

А. І. МІНОЧКІН, В. А. РОМАНЮК, О. Я. СОВА

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ TCP-ПРОТОКОЛІВ У МЕРЕЖАХ MANET

Постійне підвищення вимог до якості передавання різних типів трафіку в мережах MANET, зокрема коли йдеться про використання прикладних програм реального часу, потребує гарантування ресурсів мережі. Якість обслуговування для таких програм у мобільних мережах передбачає забезпечення необхідних параметрів каналу та механізмів доступу до каналу передавання з гарантією QoS наявності надійних транзитних вузлів із потужними методами запобігання перевантаженням і втратам повідомлень у мережі.

Мета статті — проаналізувати здатність використовуваних у проводових мережах протоколів управління навантаженням виконувати свої функції для гарантування надійного передавання в мережах MANET.

Як відомо, згідно з багаторівневою моделлю OSI завдання боротьби з перевантаженнями покладено на транспортний рівень [2]. У мережі Інтернет на цьому рівні функціонують здебільшого два протоколи — TCP та UDP. Одні прикладні програми (такі як потокові аудіо- та відеодані, програми реального часу) використовують для передавання своїх пакетів UDP, а решта (передавання даних, FTP) — TCP. Протокол UDP працює без встановлення з'єднання і не дає жодних гарантій щодо надійного доставляння інформації, тобто управляти якістю обслуговування в ньому немає жодної змоги. Протокол TCP виконує впорядковане доставляння та надійне передавання даних за допомогою механізму повторного передавання [3].

Стандартний TCP передбачає, що будь-яка втрата пакетів відбувається в результаті перевантаження мережі, унаслідок чого скорочується швидкість передавання відправника. Проте в мобільних радіомережах (MR) втрати пакетів можливі не тільки в результаті перевантаження мережі, а й через велику кількість помилок у безпроводовому каналі передавання, що змушує протокол TCP до зайвих повторних передавань пакетів. Окрім того, розриви каналу зв'язку, зумовлені мобільністю абонентів, призводять до тривалих простоїв протоколу TCP з огляду на присутній у ньому експоненціальний механізм затримки [4].

З метою підвищення продуктивності протоколу TCP та його адаптації до динамічного середовища мереж MANET розроблено багато методів управління навантаженням, які різняться обсягом управляючого впливу, параметром, узятим за метрику контролю навантаження, та функціонуванням на рівнях моделі OSI (рис. 1).

Використання зазначених методів управління навантаженням можливе з упровадженням відповідної системи управління мобільною мережею, одним з елементів якої є підсистема управління навантаженням [5], котру буде реалізовано згідно зі схемою, наведеною на рис. 2.

Нині існує багато протоколів управління навантаженням у телекомунікаційних мережах, які різняться місцем функціонування та властивостями. Зазначені протоколи можна класифікувати за такими ознаками (рис. 3):



Рис. 1. Класифікація методів управління навантаженням у MANET



Рис. 2. Схема підсистеми управління навантаженням у складі системи управління мережею



Рис. 3. Класифікація протоколів управління навантаженням

♦ **типом** — **активні** (запобігають виникненню перевантажень), **реактивні** (містять механізми боротьби з перевантаженнями після їх виявлення);

♦ **кількістю підтримуваних швидкостей передавання** — **багатшвидкісні** (з можливістю переходу на нижчі швидкості передавання в разі виявлення перевантаження), **одношвидкісні** (без можливості переходу на інші швидкості);

♦ **присутністю зворотного зв'язку (ЗЗ)** — з **явним зворотним зв'язком** (маршрутизатор явно інформує джерело навантаження про стан мережі), з **неявним зворотним зв'язком** (відправник інформується про перевантаження через приймач, а отже, вони обидва відповідальні за визначення стану мережі. Реалізований в Leaky Bucket та Token Bucket) [2; 3];

♦ **типом потоків даних** — **управління зовнішніми потоками** (потоки даних, які проходять через вузол, використовуючи його як комутатор), **управ-**

ління внутрішніми потоками (потоки даних, які надходять чи виходять з кінцевого вузла);

♦ **кількістю маршрутів** — **одномаршрутні** (дані передаються одним маршрутом), **багатмаршрутні** (кількома різними маршрутами);

♦ **функціонуванням на рівні моделі OSI** — **одно-, багаторівневі (міжрівневі)**;

♦ **наявністю пріоритету обслуговування** — **без пріоритету, із пріоритетом**;

♦ **місцем управління** — **мережні, із кінця в кінець** [6];

♦ **класом апаратних засобів** — **використовуються в кінцевому обладнанні, у маршрутизаторах.**

Зауважимо, що з огляду на різні умови функціонування провідних та безпроводних мереж застосовувати одні й ті самі протоколи управління навантаженням у цих мережах неможливо. Тому спочатку доцільно розглянути наявні протоколи,

Аналіз відомих методів (протоколів) управління навантаженням на транспортному рівні моделі OSI

Мережі	Протокол управління навантаженням	Методи управління навантаженням	Управляючий параметр	Характеристики згідно з класифікацією
Проводові	TCP	Повільний старт. Go-Back-N (ковзаюче вікно). Leaky Bucket. Token Bucket	Вікно перевантаження	Реактивні. Із кінця в кінець. Багатошвидкісні. Однорівневі. З явним зворотним зв'язком. Використовуються в кінцевому обладнанні
	SACK TCP	Повільний старт. Selective Repeat. (вибіркове повторне передавання)		
	TCP Tahoe	Повільний старт. Швидке повторне передавання		
	TCP Reno	Повільний старт. Швидке повторне передавання. Швидке відновлення. Запобігання перевантаженням		
	TCP Vegas	Вимірювання RTT. Повільний старт	Час кругообігу пакета (RTT). Вікно перевантаження	Активний. Із кінця в кінець. Багатошвидкісний. Використовується в кінцевому обладнанні
Безпроводові з централізованим управлінням	Непрямий TCP	Сегментація з'єднання на проводову та безпроводову частини мережі	У проводовій частині мережі – вікно перевантаження.	Реактивні. Міжаузлові. Багатошвидкісні. Використовуються в кінцевому обладнанні та в точках доступу до проводової мережі
	TCP із підслуховуванням	Буферизація даних із метою здійснення швидкого повторного передавання	У безпроводовій частині мережі — відповідний параметр протоколу, який використовується на безпроводовій ділянці	
	Мобільний TCP	Контроль переданих пакетів та прийнятих ACK для підтримки з'єднання в разі тривалої відсутності зв'язку з мобільним абонентом		
Безпроводові з децентралізованим управлінням (MANET)	C ³ TCP	Вимірювання смуги частот та часу затримки пакетів (у співпраці з каналним рівнем мережі) за допомогою додаткового модуля управління навантаженням	Ширина смуги частот. Час затримки пакетів	Міжрівневий. Із кінця в кінець. Використовується в кінцевому обладнанні
	C ³ Reno-2	Управління потужністю передавання на фізичному рівні для запобігання перевантаженням, тоді як на транспортному рівні використовується протокол Reno-2 із віконним механізмом управління навантаженням	Потужність передавача. Вікно перевантаження	Міжрівневий. Використовується в кінцевому обладнанні
	TCP-MEDX	Енергоефективний метод, який використовує вимірювання часу затримки передавання та зміну затримки передавання для виявлення причини втрати пакетів у мережі	Час затримки передавання. Зміна затримки передавання	Реактивний. Із кінця в кінець. Використовується в кінцевому обладнанні. Міжрівневий
	TSR	Використання протоколів маршрутизації для запобігання втраті пакетів та скорочення кількості повторних передавань	Маршрутна таблиця. Час кругообігу пакета (RTT)	Міжрівневий. Використовується в кінцевому обладнанні. Реактивний
	F-TCP	Схема зі зворотним зв'язком	Вікно перевантаження	Однорівневий. Реактивний. Із кінця в кінець. Використовується в кінцевому обладнанні
	Fuzzy-RED	Використання апарату нечіткої логіки для обчислення порогів перевантаження	Черга повідомлень	Однорівневий. Активний. Використовується в кінцевому обладнанні

використовувані в проводових мережах, щоб визначити ті проблемні питання (починаючи від відмінності в поведінці абонентів і закінчуючи архітектурою мережі та принципами її функціонування, які визначаються механізмами фізичного, каналного, мережного та транспортного рівнів), через які ці протоколи в їх безпосередньому виконанні не можна використати в безпроводових мережах.

Протокол TCP розроблявся для використання в проводових мережах. З упровадженням і розвитком безпроводових мереж зв'язку постала необхідність модернізувати цей протокол з урахуванням особливостей, притаманних радіомережам, а згодом — адаптувати протокол TCP до роботи в мережах MANET, які являють собою динамічну самоорганізовану архітектуру. Тому з урахуванням наведеної раніше класифікації проаналізуємо відомі методи управління навантаженням на транспортному рівні моделі OSI та розглянемо можливість застосування деяких із них у МР (див. таблицю).

Схема управління навантаженням, запропонована у протоколі TCP [2; 3; 7], є надійною та ефективною в разі використання в проводових мережах зв'язку. Але вона не спрацьовує у безпроводових мережах, в яких пакети втрачаються і/або затримуються не лише через перевантаження в мережі, а й через часті зміни параметрів самої мережі та безпроводового середовища передавання інформації. Втрата пакетів даних у МР відбувається здебільшого за рахунок мобільності абонентів мережі, що, у свою чергу, призводить до обриву ланок між абонентами, до зміни маршруту передавання та повторного передавання пакетів. Основне джерело проблем для всіх протоколів (у разі їх використання в MANET) — велика кількість помилок у каналі ($10^{-3} \dots 10^{-1}$ для MANET порівняно з $10^{-8} \dots 10^{-6}$ для проводових мереж), обмежена ширина смуги пропускання, затримки при доступі до каналу [8].

Окрім того, ємність безпроводових каналів не є постійною і залежить від інтерференції сигналів та рівня шуму в каналі. Тому транспортні протоколи, спроектовані для проводових мереж, не можна вважати придатними для MANET у їх безпосередньому виконанні. Їхня непридатність пояснюється тим, що ці протоколи як параметр для виявлення перевантаження використовують втрату пакетів

і не можуть відрізнити втрату від помилок у каналі передавання.

Упродовж останніх років потужні зусилля дослідників було спрямовано на адаптацію TCP для роботи в мережах MANET. Основні напрямки модифікації алгоритму управління навантаженням у TCP є сенс класифікувати в такий спосіб (рис. 4):

◆ *TCP-модифікації* — заміна транспортного протоколу версіями, які враховують різні характеристики безпроводових мереж та нові методи обчислення (TCP Vegas, TCP MEDX, Fuzzy RED).

◆ *Модифікації з явним зворотним зв'язком* — протоколи цієї групи використовують різні техніки зворотного зв'язку, покладаються на доступне буферне середовище проміжних вузлів, що змушує їх бути більш залежними від розміру доступної пам'яті, ніж від ємності каналів (TSR, TCP-F).

◆ *Вимірювання параметрів нижніх рівнів* — дані протоколи збирають інформацію про весь маршрут передавання даних та про тривалість з'єднання. Проте це вимагає додаткового трафіку, який використовуватиме і без того обмежені ресурси мережі (C³Reno-2, C³TCP).

Розглянемо ці модифікації протоколу TCP.

TCP Vegas — протокол, що надає кілька нових механізмів для TCP, включаючи активний механізм уникнення перевантаження, що зберігає початкову парадигму протоколу TCP (AIMD, адитивне зростання/мультиплікативне зменшення). Замість того щоб збільшувати швидкість передавання до моменту, коли виникне втрата пакета, TCP Vegas намагається запобігти схожим втратам, зменшуючи швидкість передавання в момент, коли протокол «відчуває» початок навантаження, навіть якщо немає явної втрати пакетів. Це досягається наявністю нового механізму передавання, який містить два лічильники тайм-аутів: перший — для грубого вимірювання часу передавання (RTO), за аналогією до TCP Reno, другий — для точного вимірювання RTO. Вимірювання проводиться для кожного переданого сегмента зчитуванням значень системного часу при відправленні пакета і при поверненні АСК від приймача. Передбачення втрати сегмента відбувається на базі статистики зміни значення RTT — чим вище це значення, тим більше навантаження на маршруті до приймача [9].

TCP-MEDX (Mobile Error Detection eXtension) — розширення протоколу TCP з можливістю вияв-



Рис. 4. Напрямки модифікації протоколу TCP для мереж MANET

лення помилок, характерних для безпроводових мереж. До основних характеристик цього протоколу належать, *по-перше*, енергоефективність (починає працювати тільки після виявлення втрати пакетів і завдяки цьому заощаджує обмежений енергоресурс кінцевого обладнання) і, *по-друге*, здатність усувати негативний ефект, спричинений асиметричністю безпроводових ланок, підвищуючи точність виявлення випадків втрати помилок.

У протоколі використовуються два параметри для виявлення перевантаження:

- ◆ затримка передавання;
- ◆ зміна затримки передавання.

TCP-MEDX приймає рішення про те, що мережа перебуває у стані перевантаження, якщо виконуються дві умови:

1) поточна затримка передавання значно перевищує поріг, що дорівнює $\beta\bar{P}$, де \bar{P} — середній час затримки передавання, а β — стала, що визначається певною прикладною програмою;

2) затримка передавання і далі зростає впродовж певної кількості пакетів.

Коли виявлено втрату пакетів, TCP-MEDX ініціює зазначені критерії для прийняття рішення щодо наявності перевантаження. Якщо в мережі присутнє перевантаження, вікно перевантаження зменшується вдвічі. В іншому разі TCP-MEDX приймає рішення, що пакети було втрачено через помилки передавання, і не змінює розмір вікна перевантаження [10].

TSR (TCP-aware Source Routing). Розробники цього протоколу вважають, що більшість випадків перевантаження в мережах MANET відбуваються через тривалі тайм-аути, повторне передавання та неправильну послідовність пакетів на прийомі, тобто з причин, зумовлених неточностями маршрутизації пакетів у мережі та вибором хибного шляху при відновленні втраченого з'єднання.

Протокол TSR було розроблено на основі протоколу маршрутизації DSR (Data Set Ready — сигнал готовності до передавання даних), який для визначення маршруту передавання пакетів використовує службові повідомлення такого змісту: ROUTE-REQUEST — запит маршруту; ROUTE-REPLY — підтвердження існування маршруту; ROUTE-ERROR — для вилучення неіснуючого маршруту з маршрутної таблиці. У процесі розробки протоколу TSR було введено два додаткові повідомлення: ROUTE-PROBE — для виявлення нових можливих маршрутів передавання в разі втрати з'єднання; REPLY-PROBE — для підтвердження існування нових маршрутів.

У випадку переривання маршруту протокол переходить у стан утримання і відправник припиняє передавання пакетів у мережу доти, доки не буде знайдено нового маршруту. Коли приймач отримує повідомлення REPLY-PROBE, він виходить зі стану утримання і приступає до вибору

маршруту, здійснюваного обчисленням найменшого значення RTT в даний момент часу [11].

TCP-F (feedback). Протокол зі зворотним зв'язком, в якому передавач TCP може відрізнити втрату пакетів через перевантаження мережі від втрати пакетів унаслідок помилок у каналі передавання за допомогою повідомлення про відсутність маршруту передавання (RFN), яке надходить від проміжних вузлів. Ідея протоколу полягає у встановленні TCP у «сплячий стан» після прийому повідомлення RFN (Route Failure Notification — повідомлення про помилку маршруту). У цьому стані TCP припиняє передавання пакетів і «заморожує» таймер передавання та розмір вікна перевантаження. Після прийому повідомлення RRN (Route Re-establishment Notification — повідомлення про відновлення маршруту) про наявність необхідного маршруту передавач виходить зі сплячого стану і продовжує передавання з тими самими параметрами, які були до розриву маршруту.

Продуктивність протоколу TCP-F вища за продуктивність стандартного TCP, особливо в умовах, де затримка при відновленні маршруту дуже значна. Цей підхід виправданий для мереж з високими швидкостями передавання [11].

Міжрівневий протокол управління навантаженням для TCP (C^3 TCP). Приклад TCP-з'єднання через 3-пролітну безпроводову мережу наведено на рис. 5. Передавальний вузол N_1 ініціює передавання, відправляючи TCP-дані до вузла N_4 через послідовну топологію. На прийомі пакетів із даними TCP каналний рівень вузла вимірює затримку і ширину смуги пропускання для ланки L_1 . Далі він включає інформацію про вимірювання в спеціальне додаткове поле, що міститься в заголовку MAC. Вузол N_2 , отримавши пакети даних від вузла N_1 , виконує аналогічне вимірювання для ланки L_2 і т. д. Інформація про ширину смуги пропускання оновлюється і заноситься до заголовку MAC. Розміри затримки, що виникла на ланках L_1 , L_2 та L_3 , додаються.

Далі TCP-приймач вузла N_4 відправляє передавачеві підтвердження ACK, яке свідчить про успішний прийом пакетів. Це підтвердження також містить заголовки каналного та фізичного рівнів, які несуть отриману вузлом N_4 під час прийому пакетів інформацію про ширину смуги пропускання та затримку.

Після прийому пакета з TCP ACK вузол-відправник N_1 має інформацію про затримку і ширину смуги пропускання як переданих, так і прийнятих пакетів, а отже, може регулювати вихідний трафік [8].

C^3 Reno-2 (Cross Layer Congestion Control Algorithm in TCP Reno-2). Цей протокол передбачає спільне управління навантаженням на фізичному рівні за допомогою потужності передавача, а на транспортному рівні — із використанням

протоколу Reno-2 (віконне управління потоком даних).

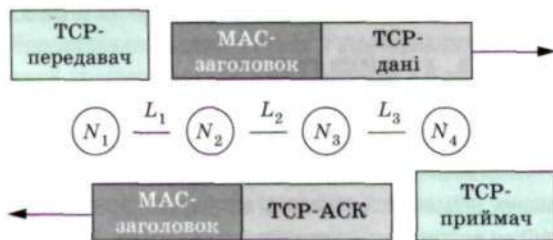


Рис. 5. Використання C³TCP у безпроводовій мережі з трьома ланками

Ємність безпроводових каналів у мережах MANET не є сталою величиною і залежить від відношення сигнал/шум, яке, у свою чергу, визначається потужністю передавача. Проте, як показали дослідження цього протоколу, його ефективність виявляється тільки за низької потужності передавача, а зі збільшенням потужності кількість втрачених пакетів значно зростає, що унеможливає застосування цього методу за цих умов [12].

Fuzzy-RED (Random Early Detection) — адаптація протоколу RED, найпоширенішого в мережах із централізованим управлінням, із пристосуванням до динамічних умов безпроводового середовища [13]. У ньому управління навантаженням відбувається зміною розміру черги, для чого застосовується апарат нечіткої логіки. У Fuzzy-RED, на відміну від звичайного RED, фіксовані значення порогів черги замінені на динамічні, які залежать від стану мережі в певний момент часу і обчислюються з використанням нечітких логічних висловлювань, здобутих з експертної бази знань.

Проте взяття як метрики для управління навантаженням у мережі тільки одного параметра (розмір черги та швидкість її зміни) без урахування інших параметрів мереж MANET призводить до неточного оцінювання поточної ситуації в мережі та неповного використання можливостей апарата нечіткої логіки.

* * *

Одне з основних питань, які необхідно розв'язати при створенні системи управління якістю обслуговування в мережах MANET, стосується розробки ефективного методу управління навантаженням. Але на відміну від проводових мереж передавання даних, де перевантаження може відбуватися передусім через локальні перевантаження на окремих вузлах мережі, у безпроводових мережах існує багато причин втрати пакетів, через які стандартний протокол транспортного рівня TCP втрачає свою ефективність [8].

Як впливає з проведеного аналізу, сьогодні існує багато пропозицій стосовно адаптації протоколу TCP до мобільних мереж, які, утім, ураховують лише окремі особливості безпроводового середовища (C³TCP, TCP-MEDX, Fuzzy-RED) [8; 10; 13]

або потребують суттєвої модернізації мережного обладнання, яке успішно застосовується нині (TCP Vegas) [9]. Тому для ефективного управління навантаженням пропонується створення багатопараметричної моделі, в якій у ролі параметрів управління навантаженням використовується не тільки розмір черги, а й швидкість передавання за наявності вільного маршруту. Як математичну основу запропонованої моделі буде використано нечітку логіку.

Нечітку логіку вибрано з тих міркувань, що вона є потужним інструментом при управлінні складними процесами та нелінійними системами, створити математичну модель яких дуже складно або й неможливо. Усі ці складності сприяли розвитку альтернативного моделювання і методів управління, які спираються на нечітку логіку, котра має, зокрема такі переваги:

- ◆ здатність до швидкого відтворення управляючої структури системи із залученням попереднього досвіду;
- ◆ меншу залежність від наявності точних математичних моделей;
- ◆ легке оперування нелінійними змінними, а також мультиплікативними вхідними сигналами.

Метою подальших досліджень буде розроблення математичної моделі управління навантаженням на основі нечіткої логіки, яка враховуватиме такі параметри управління навантаженням, як розмір черги, швидкість передавання пакетів та інформацію про наявність вільного маршруту необхідної якості.

Література

1. Романюк В. А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62–68.
2. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
3. Шиллер Й. Мобильные коммуникации: Пер. с англ. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2002. – 384 с.
4. Monaparta P., Li J., Gui C. QoS in Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Wireless Communication, June 2003. – P. 44–52.
5. Минович А. И., Романюк В. А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № 7. – С. 54–58.
6. G. Holland and N. Vaidya. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks // Mobicom'99, August 1999.
7. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с.
8. D. Kliazovich, F. Granelli, Cross-Layer Congestion Control in Ad Hoc Wireless Networks // Ad Hoc Networks Journal. – 2006. – Vol. 4, no. 6. – P. 678–708.
9. S. Papanastasiou, M. Ould-Khaoua. Exploring the performance of TCP Vegas in Mobile Ad hoc Networks // International Journal of Communication Systems. – March 2004. – Vol. 17. – Issue 2. – P. 163–177.
10. Chaoyue X., Jaegeol Y., Jason L. and Tadao M. Energy-Efficient Method to Improve TCP Performance for MANETs // In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, 2004.
11. Choi J.H., Yoo S.H. and Yoo C. An Enhancement Scheme for TCP over Mobile Ad Hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM'03, 2003.
12. Rath H.K., Sahoo A., Karandikar A. A Cross Layer Congestion Control Algorithm in Wireless Networks for TCP Reno-2 // IEEE Wireless Communications, August 2005.
13. L. Rossides, C. Chrysostomou, A. Pitsillides, A. Sekercioglu. Overview of Fuzzy-RED in Diff-Serv Networks // In Proceedings of the Soft-Ware 2002 Conference. April 2002, Belfast, Northern Ireland.