УДК 004.7

О.А. Фещенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ВІДМОВОСТІЙКА МАРШРУТИЗАЦІЯ В SDN

Важливим недоліком існуючих моделей відмовостійкої маршрутизації на даному етапі розвитку технології є відсутність оперативного реагування на перевантаженість мережі. Більшість протоколів маршрутизації забезпечують перерахунок маршрутів з періодом у десятки секунд, що недопустимо у сучасній динамічній мережі. У статті проведено дослідження засобів, що забезпечують відмовостійку маршрутизацію в перспективних мережах SDN. Розроблена математична модель відмовостійкої маршрутизації, яка розраховує одразу два шляхи: головний та резервний.

Ключові слова: *математична модель, відмовостійка маршрутизація, Fast ReRoute, захист вузла, захист каналу, захист маршруту, SDN.*

Вступ

Задачі маршрутизації завжди виконували дуже важливі функції в забезпеченні якості обслуговування в сучасних телекомунікаційних системах, які переважно функціонують на основі таких технологій як IP та MPLS. Важливо те, що основним джерелом погіршення якості обслуговування є виникаюча у мережі перевантаженість. На жаль, більшість протоколів маршрутизації забезпечують перерахунок маршрутів з періодом у десятки секунд та не забезпечують оперативне реагування на перевантаження мережі [1 – 4]. Тому для більш швидкого оперативного реагування на можливі відмови в обслуговуванні пакетів, які викликані перевантаженням каналів і чергами маршрутизаторів, все частіше використовуються засоби відмовостійкої маршрутизації, такі як Fast ReRoute. При цьому дуже важливо, щоб маршрутний протокол задовольняв ряду важливих вимог: забезпечував реалізацію різних схем резервування ресурсів і елементів мережі: захист каналу, вузла, маршруту; був адаптований під одно/багато шляхову стратегію маршрутизації, а також наряду з розрахунком самих маршрутів визначав порядок розподілу по них мережевого трафіка. Останнім часом велику популярність набирає технологія SDN, тому в зв'язку з цим пропонується рішення задачі відмовостійкої маршрутизації в SDN шляхом розробки потокової моделі, котра би задовольняла усім вищесказаним вимогам.

Мета статті: дослідження засобів, що забезпечують відмовостійку маршрутизацію в перспективних мережах SDN, та створення математичної моделі відмовостійкої маршрутизації, яка буде розраховувати одразу два шляхи: головний та резервний.

1. SDN архітектура

Програмно-конфігуруємі мережі (SDN, Software-Defined Networking) – це мережі передачі даних, в яких управління трафіком відокремлене від пристроїв передачі даних і реалізується програмно окремими елементами мережі, тобто мережа SDN є набором комутаторів, котрими управляє контролер. Інформацію про те, як саме маршрутизовати трафік, контролери, в свою чергу, можуть отримувати від зовнішніх додатків.

Підхід до побудови SDN кардинально відрізняється від існуючих принципів створення мереж передачі даних: SDN – це мережа з централізованим управлінням, тоді як сучасні мережі припускають наявність множини «розумних» маршрутизаторів,

© О.А. Фещенко

які самостійно визначають маршрути трафіку, ґрунтуючись на інформації, одержаної за протоколами маршрутизації від сусідніх вузлів. SDN позбавляє від необхідності мати рівень управління (Control Plane) у кожному мережевому пристрої, що здешевлює цей пристрій, і вартість мережі в цілому.

Невід'ємною частиною SDN є протокол Openflow (відкритий потік) – протокол і технологія управління процесом обробки даних, що передаються маршрутизаторами і комутаторами. Його контролером може буде як сервер так і звичайний персональний комп'ютер. Це управління замінює або доповнює працюючу на комутаторі (маршрутизаторі) вбудовану програму. Управління даними в OpenFlow здійснюється не на рівні окремих пакетів, а на рівні їх потоків. Головна ідея SDN – відділення функцій передачі трафіку від функцій. У традиційних комутаторах і маршрутизаторах ці процеси реалізовані в одному корпусі: спеціальні мікросхеми забезпечують пересилання пакетів з одного порту на інший, а програмне забезпечення визначає правила такої пересилки, виконує необхідний аналіз пакетів, змінює службову інформацію. Для визначення маршруту передачі або недопущення зациклення трафіку пристрої, звичайно, «спілкуються між собою», для чого розроблено багато протоколів, таких як OSPF, BGP і Spanning Tree, але при цьому кожний функціонує досить автономно.

Згідно концепції SDN, вся логіка управління виноситься в контролери, які здатні відслідковувати роботу всієї мережі. Не можна сказати, що це революційно нова ідея: зв'язківці пам'ятають, що подібну логіку свого часу передбачалося реалізувати при модернізації телефонних мереж, результатом чого стала поява «інтелектуальних мереж», а потім і комутаторів класу Softswitch.

Протокол OpenFlow при визначенні трафіку використовує поняття "потоку". Ключовим елементом комутатора, що підтримує цей протокол, є таблиця протоколів "Flow Table". Група стовпців в лівій частині таблиці формує поля відповідності, де вказані характеристики потоків. Це можуть бути різні параметри, наприклад: MAC-адреса, IP-адреса, номер протокольних портів TCP і UDP та інша інформація. Ці дані за допомогою OpenFlow контролер записує в таблицю комутатора. Він же визначає пріоритети різних потоків.

Вхідні пакети перевіряються на відповідність зазначеним у таблиці параметрам. Якщо відповідність виявлено, до пакетів застосовується дія, яка зазначена в наступному стовпці таблиці. Типовою дією є пересилання пакета на один або кілька вихідних портів. Крім того, комутатор може змінити вміст службових полів пакета, скинути його, направити для аналізу контролеру. У разі, якщо збіг не знайдено, пакет скидається або надсилається контролеру, який визначить, як слід обробляти даний потік, і додасть відповідний запис у таблицю. Статистика по трафіку – кількість пакетів, байтів та інше, розміщується у відповідних полях.

2. Аналіз існуючих протоколів відмовостійкої маршрутизації

Протокол HSRP (Hot Standby Router Protocol) призначений для збільшення доступності маршрутизаторів виконуючих роль шлюзу по замовчанню. Це досягається завдяки об'єднанню маршрутизаторів в резервну групу з одним IP-адресом, який і буде використовуватися як шлюз за замовченням для комп'ютерів в мережі. Active маршрутизатор - маршрутизатор, який відповідає за відправку пакетів, відправлених на IP-адресу, який асоційований з віртуальним маршрутизатором.

Протокол VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol) призначений для збільшення доступності маршрутизаторів виконуючих роль шлюзу. Це досягається шляхом об'єднання групи маршрутизаторів в один віртуальний маршрутизатор та призначення їм загальної IP-адреси, яка і буде використовуватися як шлюз за замовчуванням для комп'ютерів в мережі.

Фактично, віртуальний маршрутизатор - це група інтерфейсів маршрутизаторів, які знаходяться в одній мережі і розділяють VRID (Virtual Router Identifier) і віртуальну IP- адресу.

VRRP - маршрутизатор може перебувати в декількох віртуальних маршрутизаторах, кожен з унікальною комбінацією VRID/IP - адресу. Відповідності між VRID та IP-адресою повинні бути однаковими на всіх маршрутизаторах в одній мережі .

У будь-який момент часу тільки один з фізичних маршрутизаторів виконує маршрутизацію трафіку, тобто, стає VRRP Master router, інші маршрутизатори в групі стають VRRP Backup router . Якщо поточний VRRP Master router стає недоступним, то його роль бере на себе один з VRRP Backup маршрутизаторів, той у якого найвищий пріоритет. Завдання пріоритету дозволяє визначити більш пріоритетні шляхи адміністративно.

Backup - маршрутизатор не буде намагатися перехопити на себе роль Master-маршрутизатора, якщо тільки у нього не вищий пріоритет, ніж у поточного Master-маршрутизатора. VRRP дозволяє адміністративно заборонити перехоплення ролі Master-маршрутизатора. Виключення з цього правила - це VRRP - маршрутизатор завжди буде ставати Master, якщо він власник IP- адреси , що привласнена віртуальному маршрутизатору.

У кожному віртуальному маршрутизаторі тільки Master відправляє періодичні VRRP - оголошення на зарезервовану групову адресу. На канальному рівні в якості MAC-адреси відправника VRRP - оголошень використовується віртуальна MAC- адреса.

Протокол GLBP (Gateway Load Balancing Protocol) працює аналогічно, але не ідентично іншим протоколам резервування шлюзу, таким як HSRP і VRRP . Ці протоколи дозволяють декільком маршрутизаторам брати участь у сконфігурованій віртуальній групі маршрутизаторів із загальною віртуальною IP-адресою. Один член групи вибирається активним маршрутизатором, в той час як інші залишаються неактивними доти, поки не відбудеться збій з активним маршрутизатором. При цьому ці резервні маршрутизатори володіють ресурсами, які майже не використовуються протягом усього часу експлуатації цієї системи. GLBP забезпечує розподіл навантаження на кілька маршрутизаторів використовуючи одну віртуальну IP-адресу та кілька віртуальних MAC-адресів. Кожний хост налаштований з однаковою віртуальною IP-адресою і всі маршрутизатори у віртуальній групі беруть участь у передачі пакетів. Маршрутизатори відправляють один одному повідомлення hello кожні 3 секунди.

Дані протоколи працюють достатньо ефективно, але вони є власністю корпорації Cisco, тому приміняти їх для відмовостійкої маршрутизації в SDN не має можливим.

3. Математична модель відмовостійкої маршрутизації

Нехай структура SDN представлена у виді графа $G = (V, E)$, де V – це множина вузлів, E – множина каналів мережі. Для кожної дуги $(i, j) \in E$ визначимо її пропускну здатність φ_{ij}. Кожному потоку трафіку з множини зіставлен ряд параметрів: d_k, s_k, t_k – інтенсивність k-го трафика, вузол-відправник та вузел –одержувач відповідно.

Нехай керуючої змінною служить величина x_{ij}^k, яка характеризує частку k -го трафіку, що протикає в каналі $(i, j) \in E$.

У рамках моделі мають місце умови збереження потоку у вузлах і в мережі в цілому:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{ij}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{ji}^k = 0; \quad k \in K, \quad i \neq s_k, d_k; \\ \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{ij}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{ji}^k = 1; \quad k \in K, \quad i = s_k; \\ \sum\limits_{j:(i,j)\in E} x_{ij}^k - \sum\limits_{j:(j,i)\in E} x_{ji}^k = -1; \quad k \in K, \quad i = d_k. \end{cases} \qquad (1)$$

З метою запобігання перевантаження каналів зв'язку вводиться умова:

$$\sum_{k\in K} r^k x_{ij}^k \le \varphi_{ij}; \ (i, j) \in E. \qquad (2)$$

Для реалізації одношляхової стратегій маршрутизації необхідно забезпечити задовільнення наступної системи обмежень:

$$x_{ij}^k \in \{0;1\}, \qquad (3)$$

а при використанні багатошляховій маршрутизації:

$$0 \le x_{ij}^k \le 1. \qquad (4)$$

Для визначення запасного (резервного) маршруту необхідно розрахувати змінні $\bar{x}_{ij}^k$, які характеризують частку k-го трафика, що протікає в каналі $(i, j) \in E$ запасного маршрута. На змінні $\bar{x}_{ij}^k$ також накладаються обмеження, подібні (1) – (4). Для запобігання перетину основного і запасного маршрутів з реалізацією різних схем резервування необхідно виконати ряд ключових додаткових умов.

При реалізації схеми захисту (i, j)-каналу в пропоновану модель необхідно ввести умови види:

$$x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \qquad (5)$$

виконання яких гарантує використання (i, j)-каналу лише одним маршрутом – або основним , або запасним. При реалізації схеми захисту i-го вузла модель варто доповнити такою умовою :

$$\sum_{i:(i,j)\in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \qquad (6)$$

виконання якого гарантує використання i-го вузла (тобто всіх інцидентних йому каналів) або основним , або запасним маршрутом.

Для забезпечення захисту колії (шляхів) в структуру моделі необхідно ввести умови – рівності

$$\sum_{(i,j)\in E} x_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k = 0, \qquad (7)$$

що еквівалентно задоволенню вимог щодо відсутності в основному і запасному маршрутах загальних вузлів і каналів (крім вузла-відправника і вузла-отримувача).

Для розрахунку маршрутних змінних x_{ij}^k і $\bar{x}_{ij}^k$ при вирішенні завдань Fast ReRoute в SDN мережі мінімізувалася наступна цільова функція:

$$F = \sum_{k\in K} \sum_{(i,j)\in E} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k\in K} \sum_{(i,j)\in E} \bar{c}_{ij}^k \bar{x}_{ij}^k, \qquad (8)$$

де c_{ij}^k і $\bar{c}_{ij}^k$ – метрики маршрутизації для основного і запасного маршрутів відповідно.

Перший доданок у функції (8) чисельно характеризує умовну вартість використання основного маршруту, а другий - запасного маршруту. У разі якщо всі метрики c_{ij}^k і $\bar{c}_{ij}^k$ дорівнювали одиниці, то оптимальним вважався шлях з мінімальним числом переприйомів. Якщо здійснювався перехід до метриці протоколу IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), тобто $c_{i,j} = 10^7 / \varphi_{i,j}$, по «найкоротшим» вибирався шлях з максимальною пропускною здатністю, що актуально для гетерогенних мереж. В результаті мінімізації виразу (8) здійснювався розрахунок змінних x_{ij}^k і $\bar{x}_{ij}^k$, чому на практиці відповідало ви-

значення двох типів маршрутів між парою вузлів відправник - одержувач - основного і запасного. Причому паралельно з розрахунком маршрутів визначався порядок їх використання трафіками користувачів. Крім того, в ході дослідження моделі (1) - (8) встановлено необхідність її доповнення умовою

$$\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in E} c_{ij}^{k} x_{ij}^{k} \le \sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in E} \bar{c}_{ij}^{k} \bar{x}_{ij}^{k}, \qquad (9)$$

виконання якого гарантує те, що основний шлях завжди буде ефективніше, тобто продуктивніше запасного залежно від вибору метрик c_{ij}^{k} і $\bar{c}_{ij}^{k}$.

За визначенням рішення, пов'язані з резервуванням мережевих ресурсів, погано масштабуються і можуть викликати зниження ефективності управління трафіком , що є певною «платою» за підвищення відмовостійкості.

Для деякого підвищення масштабованості кінцевих рішень при розрахунку змінних $\bar{x}_{ij}^{k}$ від виконання аналога умов (2) можна відмовитися, що призведе до того, що для трафіку, викликаного по основному маршруту, буде гарантована необхідна пропускна здатність в каналах зв'язку, а запасний маршрут буде лише припустимим, без яких гарантій за швидкістю передачі пакетів.. Крім того, для підвищення масштабованості рішень доцільно при розрахунку основного маршруту використовувати умова (4), спрямоване на реалізацію багатошляхової маршрутизації, а при розрахунку запасного маршруту використовувати аналог умови (3) , пов'язаного з одноколійних маршрутизацією .

При реалізації одношляхової відмовостійкій маршрутизації оптимізаційна задача (8) з обмеженнями (1), (2), (4) - (7), (9) відноситься до класу задач змішаного цілочисельного нелінійного програмування. При багатошляховой відмовостійкій маршрутизації , коли справедливі обмеження (1)–- (3), (5) - (7), (9) це вже завдання нелінійної оптимізації, що передбачає застосування відповідних методів.

Висновки

SDN володіє рядом переваг перед існуючими рішеннями. У першу чергу - це ціна. Крім ціни SDN дає більшу гнучкість і універсальність. Незалежно від топології трафік буде розподілятися дуже ефективно за допомогою ПЗ, яке без зусиль можна змінювати під конкретні умови мережі. Важливим фактором, який безпосередньо впливає на якість обслуговування – це надійність мережі, яка забезпечується відмовостійкою маршрутизацією.

У проведеному дослідженні було розроблено модель відмовостійкої маршрутизації для перспективних мереж SDN. Дана модель дозволяє ефективно регулювати трафік при виході з ладу основного шляху. Таким чином, запропонована потокова модель дозволяє для одного й того самого потоку два типа шляхів: головний та резервний. В залежності від параметрів моделі можна реалізувати різні схеми резервування: з захистом каналу, вузла або путі. В ході рішення задачі SDN Fast Reroute мінімізується класична метрика основного та резервного маршруту.

Список літератури

1. *Thomas D. Nadeau SDN: Software Defined Networks / Thomas D. Nadeau, Ken Gray. – N-Y, 2013. – 384 p.*
2. *Thomas A. Limoncelli OpenFlow: A Radical New Idea in Networking / Thomas A. Limoncelli // Communications of the ACM, 2012. – Vol. 10, Is. 6. – P. Net.1 –Net.6.*
3. *Смелянский Р. Программно-конфигурируемые сети [Электронный ресурс] / Р. Смелянский // Открытые системы. СУБД, – 2012. – №9. – Режим доступа к статье: http://www.osp.ru/os/2012/09/13032491.*
4. *Software-Defined Networking (SDN) Definition [Электронный ресурс]. – Режим доступа к матеріалам: https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-definition*

Надійшла до редколегії 3.11.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасєв, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В SDN

О.А. Фещенко

Важным недостатком существующих моделей отказоустойчивой маршрутизации на данном этапе развития технологии является отсутствие оперативного реагирования на перегруженность сети. Большинство протоколов маршрутизации обеспечивают пересчет маршрутов с периодом в десятки секунд, что недопустимо в современной динамической сети. В статье проведено исследование средств, которые обеспечивают отказоустойчивую маршрутизацию в перспективных сетях SDN. Разработана математическая модель отказоустойчивой маршрутизации, которая рассчитывает сразу два пути: главный и резервный.

Ключевые слова: *математическая модель, отказоустойчивая маршрутизация, Fast ReRoute, защита узла, защита канала, защита маршрута, SDN.*

FAULT-TOLERANT ROUTING SDN

O.A. Feshenko

An important drawback of the existing models of fault-tolerant routing at this stage of the technology is the lack of a rapid response to network congestion. Most routing protocols provide re-route with a period of tens of seconds, which is unacceptable in today's dynamic network. In this paper a study resources that provides fault tolerance Advanced routing networks SDN. A mathematical model of fault-tolerant routing that counts just two ways: main and reserve.

Keywords: *mathematical model, fault-tolerant routing, Fast ReRoute, protection unit, channel protection, the protection route, SDN.*