

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ГІБРИДНИХ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ

Розглянуто пропускну здатність гібридних бездротових мереж. Доведено, що ширина пропускної здатності довільної мережі ad hoc не вимірюється числом вузлів у цій мережі. Розглядається два різні методи маршрутизації і вивчається характер визначення пропускної здатності гібридної мережі. Отримані аналітичні вирази пропускної здатності.

Throughput capacity of hybrid wireless networks is studied. It has been shown that the capacity of a random ad hoc network does not scale well with the number of nodes in the system. Two different routing strategies and study the scaling behavior of the throughput capacity of a hybrid network are considered. Analytical expressions of the throughput capacity are obtained.

Вступ

Гібридна мережа формується за допомогою розміщення розкиданих мереж базових станцій в мережі *ad hoc*. Вважається, що ці базові станції з'єднані дротовою мережею з високою пропускну здатністю і поведуться як реле для бездротових вузлів. Вони не є ні джерелом даних, ні отримувачем даних. Гібридні мережі становлять альтернативу між традиційними комірковими мережами та мережами *ad hoc*, у них інформація може бути направлена багатопрохідним шляхом або через інфраструктуру.

Пропускна здатність — це ключова характеристика бездротових мереж. Вона являє собою досягнення високої швидкості передачі інформації, яку може забезпечити мережа. Пропускна здатність бездротової мережі залежить від багатьох аспектів мережі: архітектури мережі, обмеження потужності та ширини пропускної здатності, методу маршрутизації, бездротового втручання і т.д. Добре розуміння пропускної здатності різної архітектури мереж дає змогу обрати архітектуру, що задовольняє особливі вимоги.

Для мереж бездротової інформації існує кілька моделей мереж. У бездротовій комірковій мережі, або бездротовій локальній мережі, вузли зв'язані між собою базовими станціями або точками доступу. Вузол спочатку має з'єднатися з найближчою базовою станцією або точкою доступу для того, щоб зв'язатися з іншими вузлами. Базова станція (точка доступу) слугує шлюзом для зв'язку всіх вузлів в її комірці (основна зона дії).

У результаті досліджень [1] автори запропонували гібридну модель для того, щоб підвищити рівень зв'язку в мережі. В моделі розкиданої мережі базових станцій станції з'єднані дротовою мережею і розміщені в межах *ad hoc* мережі. Вихідна мережа складається з вузлів і деяких добре з'єднаних базових станцій. Вона називається гібридною мережею, оскільки являє собою альтернативу між традиційними комірковими мережами *ad hoc* мереж. У мережах *ad hoc* немає інфраструктури, інформація може бути направлена тільки багатопрохідним шляхом. В коміркових мережах інформація завжди направлена через інфраструктуру, в той час як у гібридній мережі інформація може бути направлена багатопрохідним шляхом або через інфраструктуру. Комунікація з використанням направлення багатопрохідними шляхами і комунікація з використанням інфраструктури співіснують в мережі. Великий інтерес являє дослідження того, яку швидкодію можна дістати за допомогою гібридних мереж. У той час як пропускна здатність коміркових мереж вже добре вивчена [2], дослідники почали лише нещодавно досліджувати смугу пропускної здатності бездротових мереж *ad hoc*.

Кожна базова станція в гібридній мережі обслуговує встановлену кількість вузлів. Тому кожен вузол може з'єднатися з дротовою мережею, використовуючи для цього постійну частку смуги пропускної здатності, в результаті чого маємо пропускну здатність одного вузла $\Theta(1)$ або загальну пропускну здатність $\Theta(n)$.

У праці [3] Гупта і Кумар вивчали пропускну здатність довільної бездротової мережі, де закріплені вузли довільно розміщені в мережі і кожен вузол відсилає інформацію до довільно обраного пункту призначення. Смуга пропускної здатності на вузол подана як $\Theta\left(\frac{W}{\sqrt{n \log n}}\right)$, якщо n наближується до нескінченності, де n — це кількість вузлів у мережі і W — це загальна швидкість передачі кожного вузла по бездротовому каналу.

Таким чином, загальна смуга пропускної здатності всіх вузлів у мережі визначається як

$$\Theta\left(\sqrt{\frac{n}{\log n}}W\right).$$

У праці [4] вивчається пропускна здатність довільної тривимірної бездротової мережі *ad hoc* і

$$\text{показано, що загальна смуга пропускної здатності вимірюється як } \Theta \left(\left(\sqrt{\frac{n}{\log n}} \right)^{\frac{2}{3}} W \right).$$

У праці [5] запропонована схема, яка використовує переваги мобільності вузлів. Дозволяючи лише передачу естафети в один крок, схема досягає загальної пропускної здатності $O(n)$ за рахунок необмеженості затримки та буферних вимог. Пропускна здатність за різними схемами трафіку вивчається в праці [6]. Існує тільки одна діюча пара джерело—призначення, поки всі інші вузли слугують пунктами передачі, що допомагають передавати інформацію між вузлами джерела і призначення. Доведено, що смуга пропускної здатності вимірюється як $O(\log n)$. У праці [7] досліджується вплив *IEEE 802.11* на пропускну здатність мережі та надано спеціальний критерій оцінки схеми трафіку, що робить потужність розміреною з розміром мережі.

Далі розглянуто дві різні стратегії маршрутизації і в результаті отримано аналітичні вирази про-пускної здатності гібридних мереж. Крім того, одержані максимальні можливості пропускної здатності й умови їх досягнення. Вважається, що до гібридної мережі входять m базових станцій та n вузлів, кожен з яких здатний передавати інформацію по бездротовому каналу при W біт/сек. У першій стратегії маршрутизації вузол посилає дані через інфраструктуру, якщо пункт призначення знаходиться поза коміркою, де розміщене джерело. В іншому випадку дані будуть відправлені багато прохідним шляхом, як у мережі *ad hoc*. Відповідно до цієї стратегії, якщо m збільшується в асимптотичній залежності повільніше ніж \sqrt{n} , то максимальна пропускна здатність визначається

$$\text{як } \Theta_{\max} = \Theta \left(\sqrt{\frac{n}{\log \frac{n}{m^2}}} W \right). \text{ У цьому випадку додавати базові станції не вигідно. Однак у випадку, де}$$

базові станції можуть бути додані при зростанні швидкості в асимптотичній залежності швидше ніж \sqrt{n} , максимальна пропускна здатність визначається як $\Theta_{\max} = \Theta(mW)$ і зростає лінійно з кількістю базових станцій. Подібні результати отримані для ймовірнісної стратегії маршрутизації. У цій стратегії вузол вибирає, чи використовувати інфраструктуру, щоб послати дані з невеликою ймовірністю. Згідно із цією стратегією маршрутизації, якщо m збільшується повільніше ніж

$\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, то максимальна смуга пропускної здатності має ту саму асимптотичну поведінку, що й мережа *ad hoc*. Тому немає ніякої вигоди використовувати інфраструктуру в цьому випадку. Якщо

m збільшується швидше ніж $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, максимальна пропускна здатність вимірюється як $\Theta(mW)$ і

збільшується лінійно з числом базових станцій. Для обох стратегій маршрутизації, якщо число базових станцій масштабує повільніше, ніж певний поріг, смуга пропускної здатності, що задана інфраструктурою, визначає загальну пропускну здатність мережі. У цьому випадку максимальна смуга пропускної здатності змінюється лінійно з числом базових станцій, забезпечуючи ефективне вдосконалення в мережах *ad hoc*. Тому, щоб досягати суттєвого збільшення пропускної здатності, внески в дротову інфраструктуру мають бути достатньо високими: кількість базових станцій має

бути принаймні \sqrt{n} для першого методу маршрутизації і $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$ — для ймовірнісного способу маршрутизації.

Пропускна здатність бездротових гібридних мереж за ймовірнісним способом маршрутизації

Спочатку обчислимо смугу пропускної здатності, задану режимом передачі *ad hoc*. Нехай Z_i буде випадковою змінною, яка являє собою чи обирає вузол i використання способу *ad hoc* при відправці даних. Тоді:

$$Z_i = \begin{cases} 1, & \text{вузол } i \text{ обирає режим } ad_hoc, \\ 0, & \text{навіпаки.} \end{cases} \quad (1)$$

Відповідно до методу маршрутизації $\{Z_i\}_1^n$ є послідовністю випадкових змінних з $E[Z_i] = p$. Довільна змінна $N_a = \sum_{i=1}^n Z_i$ представляє собою кількість вузлів, що обирають використання способу *ad hoc* при відправці даних в мережі.

Згідно із законом великих чисел при ймовірності $Z_i=1$ маємо:

$$\frac{N_a}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \rightarrow p, \text{ при } n \rightarrow \infty.$$

Пропускню здатність задану режимом передачі *ad hoc*, знаходять так:

$$T_a = \Theta \left(\sqrt{\frac{np}{\log(np)}} W_1 \right). \quad (2)$$

У кожній комірці, для того, щоб використовувати пропускню здатність, забезпечену інфраструктурою, принаймні один вузол має обрати спосіб інфраструктури для відправки даних. В іншому випадку базова станція не отримає або не відправить дані. Зв'язкові підканали передачі до і від базової станції не використовуються і ширина смуги пропускну здатності витрачається.

Фактично, якщо $p < 1$, ймовірність того, що принаймні один вузол відішле дані способом інфраструктури, наближається до одиниці, оскільки n прямує до нескінченності. Визначимо випадкову змінну \bar{Z}_i як протилежну Z_i , тобто $\bar{Z}_i = 1$, якщо вузол i обирає модель інфраструктури, і $\bar{Z}_i = 0$ — навпаки. Для комірки k позначимо кількість вузлів в одній комірці як N_k , маємо $\lim_{n \rightarrow \infty} N_k / n \rightarrow 1/m$ і, таким чином, $\lim_{n \rightarrow \infty} N_k \rightarrow \infty$. Пропускна здатність комірки k , заданої режимом інфраструктури, визначається як:

$$T_i(N_k) = \Theta(W_2) E \left[1 - \left(\sum_{i=1}^{N_k} \bar{Z}_i \right) \right] = \Theta(W_2) P \left(\sum_{i=1}^{N_k} \bar{Z}_i \geq 1 \right) = \Theta(W_2) (1 - p^{N_k}).$$

Оскільки $\lim_{n \rightarrow \infty} N_k \rightarrow \infty$, якщо $p < 1$, то

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T_i(N_k) = \Theta(W_2).$$

Нехай загальна кількість комірок у мережі дорівнює m . Для цілої мережі пропускна здатність, задана режимом передачі інфраструктури, є $\Theta(mW_2)$. Враховуючи (2), дістаємо таке твердження: для гібридної мережі з n вузлами і m базовими станціями, відповідно до способу маршрутизації, загальна пропускна здатність гібридної мережі визначається як:

$$T(n, m) = \Theta \left(\sqrt{\frac{np}{\log(np)}} W_1 + mW_2 \right). \quad (3)$$

Як можна побачити з (3), для кожної схеми розміщення каналу пропускна здатність максимізується, коли $p \rightarrow 1$. Це означає, що майже всі вузли мають обрати спосіб *ad hoc* з метою максимізування пропускну здатності. Це пояснюється тим, що ширина смуги пропускну здатності базової станції повністю використовується до того часу, поки є вузловий зв'язок з використанням способу інфраструктури. Ширина смуги пропускну здатності базової станції розподілена між вузлами, які використовують її, щоб відправити дані. Більша кількість вузлів, з'єднаних базовою станцією, не збільшує пропускню здатність, задану інфраструктурою. Оскільки p значно менше одиниці, тому що n прямує до нескінченності, ймовірність, що принаймні один вузол обере спосіб інфраструктури, наближається до одиниці. Тому ширина смуги пропускну здатності базових станцій буде повністю використана, коли n прямує до нескінченності. Умова $p \rightarrow 1$ означає, що майже всі вузли мають бути з'єднані за допомогою способу *ad hoc* для того, щоб у повній мірі використати у своїх інтересах переваги просторового паралелізму.

Щоб дістати максимальну пропускню здатність, ми маємо врахувати всі схеми розподілу каналів. Отримаємо такі результати:

1. Якщо $m = \Theta \left(\sqrt{\frac{n}{\log n}} \right)$, загальна пропускна здатність збільшується, коли $W_2 / W \rightarrow 0$ і $p \rightarrow 1$.

Відповідна пропускна здатність дорівнює $\Theta \left(\sqrt{\frac{n}{\log n}} W \right)$.

Зазначимо, що максимальна пропускна здатність у цьому випадку має такий самий асимптотичний характер, що й пропускна здатність мережі *ad hoc*. Коли m збільшується асимптотично повільніше ніж $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, не дуже вигідно використовувати інфраструктуру при обчисленні пропускну здатності.

2. Якщо $m = \Theta\left(\sqrt{\frac{n}{\log n}}\right)$, загальна пропускна здатність збільшується, коли $W_1/W \rightarrow 0$ і $p \rightarrow 1$.

Відповідна пропускна здатність дорівнює $\Theta(mW)$.

Коли кількість базових станцій зростає швидше ніж $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, максимальна пропускна здатність зростає лінійно з кількістю базових станцій. Порівняно з мережею *ad hoc* коефіцієнт посилення пропускної здатності визначається як: $g(n, m) = \Theta\left(m\sqrt{\frac{\log n}{n}}\right)$.

Якщо $m = n^\alpha$ при $1/2 \leq \alpha \leq 1$, тоді $g(n, m) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} m^{1-\frac{1}{2\alpha}} \sqrt{\log m}$ і збільшується многочленно з кількістю базових станцій.

Висновки

Гібридна мережа складається з мережі *ad hoc* і мережі базових станцій. Базові станції зв'язані дротовою мережею і розміщені в мережі *ad hoc* за звичайною моделлю. Дані можуть бути відправлені багатопробіжним способом, як у спеціальних мережах, або як у коміркових мережах — через інфраструктуру. Мета цієї праці полягає в тому, щоб дослідити вигідність інфраструктури для пропускної здатності й одержати асимптотичний характер пропускної здатності гібридних мереж.

Вважаємо гібридну мережу з m базовими станціями і n вузлами, кожний з яких здатний передавати інформацію при W біт/сек по загальному бездротовому каналу. Згідно зі способами *k-nearest-cell-routing*, якщо m зростає повільніше ніж \sqrt{n} , максимальна загальна пропускна здатність

дорівнює $\Theta\left(\sqrt{\frac{n}{\log \frac{n}{m^2}}}\right)$. У цьому випадку вигідність додавання базових станцій є незначною.

Однак якщо базові станції будуть додані на швидкості, що зростає за асимптотичною залежністю, швидше ніж \sqrt{n} , максимальна пропускна здатність вимірюється як $\Theta(mW)$ і збільшується лінійно з кількістю базових станцій.

У ймовірнісній стратегії маршрутизації режим передачі обирається незалежно для кожної пари джерело — призначення з визначеною ймовірністю. Згідно з цією стратегією, якщо m зростає повільніше ніж $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, максимальна пропускна здатність визначається як $\Theta\left(\sqrt{\frac{n}{\log n}}W\right)$, що має такий самий асимптотичний характер, що й мережа *ad hoc*. У цьому випадку не вигідно використовувати інфраструктуру. Якщо m зростає швидше ніж $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$, максимальна пропускна здатність визначається як $\Theta(mW)$ і збільшується лінійно з кількістю базових станцій.

Для обох стратегій маршрутизації існує поріг для зміни числа базових станцій (m) відносно кількості вузлів (n), де максимальна пропускна здатність змінює асимптотичну поведінку. Коли кількість базових станцій масштабується повільніше ніж поріг, пропускна здатність визначається особливостями передачі *ad hoc*. У цьому випадку, ефект додавання базових станцій для пропускної здатності мінімальний. Коли кількість базових станцій змінюється швидше ніж поріг, пропускна здатність визначається особливостями інфраструктури. У цьому випадку максимальна пропускна здатність збільшується лінійно з числом базових станцій, забезпечуючи ефективне вдосконалення мереж *ad hoc*.

Таким чином, для того, щоб досягати суттєвої вигідності, інвестиції в дротову інфраструктуру повинні бути достатньо високими: кількість базових станцій повинна бути принаймні \sqrt{n} для стратегії *k-nearest-cell-routing* і $\sqrt{\frac{n}{\log n}}$ для ймовірнісної стратегії маршрутизації.

Максимальна пропускна здатність досягається, коли $W_1/W \rightarrow 0$ або $W_1/W \rightarrow 1$. W_1 — це ширина смуги пропускної здатності каналу, що призначена проводити передачу інформації способом *ad hoc*. В умовах припускається, що задля максимізування пропускної здатності, один із двох способів передачі одержить майже всю ширину смуги частот, у той час як інший не отримує зовсім. У будь-якому разі випадку, деякі з вузлів не отримують ширини смуги пропускної

здатності для відправки даних. Єдиний спосіб уникнути цієї ситуації полягає в тому, щоб призначити певну мінімальну ширину смуги кожному підканалу.

У цьому випадку максимальна пропускна здатність буде досягнута, коли $W1$ набуде свого мінімального або максимально можливого значення. Якщо попередньою вимогою є $W1/W \rightarrow 0$, нова умова полягає в тому, що $W1$ набуде мінімального значення, призначеного підканалу режиму *ad hoc*. Варто зазначити, що це не змінює домінуючої масштабуючої поведінки максимальної пропускної здатності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Olivier P. T. Dousse and Hasler M., «Connectivity in ad-hoc and hybrid networks,» in *Proc. IEEE Infocom*, 2002.
2. Rappaport T. S., *Wireless Communications: Principle and Practice*, Second Edition. Prentice Hall, 2002.
3. Gupta P. and Kumar P. R., «The capacity of wireless networks,» *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, Mar 2000.
4. Gupta P. and Kumar P., «Internets in the sky: The capacity of three dimensional wireless networks,» *Communications in Information and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39—49, 2001.
5. Grossglauser M. and Tse D. N. C., «Mobility increases the capacity of ad—hoc wireless networks,» in *Proc. IEEE Infocom*, 2001.
6. Gastpar M. and Vetterli M., «On the capacity of wireless networks: the relay case,» in *Proc. IEEE Infocom*, 2002.
7. Li J., Blake C., Couto D. S. J. D., Lee H. I. and Morris R., «Capacity of ad hoc wireless networks,» in *Mobile Computing and Networking*, 2001, pp. 61—69.
8. Cormen T. H., Leiserson C. E. and Rivest R. L. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 1990.