

УДК 621.391.8

О. І. ГОЛУБЕНКО, ст. викладач;

Я. О. ОСАДЧИЙ, студент;

Д. О. ОВДІЙ, студент;

П. К. КОЗИЦЬКИЙ, студент;

Д. В. СУМЦОВ, студент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАЛАНСУВАННЯ ТРАФІКУ В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОТОКОЛУ МРТСП

Проведено аналіз результатів імітаційних експериментів, що дозволив подати КЕП у вигляді аналітичних залежностей, які не враховують усіх особливостей імітаційної моделі, але дають змогу оцінити зверху як імітаційну модель, так і реальну систему.

**Ключові слова:** коефіцієнт ефективності передавання; протокол МРТСП; імітаційні моделі; трафік,

### Вступ

Наявність у таких сучасних портативних електронних пристроях, як ноутбуки, планшети і смартфони кількох мережних інтерфейсів, безпроводових або проводових, відкриває теоретичну можливість спільного їх використання для збільшення пропускної здатності каналів зв'язку та підвищення якості сервісів. Для агрегації безпроводових інтерфейсів оператори зв'язку спільно з виробниками мережного устаткування розробляють стандарти і специфікації. Проте це досить затратний і тривалий процес, тому масове використання таких технологій можливе не в найближчому майбутньому. Досягти цього можна, використовуючи технології багатоканальної маршрутизації.

### Основна частина

Для поліпшення якості обслуговування та вирішення зазначених завдань оператори вдаються до використання протоколу МРТСП (*Multipath TCP*). У TCP/IP ми встановлюємо з'єднання з певною IP-адресою, після чого обмінюємося пакетами тільки з цією адресою. Розробники нового розширення для протоколу Multipath TCP (RFC 6824) пропонують зняти це історичне обмеження. На їхню думку, використання багатоканальної (*multipath*) модифікації TCP спростить використання цього протоколу в багатьох прикладних задачах, таких як прозоре перенаправлення трафіку з одного пристрою на інший і балансування навантаження.

З'єднання багатомаршрутного TCP забезпечує двосторонній байтовий обмін між двома комп'ютерами, що взаємодіють один із одним у рамках традиційного протоколу TCP, і, таким чином, не потрібно будь-яких змін у додатках. Однак багатомаршрутний TCP дозволяє комп'ютерам використовувати різні маршрути з різними IP-адресами для обміну пакетами, що належать МРТСП-з'єднанню. З'єднання МРТСП сприйма-

ється додатком як звичайне TCP-з'єднання. Проте на мережному рівні кожний субпотік МРТСП виглядає як регулярний TCP-потік, сегменти якого несуть в собі нові типи TCP-опцій. *Субпотік* — це потік TCP-сегментів, переданих за індивідуальним маршрутом, який становить частину МРТСП-з'єднання. Субпотік запускається і переривається так само, як і звичайне TCP-з'єднання. МРТСП управляє створенням, видаленням і використанням цих субпотоків для передавання інформації. Кількість субпотоків, якими управляє з'єднання МРТСП, не визначена і може змінюватися в період існування МРТСП-з'єднання.

Розглянемо дослідження ефективності протоколу МРТСП на основі імітаційного моделювання з метою скорочення часу проведення необхідних експериментів замість використання реальних мереж або імітаційних моделей зі стеком протоколів, яке можна порівняти з реальною мережею.

Об'єктом дослідження є протокол транспортного рівня МРТСП. Предметом дослідження є ефективність балансування трафіку при використанні багатоканальної маршрутизації. Метою дослідження є аналіз ефективності балансування трафіку за допомогою протоколу МРТСП.

Використовувані методи дослідження включають у себе імітаційне моделювання, методи математичної статистики і теорії планування експериментів.

Розглянемо імітаційну модель комп'ютерної мережі, що складається з двох мереж з різною пропускною здатністю, між якими балансується створюване сервісом навантаження: мережі доступу, яка генерує навантаження, і мережі сервісу, в якій розміщено сервер, що обслуговує сервіс. Як модель протоколу МРТСП було використано проект із відкритим вихідним кодом, який задля дослідження було модифіковано (додана можливість використання однієї IP-адреси для сервера). Крім того, в імітаційній моделі використовується

розширення «per flow ECMP» і статичні маршрути для побудови двох шляхів до сервера через різні мережі.

Передавання даних проводилося від клієнта до сервера. Топологію мережі, реалізовану в імітаційній моделі, зображено на рис. 1, де  $C_1, \dots, C_5$  — пропускна здатність каналів ( $C_1 = 1, C_2 = 1 \dots 10, C_3 = C_4 = C_5 = 100$  Мбіт/с); на всьому шляху проходження, окрім протоколу МРТСП (на клієнті і сервері) використовуються протоколи, що знаходяться нижче: IPv4, PPP.

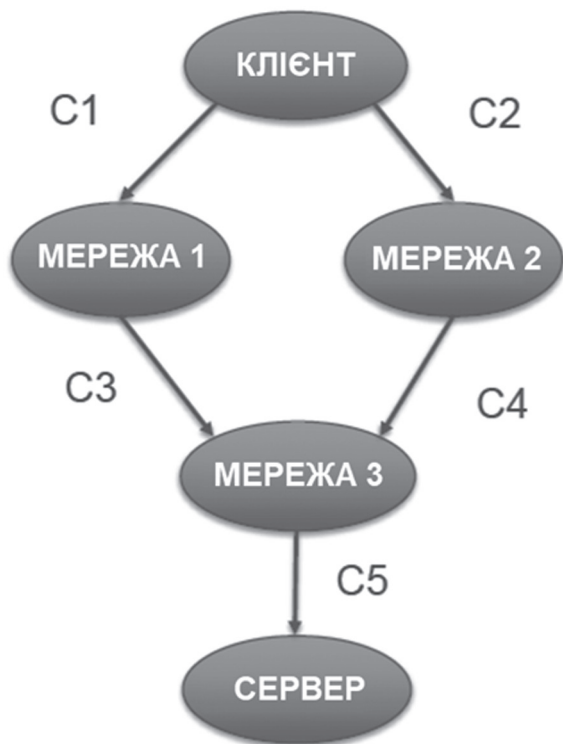


Рис. 1. Топологія досліджуваної мережі

Імітаційна модель має низку обмежень порівняно з реальною мережею і протоколом:

- не враховується час обробки пакетів у транзитних мережах (мережі 1, мережі 2, мережі 3);
- не розглядається можливе перетинання двох транзитних мереж у вузьких місцях;
- використовується детермінований час затримки і надходження пакетів — 10 мс.

Під час використання настільної ЕОМ середньої цінової категорії створена модель дозволяє знизити час експерименту більш ніж на 40% порівняно з експериментом на основі реальної мережі. Проте розглянуті вище обмеження знижують коректність результатів.

При проведенні імітаційних експериментів з передавання 100 МБ трафіку отримано, що коефіцієнт ефективності передавання (КЕП, відношення середньої швидкості передавання даних до сумарної пропускної здатності доступних мереж) зменшується зі збільшенням сумарної пропускної здатності. Це пов'язано з тим, що в протоколі

МРТСП на старті передавання розмір вікна дорівнює одному пакету, і наростання вікна відбувається поступово, тому для досягнення пікової швидкості необхідний час, обернено пропорційний до пропускної здатності.

Аналіз результатів імітаційних експериментів дозволив подати КЕП у вигляді аналітичних залежностей, які не враховують усіх особливостей імітаційної моделі, але дають можливість оцінити зверху як імітаційну модель, так і реальну систему.

У загальному випадку КЕП зменшується через такі накладні витрати.

**1. Службові заголовки.** Позначимо частку службових заголовків по відношенню до корисного трафіку через  $K_{overhead}$ .

**2. Повільне наростання вікна передавання протоколу ТСР на початку передавання.** Позначимо за допомогою  $K_{slowstart}$  частку часу, на яку затримується передавання даних.

**3. Службові пакети створення і завершення з'єднання.** Позначимо через  $K_{connection}$  частку часу, на яку затримується передавання даних через використання службових пакетів. Отже, отримуємо таку формулу розрахунку КЕП:

$$\eta_{mp\ tcp} = 1 - K_{overhead} - K_{slowstart} - K_{connection} \quad (1)$$

Службові заголовки  $L_h$  складаються із заголовків каналного рівня  $L_{12}$ , мережного рівня  $L_{13}$ , заголовка ТСР  $L_{tcp}$  і опцій МРТСП у заголовку ТСР  $L_{mp\ tcp}$  (усі величини вказані в байтах), тобто:

$$L_h = L_{12} + L_{13} + L_{tcp} + L_{mp\ tcp} \quad (2)$$

Таким чином, частка службових пакетів, а отже і пов'язане з цим зменшення КЕП становитиме

$$K_{overhead} = \frac{L_h}{L_{payload} + L_h} \quad (3)$$

де  $L_{payload}$  — розмір даних, переданих в одному пакеті, байт.

Подамо суму значень пропускної здатності каналів як

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

де  $n$  — число каналів;  $C_i$  — пропускна здатність  $i$ -го каналу зв'язку, біт/с.

Виразимо довжину запакованого в заголовок пакета:

$$L_{ssi} = \min(W_{max}, 2C_i t_3) \quad (5)$$

де  $W_{max}$  — максимальний розмір вікна, біт;  $t_3$  — час затримки передавання пакета по каналу, с.

Тоді час простою каналу через відсутність пакетів, розмір яких менший за оптимальний розмір вікна, становитиме

$$T_{ssi} = \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{L_{ssi}}{L_p} \right\rfloor} \frac{L_{ssi} - jL_p}{C_i} \quad (6)$$

Час передавання без простою каналу:

$$T_{ideal} = \frac{D}{C(1-K_{overhead})}, \quad (7)$$

де  $D$  — обсяг даних, переданих по мережі, біт.

Отримуємо частку простою каналу через механізм плаваючого вікна:

$$K_{slowstart} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ssi}}{T_{ideal} + \sum_{i=1}^n T_{ssi}}. \quad (8)$$

Частка службових пакетів не залежить від їх розмірів і розраховується за формулою

$$K_{connection} = \frac{2(2t_3 + 4(n-1)t_3)}{T_{ideal}} = \frac{(8n-4)t_3}{T_{ideal}}, \quad (9)$$

згідно з якою, поки перше з'єднання не буде встановлено/закрито, інші потоки не будуть ініціювати/закривати свої з'єднання. Таким чином, службові пакети відкриття/закриття з'єднання першого потоку передаються за час  $2t_3$ , інших потоків — за час  $4t_3$ . Формули (1)–(9) будуть корисні операторам для розрахунку теоретично необхідного мінімуму ресурсоемності мережі, без якого впровадження протоколу МРТСП призведе до її перевантаження. Результати розрахунків частки корисної пропускної здатності двох методів наведено на рис. 2.

#### Висновки

Таким чином, можна сформулювати наступний висновок: через механізм наростаючого вікна при старті передавання КЕП зменшується зі збільшенням пропускної здатності каналів зв'язку.

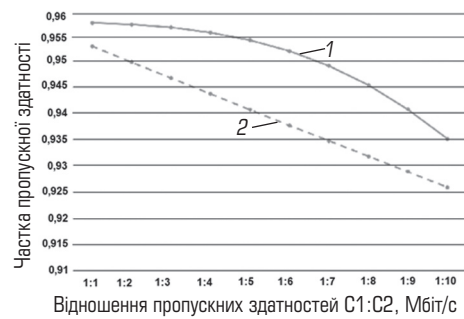


Рис. 2. Залежність КЕП від пропускної здатності каналів: 1 — аналітичний метод; 2 — імітаційний метод

#### Список використаної літератури

1. Стеглов В. К., Беркман Л. Н., Карпенко Н. Ф. Многокритериальная оптимизация системы управления телекоммуникационными сетями // Зв'язок. 1999. № 6. С. 13–16.
2. Форд С., Рейсі М., Доуфксі А. Оцінка продуктивності МРТСП у внутрішніх гетерогенних мережах // Перший інтерн. Конф. Про системну інформатику, моделювання та відтворення. 2014. С. 173–178.
3. Дмитрієв А. С. Аналіз ефективності протоколу МРТСП для агрегування пропускної спроможності каналів зв'язку // Зб. робіт VII наук.-практ. конф. молодих учених, 2016. С. 10–13.
4. Методика підвищення надійності мереж майбутнього з використанням алгоритму визначення оптимального числа об'єктів резервування / С. І. Отрох, В. І. Кравченко, М. В. Загряжська [та ін.] // Наукові записки УНДІЗ. 2017. № 4. С. 24–29.

**Рецензент:** доктор техн. наук, доцент В. В. Онищенко, Державний університет телекомунікацій, Київ.

А. І. Голубенко, Я. О. Осадчий, Д. А. Овдій, П. К. Козицький, Д. В. Сумцов

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАЛАНСИРОВАНИЕ ТРАФИКА В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ПРОТОКОЛА МРТСП

Проведен анализ результатов имитационных экспериментов, который позволил представить КЭП в виде аналитических зависимостей, которые не учитывают всех особенностей имитационной модели, но дают оценку сверху как для имитационной модели, так и для реальной системы.

**Ключевые слова:** коэффициент эффективности передачи; протокол МРТСП; имитационные модели; трафик.

O. I. Golubenko, Ya. O. Osadchiy, D. A. Ovdij, P. K. Kozitskiy, D. V. Sumtsov

#### RESEARCH OF EFFICIENCY BALANCING TRAFFIC IN MOBILE NETWORKS BY MEANS OF MPTCP PROTOCOL

The analysis of the results of simulation experiments presented in this article allowed to present the CES in the form of analytical dependencies, which do not take into account all the features of the simulation model, but give an overview of both the simulation model and the real system.

The research is based on simulation to reduce the time needed to carry out the necessary experiments instead of using real networks or simulation models with a protocol stack that can be compared to a real network.

The object of the study is the transport protocol MPTCP. The subject of the study is the effectiveness of balancing traffic when using multichannel routing. The purpose of the study is to analyze the effectiveness of traffic balancing using the MPTCP protocol. The research methods used include simulation, methods of mathematical statistics and theory of experiment planning. The following traffic balancing studies using multichannel routing of MRTSC show the efficiency of using the protocol for aggregating wireless interfaces.

**Keywords:** transmission efficiency ratio; MPTCP protocol; simulation models; traffic.