

УДК 004.724.4

DOI: 10.18372/2073-4751.84.20903

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

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СЛУЖБОВОГО ТРАФІКУ В AD-HOC МЕРЕЖАХ

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Ad-hoc мережі, або мережі спеціального призначення, являють собою набір мобільних платформ або вузлів, де кожен вузол може вільно та довільно переміщатися без будь-якої фіксованої інфраструктури, за винятком самих вузлів. Вони часто автономні, самоконфігуровані, адаптивні і мають багато доведених переваг, через що є предметом багатьох сучасних досліджень.

Надамо визначення ролі службового трафіку у спеціалізованих ad-hoc мережах.

Службовий трафік (також відомий як керуючий, сигнальний або накладний трафік) – це весь мережевий трафік, який безпосередньо не переносить дані користувачів, але необхідний для створення, підтримки, оптимізації та адаптації мережі.

У спеціалізованих мережах наявність службового трафіку є структурно неминучою через відсутність фіксованої інфраструктури, динамічність топології, обмеженість ресурсів у вузлах мережі, непередбачуваність і неповну визначеність глобального стану таких мереж.

Службовий трафік є необхідним для роботи мережі, але надмірний службовий трафік погіршує масштабованість, енергоефективність та якість обслуговування.

В структурованих мережах трафік керування є централізованим та передбачуваним. Натомість в ad-hoc мережах трафік керування є розподіленим,

надлишковим, чутливим до мобільності та часто базується на ширококомовній передачі. Всі ці фактори породжують три системні проблеми

- вибуховий характер трафіку керування,
- виникнення штормів ширококомовної передачі,
- сплески трафіку виявлення маршрутів,
- поява петель негативного зворотного зв'язку.

При цьому слід відзначити що чим більше мобільності, тим більше трафіку керування. Чим більше трафіку керування, тим більше перевантаження та, відповідно, наявне зростання кількості збоїв пошуку маршруту. Чим більше збоїв, то ще більше трафіку керування.

Мета

Метою статті є математичне моделювання залежностей інтенсивності службового трафіку від кількості та щільності вузлів в ad-hoc мережі, завад або перешкод, а також співвідношення сигнал/шум в вузлах з метою зменшення впливу такого трафіку на загальне навантаження в мережі.

Основна частина

Службовий трафік, по суті, використовується для зменшення невизначеності щодо стану мережі. Тобто якщо трафік даних передає інформацію між програмами, то сервісний трафік передає інформацію про стан мережі.

В цілому, зміна стану мережі - це випадковий процес. Розглянемо ad-hoc мережу з N вузлів індексовану проміжком часу t при цьому стан

мобільних з'єднань змінюється через переміщення вузлів, завмирання сигналів, завади та перешкоди.

Визначимо стан мережі як випадкову змінну

$$S(t) = \{T(t), L(t), R(t)\}$$

де:

$T(t)$ - топологія (хто до кого може дістатися);

$L(t)$: якість з'єднання (сигнал/шум, затримка, втрати);

$R(t)$: стан маршрутизації.

Істинний стан ніколи не може повністю спостерігатися жодним вузлом.

Ентропія стану мережі задається через невизначеність її стану у момент часу t , а саме:

$$H(S(t)) = - \sum_{s \in S} P(s) \log P(s)$$

Інтерпретація: висока рухливість - висока ентропія; щільна мережа - висока ентропія; стабільна, розріджена мережа - низька ентропія.

Кожен вузол i має лише локальну оцінку

$$\hat{S}_i(t) \subset S(t)$$

з невизначеністю

$$H(S(t) | \hat{S}_i(t))$$

Загальна роль сервісного трафіку - це зменшення невизначеності. Нехай $C(t)$ позначає сервісний трафік, обмін яким відбувся до моменту часу t , тоді інформація, що надається сервісним трафіком, може бути визначена таким виразом:

$$I(S(t); C(t)) = H(S(t)) - H(S(t) | C(t))$$

Далі визначимо коефіцієнт ефективності управління

$$\eta = \frac{I(S; C)}{|C|}$$

де: $|C|$ - кількість бітів, переданих як сервісний трафік.

Виходячи з того, що службовий трафік використовується з метою управління мережевими процесами.

неважко зрозуміти що такий трафік не може бути нульовим. Іншими словами, існує нижня межа об'єму такого трафіку перетин якої веде до втрати керованості мережі. З теорії інформації відомо що для зменшення невизначеності на ΔH необхідно передати щонайменше ΔH біт інформації. Таким чином:

$$|C| \geq H(S) - H_{\text{acceptable}}$$

де $H_{\text{acceptable}}$ - максимально допустима невизначеність необхідна для коректної роботи.

Важливим чинником функціонування ad-hoc мереж є визначення ступенів впливу мережеских та фізичних факторів на інтенсивність службового трафіку. Як було відмічено вище службовий (керуючий) трафік у бездротових ad-hoc мережах необхідний для підтримки точного уявлення про стан мережі, включаючи топологію, якість з'єднання та інформацію про маршрутизацію.

З інформаційно-теоретичної точки зору, службовий трафік можна інтерпретувати як механізм зменшення невизначеності щодо змінного в часі стану мережі, динаміка якого зумовлена мобільністю, станом каналу та перешкодами або завадами [1], [2]. На відміну від мереж на основі інфраструктури, ці накладні витрати генеруються повністю розподіленим чином і сильно залежать як від масштабу мережі, так і від факторів фізичного рівня. Отже, розуміння того, як ключові параметри впливають на обсяг службового трафіку, є важливим для оцінки масштабованості та меж ефективності.

Нехай R_c позначає сукупну швидкість службового трафіку $S(t)$ представляє стан глобальної мережі. Фундаментальна нижня межа необхідної швидкості трафіку задається швидкістю ентропії стану мережі:

$$R_c \geq \hat{H}(S),$$

тобто використовується підхід, який зазвичай застосовується в інформаційно-теоретичному аналізі витрат на керування в мобільних ad-hoc мережах [3], [4].

Різномірні фактори по різному впливають не лише на кількісні, але й на якісні показники службового трафіку. Коротко зупинимось на кожному з факторів.

Вплив кількості вузлів. Невизначеність, пов'язана з топологією мережі, зростає зі збільшенням кількості вузлів N . Моделюючи топологію як випадковий граф з бінарними станами з'єднань, ентропія топології масштабується квадратично з N [5]. Як результат, накладні витрати на керування, необхідні для відстеження змін топології, зростають нелінійно, що пояснює погану масштабованість протоколів плоскої маршрутизації, що спостерігається на практиці [6], [7]. Розглянемо ad-hoc мережу, що складається з N вузлів. Топологію мережі можна представити у вигляді графа з кількістю вузлів до

$$L = \frac{N(N-1)}{2}$$

потенційних бездротових з'єднань. Якщо кожне з'єднання змодельовати як двійкову випадкову величину, що вказує на його існування з ймовірністю p , то ентропія топології приблизно дорівнює

$$H_{top} \approx L \cdot h(p);$$

де

$$h(p) = -p \log(p) - (1-p) \log(1-p)$$

двійкова функція ентропії. Цей вираз означає, що невизначеність, пов'язана з топологією мережі, масштабується як

$$H_{top} = \Theta(N^2).$$

Оскільки зв'язки з'являються та зникають через мобільність та зміни каналу, швидкість ентропії топології стає пропорційною швидкості зміни

зв'язку λ . Отже, необхідна швидкість трафіку обслуговування

$$R_c(N) \propto N^2 \cdot \lambda$$

Таке квадратичне масштабування пояснює добре відому відсутність масштабованості плоских механізмів спеціальної маршрутизації та сигналізації та підкреслює фундаментальну складність підтримки глобальних мережевих моделей зі збільшенням розміру мережі.

Вплив щільності вузлів. Щільність вузлів безпосередньо впливає на середню з'язність вузла та, як наслідок, на обсяг трафіку обслуговування сусідства. Попередні аналітичні та експериментальні дослідження показали, що накладні витрати на сигналізацію швидко зростають у щільних мережах через збільшення конкуренції та надлишкових ширококомовних розсилок [8], [9]. Якщо щільність вузлів представити як

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

де A – площа розгортання.

Тоді для заданої дальності передачі r очікувана кількість сусідів на вузол становить

$$d \approx \rho \pi r^2.$$

Більшість механізмів управління службовим трафіком у ad-hoc мережах, такі як виявлення сусідів, моніторинг з'єднань та обслуговування локальних маршрутів, масштабуються лінійно з кількістю сусідів. Таким чином, службовий трафік, що генерується одним вузлом, можна апроксимувати як

$$R_c^{(i)} \propto d.$$

Агрегування по всіх вузлах дає

$$R_c^{(total)} \propto N \cdot \rho \pi r^2.$$

Цей результат показує, що для фіксованої області збільшення щільності вузлів призводить до надлінійного зростання сервісного трафіку, навіть за відсутності

мобільності. Тому щільні мережі відчувають надмірні накладні витрати на керування лише через обслуговування сусідства.

Вплив перешкод. Перешкоди збільшують частоту помилок пакетів та нестабільність з'єднання, що призводить до частого відновлення маршрутів та повторних передач. Це явище призводить до нелінійного посилення службового трафіку, особливо при високому навантаженні або конкуренції, що задокументовано як в аналітичних, так і в прикладних дослідженнях на основі моделювання [10], [11]. Перешкоди опосередковано впливають на трафік послуг, збільшуючи невизначеність, пов'язану з надійністю з'єднання. Нехай p_e позначає ймовірність помилки пакета на з'єднанні через перешкоди та конкуренцію. Ентропія, пов'язана з надійністю з'єднання, дорівнює

$$H_{\text{link}} = h(p_e).$$

Зі збільшенням перешкод p_e зростає, що призводить до вищої ентропії та зростання частоти відновлювальних дій як на каналному, так і мережевому рівнях. Якщо кожна втрата пакетів або збій каналу запускає сигналізацію (наприклад, повторні передачі, відновлення маршруту), швидкість службового трафіку може масштабуватися як

$$R_c \propto \frac{1}{(1-p_e)}$$

Цей зв'язок вказує на

ефект нелінійного посилення: відносно невелике збільшення перешкод може спричинити непропорційне зростання службового трафіку. Така поведінка зазвичай спостерігається в перевантажених або пересичених ad-hoc мережах.

Вплив співвідношення сигнал/шум (SNR). Низький рівень SNR значно збільшує частоту відмов каналу, що змушує частіше передавати сигнали керування для підтримки зв'язку.

Інформаційно-теоретичні та міжрівневі дослідження показують, що накладні витрати на керування експоненціально зменшуються зі покращенням SNR, тоді як для режимів з низьким SNR сигналізація часто переважає корисний трафік даних [12], [13]. Співвідношення сигнал/шум безпосередньо впливає на стабільність з'єднання, а отже, на швидкість, з якою інформація про стан мережі застаріває. Для багатьох схем модуляції та кодування коефіцієнт відмов з'єднання можна приблизно визначити як

$$\lambda_{\text{link}} \propto e^{-\alpha \cdot \text{SNR}},$$

де α - технологічно залежна константа.

Поєднуючи ці ефекти, можна побудувати уніфіковану модель виходячи з якої сукупний показник трафіку послуг можна приблизно визначити як

$$R_c \approx K \cdot N \cdot (\rho \pi r^2) \cdot e^{-\alpha \cdot \text{SNR}} \cdot f(I),$$

що узгоджується з раніше отриманими нижніми межами та законами масштабування для накладних витрат керування в мобільних ad-hoc мережах [3], [4], [14]. Сукупний показник службового трафіку можна апроксимувати наступним виразом:

$$R_c \approx K \cdot N \cdot \bar{d} \cdot \lambda_{\text{link}}(\text{SNR}, I),$$

де K відображає ефективність протоколу та надмірність сигналізації, $\bar{d} = \rho \pi r^2$

– середній ступінь зв'язності вузла вузла, а $\lambda_{\text{link}}(\text{SNR}, I)$ представляє швидкість зміни каналу як функцію SNR та перешкод I . Підставляючи вищевказані вирази, отримуємо

$$R_c \approx K \cdot N \cdot (\rho \pi r^2) \cdot e^{-\alpha \cdot \text{SNR}} \cdot f(I),$$

де $f(I)$ – коефіцієнт посилення, що залежить від рівня інтерференції.

Представлені моделі дозволяють оцінити вплив перелічених вище факторів на інтенсивність службового трафіку в ad-hoc мережі. Більшість розглянутих факторів носить

некерований характер, тобто механізми впливу чи регулювання величин таких параметрів суттєво обмежені, або взагалі відсутні.

Незважаючи на це ми всеж більш детально зупинимося на такому факторі, як щільність вузлів.

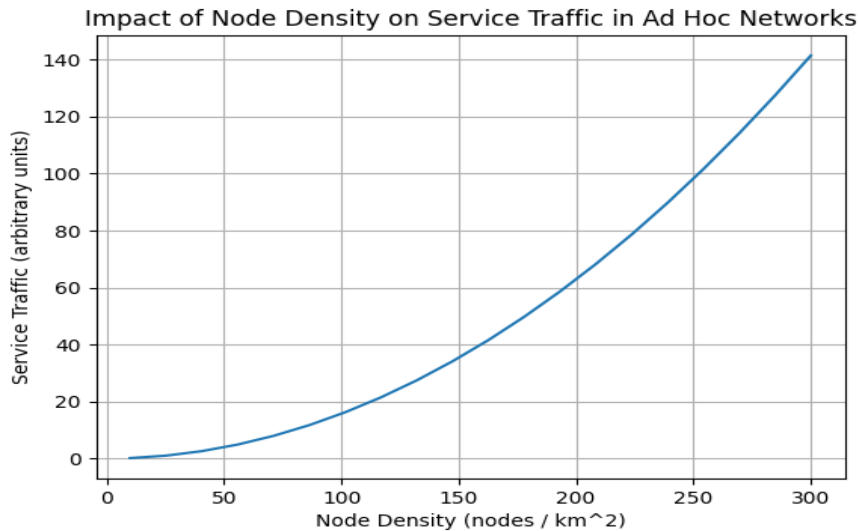


Рис. 1. Залежність величини службового трафіку від щільності вузлів

На рис. 1 показано вплив щільності вузлів на величину сукупного службового трафіку для фіксованої області розгортання. Результати підтверджують аналітичну модель, демонструючи надлінійне - приблизно квадратичне - зростання накладних витрат на керування зі збільшенням щільності вузлів. Така поведінка зумовлена лінійним збільшенням середнього ступеня зв'язності вузла в поєднанні з пропорційним зростанням кількості вузлів-учасників, що призводить до швидкої ескалації вартості обслуговування сусідства та широкомовної сигналізації.

Особливістю параметру, який визначається щільністю вузлів є те, що він піддається своєрідному «регулюванню». Механізм такого регулювання лежить всередині певних алгоритмів маршрутизації і діє шляхом відсіювання збиткових, з точки зору цих алгоритмів, вузлів мережі.

Одним із прикладів подібного алгоритму є ND-AODV. Аналіз алгоритмів зменшення кількості вузлів виходить за рамки цієї роботи. Доцільно лише констатувати, що для мережі зі

щільністю вузлів 200 вузлів/км² зменшення становить 62%, а при 500 вузлів/км² - 85%, тобто може бути досягнуто зменшення службового трафіку у кілька десятків разів.

Висновок

У роботі виконано інформаційно-теоретичний аналіз службового трафіку в ad-hoc мережах та запропоновано узагальнену математичну модель, яка дозволяє кількісно оцінити вплив основних мережевих і фізичних факторів на інтенсивність службового трафіку. Показано, що службовий трафік є структурно необхідним елементом функціонування ad-hoc мереж, оскільки він забезпечує зменшення невизначеності щодо стану топології, якості з'єднань та маршрутної інформації.

Отримані результати підтверджують, що зі збільшенням кількості та щільності вузлів накладні витрати на керування зростають надлінійно, що обумовлює фундаментальні обмеження масштабованості плоских механізмів маршрутизації. Додатково встановлено, що завади та низьке співвідношення

сигнал/шум призводять до нелінійного посилення службового трафіку через збільшення частоти збоїв з'єднань і відновлювальних процедур.

Окремо показано, що щільність вузлів є одним із небагатьох параметрів, вплив якого може бути частково компенсований алгоритмічними засобами. Зокрема, використання механізмів зменшення ефективної участі вузлів у керуванні мережею, таких як ND-AODV, дозволяє суттєво знизити обсяг службового трафіку в щільних ad-hoc мережах, не змінюючи їх фізичної структури. Представлений підхід створює основу для подальших досліджень, спрямованих на розробку адаптивних та щільнісно-орієнтованих протоколів маршрутизації, а також на експериментальну перевірку отриманих моделей у середовищах імітаційного моделювання та реальних мережах.

Література

- [1] T. Cover and J. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed. Wiley, 2006.
- [2] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [3] N. Bisnik and A. A. Abouzeid, "On the capacity deficit of mobile wireless ad hoc networks: A rate-distortion formulation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 12, pp. 5737–5751, Dec. 2009.
- [4] N. Bisnik, A. A. Abouzeid, and R. G. Maunder, "Bounds on the overhead of geographic routing in mobile ad hoc networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, no. 1, pp. 136–149, Feb. 2011.
- [5] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, Mar. 2000.
- [6] E. M. Royer and C. E. Perkins, "An implementation study of the AODV routing protocol," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2000.
- [7] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "An efficient routing protocol for wireless networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 183–197, 1996.
- [8] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," *ACM/IEEE MobiCom*, 1999.
- [9] Y. Sasson, D. Cavin, and A. Schiper, "Probabilistic broadcast for flooding in wireless mobile ad hoc networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2003.
- [10] V. Kawadia and P. R. Kumar, "A cautionary perspective on cross-layer design," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 3–11, Feb. 2005.
- [11] M. Conti and S. Giordano, "Mobile ad hoc networking: Milestones, challenges, and new research directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 85–96, Jan. 2014.
- [12] J. Zhai and Y. Fang, "Physical carrier sensing and spatial reuse in multirate and multihop wireless ad hoc networks," *IEEE INFOCOM*, 2006.
- [13] K. Fall and K. Varadhan (eds.), *The ns Manual*, The VINT Project, 2011.
- [14] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477–486, Aug. 2002.

Телешко І.В.

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СЛУЖБОВОГО ТРАФІКУ В AD-НОС МЕРЕЖАХ

У статті розглянуто проблему надмірного службового трафіку в бездротових ad-hoc мережах, що виникає внаслідок відсутності фіксованої

інфраструктури, динамічної топології та обмежених ресурсів вузлів. Службовий трафік інтерпретується з інформаційно-теоретичної точки зору як механізм зменшення невизначеності щодо стану мережі. Запропоновано математичну модель, яка пов'язує інтенсивність службового трафіку з кількістю та щільністю вузлів, рівнем завад, а також співвідношенням сигнал/шум у каналах зв'язку. Показано, що за фіксованої області розгортання збільшення щільності вузлів призводить до надлінійного, близького до квадратичного, зростання накладних витрат на керування мережею. Особливу увагу приділено можливостям зменшення ефективної щільності вузлів за рахунок алгоритмічних механізмів маршрутизації, зокрема підходів типу ND-AODV, що дозволяють істотно скоротити обсяг службового трафіку в щільних мережах. Отримані результати можуть бути використані для оцінки масштабованості ad-hoc мереж та розробки більш ефективних протоколів керування.

Ключові слова: ad-hoc мережі, службовий трафік, маршрутизація, щільність вузлів, бездротові мережі, AODV, ND-AODV, інформаційна ентропія, масштабованість.

TELESHKO I.

ASSESSMENT OF SERVICE TRAFFIC DEPENDENCES IN AD-HOC NETWORKS

The article devoted to the problem of excessive service traffic in wireless ad-hoc networks, which arises due to the lack of a fixed infrastructure, dynamic topology, and limited node resources. Service traffic is interpreted from an information-theoretic point of view as a mechanism for reducing uncertainty about the network state. A mathematical model is proposed that relates the intensity of service traffic to the number and density of nodes, the level of interference, and the signal-to-noise ratio in communication channels. It is shown that for a fixed deployment area, an increase in node density leads to a superlinear, close to quadratic, increase in network management overhead. Special attention is paid to the possibilities of reducing the effective node density due to algorithmic routing mechanisms, in particular, approaches such as ND-AODV, which allow significantly reducing the volume of service traffic in dense networks. The results obtained can be used to assess the scalability of ad-hoc networks and develop more effective management protocols.

Keywords: ad-hoc networks, service traffic, routing, node density, wireless networks, AODV, ND-AODV, information entropy, scalability.

Стаття подана до редакції: 25/11/2025

Стаття прийнята до опублікування: 11/12/2025

Стаття опублікована: 30/12/2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0