

АНАЛІЗ МЕТОДІВ БАГАТОШЛЯХОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

У статті проаналізовано методи багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах. В умовах швидкого розвитку телекомунікаційних мереж велика увага приділяється маршрутизації. Використання програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж дозволяє удосконалення існуючих телекомунікаційних технологій та їх адаптацію до нових умов функціонування). В ході багатошляхової маршрутизації пакети одного трафіку можуть передаватися одночасно уздовж кількох шляхів, забезпечуючи збалансоване завантаження телекомунікаційної мережі і сприяючи підвищенню, перш за все, швидкісних і пов'язаних з ним ймовірно-часових показників якості обслуговування. Шляхом проведення аналізу існуючих методів і алгоритмів багатошляхової маршрутизації можливо розглянути їх подальші вдосконалення.

Симоненко А.А., Троцько А.А. Кушніренко Д.М. Использование многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетях. В статье проанализированы методы многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетях. В условиях быстрого развития телекоммуникационных сетей большое внимание уделяется маршрутизации. Использование программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей позволяет усовершенствование существующих телекоммуникационных технологий и их адаптацию к новым условиям функционирования. В процессе многопутевой маршрутизации пакеты одного трафика могут передаваться одновременно вдоль нескольких путей, обеспечивая сбалансированное загрузки телекоммуникационной сети и способствуя повышению, прежде всего, скоростных и связанных с ним вероятностно-временных показателей качества обслуживания. Путем проведения анализа существующих методов и алгоритмов многопутевой маршрутизации возможно рассмотреть их дальнейшие усовершенствования.

O. Symonenko, O. Trocko, D Kushnirenko Using multi-path routing in software-configured telecommunication networks. The article analyzes the methods of multi-path routing in software-configured telecommunication networks. With the rapid development of telecommunication networks, much attention is paid to routing. The use of software-configured telecommunication networks allows the improvement of existing telecommunication technologies and their adaptation to new operating conditions. In the process of multi-path routing, packets of one traffic can be transmitted simultaneously along several paths, providing a balanced load on the telecommunications network and helping to improve, above all, the speed and related probability-time indicators of quality of service. By analyzing existing methods and algorithms for multi-path routing, it is possible to consider their further improvements.

Ключові слова: телекомунікаційна мережа, маршрутизація, Software Defined Networking(SDN).

Постановка завдання в загальному вигляді. Стрімкий розвиток телекомунікаційних мереж тісно пов'язаний із реалізацією ідей, що покладені в основу концепції програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж (ПК-ТКМ, Software Defined Networking, SDN). Враховуючи новизну ПК-ТКМ, їх розвиток і впровадження вимагає удосконалення існуючих телекомунікаційних технологій та їх адаптацію до нових умов функціонування [1, 2]. В першу чергу це стосується задач маршрутизації, які в ПК-ТКМ вирішуються централізовано, на спеціальних серверах, які є продуктивнішими, ніж традиційні IP-маршрутизатори. Це дозволяє використовувати більш ефективні і водночас більш складні протоколи маршрутизації для виконання обчислень під реалізацією маршрутизації.

В зв'язку з постійно зростаючими вимогами щодо якості обслуговування (*Quality of Service, QoS*), протоколи маршрутизації розширюють свої класичні функції в напрямку підтримки додаткових можливостей, серед яких балансування навантаження за каналами ТКМ з реалізацією стратегії багатошляхової маршрутизації [3-6]. На практиці, забезпечення балансування навантаженням дозволяє оптимізувати розв'язання задачі маршрутизації і ефективно використовувати ресурси мережі, в результаті чого покращуються значення ключових показників *QoS*.

Ефективність балансування навантаження при розв'язанні задач маршрутизації в ТКМ і в ПК-ТКМ зокрема, багато в чому залежить від адекватності математичних моделей і методів, що використовуються при розробці відповідних протоколів багатошляхової маршрутизації. Проведений аналіз показав, що існуючі математичні моделі і методи багатошляхової маршрутизації не завжди дозволяють забезпечити максимально можливий рівень *QoS*, а інколи взагалі призводять до зациклювання пакетів. Крім того, існуючі моделі і методи не враховують особливості ПК-ТКМ і не адаптовані до них.

До методів багатошляхової маршрутизації висуваються дві групи вимог. Вимоги першої групи являються традиційними для будь-яких алгоритмів маршрутизації і припускають їх низьку обчислювальну складність, швидку збіжність і мінімальні обсяги службового трафіку. Друга група вимог обумовлена необхідністю забезпечення гарантованої якості обслуговування і збалансованого завантаження ТКМ на основі реалізації раніше зазначених принципів концепцій управління трафіком - *Traffic Engineering QoS-based (constraint based) Routing i Load-Balancing Routing*. У зв'язку з тим, що в більшості своїй наведені вимоги за своєю природою є суперечливими, в даний час запропонований цілий ряд підходів до формалізації та вирішення завдань багатошляхової маршрутизації, заснованих на використанні різних методів вирішення виникаючих в тому чи іншому вигляді задач оптимізації [7-10].

Отже, використання програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж при в залежності від методів багатошляхової маршрутизації, що використовуються дозволяє покращити якість передачі, шляхом зміни певних параметрів.

Аналіз останніх публікацій. На сьогоднішній час значна кількість публікацій присвячена дослідженню методів багатошляхової маршрутизації, як в звичайних так і в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах. Розглядаючи сучасні методи багатошляхової маршрутизації, можна зробити висновок, що графокомбінаторний підхід залишався домінуючим в ході протокольних рішень завдань маршрутизації – RIP (*Routing Information Protocol*), IGRP (*Interior Gateway Routing Protocol*), EIGRP (*Extended IGRP*), IS-IS (*Intermediate System - to - Intermediate System*), OSPF (*Open Shortest Path First*), PNNI (*Private Network - to - Network Interface*) і ін. [13]. Перераховані протоколи, в основу яких покладені графові моделі і методи пошуку найкоротшого шляху за допомогою алгоритмів Дейкстри, Беллмана-Форда або Флойда-Уоршела реалізують переважно одношляхову стратегію маршрутизації. Основною перевагою комбінаторних алгоритмів розв'язання задачі пошуку найкоротшого шляху є невисока і заздалегідь відома обчислювальна складність їх реалізації. Недоліки подібних моделей і алгоритмів пов'язані з обмеженими можливостями забезпечення збалансованого завантаження мережі і *QoS* одночасно за кількома показниками. Відповідно до вимог часу з метою забезпечення збалансованого завантаження ТКМ в ряді протоколів маршрутизації передбачене балансування навантаження, що припускає багатошляхову маршрутизацію. Причому протоколи RIP і OSPF виконують балансування навантаження одночасно максимум по шести маршрутах з рівною вартістю (метрикою) [11, 12]. У протоколах IGRP і EIGRP, крім того, підтримується функція балансування навантаження по маршрутам з різною вартістю, що вимагає додаткової, досить трудомісткою і заснованої на евристичних налаштуваннях мережевого обладнання. Крім того, графокомбінаторні методи зазнали зміни не тільки на технологічному (протокольному) рівні, а й істотно модифікувалися на рівні постановки задачі, що дозволило здійснити пошук деякої множини шляхів – мультишляхів (*multipath*) або багаторазових шляхів (*multiple*).

Метою статті є аналіз методів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Виклад основного матеріалу. Програмно-конфігурована мережа (*Software-defined Networking*) – мережа передачі даних, в якій рівень управління мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно, одна з форм віртуалізації обчислювальних ресурсів.

Головна мета SDN є відокремлення рівня додатків від рівня управління і рівня управління від рівня передачі даних. Таким чином, можна значно спростити складність фізичних пристроїв, оскільки виконання логічних функцій повністю переноситься на вищий рівень. Це не тільки здешевлює фізичні пристрої, а й покращує надійність і спрощує управління мережі в цілому. Тепер, замість маршрутизаторів можна використовувати звичайні комутатори. Для адміністратора мережі буде значно легше контролювати мережу в цілому. Також, це дозволяє абстрагуватися від реалізації кожного конкретного пристрою, оскільки рівень управління зв'язується з рівнем даних через стандартний інтерфейс. А це, в свою чергу, значно спрощує взаємодію між пристроями різних виробників, і зменшує час налаштування і підготовки або ремонту всієї мережі. Окрім того, така побудова мережі значно прискорює створення нових мережевих додатків. Оскільки для взаємодії рівнів додатків і управління також використовується стандартний інтерфейс, програмісту більше не потрібно думати про те, яким саме чином можна передавати команди і запити до мережі. Головне реалізувати основний функціонал додатку, а додаток буде взаємодіяти з рівнем контролю через попередньо виділені інтерфейси (Рис. 1). Архітектура SDN схематично зображена на рисунку 1.1.

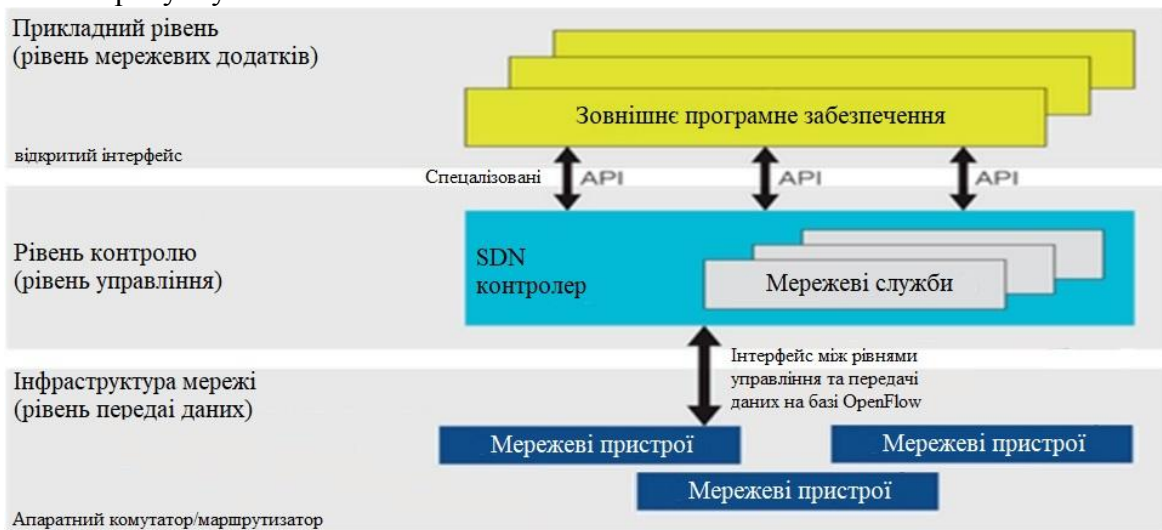


Рис. 1. Архітектура SDN

В програмно-конфігурованих мережах додатки отримують представлення про мережу, на відміну від традиційних мереж, де мережа отримує представлення про додаток:

традиційні (тобто не SDN) додатки лише неявно та опосередковано описують свої вимоги до мережі, зазвичай включають декілька кроків що обробляються мережевими адміністраторами, наприклад, перевірка наявності ресурсів та керування політикою конфіденційності для підтримки додатків;

традиційні мережі (наприклад, сучасний Інтернет та його послуги, такі як веб-браузер, потокове відео) не пропонують динамічний спосіб виразити весь спектр вимог користувачів, наприклад пропускну спроможність, затримку, варіацію затримки або доступність. Пакетні заголовки можуть зашифрувати запити пріоритету, але провайдери мережі зазвичай не довіряють міткам трафіку, що прямує від користувача. Тому деякі мережі намагаються самостійно визначити вимоги до користувачів (наприклад, через аналіз трафіку), що може спричинити додаткові витрати, а іноді й призвести до неправильної класифікації. SDN надає користувачеві можливість повністю вказувати свої потреби в контексті довірених відносин;

традиційні (тобто не SDN) мережі не надають інформацію та стан мережі додаткам, що їх використовують. За допомогою підходу SDN додаток може відслідковувати стан мережі та адаптувати його відповідно.

Відповідно використання багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах дозволяє підвищити швидкість та якість обслуговування.

Багатошляхова маршрутизація в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Для забезпечення надійного управління в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах, важливо використовувати відповідні протоколи маршрутизації. Протоколи маршрутизації призначені для автоматичної побудови таблиць маршрутизації, які використовуються для просування пакетів даних. Алгоритми маршрутизації можна умовно розділити на дві великі групи: одношляхова маршрутизація і багатошляхова. При одношляховій маршрутизації передача інформації здійснюється по одному каналу зв'язку, при багатошляховій – використовується кілька маршрутів до одного вузла призначення. Однією з найважливіших вимог, що висуваються до протоколів маршрутизації, є надійність і відмовостійкість. Ці критерії ефективно задовольняють методи багатошляхової маршрутизації (*multipath routing*). З цієї причини розробці і дослідженню алгоритмів передачі даних одночасно по декількох маршрутах присвячено безліч наукових робіт, тому що вона забезпечує стабільність, балансування навантаженням, запобігання перевантажень і оптимальне використання ресурсів мережі.

В даний час запропоновано багато підходів до формалізації та вирішення завдань багатошляхової маршрутизації, заснованих на використанні різних математичних моделей і алгоритмів рішення в залежності від обраного критерію оптимізації.

Як в одношляховій маршрутизації, так і в багатошляховій виділяють два класи алгоритмів пошуку шляхів: статичні і динамічні (адаптивні) алгоритми. Принципова різниця між ними полягає в ступені обліку зміни топології і навантаження мережі при вирішенні завдання вибору маршруту.

Статична маршрутизація передбачає знаходження декількох шляхів між кожною парою джерело-одержувач заздалегідь. Дані маршрути записуються в таблицю маршрутизації і використовуються при передачі даних. Як правило, такі алгоритми дозволяють враховувати кілька критеріїв при виборі маршруту, але володіють великою обчислювальною складністю, а, отже, і меншою гнучкістю при зміні навантаження в мережі. Такі алгоритми використовуються в надійних мережах, де зміни відбуваються достатньо рідко і потребується жорстко заданий коефіцієнт готовності.

Динамічні протоколи засновані на лавинних алгоритмах маршрутизації і алгоритмах маршрутизації від джерела і здатні динамічно реагувати на зміну топології мережі. Одним з таких протоколів є *Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV)*.

Динамічні протоколи маршрутизації, що застосовуються в даний час в обчислювальних мережах, діляться на три групи, кожна з яких пов'язана з одним з наступних типів алгоритмів:

- дистанційно-векторні протоколи (*Distance Vector Algorithms, DVA*);
- протоколи стану каналу (*Link State Algorithms, LSA*);
- гібридні протоколи.

У протоколах дистанційно-векторного типу кожен маршрутизатор періодично і ширококомовно розсилає по мережі вектор, компонентами якого є відстані від даного маршрутизатора до всіх відомих йому мереж. Під відстанню зазвичай розуміється число переходів. Можлива й інша метрика, що враховує не тільки число проміжних маршрутизаторів, а й час проходження пакетів по мережі між сусідніми маршрутизаторами. При отриманні вектора від сусіда маршрутизатор нарощує відстані до вказаних у векторі мереж на відстань до даного сусіда. Отримавши вектор від сусіднього маршрутизатора, кожен маршрутизатор додає до нього інформацію про відомі йому інші мережі, про які він дізнався безпосередньо (якщо вони підключені до його портів) або з аналогічних оголошень інших маршрутизаторів, а потім знову розсилає нове значення вектора по мережі. Кожен маршрутизатор дізнається інформацію про всі наявні в інтермережі мережах і про відстань до них через сусідні маршрутизатори.

Протоколи стану каналу забезпечують кожен маршрутизатор інформацією, достатньою для побудови точного графа зв'язків мережі. Всі маршрутизатори працюють на основі однакових графів, що робить процес маршрутизації стійкішим до змін конфігурації. Широкомовна розсилка використовується тут тільки при змінах стану зв'язків, що

відбувається в надійних мережах не так часто. Вершинами графа є як маршрутизатори, так і об'єднані ними мережі. Інформація, що розповсюджується по мережі складається з опису зв'язків різних типів: маршрутизатор - маршрутизатор, маршрутизатор - мережа.

Гібридні протоколи працюють за принципами дистанційно-векторних протоколів, але будують таблиці маршрутизації, як протоколи стану каналу.

Важливим фактором при виборі метода маршрутизації є логічна топологія мережі. При такому підході вдалим рішенням є графові моделі і використання відповідних алгоритмів пошуку найкоротших шляхів. Вони є статичними і забезпечують попереднє резервування каналів. Як правило, вважається достатнім знаходження двох непересічних шляхів або декількох шляхів в залежності від встановлених обмежень. Вибір кількості необхідних шляхів при передачі трафіку методами багатошляхової маршрутизації має дуже важливе значення. Для вирішення завдань багатошляхової маршрутизації засобами моделювання можна виділити:

- мережеве моделювання;
- моделі, засновані на мережах масового обслуговування;
- моделі, засновані на використанні інтегрально-диференціальних та різницевих рівнянь стану ТКМ;
- моделі з підтримкою гарантованого QoS.

З точки зору резервування існують алгоритми, в яких виділяється додатковий резервний канал. При цьому цей канал може спільно використовуватись з іншою групою шляхів (*shared-link*), або ж відноситися тільки до однієї групи. Дана умова дозволяє управляти коефіцієнтом готовності шляху для забезпечення необхідних гарантій якості обслуговування. Однак, основною перевагою багатошляхової маршрутизації є відсутність холодного резерву та використання всіх шляхів з оптимальним розподілом навантаження по ним. Тому найбільшого поширення все ж мають методи без резервування. У таких алгоритмах обрані шляхи забезпечують саморезервування і не вимагають виділення додаткових ресурсів. На підставі вищевикладеного можна виділити ще два класи алгоритмів за типом використання знайдених шляхів: багатошляхова маршрутизація з резервуванням і багатошляхова маршрутизація з використанням всіх знайдених шляхів. Якщо використовуються всі знайдені шляхи, то з точки зору розподілу трафіку і балансування навантаження виділяють рівномірний розподіл (лавинна маршрутизація) і виважений розподіл (критеріальний підхід). При рівномірному лавинному балансуванні пакети рівномірно розподіляються по всіх знайдених шляхах незалежно від адреси джерела і призначення. Прикладом такого алгоритму слугують методи, що працюють за принципом *round robin*. Це, так званий, по пакетний розподіл. Також існує рівномірний розподіл за адресою отримувача. Принциповою відмінністю є аналіз адреси одержувача при направленні пакетів.

Зважене балансування навантаження передбачає розрахунок деяких метрик, на підставі яких знайденим шляхам присвоюються коефіцієнти розподілу трафіку. І у разі відмови одного або декількох шляхів дані метрики враховуються при перерозподілі трафіку зі шляху, що відмовив. Як правило, в таких алгоритмах використовується одна метрика, тобто один критерій, який повинні задовольняти знайдені шляхи. Наприклад, смуга пропускання, або значення затримки. При цьому забезпечується більша гнучкість з точки зору задоволення вимог QoS, але значно зростає складність алгоритму і час розрахунку маршруту. Тому багатошляхова маршрутизація використовується зазвичай в алгоритмах статичної маршрутизації. Іншим протоколом, що використовує одразу декілька метрик для пошуку маршрутів і балансування трафіку, є EIGRP, розроблений компанією *Cisco*.

З точки зору здійснення пошуку маршруту розрізняють маршрутизацію від джерела (*source routing*) і покрокову маршрутизацію з обробкою маршрутною інформацією на проміжних вузлах (*intermediate routing*). При маршрутизації від джерела пошук шляху для передачі пакетів здійснює вузол, який є джерелом. При цьому в заголовку переданого пакета міститься інформація про увесь шлях просування пакета.

В такому випадку проміжним вузлам залишається лише здійснювати пересилання пакета без додаткової обробки і побудови своєї таблиці маршрутизації. Недоліком даної технології є погана масштабованість, так як зі збільшенням кількості вузлів в мережі, також збільшується розмір заголовка пакету. При використанні покрокової маршрутизації джерело передає пакет на проміжний вузол, а не будує відразу весь шлях до одержувача. У свою чергу, проміжний вузол вже направляє пакет до одержувача. Це, так звана, двофазна маршрутизація. В основі зазначених алгоритмів лежить балансування навантаження по Валіанту (*Valiant Load Balancing*) [21]. Покрокова маршрутизація застосовується в великих масштабованих мережах.

В результаті маршрутизація від джерела забезпечує знаходження непересічних шляхів, а покрокова маршрутизація являється масштабованою. Тим самим при об'єднанні позитивних якостей двох методик може бути запропонована гібридна покрокова маршрутизація від джерела. При цьому вузол джерело шукає непересічні шляхи до одержувача через проміжні вузли і спочатку відправляє пакети їм, а звідти вони будуть спрямовані до одержувача. При цьому важливим моментом є вибір ключових вузлів, через які здійснюється передача. В цілому можна помітити, що класифікація методів багатошляхової маршрутизації має багато спільного з класифікацією одношляхової маршрутизації. Однак, у неї є свої відмінні риси, наприклад такі як спосіб балансування навантаження, використання загальних елементів одночасно декількома групами шляхів. На рис. 1 представлена узагальнена схема класифікації методів багатошляхової маршрутизації [19].



Рис. 1. Узагальнена схема багатошляхової маршрутизації

У табл.1 представлені методи багатошляхової маршрутизації, робота яких ґрунтується на алгоритмах пошуку маршрутів в мережі між заданою парою вузлів [13 – 23]. Наприклад, суть алгоритму багатошляхової маршрутизації МРАТН [14, 16] полягає у знаходженні графа маршрутизації, представленого множиною дуг:

$$SG_i = m, n | n \in S_j^m, m \in M$$

де M – множина вузлів мережі, M_i – множина вузлів-сусідів i -му вузлу, S_j^m – множина варіантів подальшої передачі пакетів від вузла i до вузла j .

Основна ідея узагальнення дерева найкоротших шляхів, одержуваних в рамках алгоритмів Дейкстри і Беллмана-Форда, в граф найкоротших мультишляхів полягає в переході від множини

$$S_j^i = k \in M^i | D_j^k + c_k^i = D_j^i$$

ДО МНОЖИНИ

$$S_j^i = k \in M^i | D_j^k < D_j^i$$

де D_j^k і D_j^i – найкоротші шляхи від вузлів i та k до вузла j , а величина c_k^i – вартість (вага) дуги (i, k) .

В методі багатошляхової маршрутизації з використанням алгоритму МРАТН рішення задачі багатошляхової маршрутизації буде являти собою необхідний найкоротший шлях без петель.

Таблиця 1

Методи багатошляхової маршрутизації на основі різних алгоритмів роботи

Методи на основі алгоритму	Суть роботи	Тип
ECMP (Equal Cost Multipath) [13, 22]	Алгоритм розрахунку шляхів рівної вартості. Може використовуватися в розширеннях протоколу OSPF, оптимізованого під багатошляхові рішення.	Стану каналів
MPA (Multiple Path Algorithm) [13]	Алгоритм знаходження мультишляхів. Може використовуватися в розширеннях протоколу OSPF, оптимізованого під багатошляхові рішення.	Стану каналів
DSPA (Discount Shortest Path Algorithm) [14, 22]	Алгоритм відмови від найкоротшого шляху. Використовується для мінімізації затримки пакетів. Враховує кількість і незалежність (не перетинання) шляхів в мережі.	Дистанційно-векторний
CRA (Capacity Removal Algorithm) [14]	Використовується для максимізації продуктивності мережі. Враховує зміну стану трактів для обчислення шляхів, максимізує потік між вузлами.	Стану каналів
DASM (Diffusing Algorithm for Shortest Multipath) [14, 18]	Узагальнює алгоритми Дейкстри/Шолтена, гарантує відсутність петель в таблицях багатошляхової маршрутизації, що розраховуються і забезпечує балансування завантаження ресурсів мережі.	Дистанційно-векторний
ROAM (Routing OnDemand Acyclic Multipath) [22]	Алгоритм маршрутизації за вимогою, який підтримує багатошляховий спосіб доставки пакетів без утворення петель. Розраховує множину незалежних шляхів доставки. Вирішено проблему пошуку в нескінченність.	Дистанційно-векторний
MDVA (multipath distance vector algorithm) [14, 17, 21]	Узагальнює розподілений алгоритм Беллмана-Форда на випадок розрахунку множини найкоротших шляхів.	Дистанційно-векторний
MPATH (Multipath Routing Algorithm) [14, 16, 20]	Узагальнює дерево найкоротших шляхів, що отримані в рамках алгоритмів Дейкстри і Беллмана-Форда, в граф найкоротших мультишляхів різної вартості.	Дистанційно-векторний
MPDA (Multipath Partial Dissemination Algorithm), QMPDA (Quality Multiple Partial Dissemination Algorithm) [14, 19]	Алгоритми з частковим поширенням інформації про стан мережі. Вони забезпечують розрахунок множини безпетельних шляхів з урахуванням зміни стану трактів мережі, в т.ч. при виході їх з ладу (QMPDA). Синхронізація інформації про стан мережі обмежена одним переприйманням. QMPDA також підтримує різні класи обслуговування трафіків.	Стану каналів

Наприклад, суть алгоритму багатошляхової маршрутизації МРАТН [14, 16] полягає у знаходженні графа маршрутизації, представленого множиною дуг

$$SG_i = m, n | n \in S_j^m, m \in M$$

де M – множина вузлів мережі, M_i – множина вузлів-сусідів i -му вузлу, S_j^m – множина варіантів подальшої передачі пакетів від вузла i до вузла j .

Основна ідея узагальнення дерева найкоротших шляхів, одержуваних в рамках алгоритмів Дейкстри і Беллмана-Форда, в граф найкоротших мультишляхів полягає в переході від множини

$$S_j^i = k \in M^i | D_j^k + c_k^i = D_j^i$$

до множини

$$S_j^i = k \in M^i | D_j^k < D_j^i$$

де D_j^k і D_j^i – найкоротші шляхи від вузлів i та k до вузла j , а величина c_k^i – вартість (вага) дуги (i, k) .

В методі багатошляхової маршрутизації з використанням алгоритму МРАТН рішення задачі багатошляхової маршрутизації буде являти собою необхідний найкоротший шлях без петель.

Поряд із зазначеними перевагами графокомбінаторних методів і алгоритмів (табл.1), варто відзначити ряд важливих недоліків, істотно обмежуючих їх практичну реалізацію в сучасних мультисервісних ТКМ. По-перше, узгоджене рішення задач балансування навантаження, маршрутизації і забезпечення QoS в рамках графових моделей і комбінаторних алгоритмів, оптимізованих під однопродуктові двополюсні мережі, з ростом числа трафіку (продуктів) в мережі наштовхується на ряд серйозних труднощів описового і обчислювального характеру, так як передбачається, що всі мережеві ресурси виділені одному трафіку. По-друге, основна перевага розглянутих моделей, що складається в простоті і прогнозованій обчислювальній складності реалізації, зі зростанням кількості показників QoS (три і більше) зводиться до нуля, оскільки завдання пошуку навіть одного найкоротшого шляху в цьому випадку стає скаладною.

Варто відзначити, що рішення завдань багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах спочатку не вкладалося в рамки графокомбінаторних моделей, так як вони не дозволяють коректно математично описати процеси динаміки стану, забезпечення мультисервісу і гарантованої якості зв'язку більш ніж за двома показниками. В сучасних умовах пошук найкоротшого шляху (мультишляху) для кожного трафіку, що обслуговується, не завжди є навіть необхідною (а тим більше достатньою) умовою успішного вирішення завдань маршрутизації, оскільки як і раніше залишається відкритим питання розподілу ресурсів уздовж кожного з шляхів. В умовах, коли рішення маршрутних завдань складне, а іноді і практично неможливе, то застосування методів що працюють за комбінаторними алгоритмами стає недоцільним, або ж їх використовують спільно з іншими методами пошуку [19].

Особливо це характерно для задач, в яких крім параметрів мережі необхідно враховувати безліч зовнішніх чинників, наприклад параметри інформаційних потоків.

Незважаючи на обмеженість можливостей графокомбінаторних математичних моделей, відсутність жорстких вимог до якості рішення маршрутних завдань раніше сприяло широкому поширенню подібних алгоритмів. У зв'язку з цим графові методи і комбінаторні алгоритми БШМ можуть розглядатися лише як тимчасовий (проміжний) крок між реалізованими на практиці і перспективними рішеннями при задоволенні комплексу вимог, висунутих до програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж.

Потокові моделі займають ключове місце в засобах математичної формалізації задач багатошляхової маршрутизації, оскільки в даний час на практиці трафік (аудіо, відео) носить чітко виражений поточковий характер. Наочність і логічна обґрунтованість цих моделей нерідко дозволяє виробити новий і досить природний підхід до вирішення поставленого завдання, що дозволяє визначити шляхи подальшого прикладного аналізу. Значний внесок у розвиток поточкових моделей і методів їх аналізу внесли Хітчкок і Купманс, Форд і Фалкерсон, Елмаграбі, Бредлі, Магнанті і Голден, Френк і Фріш, Саати, Ху і ін. [22].

Важливо відзначити, що при використанні поточкових моделей основна увага приділяється вивченню особливостей структури мережі, що грає головну роль в підвищенні ефективності обчислювальних алгоритмів. В значній мірі мережевий аналіз заснований на

теорії графів. Однак мережеве моделювання в порівнянні з комбінаторними методами розрахунку графових моделей ТКМ дозволяє отримати теоретичні результати і обчислювальні алгоритми, в яких більш повно проводиться облік параметрів трафіку, що важливо при вирішенні задач забезпечення QoS. У мережевих моделях кожна дуга характеризується трьома параметрами: мінімальним значенням потоку, який може протікати по дузі (нижня межа); пропускну спроможністю, яка показує, який максимальний потік можна передавати по дузі (верхня межа); вартістю передачі одиниці потоку по даній дузі

Крім необхідності забезпечення збалансованого завантаження ТКМ в рамках поточкових моделей знайшов своє застосування підхід, заснований на використанні теорії масового обслуговування з метою врахування часових параметрів якості обслуговування.

При цьому передбачається, що всі канали зв'язку абсолютно надійні і завадостійкі, ємність буферної пам'яті на вузлах є необмеженою, а час обробки у вузлах дуже малий. Потік, що надходить в мережу, вважається пуассонівським, при цьому довжини всіх пакетів передбачаються незалежними і розподіленими по показовому закону.

Одним з основних моментів є прийняття „гіпотези про незалежність”, яка передбачає, що при об'єднанні кількох потоків в лінії передачі зберігається незалежність між інтервалами надходження і довжинами пакетів.

Згідно з проведеним аналізом при моделюванні процесів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах найбільш прийнятним представляється підхід, заснований на комбінованому використанні можливостей графових (графокомбінаторних), поточкових і тензорних методів маршрутизації. При цьому використання графокомбінаторних моделей дозволяє істотно знизити обчислювальну складність рішень за рахунок попереднього розрахунку шляхів доставки переданих пакетів.

Висновки.

Використання різних методів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах має очевидні переваги:

підвищення ефективності використання пропускну здатності каналів, балансування навантаженням в мережі;

спрощення управління мережею, підвищення масштабованості мережі;

підвищення безпеки мереж;

ефективніший розрахунок маршрутів;

зниження витрат;

повне прогамування мережі;

підвищення надійності функціонування мережі за допомогою централізованого управління конфігурацією мережевих параметрів на рівні сесій, користувачів, пристроїв і додатків;

динамічне підстроювання ємності віртуальної мережі та інших параметрів під зростаючі потреби клієнта без зміни фізичної топології;

створення ізольованих віртуальних мереж для кожного користувача на базі єдиної фізичної інфраструктури;

спрощення функціоналу проміжних пристроїв.

Отже, використання різних методів багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах має великий потенціал і допомагає вирішити проблеми, що зустрічаються в класичних підходах до організації мереж, зокрема зменшити витрати на організацію мережі за рахунок використання більш простих пристроїв і спростити контроль за мережею, за рахунок чіткого відокремлення рівня даних і рівня управління. Тому в подальшому пропонується удосконалити метод багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гургенидзе А.Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. / Гургенидзе А.Т., Кореш В.И. – СПб.: Наука и Техника, 2013.
2. Валов С. Г. Инфо-коммуникационные сети будущего: общие принципы. / Валов С. Г., Гольшко А. В. – Вестник связи. 2013. № 2. С. 52 – 61.
3. Вегенша Ш. Качество обслуживания в сетях IP. / Вегенша Ш. – М.: Издательский дом „Вильямс”, 2013. 386 с.
4. Денисова Т.Б. Мультисервис-ные АТМ сети. / Денисова Т.Б., Лихтциндер Б.Я., Назаров А.Н., Симонов М.В., Фомичев С.М. – М.: Эко Трендз, 2015. 320 с.
5. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS. / Олвейн В. – М.: Издательский дом „Вильямс”, 2014. 480 с.
6. Алленов О. М. Технология GMPLS / Алленов О. М. – Вестник связи. 2012. № 9. С. 72- 78.
7. Simha A. Traffic Engineering with MPLS. / Simha A., Osborne E. – Cisco Press, 2012. 608 p.
8. Psounis K. Active networks: applications, security, safety and architectures / Psounis K. – Proc. IEEE Communications Surveys. 2010. P. 2 – 16.
9. ChenKhong T. A QoS-based routing algorithm for PNNI ATM networks / ChenKhong T., Jianning M., Lawrence W. C. – Comput. Commun. – 2012. Vol.25, № 7. P. 714 – 729.
10. Keslassy I. Optimal Load-Balancing / Keslassy I., Chang C., McKeown N., Lee D. – Proc. IEEE Infocom '05. Miami, 2015. Vol.4, № 3. P. 1054 – 1065.
11. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. / Остерлох Х. – СПб.: BHV. С.Пб., 2012. 512 с.
12. Руденко И. Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей. / Руденко И. – М.: КУДИС-ОБРАЗ, 2013. 656 с.
13. Lee G. M. A survey of multipath routing for traffic engineering / Lee G. M. – Proc. of LNCS 3391. Springer-Verlag, 2015. Vol. 4. P. 635 – 661.
14. Vutukury S. Multipath routing mechanisms for traffic engineering and quality of service in the Internet / Vutukury S. – PhD Dissertation. University of Kalifornia, 2011. 152 p.
15. Vutukury S. MDVA: A Distance-Vector Multipath Routing Protocol / Vutukury S., GarciaLuna-Aceves J. J. – Proc. IEEE INFOCOM. Anchorage, 2011. P. 557 – 564.
16. Vutukury S. A Distributed Algorithm for Multipath Computation. / Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. – Proc. IEEE GLOBECOM. Rio de Janeiro, 2015. P. 1203-1207.
17. Vutukury S. An Algorithm for Multipath Computation Using Distance-Vectors with Predecessor Information / Vutukury S., Garcia-LunaAceves J. J. – Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Boston, 1999. P. 534 – 539.
18. Zaumen W. T. Loop-Free Multipath Routing Using Generalized Diffusing Computations / Zaumen W. T., GarciaLuna-Aceves J.J. – Proc. IEEE INFOCOM '98. San Francisco, 1998. P. 1408 – 1417.
19. Шувалов В. П. Классификация методов многопутевой маршрутизации / Шувалов В.П., Варакина И.Ю. – TComm #12014. С. 29 – 32.
20. Vutukury S. A Simple Approximation to Minimum Delay Routing / Vutukury S., Garcia-LunaAceves J.J. – Proc. ACM SIGCOMM. Cambridge, 1999. P.39 – 50.
21. Евсева О.Ю. Поточковая модель процессов маршрутизации с гарантированным качеством обслуживания / Евсева О.Ю., Лемешко А.В., Кравчук А.А. – Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2004. Вып. 138. С. 32 – 37.
22. Форд Л. Потоки в сетях. / Форд Л., Фалкерсон Д. – М.: Мир, 1966. 276 с.