

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)
Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

спеціалізація Мобільні телекомунікації

на тему: Метод підвищення ефективності застосування VNF в телекомунікаційних мережах

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ТМ-71мп
(шифр групи)

_____ П'янтковська Наталя Олегівна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ Валуйський С.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 рік

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: Метод підвищення ефективності застосування VNF в телекомунікаційних мережах.

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Спеціалізація Мобільні телекомунікації

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

П'янтковської Наталі Олегівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Метод підвищення ефективності застосування VNF в телекомунікаційних мережах»

науковий керівник дисертації Валуйський С.В.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» «__» 2018р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження _____

4. Предмет дослідження _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Дослідити особливості використання віртуалізованих мережевих функцій для ефективного використання ресурсів мережі.

2. Розробити математичну модель зниження .

3. Розробити функцію визначення кількості каналів зв'язку з БС макростільника при використанні технології малих віртуальних стільників.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 1 листопада _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз пропозицій та рекомендацій щодо проектування мережі.	4 листопада 2017	виконала
2	Аналіз технології віртуалізації, її використання у мережах.	20 березня 2018	виконала
3	Розгляд технології VNF, переваги та недоліки для використанні у мережі.	17 травня 2018	виконала
4	Постановка задачі та опис технології застосування VNF.	28 жовтня 2018	виконала
5	Розробка математичної моделі для визначення параметрів мережі при використанні технології малих віртуальних стільників.	8 листопада 2018	виконала
6	Побудова графіків та висновки щодо роботи.	14 листопада 2018	виконала
7	Оформлення магістерської дисертації	30 листопада 2018	виконала

Студент

(підпис)

П'янтковська Н.О.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Валуйський С.В.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

на магістерську дисертацію

виконану на тему: Метод підвищення ефективності застосування VNF в телекомунікаційних мережах.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ЯК СПОСІБ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ	15
1.1. Постановка проблеми та короткий опис поточного стану на ринку ..	16
1.2. Переваги інтеграції NFV.....	18
1.3. Архітектура NFV	19
1.4. Бізнес-модель взаємодії NFV	26
Висновки	33
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ NFV: ЇЇ ОСОБЛИВОСТІ, ПИТАННЯ ЩОДО ПЛАНУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ.....	34
2.1. Постановка проблеми та короткий опис поточного стану справ на ринку.....	34
2.1.1. Взаємозв'язок з SDN	37
2.1.2. Мережеві функції	38
2.2. Поля застосування	38
2.3. Переваги віртуалізації мережевих функцій	41
2.4. Можливості для мережевих функцій віртуалізації	44
2.4.1. Хмарні обчислення.....	44
2.5. Виклики для віртуалізації мережевих функцій	45
Висновки	48
РОЗДІЛ 3	50
3.1. Проблеми застосування VNF	54
Висновки	58
РОЗДІЛ 4. МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ VNF.....	60

4.1. Технічні питання NFV.....	60
4.2. Проблематика.....	63
4.3. Опис технології формування.....	64
4.4. Математичне формулювання	67
4.5. Задачі і аспекти впровадження технологій віртуалізації	72
4.6. Практичне застосування	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AAA Authentication-Authorisation-Accounting

API Application Programming Interface (a set of routines, protocols, and tools for building software applications)

ASIC Application Specific Integrated Circuit

BNG Broadband Network Gateway

BRAS Broadband Remote Access Server

BSS Business Support System

CAPEX Capital expenditure

CDN Content Distribution Network

CG-NAT/NAT Carrier Grade Network Address Translation

COTS Commercial off-the-shelf

CPU Central Processing Unit

DHCP Dynamic Host Configuration Protocol

DMA Direct memory access

DNS Domain Name Service

DPDK Data Plane Development Kit

DPI Deep Packet Inspection

DSL Digital Subscriber Line (typically ADSL2/+, VDSL2, G.fast)

Ecosystem Equipment and software vendors, integration services vendors, network operators, service providers, academia, etc.

EMS Element Management System

EPC Evolved Packet Core

ETSI European Telecommunications Standards Institute (in practise ETSI has global membership, including the Americas and Asia) .

HSS Home Subscriber Service

HV Hypervisor

I/O Input/Output

IoT Internet of Things

IMS IP Multimedia System

Industry Standard High Volume Server A server built using standardised IT components (for example x86 architecture) and sold in the millions.

InP Internet Provider

IPR Intellectual Property Rights

IPSec/SSL IP Security/ Secure Sockets Layer

IPv6 Internet Protocol version 6

ISG Industry Specification Group. An organisation under the auspices of the European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

ISSU In Service Software Upgrade

IT Information Technology

KVM Kernel based Virtual Machine

LAN Local Area Network

LB Load Balancer

LXC Linux Containers

MANO NFV management and organization

M2M Machine-to-Machine communications

MME Mobility Management Entity

MVNO Mobile Virtual Network Operator

NF Network Functions

NFV Network Functions Virtualisation

NFVI Network Functions Virtualisation Infrastructure

NGN Next Generation Network

NIC Network Interface Controller

NMS Network Management System

NUMA Non-Uniform Memory Access

OAM Operations Administration & Maintenance

OGF Open Grid Forum

ONF Open Networking Foundation

OpenFlow Specifications developed by the Open Networking Foundation

OpenNaaS Specifications developed by the OpenNaaS community

OpenStack Specifications developed by the OpenStack Foundation

OPEX Operating expense

OSS Operations Support System

PDN-GW Packet Data Network Gateway

PE Router Provider Edge Router

PoP Point of Presence

QoE Quality of Experience

SBC Session Border Controller

SDN Software Defined Network

SDO Standards Development Organisation

SGSN/GGSN Serving GPRS support node/Gateway GPRS support node

SLA Service Level Agreement

SP Service Provider

RGW RADOS GateWay

TOMS Telecom Operators Management System

TCP Transmission Control Protocol

TE Traffic Engineering

TSPs Telecommunication Service Providers

VIM Virtualized Infrastructure Manager

VM Virtual Machine

VMWare Proprietary Hypervisor

VNA Virtualised Network Appliance

VNF Virtualised Network Functions

VNFP Virtualised Network Functions Provider

VPN Virtual Private Network

vswitch Any Ethernet switch implemented in software alongside or inside a hypervisor. There are proprietary and open implementations of vswitch.

WAN Wide Area Network

Xen Proprietary Hypervisor

ВСТУП

Сучасне суспільство важко уявити без інформаційних технологій, адже кожна людина хоч раз зверталася за допомогою до інформаційних ресурсів. Сучасність характеризується стабільним зростанням обсягу інформаційних потоків і це відноситься практично до будь-якої сфери діяльності людини. Інформація являє собою один з основних, вирішальних чинників, який визначає розвиток технології і ресурсів в цілому. Оскільки телекомунікаційна індустрія вступає в епоху, яка характеризується ультра–широкосмуговими мережами та повними з'єднаннями, традиційні послуги голосового спілкування, пошти та передачі повідомлень більше не відповідають комплексним і персоналізованим вимогам користувачів. Оскільки мобільні мережі розширюються, а темп приросту користувачів Інтернету та підключених пристроїв ІОТ зростає, це призводить до епохи масового трафіку даних. Те, що потрібно для вирішення цього завдання – це розвинена цифрова мережа, здатна обробляти величезну кількість даних без проблем і легко. Ця інфраструктура інформації та комунікацій дозволяє забезпечити високу надійність різноманітних послуг зв'язку.

Нині бізнес телекомунікаційних підприємств стає все більш складним, різноплановим і динамічним. Такі чинники як нові технології, персонал, інформація, капітал, організаційний дизайн, комунікації швидко змінюються зумовлюючи формування нових телекомунікаційних ринків. На підвищення конкурентоспроможності телекомунікаційних підприємств істотно впливає ринкове оточення, в якому функціонує підприємство, а також його особливості. За означених умов, телекомунікаційні підприємства змушені постійно розробляти і застосовувати адекватні конкурентні стратегії, щоб зайняти стійку конкурентну позицію на ринку. Вимога конкурентного середовища – завжди дотримуватись вимог технічного, технологічного, інформаційного прогресу і швидко змінюватись відповідно до постійних мінливих умов.

Щоб відповідати різноманітним потребам та бізнес-задачам телекомунікаційних компаній, провайдери пропонують рішення у таких сферах як бездротовий широкосмуговий доступ, мобільний зв'язок, підводні кабельні системи, рішення щодо операцій та управління телекомунікаціями (TOMS) та SDN (Software-Defined Networking) / NFV (віртуалізація мережевих функцій).

Технології SDN / NFV привертають увагу як рішення для задоволення потреб диверсифікації послуг зв'язку та збільшення обсягів та швидкості руху. Оператори ведуть конкуренцію в наданні комерційних рішень SDN / NFV. Технології віртуалізації застосовуються не тільки до мереж, але й до сервісних вузлів обслуговування. Це дозволяє гнучко розподіляти оптимальні ресурси по всій мережі, щоб впоратись із зміною обсягу трафіку. Технології SDN / NFV почали давати відповіді на цей виклик, але наступним важливим кроком є повне комерціалізація цих віртуалізованих сервісів та їх готовність до масштабного виконання з великою кількістю партнерів. Віртуалізація мереж та послуг стала більше, ніж концепцією; вона є діловою вимогою, що потребує ефективних методів трансформації, перевіреної технології та рішень, які готові до стриманості динамічного ринку.

На щорічних всесвітніх форумах було розроблено єдине рішення для корпоративних комунікацій, які інтегрують оператори від хмари до пристрою. Завдяки філософії хмарності, інтеграції та відкритості, ці рішення дозволяють операторам швидко розширюватися на ринку послуг. Єдиний багаторівневий портал об'єднує всі операції з хостингу та надання послуг, що дозволяє корпоративним клієнтам самостійно придбати і керувати ними. Оператори також можуть запропонувати розумніші, якісні послуги зв'язку своїм корпоративним клієнтам, відкривши свої мережеві можливості для партнерів та інноваційно нові послуги. Коли перевізники зможуть інтегрувати служби комунікації в потоки робочих процесів і процеси роботи підприємства, пропонуючи бездоганний, послідовний досвід роботи, вони зможуть допомогти своїм корпоративним клієнтам працювати ефективно та

оперативно. Це означає, що оператори можуть дозволити підприємствам трансформуватися для цифрового майбутнього.

Метою магістерської роботи є проведення аналізу характеристик технологій віртуалізації, задля вибору підходящого рішення для впровадження в хмарному середовищі.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Провести аналіз особливостей технології віртуалізації.
2. Дослідити архітектуру технології віртуалізації.
3. Дослідити архітектуру віртуальних мережевих функцій та розглянути основні рішення їх застосування.
4. Розглянути основні показники ефективності впровадження ВМФ в телекомаунікаційні мережі.
5. Використовуючи макети віртуальної машини, проаналізувати придатність використання ВМФ в системі хмарних сервісів.

Об'єктом дослідження виступають віртуальні функції мережі, в тому числі сервери, а предметом дослідження – технології віртуалізації.

РОЗДІЛ 1. ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ЯК СПОСІБ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Термін "віртуалізація" десятиліттями використовується в різних галузях інформатики: віртуалізація серверів (або віртуальних машин), віртуалізація дисків та віртуалізація додатків (наприклад, віртуальна машина Java) та інше. Як правило, віртуалізація представляє шар абстракції між користувачем та обчислювальним ресурсом, що приховує фізичні характеристики цього ресурсу. Віртуалізація зазвичай використовується для досягнення таких цілей, як ефективне використання ресурсів та легкість управління. У нашій роботі ми зосереджені на віртуалізації комп'ютерних систем для запуску декількох віртуальних машин, які виступають мережевими функціями. Фізичні ресурси (наприклад, процесор та пам'ять) комп'ютерної системи розподіляються за допомогою технології віртуалізації та призначаються для різних функцій віртуальної мережі. У цьому розділі ми розглядаємо роль віртуалізації в області мережевого зв'язку та короткочасне представлення архітектури NFV.

Стверджується, що сучасна архітектура Інтернету страждає від осіфікації, що ускладнює проведення інноваційних мережеских експериментів на апаратному мережевому обладнанні. Це відбувається з двох причин. По-перше, обладнання на апаратному забезпеченні забезпечує обмежену програмуваність, і для перевірки нового протоколу або алгоритму часто необхідне перероблення обладнання. По-друге, апаратне обладнання, яке використовується у виробництві та тестуванні на тому ж устаткуванні, може вплинути на виробничий трафік. Віртуалізація мережі представлено як рішення до проблеми осіфікації шляхом віртуалізації будівельних блоків мережі (тобто вузлів і посилань). Таким чином, віртуальна мережа, яка складається з різних віртуальних вузлів і посилань, інвенціонує в фізичній мережі. Крім того, декілька віртуальних мереж (наприклад, експериментальні, виробничі тощо) можуть бути спільно розташовані в тій

же фізичній мережі, і кожна віртуальна мережа може бути запрограмована та керована незалежно. Абстракція віртуальних мереж обіцяє програмування та ізоляцію трафіку; дві необхідні властивості для вирішення проблеми осіфікації. Мережева віртуалізація приділяє велику увагу комунікаційній галузі, де найбільші постачальники, а також телеком спільнота виявили свою зацікавленість у технологіях.

Ідея віртуалізації мережі мотивує дослідників оцінювати звичайні комп'ютери для обробки пакетів. Це пов'язано з тим, що на базі програмного забезпечення платформи більш програмовані, порівняно з апаратним обладнанням. Крім того, підтримка віртуальних мереж легко доступна на продуктових серверах. Є багато досліджень, які оцінюють ефективність IP-експедиторів (тобто віртуальних маршрутизаторів) на віртуалізованих товарних серверах. Дослідження віртуальних маршрутизаторів заклали основу для віртуалізації мережевих функцій (NFV), що передбачає реалізацію різноманітних мережевих функцій (IP forwarder, брандмауер, балансування навантаження тощо) на віртуалізованих товарних серверах. У 2012 році стандартна розробка віртуалізації мережевої функції (NFV) розпочата під егідою Європейського інституту стандартів телекомунікацій (ETSI).

1.1. Постановка проблеми та короткий опис поточного стану на ринку

Network Function Virtualization (NFV) привернула значну увагу промисловості і науковців як важлива змінна в обслуговуванні телекомунікаційних послуг. Розглядаючи мережеві функції (NFs) від фізичних пристроїв, по яких вони біжать, у NFV є потенціал, аби привести до значного скорочення Експлуатаційних витрат (OPEX) і капітальних витрат (CAPEX), які полегшують розгортання нових послуг зі збільшеною гнучкістю за часом та відносною вартості. Парадигма NFV все ще не розкрита, тому наукова спільнота має великий спектр можливостей аби розвивати нову

архітектуру системи, оцінювати альтернативи і компроміси в розробленні технологій для її успішної інтеграції у фізичну мережеву інфраструктуру.

Традиційно оператори розгортають власні фізичні пристрої й устаткування для кожної функції, яка є частиною даного обслуговування. Крім того, у сервісних компонентів є суворе формування ланцюжка і / або наказуючи, щоб це було відображено в мережевій топології і в локалізації елементів обслуговування, разом з вимогами для високої якості, стабільності і суворій прихильності протоколу, привели до довгих циклів продукту, дуже низької сервісної гнучкості і важкої залежності від спеціалізованих апаратних засобів.

Однак, користувачі збільшують вимоги щодо більш різноманітних і нових (нетривких) послуг з великими швидкостями передачі даних. Тому телекомунікаційні постачальники послуг (TSPs) повинні відповідно і безперервно купувати, зберігати і управляти новим фізичним обладнанням, хоча ж це не тільки вимагає швидко змінювати навички для технічного персоналу, що працює і керує цим обладнанням, але також і вимагає щільного розгортання мережевого обладнання. Крім того, навіть з цим високим споживчим попитом не може бути піднята абонентська плата за користування, що завдає збільшення капіталу і експлуатаційних витрат провайдерам, при цьому зворотній ланцюжок надання послуг при зменшенні витрат і при збільшенні плати для клієнтів призведе до того, що останні будуть відмовлятися від послуг. Тому TSPs були змушені знайти способи будівництва більш динамічних і обізнаних про обслуговування мереж з метою скорочення циклів роботи продукту та капітальних витрат і поліпшення сервісної гнучкості.

Основною ідеєю NFV є від'єднання фізичного обладнання від мережевих функцій, що працюють на них. Це означає, що мережева функція, может бути відправлена до TSP як екземпляр простого програмного забезпечення, що дозволяє об'єднувати декілька типів мережевого обладнання на серверах високого рівня, комутаторах і сховищах, які можуть

бути розташовані в центрах обробки даних, розподілених мережеских вузлах та в кінцевих приміщеннях користувача.

Таким чином, певна послуга може бути розбита на набір віртуальних мережеских функцій (VNF), які потім будуть реалізовані в програмному забезпеченні на одному або кількох продуктових стандартних фізичних серверах. Потім VNF можуть бути переміщені та інстальовані в різних мережах (наприклад, впровадження клієнтоорієнтованих служб у певному географічному розташуванні), без необхідності придбання та встановлення нового обладнання.

1.2. Переваги інтеграції NFV

Застосування операторами технологій віртуалізації дозволить з більшою гнучкістю підвищувати їхні можливості та послуги мережі для користувачів, а також надасть можливість швидшого та дешевшого розгортання або підтримки нових мережеских послуг для досягнення кращих показників експлуатаційної якості. Переваги інтеграції NFV прокладає шлях до різноманітних способів надання послуг в порівнянні з поточними:

- Від'єднання програмного забезпечення від апаратного забезпечення. Оскільки мережеский елемент більше не є складовою частиною інтегрованих об'єктів апаратного та програмного забезпечення, спостерігається еволюція обох незалежних один від одного. Це дає окрему можливість розробки та технічного обслуговування програмного та апаратного забезпечення.

- Розгортання функцій гнучкої мережі. Відокремлення програмного забезпечення від апаратного забезпечення допомагає перепризначити та розподіляти ресурси інфраструктури, таким чином разом, апаратно–програмне забезпечення, могло виконувати різні функції в різний час. Це допомагає операторам мережі швидше розгорнути нові мережескі сервіси на тій же фізичній платформі. Тому компоненти можуть

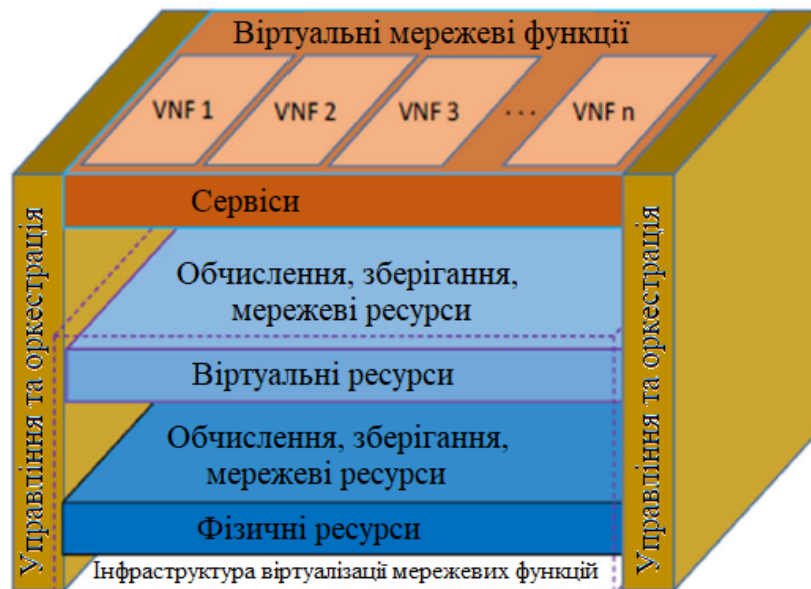
демонструватися на будь-якому пристрої з підтримкою NFV в мережі, і їх зв'язки можуть бути налаштовані гнучким способом.

– Динамічне масштабування. Розмежування функціональності мережевих функцій в інгредієнтованих програмних компонентах забезпечує більшу гнучкість, аби масштабувати фактичні характеристики VNF більш динамічно та з більш точною грануляцією, наприклад, відповідно до фактичного трафіку, для якого оператор мережі повинен забезпечувати потужність. Варто зауважити, що загальна концепція від'єднання NF від спеціалізованого устаткування не обов'язково вимагає віртуалізації ресурсів. Це означає, що TSP все ще можуть придбати або розробляти програмне забезпечення і запускати його на фізичних машинах. Різниця в тому, що ці NF повинні мати можливість працювати на продуктових серверах. Однак переваги (такі як гнучкість, динамічне масштабування ресурсів, енергоефективність), очікувані від використання цих функцій у віртуалізованих ресурсах, є дуже сильними факторами при продажі NFV. Не варто забувати, що також існує гібридний сценарій, де функції, що працюють на віртуалізованих ресурсах, співіснують з тими, які працюють з фізичними ресурсами. Такі гібридні сценарії можуть бути важливими в процесі переходу до NFV.

1.3. Архітектура NFV

ETSI представляє архітектуру NFV високого рівня з трьома блоками, як показано на рисунку 1. Перший блок називається NFV Infrastructure (NFVI). NFVI - це набір апаратних та програмних ресурсів. Обчислювальні пристрої, пристрої зберігання та мережеві послання є прикладами апаратних ресурсів. На вершині апаратного ресурсу є шаблон абстракції, який віртуалізує апаратні ресурси. Віртуальні ресурси (такі як віртуальні процесори та віртуальні NIC) виділяються віртуальним машинам, а різні віртуальні машини можуть спілкуватися один з одним через віртуальні послання. Другий блок архітектури NFV складається з віртуальних мережевих функцій

(VNF) та служб. Мережева функція – це функціональний блок в межах мережевої інфраструктури [38]. Наприклад, IP-експедитори, брандмауери та балансувальні завантажувачі трафіку є загальними мережевими функціями. VNF - це реалізація мережевої функції над віртуальною інфраструктурою. Наприклад, мережева функція може бути реалізована на одній або декількох віртуальних машинах. Подібним чином, кілька VNFs можна підключити в серії (ланцюжок), щоб сформувати мережеву послугу. Точне число VNF та їх порядок можуть змінюватися від одного сервісу до іншого залежно від функціональних специфікацій. Третій блок відомий як NFV Management and Orchestration (NFV MANO). NFV MANO займається забезпеченням ресурсів та управлінням VNF. Наприклад, він може вибрати одну або декілька віртуальних машин за допомогою NFVI, щоб відобразити мережеву функцію. Крім того, автоматизація послуг мережі, включаючи створення та видалення VNF, є прикладом завдання управління, яке виконує VNF MANO.



NFV Infrastructure (NFVI)

NFVI являє собою поєднання апаратних і програмних ресурсів, які складають середовище, в якому VNFs розгорнуті фізичні ресурси включають в себе комерційно-оффшельфові (COTS) обчислювальні апаратні засоби,

сховища та мережі (що складаються з вузлів і посилань), які забезпечують обробку, зберігання та підключення до VNF.

Віртуальні ресурси – абстракції обчислення та зберігання мережевих ресурсів. Абстракція досягається за допомогою шару віртуалізації (на базі гіпервізора), який відокремлює віртуальні ресурси від базових фізичних ресурсів. У середовищі обробки даних ресурси обчислювальної та об'ємної пам'яті можуть бути представлені в термінах одного або декількох віртуальних машин (VM), тоді як віртуальні мережі складаються з віртуальних зв'язків та вузлів.

Віртуальний вузол - це компонент програмного забезпечення, що має функціональність хостингу або маршрутизації, наприклад операційну систему, інкапсульовану у віртуальну машину. Віртуальний зв'язок є логічним взаємозв'язком двох віртуальних вузлів, що з'являються як прямий фізичний зв'язок з динамічно змінними властивостями.

Віртуальні мережеві функції та служби NF

Віртуальні мережеві функції та служби NF – це функціональний блок в межах мережевої інфраструктури що має чітко визначені зовнішні інтерфейси та чітко визначену функціональну поведінку. Приклади NF є елементами домашньої мережі, наприклад шлюз RGW; і звичайні мережеві функції, наприклад, DHCP-сервери, міжмережеві екрани тощо. Таким чином, VNF є реалізацією NF, тобто розгорнуті на віртуальні ресурси, такі як VM. Один VNF може складатися з декількох внутрішніх компонентів, отже, він може бути розгорнутий на декількох віртуальних машинах, в цьому випадку кожен VM розміщує один компонент VNF.

Сервіс – це пропозиція, надана TSP, яка складається з одного або декількох NF. У випадку з NFV NF, які складають службу, віртуалізуються та розгортаються на віртуальні ресурси, такі як VM. Однак, з точки зору користувачів, послуги, які базуються на функціях, що виконуються за посередництвом обладнання або на VMs, повинні мати таку ж продуктивність. Кількість і тип замовлення VNF, які його складають,

визначаються функціональною та поведінковою специфікацією сервісу. Тому поведінка послуги залежить від рівня складових NFV.

Запропонована ETSI NFV-еталонна архітектура визначає початкові функціональні вимоги та окреслює необхідні інтерфейси. Проте обсяг роботи ETSI - скоріше обмежений, виключаючи такі аспекти, як контроль та управління застарілим обладнанням. Це може ускладнити операції та MANO для кінцевого сервісу, що включає як успадковані функції, так і VNF. Крім того, стандарти та / або фактичні практичні вказівки та еталон реалізації VNF, інфраструктури MANO та необхідних інтерфейсів ще не визначені. Зокрема, видно з поточних рішень NFV що постачальники мають різні ідеї щодо того, що являє собою NFVI і VNF, і як їх можна моделювати. Залишається ряд відкритих питань, таких як:

1. які NF слід розгортати в вузлах центрів обробки даних, а які в вузлах оператора;
2. які функції повинні бути розгорнуті на спеціальних віртуальних машинах і які в контейнерах;
3. яку кількість і типи ресурсів NFVI потрібно буде запускати певні функції;
4. які експлуатаційні вимоги до середовища, що включає як VNF, так і ті, що працюють на старому обладнанні.

Оскільки як постачальники, так і TSP вже значно багато вклали коштів в NFV, спільнота дійшла до того, що неможливо повернути назад конкретні рішення.

ETSI запропонував низку випадків використання NFV

NFV може застосовуватися до обладнання для приміщень клієнтів (CPE) та до мережі Evolved Packet Core (EPC).

1) Обладнання клієнтського приміщення (CPE): на рисунках 1 і 2 ми використовуємо приклад CPE, які ілюструють економію масштабу за рахунок NFV. На рисунку 1 показана типова (поточна) реалізація CPE, яка складається з таких функцій: протокол динамічної конфігурації хоста

(DHCP), переадресація мережевих адрес (NAT), маршрутизація, універсальний плагін та відтворення (UPnP), брандмауер, модем, радіо та комутація. У цьому прикладі одна служба (CPE) складається з восьми функцій. Ці функції можуть мати переважні вимоги.

Наприклад, якщо ці функції є частиною сервісного ланцюга 2, може знадобитися виконувати функції брандмауера до NAT. В даний час необхідно, щоб ці функції знаходились на фізичному пристрої, розташованому в приміщенні кожного з клієнтів 1 і 2. З такою реалізацією, якщо є необхідність зробити зміни в CPE, скажімо, додаванням, видаленням або оновленням функції, може знадобитися, щоб спеціаліст від Інтернет-провайдера індивідуально обговорював з клієнтом зміни. Це може навіть вимагати повної зміни конфігурації пристроїв у випадку доповнень. Це не тільки дорого (оперативно) для інтернет-провайдерів, але і для клієнтів.

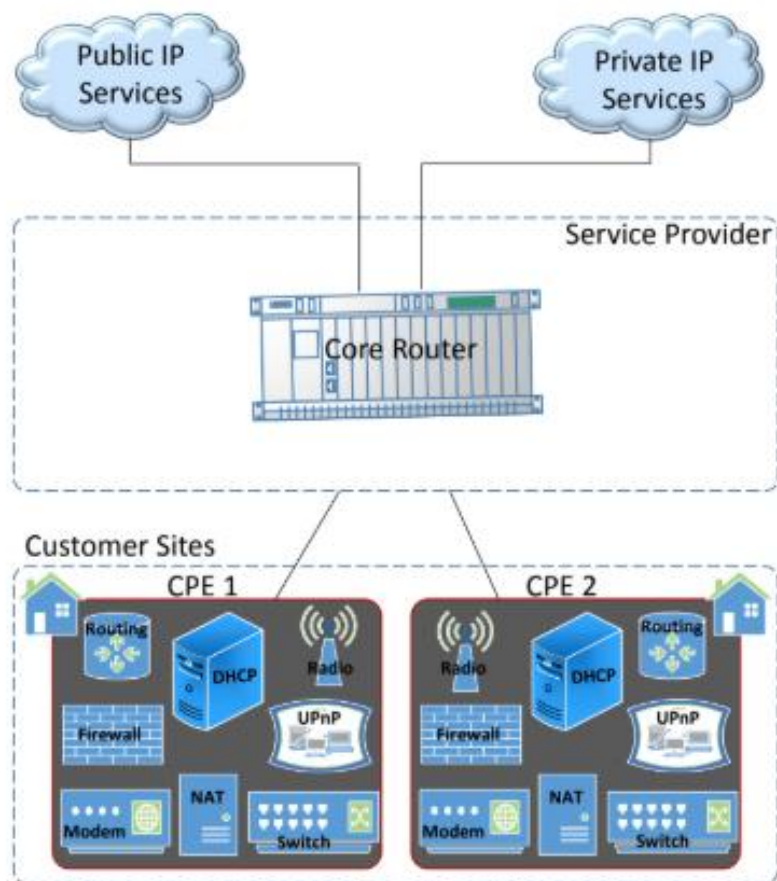


Рисунок. Традиційна модель організації мережі з CPE

На малюнку 2 ми показуємо можливу реалізацію на основі NFV, в якій деякі функції CPE переносяться на спільну інфраструктуру в ISP, що також може бути центром обробки даних. Це робить описані вище зміни легшими, оскільки, наприклад, оновлення DHCP для всіх клієнтів міститиме лише зміни у інтернет-провайдера. Таким же чином можна одночасно додати ще одну функцію, таку як батьківський контроль для всіх або частини клієнтів. Окрім економії операційних витрат для інтернет-провайдера, це потенційно призводить до більш дешевих CPE, якщо це розглядається у великих масштабах.

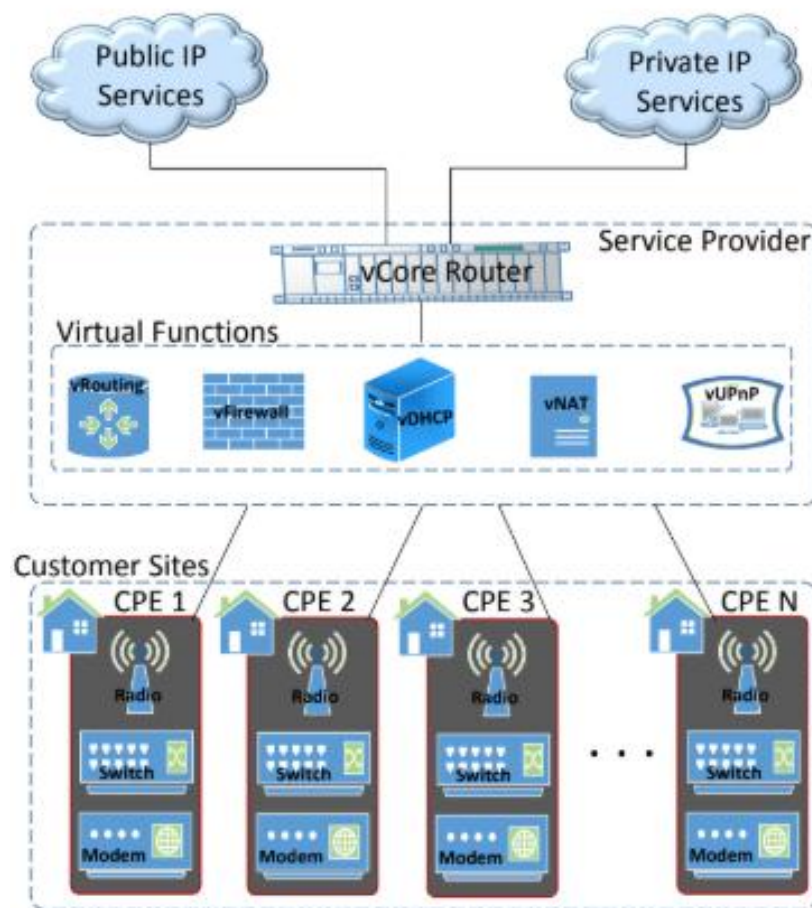


Рисунок. Організація мережі з впровадженням NFV

Віртуалізація EPC є ще одним прикладом NFV, який привернув велику увагу промисловості. EPC - це основна мережа Long Term Evolution (LTE), яка визначається 3GPP. На лівій стороні рисунка 3 показано базову архітектуру LTE без NFV. Користувальницьке обладнання (UE) підключено

до EPC через мережу доступу LTE (E-UTRAN). Розроблений NodeB (eNodeB) є базовою станцією для радіо LTE. EPC виконує важливі функції, включаючи відстеження підключень, керування мобільністю та керування сеансами. Вона складається з чотирьох NF: Serving Gateway (S-GW), шлюз пакетної передачі даних (PDN) (P-GW), об'єднане управління мобільністю (MME) та (PCRF). Він також підключений до зовнішніх мереж, що може включати підсистему IP Multimedia Core Network Subsystem (IMS). У поточній EPC всі його функції базуються на запатентованому обладнанні. Тому навіть невеликі зміни до певної функції можуть вимагати заміни обладнання. Те саме стосується і випадків, коли необхідно змінити потужність обладнання. На правій стороні, на рисунку, ми показуємо ту саму архітектуру, в якій EPC віртуалізується. У цьому випадку, або всі функції в EPC, або лише деякі з них переміщуються в спільну (хмарну) інфраструктуру.

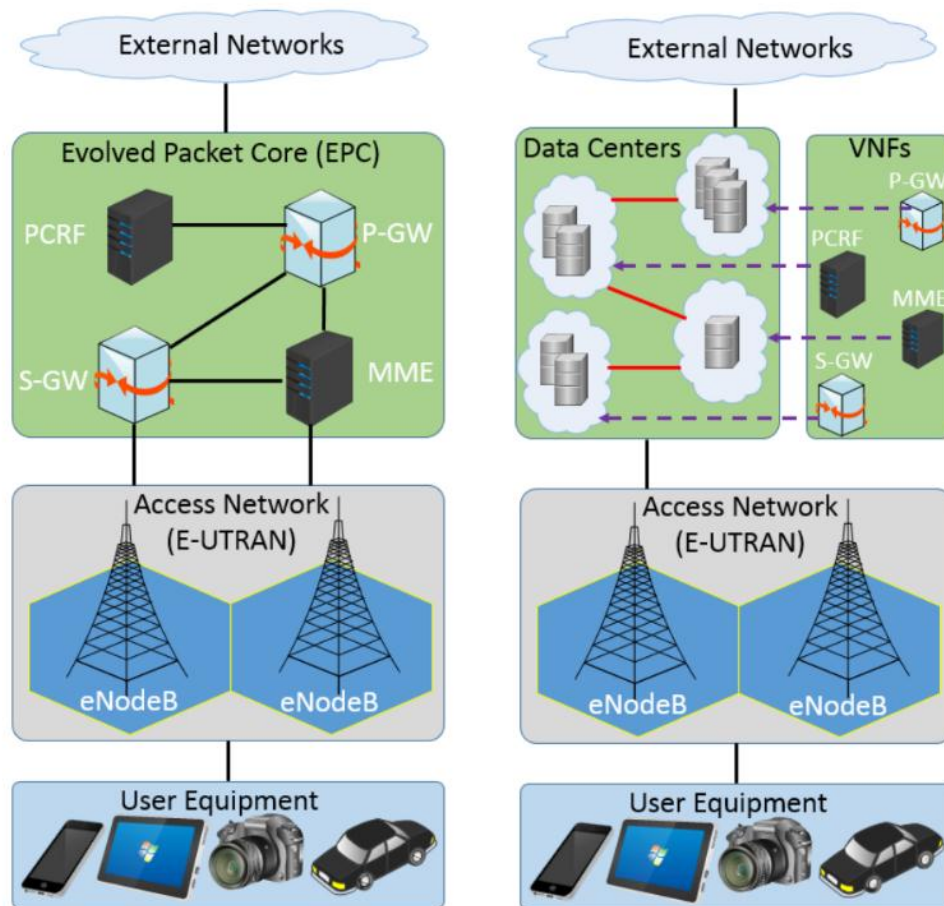


Рисунок . Виртуалізація EPC

Віртуалізація EPC може потенційно призвести до більшої гнучкості та динамічного масштабування, а отже, дозволить TSP легко та дешево реагувати на зміни у ринкових умовах. Наприклад, як показує кількість серверів, виділених кожній функції на рисунку, може знадобитися збільшення ресурсів користувача площини, не впливаючи на площину керування. У цьому випадку VNFs, такі як віртуальний MME, можуть масштабуватися самостійно відповідно до їх конкретних вимог до ресурсів. Точно так само, VNF, що займаються лінією даних, можуть вимагати іншої кількості ресурсів, ніж ті, що стосуються лише сигналізації. Ця гнучкість призведе до більш ефективного використання ресурсів. Нарешті, це також дозволяє спростити оновлення програмного забезпечення в мережесхемних функціях EPC, що, отже, дозволить швидше запускати інноваційні послуги.

1.4. Бізнес-модель взаємодії NFV

Використовуючи архітектуру, представлену на рисунку, і на основі бізнес-моделей віртуалізації мережі та хмарних обчислень, ми визначаємо п'ять основних гравців у середовищі NFV та пропонуємо еталонну бізнес-модель, яка ілюструє можливі ділові відносини між ними, як показано на рисунку. Ми також обговорюємо важливі аспекти дизайну системи NFV.

A. Бізнес-модель

1) Постачальник інфраструктури (InP): InP розгортає та управляє фізичними ресурсами у формі центрів обробки даних та фізичних мережах. На вершині цих ресурсів віртуальні ресурси можуть бути забезпечені та орендовані через один або більше інтерфейсів програмування TSP. InP може також визначити, як цей пул з наявних ресурсів виділяються для TSP. У NFV, приклади InP можуть бути загальнодоступними центрами обробки даних, такими як Amazon або приватними серверами, що належать TSP. Якщо заданий InP не може повністю або частково надавати ресурси для певних TSP, і, отже, можуть бути сформовані коаліції разом з іншими InP, щоб забезпечити багатодоменні VNF.

2) Постачальник телекомунікаційних послуг (TSP): TSPs 4 орендує ресурси з однієї або більше InP, які вони використовують для запуску VNFs. Вони також визначають поєднання цих функцій для створення послуг для кінцевих користувачів. У більш загальному випадку, TSP можуть передавати свої віртуальні ресурси в суб-лізинг до інших TSP. У такому випадку перепродаж TSP займе роль InP. У випадках, коли InP є приватною або власною, наприклад, надані мережевими вузлами або серверами TSP, то InP і TSP можуть бути однією організацією.

3) VNF Providers (VNFP) та Серверні провайдери (SP): NFV поділяє роль традиційних постачальників мережевого обладнання (таких як Cisco, Huawei, HP та Alcatel-Lucent) у два: VNFP та SP. VNFPs забезпечують реалізацію програм для NF. Ці функції можуть бути або надані безпосередньо TSP, або VNFP може надати їх InP, який потім забезпечить як інфраструктуру, а також VNF для TSP. Також можливо, що TSP розробляють свої власні NF (програмне забезпечення). У цьому випадку VNFP та TSP будуть однією організацією.

Точно так само, SP надають галузеві стандартні сервери, на яких можуть бути розгорнуті VNF. Ці сервери можуть бути надані InP (у випадку, якщо функції будуть працювати у хмарі), або TSP (якщо функції будуть виконуватись у мережеских вузлах TSP). Варто зазначити, що ці об'єкти (VNFP та SP) насправді можуть бути однією компанією. Основна відмінність полягає в тому, що функції, які вони надають, не пов'язані з роботою на обладнаннях з спеціалізованими функціями або зроблені конкретним постачальником. Іншими словами, TSP може придбати VNF з одного суб'єкта, і серверів від іншого.

4) Брокери: у деяких випадках для TSP, можливо, доведеться придбати функції, які складають одну службу від декількох VNFP, та / або розгортати та керувати кінцевими службами, що працюють на ресурсах з декількох InP. У цьому випадку, може необхідно мати брокерську роль. Брокери отримують вимоги до ресурсів і / або функцій від TSP, а потім створюють, оброблюють

та об'єднують ресурси та функції з декількох InP, VNFP та SP, щоб запуснути їх як службу до TSP. Ця роль лише включена в модель для повноти, оскільки вона може не знадобитися у всіх випадках екосистеми NFV.

5) Кінцевий користувач: Кінцеві користувачі є кінцевими споживачами послуг, що надаються TSP. Вони схожі на кінцевих користувачів існуючого Інтернету, за винятком того, що існування кількох послуг від конкуруючих TSP дозволяє їм вибирати з широкого спектру послуг. Кінцеві користувачі можуть підключатися до кількох TSP для різних служб.

Стрілки на рисунку позначають ділові відносини або інтерфейси між різними об'єктами. Наприклад, VNFP та / або SP використовують інтерфейси 1 і 2 для ведення переговорів та / або надають VNF та товарні сервери відповідно до TSP і InP, тоді як TSP використовують інтерфейси 3 та 4 для їх взаємодії з брокерами та користувачами відповідно.

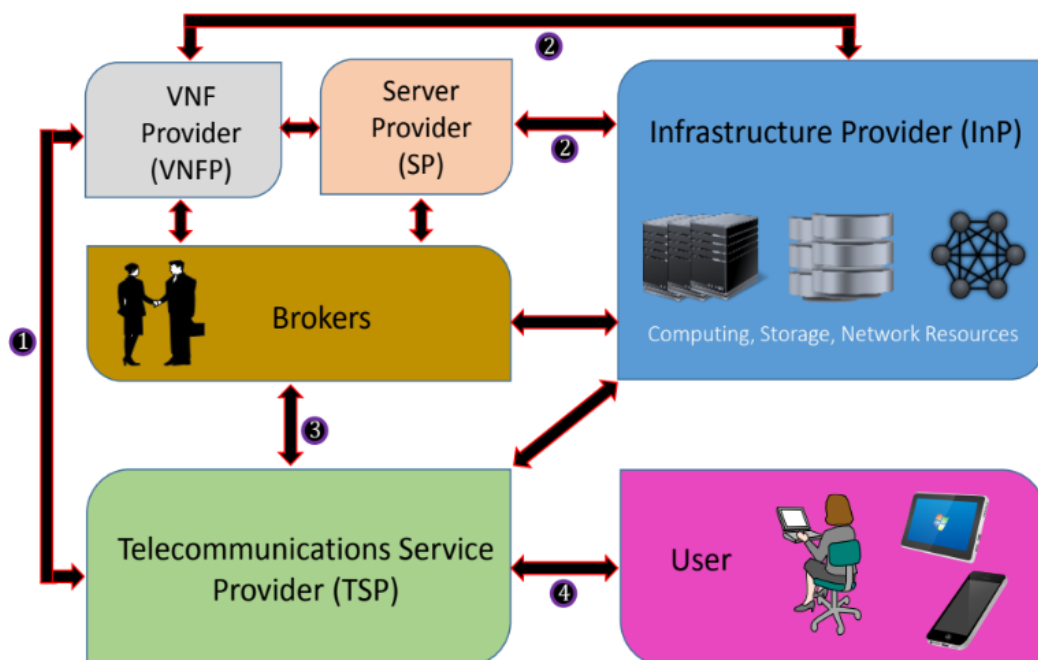


Рисунок. Запропонована NFV бізнес-модель

Б. NFV Design Considerations

Важливо зазначити, що не тільки достатньо розгорнути NF над віртуалізованими інфраструктурами, оскільки користувачі мережі, як

правило, не стурбовані складністю базової мережі. Усі користувачі вимагають, щоб мережа надала їм доступ до потрібних програм, коли вони їм необхідні. Тому NFV буде прийнятним рішенням для TSP, якщо він відповідає ключовим міркуванням, що вказані нижче.

1) Архітектура та продуктивність мережі. Щоб бути прийнятними, архітектури NFV повинні мати можливість досягнути продуктивності аналогічної тому, яка отримана від функцій, що працюють на виділеному обладнанні. Це вимагає, щоб усі потенційні вузькі місця на всіх стек рівнях були оцінені та пом'якшені. Як приклад, якщо VNF, які належать до однієї служби, розміщуються в різних VM, то між цими двома віртуальними машинами повинно бути з'єднання, і це з'єднання повинно забезпечувати стійкий об'ємний трафік з високою пропускною спроможністю для VNF.

З цією метою може бути важливо, аби мережа могла скористатися перевагами з'єднання з мережевими інтерфейсами, які мають високу пропускну здатність та низьку затримку через технології завантаження процесора як прямий доступ до пам'яті (DMA) для руху даних та апаратного забезпечення для обчислення CRC. Крім того, було доведено, що поле-програмувальні матриці (FPGA) підвищують продуктивність VNF. Нарешті, VNFs повинні виділяти лише необхідні ресурси зберігання та обчислення. В іншому випадку, розгортання NFV може потребувати більше ресурсів, і, отже, немає підстав для переходу до NFV.

2) Безпека та стійкість: динамічний характер NFV вимагає, щоб технології безпеки, політики, процеси та практики були включені в її генетичну структуру. Зокрема, існують два важливих ризики для безпеки, які слід розглянути в проектах NFVI: (1) функції або послуги від різних абонентів повинні бути захищені / ізольовані один від одного. Це допомагає забезпечити, щоб функції були стійкими до несправностей та атак, оскільки порушення або порушення безпеки в одній функції / службі не вплинули на інший. (2) NFVI (фізичні та віртуальні ресурси) повинен бути захищений від наданих абонентських послуг. Один із способів забезпечення безпеки NFVI -

розгортання внутрішніх брандмауерів у віртуальному середовищі. Це дозволить NFV MANO отримати доступ до VNF, не забруднюючи шкідливий трафік із мереж клієнтів в NFVI. Нарешті, щоб забезпечити еластичність розгортання послуг, може знадобитися, щоб функції, які складають один і той же сервіс, не були під час розгортання організовані фізичними ресурсами в одному і тому ж провалі або сфері безпеки.

3) Надійність та наявність: Оскільки в області ІТ переривання живлення, проміжні секунди допустимі, і користувач, як правило, ініціює спроби повторення, в телекомунікаціях існує основна послуга очікування про те, що відключення будуть нижчими за впізнаваний рівень (тобто, у порядку, що містяться у мілісекундах), а відновлення служби здійснюється автоматично. Крім того, сервіси, що впливають на переривання роботи, повинні бути обмежені певною кількістю користувачів (наприклад, певна географія) та відключення мережевих мереж неприйнятними. Ці високі потреби в надійності та доступності є не лише сподіваннями клієнтів, а й часто нормативними вимогами, оскільки TSP вважається частиною критичної національної інфраструктури, і існують відповідні юридичні зобов'язання щодо забезпечення послуг / безперервності бізнесу. Однак не кожна функція має однакові вимоги до стійкості: наприклад, телефонія, як правило, має найвищі вимоги за наявності інших послуг, наприклад, Служби коротких повідомлень (SMS) може мати нижчі рівні доступу. Таким чином, можна визначити кілька класів доступності, які повинні підтримуватися системою NFV. Знову ж таки, функції можуть бути розгорнуті з резервуванням для відновлення програмного забезпечення або апаратні збої.

4) Підтримка неоднорідності: основний пункт продажу NFV ґрунтується на розриві бар'єрів, що виникають внаслідок фірмової діяльності апаратного забезпечення послуг. Тому потрібно згадати про те, що відкритість і неоднорідність будуть в ядро успіху NFV. Тому Платформа NFV повинна бути відкритою, спільною середовищем, здатною запуску програм від різних постачальників. InP повинен бути вільно приймати

рішення про вибір апаратного забезпечення, змінювати апаратних постачальників, а також займатись неоднорідним обладнанням. Крім того, такі платформи повинні мати можливість захистити VNF від специфіки основних мережевих технологій (наприклад, оптичний, бездротовий, датчик тощо). Нарешті, і не менш важливо, платформи повинні дозволяти сервіс "від кінця до кінця", який буде створений на більше, ніж одній інфраструктурній області без обмежень і без потреб в технологіях конкретних рішень. Поки віртуалізація в межах одного InP знижує вартість, забезпечує міжсерверний NFV "виробництво" тих самих функцій внутрішнього програмного забезпечення і призводить до збільшення доходів. Як Наприклад, якщо мобільний користувач, який підписався на дану TSP, перейде до охоплення іншого TSP, користувач не повинен обмежуватися голосовими повідомленнями, даними та простими службами обміну повідомленнями. Реальна сила NFV буде реалізовано, якщо такий користувач зможе вибрати брандмауер або службу безпеки з поточного TSP або використовувати а комбінація функцій від хоста TSP та інших з той, для якого він має покриття..

5) Спадкова підтримка: зворотна сумісність завжди стане проблемою, що викликає підвищений інтерес до будь-якої нової технології. NFV не є винятком. Це навіть для телекомунікаційної галузі важливіше, оскільки навіть для того чи іншого оператора, який вирішує перейти до NFV, може знадобитися певний час, щоб це було повним, не кажучи вже про те, що деякі оператори це зробить швидше, ніж інші. Тому підтримка як фізичних, так і віртуальних НФ важлива для операторів, що здійснюють перехід до NFV, тому що їм може знадобитися керувати застарілими фізичними ресурсами поряд з віртуалізованими функціями для деяких час Це може вимагати наявності стратегії оркестровки, яка закриває розрив між застарілими службами та NFV. Важливо підтримувати шлях міграції до NFV, зберігаючи поточні інвестиції в мережу операторів. InPs повинні мати можливість функціонувати в середовищі, за якою як віртуалізовані, так і фізичні мережеві функції працюють в мережі одночасно.

б) Масштабованість мережі та автоматизація. Для досягнення повних переваг NFV необхідне масштабоване та чутливе мережеве рішення. Таким чином, під час виконання вищезазначених міркувань, NFV має бути прийнятним для масштабування, щоб мати змогу підтримувати мільйони абонентів. Навести приклад

Найбільш сучасні конфігураційні концепції NFV засновані на розгортанні VM для розміщення VNF. Точно так само, як єдиний віртуальний комп'ютер може не відповідати вимогам певної функції, не економічно розгортати віртуальну машину для кожного NFV, оскільки вихідний розмір VM буде занадто великим і призведе до проблем масштабованості на рівні віртуалізації. Проте NFV буде масштабувати, лише якщо всі функції можуть бути автоматизованими. Тому автоматизація процесів має першорядне значення для успіху NFV. Крім того, потреба у динамічних середовищах вимагає, щоб VNF-файли могли бути розгорнуті та видалені за вимогою та масштабовані, щоб відповідати зміненому трафіку.

Через вимоги користувачів в режимі реального часу мати можливість отримувати не дорогі послуги, TSP були змушені шукати нові способи доставки цих послуг у гнучких способах, а також за рахунок економії OPEX та CAPEX. NFV став можливим підходом, щоб зробити мережеве обладнання більш відкритим, а отже, дозволити TSP стати більш гнучкими, швидшими в обслуговуванні інновації та зменшення експлуатації та обслуговування (O & M) витрати. Зрозуміло, що NFV разом з тісно пов'язаними та комплементарними областями SDN та хмарних обчислень можуть стати великою частиною майбутнього надання телекомунікаційних послуг. У цьому документі ми представили NFV, описали її архітектуру, як визначено ETSI, запропонували еталонну бізнес-модель та вивчили важливі конструктивні міркування. Потім ми порівнювали NFV з тісно пов'язаними областями, SDN та хмарними обчисленнями, обговорюючи поточні дослідження для їх об'єднання. Ми також представили основні технічні та

стандартизаційні зусилля, дослідницькі проекти, комерційні продукти та ранній сертифікат NFV концептуальних реалізацій. Нарешті, ми обговорили основні напрямки досліджень, які будуть ключовими для успіху NFV, а також для його застосування до ICN та IoT, а також підсумували результати опитування. Ми вважаємо, що до того, як ці ділянки будуть вивчені, TSP, які розгортають NFV, можуть покластися на захист від постачальників, щоб вирішити ці прогалини, що суперечить первісній меті NFV.

Висновки

Через вимоги користувачів у режимі реального часу, на вимогу, онлайн, недорогих короткотривалих сервісів, TSP були змушені шукати нові способи надання цих послуг у гнучких способах, а також за рахунок економії OPEX та CAPEX. NFV з'явився як можливий підхід, щоб зробити мережеве обладнання більш відкритим, а отже, дозволити TSP стати більш гнучким, швидшим у обслуговуванні інновацій та зменшити витрати на експлуатацію та технічне обслуговування (O & M). Зрозуміло, що NFV разом з тісно пов'язаними та комплементарними областями SDN та хмарних обчислень можуть стати великою частиною майбутнього надання телекомунікаційних послуг.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АРХІТЕКТУРИ NFV: ЇЇ ОСОБЛИВОСТІ, ПИТАННЯ ЩОДО ПЛАНУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ

2.1. Постановка проблеми та короткий опис поточного стану справ на ринку

Мережі телекомунікаційних операторів заповнені великою і зростаючою різноманітністю власних апаратних пристроїв. Щоб запустити нову мережеву службу, часто потрібно ще одне різноманіття, і знаходження простору та потужності для розміщення цих ящиків стає дедалі складнішим; посилюється зростаючими витратами на енергію, проблемами капіталовкладень та відсутності навичок, необхідних для проектування, інтеграції та експлуатації все більш складних апаратних пристроїв.

Більше того, апаратні прилади швидко виходять з ладу, що вимагає довготривалого циклу «закупівельного дизайну – інтеграції – розгортання», що повторюється з невеликою або майже неприбутковою вигодою. Що ще гірше, апаратні життєві цикли стають дедалі коротшими, оскільки технології та послуги інновацій прискорюються, гальмуючи виведення нових мережевих послуг та обмежуючи інновації у світі. NFV спрямована на вирішення цих проблем шляхом використання стандартної технології віртуалізації ІТ для консолідації багатьох типів мережевого обладнання на промислові стандартні сервери високого обсягу, комутатори та сховища, які можуть бути розташовані в датацентрах, мережевих вузлах та в об'єктах кінцевого користувача.

Ми вважаємо, що мережеві функції віртуалізації можуть буди застосовні до будь-якої площини даних та керуватися площиною в інфраструктурі фіксованої та мобільної мережі. Ми хотіли б підкреслити, що ми бачимо, що мережеві функції віртуалізації набагато краще доповнюють програмне забезпечення, визначене мережею (SDN). Ці теми є взаємовигідними, але не залежать один від одного. Мережеві функції можуть

бути віртуалізовані та розгорнуті без необхідності використання SDN, і навпаки.

Віртуалізація мережевих функцій потенційно може запропонувати безліч переваг, включаючи, але не обмежуючись ними:

- Скорочення витрат на обладнання та зменшення споживання електроенергії шляхом консолідації обладнання та економії на масштабі ІТ-індустрії.

- Збільшення швидкості шляхом мінімізації типового циклу інноваційних мереж. Економія масштабу, необхідна для покриття інвестицій в апаратні засоби, більше не застосовується для розробки додатків на основі програмного забезпечення, що робить можливим розвиток інших функцій. NFV повинна дозволити операторам мережі суттєво зменшити цикл дозрівання.

- Наявність багатопроцесорного та багаторівневого мережевого пристрою, що дозволяє використовувати єдину платформу для різних програм, користувачів та орендарів. Це дозволяє операторам мережі розподіляти ресурси між різними службами та різними клієнтськими базами.

- Можливе цілеспрямоване втілення послуг на основі географії або набору клієнтів. Послуги можуть бути швидко збільшені / зменшені по мірі необхідності.

- Включає широкий спектр екосистем та сприяє відкритості. Він відкриває ринок віртуальних приладів для чистих абітурієнтів програмного забезпечення, малих гравців та наукових кіл, заохочуючи більше інновацій, щоб швидко приносити нові послуги та нові джерела доходів та набагато менший ризик.

Щоб використовувати ці переваги, існує ряд технічних проблем, які необхідно вирішити:

- Досягнення високоефективних віртуалізованих мережевих пристроїв, які є портативними між різними постачальниками обладнання та різними гіперзв'язками.

– Досягнення співіснування на конкретних апаратних мережевих платформах, одночасно забезпечуючи ефективний шлях міграції до повністю віртуальних мережевих платформ, які повторно використовують оператори мережі OSS / BSS. Розробка OSS / BSS повинна перейти відповідно до моделі мережевих функцій віртуалізації, і саме там де SDN може відіграти свою роль.

– Управління та оркестрування багатьох віртуальних мережевих пристроїв (особливо поряд із застарілими системами управління), забезпечуючи при цьому безпеку від атак та неправильної конфігурації. Мережеві функції Віртуалізація буде масштабувати лише тоді, коли всі функції можуть бути автоматизовані.

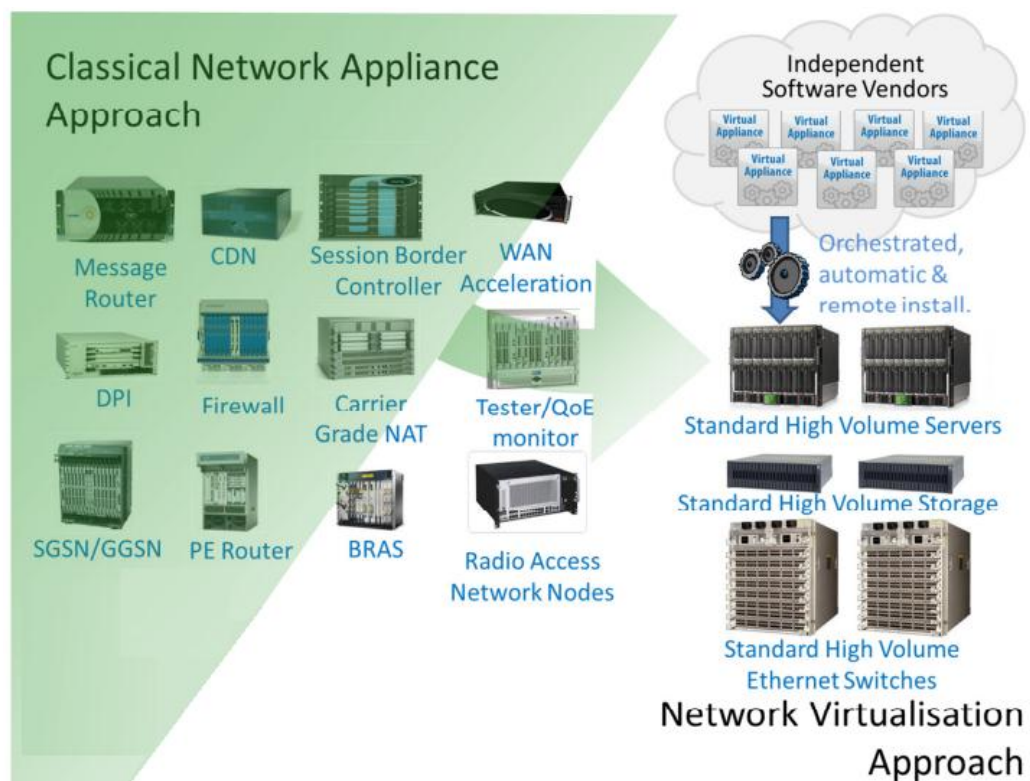


Рисунок 2. Баження віртуалізації мережевих функцій

– Забезпечення належного рівня стійкості до апаратних та програмних збоїв.

– Інтеграція декількох віртуальних пристроїв від різних постачальників. Мережеві оператори повинні мати можливість "змішувати" і "збігати" обладнання з різних постачальників, гіпервізорів від різних

постачальників і віртуальних пристроїв від різних постачальників, не зазнаючи суттєвих витрат на інтеграцію та уникнення блокування.

NFV має на меті перетворити архітектуру мережі операторів за допомогою розробки стандартної технології віртуалізації ІТ для консолідації багатьох типів мережевого обладнання на промислові стандартні сервери високого обсягу, комутатори та зберігання, які можуть бути розташовані в датацентрах, мережних вузлах та в кінцевому обладнанні користувача як показано на рисунку 1. Це передбачає реалізацію мережних функцій у програмному забезпеченні, яке може працювати на ряді галузевих стандартних серверних апаратних засобів, і які можуть бути перенесені або інвентаризовані в різних місцях у мережі, за необхідності, без необхідності установки нового обладнання.

2.1.1. Взаємозв'язок з SDN

Як показано на рисунку 3, віртуалізація мережних функцій надзвичайно доповнює програмне забезпечення, визначене мережею (SDN), але не залежить від нього (або навпаки). NFV може бути реалізована без необхідності використання SDN, хоча ці два поняття та рішення можуть бути об'єднані та потенційно більша цінність нараховується.

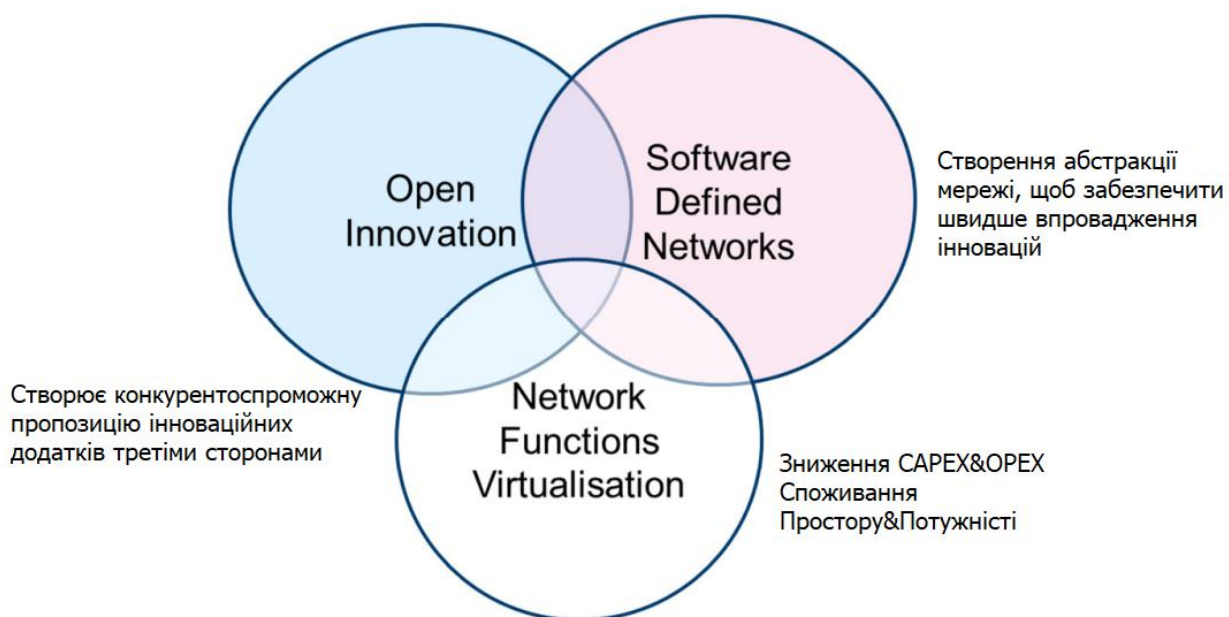


Рисунок 3. Взаємозв'язок NFV з SDN

2.1.2. Мережеві функції

Цілі віртуалізації можуть бути досягнуті за допомогою механізмів SDN, спираючись на методи, що використовуються в даний час у багатьох центрах обробки даних. Але підходи, що спираються на відокремлення управління та передачі даних, як це пропонується SDN, можуть підвищити продуктивність, спростити сумісність із існуючими розгортаннями та полегшити процедури експлуатації та технічного обслуговування. NFV здатна підтримувати SDN, надаючи інфраструктуру, на якій можна запуснути програмне забезпечення SDN. Крім того, віртуалізація мережевих функцій тісно пов'язана з цілями SDN для використання продуктивних серверів і комутаторів.

2.2. Поля застосування

Віртуалізація мережевих функцій застосовується до будь-якої площини обробки та керування пакетами даних функція в мобільних і фіксованих мережах. Потенційні приклади, які можна вказати, включають:

- Перемикаючі елементи: BNG, CG-NAT, маршрутизатори.
- Мобільні вузли мережі: HLR / HSS, MME, SGSN, GGSN / PDN-GW, RNC, вузол B, eNode B.
- Функції, що містяться у домашніх маршрутизаторах та набірних коробках для створення віртуалізованого середовища будинку.
- Тунельні елементи шлюзу: шлюзи VPN / IPSec / SSL.
- Аналіз трафіку: вимірювання DPI, QoE.
- Сервісне забезпечення, моніторинг SLA, тестування та діагностика.
- Сигналізація NGN: SBC, IMS.
- Конвергентні та загальнодоступні функції: сервери AAA, платформи контролю та регулювання політики.
- Оптимізація рівня застосування: CDN, Cache Servers, Balancers завантаження, додаток

- Прискорювачі
- Функції безпеки: брандмауери, антивірусні сканери, системи виявлення вторгнень, захист від спаму.

Подальші дослідження необхідні для ідентифікації тих мережевих функцій, для яких віртуалізація дає найбільшу користь. Використовуватимемо випадки, які нас більш за все цікавлять:

- Програмне забезпечення DPI, що забезпечує розширені аналізи трафіку та багатовимірну звітність, і показує можливість здійснення незавершеного технічного обслуговування на фактичних рівнях ліній. Програмне забезпечення на базі DPI може бути широко розгорнуто в мережі, забезпечуючи набагато кращі можливості аналізу, а також простіші механізми для розгортання, оновлення, тестування та масштабування на зміни робочих навантажень.

- Реалізація IP-вузлів, що підтримують - наприклад, але не обмежують можливості CG-NAT та BRAS на стандартних високопродуктивних серверах, що дає можливість ефективного повторного використання обладнання, оскільки попит на такі можливості розвивається.

- Віртуалізація сервісів та можливостей, які наразі потребують спеціалізованого устаткування на приміщеннях клієнта (домашнє середовище для невеликих філій у великих корпоративних приміщеннях), включаючи, але не обмежуючись ними: брандмауер, веб-безпека, IPS / IDS, WAN прискорення і оптимізація, і функції маршрутизатора. Віртуалізація домашнього середовища, включає маршрутизатори, концентратори та настільні комп'ютери, потенційно могла б забезпечити просту та безперешкодну міграцію до IPv6, зменшити споживання енергії та уникнути послідовних оновлень апаратного забезпечення, коли розвиваються широкосмугові програми та послуги.

- Віртуалізація контентних дистрибутивних мереж (CDN), з початковою метою розширення і масштабування служб доставки контенту, а також з метою максимального повторного використання апаратного

забезпечення в PoPs шляхом можливості інсталяції інших програм служби доставки (наприклад, Веб Прискорення) на вимогу. Віртуалізація CDN також дозволить хостинг послуг CDN від потенційних ділових партнерів, таких як зовнішні постачальники CDN.

– Віртуалізація орієнтації мобільної основної мережі на більш економічно ефективно виробниче середовище, що дозволяє операторам мережі справлятися із зростаючим попитом на трафік у мобільних мережах, а також сприяє кращому використанню ресурсів (включаючи економію енергії), більш гнучке управління мережею (немає необхідності змінювати апаратні засоби для оновлення версій), консолідація апаратного забезпечення, полегшення підтримки багаторівневої оренди та більш швидка конфігурація нових послуг. Мережеві функції. Віртуалізація в мобільних мережах також може бути використана для створення основних мережевих екземплярів, оптимізованих для певних служб, наприклад. для комунікацій "машина-машина" (M2M).

– Координована реалізація хмарних технологій та мереж для підприємств, що дозволяють пропонувати послуги на вимогу та забезпечувати ефективність капіталу для корпоративних клієнтів та операторів мережі.

– Гібридні волокно-DSL вузли розташовані глибоко в зовнішній мережі в вуличних шафах, під землею та на стовпах. Ці вузли мають відрізнитись дуже низьким енергоспоживанням і дуже низьким / нульовим технічним обслуговуванням. Віртуалізація може бути використана для зменшення складності обладнання на віддаленому вузлі, заощаджуючи енергію та забезпечуючи підвищену ступінь майбутнього контролю, коли послуги розвиватимуться. Ці віддалені вузли могли б більш економічно забезпечувати як фіксований, так і бездротовий доступ, якщо ключові функції були віртуалізовані на загальній платформі.

– Мережеві функції. Віртуалізація також може бути використана для забезпечення ефективної виробничої середовища, яка зазвичай

використовується різними програмами, користувачами та орендарями, тим самим підтримуючи співіснування декількох версій та варіантів мережевої послуги (включаючи тестові версії та бета-версії).

2.3. Переваги віртуалізації мережевих функцій

Ми вважаємо, що застосування мережевих функцій у віртуалізації приносить багато переваг операторам мережі, що сприяє різкій зміні ландшафту галузі телекомунікацій. Перевагами передбачаємо включати:

- Скорочення витрат на обладнання та зменшення споживання електроенергії через консолідацію обладнання та використання економії на масштабі ІТ-індустрії.

- Збільшення швидкості виходу інновацій на ринкок шляхом мінімізації типового мережевого оператора. Економія масштабу, необхідна для покриття інвестицій в апаратні засоби, більше не застосовується для розробки на основі програмного забезпечення, що робить можливим інші режими еволюції функцій. Мережеві функції віртуалізації повинні дозволити операторам мережі суттєво зменшити цикл дозрівання.

- Можливість запуску виробничих, контрольних установок в тій же інфраструктурі забезпечує набагато більш ефективну перевірку та інтеграцію, зменшуючи витрати на розробку та час виходу на ринок.

- Можливе цілеспрямоване втілення послуг на основі географії або набору клієнтів. Послуги можуть бути швидко збільшені / зменшені по мірі необхідності. Крім того, швидкість обслуговування покращується шляхом забезпечення віддаленого доступу до програмного забезпечення без будь-яких відвідувань сайту, необхідних для встановлення нового обладнання.

- Оптимізація конфігурації мережі та / або топології в найближчому реальному часі на основі фактичних моделей трафіку / мобільності та попиту на послуги. Наприклад, можна оптимізувати розташування та розподіл ресурсів на мережеві функції автоматично і в

реальному часі забезпечує захист від несправностей без інженерної повної пружності 1 + 1.

- Підтримка багаторівневої оренди, що дозволяє операторам мережі надавати індивідуальні послуги та з'єднання для декількох користувачів, додатків або внутрішніх систем або інших мережевих операторів, всі вони співіснують на одній і тій же апаратній системі з відповідним безпечним розділенням адміністративних доменів.

- Зниження енергоспоживання за рахунок використання функцій керування живленням у стандартних серверах та зберіганні, а також консолідації робочого навантаження та оптимізації розташування. Наприклад, спираючись на методи віртуалізації, можна було б зосередити робоче навантаження на меншій кількості серверів в непікові години (наприклад, протягом ночі), щоб всі інші сервери було вимкнено або введено в режим енергозбереження.

Поліпшення ефективності роботи, використовуючи переваги більшої однорідності платформи фізичної мережі та його однорідності з іншими платформами підтримки:

- Механізми управління ІТ забезпечують автоматичне встановлення, розширення масштабу та збільшення потужності та повторне використання віртуальних машин (VM) [4].

- Усунення необхідності для конкретного обладнання. База навичок роботи над стандартними ІТ-серверами високого обсягу значно більша і менше фрагментований, ніж для сьогоdnішнього телекомунікаційного мережевого обладнання.

- Зниження різноманітності обладнання для планування та забезпечення. Припускаючи, що інструменти розроблені для автоматизації та вирішення проблеми підвищеної складності програмного забезпечення віртуалізації.

- Можливість тимчасово відновити збої за допомогою автоматичної переконфігурації та переміщення робочих навантажень на

додаткові ресурси за допомогою механізмів ІТ-оркестровки. Це може бути використано для зниження вартості операцій на 24/7, автоматично зменшуючи збої.

- Потенціал для підвищення ефективності між ІТ та мережевими операціями.

- Можливість підтримувати оновлення програмного забезпечення (MSSU) з легкою реверсією шляхом встановлення нової версії віртуалізованого мережевого пристрою (VNA) як нової віртуальної машини (VM). Припускаючи, що трафік може бути перенесений зі старої віртуальної машини на нову віртуальну машину без переривання служби. Для деяких додатків може знадобитися синхронізувати стан нової віртуальної машини зі старою віртуальною машиною.

Хоча віртуалізація мережевих функцій надає телекомунікаційній індустрії багато переваг, вона, ймовірно, трансформує ландшафт постачальника. Кожен гравець повинен буде позиціонувати / переставити себе на новий ринок віртуалізації мережевих функцій. Це не є настільки руйнівним, як може здатися, тому що постачальники мережевого обладнання вже реалізують деякі свої рішення, об'єднуючи їх фірмове програмне забезпечення з галузевими стандартними апаратними та програмними компонентами, але на власний розсуд. Застосування їх фірмового програмного забезпечення для роботи на стандартному апаратному забезпеченні стандартним способом може стати значною можливістю для існуючих гравців, оскільки їх програмне забезпечення та мережеве ноу-хау є реальною цінністю у багатьох випадках. Деякі великі гравці галузі вже рухаються в цьому напрямку, пропонуючи віртуалізовані версії своєї продукції. Виклик мережевим операторам полягає в тому, як перенести свою операційну базу та майстерність на мережеве середовище на основі програмного забезпечення, ретельно переорієнтуючи інвестиції, щоб максимально використовувати повторне використання існуючих систем та процесів.

2.4. Можливості для мережевих функцій віртуалізації

2.4.1. Хмарні обчислення

У зв'язку із значним поширенням технології хмарних обчислень зросла роль віртуалізації при побудові хмарних додатків, адже досить зручно реалізовувати певні компоненти обчислювальної мережі віртуально. Рішення віртуалізації придатні для застосування у всіх моделях хмарних сервісів.

В даний час прийнято виділяти три основні моделі обслуговування хмарних технологій, які іноді називають шарами хмари. Можна сказати, що ці три шари - послуги інфраструктури, послуги платформи і послуги додатків - відображають будову не тільки хмарних технологій, а й інформаційних технологій в цілому.

Мережеві функції віртуалізації використовують сучасні технології, такі як ті, що розроблені для хмарних обчислень. В основі цих хмарних технологій лежать механізми віртуалізації: апаратна віртуалізація за допомогою гіпервізорів, а також використання віртуальних комутаторів Ethernet (наприклад, vswitch) для підключення трафіку між віртуальними машинами та фізичними інтерфейсами. Для функцій, орієнтованих на комунікацію, високопродуктивна обробка пакетів доступна через високошвидкісні багатоядерні процесори з високою пропускнуою здатністю вводу / виводу, використання смарт-мереж Ethernet NIC для розподілу навантаження та розвантаження TCP та маршрутизації пакетів безпосередньо в пам'ять віртуальної машини, і драйвери Ethernet в режимі опитування (замість переривань, наприклад, Linux NAPI та Intel DPDK).

Хмарна інфраструктура забезпечує методи підвищення доступності та використання ресурсів за допомогою механізмів оркестровки та керування, що застосовуються до автоматичного створення віртуальних пристроїв у мережі, для управління ресурсами шляхом призначення віртуальних пристроїв на коректний процесор, ядро та інтерфейси, повторна ініціалізація невідлених віртуальних машин, моментальні знімки стану VM та

переміщення віртуальних машин. І нарешті, наявність відкритих API для керування та управління площинами даних, як-от OpenFlow, OpenStack, OpenNaaS або OGF's NSI, забезпечує додатковий ступінь інтеграції мережевих функцій віртуалізації та хмарної інфраструктури.

2.5. Виклики для віртуалізації мережевих функцій

Існує ряд проблем, пов'язаних з впровадженням віртуалізації мережевих функцій, які потребують вирішення спільноти, зацікавленої у прискоренні прогресу. Як ці зусилля можуть бути досягнуті, описано далі в цьому розділі. Проблеми, які ми виявили:

- Портативність / сумісність. Можливість завантаження та виконання віртуальних пристроїв у різних, але стандартизованих середовищах центрів обробки даних, наданих різними постачальниками для різних операторів. Завдання полягає у визначенні єдиного інтерфейсу, який чітко відокремлює екземпляри програмного забезпечення з базою апаратного забезпечення, представлені віртуальними машинами та їх гіперв'язками. Портативність та сумісність дуже важливі, оскільки створюють різні екосистеми для постачальників віртуальних пристроїв та постачальників центрів обробки даних, тоді як обидві екосистеми чітко пов'язані і залежать один від одного. Портативність також дозволяє оператору вільно оптимізувати місце розташування та необхідні ресурси віртуальних пристроїв без обмеження.

- Міграція та співіснування із існуючими платформами. Реалізація мережевих функцій віртуалізації повинна співіснувати з застарілим мережевим обладнанням мережевих операторів та бути сумісною з їхніми існуючими елементами управління, мережевими системами, OSS і BSS, а також потенційно існуючими системами керування IT. Наприклад, якщо мережеві функції віртуалізації оркестровки та IT-оркестровки необхідно буде змінити, архітектура віртуалізації мережевих функцій повинна підтримувати міграцію від сьогоденних фірмових пристроїв фізичного мережевого

рішення до більш відкритих стандартів на основі віртуальних мережевих рішень пристроїв. Іншими словами, мережеві функції віртуалізації повинні працювати в гібридній мережі, що складається з класичних фізичних мережевих пристроїв та віртуальних мережевих пристроїв. Тому віртуальні прилади повинні використовувати існуючі інтерфейси North Bound (для керування та управління) та взаємодіяти з фізичними пристроями, що реалізують однакові функції.

– Управління та оркестрування. Необхідна послідовна архітектура управління та оркестрування. Мережеві функції віртуалізації являють собою можливість через гнучкість, надану програмними мережевими пристроями, що працюють у відкритій та стандартній інфраструктурі, для швидкого виведення керування та оркестровки зв'язних інтерфейсів до чітко визначених стандартів та абстрактних специфікацій. Це значно зменшить вартість та час для інтеграції нових віртуальних пристроїв у операційне середовище оператора мережі. Програмне забезпечення визначено мережею (SDN) далі поширюється на це, щоб оптимізувати інтеграцію пакетних та оптичних комутаторів у систему, наприклад, віртуальний пристрій або мережеві функції. Система керування віртуалізацією може керувати фізичною поведінкою пересилання перемикачі з використанням SDN.

– Автоматизація. Мережеві функції віртуалізації буде масштабувати, лише якщо всі функції зможуть бути автоматизовані. Автоматизація процесу має першорядне значення для успіху.

– Безпека та стійкість. Мережеві оператори повинні бути впевнені, що безпека, стійкість і доступність їхніх мереж не порушуються при введенні віртуалізованих мережевих функцій. Наші вихідні очікування полягають у тому, що мережеві функції віртуалізації покращують стійкість і доступність мережі, дозволяючи відновлювати мережеві функції на вимогу після виходу з ладу. Віртуальний пристрій повинен бути таким же надійним, як і фізичний пристрій, якщо інфраструктура, особливо гіпервізор та його конфігурація, є безпечною. Мережеві оператори будуть шукати інструменти для контролю та

перевірки конфігурації гіпервізора. Вони також вимагатимуть сертифікованих гіпервізорів та віртуальних приладів.

– Стабільність мережі. Забезпечення стабільності мережі не впливає при керуванні та оркестрації великої кількості віртуальних пристроїв між різними постачальниками апаратних засобів та гіперзв'язками. Це особливо важливо, коли, наприклад, віртуальні функції переміщуються, або під час повторної конфігурації (наприклад, через апаратні та програмні збої) або через кібер-атаку. Цей виклик не є унікальним для віртуалізації мережевих функцій. Потенційна нестабільність може також існувати в існуючих мережах залежно від небажаних комбінацій різноманітних механізмів керування та оптимізації, наприклад, діючи на основну транспортну мережу або на компоненти вищих шарів (наприклад, контроль доступу до потоку, контроль завантаженості, динамічна маршрутизація та розподіл, тощо). Слід зазначити, що виникнення нестабільності мережі може мати первинні ефекти, такі як небезпека, навіть різко, параметрів продуктивності або скомпрометування оптимізованого використання ресурсів.

Механізми, здатні забезпечити стабільність мережі, додадуть додаткові переваги для віртуалізації мережевих функцій.

1. Простота. Забезпечення того, що віртуалізовані мережеві платформи будуть простішими для роботи, ніж ті, що існують сьогодні. Значною і актуальною спрямованістю для операторів мережі є спрощення безлічі складних мережевих платформ та систем підтримки, які розвивалися десятиліттями, зберігаючи при цьому безперервність підтримки важливих служб, що генерують дохід.

2. Інтеграція. Безперервна інтеграція декількох віртуальних пристроїв на існуючі стандартні сервери високого обсягу та гіпервізорів є головною проблемою для віртуалізації мережевих функцій. Мережеві оператори повинні мати змогу "змішувати і підбирати" сервери різних постачальників, гіпервізорів від різних постачальників і віртуальних пристроїв від різних постачальників, не зазнаючи значних витрат на

інтеграцію та уникнення блокування. Екосистема повинна запропонувати послуги з інтеграції та обслуговування, а також сторонню підтримку; повинно бути можливо вирішити питання інтеграції між кількома сторонами. Для екосистеми потрібні механізми для перевірки нових продуктів віртуалізації мережевих функцій. Інструменти повинні бути ідентифіковані та / або створені для вирішення цих проблем.

Висновки

Через кілька років ми можемо очікувати, що індустрія зв'язку буде виглядати і відчувати себе схожою на ІТ-індустрію. Там буде ширший спектр бізнес-моделей, більш підходящих для індустрії програмного забезпечення. Складність операцій буде вичерпана завдяки більш автоматизованій роботі, і самозабезпечення буде більш поширеним явищем. Як детально описано в цьому розділі, віртуалізація мережевих функцій має багато переваг для телекомунікаційних операторів, їх партнерам та клієнтам, одночасно надаючи можливість створювати нові типи екосистем, які заохочуватимуть та підтримуватимуть швидке інноваційне зниження витрат та зменшення ризику. Щоб скористатися цими перевагами, технічні проблеми, як описано вище, повинні розглядатися цілісно. Рекомендовано, щоб ІТ та мережеві галузі об'єднували свої найкращі практики та ресурси в спільні зусилля для досягнення широкої згоди щодо стандартизованих підходів та загальної архітектури, які б вирішували ці технічні проблеми і які є сумісними і економніші.

Щоб пришвидшити прогрес, під егідою ETSI створюється нова група експертів з галузевої специфікації (ISG) з відкритим членством для роботи над технічними завданнями для віртуалізації мережевих функцій, як зазначено в цьому розділі. Хоча ETSI забезпечить організацію цієї ініціативи, ISG почне працювати над усіма відповідними організаціями та намагатиметься заохотити конвергенцію ІТ і зусилля щодо стандартизації мережі в цьому напрямку.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ

Мережа, як правило, являє собою набір апаратних мережевих пристроїв, що виконують різні мережеві функції (NF). Застосування NF спеціального призначення є не дешевим задоволенням в плані розробки, і часто необхідно додавати ще деяке обладнання, аби забезпечити нову мережеву послугу, таким чином це ускладнює доступ операторів мережі до нових мережевих послуг за низькою ціною. Віртуалізація мережевої функції (NFV) - це механізм, який має на меті зменшити вартість розгортання мережевих функцій замість використання спеціального обладнання, оскільки NFV використовує програмне забезпечення для реалізації NF на програмних серверах.

Цей механізм спрямований на досягнення високої продуктивності мережі через недосяжні місця в програмному забезпеченні, особливостями NF є реалізація всередині віртуальних машин (VM) як віртуалізовані мережеві функції. Відокремлення продуктивності є ще однією проблемою, а це означає, що навантаження на одну віртуальну машину не повинно впливати на продуктивність інших віртуальних машин, що працюють паралельно. Однак важко забезпечити ізоляцію продуктивності через конфлікт ресурсів на продуктовому сервері. Крім того, різні NF мають різні вимоги щодо впровадження (наприклад, середня пропускна спроможність або обмежена затримка пакетів), які важко забезпечити через недетерміновану поведінку продуктових серверів.

У цій роботі ми досліджуємо, як можна вирішити проблеми резервування ресурсів і це може бути корисним для досягнення ефективності мережевого додатка в реальному часі. Крім того, ми пропонуємо поглиблене порівняння віртуалізації KVM та LXC як з точки зору продуктивності, так і з точки зору ізоляції.

Телекомунікаційні оператори стикаються з проблемами надання нових мережевих послуг та одночасним зниженням вартості цих послуг. Великі

операторські мережі, як правило, обладнані різними апаратними мережевими пристроями, і для додавання нових мережесервісів часто потрібно додати ще одну частину, і таке обладнання спеціального призначення зазвичай дороге, вимагає більшого простору та збільшує витрати на енергію, але ж воно може бути не використаним протягом більшої частини часу, тоді як операторам все ж потрібно заплатити повну вартість обладнання.

Крім того, складно керувати, оновлювати та розгортати велику мережу, яка являє собою набір різних апаратних мережесервісів, вироблених кількома постачальниками. Тому додавання більшої кількості апаратних засобів значно збільшує як капітальні, так і операційні витрати по мережі. Оператори мережі прагнуть запропонувати нові послуги для отримання більшого прибутку, але вартість та складність апаратних мережесервісів стають вузькими місцями.

Альтернативою апаратним цілям є використання програмного забезпечення, що працює на загальних комп'ютерах. Програмне забезпечення має кілька переваг у порівнянні з виділеним устаткуванням. Воно є гнучким і може управлятися за нижчою ціною, і це призводить до ідеї впровадження мережесервісів функціональності в програмне забезпечення для вирішення вищезазначених проблем вартості та складності.

У зв'язку з цим було запропоновано структуру віртуальної мережі (VNF) для розміщення програмних мережесервісів / середніх скриньок на недорогих програмних серверах (наприклад, функціях віртуальної мережі). Це дає змогу спільно розгортати багато різних мережесервісів функцій (наприклад, IP-експедитора, брандмауера, системи виявлення вторгнень тощо) як додатки на єдиному сервері. Використання товарного обладнання та програмного забезпечення робить рішення більш гнучким, програмним та менш дорогим, ніж його аналог обладнання. Вигоди є значними, і тому мережесервіси оператори та постачальники ініціювали нову групу стандартизації для функцій віртуальної мережі.

Концепція віртуалізованих мережевих функцій часто поєднується з хмарними обчисленнями яка останніми роками стала видатною комп'ютерною технологією. Хмарне обчислення дозволяє підприємству передавати свої обчислювальні вимоги постачальникам хмарних сервісів. Аутсорсинг зменшує витрати на підтримку комп'ютерної інфраструктури на підприємстві. У той же час, постачальник послуг може отримувати більше доходу, пропонуючи хмарні сервіси декільком клієнтам одночасно.

Провайдер послуг (оператор мережі) використовує методи віртуалізації серверів, щоб розділити одну фізичну інфраструктуру між кількома клієнтами. Це досягається за рахунок паралельної роботи декількох гостьових операційних систем на тому ж апаратному забезпеченні і дозволяють кожному гостю запускати певну службу (мережеву функцію). Віртуалізація також дає гнучкість, так що постачальник послуг може додавати або видаляти ресурси за різними вимогами, що призводить до економічності.

Є пропозиції, коли постачальник хмарних послуг (який може бути оператором мережі) може запропонувати мережеві функції як хмарні сервіси, за таких пропозицій клієнт передає операторам керування мережевими функціями, що допомагає підприємству знизити вартість керування мережею. Оператор мережі виділяє одну або декілька віртуальних машин для виконання певних задач обробки мережі для підприємства. Крім того, оператор мережі підтримує багатовекторність і спільно керує кількома мережевими функціями (віртуальних машин), що належать різним підприємствам на одному і тому ж фізичному сервері.

Ідея аутсорсингу віртуальних мережевих функцій є привабливою, але витісняє багато проблем для мережевих операторів. Першим завданням є продуктивність, оскільки обробка пакетів у програмному забезпеченні, як правило, повільніше, ніж в апаратному забезпеченні. Але в той же час потужність продуктивних серверів зростає, а ціна знижується. Наприклад, сьогодні ми можемо придбати багатоядерний сервер із швидким доступом до

пам'яті (NUMA) і високою пропускнуою здатністю вводу / виводу (PCI-Express) за доступною ціною. Проте все ще важко досягти високошвидкісної продуктивності обробки пакетів, оскільки вузькі місця роботи можуть перебувати в програмному забезпеченні, що може запобігти використанню мережевих функцій у програмному забезпеченні у повному обсязі можливостей, пропонуваніх поточним серверним обладнанням. Основна увага нашої роботи полягає в тому, щоб виявити такі обмеження продуктивності по шляху обробки пакетів на сервері, на якому запуснені віртуальні машини, і дослідити, як можна уникнути обмежень продуктивності, щоб максимально підвищити продуктивність.

В ідеалі продуктивність однієї віртуальної машини не повинна впливати на ефективність інших віртуальних машин, що працюють паралельно, це властивість відома як ізоляція ефективності. Однак досягнення ізоляції продуктивності є складним завданням. Це пов'язано з тим, що одна віртуальна машина може намагатися зарезервувати всі доступні системні ресурси (такі як процесор, пам'ять та пропускну здатність каналу зв'язку), що призведе до деградації продуктивності для інших віртуальних машин. Тому правильне управління ресурсами вздовж площини даних віртуальної машини є ключовим для досягнення високої продуктивності та ізоляції в той же час. У нашій роботі ми досліджуємо, як таке управління ресурсами може бути досягнуто за допомогою різних технологій віртуалізації, і які наступні методи впровадженні в мережу допомагають досягти ефективності використання мережевих ресурсів.

Іншою бажаною властивістю віртуальної мережевої функції є можливість надання гарантій обслуговування, наприклад, в частині мінімальної пропускнуої здатності або максимальної затримки пакетів. Мережеві функції, що працюють на різних віртуальних машинах, незалежні: може статися, що кілька мережевих функцій хочуть одночасно передавати пакети на тому ж фізичному інтерфейсі. Як наслідок, може існувати спорідненість зв'язку та не симетрична поведінка продуктивності. У нашій

роботі ми досліджуємо, як можна керувати виконанням окремих мережевих функцій для досягнення єдиних цілей служби.

У цьому налаштуванні комп'ютерний метод віртуалізації (тобто, віртуалізація сервера) використовується для паралельного запуску декількох віртуальних машин на одній апаратурі. Тут ми використовуємо віртуальні маршрутизатори, що виконують IP-пересилання як приклад мережевих функцій. Кожна віртуальна машина оснащена власним набором мережевих ресурсів (віртуальних мережевих інтерфейсів (VIF), протоколів маршрутизації, правил фільтрації пакетів тощо). Навіть якщо віртуальна машина спілкується через віртуальні інтерфейси, її метою часто є обробка пакетів, що з'являються на фізичних інтерфейсах у середовищі хосту. Це означає, що для перенаправлення пакетів між фізичними та віртуальними інтерфейсами потрібен механізм. Це перенаправлення вводить шар неорієнтованості, який відсутній у не віртуальній (фізичній) системі. Це відомо як віртуалізація введення-виведення.

3.1. Проблеми застосування VNF

Віртуалізація мережевих функцій отримала значний інтерес в останні роки як в науковій галузі, так і в телекомунікаційній галузі. Вона висуває ідею реалізації мережевих функцій у програмному забезпеченні, що працює на звичайних комп'ютерах, замість розгортання виділеного обладнання для кожної конкретної мережевої функції (IP-експедитори, брандмауери, WAN-прискорювачі тощо). Різні мережеві функції можуть працювати паралельно як віртуальні машини / екземпляри на тій самій комп'ютерній платформі, тим самим розподіляючи вартість апаратури за допомогою кількох мережевих функцій. Рішення на основі програмного забезпечення мають багато переваг у порівнянні з аналогами обладнання, включаючи гнучкість, легкість керування та меншу вартість. Проте існують серйозні проблеми, пов'язані з віртуалізованими програмними рішеннями.

1. Продуктивність є першим і найбільш очевидним викликом, оскільки обробка пакетів у віртуальних машинах покриває накладні витрати, що може призвести до штрафних санкцій.

2. Ізоляція продуктивності є ще однією проблемою, оскільки ми спільно знаходимо багато різних мережевих функцій на тій же серверній платформі, і поведінка однієї віртуальної машини може вплинути на продуктивність інших. Це може потенційно ускладнити надання послуг та гарантій роботи віртуальних машин.

У нашій роботі ми досліджуємо, яким чином можна забезпечити функції віртуальних мережевих функцій. Ми спеціально шукали відповіді на наступні питання дослідження:

1. Продуктивність: як мережеві компоненти можна віртуалізувати в комп'ютерній системі, і які компроміси між функціональністю та продуктивністю віртуалізації?

2. Продуктивність ізоляції: як віртуальна мережа може функціонувати одночасно і ділитися ресурсами, не впливаючи на продуктивність один одного, і які компроміси пов'язані з механізмами для досягнення ізоляції продуктивності?

3. Сервісні гарантії: як можна інтегрувати контроль трафіку та планування віртуальних машин при гарантованому рівні обслуговування та який вплив на продуктивність? У решті цього розділу ми деталізуємо кожне питання дослідження, а також обговорюємо напрями, які ми беремо в нашій роботі для вирішення дослідницьких питань.

Продуктивність

Незважаючи на те, що нинішні апаратні платформи можуть підтримувати високоефективні мережі, все ще є вузькі місця, пов'язані з способами, якими організована обробка пакетних програм у операційних системах. Наприклад, для віртуалізованого середовища може знадобитися використовувати програмний міст для перенаправлення пакетів між віртуальною машиною та операційною системою хосту. Додаткова обробка

пакетів, що виникає в цьому, є накладними витратами на віртуалізацію, що погіршує продуктивність порівняно з невіртуальною платформою.

У даній роботі ми досліджуємо накладні витрати на віртуалізацію для різних комбінацій технологій віртуалізації операційної системи і вводу-виводу, та вивчаємо, як можна зменшити накладні витрати на віртуалізацію до мінімального рівня. Наша гіпотеза полягає в тому, що для оптимізації компонентів віртуальних мереж (наприклад, мережевих і віртуальних мережевих пристроїв) є значні можливості для вдосконалення, оскільки вони загалом не розроблені з урахуванням продуктивності віртуальних мереж. Конструкція площини даних віртуальної мережі ускладнюється тим, що це комбінація декількох різних модулів обробки пакетів, які можуть працювати на різних рівнях в комп'ютерній системі.

Продуктивність ізоляції

Коли мережеві функції віртуалізуються та запускаються у середовищі, паралельно буде функціонувати багато мережевих функцій як віртуальні машини на одному апаратному забезпеченні, де кожна віртуальна машина може належати іншому клієнту. У такій установці бажано підтримувати ізоляцію продуктивності серед мережевих функцій. Виконання ізоляції є власністю віртуалізованої платформи, що віртуальна машина не повинна впливати на продуктивність інших. Тим не менш, важко зберегти ізоляцію продуктивності, оскільки системні ресурси поділяються між віртуальними машинами, і конфлікт ресурсів може призвести до слабкої ізоляції продуктивності. Наприклад, перевантажена віртуальна машина може переповнювати загальну чергу пакетів, що може призвести до втрати пакетів для інших віртуальних машин.

Технології віртуалізації системи забезпечують певний рівень резервування ресурсів для віртуальних машин, але недостатньо для забезпечення належної ізоляції продуктивності для функцій віртуальної мережі. Причиною є те, що середовище хосту (наприклад, ядро операційної системи, включаючи мережеві інтерфейси), ділиться між усіма віртуальними

машинами, а також мережевий трафік на цьому рівень не асоціюється з віртуальними машинами, отже, не існує жодних засобів для виконання політик резервування.

Відсутність контролю над трафіком в спільному середовищі ядра та хостингу призводить до слабкої ізоляції продуктивності. Вхідний трафік у середовищі хостингу розміщується в мережевій черзі, яка містить трафік всіх віртуальних машин. Вхідний пакет може бути скинутий через конфлікт у черзі ще до того, як буде визначено, до якої віртуальної машини належить трафік. Пакетне падіння для певної віртуальної машини призводить до деградації пропускної спроможності. Зниження пропускної спроможності через конфлікт ресурсів у середовищі хостингу відображає слабку ізоляцію продуктивності.

Ми передбачаємо, що управління дрібнозернистим мережевим трафіком на ранній стадії обробки пакетів може бути корисним для поліпшення ізоляції. У нашій роботі ми досліджуємо, як надходження трафіку для віртуальної машини можна класифікувати в зарезервовану чергу мережі всередині NIC. У зв'язку з цим ми вивчаємо, як процесорні ядра можуть бути пов'язані з мережевими чергами, щоб поширити робоче навантаження та уникнути суперечок з боку CPE.

Сервісні гарантії

Угода про рівень сервісу (SLA) - це договір між клієнтом та постачальником про рівень обслуговування, на який споживач може розраховувати від постачальника. Наприклад, SLA може визначити гарантію обслуговування з точки зору мінімальної пропускної здатності мережі або максимальної затримки пакетів. Проте у віртуалізованому середовищі досягнення таких гарантій обслуговування є складним завданням, оскільки це вимагає не лише підвищення продуктивності, як обговорювалося вище, але й належні засоби для забезпечення кількісних рівнів гарантій обслуговування. У певній мірі проблема схожа на проблему забезпечення послуг у не віртуальних IP-мережах, де різні потоки мереж конкурують за

фізичні ресурси, такі як пропускна здатність зв'язку та буферний простір. Це також стосується і віртуалізованої мережі, але, крім того, існує також конкуренція для ресурсів обчислень хоста серед різних функцій віртуальної мережі.

Крім того, різні віртуальні машини у віртуальній мережі можуть належати до різних мережевих підприємств, тому мережевий трафік не знаходиться під контролем єдиного адміністративного домену. Тому для управління потоками трафіку різних віртуальних машин необхідні додаткові механізми для надання гарантій обслуговування.

У нашій роботі ми досліджуємо, як можна забезпечити гарантії пропускної здатності та затримки для віртуальних мережевих функцій. Наша гіпотеза полягає в тому, що прямий контроль над потоком мережевого трафіку кожної віртуальної машини може бути корисним для забезпечення як гарантії пропускної спроможності, так і затримки. Це пов'язано з тим, що віртуальні IP-мережі вже продемонстрували, що гарантії продуктивності можуть бути досягнуті для різних конкуруючих мережевих потоків, прямо регулюючи їх відправлення та прибуття в пакет. У цьому регіоні такі механізми, як контроль рівня частоти токенів та планування пакетів *Weighted Fair Queuing*, є добре налагодженими методами надання гарантій обслуговування.

Висновки

Ми відзначили, що багато поточних рішень NFV, особливо з промисловості, полягають, головним чином, в об'єднанні ресурсів конкретного постачальника, розміщених у хмарі, а не на реальній підтримці гнучкості, сумісності, інтегрованого управління, оркестровки і сервісна автоматизація, що є основними вимогами для NFV. Очікується, що такі реалізації будуть продовжувати зростати, перш ніж NFV стане повністю стандартизованою. Оскільки NFV переміщується з лабораторій і PoCs на

тестування та комерційні розгортання, постачальники інвестують значні ресурси для розвитку рішень NFV.

Ми розглянули підходи SDN та NFV. Ми забезпили основу для формального вирішення проблеми як майбутньої роботи та запропонували прототип бізнес-моделі концепції наближення функції віртуальної мережі.

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ VNF

Метод оптимізації розташування та маршрутизації в мережі за рахунок віртуальних мережевих функцій

Віртуалізацію мережевих функцій (NFV) поступово застосовують Інтернет-провайдери (ISPs) у їх транспортних мережах за допомогою віртуальних мережевих функцій (VNF), аби відповідати вимогам клієнтів.

Мотивацією до цих змін є підвищення керованості, надійності та продуктивності систем за допомогою віртуалізації, збільшення енергії та простору, надані віртуалізацією, за ціною, яка стає конкурентоспроможною відносно застарілих функцій фізичної мережі. З точки зору оптимізації мережі, маршрутизація за рахунок VNF через транспортну мережу передбачає застосування VNF щодо сучасного рівня: бітрейт кожного потоку попиту може змінюватися вздовж мережі VNF, обробки VNF, а затримка та навантаження обслуговування є вимогами відстеження трафіку. У даній роботі ми пропонуємо мережу NFV, придатну для операцій інтернет-провайдера. Ми визначаємо загальну задачу оптимізації маршрутизації мережі через VNF і розробимо програмну модель, зробимо висновки про можливі компроміси між досягнутими цілями Інтернет-провайдера, що існували в минулому, та новітніми цілями TE-NFV через моделювання нових топологій для Інтернет-провайдерів.

3.1. Технічні питання NFV

З появою віртуалізації мережевих функцій (NFV) [1], [2] увагу досліджень в даний час зосереджено на ключових аспектах систем NFV через Standards Developing Organizations (SDO). Ключові аспекти, про які варто згадати, такі:

1. Надання послуг віртуалізації;

2. Оркестрація процесів над VNF вузлами як функція призначення попитів до існуючих ланцюгів VNF або підрядкових ланцюгів;
3. Зміни вхідних / вихідних швидкостей передачі в VNF через конкретні VNF операції (наприклад, стиснення / декомпресія);
4. Обробка VNF та переадресація латентності як параметра оркестровки.

ETSI де-факто визнало SDO еталонною специфікацією функціональної архітектури високого рівня NFV. ETSI визначає три рівні для архітектури NFV: віртуальні мережеві функції (VNF), вузли; NFV Infrastructure (NFVI), включаючи елементи, необхідні для запуску VNF, такі як вузол гіпервізора та кластери віртуалізації; управління та оркестрування (MANO), обробка операцій, необхідних для запуску, міграції, оптимізації вузлів і мереж VNF, зв'язку з мережевим оркестратором.

Перспективним використанням NFV для мереж операторів є віртуальне обладнання для приміщень клієнтів (vCPE), яке є спрощеною моделлю CPE обладнання за допомогою віртуалізованих індивідуальних мережевих функцій, розміщених у мережах доступу та агрегації, як це показано на рисунку 1. Операції MANO повинні враховувати особливий характер архітектур NFV, таких як латентність / трафік обмежується як вузлом VNF, так і тим фактом, що деякі VNF можуть змінювати вхідний бітрейт, стискаючи або розпаковуючи його і т. д. У цьому наша робота несе такі завдання:

- ми визначаємо проблему і формулюємо за модель оптимізації розміщення та маршрутизації VNF (VNF-PR), включаючи обмеження стиснення / декомпресії та два режими переадресації латентності (з і без швидкого шляху), як під цілями TE, так і NFV.

- ми розробляємо математико-евристичний підхід, який дозволяє нам проводити експерименти для випадків протягом прийняттого часу виконання.

– ми оцінюємо наше рішення на реалістичних налаштуваннях. Ми формулюємо метод ефективності використання VNF щодо стратегій розгортання NFV.

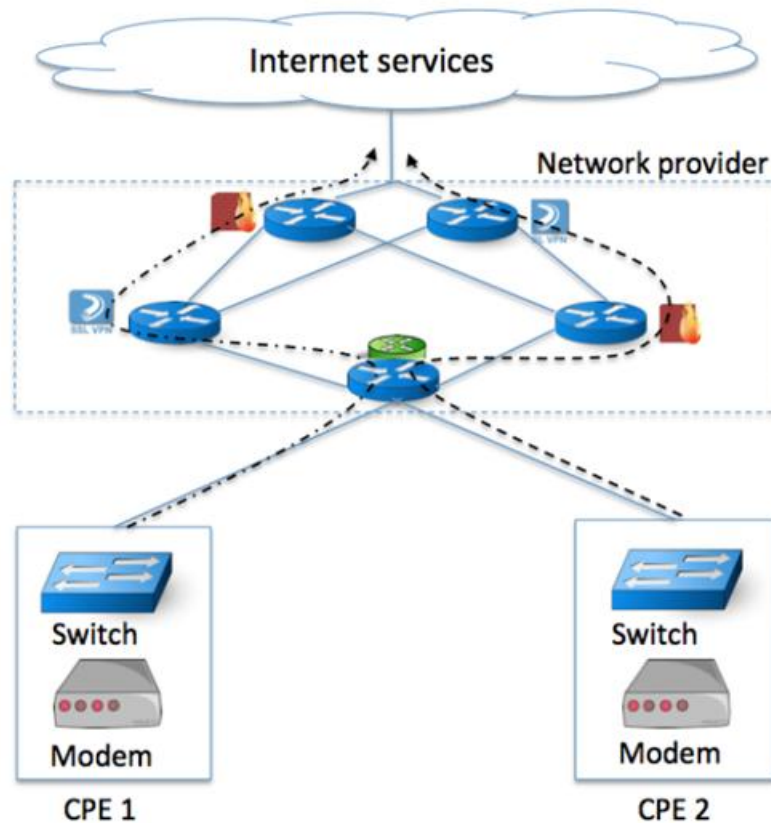


Рисунок 1. З'єднання VNF з віртуалізованим обладнанням під замовників приміщень (vCPE)

Деякі дослідники в своїх роботах з оркестровки VNF схильні сконцентрувати цю проблему на проблемі вбудованості віртуальної мережі (VNE). Наприклад, VNF можуть слугувати як звичайні віртуальні машини (VM), які повинні бути віднесені до мережі VM контейнерів, пов'язаних між собою через фізичні посилення, які містять логічні посилення на вимоги віртуальної мережі. Кожний сервісний ланцюг має специфічні вимоги, зокрема, вимоги про кінцеву затримку.

Розміщення та маршрутизація мереж з VNF є проблемою, яка принципово відрізняється від проблеми VNE. Як і у VNE, вузли віртуальної мережі потрібно помістити в основну фізичну інфраструктуру. Однак,

інакше, ніж VNE, в мережах VNF: (i) попит не є запитом на багатоточкове з'єднання з мережею, а є попитом на маршрутизацію поточного джерела “точка-точка” та (ii) специфічні аспекти NFV, такі як переадресація затримки, зміни вхідного / вихідного бітрейту, а також ланцюгування не розглядаються в VNE, і їх включення ще більше збільшить складність часу.

У цьому сенсі проблема з'єднання VNF наближається до проблем локалізації об'єкта, тоді як VNE є проблемою відображення.

3.2. Проблематика

У сучасній техніці роботи з NFV оркестрації, як правило, відображають проблему про вбудовування віртуальної мережі (VNE). Наприклад VNF обробляються як звичайні віртуальні машини (VM), які повинні бути віднесені до мережі контейнерів VM, пов'язаних між собою через фізичні посилення, які містять логічні посилення вимог віртуальної мережі. Аналогічно, можливе розміщення VNF з'єднань, яке поєднує в собі транспортизацію маршрутів та VNE ланцюгів, спочатку вирішуючи розташування, а потім - зміну ланцюгів. До того ж відокремлюють спадкову проблему VNEб яка має дві складові: VNF-з'єднання та VF-вклади, де в ланцюжку послуг вбудовано VM, а кожен VM - розташований на фізичних серверах. Кожне сервісний ланцюг має специфічні вимоги, зокрема, - вимога кінцевої затримки.

Розміщення та маршрутизація VNF ланцюгів - це проблема, яка принципово відрізняється від проблеми VNE. Як і у VNE, вузли віртуальної мережі потрібно помістити в основну фізичну інфраструктуру. Проте, інакше як VNE, в поєднанні з VNF:

(i) попит не є запитом мережі з множинним числом точок, а як попит на маршрутизацію потоку джерело-призначення точка-точка

(ii) конкретні аспекти NFV, такі як переадресація латентної поведінки, зміна бітрейту вхід / вихід не розглядаються в VNE, і їх включення

збільшити щільність часу. У цьому сенсі проблема VNF близька до проблеми розташування об'єктів, тоді як VNE є проблемою з'єднань.

Ми вважаємо, що спосіб вирішення проблем NFV MANO полягає у визначенні проблеми розміщення та маршрутизації VNF (VNF-PR), безпосередньо адаптованої до середовища NFV, з метою щільності часу, точності моделювання та практичної зручності використання. Це також підхід, прийнятий кількома напрямками:

- оркестрування VNF, моделюючи його як задачу планування VNF і пропонуючи масштабування структури за рахунок математичних розрахунків.

- проблему VNF-PR для середовищ обробки даних з оптичними та електронними елементами, формулюючи проблему як завдання подвійного цільового програмування, і запропоновано евристичний алгоритм для її вирішення.

- проблема розміщення VNF вузла з конкретно визначеним докладним аналізом пакетів (DPI), з формальним визначенням проблеми та евристичним алгоритмом для її вирішення.

3.3. Опис технології формування

Нижче ми надаємо визначення проблеми розміщення та маршрутизації VNF (VNF-PR) та формулюємо математичне програмування та модель.

А. Проблема.

Проблема розміщення та маршрутизації (VNF-PR) віртуальних мережевих функцій

Завдання. Заданий графу мережі $G(N; A)$, де N являє собою набір вузлів, A набір дуг між вузлами, $N_v \subseteq N$ – сукупність вузлів, що розташовані під NFVI серверні кластери. Враховуючи набір запитів D , кожен запит $k \in D$, характеризується джерелом o_k , напрямком t_k , смугою пропускання b_k та набором VNF різних типів, які повинні проходити через крайові потоки, задачею оптимізації VNF-PR є знайти:

- оптимальне розміщення вузлів VNF під NFVI кластерами ;
- оптимальне присвоєння попитів до VNF ланцюгів на предмет:
 - Обмеження потужності NFVI кластеру;
 - Обмеження стиснення / декомпресії VNF потоку;
 - Обмеження переадресації затримки VNF;
 - Обмеження доступу до VNF вузла

Метою оптимізації є пошук показників ефективності як на рівні мережі, так і на рівні NFVI. У нашій мережевій моделі ми пропонуємо як мережеву метрику на рівні класичної TE метрики, тобто мінімізацію максимального використання, так і метрику рівня NFVI як мінімізацію виділених обчислювальних ресурсів. Крім того, ми припускаємо що:

- декілька VNFs одного типу може бути розподілені на одному вузлі, але кожен запит не може розподілити потік на кілька VNF того ж типу.
- різні шаблони віртуальних машин (VM) для впровадження VNF, кожен із яких має різні обчислення споживання ресурсів та направлені на затримку передачі VNF.
- Споживання обчислювальних ресурсів VNF може бути виражено в термінах живого ресурсу пам'яті (наприклад, ОЗП) та обчислювальних процесорів (ЦП), проте модель повинна бути достатньо універсальною, щоб інтегрувати інші обчислювальні ресурси.
- Затримка, введена VNF, може слідувати одному з двох наступних режимів (як показано на рис.2):

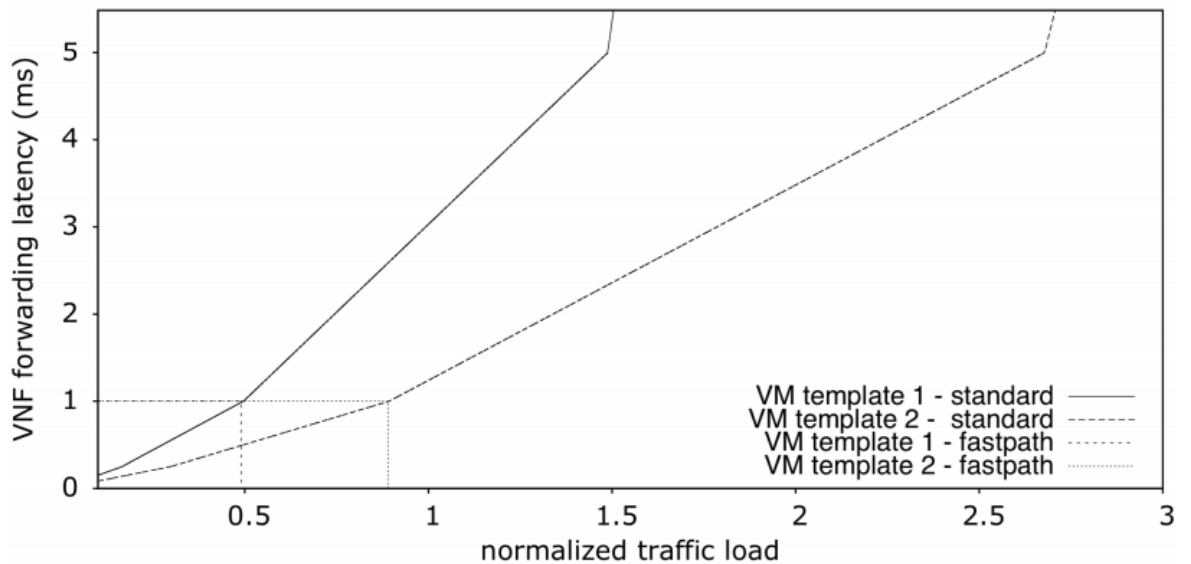


Рис 2. Приклад профілів латентності переадресації VNF.

1. Стандартний: VNFs мають буфери, що направлена затримка розглядається як фрагмент опуклої лінійної функції для сукупної бітової швидкості на VNF. Це дифолтний випадок VNF функціонування з заміною за рахунок збільшення сокетних буферів.

2. Швидкий: VNF впроваджені без буферів або з дуже маленьким буфером (1-2 пакети), так що направлена латентність зростає до максимальної сукупної бітової швидкості, після якої пакети скидаються.

На рисунку 2 наведено приклади переадресації направленої затримки для двох випадків (з двома шаблонами, що використовуються для тестів).

– Для кожного запиту та кожного кластера NFVI може бути встановлений тільки один VNF стиснення / декомпресії. Це дозволяє тримати час виконання на прийнятному рівні, надмірно не зменшуючи VNF розміщення.

– Кожен мережний вузол взаємопов'язаний з NFVI кластерним вузлом.

3.4. Математичне формулювання

У таблиці І представлені математичні позначення, що використовуються в формулюванні лінійного програмування змішаного цілого числа (MILP) задачі VNF-PR.

N_a	вузол доступу
N'_a	Дублювання вузлів доступу, і яких знаходиться попит
N_c	Агрегація / основні вузли
N_v	Вузли, в котрих знаходяться VNF $N_v = N_a \cup N_c$
N	Набір всіх вузлів $N = N_a \cup N_v$
A	набір всіх дуг $A \subseteq NN$
D	попити
R	типи ресурсів (процесор, оперативна пам'ять, пам'ять)
F	Типи VNF
C_f	набір можливих копій VNF типу f
T	набір конфігурацій шаблонів VM
o_k	походження попиту $k \in D$
t_k	призначення попиту $k \in D$
b_k	qt (смуга пропускання) попиту $k \in D$
m_{kl}	1, якщо запит $k \in D$ вимагає VNF $l \in F$
γ_{ij}	ємність дуги
λ_{ij}	латентність зв'язку
M_i	максимальний обсяг трафіку, який можна змінити
Γ_{ir}	ємність вузла $i \in N$ в термінах ресурсу типу $r \in R$
rr_{rt}	потреба ресурсу $r \in R$ для VM типу t

μ_f	коефіцієнт компресії / декомпресії для VNF $f \in F$
$g_{gj}^t(b)$	j -я функція латентності $f \in F$ і загальна смуга пропускання b , якщо вона виділена на VM типу t , лінійна у смузі пропускання
L	максимально допустима латентність для попиту
x_{ij}^k	1, якщо дуга $(i; j)$ використовується для попиту $k \in D$
z_{ift}^{kn}	1, якщо вимога $k \in D$ використовує копію n -го типу VNF типу $f \in F$, розміщену на вузлі $i \in N_c$ на VM типу t
y_{ift}^n	1, якщо n -й примірник типу VM t присвоюється VNF типу $f \in F$, розташованого вузлом $i \in N_c$
ϕ_{ij}^k	потік за вимогою $k \in D$ на дугу $(i; j)$
ψ_{if}^{kn}	Потік за вимогою $k \in D$, що надходить у вузол i та копіювання n VNF типу $f \in F$
l_{if}^k	затримка, яка вимагає $k \in D$ 'страждає', використовуючи VNF типу $f \in F$, розташованого вузлом $i \in N_c$

Ми працюємо над розширеним графом (для розрізнення між вузлами походження / призначення та вузлами NVFI), в якому кожен вузол доступу i дублюється в вузлі i_0 . Дуга $(i; i_0)$ буде додана до j та всі дуги $(i; j)$ походять з вузла доступу i буде перетворений в дуги $(i_0; j)$.

Бінарна змінна x_{ij}^k являє собою посилення на попит використання, а отже, і шлях, який використовується попитом. Бінарна змінна y_{ift}^n являє собою копію VNF на певному вузлі. Бінарна змінна z_{ift}^{kn} являє собою присвоєння заданого запиту певній копії VNF. Аби впровадити можливість стискування / декомпресування потоків для деяких VNF нам потрібно ввести явну змінну потоку ϕ_{ij}^k і параметр стиснення μ_f для кожного типу VNFs. Крім того, змінна k_n являє собою потік попиту k , входить у вузол i і використовується копія n VNF типу f .

Нижче ми вводимо обмеження.

Баланс потоку маршрутизації на одному шляху:

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ji}^k - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } i = o_k \\ -1 & \text{if } i = t_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \mathbf{A}k \in D, i \in A$$

(1)

Потік і компресія / декомпресійний баланс для вузлів NFVI та для кожного запиту:

$$\sum_{j \in N:(i,j) \in A} \phi_{ji}^k - \sum_{j \in N:(j,i) \in A} \phi_{ji}^k \sum_{f \in F, n \in C_f} (1 - H_f \psi_{if}^{kn}) \quad (2)$$

Баланс потоку для вузлів доступу:

$$\sum_{j \in N:(i,j) \in A} \phi_{ji}^k - \sum_{j \in N:(j,i) \in A} \phi_{ji}^k = \begin{cases} b^k & \text{if } i = o_k \\ h^f & \text{if } i = t_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \mathbf{A}k \in D, \mathbf{A}i \in N_a \quad (3)$$

Когерентність між змінами шляху та потоку:

$$\phi_{ij}^k \leq M_x x_{ij}^k \quad \mathbf{A}k \in D, \mathbf{A}(i,j) \in A \quad (4)$$

$$x_{ij}^k \leq \frac{1}{\prod_{f \in F: m_{kf}=1} h_f} \phi_{ij}^k \quad \mathbf{A}k \in D, \mathbf{A}(i,j) \in A \quad (5)$$

Обмеження лінеаризації компресії / декомпресії VNF:

$$\psi_{if}^{kn} \leq \sum_{j \in N:(i,j) \in A} \phi_{ji}^k + M_i (1 - \sum_{t \in T} z_{ift}^{kn}) \quad \mathbf{A}i \in N_v, k \in D, f \in F, n \in C_f$$

(6)

$$\psi_{if}^{kn} \geq \sum_{j \in N:(i,j) \in A} \phi_{ji}^k + M_i (1 - \sum_{t \in T} z_{ift}^{kn}) \quad \mathbf{A}i \in N_v, k \in D, f \in F, n \in C_f \quad (7)$$

$$\psi_{if}^{kn} \leq M_i (\sum_{t \in T} z_{ift}^{kn}) \quad \mathbf{A}i \in N_v, k \in D, f \in F, n \in C_f \quad (8)$$

Тільки один компресійний / декомпресійний VNF для кожного вузла і попиту:

$$\sum_{t \in T} \sum_{f \in F, n \in C_f: H_f \neq 1} z_{ift}^{kn} \leq 1 \quad Ak \in D, Ai \in N_v \quad (9)$$

Обмеження швидкості використання:

$$\sum_{k \in D} b_k \rho h_{ij}^k \leq U_{ij}, A(i, j) \in A \quad (10)$$

Якщо немає VNF, не може використовуватись будь-якою вимогою:

$$z_{ift}^{kn} \leq y_{ift}^n \quad Ak \in D, Ai \in N_v, Af \in F, At \in T, n \in C_f \quad (11)$$

Якщо трафік не проходить через VNF, не можна використовувати:

$$z_{ift}^{kn} \leq \sum_{j: (j,i) \in A} x_{ji}^k \quad Ak \in D, Ai \in N_v, Af \in F, At \in T: m_{kf}=1 \quad (12)$$

Кожен запит використовує рівно один VNF кожного типу, який він запитує

$$\sum_k \sum_{f \in F: m_{kf}=1} z_{ift}^{kn} = 1 \quad Ak \in D, f \in F: m_{kf}=1 \quad (13)$$

На кожен вузол, щонайбільше, VM призначений для кожної копії VNF певного типу:

$$\sum_{t \in T} y_{ift}^n \leq 1 \quad Ai \in N_c, Af \in F, An \in C_f \quad (14)$$

Вузол ємністю (утилізація VNF):

$$\sum_k \sum_{f \in F} z_{ift}^{kn} \leq \Gamma_{ir} \quad Ai \in N_v, At \in R \quad (15)$$

Лінеаризація функції затримки:

$$l_{if}^k \leq g_{ft}^j (\sum_{d \in D} \psi_{if}^{dn} - L_{max} (1 - Ak z_{ift}^{kn})) \quad Ak \in D, Ai \in N_c, f \in F, At \in T, n \in C_f, Aj \in 1..G \quad (16)$$

Максимальна латентність:

$$\sum_{j: (j,i) \in A} x_{ji}^k \sum_{i \in N_c} \sum_{f \in F} l_{if}^k \leq L \quad Ak \in D \quad (17)$$

Екв. (3) являє собою баланс потоку для вузлів доступу. У пункті призначення вузла кількість потоків встановлюється рівною попиту, помноженому на всі фактори стиснення всіх необхідних VNF. Екв. (2) являє

собою баланс потоку для даного вузла, який має можливість розміщення VNFs. Ми припускаємо, що при наданні вузла i вимоги k такий попит використовує максимум VNF f з коефіцієнтом стискання / декомпресії $\mu_f = 1$. Якщо попит проходить через VNF з коефіцієнтом декомпресії μ_f , то вихідний потік вузла пропорційний вхідному потоку:

$$\sum_{j \in N: (i,j) \in A} \phi_{ij}^k = H_f \sum_{j \in N: (j,i) \in A} \phi_{ji}^k$$

Використовуючи змінну z , яка являє собою розподіл попиту на VNF i вираховує вихідний потік, який ми отримуємо:

$$\sum_{j \in N: (i,j) \in A} \phi_{ij}^k - \sum_{j \in N: (j,i) \in A} \phi_{ji}^k = \sum_{j \in N: (j,i) \in A} \phi_{ji}^k \sum_{t \in T} (H_f - 1) z_{ift}^{kn} \quad (18)$$

Змінна ψ_{if}^{kn} , якщо вона являє собою потік попиту k , який входить до вузла i і проходить через копію n VNF типу f (нелінійне подання)

$$\psi_{if}^{kn} = \left(\sum_{j \in N: (j,i) \in A} \phi_{ji}^k \right) \sum_{t \in T} \sum_{n \in N_f} z_{ift}^{kn}$$

Обмеження можна лінеаризувати, використовуючи (6) - (8), причому параметр M_i дорівнює $\sum_{j \in N: (j,i) \in A} \gamma_{ji}^k$, що являє собою максимальну кількість потоку входу в вузол i .

Як згадувалося раніше, ми розглядаємо дві цільові функції:

– Мета TE: мінімізувати максимальне використання мережевого посилання:

$$\text{Min } U \quad (19)$$

– Мета NFV: мінімізувати кількість ядер (CPU), що використовуються в реальному часі VNFs:

$$\text{Min } \sum_{j \in N_v} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{k \in D} \sum_{r=CPU} r r_{rt} y_{ift}^n \quad (20)$$

Перша мета дозволяє враховувати невід'ємні коливання, пов'язані з інтернет-трафіком, і, таким чином, мінімізувати ризик раптового обмеження мережевих зв'язків. Останнє припускає той факт, що сьогодні перші модульні витрати на сервери віртуалізації, особливо в плані енергоспоживання, є CPU.

3.5. Задачі і аспекти впровадження технологій віртуалізації

Ми стикаємося з багатоцільовою проблемою: мінімізувати максимальну утилізацію каналів і мінімізувати загальну вартість віртуалізації на рівні NFVI. Ці дві цілі перебувають у конкуренції; насправді, щоб отримати низький рівень використання, необхідно виділити велику кількість VNF. Ми вирішили визначити пріоритети цілей. Ми мінімізуємо по-перше максимальне використання каналу, а потім вартість NFV, яка відображає ISP-орієнтоване бачення, щоб поліпшити якість користувацького досвіду (строго пов'язаний з цим перевантаження, особливо в режимі реального часу послуг).

На практиці, для того, щоб зробити все можливе для задоволення другої мети і дозволяють максимально можливу граничну прибуток, ми виконуємо перший крок оптимізації, щоб знайти краще рішення, відповідно до першої мети, а потім, зберігаючи краще значення, знайдене в першому кроці як параметр ми мінімізуємо другу мету. Насправді, для заданого оптимального значення першого кроку, можливі різні доступні конфігурації на другій стадії, а також значне зниження первинних витрат може бути досягнуто за рахунок цього другого етапу без втрати щодо вторинної мети.

Крім того, для того, щоб забезпечити більше зниження загальної вартості, ітеративний підхід може бути використаний: буде знайдена зростаюча крок за кроком до бажаного рівня собівартості величина першої мети для другої мети. Така ітеративна процедура може мати перевагу, надаючи на другому кроці оптимізації реалізоване рішення (теплий старт), який у багатьох практичних випадках може зменшити обчислювальний час оптимізації.

3.6. Практичне застосування

Ми реалізували наш алгоритм VNF-PR за допомогою скриптів CPLEX та AMPL. Ми обмежили час виконання на 2 години для фази оптимізації TE та 3 години для фази оптимізації NVF, які досягли більшої частини часу оптимальний для TE-цілі та хороші результати для цілі NFV.

Ми прийняли трирівневу топологію, представлену на рисунку 3, як граничний приклад для мережі Інтернет-провайдерів. Кожний вузол доступу з'єднаний з двома вузлами агрегації, кожен агрегатний вузол підключений до двох основних вузлів, а вузли сердечника - повністю зчепленими. Ми розглядаємо всі вузли як NFVI вузли, в яких можуть розмістити VNFs. Вимоги створюються рівномірно в інтервалі $[a; b]$, так що граничні вимоги не можуть створювати жодного вузького місця на ланках доступу. Зв'язки агрегації мають розмірність, так що існує ризик насичення посилань (наприклад, використання посилання вище 100%), якщо розподіл трафіку не оптимізовано. Основні посилання такі, що існує дуже низький ризик вузьких місць. Затримки посилання встановлюються таким чином, щоб впоратися з різними географічними межами: 1 мс для ліній доступу, 3 мс для зв'язків агрегації та 5 мс для основних ліній (таким чином полегшується маршрутизація через основні посилання).

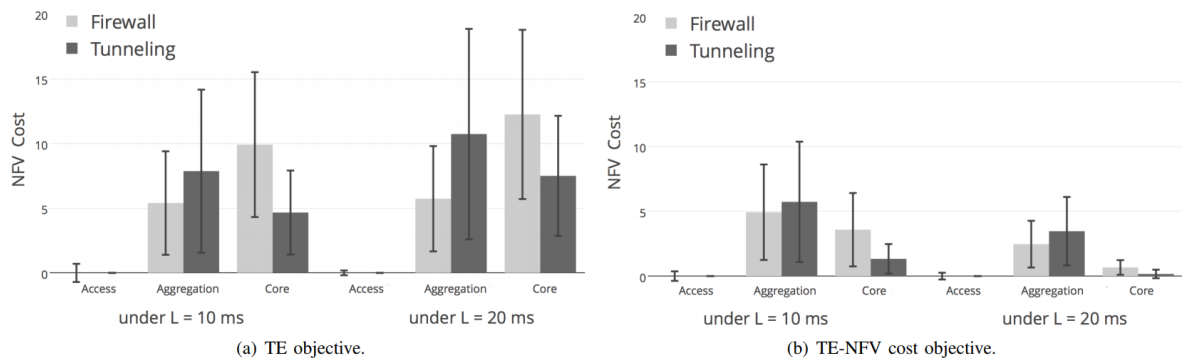


Рисунок 4. Розподіл вузла VNF по шарах NFVI (стандартний випадок).

Затримки обробки VNF встановлюються так, як на рис. 2, для швидкодіючих та стандартних випадків. Ми використовуємо два шаблони віртуальної машини, один вимагає 1 процесор і 16 Гб оперативної пам'яті, а один вимагає 4 процесорів і 64 Гб оперативної пам'яті. Ми запускаємо тестові налаштування для кінцевої латентності (L) з суворими та втраченими значеннями (10 і 20 мсек).

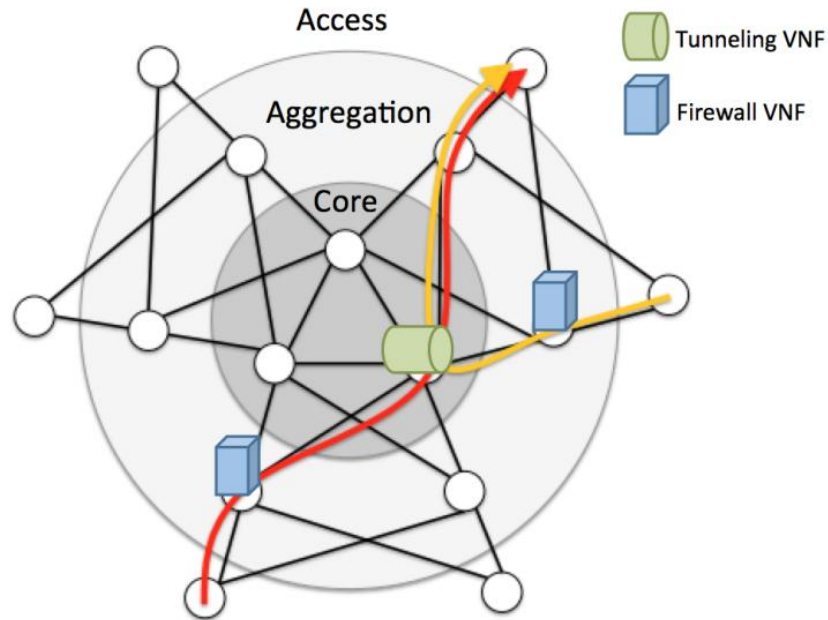


Рисунок 3. Прийнята топологія мережі та приклад рішення з VNF-PR.

Щоб не вводити непотрібну складність для відстеження різниці між різними випадками, ми обмежуємося двома типами VNF на вимогу: тунельний VNF (вимагає декомпресії) і брандмауер, як VNF. Рівень NFVI має розмір таким чином, що достатньо обчислювальних ресурсів, щоб окремо задовольнити половину всіх вимог (тобто, не включаючи спільне використання VNF); Ноти доступу NFVI мають розмірність, так що вони складаються з 5 процесорів, 80 Гб оперативної пам'яті на кожному вузлі доступу, вдвічі та чотири рази перевищує цю кількість за агрегацією та вузлами сердечника, відповідно.

Кожна справа емульгує 10 матрицями випадкового запиту. Для буферизованого випадку VNF ми аналізуємо наступні результати, показані на малюнку 4 (розподіл витрат NFV), рис.5 (розподіл використання сполучення каналів зв'язку), рис.6 (кінцевий та кінцевий розподіл VNF експедиції).

Як загальне зауваження, незалежно від мети та часу затримки, в вузлах доступу практично не існує VNF, і кількість мереж брандмауера та тунелювання VNF значною мірою залежить від агрегації та основних сегментів. Крім того, у всіх випадках, крім одного, більше тунельних VNFs,

ніж брандмауер VNFs на рівні агрегації, тоді як інверсія тримається на рівні основного, що, ймовірно, пов'язано з тим, що тунельні VNF штовхаються в бік краю призначення, якщо відповідне збільшення в трафіку.

Ми пропонуємо докладний аналіз з двох точок зору: що станеться, коли ми також розглянемо вартість NFV в цільовій функції, і що станеться, коли ми змінюємо межу на кінцевому кінці латентності. Тоді ми порівняємо стандартну ситуацію з випадком швидкого шляху.

A. TE проти чутливості цілей TE-NFV

Ми аналізуємо різницю між результатами з об'єктом TE та результатами з комбінованою метою TE-NFV, порівнюючи їх для еквівалентної максимальної латентності (L).

1. Вартість NFVI (рис.4): вартість NFVI суттєво зменшується завдяки цілі TE-NFV. Відносний розрив між двома типами VNF зменшується, якщо пройти від мети TE до мети TE-NFV як для агрегації, так і для основних шарів. Перехід від TE до справи TE-NFV дозволяє майже вдвічі зменшити загальну кількість необхідних CPU, зберігаючи той же рівень продуктивності TE завдяки нашій математичній евристиці.

2. Використання посилань (мал.5): для агрегаційних посилань немає великої різниці. Ймовірно, це пов'язано з нашою математичною теорією, яка вперше оптимізує ціль TE, а потім - витрати NFV. Основні посилання, як правило, менш використовуються з метою TE-NFV, а при затримці встановлено 20 мс.

3. Розподіл латентності (рис.6): загальний розподіл латентності приблизно еквівалентний, тоді як досвідчена експедиторська латентність двох типів VNF зростає ціль TE-NFV. Ймовірно, це пов'язано з вартістю VNF зменшення другого ступеня математико-евристичного, що призводить до більш високої концентрації потоків на меншій частоті VNF (див. рис.4), латентність якого експоненціально збільшується з навантаженням трафіку в буферній ситуації. Незалежно від мети, затримки переадресації брандмауера

та тунелювання VNF близькі і глобально значно нижчі, ніж загальна латентність, враховуючи незначну вагу латентності посилянь.

В. Відчутність до латентності

Нижче ми проаналізуємо результати, що продовжують наполягати на впливі латентності ланцюжка VNF, пов'язаного L з результатами.

? Вартість NFVI (рис.4): встановлення суворої затримки призводить до зниження вартості NFV та збільшення рівня використання VNF. Хоча у випадку TE строгий час затримки з затримкою ($L = 10$ мс) призводить до 30% нижчої вартості NFVI, ніж втрачена латентність ($L = 20$ мс), у випадку TE-NFV ми маємо протилежну поведінку з ціною подвоєння, переходячи від строго до збиткової латентності. Це відбувається тому, що крок NFV в рамках об'єктиву TE-NFV дозволяє краще розподіляти VNF між різними вузлами NFVI, майже незалежно від рівня (агрегації або ядра), а також бути краще поділено.

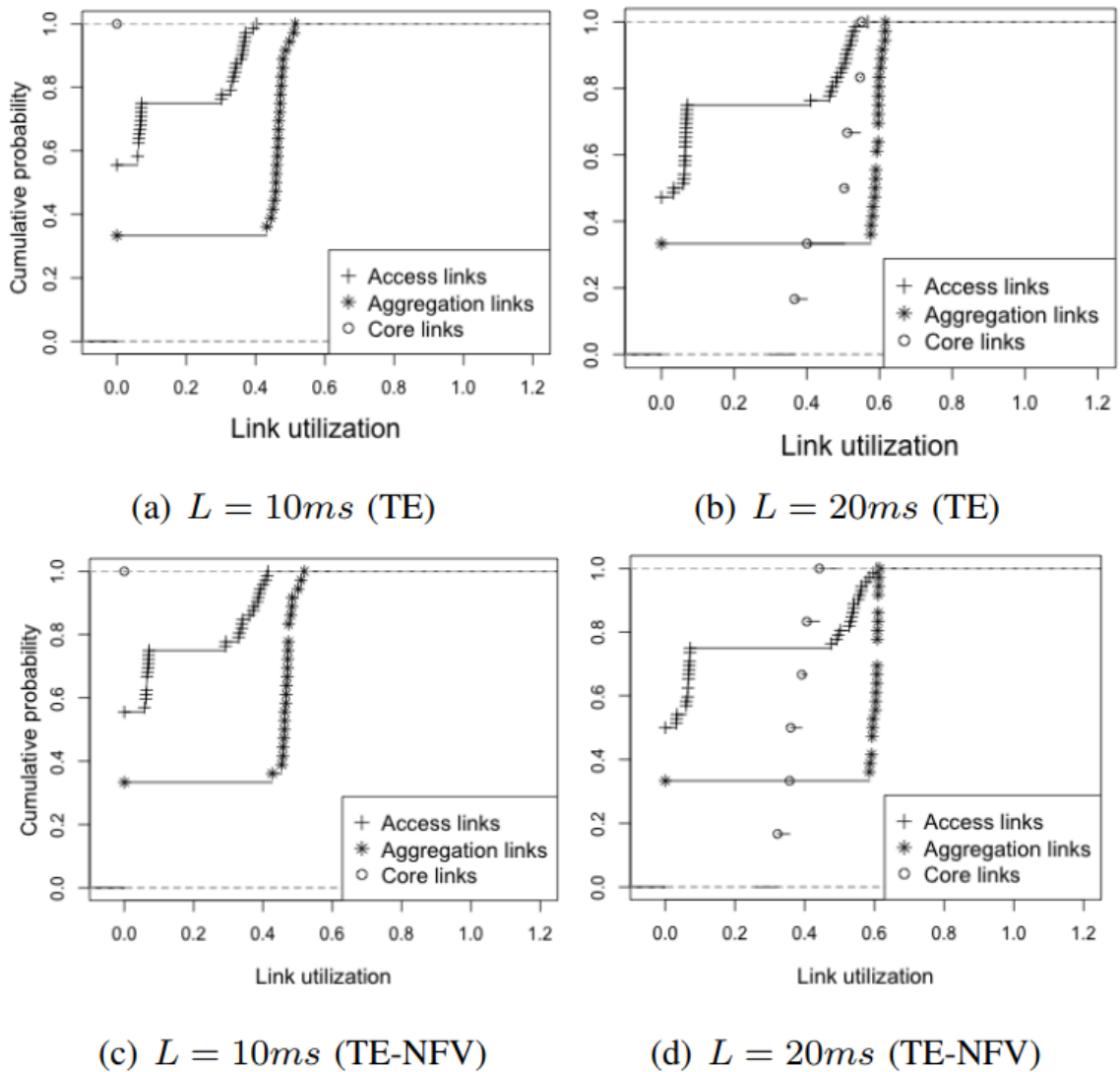


Рисунок 5. Використання послань емпіричних CDF (стандартний випадок).

Використання послань (мал.5): усі послання мають вплив латентний зміна Сувола пов'язана з латентністю ситуація ($L = 10$ ms) призводить до зниження використання, ніж у випадку з відсутністю випадків. Використання лінків доступу та агрегації збільшується приблизно на 10%, а для основних ліній - на 30%.

? Розподіл латентності (мал. 6): очевидно, що сувола затримка збігається з ланцюгом, що призводить до найнижчого розподілу латентності: затримка від кінця до кінця і затримка перенаправлення VNF мають аналогічні профілі незалежно від цілей. Замість цього для вільного випадку ($L = 20$ мс), латентність переадресації VNF вище для обох типів. Медіана

затримки коливається від 1 до майже 3 для вільного випадку, що означає, що обмін VNF сильно мотивований, коли латентний зв'язок стає менш жорсткий. Це підтверджується розподілом кількості увімкнених VNF, що значно зменшується для менш жорстких обмежень затримки.

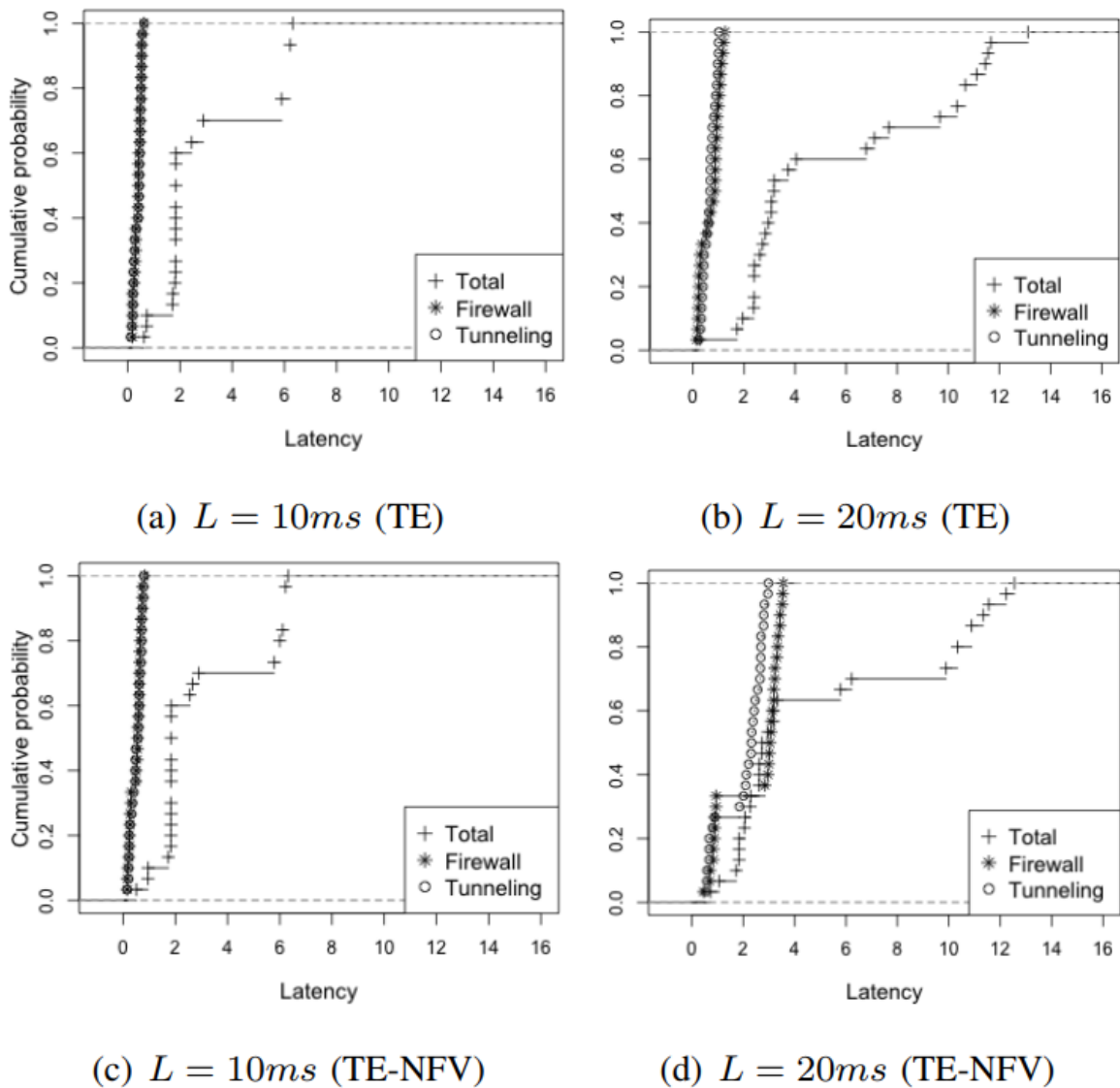


Рис 6. Емпіричні CDF компоненти латентності (стандартний випадок).

С. Стандартна і швидка передача VNF перемикання

Нарешті, ми порівнюємо стандартний випадок із швидким випадком. Ми розглядаємо лише ситуацію із суворою латентністю ($L = 20$ мс), щоб краще проаналізувати вплив режиму переадресації VNF (дійсно, більш жорсткі обмеження затримки мають більший вплив на розміщення та маршрутизацію).

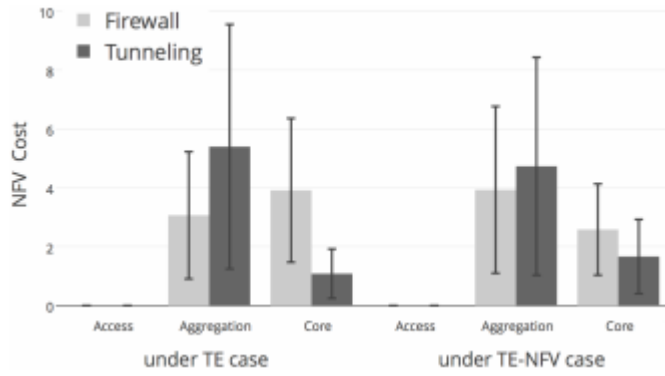
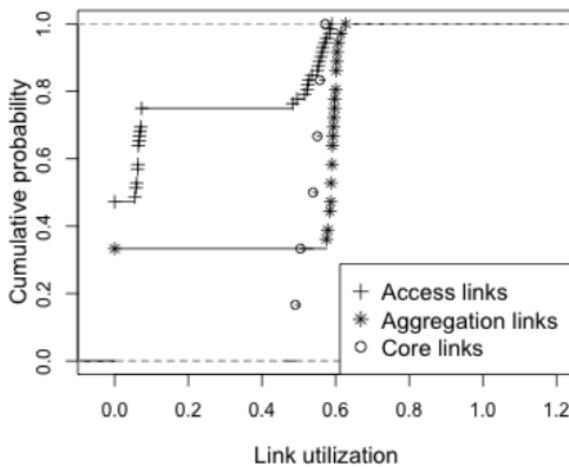
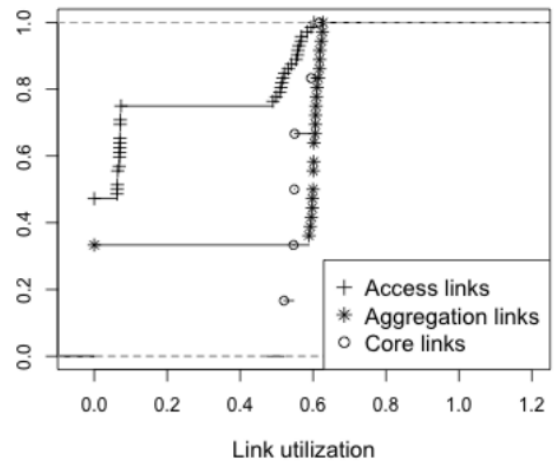


Рисунок 7. Розподіл вузла VNF по шарах NFVI (швидка швидкість, $L = 20$ мс).

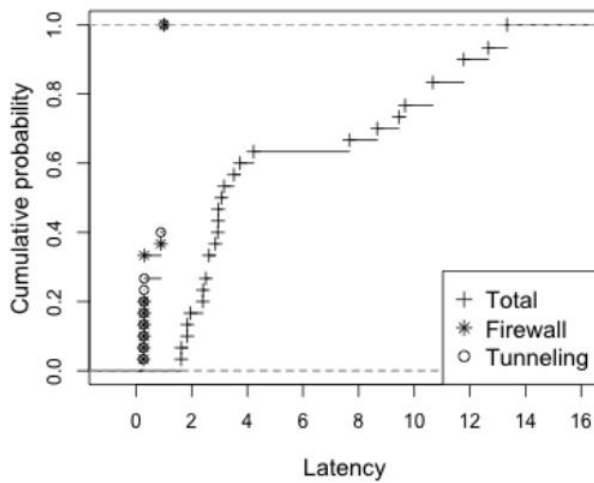


(a) $L = 20$ ms (TE)

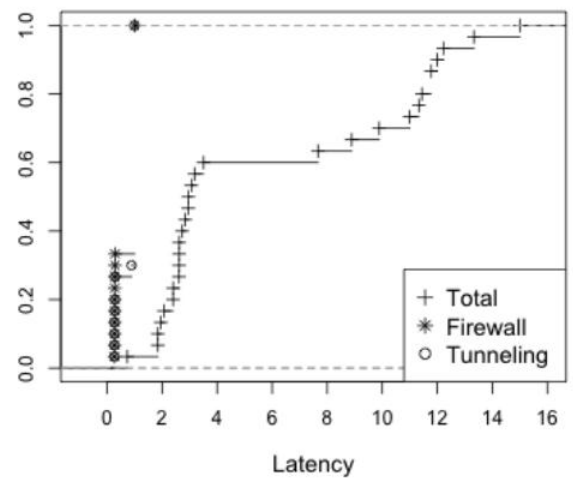


(b) $L = 20$ ms (TE-NFV)

Рисунок 8. Посилання на використання емпіричних CDF (швидкого випадку).



(a) $L = 20$ ms (TE)



(b) $L = 20$ ms (TE-NFV)

Рисунок 9. Емпіричні CDF компоненти затримки (швидкий шлях)

На рисунках 7, 8 і 9 наведені, відповідно, вартість NFV, використання зв'язку, латентні розподіли, що порівнюються з відповідними попередніми. Ми можемо відзначити що:

– Вартість NFVI (Фіг.7 - Фіг.4): для TE - число процесорів, а значить і VNF, в режимі швидкого проходження менше ніж у стандартному режимі. Натомість, для випадку TE-NFV є трохи більше VNF з режимом швидкого потоку. Пов'язаний із спостереженим збільшенням затримки, це означає, що коли TE є єдиною метою, режим швидкого доступу забезпечує більш високий розподіл VNF між вимогами. Для випадку TE-NFV це розрив знецінюється і трохи перевертається. Ми також відзначаємо, що стандартний режим виштовхує більше VNF до агрегації NFVI вузлів у порівнянні з швидким проміжним режимом.

– Використання зв'язків (рис.8 - рис.5): помітна різниця виявляється лише для випадку TE-NFV та лише для основних посилянь. Медіана використання зв'язків ядра переходить від приблизно 40% у стандартному випадку до приблизно 60% у випадках швидкого проходження.

– Розподіл латентності (Фіг.9 - Фіг.6): загальна латентність вище в режимі швидкого проходження. Криві затримки брандмауера та тунелювання ідентичні для режиму швидкого проходження. Крім того, в режимі швидкого потоку ми отримуємо меншу латентність у глобальному масштабі, ніж у стандартному режимі.

Висновки

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У цьому документі запропоновано модель оркестрування віртуалізації мережевих функцій та алгоритм, який виходить за рамки останніх робіт на сучасному рівні. Наша модель враховує специфічні обмеження переадресації NFV, які роблять оркестрування вимог до переваг унікальними та складними мережевими функціональними мережами. Для того, щоб опанувати складність часу, розглядаючи цілі оптимізації вартості інфраструктури віртуалізації як технології трафіку, так і мережевих функцій, ми використовуємо математико-евристичний метод вирішення.

Результати великих тестів кваліфікують вплив режиму переадресації функції віртуальної мережі на результат оркестровки. Ми висвітлили багато цікавих аспектів. Наприклад, коли вартість інфраструктури віртуалізації вважається невідповідною (тобто існує велика кількість ресурсів), використовуючи режим швидкого переходу (тобто, функція віртуальної мережевої функції, яка дозволяє досягати постійної ланцюгової переадресації до максимального навантаження), дозволяє вищі обмін ресурсами віртуальної мережі, ніж використання стандартних режимів переадресації (де замість цього пакетів буферизуються, що призводить до штучної латентної поведінки пересилання).

Ще одне важливе розуміння нашого аналізу полягає в тому, що встановлення строгих кінцевих обмежень затримки в мережах VNF може суттєво впливати на розподіл NFV-вузлів, збільшує вартість інфраструктури віртуалізації при зменшенні використання мережевих каналів через вищу розподіл функцій віртуальної мережі, особливо рівень агрегації. З прийнятими наборами даних рівень доступу, як правило, не містить віртуальних мережевих функцій, що свідчить про те, що лише надзвичайно низькі вимоги до латентності послуг, пов'язані з хмарними серверами, а не віртуалізація мережевих функцій, можуть виправдати таке поширене розгортання ресурсів віртуалізації в мережу доступу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. H. Zhang, D. Ferrari, "Rate-controlled Service Disciplines," *Journal of High Speed Networks*, vol. 3, no. 4, 1994.
2. Xen Hypervisor, Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.xenproject.org/>
3. N. Feamster, L. Gao, and J. Rexford, "How to Lease the Internet in Your Spare Time," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 1, pages 61–64, 2007.
4. T. Anderson, L. Peterson, S. Shenker, and J. Turner, "Overcoming the Internet Impasse Through Virtualization," *IEEE Computer Magazine*, vol. 38, no. 4, pages 34–41, 2005.
5. A. Khan et al., "Network Virtualization: A Hypervisor for the Internet?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 1, pages 136–143, January 2012.
6. Global Environment for Network Innovation, Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.geni.net/>
7. The FP7 4WARD Project, Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.4ward-project.eu/>
8. J. Carapinha, J. Jimenez, "Network Virtualization – A View From the Bottom," In *Proc. of ACM Workshop on Virtualized Infrastructures and Architectures (VISA)*, Barcelona, Spain, August 2009.
9. Cisco White Paper, "Router Virtualization in Service Providers," Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns524/ns562/ns573/white_paper_c11-512753.html
10. Cisco Cloud Services Router 1000v Data Sheet, Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/cloud-services-router-1000v-series/datasheet-listing.html>

11. Vyatta Open Source Networking Community, Accessed: February 27, 2017. [Online]. Available: <http://www.vyatta.com>
12. N. Egi, A. Greenhalgh, M. Handley, M. Hoerd, L. Mathy, and T. Schooley, "Evaluating Xen for Virtual Routers," In Proc. of IEEE Workshop on Performance Modelling and Evaluation in Computer and Telecommunication Networks (PMECT), Honolulu, Hawaii, August 2007.
13. A. Bavier, N. Feamster, M. Huang, L. Patterson and J. Rexford, "In VINI Veritas: Realistic and Controlled Network Experimentation," In Proc. of ACM Conference on SIGCOMM, Pisa, Italy, September 2006
14. M. Chiosi and et al. Network functions virtualisation: An introduction, benefits, enablers, challenges and call for action. In SDN and OpenFlow World Congress, 2012.
15. ETSI. Network functions virtualization-introductory white paper. October 2012.
16. [Online] Available: www.opennetworking.org/images/stories/downloads/whitepapers/wpsdnnewnorm.pdf
17. Channegowda, M.; Nejabati, R.; Simeonidou, D., " Software-defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations [invited]," *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of* , vol.5, no.10, pp.A274,A282, Oct. 2013 doi:10.1364/JOCN.5.00A274
18. Batalle, J.; Ferrer Riera, J.; Escalona, E.; Garcia-espin, J.A., " On the Implementation of NFV over an OpenFlow Infrastructure: Routing Function Virtualization," *Future Networks and Services (SDN4FNS), 2013 IEEE SDN for*, vol., no., pp.1,6, 11-13 Nov. 2013 doi: 10.1109/SDN4FNS.2013.6702546
19. N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker and J. Turner. "Openflow: enabling innovation in campus networks" . *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, pp. 69-74, Mar., 2008

20. Cvijetic, N.; Angelou, M.; Patel, A.; Ji, P.N.; Ting Wang, ” Defining optical software-defined networks (SDN): From a compilation of demos to network model synthesis,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013 , vol., no., pp.1,3, 17-21 March 2013
21. Cvijetic, N.; Tanaka, A.; Ji, P.N.; Sethuraman, K.; Murakami, S.; Ting Wang, ” SDN and OpenFlow for Dynamic Flex-Grid Optical Access and Aggregation Networks,” Lightwave Technology, Journal of, vol.32, no.4, pp.864,870, Feb.15, 2014 doi: 10.1109/JLT.2013.2274991
22. Peter Brucker, Sigrid Knust, Complex Scheduling Springer Berling-Heidelberg. ISBN-10 3-540-29545-3
23. Intel. Impact of the Intel Data Plane Development Kit (Intel DPDK) on packet throughput in virtualized network elements, 2009.
24. R. Guerzoni and et al. A novel approach to virtual networks embedding for SDN management and orchestration. In IEEE/IFIP NOMS 2014.
25. S. Mehraghdam, M. Keller, and K. Holger. Specifying and placing chains of virtual network functions. In IEEE CLOUDNET 2014.
26. H. Moens and F. de Turck. VNF-P: A model for efficient placement of virtualized network functions. In CNSM 2014.
27. R. Mijumbi and et al. Design and evaluation of algorithms for mapping and scheduling of virtual network functions. In IEEE NETSOFT 2015.
28. M Xia and et al. Network function placement for NFV chaining in packet/optical datacenters.
29. M. Bouet, J. Leguay, and V. Conan. Cost-based placement of vDPI functions in NFV infrastructures. In IEEE NETSOFT 2015.
30. Илья Клементьев. Технологии виртуализации [Электронный ресурс] / Илья Клементьев, Владимир Устинов // Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ". – 2015. – Режим доступа до ресурсу: www.intuit.ru.

31. М. Тим Джонс. Сетевые адаптеры, коммутаторы, сети и устройства / М. Тим Джонс // Виртуализация сетей в Linux / М. Тим Джонс., 2011.
32. Самойленко О. Сетевое взаимодействие в VMware Workstation и VMware Server [Электронный ресурс] / Александр Самойленко. – 2007. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.vmguru.ru/articles/vmware-workstation-server-networking>.
33. Александр Барсков. SDN: от концепции к решениям / Александр Барсков. // Журнал сетевых решений/LAN. – 2015. – №9.
34. Сергей Орлов. Многоконтроллерная инфраструктура SDN / Сергей Орлов. // Журнал сетевых решений/LAN. – 2014. – №12.
35. Сергей Орлов. SDN и другие / Сергей Орлов. // Журнал сетевых решений/LAN. – 2014. – №6.
36. Павлов В. В. Использование технологии контейнеризации для оптимизации микросервисов / В. В. Павлов, Ю. А. Шичкина. – Санкт-Петербург, 2017.
37. Бхану П. Толети. Гипервизоры, виртуализация и облако: О гипервизорах, виртуализации систем и о том, как это работает в облачной среде / Бхану П. Толети. – 2012.
38. Виртуализация в задачах оптимизации нагрузок на компьютерные системы [Электронный ресурс]. – 2011.
39. Джон Мак-Кейб (John McCabe) и команда Windows Server. Введение в Windows Server 2016 / Джон Мак-Кейб (John McCabe) и команда Windows Server. – Редмонд, штат Вашингтон: Microsoft Press, 2016. – 18-20 с.
40. Алексей Савельев. Hyper - V [Электронный ресурс] / Алексей Савельев // Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ". – 2015. – Режим доступа до ресурсу: www.intuit.ru.
41. Алексей Савельев. Решения виртуализации [Электронный ресурс] / Алексей Савельев // Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ". – 2015. – Режим доступа до ресурсу: www.intuit.ru.

42. Яцкин А. Д. Динамические honeypot-системы на основе контейнерной виртуализации / А. Д. Яцкин. – 2016.
43. Омельченко Р. Аналіз архітектурних особливостей віртуалізації та переваги віртуальних контейнерів / Л. Верес, Р. Омельченко. // Збірник тез дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ". – 2018. – С. 116–118
44. V.Sinitskiy. Контейнеры или виртуальные машины — что лучше выбрать для своей компании? / V.Sinitskiy. – 2015.
45. Т.В. Батура, к.ф.-м.н. Облачные технологии: основные понятия, задачи и тенденции развития / Т.В. Батура, к.ф.-м.н., Ф.А. Мурзин, к.ф.-м.н., Д.Ф. Семич, к.ф.-м.н.. – 2014. – №1. – С. 1–2.
46. Server shipments (9.5M units in 2011): <http://www.crn.com/news/data-center/232601815/gartner-2011-server-sales-grow-but-hard-drive-issues-take-a-toll.htm>
47. Router shipments (1.5M units forecast for year 2012): <http://www.isuppli.com/Manufacturing-and-Pricing/MarketWatch/Pages/EMSRouter-Shipments-Backed-by-Market-Growth-in-2012.aspx>
48. http://labs.chinamobile.com/cran/wp-content/uploads/CRAN_white_paper_v2_5_EN.pdf
49. [http://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration_\(computing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration_(computing))
50. <http://www.edac.org/downloads/resources/profitability/HandelJonesReport.pdf>