

Сравнителен анализ на възможностите за изграждане на децентрализирана контролна равнина при софтуерно дефинираните мрежи

Йордан Райчев, Дияна Кинанева, Георги Христов, Пламен Захариев

Катедра „Телекомуникации“, Русенски университет „Ангел Кънчев“

Ул. Студентска №8, 7017 Русе, България, тел: +359 82 888 817

Email: {jraychev, dkyuchukova, ghristov, pzahariev}@uni-ruse.bg

Резюме. Целта на настоящият доклад е да бъде извършен сравнителен анализ на познатите до момента решения за създаване на децентрализирана контролна равнина при софтуерно дефинираните (СД) мрежи. Софтуерно дефинираните мрежи представляват съвременна парадигма, чиято основна цел е да промени телекомуникационните мрежи, които познаваме днес. Непрекъснато разрастващите се социални мрежи, мобилните комуникации и технологии като сървърната виртуализация, намерила широко приложение в съвременните центрове за съхранение на данни и публичните облачни услуги достигат лимита на възможностите на традиционните телекомуникационни мрежи. Това налага изследването и имплементирането на технологии като мрежовата виртуализация и по-конкретно софтуерно дефинираните мрежи. Един от основните недостатъци на първоначалната концепция на софтуерно дефинираните мрежи е създаването на единична точка за отказ на мрежата поради наличието на един единствен управляващ контролер. Съществуват редица изследвания, които са съсредоточени върху този проблем и неговото отстраняване. Всички тези изследвания се свеждат до създаване на децентрализирана контролна равнина, която има за цел, както да отстрани изцяло проблем с отпадането на управляващия контролер и загуба на пълна свързаност в софтуерно дефинираната мрежа, така и увеличаване мащабируемостта и сигурността на дадената мрежа.

Comparative analysis of the possibilities of building a decentralized control plane of a Software Defined Networks (Jordan Raychev, Diyana Kinaneva, Georgi Hristov, Plamen Zahariev). The objective of the current paper is to be conducted a comparative analysis of the possibilities of building a decentralized controller plane of a Software Defined Network (SDN). The SDN network are an emerging paradigm, which aims to change telecommunications networks as we known them today. The constantly growing social media, mobile communications and technologies like server virtualization are pushing the limits of traditional computer networks. That led to a lot of researching in the field of network virtualization and more specifically the field of software defined networking. Unfortunately, as every new technology and this one has its flaws. One of the biggest research field is investigating the possibilities of building a decentralized control plane to avoid issues related to the single point of failure, scalability, high availability and security.

Увод

Конвенционалните комуникационни мрежи все по-трудно отговарят на изискванията на съвременните приложения и техните потребители. Динамичното развитие на информационните и комуникационни технологии през последното

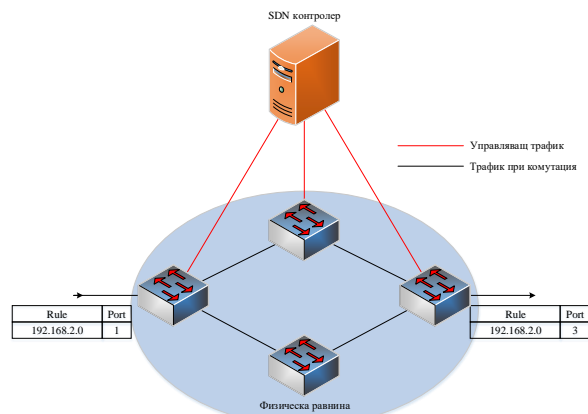
десетилетие е основния фактор, които налага преосмисляне на мрежовата архитектура, която се използва в днешно време и създаване на нова такава. Осигуряването на високо качество на услугите, динамично, централизирано и програмируемо управление на телекомуникационните мрежи са част от

проблемите, които съпровождат създаването и стандартизирането на подобна архитектура, а именно – софтуерно дефинираните мрежи [1].

Софтуерно дефинираните мрежи (SDN – Software Defined Networking) представляват нова технология за програмируемо управление на компютърните мрежи, чиято цел е минимизиране на проблемите, които съпровождат използването на традиционните телекомуникационни мрежи. Част от тези проблеми са трудност при управление, липса на гъвкавост и мащабируемост, хетерогенност на мрежовите устройства и други. Идеята за създаването на програмируеми компютърни мрежи се заражда преди повече от десетилетие [2] с предложение за повишаване нивото на програмируемост на комуникационните мрежи чрез разделяне на функциите на контролната и физическата равнина. Това от своя страна би дало възможност за бързо и ефективно внедряване на нови мрежови услуги, съвместно съществуване на мрежови устройства от различни производители без създаване на конфликти, виртуализация на мрежово оборудване и други. Основен и най-важен елемент в SDN мрежите се явява разделянето на контролната равнина, понякога наричана управляваща равнина, от физическата равнина. Физическото и логическото разделяне на двете равнини предоставя възможност за динамично внедряване на нови функции към мрежите, нещо което би било практически невъзможно при конвенционалните мрежи. Това е възможно поради факта, че централизираната управляващата равнина е изнесена, като отделно мрежово устройство, наричан още контролер. Използване на централизирана контролна равнина дава възможност на контролера за глобален поглед върху мрежата и съответно улесняване при нейното управление, изразяващо се в оптимизиране на трафика, лесно и бързо добавяне на функционалности, намаляване на разходите за управление и други.

Архитектура на софтуерно дефинираните мрежи

От представената архитектурата на фиг. 1 се вижда, че при подход с централизирано управление всички управляващи функции от физическата равнина се прехвърлят към контролната равнина (SDN контролера), оставяйки единствено поточната таблица (Flow table) на комутаторите.



Фиг. 1. Опростена архитектура на SDN мрежа

Показаните поточни таблици на фигурата по-горе, представляват псевдо поточни таблици, отразяващи комутирането на пакети погледнато от възможно най-високо ниво на абстракция. В този ред на мисли, реалните SDN комутатори и по-конкретно техните поточни таблици са съставени от множество елементи (не само тези представени на фиг. 1), като поле за съвпадение, приоритет, брояч, инструкции и други, които не са обект на настоящата статия. Важно е само да се отбележи, че при пристигане на пакет, който трябва да бъде комутиран, SDN комутатора ще прегледа своята поточна таблица и ще вземе решение за това как този пакет да бъде комутиран. Тук се разграничават два основни момента. Първо, ако комутаторът има запис в поточната си таблица за съответния пакет (т.е. има съвпадение), пакета ще бъде комутиран през подходящ изходен порт. Вторият момент е в случай, че комутатора няма запис съвпадащ с местоназначението на съответния пакет. При така развилите се обстоятелства, комутатора ще изпрати запитване към SDN контролера в отговор на което контролера ще инсталира правило в поточната таблица на комутатора и той ще има възможност да комутира пакета. Както се вижда, комутирането или маршрутизирането (на практика представляват едно и също действие погледнато от гледна точка на SDN комутатора) в SDN мрежите наподобява изключително много комутирането и маршрутизирането при конвенционалните мрежи с тази разлика, че при традиционните компютърни мрежи контролната равнина и слоя за достъп се имплементират във всяко едно от устройствата изграждащи мрежата, а при SDN мрежите двете равнини са логически разделени.

Архитектурата на софтуерно дефинираните

мрежи представена в [1] и нейната последваща версия [3] биват използвани като модел върху, който се изгражда множество съвременни SDN контролери. Тази архитектура обаче не дава описание за това какво трябва да бъде управлението върху контролния слой - разпределено или централизирано. Стигайки до отговора на този въпрос обаче, не се оказва толкова лесна задача колкото изглежда. Наличието на един единствен контролер може да доведе до проблеми свързани с мащабируемост на мрежата, намаляване на производителността на контролната равнина и други. Изследванията показват, че SDN контролера (NOX) е успявал да обработва единствено 30,000 потока за секунда [4]. С нарастване нуждите на съвременните центрове за съхранение на данни, а дори и голяма част от доставчиците на услуги (Internet Service Provider – ISP), това се оказва напълно недостатъчно. Мащабируемостта на контролната равнина при SDN мрежите се оказва основен проблем за успешното имплементиране в съвременните комуникационни мрежи. Контролната равнина на SDN мрежите се счита за мащабируема, ако нейната архитектура има възможност динамично да се адаптира към постоянните промени настъпващи в мрежата, както и удовлетворяването на качеството на услуги. За да бъде постигнато са предложени два основни подхода. Първият подход се изразява в прехвърляне на част от контролните функции към комутаторите от слоя за достъп. Това ще прехвърли част от задачите от SDN контролера към комутаторите, което от своя страна ще намали заявките изпращани към контролната равнина и паралелно с това ще увеличи производителността на мрежата като цяло. Един от проблемите с този подход е чисто технологичен. За да бъде реализиран е необходимо да бъдат създадени интегрални дънни платки, които да покрият горе споменатите изисквания, а също така и значително по-мощни процесори, които да управляват интегралните схеми. Както се вижда, това не се оказва лесна задача и би довело до множество затруднения при адаптиране на SDN технологията. Другият проблем свързан с този подход лежи в самия него. Прехвърлянето на част от контролните функции към комутаторите нарушава идеологията на SDN мрежите, превръщайки самата технология във вече познатите ни традиционни компютърни мрежи. Вторият подход се изразява в създаване на разпределена архитектура на контролната равнина при която работата е разпределена между множество SDN контролери. При този подход заявките към контролната равнина могат да бъдат

обработвани паралелно от различни контролери, като същевременно те комуникират помежду си, за да не възникнат конфликти в мрежата. Предимството на този подход, е че запазването на технологичната простота на мрежовите елементи от слоя за данни. Друго предимство на този подход е запазването на идеологията на SDN мрежи за централизирано управление, както и това, че физическо отпадане на някой от контролерите не би нарушил структурата и функционалността на мрежата.

Модели на управление на контролната равнина при софтуерно дефинираните мрежи

Управлението на контролната равнина може да се класифицира в три основни категории – централизирано, децентрализирано и йерархично. Децентрализираното и йерархичното управление от своя страна могат да бъдат класифицирани в една обща категория – структури с разпределено управление.

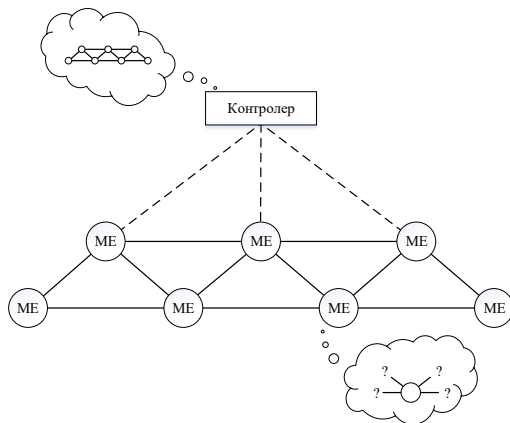
Модел на централизирано управление

Централизирано управление представлява модел описващ концептуално връзката между отделни възли на дадена структура. В контекста на компютърните мрежи под централизирано управление се разбира управлението на определена група ресурси посредством една основна контролна единица. Архитектурата на софтуерно дефинираните мрежи представя именно този модел за управление на контролната равнина, фиг. 2. При този тип управление всички заявки биват изпращани към контролера, който ги обработва и връща съответен отговор към мрежовите елементи (ME) от слоя за достъп. Това е възможно поради факта, че контролера е единственият елемент от мрежата, който има глобален поглед върху топологията, позволявайки му да вземе най-оптималното решение за това как даден трафик да бъде комутиран или маршрутизиран през мрежата.

Централизираното управление се характеризира със следните предимства:

- Възможност за по-лесно управление поради факта, че най-често контролера представлява един физически сървър;
- Повишена сигурност в следствие на минималното присъствие на логически и физически връзки от и към контролера;
- Ниска себестойност на елементите изграждащи контролната равнина;
- Възможност за по-високо оползотворяване

на налични физически (хардуерен) ресурс.



Фиг. 2. Централизирано управление на SDN мрежа

Недостатъци на централизираното управление:

- Създаване на уязвимо място в мрежата в софтуерно и хардуерно отношение. В случай на откриване на софтуерна уязвимост в операционната система на контролера, това би довело до компрометиране на цялата мрежа. Хардуерната уязвимост се изразява в това, че в случай на отпадане на контролера, мрежата се превръща в неуправляема;
- Невъзможност за мащабируемост. Увеличаването на броя на мрежовите елементи от слоя за достъп ще доведе до увеличаване на броя на заявките към контролера. В този случай, контролерът може да няма възможност да обработва ново постъпващите заявки, което ще доведе и до намаляване на производителността на мрежата като цяло.

Модел на децентрализирано управление

Децентрализираната компютърна система представлява съвкупност от автономни мрежови елементи, които комуникират по между си, за да извършва определена задача. Характерна особеност на децентрализираното управление, е че управляващите елементи могат да бъдат разположени в едно физическо помещение, но най-често те са разположени на географско различни места. Като пример за децентрализирана система може да бъде телефонната система. Телефонната система може да се възприеме като хетерогенна система поради факта, че тя е изградена от множество различни по своята същност устройства (компютри, терминали и други) [5].

В контекста на софтуерно дефинираните мрежи

децентрализираната система придобива малко по-различен смисъл. Тъй като при SDN мрежите контролната равнина е логически отделена от физическата равнина е необходимо да се намери подходящ подход чрез, който да се разпредели управлението на контролния слой върху мрежовите елементи от слоя за достъп. В случай на постъпване на голям брой заявки към контролната равнина, общото натоварване може да се разпредели между контролерите, което отстранява проблема с претоварването описан при централизираното управление. В случай, че един от управляващите контролери отпадне винаги ще има друг контролер, който да поеме неговото управление, като същевременно мрежата ще остане напълно функционираща. Това са само част от предимствата на децентрализираното управление. Други предимства са:

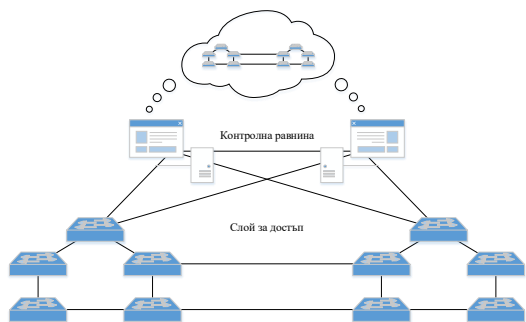
- Мащабируемост;
- Сигурност;
- Възможност за бързо възстановяване;
- Висока достъпност.

Като недостатъци на този тип управление може да се посочи:

- По-висока себестойност на поддържаната мрежа;
- По-ниска ефективност спрямо централизираното управление, поради факта, че е практически невъзможно да се оползотвори наличния физически (хардуерен) ресурс;
- Значително усложняване на системата като цяло.

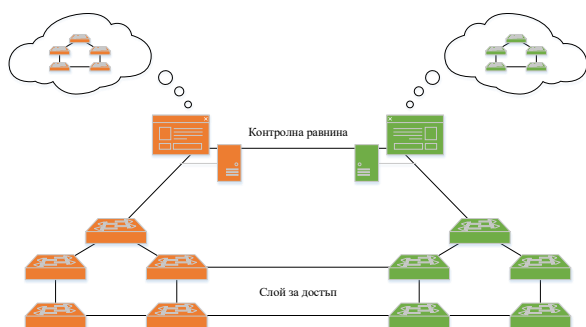
Децентрализираното управление при софтуерно дефинираните мрежи е условно разделено на две основни подгрупи – управление с **глобален** и **локален** поглед върху мрежовата топология. При децентрализираното управление с **глобален** поглед върху мрежовата топология контролната равнина бива изградена от N на брой SDN контролери, като всеки от тях има глобален поглед върху мрежовата топология. Едно от основните предимства на този тип архитектурата е ниското времезакъснение при отговор на заявките постъпващи от физическата равнина към контролерите. Това се дължи на факта, че контролерите притежават възможността за моментално обработване (отговор) на съответната заявка, дължащо се на глобалния поглед на контролерите. Архитектурата на подобен тип децентрализирана контролна равнина е

представена на фиг. 3.



Фиг. 3. Архитектура на децентрализирана контролна равнина с глобален поглед върху мрежовата топология

Децентрализираното управление с **локален** поглед върху мрежовата топология се характеризира с това, че контролната равнина е отново изградена от множество контролери с цел осигуряване на висока степен на мащабируемост, но контролерите не притежават общ поглед върху топологията, а отговарят само за функционирането на техния административен домейн.

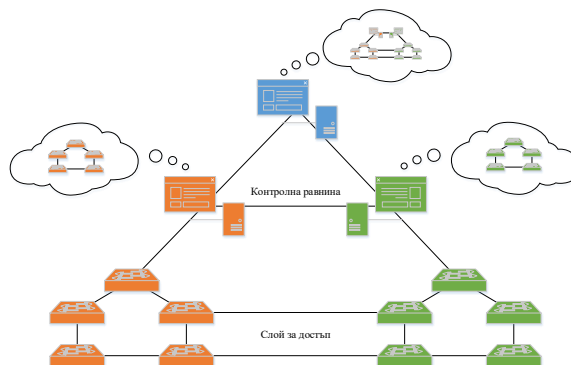


Фиг. 4. Архитектура на децентрализирана контролна равнина с локален поглед

За разликата от децентрализираното управление с глобален поглед, където закъснение при отговор е значително по-малко, тук закъснение ще бъде по-голямо поради факта, че при необходимост потребител от даден домейн да комуникира с потребител от друг домейн ще трябва да бъде включено и времезакъснението за осъществяване на връзка между контролерите от отделните домейни. Архитектурата на този тип децентрализирано управление е показана на фиг. 4. За да е осъществима комуникацията между отделните административни домейни, контролерите поддържат връзка през т.нар. източно-западен интерфейс (East-West Interface) посредством, който се обменя служебна информация между контролерите.

Модел на йерархично управление

Моделът за йерархично управление на контролната равнина може да бъде разгледан, като произведен на модела с децентрализирано управление с локален поглед върху мрежовата топология с тази разлика, че при йерархичното управление, както подсказва името му, е добавен и още един елемент, т.нар. главен управляващ контролер. Архитектурата на йерархичното управление е представена на фиг. 5. Както се вижда от фигурата, мрежовата топология отново е разделена на отделни административни домейни и всеки домейн се управлява от съответния контролер за дадената област. В допълнение на управляващите контролер, архитектурата добавя и още един главен управляващ контролер, чиято цел е да наблюдава и управлява контролерите на всички административни домейни. Основен недостатък на този тип управление, е внасянето на допълнителен елемент в архитектурата, което допълнително усложнява архитектурата на SDN мрежите и създава предпоставка за прекриване на функционалностите на управляващите контролери.



Фиг. 5. Архитектурата на децентрализирана контролна равнина с йерархичен поглед

Йерархичната структура на контролната равнина разделя контролерите на две основни групи – локални и глобални. Локалните SDN контролери управляват само един административен домейн, като генерират т.нар. локални поточни правила (които служат за попълване на поточните таблици на комутаторите от съответния административен домейн). Глобалният SDN контролер от своя страна управлява множество административни домейни и участва в маршрутизацията процес само и единствено когато е необходим глобален поглед върху мрежовата топология.

Видове архитектури за изграждане на децентрализирана контролна равнина при

софтуерно дефинираните мрежи

До момента бяха разгледани модели за управление на контролната равнина при софтуерно дефинираните мрежи. В тази секция ще бъде извършен сравнителен анализ между вече съществуващи решения за изграждане на децентрализирана контролна равнина.

Kandoo

Архитектурата Kandoo [6] се основава върху децентрализирано управление с йерархичен характер. Този тип архитектурата до голяма степен се различава от представените до момента начини за управление на контролната равнина. Контролният слой при Kandoo се изгражда въз основа на двуслойна йерархична структура чрез въвеждане на втори вид контролер, наричан още локален контролер. По този начин контролната равнина придобива вида показан на фиг. 6. При така изградената структура, ролята на локалния контролер е да отговаря за по-често случващите се събития, а основния контролер за всички останали.



Фиг. 6. Двуслойна йерархична архитектура на контролна равнина

При така представената структура показана на фиг. 6 всеки от локалните контролери обслужва един или повече комутатори, докато основния контролер обслужва всички локални контролери или по-точно рядко случващите се събития. Характерна особеност на тази архитектура, е че основния контролер е единственото устройство, което има глобален поглед върху мрежовата топология. Друга особеност на архитектурата е възможността функциите на локалните контролери да бъдат имплементирани в устройствата от слоя за достъп (комутаторите), което значително ще опрости структурата на мрежата. Този подход е в пряк разрез с идеологията на софтуерно дефинираните мрежи, а именно логическо разделяне на контролната равнина и слоя за достъп.

ONIX

Децентрализирана архитектура на ONIX [7] се

състои от четири основни елемента – физическа и комуникационна инфраструктура, приложно програмен интерфейс на ONIX и контролна логика.

Физическа инфраструктура се състои от мрежови устройства работещи на канален и мрежови слой на OSI (Open Systems Interconnection) модела (комутатори и маршрутизатори) и други устройства служещи за балансиране на мрежовия трафик. Особеното за тези устройства, е че те трябва да поддържат протокол даващ права за четене и запис на ONIX приложението.

Комуникационната инфраструктура е елемент в архитектурата, която отговаря за мрежовата свързаност между физическата инфраструктура и приложенията на ONIX. Контролният канал, който се изгражда между тях може да бъде реализиран чрез два основни метода – in band и out of band. При in band подхода, контролния трафик споделя комуникационния канал с потребителския трафик, докато при out of band подхода, контролния трафик се разпространява в отделен комуникационен канал от потребителския трафик.

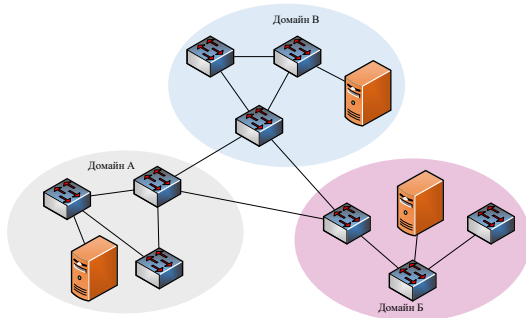
Разпределената система за управление на контролната равнина е реализирана върху клъстер от множество физически сървъри, върху всеки от който е възможно да бъдат инсталирани няколко **приложно програмен интерфейс**, чрез които бива даван достъп за четене и запис до ресурсите на мрежовите ресурси.

Контролната логика на системата последния елемент от архитектурата, който е имплементиран над приложно програмния интерфейс на ONIX. Основната функция на контролната логика е определянето на състоянието на всеки обект от физическата инфраструктура. Всяко копие на мрежовото състояние на даден елемент се съхранява в т.нар. база от данни за състоянието на мрежовите елементи (NIB – Network Information Base), която представлява аналог на маршрутната таблица при устройствата работещи на трети слой от OSI модела.

HyperFlow

Архитектурата на HyperFlow [8] се състои от OpenFlow комутатори (за изграждане на слоя за достъп) и NOX SDN контролери (за изграждане на контролната равнина) върху, всеки от който има работещо HyperFlow приложение и система за комуникация между контролерите. Характерно за тази архитектура, е че всеки от контролерите има глобален поглед върху мрежовата топология и

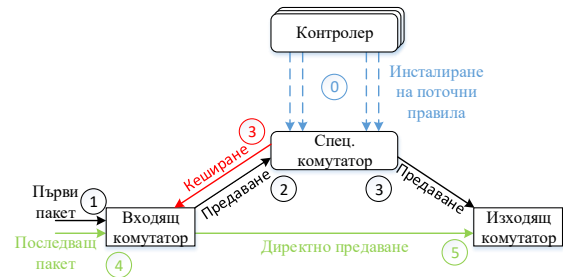
всеки от тях работи така като, че ли той е единствения контролер управляващ мрежата. Фиг.7 изобразява как би изглеждала дадена мрежа при използване на HyperFlow. Както се вижда, всеки контролер управлява група от комутатори, които са в най-голяма близост. В случай, че някой контролер отпадне, управяването от него комутатори се прехвърлят към най-близкия за тях контролер.



Фиг. 7. HyperFlow архитектура

DIFANE

Архитектурата DIFANE (Distributed Flow Architecture for Networked Enterprises) [9] до голяма степен се различава от представени до момента решения за децентрализирано управление на контролната равнина. Идеята за повишаване производителността и мащабируемостта на контролния слой при DIFANE се реализира чрез прехвърляне на част от отговорностите на контролера към слоя за достъп и по-точно към специализиран комутатор (Authority switch), който има за цел да управлява група от комутатори от слоя за достъп. При стандартната SDN архитектура, при постъпване на входящ пакет на входа на даден комутатор, той проверява поточната си таблица. В случай, че е намерено съвпадение, комутатора препраща пакета към определената му дестинация, в противен случай се изпраща заявка към основния SDN контролер и той инсталира правило в поточната таблица на въпросния комутатор. При DIFANE, след постъпване на първия пакет от определен поток комутаторът автоматично изпраща пакета към специализирания комутатор, който от своя страна изпраща пакета към съответната си дестинация, фиг. 8. Това е възможно поради факта, че SDN контролера предварително инсталира правила в поточната таблица на специализираните комутатори. След пристигане на вторият пакет от потока, комутатора от слоя за достъп посредством вече кеширания си запис изпраща пакета директно към съответната си дестинация.



Фиг. 8. DIFANE архитектура

Архитектурата представена на фиг. 8 илюстрира две основни идеи:

- Основният SDN контролер разпределя и предварително инсталира поточни правила в поточната таблица на специализираните комутатори с цел повишаване мащабируемостта на мрежата. Правилата се разпределят по равно между всички специализирани контролери;
- Комутаторите управляват целия трафик в слоя за достъп, посредством кешираните правила, а в случай, че такова правило не съществува трафика се пренасочва през определен специализиран комутатор.

DevoFlow

Идеята на архитектурата DevoFlow [10], подобна на тази при DIFANE се състои в прехвърляне на част от отговорностите от контролера към комутаторите от слоя за достъп или по-точно добавяне на допълнителна контролна логика към комутаторите с цел запазване на по-голяма част от трафика в слоя за данни. Авторите представят няколко нови механизма, чиято цел е ограничаване на трафика между слоя за достъп и контролната равнина. Това обаче нарушава основната идея на софтуерно дефинирани мрежи, а именно логическо разделяне между двете равнини.

ONOS

ONOS (Open Network Operating System) [11] представлява разпределена система за създаване на децентрализирана контролна равнина осигуряваща висока производителност и достъпност, мащабируемост и сигурност. ONOS е изключително гъвкава система, която позволява изграждането, както на централизирана контролна равнина, така и децентрализирана контролна равнина с глобален поглед върху мрежовата топология. Изследвания [12] показват, че архитектурата на контролната равнина с глобален поглед върху мрежовата топология не притежава

най-високото ниво на мащабируемост, но въпреки това авторите на ONOS са предпочели използването на именно този подход с тази особеност, че ONOS предоставя възможност топологията да бъде условно разделена на логически домейни. Този подход преобразува архитектурата на контролната равнина в архитектура с локален поглед върху мрежовата топология, която е с по-добра мащабируемост [12].

Заклучение

Софтуерно дефинираните мрежа се основават върху идеята за логическо разделяне между контролната и физическата равнина на устройствата, като същевременно контролната равнина бива пренасяне към централизиран сървър, наричан още софтуерно дефиниран контролер. Въпреки многобройните предимства на подобен тип подход не трябва да се пренебрегва факта, че използването на централизирана архитектура не притежава голяма способност за мащабируемост и достъпност.

В последните няколко години се провеждат задълбочени изследвания върху възможностите за създаване на разпределено децентрализирано управление на контролната равнина, което да увеличи достъпността, сигурността и мащабируемостта на софтуерно дефинираните мрежи.

В настоящият доклад бяха разгледани основните особености на различен по тип архитектури – централизирана, децентрализирана с локален и глобален поглед върху мрежовата топология и йерархична. В допълнение на това бяха разгледани и познатите до момента решения, които се основават върху тези архитектури. От направения анализ се вижда, че създаването на децентрализирана контролна равнина (независимо от нейния модел) е задължително за мрежи от по-голям мащаб, каквито например са мрежите на доставчиците на услуги, при които се изисква високо качество на услуги, висока достъпност, ниска латентност и други.

Благодарности

„Докладът отразява резултати от работата по проект № 2018 - ФЕЕА - 02, финансиран от фонд „Научни изследвания“ на Русенския университет.“

ЛИТЕРАТУРА

[1] Open Networking Foundation, SDN

architecture, Issue 1, June 2014

[2] Campbell, A., De Meer, H., Kounavis, M., Miki, K., Vicente, J., and D. Villela, "A Survey of Programmable Networks", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 29, Issue 2, pp. 7-23, September 1992

[3] Open Networking Foundation, SDN Architecture, Issue 1.1, 2016

[4] A. Tavakkoli et al., "Applying NOX to the Datacenter," Proc. ACM HotNets-VIII Wksp., 2009

[5] Gray J., An Approach to Decentralized Computer Systems, Technical Report 85.4, June 1985

[6] S. Yeganeh, Y. Ganjali, Kandoo: a framework for efficient and scalable offloading of control applications, Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks, August 13-13, 2012, Helsinki, Finland

[7] T. Koponen, M. Casado, N. Gude, J. Stribling, L. Poutievski, M. Zhu, R. Ramanathan, Y. Iwata, H. Inoue, T. Hama, S. Shenker, Onix: a distributed control platform for large-scale production networks, Proceedings of the 9th USENIX conference on Operating systems design and implementation, p.1-6, October 04-06, 2010, Vancouver, BC, Canada

[8] A. Tootoonchian and Y. Ganjali, "HyperFlow: a distributed control plane for OpenFlow," in Proceedings of the 2010 internet network management conference on Research on enterprise networking, ser. INM/WREN'10. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010, pp. 3-3.

[9] M. Yu, J. Rexford, M. J. Freedman, and J. Wang, "Scalable flow-based networking with difane," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 41, no. 4, pp. -, Aug. 2010.

[10] A. R. Curtis, J. C. Mogul, J. Tourrilhes, P. Yalagandula, P. Sharma, and S. Banerjee, "DevoFlow: scaling flow management for high-performance networks," Comput. Commun. Rev., vol. 41, no. 4, pp. 254-265, Aug. 2011.

[11] P. Berde, M. Gerola, J. Hart, Y. Higuchi, M. Kobayashi, T. Koide, B. Lantz, B. O'Connor, P. Radoslavov, W. Snow, and G. Parulkar, "ONOS: Towards an open, distributed SDN OS," in Proceedings of the Third Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, ser. HotSDN '14. New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 1-6.

[12] Hu, Jie et al. "Scalability of control planes for Software defined networks: Modeling and evaluation." 2014 IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS) (2014): 147-152.