньо конкретних даних про розташування елементів мережі і коли відсутнє надійне підґрунтя для припущень щодо їхнього місцезнаходження.

У випадку однорідного пуассонівського процесу функція Ріплі дорівнює площі кола радіусом s , тоді як функція Бесага набуває нульового значення:

$$L(s) = \frac{E(k_\beta(D_s))}{\mu} = \frac{\mu\pi s^2}{\mu} = \pi s^2,$$

$$M(s) = \sqrt{\frac{\pi s^2}{\pi}} - s = 0,$$

Інтенсивність другого порядку:

$$\mu_2(s) = \mu^2, \quad (3)$$

Парна кореляція дорівнює одиниці:

$$d(s) = 1, \quad (4)$$

Ці властивості слугують основою для проведення тестів на однорідність у процесі валідації. Для детального опису характеристик точкового процесу використовуються поняття агрегації та регулярності. Агрегація характеризується "взаємним притяганням подій", що спричиняє формування кластерів. Водночас, регулярність визначається як "взаємне відштовхування подій", що забезпечує приблизно однакові відстані між подіями. Ці два протилежні аспекти дозволяють описати процес на основі просторового розподілу подій. У таблиці 1 наведено стислий огляд типових значень відповідних функцій, які зазвичай спостерігаються в контексті агрегації та регулярності.

Таблиця 1. Типові значення агрегації та регулярності точкових процесів

Агрегація	Регулярність
$L(s) > \pi s^2$	$L(s) < \pi s^2$
$M(s) > 0$	$M(s) < 0$
$d(s) > 1$	$d(s) < 1$
$K(s) < 1$	$K(s) < 1$

Як видно з рівняння (2), генерація пуассонівського поля у двовимірному просторі виконується шляхом випадкового розподілу точок на площині. В реальних сценаріях відповідні процеси часто не є повністю випадковими, оскільки

просторове розташування елементів зазвичай залежить від фізичних структур, де просторові координати не є еквівалентними. Наприклад, це може стосуватися розподілу пасажирів у потязі метро або пішоходів на тротуарі. Іншими словами, процес може бути неоднорідним. Проте в деяких випадках припущення про однорідність значно спрощує вирішення задачі, не порушуючи її коректності, особливо коли основним параметром є кількість подій у певному регіоні.

Неоднорідний пуассонівський процес має спільні риси з однорідним пуассонівським процесом, але його інтенсивність змінюється залежно від просторового положення, а не є постійною:

$$\mu = \mu(\beta).$$

де β – координата у просторі.

Кількість подій в області D підпорядковується пуассонівському розподілу із середнім значенням:

$$\bar{m}(D) = \int_D \mu(\beta) d\beta,$$

Цей процес може бути використаний для різних практичних задач, де щільність розподілу користувачів є нерівномірною. Наприклад, його можна застосовувати для моделювання розташування абонентів мобільного зв'язку на тротуарі, автомобілів на дорозі або вузлів Інтернету речей у будівлі. Рис. 2 ілюструє приклад неоднорідного пуассонівського точкового процесу на площині.

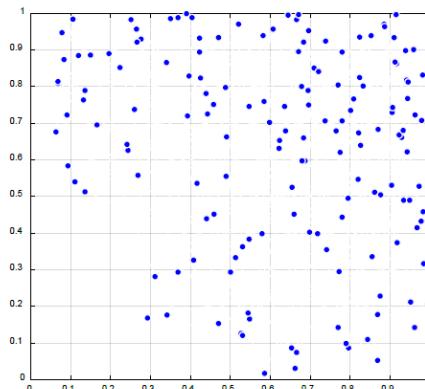


Рис. 2. Розподіл точок у неоднорідному пуассонівському процесі

Процеси Кокса є розширенням класичної моделі пуассонівського процесу, де інтенсивність розглядається як стохастична функція координат $\theta(\beta)$. Різні моделі процесу відрізняються залежно від форми функції $\theta(\beta)$. Змішаний пуассонівський процес є особливим випадком, при якому інтенсивність є випадковою, але не залежить від просторових координат.

Кластерні процеси Неймана-Скотта значно розширюють можливості моделювання точкових процесів, дозволяючи точніше описувати ситуації, коли події демонструють сильну тенденцію до агрегації або кластеризації, що свідчить про взаємне “тяжіння” між подіями.

Процес зазвичай представляється як комбінація багатьох “батьківських” подій і відповідних їм “нащадків” (дочірніх подій). Батьківські події генеруються за допомогою однорідного пуассонівського процесу, як показано в ілюстрації.

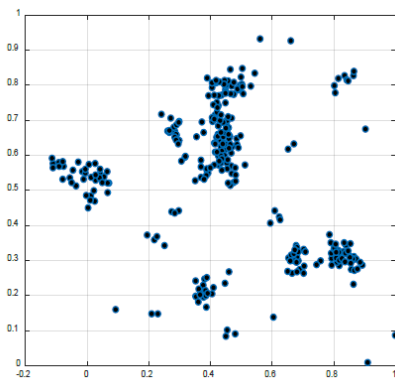


Рис. 3. Ілюстрація стохастичного процесу Кокса на площині

Кожна батьківська подія породжує стохастичну кількість нащадків, розташування яких у заданому просторі може бути різноманітним.

Процес не має чітко визначених правил для формування кластерів, що дозволяє реалізувати різні варіації процедури. Дві конкретні моделі в цьому контексті – це процес Матерна I і процес Томаса.

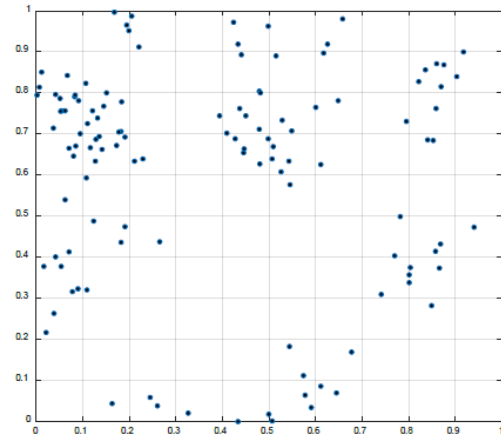


Рис. 4. Ілюстрація процесу Матерна у кластерних точкових процесах

Процеси гальмування часто застосовуються для моделювання ситуацій, коли вплив певного компонента призводить до “придушення” подій, які інакше виникали б у просторі випадковим чином. Наприклад, існування будівлі, споруди або водойми може перешкоджати розташуванню вузлів мережі. Два приклади таких процесів – це процес Матерна I і процес Матерна II.

Процес Матерна I може бути отриманий з однорідного пуассонівського процесу шляхом виключення подій, розташованих ближче одна до одної, ніж на заданій відстані. Ця модель враховує фактори, такі як неможливість розгортання декількох мережевих вузлів у безпосередній близькості один від одного. Процес Матерна II, своєю чергою, видаляє лише одну подію з пари, залишаючи лише ті події, які знаходяться на певній відстані одна від одної.

Процеси Гіббса використовуються для моделювання явищ, що демонструють взаємне “відштовхування”. Прикладами таких процесів є процес твердого тіла та процес Штрауса. Процес твердого тіла передбачає вибір певної функції розподілу, при цьому ймовірність настання події дорівнює нулю, якщо відстань між певною точкою і найближчою подією перевищує вказане мінімальне значення.

Процес Штрауса, на відміну від процесу твердого ядра, дозволяє подіям виникати на певній відстані від інших подій, хоча ймовірність цієї події залежить від

відстані. Зокрема, ймовірність події в точці дорівнює нулю, але на відстані, що визначена як мінімальна, ймовірність події стає необмеженою.

Перспективи застосування точкових процесів

Перелічені моделі просторових точкових процесів належать до найбільш відомих та широко застосовуваних для моделювання бездротових мереж зв'язку, включаючи мережі Інтернету речей.

Таблиця 2. Точкові моделі процесів для опису бездротових мереж зв'язку

Модель	Умови
Однорідний пуассонівський процес	Відсутні дані про специфіку розміщення користувачів або вона не має суттєвого значення.
Неоднорідний пуассонівський процес	Щільність мережі нерівномірною в межах зони обслуговування і змінюється за законом, який можна описати гладкою функцією.
Процеси Кокса	Мають місце скупчення мережевих пристроїв, причому можливо описати функцію розподілу пристроїв в місцях їх скупчення.
Процеси Неймана-Скотта	
-процес Матерна	Розподіл мережевих пристроїв являє собою кластери, які можна описати колами з рівномірним розподілом пристроїв всередині них.
-процес Томаса	Розподіл мережевих пристроїв являє собою кластери, розміщення в яких можна описати двовимірним нормальним розподілом.
Процеси інгібування	
-процес Матерна I	Випадок, коли мережеві елементи не можуть розміщуватися занадто близько один до одного, наприклад, антени двох базових станцій, що працюють на одному частотному каналі. У такому

	випадку обидві події (станції) видаляються.
-процес Матерна II	Випадок, аналогічний попередньому, але одна з подій залишається (перша), а друга видаляється.
Процеси Гіббса	
-процес твердого ядра	Коли існує мінімальна відстань між елементами, ближче якої вони не можуть розташовуватися один до одного. При перевищенні цієї відстані задається функція розподілу для подій.
-процес Штрауса	Близьке розташування допускається, але небажане. Наприклад, точки доступу приватних локальних мереж, що працюють на одному частотному каналі.

Потенційні застосування моделей точкових процесів, наведених у Таблиці 2, є орієнтовними та призначені для ілюстрації можливих сценаріїв. Вибір конкретної моделі залежить від поставлених вимог до моделювання та наявних вихідних даних про мережу, що аналізується. Моделювання мереж із високою щільністю є особливо важливим у випадках, коли кількість пристроїв велика і варіюється, що робить детерміновані геометричні моделі непридатними.

Аналіз вищезгаданих моделей дозволяє виокремити три основні категорії: моделі, які демонструють абсолютну просторову випадковість (рівномірний випадковий розподіл у межах зони обслуговування), моделі, що характеризуються агрегацією (утворення кластерів або скупчень), і моделі, що мають властивість регулярності (тенденція до регулярних процесів).

Ці завдання особливо актуальні при моделюванні мереж із високою щільністю, таких як мережі Інтернету речей або наномережі. Зазначені моделі дозволяють комплексно підходити до вирішення різних завдань, пов'язаних із IoT. Важливо також

враховувати методології, які застосовують фрактальні фігури для розробки моделей точкових процесів. Ці методології розширюють можливості моделювання, включаючи додатковий атрибут фрактальної розмірності, що забезпечує кількісну оцінку подібності між моделлю та реальним процесом.

Формулювання цілей побудови маршруту

Мережу Інтернету речей з високою щільністю можна розглядати як сукупність здебільшого однорідних комунікаційних вузлів, які здатні виконувати функції як терміналів, так і транзитних вузлів. У такій мережі існує надмірність зв'язків, що визначається кількістю вузлів, які забезпечують зв'язок для кожного окремого вузла. Хоча обмежена кількість вузлів може функціонувати як транзитні, зв'язність мережі зазвичай забезпечується з високою ймовірністю [1-3].

За таких умов важливою є логічна організація зв'язків між вузлами. Збільшення кількості транзитних вузлів дозволяє знизити навантаження на кожен окремий вузол, проте одночасно подовжує довжину маршруту та збільшує затримки при доставці пакетів.

Зі збільшенням кількості транзитних вузлів відстань між сусідніми вузлами на маршруті скорочується, що веде до зниження загасання сигналу та покращення співвідношення сигнал/шум. Це, у свою чергу, підвищує швидкість передачі даних [4, 5] на ділянці між вузлами. Проте збільшення числа транзитних вузлів також зумовлює зростання затримки через необхідність очікування активного стану вузлів у регіоні зв'язку. Крім того, збільшення кількості транзитних вузлів призводить до зростання енергоспоживання, що є критичним фактором, особливо для мереж із великою кількістю вузлів.

Тому важливим завданням при створенні мережі IoT високої щільності є визначення оптимальної кількості транзитних вузлів та вибір найбільш ефективних маршрутів.

Розглянемо модель, зображену на рисунку 5. Вузол-джерело, позначений як p , і вузол-приймач, позначений як τ , з'єднані маршрутом, що складається з k вузлів, які включають як вузол-джерело, так і вузол-приймач. Вузли s_1, \dots, s_{k-2} виконують транзитну функцію. Відстані між вузлами представлені змінними $d_{1,2}, \dots, d_{k-1,k}$.

Припускається, що всі вузли на маршруті розташовані лінійно, забезпечуючи з'єднання між відправником і отримувачем повідомлення з рівними відстанями між ними. Це припущення не є обов'язковим, а слугує для спрощення візуалізації та логічного аналізу. Однак отримані результати можуть бути застосовані і в інших сценаріях.

Трансивери, що використовуються для організації радіоканалу, функціонують виключно в симплексному режимі. Коли вузол виконує роль транзитного вузла, він переходить в режим передачі після отримання кадру від вузла-джерела і пересилає його наступному вузлу в маршруті. Перебуваючи в режимі передачі, вузол не може приймати сигнали від інших вузлів.

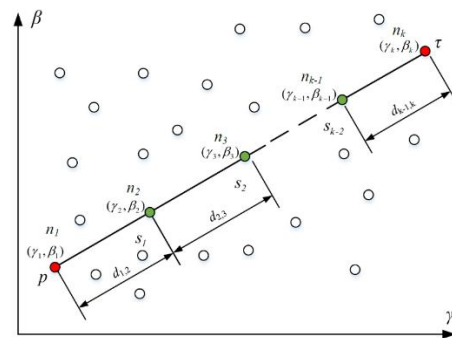


Рис. 5. Модель маршрутизації в IoT-мережі з рівномірно розташованими вузлами

Таким чином, вузол-джерело змушений дочекатися завершення передачі кадру, перш ніж відправити наступний кадр транзитному вузлу. Крім того, для кожного вузла на маршруті діє вимога: передача даних можлива лише за умови, що рівень зовнішніх сигналів на вході вузла нижчий за заздалегідь визначене порогове значення p_0 . Зовнішні сигнали відносяться до сигналів від вузлів на цьому шляху, коли вони передають кадри іншим вузлам.

Необхідно враховувати тимчасові затримки передачі, які визначаються швидкістю передачі, розміром кадру та рівнями потужності сигналів від вузлів маршруту, що є результатом умов поширення сигналу між вузлами. Це призводить до зниження швидкості передачі даних, яка залежить від довжини маршруту та взаємного розташування вузлів.

Ось як можна формалізувати цю парадигму:

1. Розглянемо маршрут, що складається з k вузлів, включаючи вузол-джерело та вузол-приймач повідомлень.

2. Припустимо, що джерело передає кадри розміром M через увесь маршрут. Розмір кадру залишається постійним на всіх сегментах маршруту.

3. Джерело може здійснювати передачу кадрів безперервно, тобто інтервал часу між передачею кадрів можна ігнорувати.

4. Врахування цих факторів є критично важливим при аналізі та оптимізації ефективності передачі даних у бездротових мережах із симплексними трансиверами.

Розробка моделі та методології вибору вузлів для побудови маршруту

Швидкість передачі даних маршрутом визначається відношенням обсягу переданих даних до часу їх передачі. Швидкість передачі кадру між двома вузлами за відсутності проміжних затримок залежить від швидкості передачі та розміру кадру.

$$z_d = \frac{M}{q},$$

де, M – розмір кадру (біт), q – швидкість передачі (біт/с).

Якщо між вузлами відправника і одержувача є лише один транзитний вузол, то час доставки буде визначатися як:

$$z_d = \frac{M}{q_{sr}} + \frac{M}{q_{rt}},$$

Швидкість передачі даних описується рівнянням, що включає такі змінні:

- M – розмір кадру в бітах;
- q_{sr} – швидкість передачі даних в бітах за секунду між вузлом-джерелом і транзитним вузлом;
- q_{rt} – швидкість передачі даних в бітах за секунду між транзитним вузлом і вузлом призначення.

Швидкість передачі даних на всьому маршруті визначається як середня швидкість передачі, що враховує вплив усіх проміжних затримок:

$$D = \frac{M}{z_d} = \frac{q_{sr}q_{rt}}{q_{sr} + q_{rt}}.$$

Якщо швидкості передачі на обох ділянках маршруту однакові $q_{sr} = q_{rt} = q$, в окремому випадку еквівалентна швидкість буде дорівнювати половині цієї швидкості $D = q/2$.

В ідеальних умовах оптимальна швидкість передачі даних залежить від кількості транзитних вузлів k :

$$D = \frac{\prod_{i=1}^k q_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1, j \neq i}^k q_{j,j+1}}. \quad (5)$$

Ідеальний випадок передбачає, що вузол-передавач переходить у стан очікування рівно на той час, який потрібен сусідньому вузлу для передачі отриманого кадру. Іншими словами, це ситуація, коли рівні потужності сигналів від вузлів, що знаходяться на відстані більше одного кроку від вузла-передавача, є надзвичайно низькими, тобто нижчими від порогового значення q_0 .

У разі, коли швидкості передачі на всіх ділянках маршруту є однаковими: $q_i = q$, $i = 1, \dots, k$, еквівалентна швидкість передачі даних визначається як величина, обернено пропорційна кількості транзитних вузлів $D = \frac{q}{k+1}$.

Швидкість передачі даних на окремій ділянці мережі залежить від співвідношення сигнал/шум, яке визначається рівнем потужності сигналу, прийнятого на точці отримання.

$$q_{i,j} = q_{i,j}(snr) = q_{i,j}(f). \quad (6)$$

Характер залежності швидкості передачі від співвідношення сигнал/шум визначається особливостями використовуваних технологій і стандартів радіоканалів. Наприклад, стандарт *IEEE 802.11n* [7] демонструє таку залежність, яку можна представити у вигляді функції. Конкретний вигляд цієї функції ілюстровано на рисунку 6.

Рівень сигналу в точці прийому визначається загасанням, зумовленим умовами поширення сигналу та просторовим розташуванням приймальної й випромінювальної антен.

$$f(d) = q_{TX} - b(d), \quad (7)$$

де $b(d)$ – модель залежності загасання від відстані.

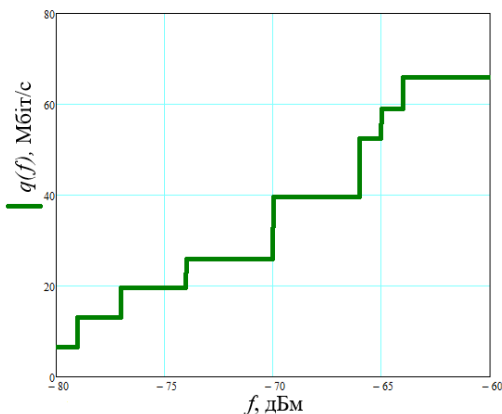


Рис. 6. Залежність швидкості передачі даних від співвідношення сигналу до шуму

Для змінної $b(d)$ використано модель, рекомендовану *ITU-R* для внутрішніх умов [6].

$$b(d) = 20 \lg f + K \lg d + L_f(g) - 28 \text{ (дБ)}, \quad (8)$$

де, d – відстань (м), f – частота (МГц), K – коефіцієнт втрат потужності, L_f – коефіцієнт втрат через проходження сигналу через перешкоду (дБ), g – кількість перешкод.

З урахуванням рівнянь (6), (7) і (8), залежність виразу (5) визначається відстанню між вузлами маршруту:

$$Q = Q(\Psi), \quad (9)$$

де Ψ – метод, що використовується для вибору позиційних точок транзитних вузлів.

Оптимальне розташування транзитних вузлів дозволяє визначити як кількість вузлів, так і відстані між ними. У загальному випадку існує нескінченна кількість можливих конфігурацій. У реальних сценаріях існує верхня межа максимальної кількості вузлів у маршруті. На основі наведених даних припускається існування оптимальної кількості вузлів, за якої пропускна здатність досягає максимуму.

Розглянемо задачу визначення найбільш ефективної кількості вузлів у маршруті при умові однакових відстаней між ними, що обмежує кількість можливих конфігурацій. Рівняння (5) моделює сценарій, за якого вузли маршруту не генерують внутрішньо-канальних завад, що вважається ідеальною ситуацією. Аналіз рівнянь (6), (7) і (8) на основі стандарту *IEEE 802.11n* дозволяє отримати залежність, представлену на рисунку 7.

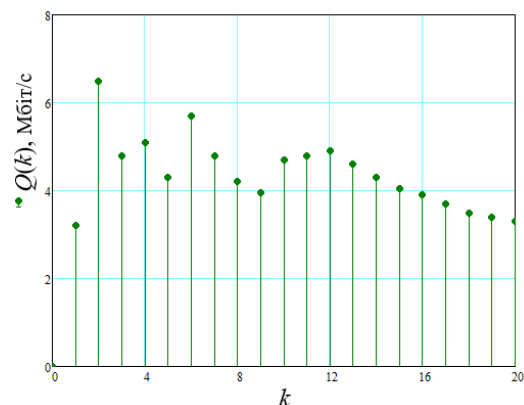


Рис. 7. Залежність пропускної здатності маршруту від відстані між вузлами *IEEE 802.11n*

У практичних сценаріях рівень потужності сигналу від сусідніх вузлів на маршруті може суттєво впливати на точку розташування передавального або приймального вузла. Таким чином, передавальний вузол має затримувати свою передачу, доки рівень сигналу від сусідніх вузлів не досягне порогового значення – q_0 .

На рис. 4 представлено схематичну ілюстрацію маршруту, вузли якого розташовані вздовж лінійної траєкторії. У

цьому прикладі передбачається, що зона покриття вузла маршруту включає два наступних вузли на маршруті. Коли перший вузол надсилає кадр другому вузлу, він переходить у стан очікування до тих пір, поки другий вузол не передасть кадр третьому вузлу, а третій вузол – четвертому вузлу. Це очікування обумовлене тим, що рівень потужності сигналу від передавачів цих вузлів перевищує порогове значення q_0 . Таким чином, частка часу, протягом якого початковий вузол може передавати дані, визначається співвідношенням $\tau_{1,2}/(\tau_{1,2} + \tau_{2,3} + \tau_{3,4})$. Таку ж логіку слід застосовувати і до інших вузлів на маршруті. Кожен вузол має очікувати завершення передачі даних вузлами, які перебувають у його зоні покриття.

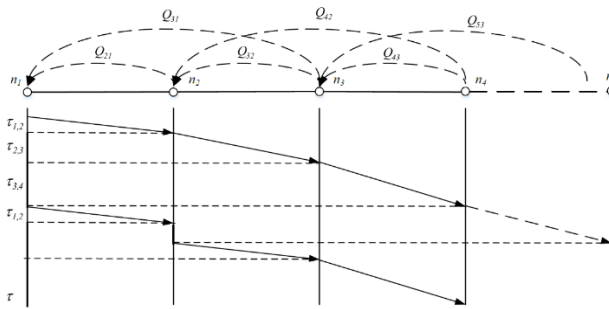


Рис. 8. Схема передачі кадрів через вузли маршруту

Час доставки кадру за маршрутом можна обчислити, враховуючи описані процеси:

$$z_d = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{M}{q_{i,j}} I(i, j). \quad (10)$$

Рис. 8 ілюструє еквівалентну швидкість передачі даних уздовж маршруту.

$$Q(k) = \frac{M}{z_d} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{q_{i,j}} I(i, j)}, \quad (11)$$

де $I(i, j)$ – функція бінарного індикатора, яка визначає стан передачі сигналу:

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & q_{j,i} < q_0 \\ 0 & q_{j,i} \geq q_0 \end{cases}$$

Значення $q_{j,i}$ у рівнянні (11) розраховується відповідно до моделі загасання:

$$q_{j,i} = q_{TX} - b(d_{j,i}).$$

Загасання сигналу $b(d_{j,i})$ залежить від відстані між вузлами j та i , яке позначається як $d_{j,i}$.

На рис. 9 зображено залежність швидкості передачі даних від кількості ділянок маршруту відповідно до рівняння (11).

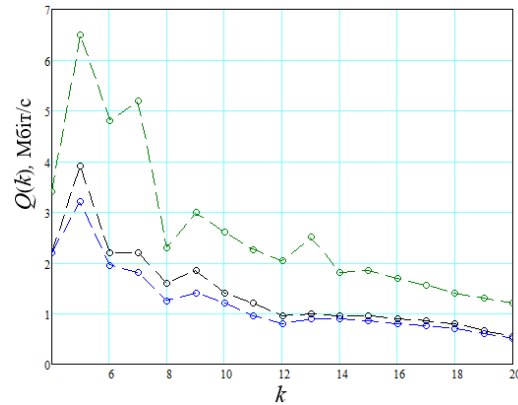


Рис. 9. Залежність швидкості передачі даних від кількості ділянок маршруту

Рис. 8 ілюструє, що швидкість передачі є неопуклою функцією кількості вузлів і має кілька локальних максимумів. Оптимальну кількість вузлів маршруту можна визначити шляхом систематичного перебору можливих значень k у діапазоні від 0 (що відповідає відсутності транзитних вузлів) до точки, де пропускна здатність знижується нижче прийнятного порогу, визначеного рівнянням (10).

$$k_0 = \arg \max_k Q(k), \quad k = 0, \dots, k_{\max},$$

$$k_{\max} = \arg \{Q(k_{\max}) = Q_{\min}\},$$

де Q_{\min} – мінімально допустиме значення пропускної здатності маршруту.

У загальному формулюванні задачі (9) відстані між вузлами допускаються довільними. Значення, обчислене за допомогою виразу (9) у контексті методів розміщення, може бути представлене через відстані між вузлами або їх координати на маршруті. У загальному випадку задача оптимізації маршруту набуває специфічної форми:

$$\{d_{i,j}, k_0 | i, j = 1, \dots, k_0\} = \arg \max_{k, d_{i,j}} Q(k, d_{i,j}) \quad (12)$$

$$k = 0, \dots, k_{\max}, \quad k_{\max} = \arg \{Q(k_{\max}) = Q_{\min}\}$$

Для розв'язання задачі (12) запропоновано метод, що включає три етапи:

1. На першому етапі визначається ідеальна довжина маршруту k . На другому етапі розраховуються оптимальні відстані між вузлами маршруту.

2. В умовах мережі *IoT*, навіть за високої щільності вузлів, не завжди можливо точно визначити позицію транзитного вузла, яка б відповідала теоретичним розрахункам.

3. На третьому етапі обираються транзитні вузли, що є найближчими до заданих ділянок маршруту.

За таких умов відстані між вузлами можуть змінюватися, що спричиняє зміну середньої швидкості передачі даних уздовж усього маршруту. Зважаючи на випадковий характер цієї процедури, доцільно оцінити "чутливість" обраного маршруту до можливих змін відстаней між вузлами [8].

Аналогічно, постає проблема оцінки "чутливості" маршруту до швидких переривань сигналу. Для оцінки виразу (11) враховуються впливи випадкових складових, використовуючи рівняння (6) та (7), які враховують випадкові зміни відстаней. У таких умовах рівняння (7) набуває наступного вигляду:

$$f(d) = q_{TX} - b(d + \Delta d),$$

де Δd – випадкове відхилення відстані від запланованої проектною відстані.

Припустимо, що Δd підпорядковується нормальному розподілу із середнім значенням 0.

Рис. 10 ілюструє залежність середньої швидкості маршруту від його довжини з урахуванням впливу випадкових відхилень відстаней від очікуваного значення.

Рис. 10 демонструє залежність між варіацією середньої швидкості передачі на маршруті та довжиною маршруту. Варіація оцінюється за допомогою коефіцієнта

варіації значень швидкості, позначеного як $C_V(k) = \sigma(Q(k))/P(Q(k))$.

Де, $\sigma(Q(k))$ – стандартне відхилення, $P(Q(k))$ – середнє значення.

Для розрахунку цих значень використовуються дані, представлені на рисунку 9 (червона крива). Рис. 10 демонструє, що коефіцієнт варіації зменшується зі збільшенням кількості вузлів у маршруті, що відповідає очікуваному результату. Залежність оцінюється за допомогою кривої $\sigma(Q(k)) \approx b/k$ (показана синьою пунктирною лінією).

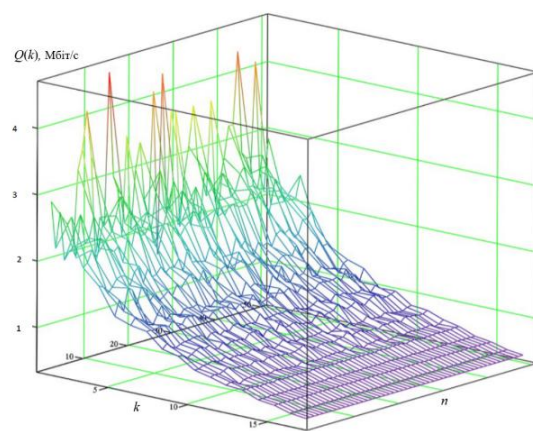


Рис. 10. Залежність середньої швидкості маршруту від його довжини з урахуванням випадкових відхилень відстаней

Зі збільшенням кількості вузлів і зменшенням відстаней між ними маршрут стає менш чутливим до випадкових змін цих відстаней. Подібні обставини виникають і при дослідженні чутливості маршруту до швидкого згасання сигналу. Таким чином, при виборі маршруту важливо знайти баланс між надійністю швидкості передачі даних та її середнім значенням. Для вирішення цього питання пропонується використовувати "метод ліктьової точки" [9] для кривої, зображеної на рисунку 11. Точка ліктя (E) – визначається як точка перетину дотичної, проведеної під кутом $3\pi/4$ до осі абсцис.

У цьому сценарії точка "ліктя" розташована між точками $k=5$ і $k=6$. Середня швидкість передачі даних є вищою у першій точці, що робить її доцільним вибором для визначення необхідної кількості вузлів маршруту. Цей метод забезпечує

максимальну можливу середню швидкість передачі даних на маршруті та гарантує стабільність характеристик маршруту на високому рівні.

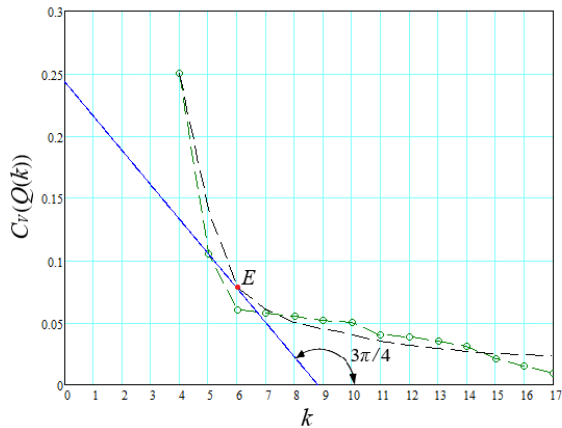


Рис. 11. Залежність середньої швидкості передачі даних від довжини маршруту

Отже, процес відбору вузлів для побудови маршруту можна описати наступним чином:

1. Початкові дані складаються з координат вузлів мережі, позначених як: $C = \{c_1, c_{1+1}, \dots, c_N\}$, де N – кількість вузлів мережі. Крім того, визначаються початковий та кінцевий вузли маршруту n_1 та n_k , а також відстань між ними $n_{1,k}$. Технологія організації каналу, що використовується, підпорядковується залежності, яка описується рівнянням (1).

2. Визначення найефективнішої кількості вузлів у маршруті k шляхом розв'язання задачі (3).

3. Визначення відстаней між вузлами на маршруті, шляхом розв'язання задачі (4).

4. Оцінка стійкості маршруту. Розрахунок коефіцієнтів варіації C_v .

5. Визначення оптимального значення k за допомогою методу ліктьової точки.

Цей метод ґрунтується на припущенні, що в безпосередній близькості від розрахункових координат розташовані транзитні вузли, які розміщені вздовж прямої лінії, що з'єднує початковий і кінцевий вузли маршруту. Це припущення є справедливим для мереж із великою щільністю вузлів. Для мереж з обмеженою кількістю

вузлів доцільно зосередитися на розв'язанні задачі (3), яка полягає у визначенні необхідної кількості вузлів маршруту на основі відстаней між ними.

Запропонований метод скорочує використання мережевих ресурсів завдяки вибору майже оптимального маршруту, враховуючи вплив швидкості передачі на рівень потужності корисного сигналу та завади від сусідніх вузлів на маршруті. Наприклад, він дозволяє підвищити загальну швидкість передачі даних у порівнянні з підходом, що базується на визначенні найкоротшого маршруту на основі кількості транзитних ділянок.

Висновки

Здатність комунікаційної мережі забезпечувати високий рівень обслуговування трафіку визначається такими ключовими факторами, як затримка доставки даних та максимальна швидкість передачі інформації. Розміри бездротової мережі значною мірою залежать від організації маршрутів між відправниками та одержувачами.

Облаштування транзитних ділянок маршруту впливає на зниження досяжної швидкості передачі даних. Це зумовлено, зокрема, неможливістю одночасної роботи вузлів у режимах прийому та передачі. Додатково, швидкість передачі знижується через необхідність очікування завершення передачі даних усіма вузлами на маршруті та через перевищення рівня потужності сигналу певного порогового значення на кожному вузлі.

Збільшення кількості вузлів у маршруті має суперечливий вплив на швидкість передачі даних. З одного боку, це підвищує ефективність передачі завдяки зменшенню відстаней між вузлами, що знижує рівень загасання сигналу. З іншого боку, це може зменшувати швидкість через необхідність вузлів чекати завершення передачі даних сусідніми вузлами. Унаслідок цього існує ідеальна кількість вузлів у маршруті, за якої досягається максимальна швидкість передачі даних.

Запропонований підхід до вибору вузлів маршруту дозволяє оптимізувати

кількість і розташування транзитних вузлів у густонаселених мережах IoT. Підхід враховує чутливість маршруту до змін відстаней між вузлами в реальних умовах порівняно з розрахунковими значеннями.

Запропонована стратегія підвищує швидкість передачі даних порівняно з методом найкоротшого маршруту, заснованого на мінімальній кількості транзитних ділянок. Наприклад, при використанні стандарту IEEE 802.11n та відстані між джерелом і одержувачем 150–200 метрів приріст швидкості передачі перевищує 35%.

Література

1. Khan R. et al. Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges. *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology* : proceedings, Islamabad, Pakistan, 17–19 December 2012 / IEEE. 2012. P. 257–260. DOI: 10.1109/FIT.2012.53.
2. Vlasenko M., Khlaponin Y. Internet of Things (IoT) in world practice: review and analysis. *Pidvodni Tehnologii*. 2024. Vol. 13. P. 21–27.
3. Заковоротний О. Ю., Штефан В. С. Організація мереж Інтернету речей високої щільності. Проблеми інформатизації : тези доп. 11-ї міжнар. наук.-техн. конф., 16-17 листопада 2023 р., м. Баку, м. Харків, м. Бельсько-Бяла. / Нац. ун-т оборони Азерб. республіки [та ін.]. Харків : Impress, 2023. С. 97.
4. Li T. et al. Performance analysis of IEEE 802.11e Block ACK scheme in a noisy channel. *Proc. IEEE BroadNet*. 2005. Vol. 1. P. 511–517.
5. Chumachenko S. et al. Traffic Analysis During Communication with UAV. *2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* : proceedings, Kyiv, Ukraine, 22–24 October 2024 / IEEE. 2024. P. 99–104. DOI: 10.1109/APUAVD64488.2024.10765914.
6. Чумаченко С. С. та ін. Модель інтернет мережі з урахуванням мережевого розташування. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Вип. 2(78). С. 124–134.
7. Ian Poole. IEEE 802.11n Standard. URL: Radio-Electronics.com.
8. Корнієнко Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83–89.
9. Чумаченко С. С. та ін. Моделювання M2M трафіку сучасних мереж зв'язку. *Наукоємні технології*. 2024. № 3(63). С. 390–400.
9. Kim Y., Evans R. G., Iversen W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. Vol. 57(7). P. 1379–1387.
10. Migel S. et al. Machine Learning Method for Optimal Route Calculation. *2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)* : proceedings, Kyiv, Ukraine, 24–27 October 2023 / IEEE. 2023. P. 168–173. DOI: 10.1109/MSNMC61017.2023.10329020.
11. Melnyk V., Honcharenko Y., Maloied M. Reliability Analysis of Radioelectronic Systems of Aircraft. *Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 736. Proceedings of the International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development* / ed. by I. Ostroumov, M. Zalisky. 2023. P. 234–246.

Чумаченко С.С., Чумаченко Б.С., Малоєд М.М., Одарченко Р.С., Фесенко В.О.

МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ ІоТ ІЗ ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПРИСТРОЇВ

Дане дослідження ґрунтується на припущенні, що в безпосередній близькості від розрахункових координат розташовані транзитні вузли, які розміщені вздовж прямої лінії, що з'єднує початковий і кінцевий вузли маршруту. Це припущення є справедливим

для мереж із великою щільністю вузлів. Для мереж з обмеженою кількістю вузлів доцільно зосередитися на розв'язанні задачі, яка полягає у визначенні необхідної кількості вузлів маршруту на основі відстаней між ними.

Запропонований метод скорочує використання мережевих ресурсів завдяки вибору майже оптимального маршруту, враховуючи вплив швидкості передачі на рівень потужності корисного сигналу та завади від сусідніх вузлів на маршруті. Наприклад, він дозволяє підвищити загальну швидкість передачі даних у порівнянні з підходом, що базується на визначенні найкоротшого маршруту на основі кількості транзитних ділянок. При використанні стандарту IEEE 802.11n та відстані між джерелом і одержувачем 150–200 метрів приріст швидкості передачі перевищує 35%.

Ключові слова: бездротова мережа; Інтернет речей; пуассонівське поле; точковий процес; вузли маршруту; щільність; швидкість передачі.

Chumachenko S.S., Chumachenko B.S., Maloied M.M., Odarchenko R.S., Fesenko V.O.

ROUTING METHOD IN WIRELESS IoT NETWORKS WITH HIGH DEVICE DENSITY

This research is based on the assumption that in the immediate vicinity of the calculated coordinates are located transit nodes, which are located along a straight line connecting the initial and final nodes of the route. This assumption is valid for networks with a high density of nodes. For networks with a limited number of nodes, it is advisable to focus on solving the problem of determining the required number of nodes of the route based on the distances between them.

The proposed method reduces the use of network resources by selecting a near-optimal route, taking into account the influence of the transmission speed on the level of the useful signal power and interference from neighboring nodes on the route. For example, it allows you to increase the overall data transfer rate compared to the approach based on determining the shortest route based on the number of transit sections.

Keywords: wireless network; Internet of Things; Poisson field; point process; route nodes; density; transmission rate.