

КОДУВАННЯ ТРАФІКУ МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Мережа спеціального призначення (*Ad-hoc*) являє 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. Вочевидь, спостерігається швидке впровадження бездротових мережевих технологій у навіть не комерційному секторі з використанням специфікацій *WLAN* на основі *IEEE 802.11*.

Кожен вузол у *Ad-hoc* мережі відповідає за маршрутизацію пакетів між своїми сусідами, сприяючи таким чином встановленню та підтримці підключень до мережі. Це призводить до необхідності визначення нового класу протоколів маршрутизації.

З іншого боку, в мережах зазвичай створюються черги з пакетів даних, призначених для пересилання між вихідними, внутрішніми та кінцевими вузлами. Використання так званого мережевого кодування може покращити пропускну здатність мережі та зменшити споживання енергії шляхом об'єднання наявних пакетів даних перед пересиланням.

Концепція мережевого кодування, по суті, бере початок з основоположної статтею *Ahlswede* та ін. [1] у 2000 році. Основна ідея мережевого кодування полягає в тому, щоб дозволити кожному вузлу мережі об'єднувати дані з вхідних

інтерфейсів для визначення того, які дані передавати на його вихідних інтерфейсах.

Ця концепція контрастує з традиційними операціями маршрутизації в мережах з комутацією пакетів, таких як Інтернет, де кожен вузол повинен ретранслювати дані (використовуючи операції маршрутизації) від вибраних вхідних до вибраних вихідних інтерфейсів. В роботі [1] доведено, що мережеве кодування може значно перевершити мережеву маршрутизацію з точки зору досяжної пропускної здатності.

Мета

Метою статті є обґрунтування можливості та доцільності застосування мережного кодування в *Ad-hoc* мережах, а також аналіз реалізації деяких алгоритмів кодування з точки зору особливостей мереж з втратою даних.

Основна частина

На сьогоднішній день в *Ad-hoc* мережах використовуються два види маршрутизації: одношляхова та багатошляхова. Особливістю *Ad-hoc* є самоорганізація, тобто кожен вузол, що працює в ній може грати роль як передавача своєї інформації, так і ретранслятора загального потоку даних. Відповідно в таких мережах завжди існує декілька шляхів між парою вузлів. Сенс багатошляхової маршрутизації полягає в тому, щоб надати вузлу можливість вибору одного оптимального маршруту із усіх можливих варіантів. Використання протоколів багатошляхової маршрутизації є більш оптимальним з точки зору забезпечення балансування навантаження у

мережі та захисту від збоїв при передачі трафіку. Такий підхід дозволяє оптимально використовувати ємність каналу зв'язку і підвищити загальну пропускну здатність. Додатково забезпечується відмовостійкість мережі і надійність передачі [2].

Існуючи на даний момент протоколи прийнято класифікувати за принципом роботи [2-3]. Виділяють три базові групи протоколів: проактивні, реактивні та гібридні. Кожен клас протоколів має свої переваги і недоліки при використанні в бездротових *Ad-hoc* мережах. При проактивній маршрутизації (протоколи *OSPF*, *OLSR*, *TBRPF*, *FSR* і ін.) адресація досить проста в реалізації, але вона має проблеми з масштабуванням у великих мережах. Реактивні протоколи (*AODV-BR*, *AOMDV*, *TORA*, *ROAM*, *MDSR*, *SMR*) також мають проблеми з масштабуванням. Для підвищення показника масштабування, необхідно підвищити контроль при визначенні та обслуговуванні маршруту. Це може бути досягнуто шляхом локалізації поширення керуючого повідомлення в певному сегменті, де знаходиться пункт призначення [2]. Гібридні протоколи маршрутизації (*SPREAD*, *ZRP*, *NAMP*, *E-NAMP*, *HSPREAD*) є протоколами що створені на основі двох попередніх видів. Як правило, вони розбивають мережу на окремі логічні підмережі (зони), всередині яких функціонує проактивний протокол, а взаємодія між цими підмережами здійснюється реактивними методами. Перевага цих протоколів полягає в тому, що вони підтримують сильний мережевий зв'язок (проактивно) в зонах маршрутизації при визначенні віддаленого маршруту (за межами зони маршрутизації) швидше, ніж інші, а також вони можуть взаємодіяти з іншими протоколами маршрутизації для підвищення продуктивності і надійності [2]. Недоліком гібридних протоколів є їхня складність реалізації та збільшення часу затримки сигналів при переході між підмережами.

Згідно зі своєю природою *Ad-hoc* мережі можуть бути віднесені до так званих мереж з втратою даних (*Lossy Network*). Трафік в таких мережах дуже

чутливий до їх агресивного середовища передачі даних. Це пов'язано із застосуванням залежної схеми кодування, такої як оцінка/компенсація руху. Крім того, різні приймачі зазвичай мають різні можливості щодо отримання даних. В мережах з кількома стрибками втрати можуть бути викликані не стільки ненадійними з'єднаннями, скільки ненадійними вузлами, які періодично приєднуються до мережі та залишають її [4].

Пакункове мережеве кодування або *Branch Network Coding (BNC)* [5-7], є рішенням для передачі пакетів з кількома стрибками в мережах із втратою пакетів. Щоб бути сумісним з існуючою інфраструктурою, зазвичай *BNC* реалізований через *UDP*. Один біт помилки, ймовірно, призведе до відхилення пакета. *UDP-Lite* – це варіант *UDP*, який підтримує часткові контрольні суми [8]. *BNC* – це клас лінійного мережевого кодування [9, 10], призначений для практичної реалізації в мережах з кількома стрибками з втратою пакетів.

Пакункове мережеве кодування (*BNC*). Кодер кодує всю частину даних для надсилання в кілька пакунків, а потім обмежує застосування випадкового лінійного мережевого кодування (*RLNC*) [11] до пакетів, що належать до одного пакунку. Замість пересилання на проміжних вузлах виконується перекодування для генерації більшої кількості пакетів. Існує *BNC*, який може досягати швидкості, близької до оптимальної, наприклад, коди *BATS* [7].

Дані, які потрібно передати, розбиваються на набір вхідних пакетів, кожен з яких розглядається як вектор з K символів над фіксованим кінцевим полем. Розмір поля має бути досить великим для припущення про те, що два випадкові вектори над цим полем є лінійно незалежними один від одного з високою ймовірністю.

Кожний пакунок складається з M кодованих пакетів M це ціле число більше за нуль відоме як розмір пакунку. Для створення пакунку вибирається підмножина вхідних пакетів. Спосіб вибору

підмножини залежить від програми та конструкції коду. Кожен кодований пакет у пакунку є випадковою лінійною комбінацією на вибраній підмножині вхідних пакетів. До кожного пакету також додається вектор коефіцієнтів. Призначення векторів коефіцієнтів – перекодування операції на проміжних вузлах. Два кодованих пакети в пакунку називаються лінійно незалежними один від одного, якщо і тільки якщо їхні вектори коефіцієнтів лінійно незалежні один від одного.

Заголовок *BNC* разом із корисним навантаженням називається пакетом *BNC*. Для попереднього дослідження було використано просту стратегію планування, згідно з якою пакети надсилаються послідовно. Кількість лінійно незалежних пакетів у пакунку, іменується рангом пакунку, і є мірою інформації, що передається пакунком. Таким чином, продуктивність *BNC* зазвичай вимірюється очікуваним рейтингом серед усіх пакетів, що надходять до вузла приймача.

На вихідному вузлі щойно згенерований пакет має ранг *M*. Через втрату пакетів ранг пакету монотонно знижується в мережі. Щоб сповільнити швидкість падіння рангу, перекодування виконується в проміжних вузлах. Після отримання всіх пакетів пакунку, які не були відкинуті, перекодовані пакети цього пакунку генеруються за допомогою випадкових лінійних комбінацій на отриманих пакетах цього пакунку.

У вузлі-приймачі запускається декодер *BNC*. Спосіб розшифровки залежить від способу формування пакунків.

Мережеве кодування та типи мережевої розсилки. На сьогоднішній день більшість з робіт з мережевого кодування зосереджена на груповій розсилці. Дійсно, це стосується оригінальної роботи з мережевого кодування [1] та для головної проблеми, розглянутої в оригінальній роботі, а саме, встановлення єдиного з'єднання через дротову пакетну мережу без втрат, Мережеве кодування не дає переваг перед простою маршрутизацією у випадку одноадресної передачі. Але це не означає, що

корисність мережевого кодування суворо обмежена груповою передачею. Відомо, наприклад, що кодування для декількох підключень дає перевагу, незалежно від того, чи є вони груповими чи одноадресними. Проблема кодування для кількох одноадресних з'єднань була досліджена в роботі [12], та всеж загально визнано, що проблема є складною і насправді піддається лише тимчасовим рішенням.

Відомо також, що кодування в мережах пакетної передачі з втратами дає перевагу, незалежно від того, чи це для одного з'єднання, чи для кількох з'єднань, і незалежно від того, чи є вони багатоадресними чи одноадресними. Було запропоновано кілька схем кодування, як для дротових мереж, які складаються виключно з каналів «точка-точка», так і для бездротових мереж, які можуть містити широкомовні канали. Особливо цікавим є випадок з бездротовими мережами де зв'язки викликають розповсюдження пакунків імовірнісним чином і немає причин обмежувати потік інформації певним шляхом, як у дротових мережах Швидше, кожен вузол у мережі буде діяти як ретранслятор, кодуючи пакети, які він отримує, і надсилаючи ці кодовані пакети довільним чином. Тобто бездротова мережа може розглядатися як *Ad-hoc* мережа. В результаті чого стає питання не просто про те, яким маршрутом мають слідувати пакунки, а скоріше, про те, скільки пакунків вузли мають надіслати та що ці пакунки мають містити.

Далі буде розглянуто проблему встановлення ефективних одноадресних з'єднань через кодовані бездротові пакетні мережі. Однак перш ніж продовжити, варто виизначити чи є таке кодування ефективним.

Порівняння різних підходів до одноадресної передачі. Щоб відповісти на питання про те, наскільки вигідно використовувати кодування, було проведено просте моделювання різних підходів до бездротової одноадресної передачі [13]. Моделювалися бездротові мережі, в яких вузли були розміщені випадковим чином з рівномірним розподілом в квадратній

області. Розмір квадрату було встановлено для досягнення одиничної щільності вузлів. Було розглянуто мережу, в якій трансляція була схильна до загасання на відстані із завмиранням Релея. Таким чином, коли вузол передає, то відношення сигнал/шум (SNR) сигналу, отриманого у вузлі j , дорівнює $\gamma d(i, j)^{-\alpha}$, де γ – експоненціально розподілена випадкова величина з одиничним середнім, $d(i, j)$ – відстань між вузлом i та вузлом j , а α – параметр загасання, який прийнятий рівним 2.

Було припущено, що пакунок переданий вузлом вважається успішно отриманим вузлом j , за умови, коли прийняте SNR перевищує β , тобто.

$$\gamma d(i, j)^{-\alpha} \geq \beta,$$

де β – це поріг, який був прийнятий на рівні 1/4. Якщо пакунок не отримано, він повністю втрачається.

Представлено п'ять різних підходів до бездротової одноадресної передачі; а саме, підходи I–III які не використовують мережеве кодування та підходи IV і V, що таке кодування використовують:

I) Повторна передача з кінця в кінець: шлях вибирається від джерела до приймача, і пакети підтверджуються приймачем або вузлом призначення. Якщо підтвердження пакунку не отримано джерелом, пакунок передається повторно. Це означає ситуацію, коли надійність забезпечується схемою ретрансляції на транспортному рівні, наприклад, протоколом керування транспортом (TCP), а на каналному рівні механізм надійності відсутній.

II) Наскрізне кодування: шлях вибирається від джерела до приймача, і для виправлення пакунків, втрачених між джерелом і приймачем, використовується код наскрізного прямого виправлення помилок (FEC).

III) Повторна передача за посиленням: шлях вибирається від джерела до приймача, і для запиту повторної передачі пакунків, втрачених на кожному каналі зв'язку, використовується запит на автоматичне повторення (ARQ). Таким чином, на кожному каналі зв'язку пакунки

підтверджуються одержувачем, і, якщо підтвердження проходження пакунку відправником не отримано, то пакунок передається повторно.

IV) Кодування шляху: шлях вибирається від джерела до приймача, і сам вузол на шляху використовує кодування для виправлення втрачених пакунків. Найпростіший спосіб зробити це полягає в тому, щоб кожен вузол використовував один із кодів FEC для наскрізного кодування, декодування та повторного кодування пакунків, які він отримує.

V) Повне кодування: у цьому випадку шляхи не розглядаються взагалі. Вибирається підграф, який визначає частоту, з якою кожен вузол передає пакети, і використовується схема випадкового лінійного кодування з [14–16]. Це являє собою кінцеву межу досяжності за умови, що нам заборонено змінювати дизайн фізичного рівня.

У всіх випадках, що потребують підтвердження, ці підтвердження можуть втрачатися так само, як і пакунки, що йдуть тим самим шляхом.

Середня кількість передач, необхідних для одного пакунку з використанням різних підходів у випадкових мережах різного розміру, показана на рис. 1. Ми бачимо, що хоча наскрізне кодування та повторна передача за посиленням вже дають суттєве покращення відносно наскрізної повторної передачі, але підходи з використанням мережевого кодування є ще більш ефективними.

При збільшенні розміру мережі до, скажімо, дев'яти вузлів повне кодування покращує повторну передачу за посиленням вже у два рази. Крім того, у міру зростання мережі продуктивність різних схем відрізняється. Мається на увазі продуктивність з точки зору кількості передач, необхідних для кожного пакунку.

В деяких випадках, при перевантаженні, наприклад, показник продуктивності зростає суперлінійно і підвищення може бути навіть більшим, ніж показано на рис.1. У будь-якому випадку очевидно, що використання мережевого кодування

обіцяє значні покращення, особливо для великих мереж. Враховуючи потенційні переваги мережевого кодування, слід описати шлях як того можна досягти на основі моделі бездротових мереж.

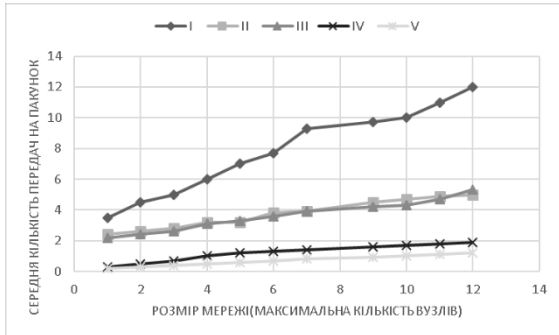


Рис. 1. Середня кількість передач, необхідних для одного пакунок у випадкових мережах різного розміру.

Модель бездротової Ad-hoc мережі.

Розглянемо модель мережі таку, що побудована за допомогою орієнтованого гіперграфа $H = (N, A)$, де N – множина вузлів, а A – множина гіпердуг. Гіперграф – це узагальнення графа, де замість дуг ми маємо гіпердуги. Гіпердуга – це пара (i, J) , де i , початковий вузол, є елементом N , а J , набір кінцевих вузлів, є непорожньою підмножиною N .

Кожна гіпердуга (i, J) представляє бездротове ширококомове з'єднання від вузла i до вузлів у непорожній множині J . Нехай A_{ijk} процес підрахунку, що описує надходження пакетів, які вводяться на гіпердугу (i, J) і приймаються точно набором вузлів $K \subset J$, тобто для $\tau \geq 0$, $A_{ijk}(\tau)$ – це загальна кількість пакетів, які вкидаються на гіпердугу (i, J) та отримані всіма вузлами в K (і жодними вузлами в $N \setminus K$) між часом 0 і часом τ . Наприклад, припустимо, що три пакети введено в гіпердугу $(1, \{2, 3\})$ між часом 0 і часом 1 і що з цих трьох пакетів один отримано лише вузлом 2, один повністю втрачено, а один отримано обома вузлами 2 і 3; тоді маємо $A_{1(23)0}(1) = 1$, $A_{1(23)2}(1) = 1$, $A_{1(23)3}(1) = 1$, і $A_{1(23)(23)}(1) = 1$. При цьому припускається, що A_{ijk} має середню швидкість z_{ijk} ; точніше,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_{ijk}(\tau)}{\tau} = z_{ijk}$$

майже напевно.

Нехай $z_{ijk} = \sum_{K \subset J} z_{ijk}$ буде середньою швидкістю, з якою пакети вводяться в гіпердугу (i, J) . Вектор швидкості z , що складається z_{ij} , $(i, J) \in A$, є підграфом кодування для цільового з'єднання, і його можна змінювати в межах набору обмежень Z , продиктованого нижчими рівнями. Можна припустити, що Z є опуклою підмножиною додатного ортанта, що містить початок координат. Ми пов'яжемо з мережею функцію вартості f , яка відображає можливі підграфи кодування на дійсні числа, і яку ми прагнемо мінімізувати. Для бездротових мереж зазвичай функція витрат відображає споживання енергії, але вона також може представляти, наприклад, середню затримку, грошову вартість або комбінацію цих критеріїв.

При цьому слід також розглянути проблеми визначення кількості пакунків, які вузли повинні надіслати і того, що ці пакунки повинні містити. Проблема визначення кількості пакунків, які можуть бути надіслані, зводиться до знаходження підграфу кодування мінімальної вартості що допускає бажане підключення. Для вирішення другої проблеми може бути використана схема так званого розподіленого випадкового мережевого кодування, яка визначається для будь-якого визначеного підграфа і описана в [17].

Висновки

Застосування методів пакуноквого кодування для мереж з втратами даних, якими по суті є Ad-hoc мережі, не тільки можлива, але й корисна з точки зору підвищення надійності та ефективності передачі даних. Методи пакетного кодування, такі як пакетні розріджені коди (BATS), спеціально розроблені для вирішення проблем, пов'язаних із мережами з втратами даних. У мережах із втратою даних кількість втрачених пакетів може змінюватися випадковим чином, що робить неоптимальним перекодування та передачу однакової кількості пакетів для всіх пакунків. Було розглянуто адаптивні стратегії перекодування які здатні регулювати кількість перекодованих пакетів на основі

спостережуваних умов мережі. Ці стратегії спрямовані на оптимізацію пропускну здатності та мінімізацію затримки декодування шляхом динамічного пристосування до поточного стану мережі.

В цілому методи пакетного кодування, зокрема коди *BATS*, з адаптивними стратегіями перекодування, добре підходять для реалізації в мережах із втратами. Вони пропонують значні переваги щодо пропускну здатності, затримки декодування та масштабованості, ефективно вирішуючи проблеми, пов'язані з втратою пакетів у таких середовищах. Але відповідь на питання про те, як ці методи працюють на практиці, потребує додаткової імплементації.

Література

1. Ahlswede R. et al, Network information flow. *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2000. Vol. 46, no. 4. P. 1204–1216.
2. Пількевич І. А., Бойченко О. С., Гуменюк І.В. Метод децентралізованого управління мережевими ресурсами інформаційно-комунікаційних мереж. *Технічна інженерія*. 2019. Vol. 2(84). P. 100–108. DOI: 10.26642/ten-2019-2(84)-100-108.
3. Shu Z. et al. Traffic engineering in software-defined networking: Measurement and management. *Access IEEE*. 2016. Vol. 4. P. 3246–3256.
4. Ho T., Lun D. Network Coding: An Introduction. New York : Cambridge University Press, 2008. 184 p.
5. Mahdavian K. et al. Gamma codes: A low-overhead linear-complexity network coding solution. *2012 International Symposium on Network Coding (NetCod)* : proceedings, Cambridge, MA, USA, 29–30 June 2012 / IEEE. 2012. P. 125–130. DOI: 10.1109/NETCOD.2012.6261896.
6. Tang B., Yang S. An LDPC approach for chunked network codes. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2018. Vol. 26, no. 1. P. 605–617.
7. Yang S., Yeung R. W. Batched sparse codes. *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2014. Vol. 60, no. 9. P. 5322–5346.
8. Yin H. H. F. Packet Aggregation May Harm Batched Network Coding. arXiv:2409.20501. 2024. 6 p.
9. Ahlswede R. et al. Network information flow. *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2000. Vol. 46, no. 4. P. 1204–1216.
10. Li S.-Y. R., Yeung R. W., Cai N. Linear network coding. *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2003. Vol. 49, no. 2. P. 371–381.
11. Ho T. et al. A random linear network coding approach to multicast. *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2006. Vol. 52, no. 10. P. 4413–4430.
12. Sachin K. et al. The Importance of Being Opportunistic: Practical Network Coding For Wireless Environments. 2005. 10 p.
13. Lun D. S., Medard M., Koetter R. Network Coding for Efficient Wireless Unicast. *2006 International Zurich Seminar on Communications* : proceedings, Zurich, Switzerland, 22–24 February 2006 / IEEE. 2006. P. 74–77. DOI: 10.1109/IZS.2006.1649082.
14. Lun D. S. et al. On coding for reliable communication over packet networks. arXiv:cs/0510070. 2007. 33 p.
15. Lun D. S. et al. Further results on coding for reliable communication over packet networks. *International Symposium on Information Theory, 2005. ISIT 2005.* : proceedings, Adelaide, SA, Australia, 04–09 September 2005 / IEEE. 2005. P. 1848–1852. DOI: 10.1109/ISIT.2005.1523665.
16. Lun D. S., Medard M., Effros M. On coding for reliable communication over packet networks. *42nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing* : proceedings, Monticello, IL, USA, 29 September–1 October 2004 / IEEE. 2004. Vol. 1. P. 20–29.
17. Lun D. S. et al. Network coding with a cost criterion. *International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2004* : proceedings, Parma, Italy, 10–13 October 2004 / IEEE. 2004. P. 1232–1237.

Телешко І.В., Лукашенко В.В.

КОДУВАННЯ ТРАФІКУ МЕРЕЖ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

На підставі аналізу відомих підходів до кодування мережного трафіку бездротових мереж передачі даних зроблено спробу обґрунтування можливості та доцільності застосування мережного кодування в мережах спеціального призначення (Ad-hoc мережах). При цьому були розглянуті особливості реалізації деяких алгоритмів кодування з точки зору обмежень, обумовлених середовищем мереж з втратою даних. Показано, що впровадження методів пакункового кодування у мережах з втратами даних, якими по суті є Ad-hoc мережі, не тільки можливо, але й корисно з точки зору підвищення надійності та ефективності передачі даних, але, відповідь на питання про те, як ці методи працюють на практиці, потребує додаткової імплементації.

Ключові слова: мережі спеціального призначення; мережеві протоколи; технології бездротового зв'язку; кодування пакетів; передача даних.

Teleshko I.V., Lukashenko V.V.

PACKAGE CODING INTO AD-HOC NETWORKS

Based on the analysis of known approaches to coding network traffic in wireless data networks, an attempt has been made to substantiate the possibility and feasibility of using network coding in special-purpose networks (Ad-hoc networks). At the same time, the features of the implementation of some coding algorithms were considered from the point of view of the limitations caused by the environment of lossy networks. It has been shown that the implementation of packet coding methods in lossy networks, which are essentially Ad-hoc networks, is not only possible, but also useful in terms of increasing the reliability and efficiency of data transmission, but the answer to the question of how these methods work in practice requires additional implementation.

Keywords: ad-hoc networks; network protocols; wireless communication technologies; packet encoding; data transmission.