

Довженко Т. П.

ДОСЛІДЖЕННЯ TCP/IP МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО REM-АЛГОРИТМУ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧЕРГОЮ З ДИНАМІЧНО-РОЗЩЕПЛЯЄМОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ (DSREM)

В статті розглянуто роботу REM та DSREM-алгоритму. Показані основні відмінності в роботі алгоритмів. Виконано імітаційне моделювання мережі TCP/IP із застосуванням REM та DSREM. Проведено порівняння основних характеристик TCP/IP-мережі для кожного з алгоритмів. Визначено ряд ключових переваг DSREM над REM-алгоритмом.

Ключові слова: активне управління чергою (AQM), REM-алгоритм, TCP/IP-мережа, динамічно розщеплений REM (DSREM-алгоритм).

1. Вступ

При стохастичному та некерованому зростанні швидкостей каналів передачі даних відбувається збільшення черги буфера маршрутизатора, а отже і перенавантаження в лінії зв'язку. Традиційні протоколи управління чергами та запобігання перенавантажень не справляються із управлінням трафіка зі складною динамікою, нелінійністю зміни навантаження, що призводить до виникнення перенавантажень і появи явища глобальної синхронізації TCP потоків. Це в свою чергу зменшує ефективну швидкість передачі даних і погіршує параметри якості, такі як відсоток втрачених пакетів, затримки і варіації затримок [1].

Для запобігання цього та для зменшення довжини черги маршрутизатора використовуються методи управління чергою.

Серед усіх, достатню зацікавленість викликають методи активного управління чергою (Active Queue Management, AQM), які полягають у відкиданні або маркуванні пакетів, що надходять в буфер маршрутизатора, до того як черга буфера заповниться, тим самим забезпечуючи:

1) мінімізацію середньої довжини черги при одночасному забезпеченні високого коефіцієнта використання каналу, а також справедливий розподіл буферного простору між різними потоками даних;

2) запобігання ефекту глобальної синхронізації TCP-трафіку;

3) неупереджене обслуговування трафіку, що характеризується короткочасними сплесками;

4) суворе обмеження максимального середнього розміру черги.

Тема, яка розглядається в даній статті присвячена опису розробленого автором алгоритму підвищення показників якості (зменшення кількості відкинутих та втрачених пакетів, збільшення запасу стійкості системи при великих навантаженнях) системи управління чер-

гою буфера маршрутизатора мережі TCP/IP. З оглядом на вищенаведене актуальність цієї теми є безперечною.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Виявити перенавантаження, виходячи із стану черги протягом тривалого часу, можливо безпосередньо в маршрутизаторі, який обслуговуючи безліч потоків володіє інформацією про пропускну здатність та затримки в каналі зв'язку. Тому для поліпшення якості параметрів каналу використовують методи активного управління чергою для буфера маршрутизатора.

AQM-технологія полягає у відкиданні або маркуванні пакетів, що надходять в буфер маршрутизатора, до того як черга буфера заповниться (в момент перенавантаження мережі).

AQM-алгоритми можуть бути класифіковані за критеріями прийняття рішення про відкидання пакетів черги при виникненні перенавантаження. Можна виділити 4 типи алгоритмів управління чергами:

1) AQM на основі середньої довжини черги;

2) AQM на основі рівня втрат пакетів і ефективності використання каналу;

3) AQM на основі класу;

4) AQM на основі теорії контролю.

На сьогоднішній день існує цілий ряд методів активного управління чергою, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Серед них окремо слід виділити REM-алгоритм, який з-поміж більшості основних алгоритмів (RED, PI) має найменше значення черги буфера [1].

Виходячи з цього об'єктом дослідження даної роботи є система активного управління чергою (AQM) буфера маршрутизатора, яка скоригована REM-алгоритмом.

Основними недоліками AQM-системи на базі REM-алгоритму є збільшення кількості відкинутих та втрачених пакетів по мірі зростання навантаженості в TCP/IP-мережі.

3. Мета та задачі дослідження

На основі вищенаведеного, метою дослідження є підвищення якісних показників системи активного управління чергою (AQM) шляхом побудови модифікованого алгоритму, що функціонує на базі методу випадкового експоненціального маркування (REM).

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- 1) провести детальний аналіз роботи REM-алгоритму;
- 2) представити новий AQM-метод на базі модифікованого REM-алгоритму (DSREM-алгоритм), який буде мати більш якісні показники основних параметрів AQM-системи;
- 3) провести порівняння основних характеристик DSREM та REM алгоритмів шляхом імітаційного моделювання TCP/IP-мережі з перенавантаженою лінією зв'язку.

4. Аналіз літературних даних

В роботі [2] було проаналізовано стабільність параметрів TCP/IP-мережі із застосуванням AQM-системи. Авторами було запропоновано застосовувати маркування пакетів черги буферу маршрутизатора.

В роботі [3] описано роботу одного з основних AQM-методів, алгоритму раннього випадкового оповіщення про перевантаженість маршрутизатора (RED), наведено його основні параметри та методику розрахунку середнього значення довжини черги буфера та ймовірності маркування/скидання пакетів.

Робота [4] присвячена питанню побудови AQM-регуляторів для мережеских маршрутизаторів. Авторами даної роботи було запропоновано схему AQM-регулятора на основі класичного пропорційно-інтегрального (PI) алгоритму. Шляхом імітаційного моделювання TCP/IP-мережі було встановлено, що застосування AQM-регулятора на базі PI-методу має кращу ефективність роботи, ніж AQM-регулятор на основі RED-методу.

У роботі [5] розглянуто алгоритм випадкового експоненціального маркування пакетів (REM) та показані основні переваги його використання в якості AQM-методу.

Дослідження роботи [6] присвячені питанню реалізації адаптивних алгоритмів та алгоритмів із само налаштуванням (RED, ARED, STRED, STPI) в якості AQM-методів.

Автори роботи [7] вважають, що запропонований ними модифікований REM-алгоритм із само налаштуванням (STREM) має перспективи застосування в якості методу активного управління чергою буфера, що підтверджено результатами проведеного ними моделювання мережі.

Робота [8] присвячена дослідженню робастності AQM-системи з використанням адаптивного REM-алгоритму (AREM). Наведені авторами результати моделювання показують, що AREM має кращі показники параметру довжини черги буфера маршрутизатора, ніж REM-метод.

В роботах наведених вище, досліджуються концепції побудови телекомунікаційних мереж із застосуванням комутаційного обладнання на базі AQM технологій, але в більшості вони мають недоліки, зорієнтовані на використання не достатньо ефективних на сьогодніш-

ній день методів, які при значному зростанні трафіку в мережі не здатні забезпечити їй достатню якість.

5. Матеріали та методи дослідження

При дослідженні як REM-алгоритму, так і його модифікованого клону DSREM-алгоритму використовувалася ряд підходів і методик закладених у мережевому симуляторі ns-2.

Зокрема використання закладеного в ns-2 програмного забезпечення для REM-алгоритму й розроблене автором програмне забезпечення для DSREM-алгоритму дозволило найбільш приблизно побудувати й описати процес проходження мережного трафіка при різних значеннях кількості вхідних джерел повідомлень, навантаження й пропускної здатності каналу.

У якості матеріалів дослідження використовувалися дані, отримані в результаті аналізу закордонної й вітчизняної літератури, а також отримані в результаті моделювання з використання вищенаведених інструментальних засобів.

Метод випадкового експоненціального маркування REM використовує експоненціальний закон управління, який в якості аргументу використовує значення ціни перенавантаження p у визначений момент часу kT та розраховується за формулою [9]:

$$p(k) = \max \left(0, p((k-1)T) + \gamma(\alpha(q(kT) - q_{ref}) + x(kT) - c) \right), \quad (1)$$

де c — пропускна здатність каналу; $q(kT)$ — поточна довжина черги буфера маршрутизатора; $x(kT)$ — швидкість надходження пакетів; a і γ — константи більше нуля (0,1 та 0,001 відповідно); T — інтервал часу вимірювань; k — номер інтервалу.

В кожному вихідному пакеті міститься змінна $p(kT)$ (ціна), в якій зберігається інформація про перевантаження мережі. Цей параметр використовується для визначення ймовірності відкидання/маркування пакетів, що розраховується за формулою:

$$prob(kT) = 1 - \varphi^{-p(kT)}, \quad (2)$$

де φ — константа більше одиниці (1,001).

Робота REM-алгоритму показана на рис. 1, а.

Так при кожному надходженні пакета в чергу змінюється його ціна та ймовірність маркування. Якщо при малому навантаженні в мережі, пакет, який має деякий показник (ціну) перенавантаження відповідний точці А та ймовірність маркування для цієї точки, не був промаркований, тоді вікно приймача збільшиться в 2 рази, а отже збільшиться навантаження в TCP/IP-мережі. Наступний пакет з відповідними показниками в точці В може бути промаркований або відкинутий. Тоді вікно приймача зменшиться разом з навантаженням в мережі. Якщо наступний пакет (в точці С) буде мати більші значення ймовірності маркування й ціни перенавантаження, проте не буде відкинутий, то навантаження мережі знову зросте і наступний пакет може бути відкинутий з більш високою ймовірністю. На рис. 2 показано блок-схему роботи REM-алгоритму.

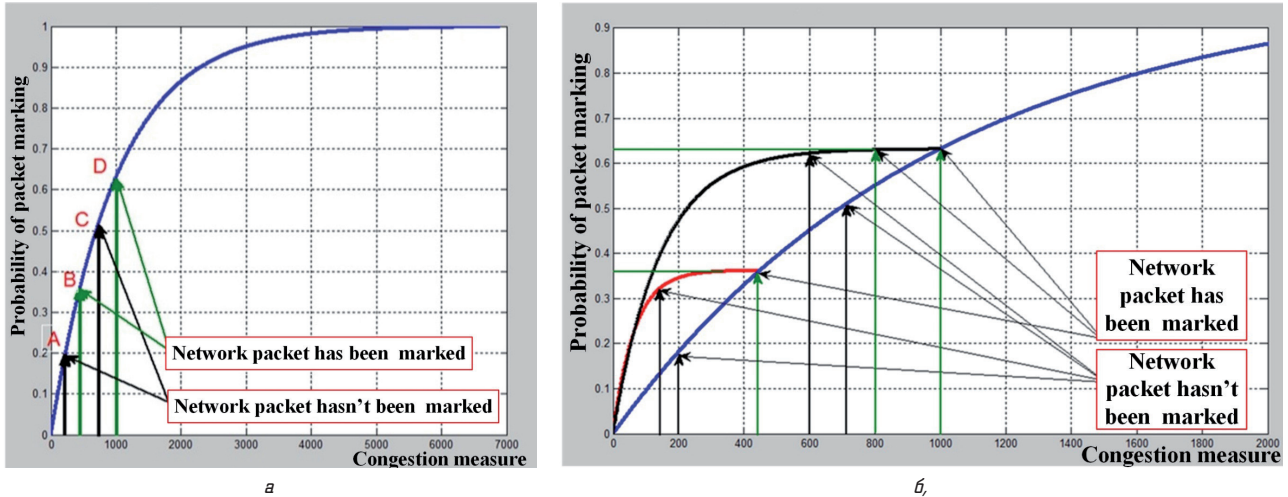


Рис. 1. Графік залежності імовірності маркування пакетів від ціни перенавантаження каналу: а — для REM-методу; б — для DSREM-методу

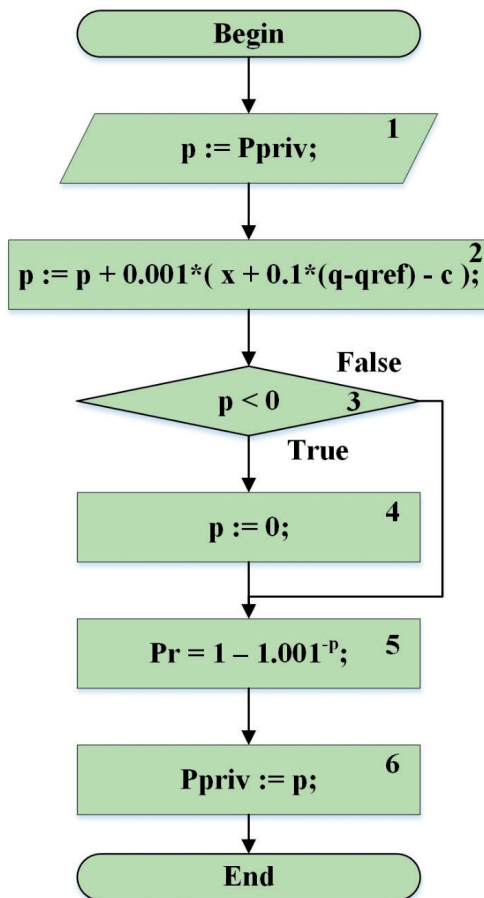


Рис. 2. Блок-схема роботи REM-алгоритму

REM-алгоритм працює наступним чином:

1. Ціна навантаження поточної ітерації визначається, як сума поточного та минулого значення цін за формулою (1).
2. Якщо значення ціни від’ємне, тоді її змінній присвоюється 0.
3. Якщо значення ціни більше додатне — розраховується ймовірність маркування пакетів за формулою (2).
4. Поточне значення ціни передається в наступну ітерацію.

DSREM-алгоритм є модифікацією REM-алгоритму. Принцип роботи алгоритму ілюструє рис. 1, б. На початку роботи при відсутності або при малому навантаженні мережі, DSREM-алгоритм працює відповідно до REM-алгоритму: якщо перший пакет не був відкинутий, вікно передавача збільшується в 2 рази, тим самим збільшується передача пакетів і збільшується ціна. Нехай наступний пакет буде промаркований. Тоді характеристика імовірності буде розщеплена завдяки коефіцієнтам масштабування по осі імовірності $k1$ та осі міри перевантаження (ціни) $k2$ [10]. Дані коефіцієнти визначаються за формулами:

$$k1 = (1 - \varphi^{* - p_{max}}), \tag{3}$$

$$k2 = p_{max_const} / p_{max}, \tag{4}$$

де $p_{max_const} = 6911$ — значення ціни маркування, при імовірності відкидання пакетів 0,999; p_{max} — максимальне значення ціни при кожній ітерації; φ^* — значення параметру норми втрат при кожній ітерації, яка визначається:

$$\varphi^* = 1 + (\varphi - 1) / k_{st}. \tag{5}$$

Тоді імовірність маркування $prob(kT)$ для DSREM-алгоритму можна записати у вигляді:

$$prob(kT) = k1 \cdot (1 - \varphi^{* - k2 \cdot p(kT)}). \tag{6}$$

При зменшенні навантаження в мережі, зменшується ціна для наступного пакету, але імовірність маркування пакету вже розраховується за розщеплюваною характеристикою імовірності. При збільшенні навантаження імовірність розраховується за REM-методом. Крім того, якщо наступний пакет після розщеплення характеристики імовірності не був промаркований та має меншу ціну, імовірність відкидання для нього також буде розраховуватися за розщеплюваною характеристикою. Таким чином при зменшенні вхідних потоків маршрутизатора, DSREM зменшує імовірність відкидання

пакетів повільніше, ніж REM-алгоритм, тим самим стримуючи зростання черги в буфері.

В мережі TCP/IP DSREM-алгоритм може бути використаний в якості регулятора черги в колі зворотного зв'язку.

До формули (5) входить спеціально визначений коефіцієнт k_{st} . Він відіграє важливу роль при побудові передавальної функції DSREM-регулятора та визначенні якісних показників перехідних характеристик замкнутої передавальної функції TCP мережі.

Значення коефіцієнта k_{st} (коефіцієнта стійкості) визначається за наступним алгоритмом:

1. Знаходимо частоту ω , при якій значення логарифмічної фазової характеристики задовольняє по якісним показникам перехідний процес. Для цього розв'язуємо наступне рівняння:

$$P(\omega) \operatorname{tg} \theta - Q(\omega) = 0, \quad (7)$$

де $P(\omega)$ — дійсна частина передавальної функції розімкненої системи; $Q(\omega)$ — уявна частина передавальної функції розімкненої системи; $\operatorname{tg} \theta$ — тангенс кута, при якому перехідна функція задовольняє показникам якості.

2. Визначаємо модуль амплітудно-фазової характеристики при знайденій частоті:

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}. \quad (8)$$

3. Визначаємо коефіцієнт стійкості:

$$k_{st} = \sqrt{A(\omega)}. \quad (9)$$

Робота DSREM-алгоритму складається з наступних кроків:

1. Якщо сума попередньої та поточної ціни менше або дорівнює нулю, то і ймовірність маркування/відкидання пакетів також буде дорівнювати нулю.

2. Якщо сума цих значень більше p_max то параметр p_max приймає значення ціни p , а ймовірність відкидання пакетів розраховується за формулою (6).

3. Якщо значення ціни більше від константи p_max_const , то p приймає значення поточної ціни даної ітерації без попередніх значень, а змінна ϕ^* зростає.

4. Коли значення ціни p менше від p_max , то змінна ϕ^* зменшується, а ймовірність маркування $prob(kT)$ розраховується за формулою (6).

6. Результати дослідження

В роботі проведено моделювання TCP/IP мережі, що містить перенавантажений канал зв'язку, з використанням AQM-алгоритмів REM та DSREM. Схема мережі (рис. 3) складається зі змінного числа FTP джерел повідомлення, які за допомогою двох маршрутизаторів передають інформацію на TCP-приймач.

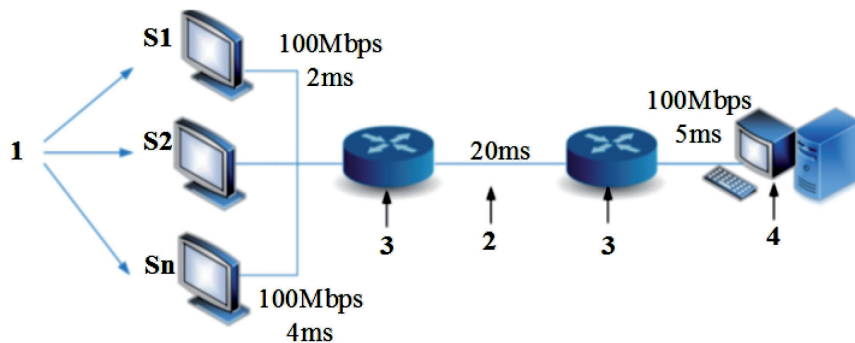


Рис. 3. Схема мережі для імітаційного моделювання: 1 — джерело повідомлення; 2 — лінія зв'язку з перенавантаженням; 3 — маршрутизатор; 4 — TCP-приймач повідомлення

Швидкість каналу між кінцевими вузлами і маршрутизаторами становить 100 Мб/с, затримка для кожного кінцевого вузла має випадковий характер. Швидкість каналу між двома транзитними маршрутизаторами становить 5 Мб/с (канал з перевантаженням), а затримка — 20 мс.

Першим почнуть роботу 20 % джерел. Потім, через 20 с — 40 %. На 40-й секунді включиться ще 40 %. Тривалість процесу моделювання складає 60 с.

На рис. 4, 5 наведені графіки ймовірності маркування пакетів та довжини черги буфера маршрутизатора, що були отримані шляхом моделювання мережі з використанням REM та DSREM алгоритмів для 5 вхідних джерел за допомогою мережевого симулятора ns-2.

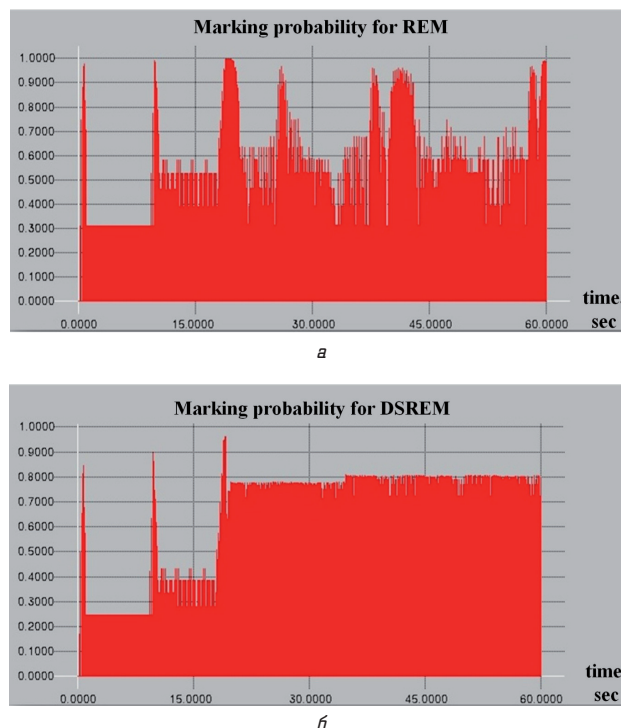


Рис. 4. Графік ймовірності маркування пакетів: а — для REM-методу; б — для DSREM-методу

З графіків наведених на рис. 4 видно, що ймовірність маркування для REM-методу має коливальний характер. В той же час, при використанні DSREM-алгоритму, даний параметр має більш пологою характеристику.

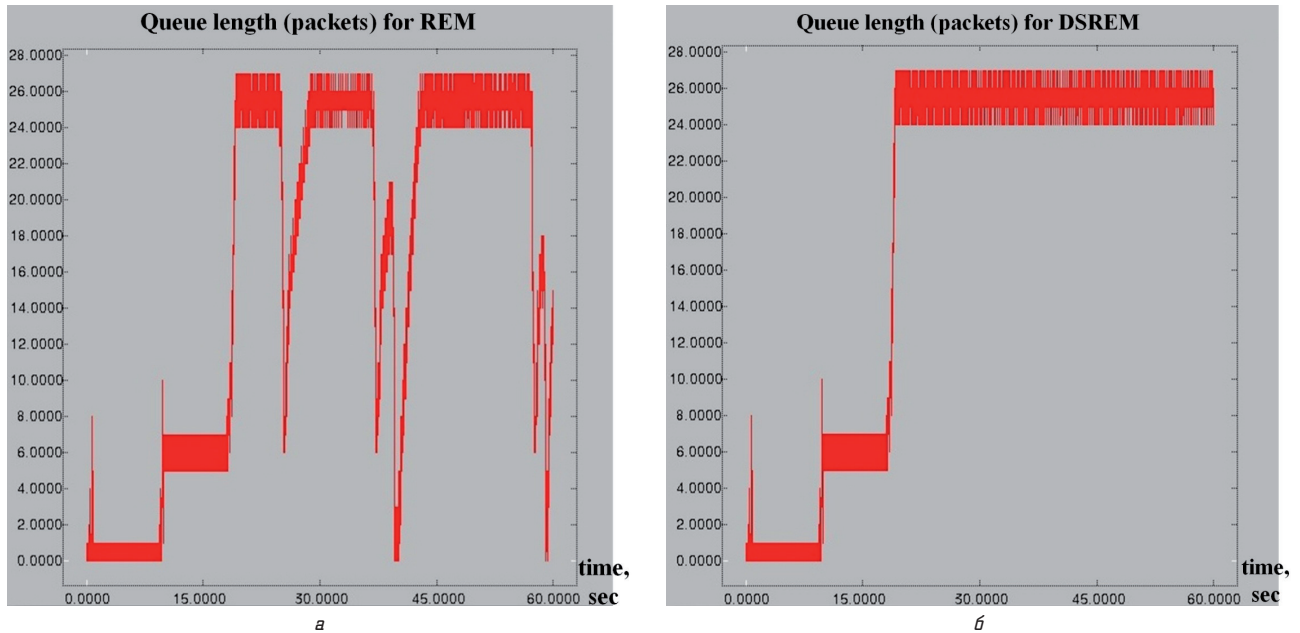


Рис. 5. Графік довжини черги буфера маршрутизатора: а — для REM-методу; б — для DSREM-методу

З графіків довжини черги пакетів буфера, що зображені на рис. 5 видно, що система, в основі якої покладено REM-алгоритм, має нестабільний характер даного параметру. В той же час, для DSREM, нестабільності характеристики довжини черги при даній конфігурації мережі не спостерігається.

На рис. 6, 7 наведені графіки імовірності маркування пакетів та довжини черги, що були отримані шляхом моделювання мережі з використанням REM та DSREM алгоритмів для 95 вхідних джерел, з яких видно, що навіть при збільшенні навантаження мережі DSREM може підтримувати стабільність параметрів краще, ніж REM.

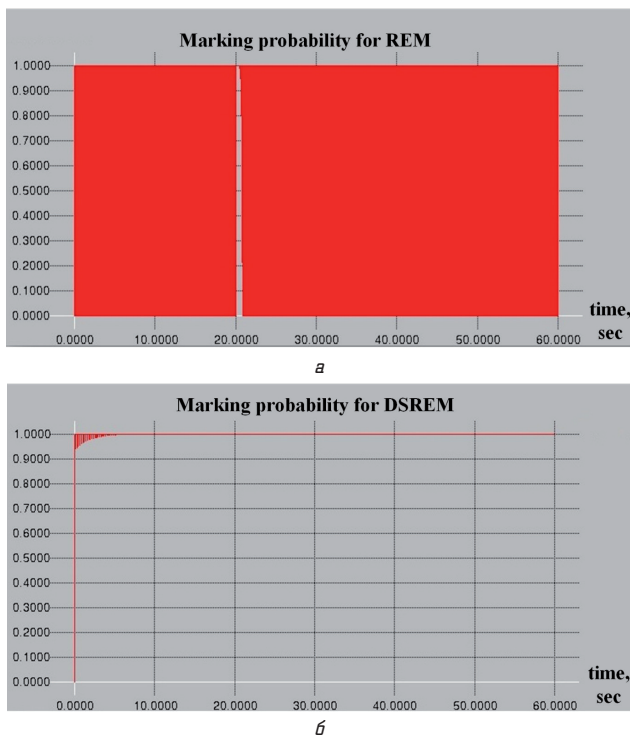


Рис. 6. Графік імовірності маркування пакетів: а — для REM-методу; б — для DSREM-методу

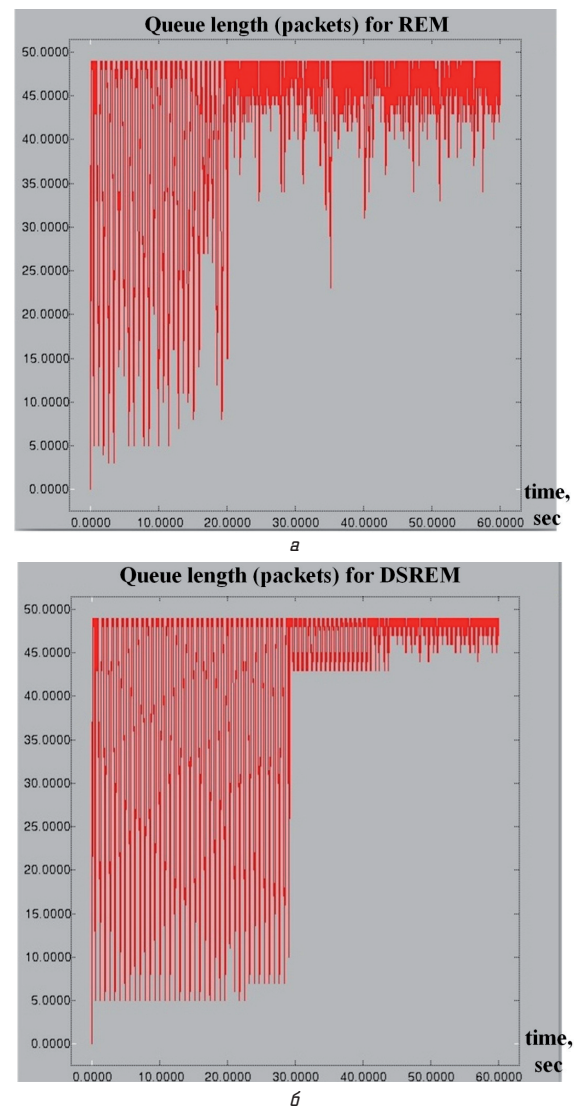


Рис. 7. Графік довжини черги буфера маршрутизатора: а — для REM-методу; б — для DSREM-методу

Дані мережевого моделювання занесені до табл. 1, з якої видно, що ефективнішим виявилось використання мережі, основою AQM-системи якої є DSREM-алгоритм, оскільки при порівнянні з REM-алгоритмом, він має кращі показники по кількості скинутих та втрачених пакетів.

Таблиця 1

Втрати пакетів при застосуванні REM та DSREM алгоритмів

Кількість вхідних джерел, шт	REM			DSREM		
	Кількість втрачених пакетів, шт	Кількість скинутих пакетів, шт	Кількість втрачених пакетів, %	Кількість втрачених пакетів, шт	Кількість скинутих пакетів, шт	Кількість втрачених пакетів, %
5	60	5	0,27	50	0	0,22
95	8062	7982	4,81	3494	3414	2,42

Для невеликої кількості вхідних джерел повідомлень, як показано в табл. 1 (рядок 1) для DSREM-алгоритму показники кількості втрачених пакетів кращі на 16,7 % порівняно з REM-алгоритмом, а для великої кількості вхідних джерел повідомлень – на 56,7 %. Що стосується скинутих пакетів, то для невеликої кількості вхідних джерел повідомлень абсолютну перевагу має DSREM-алгоритм. Для значної кількості вхідних джерел повідомлень (рядок 2) ця перевага вимірюється значенням в 57,2 %.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

В ході процесів розробки та імітаційного моделювання DSREM-алгоритму було виявлено:

1. Сильні сторони:
 - зменшення відсотка скинутих та втрачених пакетів при збільшенні числа вхідних джерел мережі;
 - стабілізація таких параметрів як довжина черги та ймовірність маркування пакетів буфера;
 - здатність налаштувати рівень показників якості мережі TCP;
 - утримування на заданому рівні показників якості мережі TCP при різних значеннях ймовірності для максимального значення ціни при кожній ітерації.
2. Слабкі сторони:
 - на даному етапі алгоритм є досить громіздким для існуючих маршрутизаторів.
3. Можливості:
 - вивчення можливостей оптимізації розробленого алгоритму під можливості існуючих маршрутизаторів.
4. Загрози:
 - можливість появи в даному сегменті алгоритму більш компактного та ефективного, ніж DSREM.

8. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Проведено детальний аналіз роботи REM-алгоритму. Описано експоненціальний закон управління, складові його найважливішої частини – ціни переважання та покрокове виконання процесу маркування пакетів.

2. Представлено детальний опис нового, запропонованого автором, DSREM-алгоритму, який оснований на використанні нових параметрів (коефіцієнтів масштабу та коефіцієнту стійкості) для покращення його роботи.

3. За допомогою мережевого симулятора ns-2 проведено імітаційне моделювання мережі TCP/IP з перенавантаженим каналом для REM та DSREM-алгоритмів.

Проведені дослідження показали хорошу ефективність DSREM-алгоритму. Робота DSREM в якості AQM-алгоритму в мережі TCP/IP дозволяє стабілізувати значення черги пакетів в буфері маршрутизатора та ймовірність їх скидання/маркування і зменшити кількість скинутих та втрачених пакетів при зміні навантаження мережі. Розроблений метод доцільно використовувати в науково-дослідних центрах і конструкторських бюро підприємств для проектування та вдосконалення TCP/IP-мереж та мережевого комутаційного обладнання.

Література

1. Коваленко, А. А. Проблемы производительности протокола TCP в гетерогенных сетях и методы ее улучшения [Текст] / А. А. Коваленко, Ю. Ю. Завизиступ, С. А. Партыка // Вестник ХНТУ. – 2005. – № 1(21). – С. 305–311.
2. Hollot, C. V. Nonlinear Stability Analysis for a Class of TCP/AQM Networks [Text] / C. V. Hollot, Y. Chait // IEEE International Conference on Decision and Control. – February 2001. – Vol. 3. – P. 2309–2314. doi:10.1109/cdc.2001.980604
3. Floyd, S. Early Detection gateways for Congestion Avoidance [Text] / S. Floyd, V. Jacobson // IEEE/ACM Transactions on Networking. – August 1993. – Vol. 1, № 4. – P. 397–413. doi:10.1109/90.251892
4. Hollot, C. V. Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows [Text] / C. V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, Weibo Gong // IEEE Transactions on Automatic Control. – June 2002. – Vol. 47, № 6. – P. 945–959. doi:10.1109/tac.2002.1008360
5. Athuraliya, S. REM: active queue management [Text] / S. Athuraliya, S. H. Low, V. H. Li, Qinghe Yin // IEEE Network. – 2001. – Vol. 15, № 3. – P. 48–53. doi:10.1109/65.923940
6. Zhang, H. A self-tuning structure for adaptation in TCP/AQM networks [Text] / H. Zhang, D. Towsley, C. V. Hollot, V. Misra // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation. – 2003. – Vol. 31, № 1. – P. 302–303. doi:10.1145/781027.781068
7. Wang, W. The Stability of TCP/REM Congestion Control Mechanism [Text] / W. Wang, Q. Chen, W. Chen, Y. Jiang // Journal of Information and Computational Science. – 2011. – Vol. 8, № 14. – P. 2925–2932.
8. Tan, L. Adaptive REM: random exponential marking with improved robustness [Text] / L. Tan, G. Peng, S. Chan // Electronics Letters. – 2007. – Vol. 43, № 2. – P. 133–135. doi:10.1049/el:20072966
9. Гостев, В. И. Исследование сети TCP/IP с применением основных алгоритмов активного управления очередью [Текст] / В. И. Гостев, Т. П. Довженко, А. С. Артющик // Системы управления, навигации та зв'язку. – 2014. – № 2(30). – С. 87–91.
10. Довженко, Т. П. Дослідження TCP/IP мережі з використанням модифікованого REM-алгоритму активного управління чергою з динамічно розщеплюємою характеристикою (DSREM) [Текст] / Т. П. Довженко, К. П. Сторчак // Матеріали XXXVII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи наукових досліджень», 30–31 березня 2016, м. Чернівці. – Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2016. – С. 12–14.

ИССЛЕДОВАНИЕ TCP/IP СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО REM-АЛГОРИТМА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ С ДИНАМИЧНО-РАСЩЕПЛЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ (DSREM)

В статье рассмотрена работа REM и DSREM-алгоритма. Показаны основные различия в работе алгоритмов. Выполнено имитационное моделирование сети TCP/IP с применением REM и DSREM. Проведено сравнение основных характеристик TCP/IP-сети для каждого из алгоритмов. Определен ряд ключевых преимуществ DSREM над REM-алгоритмом.

Ключевые слова: активное управления очередью (AQM), REM-алгоритм, TCP/IP-сеть, динамически расщепленный REM (DSREM-алгоритм).

Довженко Тимур Павлович, аспирант, кафедра комутаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна, e-mail: evetal1992@ukr.net.

Довженко Тимур Павлович, аспірант, кафедра комутаційних систем, Государственный университет телекоммуникаций, Киев, Украина.

Dovzhenko Timu, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine, e-mail: evetal1992@ukr.net

УДК 519.23:004.932.72'1

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.75793

**Хламов С. В.,
Саваневич В. Е.,
Брюховецкий А. Б.,
Оршич С. С.**

РАЗРАБОТКА ПОДСТАНОВОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ОКОЛОНУЛЕВОГО ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА СЕРИИ ССД-КАДРОВ

Разработаны подстановочные вычислительные методы максимально правдоподобного обнаружения околонулевого видимого движения объектов на серии ССД-кадров. В статье рассмотрены случаи с известной и неизвестной дисперсиями измерений положения объекта на кадрах, а также с использованием внешней ее оценки. Для использования синтезированных решающих правил предварительно оцениваются параметры видимого движения рассматриваемых объектов и соответствующие им интерполированные координаты на исследуемых кадрах.

Ключевые слова: серия ССД-кадров, МНК-оценка параметров движения объекта, измерение положения объекта, астероиды.

1. Введение

В настоящее время астероидные обзорные наблюдения с последующей автоматической обработкой их результатов являются значимым направлением современной астрометрии. Данная значимость вызвана проблематикой астероидно-кометной опасности [1, 2].

Небесные объекты, которые не принадлежат Солнечной системе, имеют нулевую скорость видимого движения. В то время, как ССО имеют ненулевую скорость, значение которой может варьироваться от околонулевой до значительно большей.

Наблюдение объектов Солнечной системы (ССО) осуществляется с помощью телескопа, оснащенного ССД-матрицей [3]. Для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением необходимо провести анализ серии измерений, которая сформирована на серии кадров. При том, не более чем по одному измерению на одном кадре.

Для обнаружения объектов с околонулевым видимым движением ранее не разрабатывались специальные вычислительные методы, а использовались общие методы

обнаружения движущихся объектов. Поэтому разработка вычислительных методов обнаружения околонулевого видимого движения объекта является актуальным. Данные методы позволят обнаруживать объекты с околонулевой скоростью видимого движения на временных интервалах наблюдения, которые значительно снижены.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования является подкласс объектов с околонулевым видимым движением на серии ССД-кадров. Он является составляющим класса движущихся объектов с ненулевым видимым движением. К данному подклассу относятся объекты, перемещения между кадрами которых за время наблюдения является незначительным (околонулевым).

Основным характерным недостатком данного объекта исследования является тот факт, что перемещения объекта с околонулевым видимым движением на серии ССД-кадров соизмеримы с ошибками определения положения исследуемого объекта. Данный недостаток очень