

Ing. Matej Kultan

Autoreferát dizertačnej práce

OPTIMALIZÁCIA SMEROVANIA V SIEŤACH NGN

na získanie **akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

v doktorandskom študijnom programe: Telekomunikácie

v študijnom odbore 5.2.15 telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 30.05.2015

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Matej Kultán

Autoreferát dizertačnej práce

OPTIMALIZÁCIA SMEROVANIA V SIEŤACH NGN

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 30.05.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Matej Kultán**
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Martin Medvecký, PhD.
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti:

meno: **doc. Ing. Dan Komosný, PhD**
adresa: Technická 12
616 00 Brno, Česká Republika
pracovisko: VUT v Brne, Ústav telekomunikácií

meno: **Ing. Peter Kvačkaj, PhD.**
adresa: Borská 6, 841 04 Bratislava
pracovisko: SWAN, a.s

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o **hod.**

v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, B-blok, 6.p., miestnosť B602

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

1	ÚVOD	4
2	SIETE NGN	4
3	SMEROVACIE PROTOKOLY A ALGORITMY	5
4	METRIKA - PREDMET OPTIMALIZÁCIE.....	6
5	FÉROVOSŤ	6
6	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	6
7	NÁVRH CAMR, NOVÉHO SPÔSOBU SMEROVANIA PREVÁDZKY V SIEŤACH NGN	7
7.1	ALGORITMICKO-MATEMATICKY MODEL CAMR	8
7.2	VYHLADÁVANIE DOSTUPNÝCH CIEST A KAPACÍT	9
7.3	VÝPOČET METRIKY CIEST	9
7.4	DISTRIBÚCIA ZÁŤAŽE NA CESTY – VÝBER TUNELA	10
7.5	IMPLEMENTÁCIA DISTRIBÚCIE – PRIRADENIE TUNELU	10
7.6	IMPLEMENTÁCIA DISTRIBÚCIE - ENKAPSULÁCIA	11
7.7	ZLOŽITOSŤ ALGORITMU CAMR.....	12
8	METÓDY, METODIKA A NÁSTROJE RIEŠENIA ÚLOHY	13
8.1	SIMULÁCIE.....	13
8.2	ARCHITEKTÚRA SIMULOVANEJ SIETE	13
9	VYHODNOTENIE CAMR.....	14
9.1	STABILIZÁCIA SYSTÉMU – SKOKOVÝ NÁRAST PREVÁDZKY Z POKOJOVÉHO STAVU	15
9.2	STABILIZÁCIA SYSTÉMU – SKOKOVÝ NÁRAST PREVÁDZKY POČAS ZAŤAŽENÉHO STAVU	15
9.3	ROVNOMERNOSŤ ZAŤAŽENIA: NADMERNÝ POSTUPNÝ NÁRAST PREVÁDZKY.....	16
9.4	ZVÝŠENIE PRENOSOVEJ KAPACITY MEDZI UZLAMI CHRBTICOVEJ SIETE, BEZ ZÁŤAŽE.....	16
9.5	ZVÝŠENIE PRENOSOVEJ KAPACITY MEDZI UZLAMI CHRBTICOVEJ SIETE, S VARIABILNOU ZÁŤAŽOU	17
9.6	FAKTOR STABILITY sf : STABILITA VS PRIEPUSTNOSŤ: CHRBTICOVÁ SIEŤ	18
9.7	FAKTOR STABILITY sf : STABILITA VS PRIEPUSTNOSŤ: PRÍSTUPOVÁ SIEŤ	21
10	ZÁVER A PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	22
11	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	23
12	ÚČASŤ AUTORA NA VÝSKUMNÝCH PROJEKTOCH	27
13	PUBLIKÁCIE AUTORA	28

1 Úvod

Súčasný trend vo vývoji komunikačných systémov si vyžaduje časté rozhodovanie o vhodnosti využívania jednotlivých komunikačných a smerovacích protokolov na zabezpečenie dostatočnej prenosovej kapacity pre každý uzol siete. Zvyšovanie potrebného prenosového výkonu siete tak závisí nielen od implementovaných technických hardvérových prostriedkov, ale hlavne od celkového technického riešenia, spôsobu vzájomného prepojenia a optimálnej konfigurácie. Práve vhodný výber kombinácie technológií, komunikačných protokolov, fyzickej realizácie zariadení a prenosových médií umožňuje zvýšiť celkový výkon siete a zlepšiť kvalitu poskytovaných služieb pre koncových spotrebiteľov.

Smerovacie algoritmy a protokoly implementované v dnešných sieťach poskytovateľov služieb internet (OSPF, IS-IS, MPLS) sú v súčasnosti definované pre relatívne statický model topológie siete. Pod pojmom statický sú myslené fyzicky individuálne konfigurované uzly smerovania, ktorých rozhodnutia o smerovaní sa zakladajú na nominálnej priepustnosti a sú nezávislé od prevádzkovej dynamiky využitia prostriedkov siete. Nárastom dátovej prevádzky, spôsobené zvýšeným dopytom po multimediálnych službách mobilných, rezidenčných a podnikových zákazníkov, bude potrebné nielen zvyšovať kapacity liniek, ale hlavne zmeniť metódu prenosu dát.

Jedným z riešení problému udržateľnosti škálovania, spôsobeným obmedzeniami prenosových médií (optických vlnovodov a smerovacieho výkonu), je rozvoj tématickej viacecestnej komunikácie, rovnomernosti rozloženia záťaže a distribúcie obsahu (CDN, P2P, NGSON). Takýto krok vyžaduje splnenie niekoľkých podmienok: čiastočnú decentralizáciu riadenia a prúdenia dátových tokov pomocou softvérovo definovaných sietí SDN, adaptívny model smerovania so sledovaním dynamických zmien v sieti a kontrolou zahľadnosti a v neposlednom rade neustálu optimalizáciu z hľadiska dodržania princípov férovosti medzi využívanými prostriedkami siete.

Na základe analýz súčasnej problematiky v dizertačnej práci, skúmaním cieľov nového spôsobu smerovania vhodného pre sieť budúcej generácie, bola navrhnutá metóda viacestného smerovania s ohľadom na zahľadnosť CAMR (Congestion Aware Multipath Routing). Jedná sa o nový spôsob smerovania dát v rámci domény poskytovateľa. Metóda poskytuje lepšie prenosové vlastnosti ako klasické metódy najkratšej cesty SPF (Shortest Path First) a metódy SPF s rovnomerným rozdelením záťaže ECMP (Equal-cost multi-path routing). Práca obsahuje popis metódy a algoritmu spolu s implementáciou do prostredia MPLS, IPv6 a IPv4 sietí. Podstatnou výhodou je, že nová metóda umožňuje jednoduchú integráciu do existujúcich sietí a prevádzku paralelne s existujúcimi IPv4/IPv6 IS-IS/OSPF prípadne MPLS protokolmi.

2 Sieť NGN

Sieť novej generácie NGN sú paketovo orientované siete schopné poskytovať telekomunikačné služby. Zároveň využívajú viaceré širokopásmové, QoS zohľadňujúce transportné technológie v ktorých sú funkcie služieb nezávislé od nižších transportných technológií. Umožňujú neobmedzený prístup pre používateľov do siete a zároveň súťaživých poskytovateľov služieb a služieb samotných. Podporujú tiež zovšeobecnenú mobilitu pre konzistentné a všadeprítomné vytvorenie služby pre používateľov.

Zovšeobecnená mobilita je jedným zo základov smerovania služieb pre používateľov. Zahŕňa schopnosť prenosných entít komunikovať napriek zmenám fyzickej polohy a zmenám technického prostredia. Stupeň dostupnosti služby môže byť závislý od viacerých faktorov zahrňujúc schopnosti prístupovej siete, dohôd úrovne poskytovania služieb SLA medzi domácou a navštívenou sieťou a pod.

[1]
Základnými charakteristikami NGN sú nasledovné aspekty:

- paketový prenos,
- oddelenie riadenia prenosu, spojenia, aplikácie/služby,
- oddelenie vytvorenia služby od transportnej vrstvy a otvorených rozhraní

- podpora širokého rozsahu služieb, aplikácií a mechanizmov založených na stavebných blokoch služby zahrňujúc služby v reálnom čase, vysielaných, či časovo nezávislých a multimedialných služieb,
- širokopásmové možnosti zohľadňujúce QoS medzi koncovými stanicami a transparentnosť prenosu,
- spätnú kompatibilitu s predchádzajúcimi sieťami cez otvorené rozhrania,
- zovšeobecnená mobilita,
- neobmedzený prístup pre používateľov k rozdielnym poskytovateľom služieb,
- rôznorodý spôsob identifikácie,
- jednotné charakteristické vlastnosti pre identickú službu vnímanú používateľom,
- konvergované služby pre mobilnú a fixnú platformu,
- nezávislosť funkcií spojených so službou od transportných technológií,
- podpora technológií poslednej míle (Prístupových technológií),
- podpora všetkých požiadaviek regulátorov, napríklad pohotovostná komunikácia, bezpečnosť, súkromie, zákonné odpočúvanie a pod.

Vyššie uvedené, charakteristiky sietí NGN boli zohľadnené pri návrhu novej metódy smerovania

3 Smerovacie Protokoly a Algoritmy

Smerovanie má za úlohu vybrať najlepšiu cestu v sieti medzi zdrojovým a cieľovým uzlom. Proces smerovania prebieha na základe smerovacej tabuľky, ktorá obsahuje záznamy ciest do viacerých cieľov v sieti. Pri smerovaní podľa počtu záznamov t.j. množstva možných ciest k identickému cieľu je možné rozlíšiť, či sa jedná o jednocestné prípadne viaccestné smerovanie. Viaccestné smerovanie umožňuje využívať dve a viac alternatívnych ciest súčasne.

Počas dlhodobého vývoja sietí vznikol veľký počet smerovacích algoritmov a protokolov, ktoré sú špecifické pre určitý druh siete. Smerovacie algoritmy poskytujú rôzne úrovne náročnosti z hľadiska potrebných výpočtových, prenosových prostriedkov, odolnosti voči rôznym zmenám v topológii napr. rýchlosťou konvergenencie prípadne úrovne robustnosti z hľadiska poskytnutých informácií o stave siete, liniek a ciest.

V závislosti od miesta-uzla výpočtu a rozhodovania smeru cesty, je možné rozdeliť smerovanie do troch základných kategórií:

- zdrojové,
- hierarchické,
- distribuované.

Smerovacie algoritmy, ktoré sú momentálne implementované vo väčšine sietí majú za úlohu vyriešiť Problém najkratšej cesty (SPP - Shortest Path Problem). Riešením problému je nájdenie cesty medzi dvoma uzlami v sieti, vrcholmi v grafe, kde je suma všetkých vzdialeností medzi cieľom a zdrojom najnižšia. Medzi základne algoritmy, ktoré riešia problémy SPP sú:

- *Dijkstrov*, pre riešenie problému najkratšej cesty s jedným zdrojom
- *Bellman-Ford*, pre riešenie problému najkratšej cesty s jedným zdrojom, podporujúci aj záporné vzdialenosti – metriky
- *A* algoritmus*, pre cieleňé urýchlenie vyhľadania cesty medzi dvoma špecifickými uzlami
- *Floyd-Warshall*, pre riešenie úplne-prepojeného problému najkratšej cesty
- *Johnson*, pre riešenie úplne-prepojeného problému najkratšej cesty, výkonnejšieho oproti Floyd-Warshall pri riedkych grafoch, t.j. sieťach s malou hustotou liniek medzi uzlami
- *Viterbi*, pre riešenie Problému najkratšej stochastickej cesty s dodatočnou váhou pravdepodobnosti v každom uzle.

Alternatívnym problémom smerovania je *problém najširšej cesty* WPP má za cieľ je vybrať cestu, ktorá má medzi zdrojovým a cieľovým uzlom najvyššiu voľnú prenosovú šírku pásma. Problém WPP je tak isto ako SPP riešiteľný úpravou Dijkstra, prípadne Bellman-Ford, Ford-Fulkerson, Edmonds-Karp algoritmi.

Okrem základných algoritmov, existujú alternatívne postupy smerovania. Jedným z vylepšení postupov riešenia problémov SPP a WPP je smerovanie pomocou znalosti alternatívnych

suboptimálnych trás. Jedná sa o metódu *perspektívnych ciest* a *algoritmu k-ciest*. Navyše pre smerovanie, vyhľadávanie uzlov v sieti a následné zostrojenie SPT je možné použiť aj algoritmy, ktoré tieto vyhľadávacie funkcie spĺňajú, ale iba čiastkovo ako algoritmy BFS a DFS.

Nová metóda smerovania využíva poznatky z uvedenej ukážky smerovacích algoritmov, modifikáciou WPP smerovania pomocou upraveného algoritmu BFS a Edmonds-Karp.

4 Metrika - predmet optimalizácie

Predmetom optimalizácie je maximalizácia, prípadne minimalizácia určitých premenných – metrik. Pri optimalizácii cesty a smerovania je potrebné definovať výkonnostné ciele (dostupná šírka pásma, oneskorenie cesty, počet prepočtov cesty). Vďaka taxonómii je možné detailnejšie popísať a merať jednotlivé ciele, definovať priamo nemerateľné premenné, merateľné premenné a vonkajšie vplyvy na dané premenné - faktory.

Metriky sú ovplyvnené faktormi. Environmentálne faktory sú definovateľné ako faktory, ktoré nezávisia od vplyvu siete ako napríklad: rozmiestnenie uzlov, schopnosť mobility uzlov, technické vlastnosti a vzájomné rušenie. Sieťové faktory sú závislé od prevádzky. K týmto faktorom patrí zahľtenie, vnútorné vzájomné vplyvy medzi dátovými tokmi, spotrebovaná energia, topológia siete. [2]

Existuje mnoho kritérií podľa ktorých je možné dané metriky zaradiť. Metriky je možné funkčne rozdeliť na: zamerané na Prevádzku, Rádiový prenos, Topológiu, Mobilitu, Energiu.

Metriky môžu byť jednoduché, alebo kombinované. Medzi jednoduché metriky patria: oneskorenie, jitter, dĺžka radu, prenosová rýchlosť, stratovosť paketov, pomer preusporiadania paketov, a pod. Nová metóda smerovania uvedená v práci využíva kombinovanú metriku zohľadňujúcu zahľtenie, stabilitu siete a dĺžku cesty.

5 Férovosť

Optimalizácia opisovaná v tejto práci je založená na spravodlivom rovnomernom prerozdelení prostriedkov medzi používateľmi, aby úžitková funkcia bola maximalizovaná. Existujú viaceré kritéria spravodlivého prerozdelenia, nakoľko prerozdelenie prostriedkov a efektívnosť sú navzájom prepojené.

Medzi základné typy férového prerozdelenia patria:

- Max-Min
- Maximálna agregovaná priepustnosť
- Proporčná férovosť

Nová metóda faktor stabilizácie pre stabilizáciu a rozloženie záťaže so snahou zachovať optimálnu krátkodobú a zároveň dlhodobú propočetnú férovosť.

6 Ciele Dizertačnej práce

Na základe štúdia uvedenej problematiky je dizertačná práca zameraná najmä na tvorbu modelu a optimalizáciu smerovacích algoritmov pre paketové siete.

V rámci podrobnejšieho rozpracovania danej témy boli stanovené nasledovné ciele dizertačnej práce:

1. **Návrh nového, prípadne modifikácia existujúceho spôsobu smerovania prevádzky v sieťach NGN.**

Navrhnutý spôsob bude zohľadňovať adaptívny prenos údajov s dôrazom na optimálnosť smerovania vzhľadom na rozloženie záťaže a zvýšenie priepustnosti.

2. **Overenie vlastností navrhnutého modelu.**

Vlastnosti modelu siete budú overené prostredníctvom simulácií, respektíve experimentálne na reálnej sieti.

3. **Vyhodnotenie navrhnutých algoritmov porovnaním s existujúcimi smerovacími algoritmami a metódami prenosu dát.**

Vyhodnotenie bude realizované z hľadiska dosiahnutých výkonnostných parametrov siete.

7 Návrh CAMR, nového spôsobu smerovania prevádzky v sieťach NGN

Cieľ nového modelu smerovania je stabilizácia siete, rozloženie záťaže a zvýšenie plánovanej prenosovej rýchlosti. Predpokladom vzniku nového spôsobu smerovania je celková znalosť voľnej prenosovej kapacity siete a disponibilita tejto informácie na okrajových uzloch PE¹. Smerovanie dát skrz sieť optimálne využíva dostupné voľné kapacity v sieti, spôsobené nerovnomernosťou záťaže liniek.

Cieľom CAMR je optimalizácia a rozšírenie existujúcich prostriedkov smerovania, hlavne vo vnútri vnútri siete pomocou existujúcich prostriedkov poskytovateľa. Preto je algoritmus aplikovateľný na klasických IP sieťach využívajúc na objavenie liniek dynamické link-state smerovacie protokoly OSPF, IS-IS. CAMR metóda sa skladá z 5 hlavných fáz, identických pre všetky okrajové uzly siete PE (

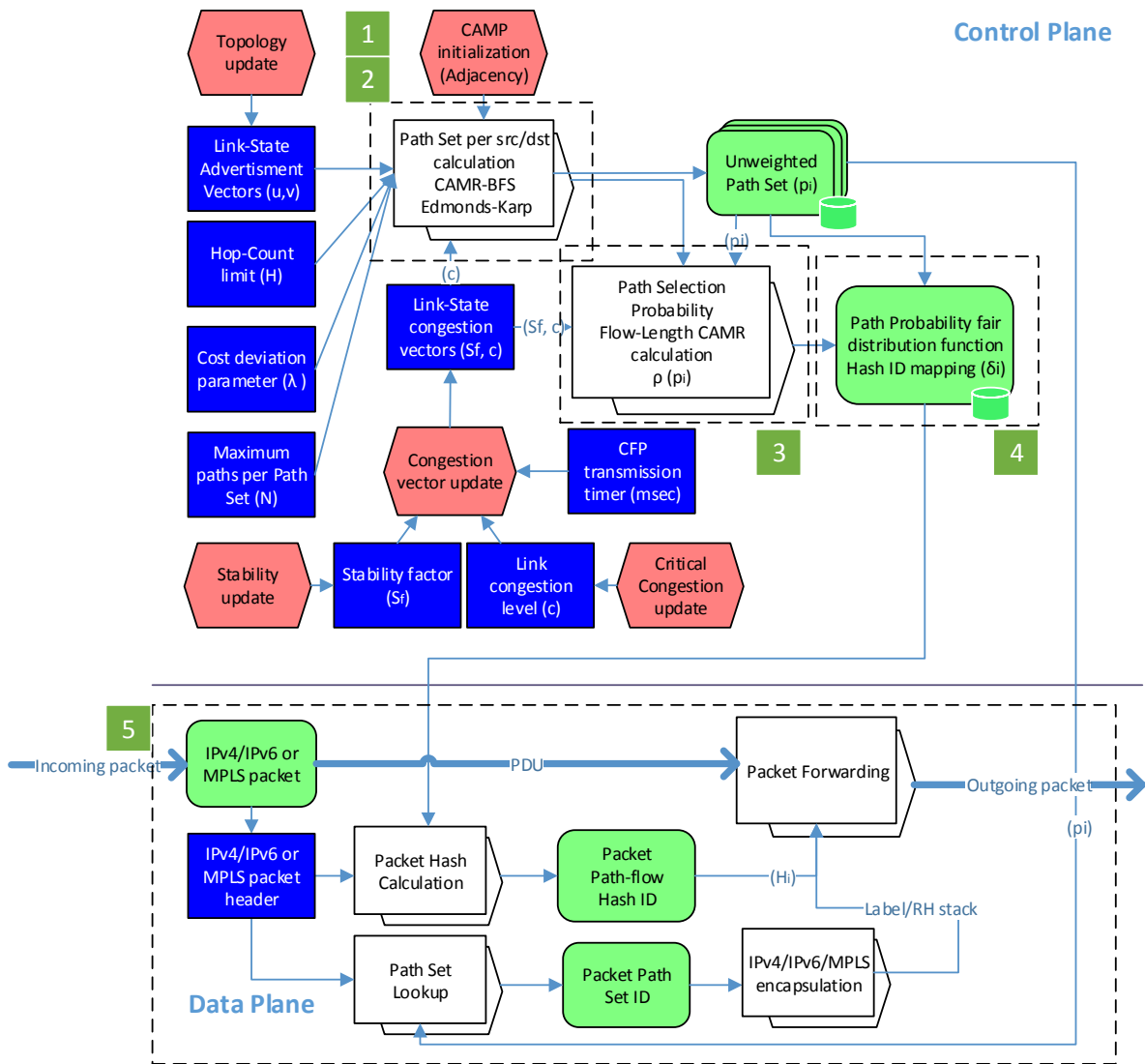
Obr. 1):

1. Výber spojenia,
2. Vyhľadávanie dostupných ciest a kapacít
3. Výpočet metriky ciest
4. Prepočet metrík na intervaly ciest
5. Enkapsulácia a proporčná distribúcia dát

Okrem 5 hlavných fáz CAMR algoritmu, sú pre túto metódu smerovania definované aj prídavné parametre a udalosti, ktoré dopĺňajú základný algoritmus a vytvárajú základný rámec pre nový smerovací protokol CAMP (Congestion Aware Multipath Protocol) a CFP (Congestion Feedback Protocol), rozširujúci protokol o distribúciu parametrov a vektorov voľných kapacít liniek.

Realizácia výpočtu ciest CAMR je možná centralizovane, distribuovane, prípadne lokálne. V prípade centralizovaného výpočtu sa zbierajú informácie o stave siete vo výpočtovom uzle a následne sa distribuujú smerovacie tabuľky. Táto metóda je výhodná, len pre malý počet uzlov s nízkou výpočtovou kapacitou lokálne. Distribuovaná metóda prepočítava smerovaciu tabuľku pre cluster smerovačov a je možné využiť pre túto metódu lokálne datacentrá. Centralizovaná a decentralizovaná architektúra je druhom softvérovo definovanej siete, nakoľko sa o smerovanie v uzle stará vzdialená riadiaca výpočtová jednotka. Lokálna implementácia vyžaduje výpočet v okrajových uzloch siete.

¹ PE – Provider Edge, angl.



Obr. 1, Schéma algoritmu CAMR, 5 hlavných fáz

7.1 Algoritmicko-matematický model CAMR

V predpokladanej sieti zobrazenej pomocou orientovaného grafu $G(V, E)$, kde V sú uzly a E hrany orientovaného grafu, potom $c(u, v)$ je kapacita jednosmernej linky, medzi uzlami $u, v \in V$. Potom $f(u, v)$ je tok dát (prúd) medzi ľubovoľným dvoma uzlami $u, v \in V$. Potom platí, že pre ľubovoľný prúd, tj. dátový tok medzi ľubovoľnými uzlami je rovný prípadne menší ako kapacita medzi danými uzlami.

$$\forall (u, v) \in E \quad f(u, v) \leq c(u, v) \quad (1)$$

Zároveň, ak uzol u nie je zdrojovým ani cieľovým uzlom pre prúd f_i je použité pravidlo zachovania toku:

$$\forall u \in V: u \neq s, u \neq t \text{ pre } f_i(s, t) \Rightarrow \sum_{w \in V} f_i(u, w) = \sum_{w \in V} f_i(w, u) \quad (2)$$

Potom existuje orientovaný graf $G_f(V, E)$ reziduálnych sietí, liniek s kapacitou

$$c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v) \quad (3)$$

Cieľom CAMR algoritmu je dosiahnutie optima rovnomerného rozloženia prúdov $f(s, t)$ na linkách (u, v) a zároveň poskytnúť ľubovoľnému prúdu $f(s, t)$ zvýšenie celkovej priepustnosti oproti protokolom najkratších ciest s štatistickým rozložením záťaže $f_{SPF_ECMP}(s, t)$.

7.2 Vyhľadávanie dostupných ciest a kapacít

Algoritmus CAMR pri vyhľadávaní ciest p , z uzlov $G(V, E)$ - s do t vyhľadáva voľné kapacity c pre prúd f s cieľom jej maximalizácie. Každou iteráciou algoritmu sa celková kapacita G_f znižuje až pokiaľ neexistuje žiadna cesta p_i medzi zdrojovým uzlom s a cieľovým t . Potom $f(s, t)$ je maximálny prúd, ktorý je možný v danom časovom okamihu dosiahnuť pomocou hľadania BFS - Edmonds-Karp – CAMR algoritmu. Pre efektívne skrátenie algoritmu sú v algoritme obmedzenia. Jedná sa o parametre počtu nájdených ciest - M , ktoré spoločne vedia zabezpečiť prenosovú kapacitu pre daný cieľ – B . Druhým parametrom je N , predstavujúci počet skokov dlhších ako najkratšia cesta. Parametre M, N, B majú za cieľ skrátiť čas prehľadávania zbytočne dlhých ciest, skúmaním celého grafu. Zároveň sa zmenší nárok na pamäť databáz ciest. Algoritmus vyhľadávania pracuje nasledovne:

Algoritmus 1: Algoritmus vyhľadávania ciest CAMR

Vyžaduje: maticu kapacít c , uzly s, t , parametre M, B, N

Návratové hodnoty: Sada ciest p , priepustnosť ciest c_f

```

1:  $\forall V, E: 0 \rightarrow f(u, v)$ 
   2: Ak  $\exists p_i(s, t) \in G_f$ ,
      kde  $(c_f(u, v) > 0) \wedge (((M \geq |p|) \wedge (B \geq f)) \vee (p_i < N + p_1))$ 
      pre  $\forall (u, v) \in p_i$  potom:
   3: Nájde  $c_{fi}(p) = \min\{c_{fi}(u, v): (u, v) \in p\}$ :
   4:  $Q = \{s\}$  #  $Q$  je zásobník FIFO
5: Pre každý uzol  $w \in V$ :
6:    $n(w) = 0$ ; kde  $n$  je binárna hodnota - príznak návštevy uzla
7:    $d(w) = \infty$ ; kde  $d(w)$  vzdialenosť od uzla  $s$ 
8:    $pd(w) = \text{null}$  # kde  $pd(w)$  je predchodca uzla  $w$ 
9:    $n(s) = 0$ 
10:   $d(s) = 0$ 
11:   $DQ = \{s\}$ 
12:  pokiaľ  $(Q \neq \emptyset)$  :
13:     $u$ , kde  $pd(u) \in DQ, Q = Q - u$ 
14:    Pre každú linku  $(u, v) \in E$ :
15:      Ak  $(n(v) \neq 0)$ 
16:         $n(v) = 1$ 
17:         $d(v) = d(u) + 1$ 
18:         $Q = Q + v$ 
19:      Ak  $v = t$ , potom  $c_{fi}(p) = \min\{c_{fi}(s, t): (s, t) \in p_i\}$ 
20:    Pre  $\forall (u, v) \in p$ :
21:     $f(u, v) \leftarrow f(u, v) + c_{fi}(p_i)$ 
22:     $G_{fi+1} \leftarrow G_{fi} - c_{fi}(p_i)$ 

```

7.3 Výpočet metriky ciest

Jedinečnosťou CAMR algoritmu je opätovné zvýhodnenie kratších liniek podľa metriky. BFS algoritmus vyberá kratšie cesty a metrika udáva pomer vyslaných dát danou cestou. CAMR metrika je definovaná nasledovne:

$$\rho(p_i) = \frac{c_{fi}}{d(t_i)^{s_f}}, \text{ kde } s_f \in \langle 0, \infty \rangle \quad (4)$$

Metrika danej cesty je závislá od kapacity cesty a jej dĺžky. CAMR využíva faktor stability a potlačenia s_f . Tento faktor slúži na potlačenie pridlhých ciest a je zároveň nástrojom stabilizácie siete, v prípade vysokých kolísaní a záťaží liniek. Viaccestné smerovanie CAMR zvyšuje celkový objem prevádzky v sieti, smerovaním cez dlhšie suboptimálne cesty.

$$\text{pre } \forall(u, v) \in E; \text{ ak } d(p_{CAMR}) > d(p_{SPF}) \text{ potom} \quad (5)$$

$$\sum_i f_{CAMR_i}(u, v) > \sum_j f_{SPF_j}(u, v) ; \sum_i c_{f,i,CAMR}(u, v) < \sum_j c_{f,j,SPF}(u, v) \quad (6)$$

Ak je celkový navýšený objem nadmerný, uzly dynamicky zvýšia faktor stabilizácie s_f s cieľom globálneho skrátenia ciest a zároveň zníženia navýšeného objemu, spôsobeného suboptimálnymi cestami.

7.4 Distribúcia záťaže na cesty – výber tunela

Nasledujúcou fázou CAMR je využitie metód pre adaptívne prerozdelenie prevádzky medzi tunely. Metrika má lokálny význam pre jeden cieľ a slúži ako pomerová hodnota na výpočet intervalov hash-funkcie. Celkový pomer vyslaných dát, tj. α_i – šírka intervalu, reprezentovaná intervalom H_i patrí jednému tunelu a je závislá od pomeru $\rho(p_i)$ metriky k celkovej metrike smerovanému cieľu:

$$\text{ak } \delta_i = \frac{\rho(p_i)}{\sum_i \rho(p_i)}, 0 \text{ potom } \alpha_1 = \left\lfloor \frac{\delta_i}{2^m} \right\rfloor, \text{ kde } m = 16 \quad (7)$$

$$H_1 < 1, \delta_i), \quad \text{pre } i > 1: H_i(\delta_{i-1}, \delta_{i-1} + \delta_i) \quad (8)$$

Metóda výberu tunelov podľa zaťaženia siete je jedným z kľúčových častí CAMR, Základnou inšpiráciou pre CAMR je používanie rovnomerného, hash algoritmu využívaného v LAG a ECMP, UCMP. Cieľom je vyhnúť sa prerozdeleniu závislého od nasledujúceho skoku, prípadne princípu paketovému rozdeleniu round robin. MFMP [3] využíva metódu round-robin, avšak táto metóda spôsobuje v prípade krátkej periódy Round-Robin cyklu rozdiely v oneskorení individuálnych dátových tokov. Taktiež nezohľadňuje riadenie toku TCP a špecifiká kritických a multimediálnych dátových tokov. Veľké intervaly round-robin prerozdelenia dátových tokov zvyšujú nestabilitu siete a spôsobujú nižšiu krátkodobú férovosť [4], Zároveň, dlhé intervaly nemusia rovnomerne rozdeliť prevádzku, ak je dostupná novšia informácia o zahľtení a pomer prerozdelenia sa zmenil počas dlhých intervalov.

7.5 Implementácia Distribúcie – priradenie tunelu

Prerozdelenie paketov do tunelov podľa hash-funkcie poskytuje nízku náročnosť na spracovanie a zároveň vysokú granularitu prerozdelenia. Využitie 16-bitového Cyclic Redundancy Check (CRC-16) na kategorizáciu dátových prúdov, zabezpečuje v CAMR rovnomernosť v rozdelení pomocou kroku veľkosti $\frac{1}{2^{16}} = \frac{1}{65536}$, tj. granularitu rozdelenia dátového toku 100Gb/s na 1,5259Mb/s.

Numerická hodnota paketu β_p - zvyšok po delení 16-bitovou hash funkciou spracovaného paketu je priradená k ceste p_i podľa prislúchajúceho intervalu H_i . Touto metódou sa dosiahne štatisticky optimálne rozdelenie dátových prúdov.

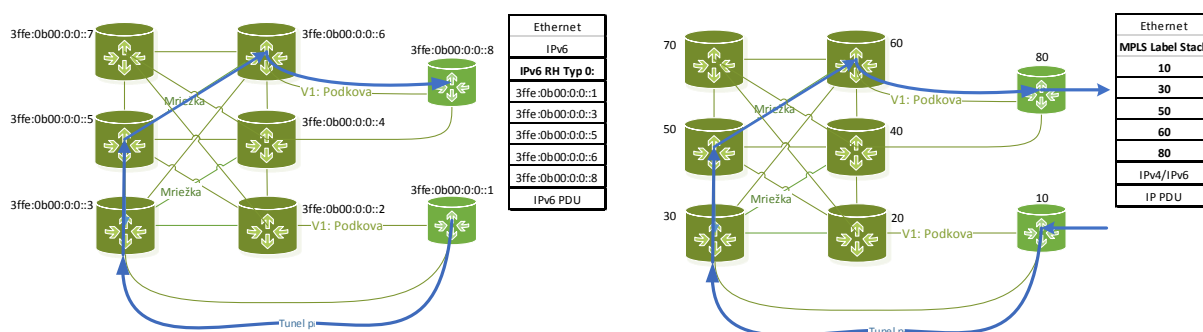
Dlhší polynóm CRC hash-funkcie zvyšuje rozlíšenie a predurčuje metódu k vyššej efektívite a rýchlejšej konvergencii k ustálenému stavu siete. Na spracovanie hash CRC-16 funkciou sa využívajú polia IPv4/IPv6 hlavičky – zdrojová IP adresa, cieľová IP adresa a pole typ protokolu zákaznických/používateľských paketov. Práve zákaznicke, vnútorné IP adresy v prípade prerozdelenia prevádzky sú podstatné pre zachovanie jednotnej cesty pre každú zákaznicku aplikáciu. V prípade tunelovania siete pomocou enkapsulácie L2TP, L2TPv3, GRE, je žiadúce aby pre zvýšenie granularity boli skúmané spomínané zákaznicke polia obsahujúce riadenie toku na vyšších L3-L7 vrstvách. V prípade prerozdelenia podľa IP polí poskytovateľa bude pre rádovo nižší počet

kombinácií IP adres uzlov operátora vykazovať hash-funkcia menej rovnomerné rozdelenie a tým pádom aj horší výkon.

Existujú aj menej efektívne metódy prerozdelenia, na základe posúvania hraníc intervalov, metódou algoritmov AMP a OMP [5], avšak tieto algoritmy sú komplikované a autor popísal rozdelenie dát len medzi limitovaný počet ciest.

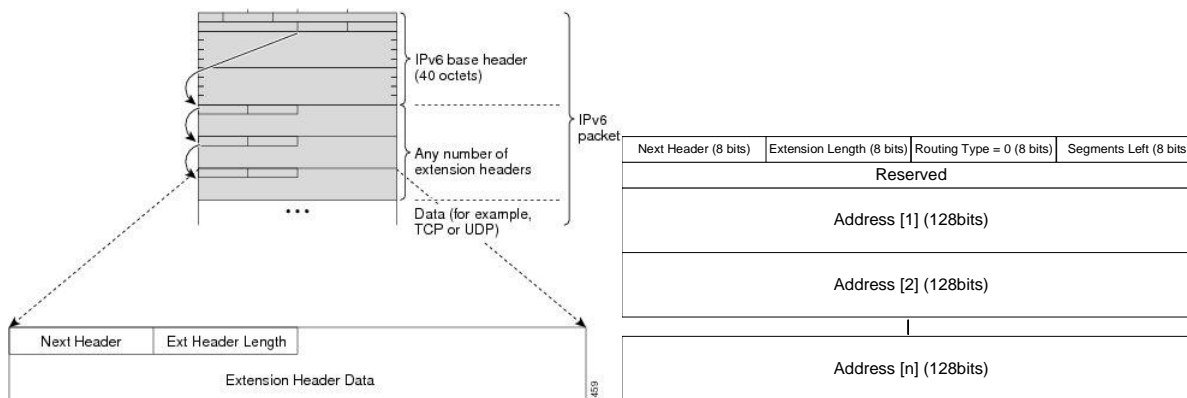
7.6 Implementácia Distribúcie - enkapsulácia

Pre enkapsuláciu a zdrojové smerovanie, sa využíva IPv6, tunelovanie pomocou L2TPv3 prípadne MPLS enkapsulácia.



Obr. 2, Zdrojové smerovanie CAMR implementácia pomocou IPv6 a MPLS Segmentového smerovania

Implementácia CAMR je ideálna pomocou podľa IETF IPv6 Routing Type 0 Extension Header, kde rozšírená hlavička nemá obmedzenie z hľadiska veľkosti. V prípade obmedzenia fragmentácie, potom maximálny počet pri MTU 1500 bajtov je až 90 presne určených skokov [6] [7]. IPv6 paket má základnú hlavičku dĺžky 40 bajtov. Následne základná hlavička paketu obsahuje pole Next Header, identifikujúca nasledujúcu hlavičku paketu. Na identifikáciu IPv6 Smerovacej hlavičky², tj. zoznamu uzlov zdrojového smerovania CAMR, sa využíva hodnota 43.

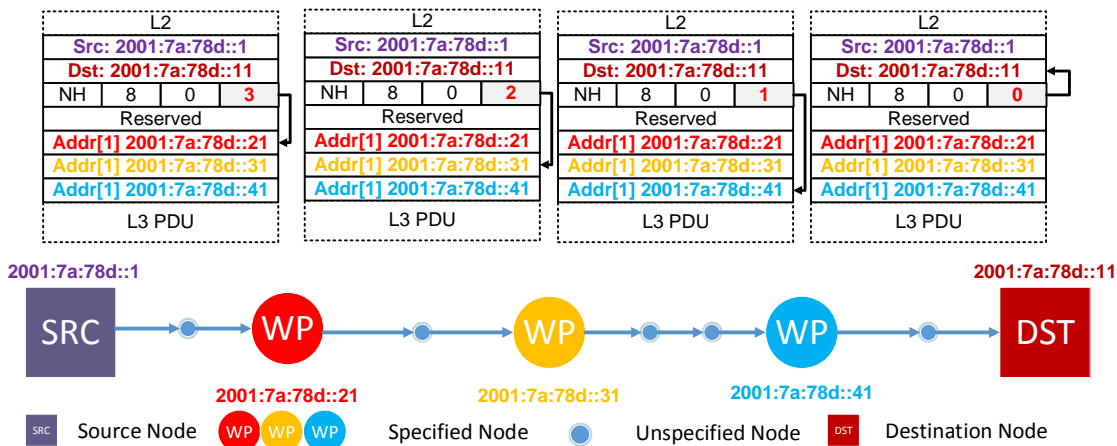


Obr. 3, Formát paketu IPv6 spolu s Extension Header (vľavo) [8],

Formát adres pri IPv6 EH Routing Type= 0 (vpravo) [9]

Formát Smerovacej hlavičky (Obr. 3) obsahuje polia: Identifikátor nasledujúcej hlavičky, Dĺžka aktuálnej hlavičky v oktetoch, Typ smerovacej hlavičky, Index nenavštívených segmentov, Rezervné pole a neposledne zoznam uzlov smerovania. Typ uvedenej smerovacej hlavičky pre zdrojové smerovanie je 0. Index nenavštívených segmentov určuje aktuálnu index v zozname uzlov smerovania od konca zoznamu, pred tým ako sa dostane paket do cieľa. Zoznam uzlov smerovania obsahuje n 128-bitových adres tvoriace tunel CAMR.

² Routing header type



Obr. 4, Ukážka využitia IPv6 v CAMR - Index nenavštevovaných segmentov [9]

Alternatívne smerovanie pomocou segmentov³ je návrhom IETF štandardu a pripadá ako možnosť implementácie CAMR do sietí MPLS. Smerovanie pomocou segmentov je metóda zdrojového smerovania. Uzly prepínajú prevádzku podľa usporiadaného zoznamu inštrukcií, zvaných segmenty. Segment môže reprezentovať ľubovoľnú topologickú inštrukciu, prípadne inštrukciu služby [10]. Zoznam segmentov je zakódovaný pomocou zásobníka MPLS návěstí. Návestia sa spracovávajú z vrchu zásobníka, ako náhle je inštrukcia segmentu splnená, návestia sa odstráni a následne sa použije najbližšie návestia, až pokiaľ nie je zásobník prázdny. Identifikátor segmentu zakódovaný v MPLS návěstí umožňuje rozlíšiť globálny segment, ktorý je jedinečný v doméne napr. identifikátor uzla. Lokálny segment v danom uzle je jedinečný napr. lokálne rozhranie uzla. Identifikátory segmentov sú distribuované pomocou protokolov IGP (ISIS, OSPF), BGP, LDP, RSVP-TE. Hĺbka zásobníka⁴ určuje maximálnu kontrolovateľnú dĺžku tunela určeného pre transport pomocou CAMR.

Maximálna teoretická dĺžka riadeného CAMR tunela pomocou segmentového smerovania je 255 skokov, vďaka definovanému počtu maximálnej hĺbky zásobníka – MSD (Maximum SID Depth), v definícii prvku počítajúceho cesty – PCE (Path Computation Element) [11].

IPv4 protokol umožňuje LSSR – Loose Source Routing a SSR – Strict Source Routing a je alternatívnou možnosťou. Nevýhodou IPv4 je obmedzená veľkosť adresného poľa 40 bajtov, ktorá limituje počet riadených skokov P smerovačov na 9, tj. maximálnu dĺžku kontrolovateľného tunela medzi uzlami s a t .

7.7 Zložitosť algoritmu CAMR

Zložitosť algoritmu závisí od pod algoritmu vyhľadávania jednotlivých ciest. Z hľadiska stability bol vybraný BFS algoritmus, ktorý zvyhodňuje svojou podstatou kratšie cesty, oproti dlhším. Pri určovaní náročnosti algoritmu sa uvažuje o katastrofickom scenári závislom od počtu uzlov a liniek, tj. vrcholov a hrán. Zložitosť BFS vyhľadania jednej cesty, tj. jednej iterácie Edmonds-Karp je závislá od množstva hrán $O(|E|)$. Je to spôsobené navštevovaním každého uzla pomocou dostupných hrán. Celková zložitosť Edmonds-Karp [12] algoritmu je z dôvodu iterácií $O(VE^2)$ [13]. Výhodou BFS algoritmu je, že prvou iteráciou BFS sa vždy nájdu najkratšie cesty pre všetky uzly. To znamená, veľmi krátku inicializačnú dobu smerovania v prípade vloženia a spustenia nového uzla. Následné vyhľadávanie sekundárnych ciest je individuálne pre každý cieľ a je potrebné jedno separátne výpočtové vlákno na výpočet a využitie paralelizácie.

Pre budúce verzie CAMR smerovania by bolo vhodné porovnať efektivitu smerovania podľa Goldberg-Tarjan prípadne Dinic algoritmu. Tieto algoritmy vykazujú podstatne nižšiu výpočtovú náročnosť pre chrbticové – plne prepojené siete, tj. umožňujú kratší interval obnovy smerovacej tabuľky.

Pre porovnanie sú v práci uvedené výsledné časy algoritmov v závislosti od veľkosti siete. Goldberg/Rao algoritmus dospeje rýchlejšie k celkovému výsledku v hustých sieťach. Edmonds-Karp

3 Segment routing, angl.

4 SID: Segment List Depth, angl.

podľa porovnania simuláciou pracuje s najnižšou efektívnosťou. Avšak, pre CAMR algoritmus v hustých grafoch však nie je dôležité nájsť úplný graf, prípadne všetky cesty s dosiahnutím maximálnej priepustnosti. Pre efektívny prenos stačia cesty, ktoré umožnia preniesť kapacitu do úrovne prenosovej kapacity B , s maximálnym počtom skokov H , pomocou maximálneho počtu ciest N . Parametre obmedzenia vo vyhľadávaní zlepšujú výkon Edmonds-Karp algoritmu jeho predčasným ukončením. Preto CAMR nie je možné porovnať s inými algoritmami, nakoľko tie vyžadujú dokončenie celkového algoritmu, pre aj tak nepotrebnú znalosť celkového súboru ciest.

8 Metódy, Metodika a Nástroje riešenia úlohy

Pred simuláciou nového algoritmu CAMR bolo nutné vybrať adekvátne simulačné a editačné prostriedky. Následne, na základe skúseností z praxe bola vybraná správna topológia pre simuláciu s cieľom čo najbližšieho priblíženia simulácie k reálnym podmienkam.

8.1 Simulácie

Na simuláciu boli analyzované možnosti využitia klasických časovo diskretných sieťových simulátorov a simulačných prostriedkov. Keďže CAMR je metóda obsahujúca algoritmus, konceptuálne nezávislý od prenosovej technológie, je výhodné uskutočniť simulácie postupne na viacerých úrovniach: na úrovni dátových prúdov, na úrovni paketov, na úrovni paketov s prihliadnutím na protokoly vyššej vrstvy.

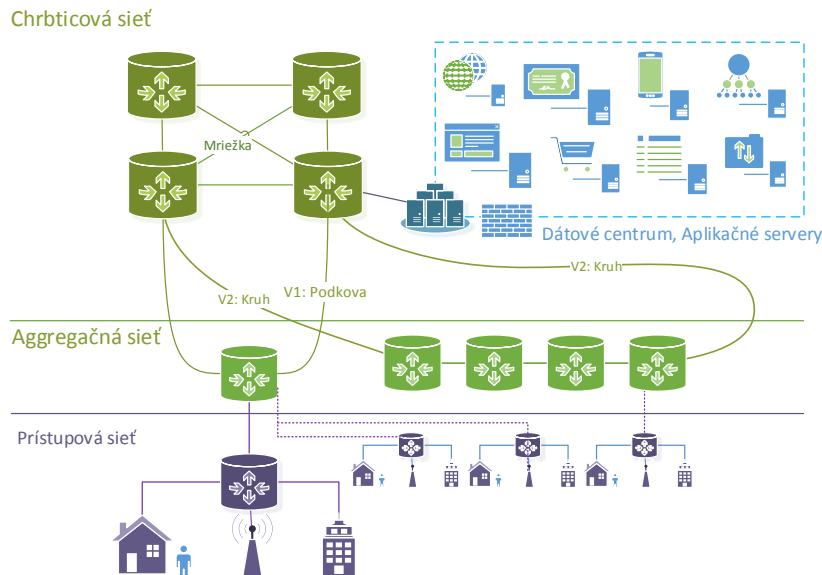
Súčasťou práce je simulácia na úrovni dátových prúdov uskutočnená v prostredí Matlab 2014a, ktorý je výhodný hlavne vďaka vysokej modularite, rýchlosti spracovania, reprezentácií dát a možnosti optimalizácie. Zároveň simulácie v Matlabe sú z analytického pohľadu prehľadné a neobsahujú iné vnorené algoritmy, prípadne iné skryté vlastnosti simulátora a ladenia, zároveň umožňujú vysokú mieru abstrakcie a štatistické funkcie. Pre účely výskumu a štúdiá som v práci zostrojil v Matlabe parametricky modifikovateľný generátor siete, generátor prevádzky, simulátor siete a smerovania pre metódy CAMR, SPF a SPF/ECMP.

8.2 Architektúra simulovanej siete

Pre aplikáciu a overenie funkcionality CAMR vo vierohodných podmienkach, je potrebné analyzovať protokol na sieti, podobnej reálnym sieťam implementovaných v prostredí poskytovateľov telekomunikačných služieb. Jednou z najpoužívanejších architektúr prenosovej siete poskytovateľa služieb je 3-vrstvová architektúra, určujúca topológiu, typy zariadení a rozhraní. Jedná sa o vrstvy chrbticovú, agregáčnu a prístupovú. Základné topológie pre chrbticovú sieť je úplná mriežka, pre prípad agregáčnej a prístupovej siete sú typické stromová prípadne kruhová topológia a nástupom DWDM sietí podkova⁵. Prístupová vrstva je občas pripojená priamo k agregáčnemu uzlu, iba pre kritické služby zdvojené.

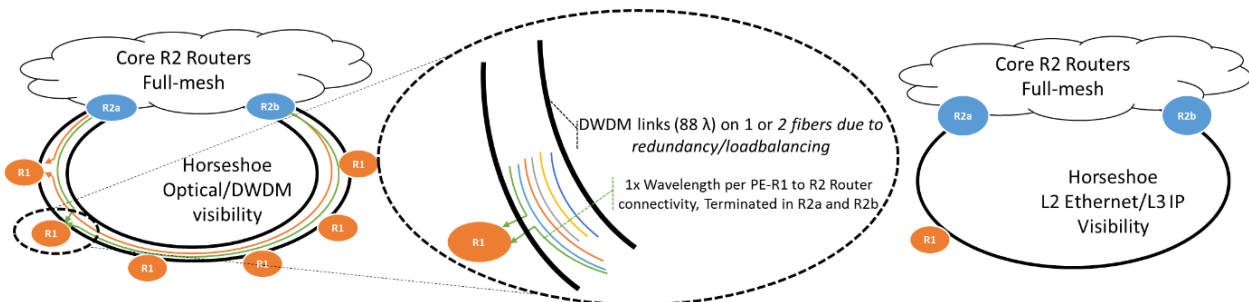
Algoritmus CAMR je v práci simulovaný na dynamicky generovanej sieti TeraStream pozostávajúcej z dvojvrstvovej Chrbticovej a Agregáčnej siete. V prípade agregáčnej vrstvy je simulovaný variant V1 s topológiou podkova. V prípade neredundantnej prístupovej vrstvy, rozhodovanie z prístupovej vrstvy je obmedzené jedinou uplink linkou. Preto je táto vrstva vynechaná zo simulácie. Počet uzlov R2 je 6 a počet uzlov R1 je 15, tj. medzi každým uzlom chrbticovej siete sa nachádza jeden agregáčny uzol.

⁵ Horseshoe, angl.t



Obr. 5, Trojvrstvový model siete, varianty agregácie V1: podkova, V2: kruh

TeraStream topológia, je model siete navrhnutý Deutsche Telekom Group pre jednotnú a jednoduchšiu plochú architektúru. Základom sú smerovače R1 a R2, kde každý uzol R1 je prepojený s redundantnými 2x 100GE linkami do smerovačov R1. Spôsob fyzickej realizácie je cez DWDM drop-waste podkova. R2 smerovače sú navzájom prepojené 100GE rozhraniami, tj. topológia úplnej mriežky. Táto konektivita je zabezpečená priamym prepojením Ethernetovou linkou prípadne dedikovaným OTU4 kanálom. V TeraStream sieti je predpokladaný na tretej vrstve RM OSI iba prenos pomocou IPv6. Cieľom je zbavovať sa zložitých, prípadne neperspektívnych a jednoúčelových technológií ako PDH, SDH, MPLS, IPv4, LDP a RSVP-TE. Taktiež využitie podkovy namiesto kruhovej topológie a dvojúrovňovej hierarchie poskytuje výhodu v jednoduchšej topológii, nižšej priemernej vzdialenosti siete a celkovo kratších dobách oneskorenia a zložitosti smerovania.

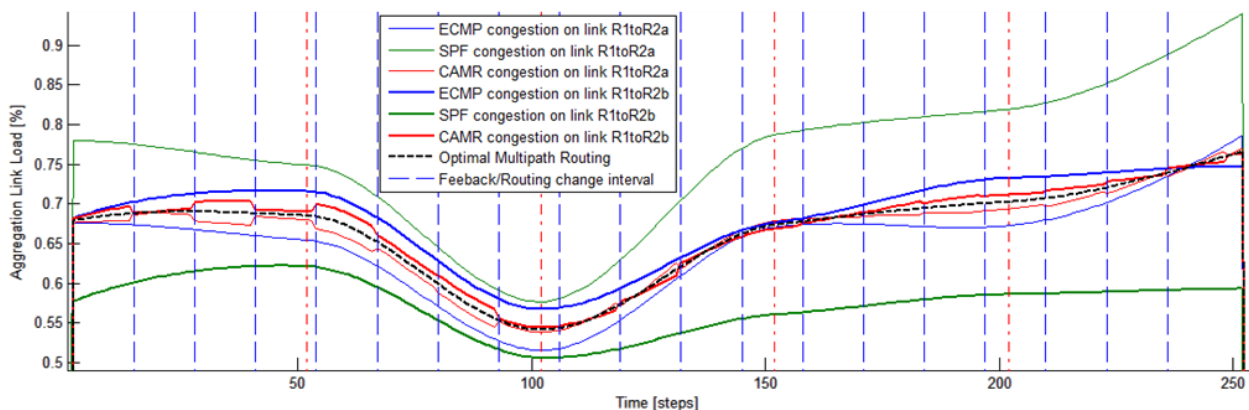


Obr. 6, Drop Waste DWDM topológia pripojenia cez 2 vlákna až 44x redundatne, obojsmerne pripojených PE R1 smerovačov do chrbticových uzlov R2a a R2b (88λ pre 2 smery a Rx a Tx)

9 Vyhodnotenie CAMR

Vyhodnotenie algoritmu v tejto kapitole má za úlohu porovnať pomocou simulácie vlastnosti CAMR s existujúcimi algoritmi SPF (Bellman-Ford) a metódou smerovania SPF s pomocou distribúcie prevádzky medzi najkratšie cesty ECMP. V tejto kapitole sú simulované špecifické scenáre prevádzky spolu s opisom jednotlivých výsledkov ako dôkaz výhod a vlastností metódy CAMR.

9.1 Stabilizácia systému – skokový nárast prevádzky z pokojového stavu



Obr. 7, Úroveň zahľtenia liniek $R1 \rightarrow R2a$ a $R1 \rightarrow R2b$ pri rôznych metódach smerovania,

Z hľadiska stability, dynamické smerovanie vyžaduje niekoľko intervalový konvergenčný čas pre veľké záťažové zmeny v krátkom intervale z pokojového stavu. Počas simulácií sa pracovalo so sieťou, ktorá na počiatku predpokladala 0-vé zaťaženie liniek. Ako dôsledok je na grafe zobrazené krátkodobé preklápanie záťaže liniek v intervale krokov 0-100. Preklápanie smerovania medzi uplink linkami sa dialo nárazovo na rozhraniach rozhodovania o smerovaní (feedback_interval = 13 - vertikálne prerušované, modré čiary).

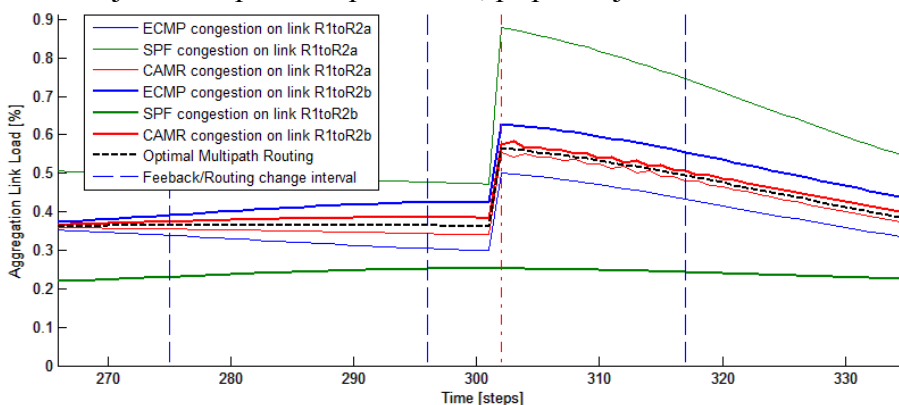
V nasledujúcom časovom intervale kroky 160-240 je možné spozorovať stabilizáciu siete, kde stav záťaže liniek $R1 \rightarrow R2a$ a $R1 \rightarrow R2b$ sú blízko optimálnych tj. rovnovážnych hodnôt. Výsledkom tejto simulácie je potvrdenie odolnosti CAMR voči skokovým nárastom prevádzky a jej následne stabilizácie z nulového stavu. Simulácia s celkovou dĺžkou 10000 krokov a rovnakou konfiguráciou poskytla nasledovné stredné hodnoty nevyváženosti:

Tabuľka 1, Stredná hodnota nevyváženosti liniek od ideálneho smerovania s rovnomerným zaťažením

SPF	ECMP	CAMR
0.1684 [16,84 Gb/s]	0.0359 [3,59 Gb/s]	0.0110 [1,1 Gb/s]

9.2 Stabilizácia systému – skokový nárast prevádzky počas zaťaženého stavu

Ďalšia simulácia má za úlohu, dokázať stabilitu siete a liniek pri zaťaženom stave. V časovom kroku 301, bola zámerné zvýšená prevádzka medzi Agregáčnymi uzlami R1: 7 a R1:21. Po skokovom náraste, vznikla krátkodobá oscilácia prerozdelenia dát medzi tunelmi, avšak rozloženie záťaže na obidvoch uplink linkách je stále lepšie ako pri ECMP, prípadne jednocestnému smerovaniu SPF.



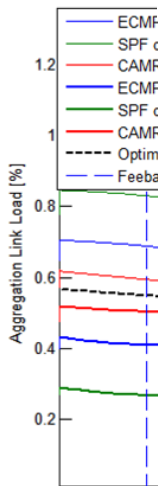
Obr. 8, Test: Stabilizácia skokového nárastu prevádzky medzi uzlami R1: 7 a R1:21, T:301

9.3 Rovnomernosť zaťaženia: nadmerný postupný nárast prevádzky

Táto simulácia má za úlohu dokázať výhody CAMR pri nadmernej prevádzke, kde nie je možné na základe najkratšej metriky prenášať dáta cez najkratšiu cestu. Z grafu (Obr. 9) je značné, že pokým prevádzka pri SPF, na nevyváženej linke vykazuje 29% stratu paketov a ECMP 15% stratu, CAMR na najzahltenejšej linke vykazuje 6,4% rezervu linky a tak poskytuje naďalej nepretržitý prenos všetkých služieb. Táto simulácia dokazuje, efektívnejšie narábanie CAMR so sieťovými prostriedkami, ako smerovanie bez odozvy zaťaženia.

```
if x==7
    if y==8
gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)=gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)+u*0.001;
    end
end
if x==7
    if y==11
gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)=gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)+u*0.001;
    end
end
```

Ukážka 1, Ukážka kódu v simulátore pre zvýšenie prevádzky



Obr. 9, Postupný nárast prevádzky medzi uzlami R1:7 a R1:8 a R1:7 a R1:11, uzlov s spoločným R2a smerovačom

9.4 Zvýšenie prenosovej kapacity medzi uzlami chrbticovej siete, bez záťaže

Čím je sieť stabilnejšia, tým je faktor sf nižší a je možné viac zužitkovať kapacitu siete pre prenos dát po dlhších cestách. Maximálna kapacita CAMR pri stabilnej sieti je súčtom všetkých dostupných kapacít max-flow medzi zdrojom a cieľom, minimálna kapacita CAMR je identická kapacite ideálneho SPF/ECMP smerovania. V tejto podkapitole ako aj v predchádzajúcich prípadoch využíva CAMR suboptimálne trasy, podľa úrovne stability a celkovej záťaže siete a preukazuje svoje výhody aj v modelovej simulácii.

Prvá simulácia v tomto bode poukazuje na výhody pri CAMR, hlavne pri hustých sieťach, topológiách úplnej mriežky (Tabuľka 2). Pri topológii úplnej mriežky, vždy existuje 1 najkratšia cesta medzi chrbticovými smerovačmi. Následne existuje dostatočné množstvo ciest s relatívne krátkymi dĺžkami. Pri použití smerovania CAMR, medzi dvoma susednými uzlami, tak ako v je v prípade tejto simulácii, existuje stále dostatok kapacity dostupnej cez suboptimálne cesty. Teoretická maximálna kapacita medzi susednými uzlami sa pohybuje od 1 ($sf = \infty$) do 10 jednotiek⁶ ($sf = 0$), v závislosti od faktoru stability. Treba poznamenať, že protokoly využívajúce viacestné smerovanie SPF spolu s

⁶ [1 jednotka = 100Gb/s]

ECMP mechanizmom umožňujú prenos iba po ceste Tunnel ID 1 (Tabuľka 2) a preto maximálnu prenosovú kapacitu 1.

Tabuľka 2, Smerovacia tabuľka 1: Rozdelenie prevádzky medzi cesty, medzi uzlami 1-6 pre rozdielne hodnoty sf

Tunnel ID	Tunnel Length [hops]	Hops	Tunnel capacity [x100 Gb/s]	Metric						Tunnel Traffic Proportion						Link Load equivalent [x100 Gb/s]								
				Sf	0	1	2	3	4	5	Sf	0	1	2	3	4	5	Sf	0	1	2	3	4	5
Tun. 1	2	1->6	1		1.000	0.500	0.250	0.125	0.063	0.031		0.1	0.158	0.237	0.335	0.447	0.561		1	1	1	1	1	1
Tun. 2	3	1->2->6	1		1.000	0.333	0.111	0.037	0.012	0.004		0.1	0.105	0.105	0.099	0.088	0.074		1	0.67	0.44	0.3	0.2	0.13
Tun. 3	3	1->3->6	1		1.000	0.333	0.111	0.037	0.012	0.004		0.1	0.105	0.105	0.099	0.088	0.074		1	0.67	0.44	0.3	0.2	0.13
Tun. 4	3	1->4->6	1		1.000	0.333	0.111	0.037	0.012	0.004		0.1	0.105	0.105	0.099	0.088	0.074		1	0.67	0.44	0.3	0.2	0.13
Tun. 5	3	1->5->6	1		1.000	0.333	0.111	0.037	0.012	0.004		0.1	0.105	0.105	0.099	0.088	0.074		1	0.67	0.44	0.3	0.2	0.13
Tun. 6	3	1->11->6	1		1.000	0.333	0.111	0.037	0.012	0.004		0.1	0.105	0.105	0.099	0.088	0.074		1	0.67	0.44	0.3	0.2	0.13
Tun. 7	4	1->5->2->6	1		1.000	0.250	0.063	0.016	0.004	0.001		0.1	0.079	0.059	0.042	0.028	0.018		1	0.5	0.25	0.13	0.06	0.03
Tun. 8	4	1->5->3->6	1		1.000	0.250	0.063	0.016	0.004	0.001		0.1	0.079	0.059	0.042	0.028	0.018		1	0.5	0.25	0.13	0.06	0.03
Tun. 9	4	1->5->4->6	1		1.000	0.250	0.063	0.016	0.004	0.001		0.1	0.079	0.059	0.042	0.028	0.018		1	0.5	0.25	0.13	0.06	0.03
Tun. 10	4	1->5->21->6	1		1.000	0.250	0.063	0.016	0.004	0.001		0.1	0.079	0.059	0.042	0.028	0.018		1	0.5	0.25	0.13	0.06	0.03
				Metric	10	3.17	1.06	0.37	0.14	0.06								Traffic	10	6.33	4.22	2.98	2.24	1.78

Druhá simulácia v tejto podkapitole predpokladá rovnakú topológiu, kde najkratšia linka 1-6 je mimo prevádzky, tj. najkratšia cesta Tunnel-ID 1 z predchádzajúceho prípadu neexistuje. ECMP mechanizmus dostal výhodu a umožňuje využiť až 5 nezávislých ciest. Maximálna teoretická prenosová kapacita CAMR bez záťaže je 9 jednotiek (sf=0) a minimálna prenosová kapacita 5.95 (sf=∞), znovu konvergujúca ku kapacite ECMP, v tomto prípade 5 jednotiek. To znamená, že sieť s pomocou CAMR je bez ohľadu na faktor stability a topológiu siete, schopná poskytnúť väčšiu teoretickú prenosovú kapacitu ako sieť využívajúca viacestné smerovanie pomocou SPF/ECMP.

Tabuľka 3, Smerovacia tabuľka 2: Rozdelenie prevádzky medzi cesty, medzi uzlami 1-6 pre rozdielne hodnoty sf, nefunkčná priama linka medzi uzlami 1-6

Tunnel ID	Tunnel Length [hops]	Hops	Tunnel capacity [x100 Gb/s]	Metric						Tunnel Traffic Proportion						Link Load equivalent [x100 Gb/s]								
				Sf	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5		
Tun. 1	2	1->6	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
Tun. 2	3	1->2->6	1		1	0.33	0.11	0.04	0.01	0		11%	14%	16%	17%	18%	19%		1	1	1	1	1	1
Tun. 3	3	1->3->6	1		1	0.33	0.11	0.04	0.01	0		11%	14%	16%	17%	18%	19%		1	1	1	1	1	1
Tun. 4	3	1->4->6	1		1	0.33	0.11	0.04	0.01	0		11%	14%	16%	17%	18%	19%		1	1	1	1	1	1
Tun. 5	3	1->5->6	1		1	0.33	0.11	0.04	0.01	0		11%	14%	16%	17%	18%	19%		1	1	1	1	1	1
Tun. 6	3	1->11->6	1		1	0.33	0.11	0.04	0.01	0		11%	14%	16%	17%	18%	19%		1	1	1	1	1	1
Tun. 7	5	1->7->2->15->6	1		1	0.2	0.04	0.01	0	0		11%	8%	6%	4%	2%	1%		1	0.6	0.36	0.22	0.13	0.08
Tun. 8	5	1->8->3->18->6	1		1	0.2	0.04	0.01	0	0		11%	8%	6%	4%	2%	1%		1	0.6	0.36	0.22	0.13	0.08
Tun. 9	5	1->9->4->20->6	1		1	0.2	0.04	0.01	0	0		11%	8%	6%	4%	2%	1%		1	0.6	0.36	0.22	0.13	0.08
Tun. 10	5	1->10->5->21->6	1		1	0.2	0.04	0.01	0	0		11%	8%	6%	4%	2%	1%		1	0.6	0.36	0.22	0.13	0.08
				Metric	9	2.47	0.72	0.22	0.07	0.02								Traffic	9	7.4	6.44	5.86	5.52	5.31

9.5 Zvýšenie prenosovej kapacity medzi uzlami chrbticovej siete, s variabilnou záťažou

Cieľom tejto podkapitoly je dokázať zvýšenie prenosovej kapacity siete pomocou CAMR v sieti s priemernou 40% záťažou. Počas simulácie je postupne zvyšovaná individuálne prevádzka určená z uzla R2:1 do uzla R2:6, až po hranicu pravidelného zahadzovania paketov pomocou CAMR.

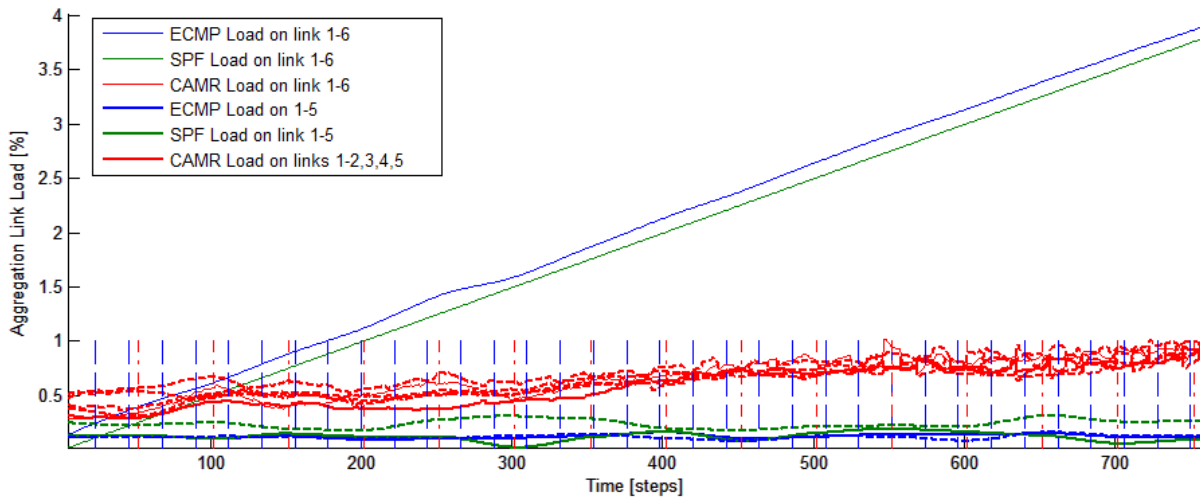
```

if x==1
  if y==6
    gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)=gen_flow_init_map_inert{u}(x,y)+u*0.005;
  end
end

```

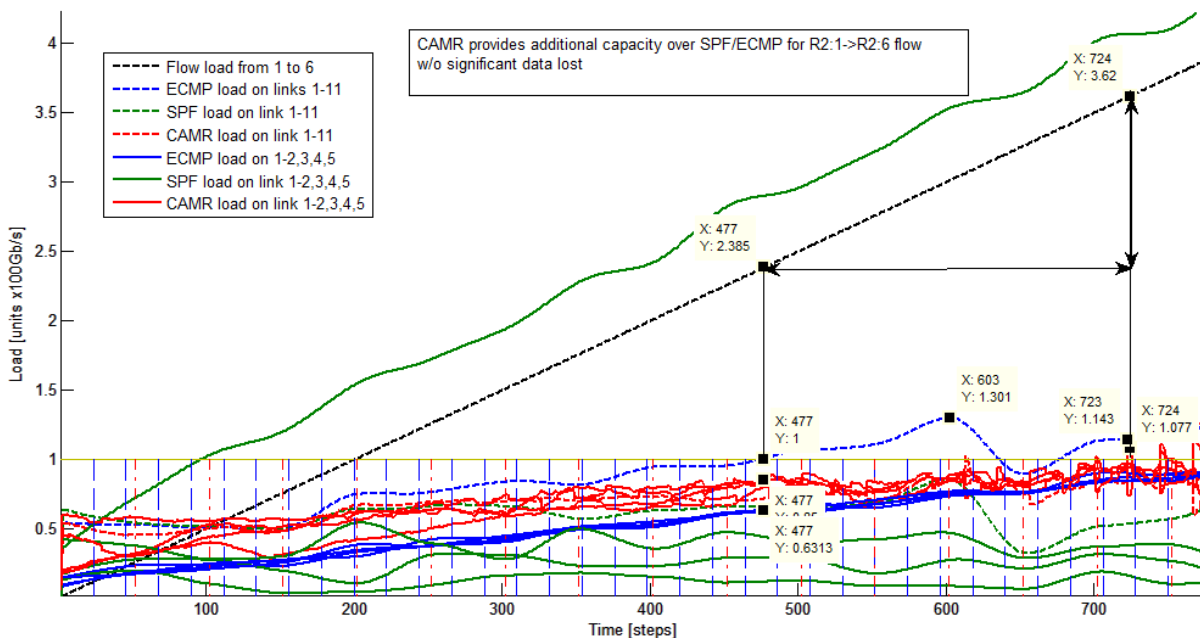
Ukážka 2, Vzťah medzi časom a zvýšením záťaže dátového toku 1-6 v čase u [kroky].

V prvom prípade (Obr. 10), rovnako ako v podkapitole 9.4, z dôvodu existencie priamej linky medzi R2:1 a R2:6 výkon SPF/ECMP zaostáva, nakoľko sieť nevie rozkladať záťaž medzi suboptimálne cesty. V kroku 175 sieť ECMP zahadzuje prenášané dáta. CAMR až za hranicou krokov 780.



Obr. 10, Zvýšenie prenosovej kapacity medzi uzlami R2:1 a R2:6

V druhom prípade (Obr. 11), znova zámerne vyradíme priamu linku 1-6 z prevádzky. V tomto prípade je umožnené ECMP sieti využívať cesty [1-2,3,4,5,11-6], tj. využiť vlastnosti rozloženia záťaže. ECMP sieť si nie je vedomá, že na linke 1-11, (Tunnel-ID 6, Tabuľka 3), je prenášaná prevádzka určená pre agregáčny uzol 11. Nevhodné smerovanie SFP/ECMP tak spôsobuje stratu dát od kroku 477. CAMR pravidelným sledovaním záťaže je schopný prenášať medzi uzlami R2:1 a R2:6 dáta, bez ohrozenia služieb na agregáčnych a taktiež chrbticových linkách až po krok 724. Znova je využitá vlastnosť CAMR rozkladania záťaže na nevyužité kapacity siete. Simulácia v tejto podkapitole dokazuje podstatné zvýšenie kapacity siete pre prenos objemných dátových tokov s záťažou pre chrbticové siete a zároveň zamedzuje zahmleniu v agregácii.



Obr. 11, Zvýšenie prenosovej kapacity medzi uzlami R2:1 a R2:6, priama linka 1-6 mimo prevádzky

9.6 Faktor Stability s_f : Stabilita vs Priepustnosť: Chrbticová sieť

Faktor potlačenia a stability, je podstatným prvkom smerovania podľa CAMR. Pri hodnote $s_f=0$, všetky cesty majú metriku, nezávislú od dĺžky. Pri veľmi vysokom $s_f \rightarrow 20$, je uprednostňovaná iba

najkratšia prípadne najkratšie cesty. V tejto simulácii pri identickej prevádzke skúmaný vplyv zaťaženia liniek od $s_f = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 20]$. V sérií simulácií bol testovaný aj parameter $s_f=100$, avšak výsledky boli takmer identické s $s_f=20$.

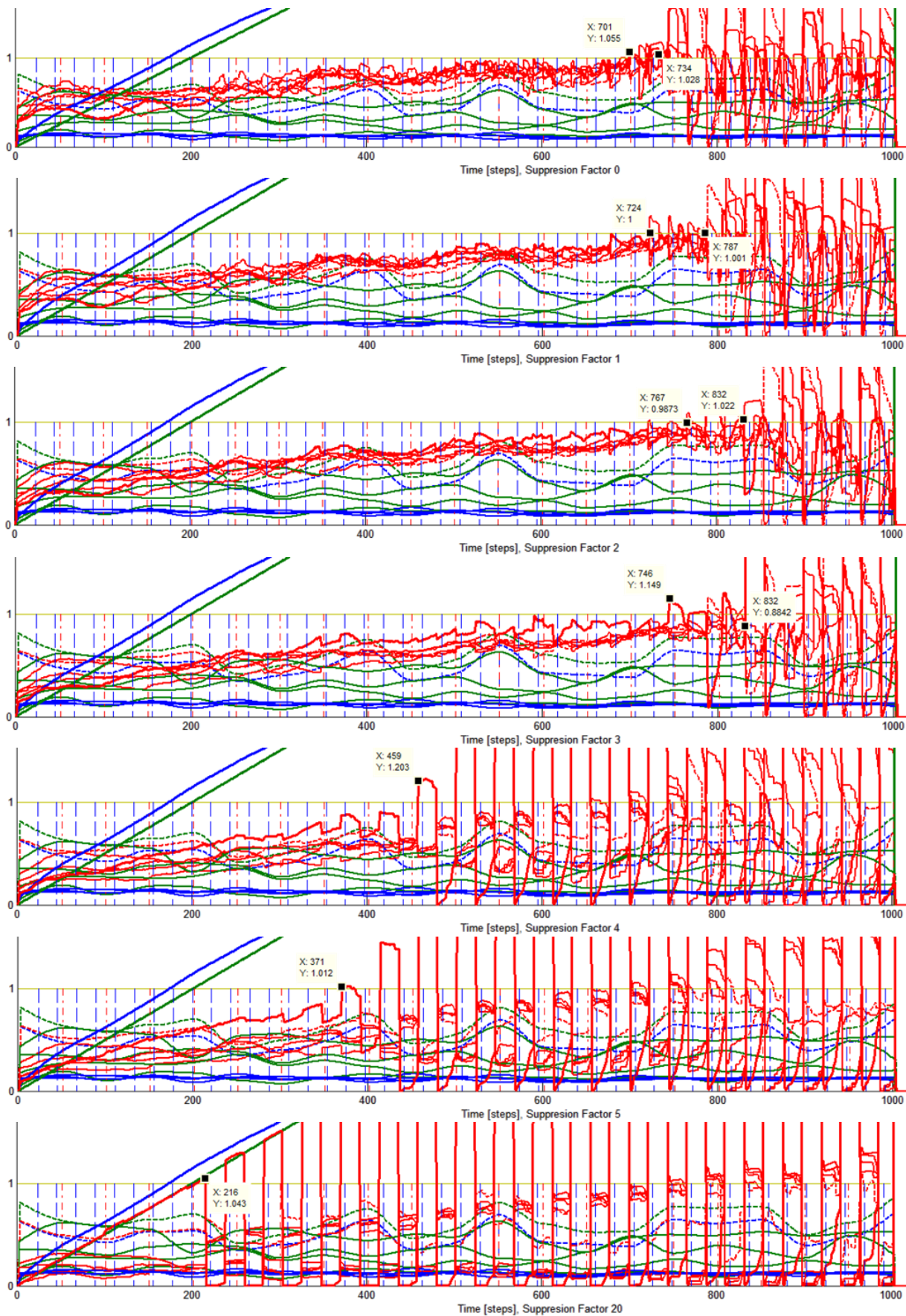
Predpokladajme sieť s postupným nárastom prevádzky medzi chrbticovými uzlami R2:1 a R2:6. Čas je preto priamo úmerný zvyšovaniu zaťaženiu medzi spomenutými uzlami. Na grafe (Obr. 12) je uvedený stav liniek R2:1 \rightarrow 2/3/4/5/6. Prevádzka je smerovaná pomocou CAMR – červená, cez hlavné cesty zobrazené linky v grafe, tj. cesty dĺžky 2 a 3 skoky.

Je možné pozorovať, že parameter s_f treba dynamicky prispôbovať z hľadiska optimálneho využitia siete. Pri nízkych hodnotách s_f (v práci zámerné označený aj jako faktor potlačenia - Suppression Factor) je pravdepodobnosť zahĺtenia chrbticových dlhých ciest vysoká, čo spôsobí nižšiu kapacitu siete, preukázateľnú na nižších časoch, kedy nastanú prvé zahodenia dát T1 a časoch destabilizácie siete T2.

Pri vysokých hodnotách $s_f > 20$, vedľajšie suboptimálne cesty sú úplne neobsadené prevádzkou, pokiaľ primárna cesta nie je úplne zahĺtená. Keď najkratšia cesta je úplne zahĺtená všetky dáta sa preklapia na cesty dĺžky $d+1$. Dáta postupne uvoľnia najkratšiu cestu a algoritmus v momente najbližšieho prerátania ciest znovu vráti všetky dáta na najkratšiu cestu. Tento nežiaduci jav preklápania sa opakuje, a sieť je nestabilná pokiaľ celková prevádzka bude väčšia ako kapacita najkratších ciest medzi uzlami.

Tabuľka 4, Závislosť momentu stratovosti T1 a destabilizácie T2 od faktoru stability

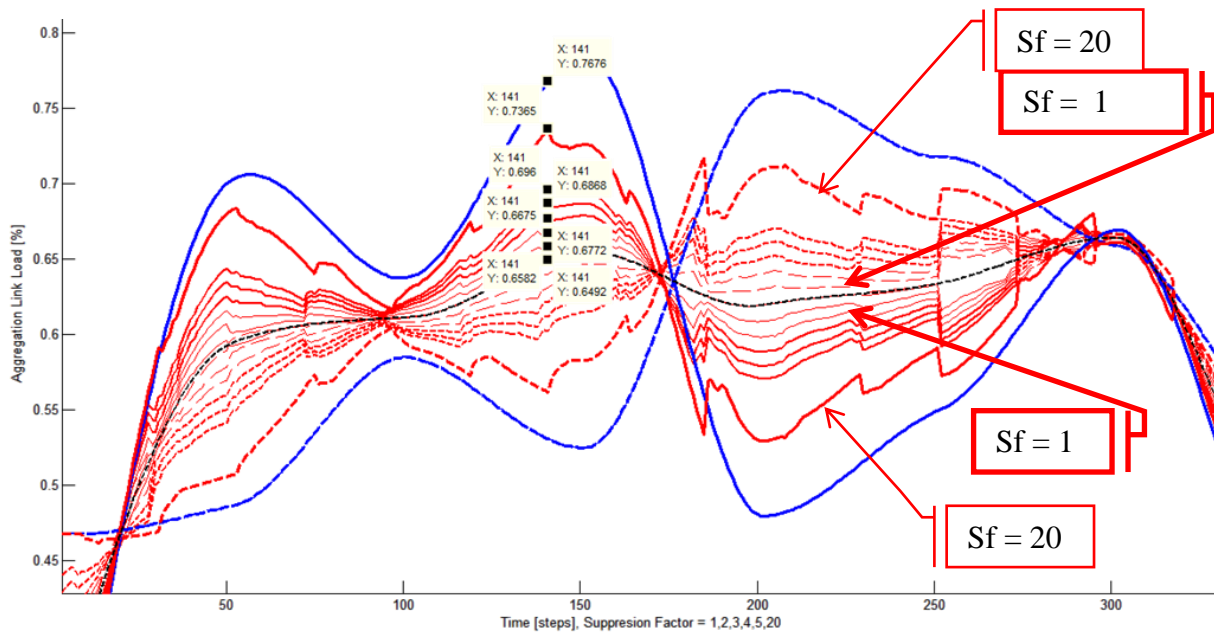
Sf	T1 [krok]	T2 [krok]
0	701	735
1	724	787
2	787	832
3	746	832
4	459	787
5	371	371
20	216	216



Obr. 12, Závislosť momentu stratovosti T1 a destabilizácie T2 od faktoru stability Sf=1->20

9.7 Faktor Stability s_f : Stabilita vs Priepustnosť: Prístupová sieť

Nasledovná simulácia má za úlohu poukázať na vplyv s_f na rozdelenie prevádzky medzi uplink linky R1toR2a a R1toR2b. Čím je s_f nižší tým sa stav liniek približuje bližšie k optimálnemu stavu. Faktor stability hrá podstatnú úlohu pri rozložení záťaže, nakoľko jeho nízka hodnota dáva vyššiu vôľu v prerozdelení dát na jednotlivé cesty. Vysoká hodnota obmedzuje výber a prerozdelenie dát medzi cesty. Rozloženie záťaže (Tabuľka 5) je efektívnejšie pri CAMR na úrovni 2% prenášanej prevádzky oproti 19% s metódou SPF/ECMP.



Obr. 13, Závislosť optimálneho rozloženia od s_f ; ECMP-modrá, CAMR-červená, $S_f=1$ (tenká),2,3,4,5,20(hrubá), linka: R1->R2a plná, R1->R2b prerušovaná čiara

Tabuľka 5, Porovnanie strednej odchýlky záťaže uplink liniek pri rôznych hodnotách s_f .

Parameter:	CAMR							ECMP
Faktor Stability	0	1	2	3	4	5	20	N/A
Str. Odchýlka [Gb/s]	1.28	1.87	2.49	3.15	3.88	4.59	7.65	10.54
Str. Odchýlka [%]	2%	3%	5%	6%	7%	8%	14%	19%

10 Záver a prínosy dizertačnej práce

Ciele práce boli sformulované s ohľadom na niektoré problémy, ktoré sú vo väčšinou spoločné s existujúcimi metódami smerovania. Jedná sa o efektívne využitie sieťových prostriedkov v reálnom čase, časovú náročnosť, stabilitu algoritmu a celkového systému, zvýšenie priepustnosti a zároveň využitie maximálnych možností existujúcich štandardizovaných prenosových systémov pomocou minimálneho zásahu do architektúry smerovacieho zariadenia a pod.

Hlavné prínosy a výstupy súvisiace s výsledkami dizertačnej práce sú nasledovné:

1. Bol navrhnutý detailný matematicko-algoritmický model novej metódy viaccestného smerovania s ohľadom na zahltenie sieťových prostriedkov, vhodný pre súčasné a budúce generácie telekomunikačných sietí – CAMR.
2. Bola navrhnutá dynamická a zároveň kombinovaná metrika pre výber najkratších ciest s cieľom maximalizácie priepustnosti, rozloženia záťaže, udržania stability a efektívneho využitia prostriedkov v sieti. Metrika je závislá od dostupnej priepustnosti cesty, dĺžky cesty a miery stability v sieti.
3. Bol definovaný a analyzovaný exponenciálny faktor kompenzácie vysokej priepustnosti cesty, pre prerozdelenie dát do dostupných ciest
4. Bol definovaný a analyzovaný faktor stability na riadenie stability, pre dynamické riadenie prerozdelenia dát na dostupné cesty podľa pomeru dĺžky
5. Boli navrhnuté nové parametre viaccestného smerovania s ohľadom na zníženie času výpočtu potrebných ciest modifikáciou algoritmu Edmonds-Karp a Breadth-first search, pomocou:
 - definície maximálneho počtu vyhľadávaných ciest so splnenou podmienkou dosiahnuteľnej priepustnosti
 - ohraničenia efektívnej dĺžky relevantných ciest pre smerovanie. Relevantná dĺžka je závislá od parametru a dĺžky najkratšej nájdennej cesty
6. Boli navrhnuté spôsoby implementácie novej metódy pomocou paralelného využitia existujúcej infraštruktúry sietí a novej metódy, bez potreby dodatočnej integrácie signalizácie ciest zdrojového smerovania. Zvlášť bolo navrhnuté riešenie spolu s popisom výhod a limitácii jednotlivých implementácii pre siete typu:
 - Smerované siete IPv4,
 - Smerované siete IPv6,
 - Prepínané siete MPLS segmentového smerovania.
7. Boli analyzované vlastnosti navrhnutého viaccestného smerovania CAMR s ohľadom na:
 - zahltenie,
 - stabilitu siete,
 - rozloženie záťaže,
 - zvýšenie maximálnej priepustnosti medzi uzlami, nezávislé na polohe v topológii.
8. Bol zostrojený parametrický generátor siete pre generovanie siete typu TeraStream a modifikovanej topológie TeraStream s kruhovou topológiou
9. Bol zostrojený simulátor na úrovni dátových prúdov pre časovo diskretnú simuláciu smerovania pomocou CAMR, SPF, ECMP princípov
10. Boli dokázané simuláciou lepšie vlastnosti CAMR oproti smerovaniu SPF a SPF s metódou ECMP dosiahnutím:
 - vyššej maximálnej prenosovej rýchlosti medzi chrbticovými uzlami v sieti s vysokou hustotou.
 - vyššej maximálnej prenosovej rýchlosti medzi agregáčnymi uzlami v sieti s dvomi uplink linkami, tj. pre prípady siete s nízkou hustotou liniek.
 - lepšieho vyváženia liniek pri postupne zvyšovanej záťaži generovanej v chrbticovej sieti. Nadmerná záťaž pri CAMR smerovaní efektívne využívala dostupné cesty rôznej dĺžky a voľné kapacity liniek až po maximálnu úroveň nasýtenia siete. Zabránila tak predčasnému zahlteniu liniek a zahodeniu dát pri vyšších úrovniach záťaže oproti porovnávaným metódam.

- lepšieho vyváženia liniek pri postupne zvyšovanej záťaži generovanej v agregácii. Ciele, ktoré nemajú dostupné najkratšie cesty cez všetky linky, spôsobujú pri porovnávaných smerovaniach nevyváženosť zaťaženia liniek. CAMR konverguje k vyváženosti agregáčnych liniek rovnovážnemu stavu. Výsledok umožňuje lepšie plánovanie kapacít liniek agregáčnych sietí.
11. Bola dokázaná simuláciou vzájomná závislosť faktoru stability na maximálnu priepustnosť a stabilitu siete.
 12. Bola dokázaná simuláciou stabilita siete smerovanou pomocou CAMR pri nárazovom náraste dát z nulového zaťaženia uzla, pri nárazovom náraste prevádzky v zaťaženom stave uzla, pri postupne zvyšovanom náraste prevádzky, pri náhodne generovanej prevádzke.

Z hlavných prínosov a získaných poznatkov predkladanej práce vyplývajú niektoré závery pre ich využitie:

1. Navrhnutý algoritmus je vhodný pre nasadenie pre siete, kde existuje viac ciest pre dosiahnutie cieľa. Jedná sa o väčšinu telekomunikačných sietí, kde v celkovej sieti sa nachádza aspoň v jednej lokalite topológia mriežky, kruhu, podkovy, prípadne redundantné pripojenie na L2,5, prípadne L3 vrstve RM OSI. Pri ostatných sieťach, bez existencie viacerých ciest pre cieľ tj. stromová prípadne lineárna topológia CAMR poskytuje smerovanie, avšak nevykazuje vyšší výkon ako iné metódy.
2. Navrhnutá metóda smerovania je aplikovateľná paralelne s existujúcou sieťou založenou na smerovanie segmentov Segment Routing – MPLS a zároveň využívajúc existujúce mechanizmy ochrany voči výpadku linky, prípadne uzla FRR.
3. Navrhnutá metóda smerovania je aplikovateľná paralelne s existujúcou sieťou IPv4 a IPv6 a zároveň využívajúc existujúce mechanizmy zdrojového smerovania a ochrany voči výpadku linky, prípadne uzla IP FRR LFA.
4. Zvýšenú výhodu CAMR oproti porovnaným v práci metódam je možné v sieti získať vhodnou dynamickou úpravou stabilizačného faktoru.

11 Zoznam použitej literatúry

- [1] ITU-T, "ITU-T Y.2001, General overview of NGN, Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models," ITU-T, 2005.
- [2] R. Baumann and S. Heimlicher, "A Survey on Routing Metrics," 10 2 2007. [Online]. Available: <http://rainer.baumann.info/public/tik262.pdf>. [Accessed 21 12 2013].
- [3] A. R. Mahlous, *Multipath Routing Using Max Flow Algorithms For Internet Traffic*, Lambert Academic, 2011, p. 188.
- [4] F. Kelly, "Fairness and stability of end-to-end congestion," Centre for Mathematical Sciences, University of Cambridge, 2003. [Online]. Available: <http://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/PAPERS/fse2ecc.pdf>. [Accessed 2014 05 12].
- [5] I. Gojmerac, *Adaptive Multi-Path Routing for Internet Traffic Engineering*, Wien: Technischen Universität Wien, 2007.
- [6] Deering, S; Hinden, R., *Internet Protocol, Version 6 (IPv6)*, IETF, 1998.
- [7] A. Ebalard, "IPv6 Type 0 – Routing Header," *IETF Journal*, October 2007.
- [8] Cisco, "Cisco Nexus 7000 Series NX-OS Unicast Routing Configuration Guide," 20 7 2011. [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/datacenter/sw/5_x/nx-os/unicast/configuration/guide/I3_cli_nxos/I3_ipv6.html. [Accessed 12 11 2014].
- [9] G. Huston, "The ISP Column: An occasional column on things Internet," 5 2007. [Online]. Available: <http://www.potaroo.net/ispcol/2007-05/6pong.pdf>. [Accessed 12 2 2015].
- [10] C. Filstils, S. Previdi, A. Bashandy and e. al., "Segment Routing Architecture," 5 5 2015. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-spring-segment-routing-02>. [Accessed 10 5 2015].

- [11] E. Crabbe, C. Filsfils, J. Medved and S. Sivabalan, "PCEP Extensions for Segment Routing," 22 April 2015. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-pce-segment-routing-03>. [Accessed 5 5 2015].
- [12] J. E. a. R. M. Karp, "Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network problems," *J. Assoc. Comput. Mach.*, 1972.
- [13] J. M. Friis and S. B. Olesen, "An experimental comparison of max flow algorithms," 23 2 2014. [Online]. Available: http://www.cs.au.dk/~gerth/advising/thesis/jakob_mark_friis_steffen_beier_olesen.pdf. [Accessed 12 10 2014].
- [14] A. J. Afilias, P. Savola and G. Neville-Neil, "RFC 5095:RFC 5095 PROPOSED STANDARD: Deprecation of Type 0 Routing Headers in IPv6," 2007.
- [15] K. N. Shigang Chen, "An Overview of Quality of Service Routing for the Next-Generation High Speed Networks: Problems and solutions," Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, [Online]. Available: <http://www.cise.ufl.edu/~sgchen/papers/QoSRoutingSurvey99.pdf>. [Accessed 2 11 2013].
- [16] U. V. Vazirani, "NP-complete problems," Computer Science Division, University of California at Berkeley , 3 10 2006. [Online]. Available: <http://www.cs.berkeley.edu/~vazirani/algorithms/chap8.pdf>. [Accessed 2 11 2013].
- [17] R. B. Al-Mukaddim Khan Pathan, "Grid Computing and Distributed Systems (GRIDS) Laboratory," Department of Computer Science and Software Engineering, University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia , [Online]. Available: <http://www.cloudbus.org/reports/CDN-Taxonomy.pdf>. [Accessed 11 12 2013].
- [18] V. Z. I. S. Nikolaos Laoutaris, "Joint Object Placement and Node Dimensioning for Internet Content Distribution," National and Kapodistrian University of Athens, Dept. of Informatics and Telecommunications, Panepistimiopolis, Ilissia, Athens , [Online]. Available: <http://cgi.di.uoa.gr/~laoutar/ipl.pdf>. [Accessed 10 12 2013].
- [19] G. Hardin, *Science Magazine*, 13 12 1968. [Online]. Available: <http://www.sciencemag.org/content/162/3859/1243.full>. [Accessed 3 10 2013].
- [20] S. B. & L. Vandenberghe, Cambridge University Press, 15 7 2013. [Online]. Available: http://www.stanford.edu/~boyd/cvxbook/bv_cvxbook.pdf. [Accessed 20 12 2013].
- [21] R. C. Robinson, Department of Mathematics, Northwestern University, 7 2006. [Online]. Available: <http://www.math.northwestern.edu/~clark/285/2006-07/handouts/lagrange-econ.pdf>. [Accessed 5 12 2013].
- [22] U. Acar, "Shortest Weighted Paths, Parallel and Sequential Data Structures and Algorithms," 21 2 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15210-s13/www/lectures/lecture12.pdf>. [Accessed 17 12 2013].
- [23] R. T. Ramalingam G, "An incremental algorithm for a generalization of the shortestpath," 1992. [Online]. Available: <http://research.cs.wisc.edu/wpis/papers/jalg96.pdf>. [Accessed 20 12 2013].
- [24] S. K.-Y. T. H.-Y. Narvaez P, Fault-tolerant routing in the Internet without flooding, *Dependable Network Computing*, 2000.
- [25] B. Briscoe, "'Flow rate fairness: dismantling a religion,'" *SIGCOMM Comput.*, 2007. [Online]. Available: <http://www.sigcomm.org/sites/default/files/ccr/papers/2007/April/1232919-1232926.pdf>. [Accessed 20 12 2013].
- [26] Z. W. a. J. Crowcroft, "QoS Routing for Supporting Resource Reservation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communiactions*, 1996.
- [27] S. C. a. K. Nahrstedt, "On Finding Multi-Constrained Paths," *IEEE ICC'98*, 1998.
- [28] Q. S. a. H. Langendorfer, "A New Distributed Routing Algorithm with End-to-End Delay Guarantee.," 1997.
- [29] F. Kelly, "Charging and rate control for elastic traffic," *European Trans- actions on*

Telecommunications, 1997.

- [30] P. Key, "Resource pricing for differentiated services," *Kommunikation in Verteilten Systemen*, 2001.
- [31] F. P. J. D. S. Low, "Internet congestion control," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 8, 19, 22, 2002.
- [32] U. Acar, "Parallel and Sequential Data Structures and Algorithms," 14 2 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15210-s13/www/lectures/lecture10.pdf>. [Accessed 12 10 2013].
- [33] M. Reid-Miller, "DFS: Depth-First Search, Parallel and Sequential Data Structures and Algorithms," 19 2 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15210-s13/www/lectures/lecture11>. [Accessed 10 12 2013].
- [34] NQLogic, "Broadband Goes Mobile," 2010. [Online]. Available: <http://www.nqlogic.com/2010/04/broadband-goes-mobile.html>. [Accessed 13 12 2013].
- [35] P. Lapukhov, "Scaling MPLS Networks," 16 08 2010. [Online]. Available: <http://blog.ine.com/2010/08/16/scaling-mpls-networks/>. [Accessed 18 12 2013].
- [36] Cisco, "Label Switched Multicast (LSM) Multicast Label Distribution Protocol (MLDP) based Multicast VPN," 12 2010. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/en/US/docs/routers/7600/ios/15S/configuration/guide/lsmml dp.pdf>. [Accessed 19 12 2013].
- [37] M. Kaufmann, "Network Routing Algorithms Protocols and Architectures," 02 2007. [Online]. [Accessed 19 12 2013].
- [38] D. Eppstein, "Finding the k shortest paths," *SIAM Journal on Computing, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, PA, USA*, 1999.
- [39] S. N. S. Kini, "MPLS Fast Re-route using extensions to LDP," IETF, MPLS Working Group, 2012. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-kini-mpls-frr-ldp-01>. [Accessed 20 12 2013].
- [40] IEEE Communications Society, "1903-2011 - IEEE Standard for the Functional Architecture of Next Generation Service Overlay Networks," IEEE, 2011.
- [41] ITU-T, "ITU-T Y.2201, Next Generation Networks – Service aspects: Service capabilities and service architecture," ITU-T, 2010.
- [42] IEEE, "IEEE Std. 1903 - 2011, IEEE Standard for the Functional Architecture of Next Generation Service Overlay Networks," IEEE, 2011.
- [43] U. Zwick, "Lecture Notes in Computer Science (LNCS2161)," in *Exact and approximate distances in graphs—a survey*, Berlin, Springer-Verlag, 2001.
- [44] M. I. o. T. MIT, "Introduction to Algorithms: Bellman-Ford," 2010. [Online]. Available: <http://courses.csail.mit.edu/6.006/fall10/handouts/recitation10-29.pdf>. [Accessed 19 12 2013].
- [45] G. Warnock and A. Nathoo, *Alcatel-Lucent Network Routing Specialist II (NRS II) Self-Study Guide*, Wiley, 2011.
- [46] X. Shen, H. Yu, J. Buford and M. Akon, 2010. [Online]. Available: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-0-387-09751-0>. [Accessed 11 10 2013].
- [47] Cisco, "MPLS Point-to-Multipoint Traffic Engineering," 2010. [Online]. Available: http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/mpls/configuration/guide/mp_te_p2mp.html. [Accessed 19 12 2013].
- [48] A. Maulloo and D. .. Tan, University of Cambridge, UK, 1997. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.65.3506&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed 10 12 2013].
- [49] HUST, "PPTV.com, People's Republic of China," 12 12 2013. [Online]. Available:

www.pptv.com. [Cit. 19 12 2013].

- [50] K. Walkowiak, *7th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks*, 2009.
- [51] Intel, "Intel® C++ Compiler 12.1 User and Reference Guides: Work and Span," 2011. [Online]. Available: http://software.intel.com/sites/products/documentation/studio/composer/en-us/2011Update/compiler_c/cref_cls/common/cilk_work_span.htm. [Accessed 20 12 2013].
- [52] C. Mung, H. L. Steven, A. R. Calderbank and J. C. Doyle, January 2007. [Online]. Available: <http://www.princeton.edu/~chiangm/layering.pdf>. [Accessed 3 12 2013].
- [53] D. Ferrari and D. C. Verma, "A Scheme for Real-Time Channel Establishment in Wide-Area Networks," 1990.
- [54] J. Wu, F. Dai, X. Lin and al, "An extended fault-tolerant link-state routing protocol in the Internet. *IEEE Trans Comput*," 2003. [Online]. [Accessed 5 12 2013].
- [55] Carnegie Mellon University, "Shortest Weighted Paths II, Parallel and Sequential Data Structures and Algorithms," 26 2 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15210-s13/www/lectures/lecture13.pdf>. [Accessed 19 12 2013].
- [56] M. Chiang, S. H. Low, , A. R. Calderbank and , J. C. Doyle, 1 2007. [Online]. Available: <http://www.princeton.edu/~chiangm/layering.pdf>. [Accessed 12 10 2013].
- [57] K. Rajendra, W. C. Dah-Ming and W. R. Hawe, Eastern Research Lab, Digital Equipment Corporation, Hudson, 26 9 1984. [Online]. Available: <http://www1.cse.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf>. [Accessed 13 10 2013].
- [58] J. Deng, S. Yunghsiang and H. Liang, Dept. of Computer Science, University of North Carolina at Greensboro, Greensboro, NC, USA, 2009. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.160.550&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed 1 12 2013].
- [59] L. Wang and V. P. L. Pai, "The effectiveness of request redirection on cdn robustness, *SIGOPS Operating Systems Review* 36," 2002. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/844128.844160>. [Accessed 20 12 2013].
- [60] J. Leblet, P. Michiardi and S. Gwendal, Institut Eurecom, Department of Corporate Communications, FRANCE, 2013. [Online]. Available: <http://www.eurecom.fr/fr/publication/2425/download/ce-michpi-080225.pdf>. [Accessed 10 12 2013].
- [61] I. Cidon, R. Rom and Y. Shavitt, "Multi-Path Routing Combined with Resource Reservation," *IEEE INFOCOM*, 1997.
- [62] H. F. Salama, D. S. Reeves and Y. Viniotis, "Distributed Algorithm for Delay-Constrained Unicast Routing.," *IEEE INFOCOM'97*, 1997.
- [63] K. L. Eng, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma and S. Lim, "A Survey and Comparison of Peer-to-Peer Overlay Network Schemes," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEY AND TUTORIAL*, 2 3 2004. [Online]. Available: <http://www.cl.cam.ac.uk/teaching/0506/AdvSysTop/survey.pdf>. [Accessed 5 11 2013].
- [64] L. Zhang, S. Deering, D. Estrin, S. Shenker and D. Zappala, "RSVP: A New Resource ReSerVation Protocol.," 1993.
- [65] R. Guerin and A. Orda, "QoS-based Routing in Networks with Inaccurate Information: Theory and Algorithms.," *IEEE INFOCOM'97*, 1997.
- [66] C.-C. Chou and K. G. Shin, "A Distributed Route-Selection Scheme for Establishing Real-Time Channels," *Sixth IFIP Int'l Conf. on High Performance Networking Conf.*
- [67] Alcatel-Lucent, "7950 Extensible Routing System," Alcatel-Lucent, 12 2013. [Online]. Available: http://www3.alcatel-lucent.com/wps/portal/!ut/p/kcxml/04_Sj9SPykssy0xPLMnMz0vM0Y_QjzKLd4w3MfQFSYG

YRq6m-pEoYgbxjgiRIH1vfV-
P_NxU_QD9gtzQiHJHR0UAAAD_zXg!!/delta/base64xml/L0lJayEvUUd3QndJQSEvNElVRkN
BISEvNI9BXzNBRC9l93dw!!?LMSG_CABINET=Solution_Product_Catal. [Accessed 23 12
2013].

- [68] Sandvine Incorporated, "Global Internet Phenomena Report," Sandvine Incorporated ULC, 08 11 2013. [Online]. Available: <https://www.sandvine.com/downloads/general/global-internet-phenomena/2013/2h-2013-global-internet-phenomena-report.pdf>. [Accessed 20 12 2013].
- [69] U. Acar, "Graphs Introduction," 12 2 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15210-s13/www/lectures/lecture09.pdf>.
- [70] J. Xing, W.-C. Wong, S.-H. G. Chan and H.-L. Ngan, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.3413&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed 3 11 2013].
- [71] S. C. a. K. Nahrstedt, "Distributed Quality-of-Service Routing in High-Speed Networks Based on Selective Probing.," Technical Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Computer Science., Illinois, 1998.
- [72] J. Hershberger, M. Maxely and S. Suriz, "Finding the k Shortest Simple Paths: A New Algorithm and its Implementation," 2007. [Online]. Available: <http://www.siam.org/meetings/alnex03/Abstracts/jhershberger.pdf>. [Accessed 19 12 2013].
- [73] P. Pragyansmita and S. V. Raghavan, "Survey of QoS Routing," in *Proc. of the 15th Intl Conference on Computer Communication*, 2002.
- [74] Q. Ma and P. Steenkiste, "Quality-of-Service Routing with Quality-of-Service Routing with Performance Guarantees," *5th International IFIP Workshop on Quality of Service*, 1997.
- [75] Cisco, Cisco, 2010. [Online]. Available: http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0s/feature/guide/TE_1208S.html. [Accessed 3 9 2013].
- [76] Tellabs, "From ATM to IP/Ethernet: Three Strategies for Cost-Effective Network Convergence," 2010. [Online]. Available: http://www.tellabs.com/resources/papers/tlab8800msr_atmmigration_wp.pdf. [Accessed 10 12 2013].
- [77] Tellabs, "From ATM to IP/Ethernet: Three Strategies for Cost-Effective Network Convergence," 2010. [Online]. Available: http://www.tellabs.com/resources/papers/tlab8800msr_atmmigration_wp.pdf. [Accessed 12 12 2013].
- [78] F. Kelly, A. Maulloo and D. Tan, "Rate control in communication networks," 1998.
- [79] H. Xin, "Introduction of Centralized and Distributed Routing," *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, pp. 2698 - 2701, September 2011.

12 Účast' autora na výskumných projektoch

1. Projekt VEGA No. 1/0106/11 – Analýza a návrh pokročilých optických prístupových sietí v konvergovanej infraštruktúre NGN využívajúcich pevné prenosové médiá pre podporu multimediálnych služieb, Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, 2011 – 2013.
2. Projekt ITMS 26240120029, OPVaV - 2008/4.1/02–SORO - Operating program research and development. Center of excellence – SMART technologies, networks and Services II. (IMS Platform for NGN). Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2010 – 2013

3. Projekt APVV-0696-12 Výskum koexistencie širokopásmových sietí LTE a pozemského digitálneho TV vysielania DVB-T/DVB-T2 Výskumný ústav spojov, n.o. 2012 – prebieha

13 Publikácie autora

- [P1] KULTAN, Matej [34 %] - MEDVECKÝ, Martin [33 %] - ORGOŇ, Miloš [33 %] Secure wireless communication in a shopping city. In *Internet Technologies and Applications Research*. Vol. 2, No. 1 (2014), s. 16-22. ISSN 2329-9398.
- [P2] KULTAN, Matej [50%] - LAPIN, Ivan [50%] Performance evaluation of wireless attendance system based on a bluetooth connection. In *Učenyje zapiski Instituta social'nych i gumanitnych znaniy*. No. 1 (2014), s. 253-259. ISSN 2078-6980.
- [P3] KULTAN, Matej [50%] - MEDVECKÝ, Martin [50%]. CAMR - Congestion Aware Multipath Routing. In *RTT 2014. Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : 16th International Conference RTT 2014; Frymburk, Czech Republic; 10-12 Sept. 2014. Prague : Czech Technical University in Prague, 2014, s. 24-28. ISBN 978-80-01-05540-3.*
- [P4] KULTAN, Matej [100%] – Možnosti rozvoja informačného system v doprave In *Prilezitosti mlade generace v oblasti vedy, vyskumu a inovacii, III. Mezinarodni vedecka studentska conference, 4. Jan., 2009 Kroměříž, Česká Republika: Evropský polytechnický institut, 2009, s. 165-168 ISBN 978-80-7314-172-1*
- [P5] KULTAN, Matej [50 %] - MEDVECKÝ, Martin [50 %] Congestion Aware Multipath Routing: Stability factor performance impact analysis. In *Interdisciplinary Scientific Conference for PhD students and assistants QUAERE 2015, Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 5. vyd. 2015. ISBN 978-80-87952-10-8*
- [P6] KULTAN, Matej [50%] - MEDVECKÝ, Martin [50%]. Congestion Aware Multipath Routing: Aggregation network applicability and IPv6 implementation. In *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS) ISSN: 2074-9007 (Print), ISSN: 2074-9015 (Online) (2015)*
- [P7] KULTAN, Jaroslav [34%] - KULTAN, Matej [33%] - JANÍČEK, František [33%]. Smart small renewable energy sources and their impact on Safety nets, ITMS. In *Zvyšovanie energetickej bezpečnosti Slovenskej republiky 2013 : zborník z vedeckej konferencie. Modra-Harmónia, Slovenská republika, 28.11.2013. 1.vyd. Trnava : VUJE, 2013, s.33-36. ISBN 978-80-89402-66-3.*
- [P8] KULTAN, Jaroslav [50%] - KULTAN, Matej [50%]. Smart spotrebiče a ich úloha pri využívaní obnoviteľných zdrojov energie. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : konferencia ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013. Roč. 19, mimoriadne č (2013), s.158-161. ISSN 1335-2547.*
- [P9] KULTAN, Jaroslav [50%] - KULTAN, Matej [50]. Computer networks new generation in the use of RES. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 123-128. ISBN 978-80-89402-69-4.*
- [P10] KULTAN, Matej [50 %] - MEDVECKÝ, Martin [50 %]. Comparision of Positioning Methods and Systems and Proposition of Ultrasound Positioning System for Precise Applications. In *RTT 2013. Workshop popri konferencii Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : Proceedings; Senec, Slovak Republic, September 11-13, 2013. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD ROM, p. 13-24. ISBN 978-80-227-4025-8.*
- [P11] LAPIN, Ivan [50 %] - KULTAN, Matej [50 %]. BlueRadar: Wireless attendance system for educational purposes based on a bluetooth sensing. In *Inovačný proces v elearningu 2014 : recenzovaný zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie. Bratislava, 20. marec 2014. Bratislava : Vydavateľstvo Ekonóm, 2014, CD-ROM, [7] p. ISBN 978-80-225-3840-4.*