VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PŘENOS MULTIMÉDIÍ V MPLS SÍTI

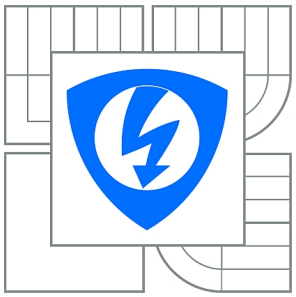
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LUKÁŠ VLČEK
AUTHOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PŘENOS MULTIMÉDIÍ V MPLS SÍTI

MULTIMEDIA TRANSMISSION IN MPLS NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

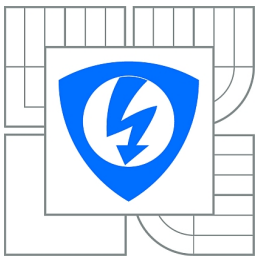
AUTOR PRÁCE — LUKÁŠ VLČEK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MICHAL POLÍVKA

SUPERVISOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student:	Lukáš Vlček	***ID:***	120576
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Přenos multimédií v MPLS síti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou směrování provozu v IP/MPLS síti. Pojednejte o problematice směrování a řízení provozu na transportních sítích. Nakonfigurujte experimentální síť tvořenou cca 9 směrovači Cisco, doplněnou o zdroje audio, video, http a ftp provozu. Vytvořenou síť nakonfigurujte tak, aby různé typy provozu procházely různými trasami. Různé trasy budou představovat různou kvalitu transportní sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Odom, WENDELL, Healy, RUS a Mehta, NAREN. Směrování a přepínání sítí - Autorizovaný výukový průvodce. Brno : Computer Press, a.s.; Cisco System, Inc., 2009. ISBN: 978-80-251-2520-5.
[2] DOSTÁLEK, Libor, KABELOVÁ, Alena. Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS. 3. vyd. Praha: Computer Press, 2002. 542 s. ISBN 80-7226-675-6.
[3] HICKS, Michael. Cisco - Optimalizace aplikací. Praha : Grada Publishing a.s., 2008. ISBN 978-80-247-1610-7.

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Michal Polívka

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

ABSTRAKT

Práca uvádza prednostné črty MPLS technológie voči ostatným prenosovým WAN mechanizmom, poukazuje na jej výhody. V ďalšej časti práce je opísaný princíp smerovania a prepínania v MPLS s dôrazom na porovnávanie s IP sieťou. Nasledujúca sekcia práce sa zameriava na problematiku riadenie a smerovania premávky, jej metódy a praktiky. Naväzujúca časť opisuje možnosti riadenia premávky v MPLS. Posledná časť práce opisuje návrh, impementáciu a riadenie experimentálnej MPLS siete. Záver zhŕňa dosiahnuté výsledky a vytyčuje finálne ciele k úplnému naplneniu zadania práce.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

MPLS, Multiprotocol Label Switching, TE, riadenie premávky, MPLS-TE, PBR, smerovanie na základe pravidel, RSVP-TE, OSPF-TE, CSPF, WAN networking, viac cestné

ABSTRACT

Thesis introduces positive traits of MPLS technology comparing to other transportation mechanisms in WAN environment, refers to its pros. The next section of thesis describes fundamentals of routing and switching in MPLS trying to make accent of different approaches between routing & switching in IP network and MPLS network. Following part focuses on topic about Traffic Engineering, its methods and practices. Another part of thesis is about Traffic Engineering in MPLS and its posibilities of controling data flow. Last section describes planning, implementation and operation of experimental MPLS network. Conclusion summarizes achieved results and sets further goals to complete whole fulfillment of thesis assignment.

KEY WORDS

MPLS, Multiprotocol Label Switching, TE, Traffic Engineering, MPLS-TE, PBR, Policy Based Routing, RSVP-TE, OSPF-TE, CSPF, configuration, WAN networking, multiple path

VLČEK, L. *Přenos multimédií v MPLS síti.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Polívka.

Prehlásenie

Čestne prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Přenos multimédií v MPLS síti“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej semestrálnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a následujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa _____

_____

podpis autora

Poďakovanie

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Michalovi Polívkovi za užitočne metodické pokyny.
Taktiež chcem poďakovať Ing. Petrovi Palúchovi, PhD za veľmi cenné rady pri úvodnej analýze zadania.

V Brne dňa _____

_____
podpis autora

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV

ÚVOD

Táto bakalárska práca na tému „Přenos multimédií v MPLS síti“ obsahom svojho zadania inklinuje k technológii MPLS a jej nadstavbu - Traffic Engineering v MPLS (taktiež označované ako MPLS-TE).

V úvodných stranách predstavuje technológiu MPLS, zaraďuje ju medzi ostatné prepínacie mechanizmy WAN sietí, porovnáva ju s nimi a poukazuje na jej prednostné a výhodné vlastnosti.

Ďašia časť práce skúma, ako vyplýva aj z jej zadania, samotnú technológiu MPLS, prvky jej domény, prepínacie mechanizmy a ich činnosť. Naväzuje na to kapitolou ohľadom smerovania paketov v MPLS, kde je dôraz kladený na porovnanie so smerovaním v tradičnej IP sieti. Sekciu uzatvára rozoberaním informačných báz, na ich základe je samotné smerovanie a prepínanie v MPLS vykonávané.

Druhá sať práce je venovaná QoS, kde pohľadom na zadané štyri typy premávky ich hodnotí z hľadiska požiadaviek na službu.

Treťou kapitolou teoretickej časti práca pojednáva všeobecne o téme smerovania a riadenia premávky v transportných sieťach, menuje a hodnotí metódy Traffic Engineeringu.

Nakoľko zadanie sa opiera primárne o MPLS, štvrtá teoretická sekcia je venovaná spôsobom, akými je možné riadiť a smerovať premávku v MPLS doméne.

Praktická časť bakalárskej práce si kladie za cieľ vytvoriť dostatočne veľkú MPLS doménu, na ktorej bude možné praktizovať Traffic Engineering, a tak dátove toky štyroch rôznych typov posielať rôznymi trasami.

Práca a jej vypracovanie je orientované na Traffic Engineering, policy-based routing nad mechanizmom MPLS. Pokiaľ používa nástroje QoS, ako sú matchnig, marking a rezervácia pásma, tak maximálne len v ich v základnom rozsahu, a to konkrétne pre nutné potreby Traffic Engineeringu. Rovnako zadané štyri druhy premávky sú chápané viac-menej ako štyri rovnaké dátové toky a práca si nekladie za cieľ v praktickej časti im vyslovene poskytknúť najlepšie zaobchádzanie s ohľadom na potrebnú kvalitu služieb, nakoľko práca a jej povaha je orientovaná primárne smerom k routingu a nie QoS.

Gró prakticého riešenia zadania bude konfigurácia na experimentálnej sieti, kde sa implementuje smerovací protokol, samotný mechanizmus MPLS a jeho obdobu pre Traffic Engineering ako následná nadstavba pre pokročilé riadenie dátovej prevádzky v sieti.

Samotná téma praktického zadania je pomerne rozsiahla, obsahuje zúžitkovanie vedomostí na úrovni pokročilého smerovania (link-state smerovací

protokol, redistribúcia smerovacích tabuliek, smerovanie na základe pravidiel), základné QoS (značovanie, manažment šírky pásma). Ďalej zadanie témy vyžaduje kapitolu o MPLS, a najmä nadstavba Traffic Engineering ako jej kompletná podkapitola.

1. MPLS – MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING

1.1. MPLS ako nasledovník vo WAN prostredí

WAN siete majú v rámci svojho vývinu za sebou už niekoľko generácií technológií. Ako posledný míľnik bol komplex mechanizmov Asynchronou Transfer Mode (ATM). Veľké očakávania od (na danú dobu) pokrokovej technológie ATM pre nasadzovanie do moderných prenosových sietí sa žiaľ nenaplnili [1], i preto priemyselný trh začal hľadať alternatívne riešenia, poučený z ťažkopádneho úspechu ATM.

MPLS vzniklo postupným vývojom pokúsiť sa preklenúť obmedzenia doterajších prepínacích WAN mechanizmov, a to sú problematická škálovateľnosť a komplikovaná spravovateľnosť vo väčších sieťach, prípadne i Multicastové vysielanie. Táto technológia prepínania vo WAN prostredí sa stala štandardom IETF. Jej predchodcom bol proprietárny mechanizmus *tag switching* [2] firmy Cisco Systems, Inc. z ktorej MPLS priamo vychádza. Oba sa dajú označiť ako prepínacie mechanizmy v dátovej sieti pracujúce medzi druhou a treťou vrstvou referenčného modelu ISO OSI podľa pozície, kam sa MPLS hlavička umiestni.

MPLS stalo štandardom IETF začiatkom roku 2001 [3]. Od tohto dátumu prešla technológia markantným vývojom a bola rozšírená o mnohé nadstavby, ako Virtual Private Network (VPN), Quality of Service (QoS), Traffic Engineering (TE), označované ako MPLS VPN, MPLS QoS, resp. MPLS-TE.

1.1.1. PREDNOSTNÉ VLASTNOSTI MPLS

Technológia Multiprotocol Label Switching má v porovnaní s tradičnými technológiami WAN sietí množstvo výhod. Pod pojmom „tradičné technológie WAN sietí“ sa myslia tieto paketové siete prechádzajúce MPLS, a síce:

- X.25
- Frame Relay
- ATM

Tak isto bude porovnávaná s IP sieťou.

Dostupnosť

MPLS ponúka virtuálnu plnú priamu dostupnosť[1] medzi všetkými koncovými sieťami zákazníka. Obmedzením pri tradičných technológiách bola nutnosť si prenajímať privátne virtuálne okruhy (PVC), ich množstvo je dané Reedovým zákonom [4]:

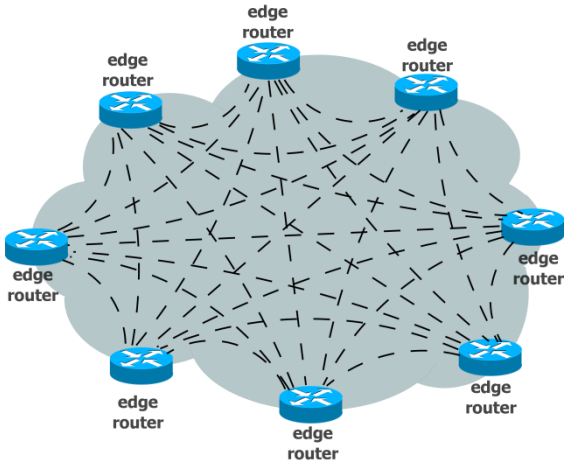
$$okruhov = \frac{N(N-1)}{2} \qquad (1)$$

kde N je počet koncových sietí. Pre zabezpečovanie plnej priamej dostupnosti použitím tradičných technológií WAN sietí je nutné vytvárať Full-Mesh topológie z PVC. To však naráža na nasledujúci krok.

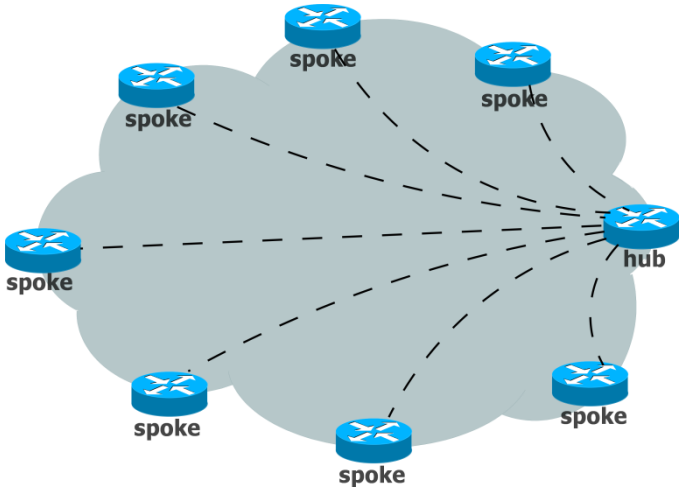
Škálovateľnosť

Jedným z hlavných obmedzení je škálovateľnosť – koncový zákazník bol nútený prenajímať si množstvo PVC za účelom dosiahnutia Full-Mesh topológie, a teda aj plnej priamej dostupnosti znázornené na Obr. 1: Full-Mesh topológia. S počtom potrebných PVC rástla úmerne aj cena, čo pri vyššom počte koncových sietí sa Full-Mesh prevedenie javilo ako nevhodné. Pre tieto prípady sa zavádzali iné topológie použitia, ako sú Partial-Mesh, či najekonomickejšia varianta Hub-and-Spoke (Obr. 2: Hub-and-Spoke topológia). Ich nasadenie má však isté úskalia z toho vyplývajúce, a síce nadbytočné preskoky pre premávku a od toho sa aj odvíjajúce rastúce oneskorenie dátového prenosu s nutným počtom preskokov.

[1] plná priama dostupnosť – dostupnosť, pri ktorej môžu komunikovať akékoľvek dve stanoviská skrz dátovú WAN sieť priamo, bez nutnosti použitia ďalších stanovísk ako medzi-preskokov na ceste dát ; prepojenie „každý s každým“



Obr. 1: Full-Mesh topológia



Obr. 2: Hub-and-Spoke topológia

Taktiež škálovateľnosť pri dodržaní „každý-s-každým“ sťažuje počet vzťahov (adjacency) v smerovaní ako vnútri transportnej siete, tak i mimo nej[2].

Sieť MPLS sa škáluje jednoducho ako akákoľvek bežná IP sieť. Z toho vyplýva jednoduchosť rastu a rozvoja, ktorá mnohokrát bola obmedzujúca pri starších WAN technológiách. S tým priamo súvisí aj nasledujúca vlastnosť.

Jednoduchá spravovateľnosť

Jedná sa predovšetkým o náročnosť udržiavateľnosti a správy domény dátovej siete. Rozširovanie siete zákazníka o jednu ďalšiu koncovú sieť z hľadiska smerovania

[2] mimo nej - myslí sa tým smerovanie v rámci koncových sietí zákazníka

znamenalo v praxi pridávať N-1[3] nových záznamov pre VC do infraštruktúry transportnej siete (kde N je počet pobočiek).

Multiprotokolovosť

MPLS bolo navrhnuté ako unifikujúca vrstva prenosu pre multi-protokolové nasadenie, preto nie je obmedzené len na prenos IP vrstvy, čo vyplýva aj z označenia „Multiprotocol“ v názve, no i schopné prenášať iné smerové protokoly sieťovej vrstvy, ako sú IPX, AppleTalk. Do úvahy pripadajú aj riešenia transportu protokolov nižšej - dátovej vrstvy „nad MPLS“, ako napríklad Ethernet, Frame Relay.

Rovnako MPLS technológia dokáže byť nasadená na rôzne už používané prenosové technológie nižších vrstiev, napríklad ATM obzvlášť [5], či Frame-Relay, čo uľahčuje nasaditeľnosť už do zabehnutého prostredia a umožňuje zjednocovanie sietí rôznych technológií, tak isto aj netradičné technológie, ako je rozvíjajúci sa Ethernet pre WAN nasadenia.

Privátnosť

Popri výhode škálovateľnosti IP siete dokáže MPLS sieť navyše zabezpečiť privátnosť pomocou VPN virtuálnych spojení vo vnútri domény, ktoré sú pre koncového zákazníka transparentné, čím sa značne líši od zdieľanej povahy IP siete a jej verejného prostredia.

Zaistenie kvality služieb

Metodódy QoS sú dnes neoddeliteľnou súčasťou moderných konvergovaných sietí. Sieť MPLS je schopná brať ohľad na prioritizovanú premávku rôzneho druhu a narábať s ňou adekvátnym spôsobom [6], čo sa vo verejnej IP sieti ťažko realizuje bez rozumnej klasifikácie jej pôvodu a typu, a to je pri „spoločných“ dátach na sieti problematické.

Riadenie premávky

Smerovanie premávky cez MPLS doménu môže závisieť na viacerých faktoroch, a to nielen na cieľovej IP adrese (ako je tomu v tradičných IP sieťach), ale napríklad aj na základe zdrojovej IP adresy, zohľadnenie premávky s ohľadom na QoS, prípadne iných parametroch. MPLS s rozšírením o ďalšie protokoly umožnuje aj nasadzovanie riadenia premávky - Traffic Engineering. Sú to medtódy zabezpečujúce rozloženie záťaže za účelom lepšej dostupnosti služieb, schopné ošetriť havárie liniek použitím záložných ciest, možnosť explicitne nakonfigurovať trasu dátových tokov cez sieť, čo je obzvlášť vhodné pri údržbe a plánovaných odstávkach siete.

[3] kde N je počet pobočiek, a teda koncových sietí zákazníka

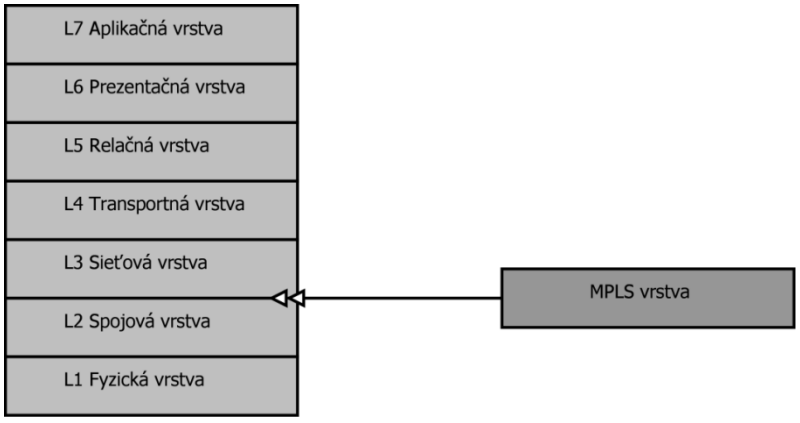
1.2. DOMÉNA A JEJ PRVKY

MPLS sieť (často nazývaná aj MPLS doména) obsahuje skupinu smerovačov pod správou jednej organizácie pracujúcej s technológiou Multiprotocol Label Switching. Ide o prepínací mechanizmus založený na prepínaní na základe značky (label) v záhlaví MPLS.

1.2.1. ZÁHLAVIE MPLS

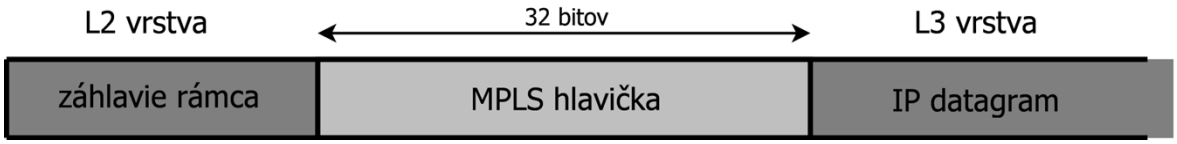
Paket (bežne IP datagram) vstupujúci do MPLS domény je na vstupnom smerovači vyšetrený, a pokiaľ vrstva riadenia rozhodne, že paket bude smerovaný skrz MPLS doménu, priradí sa mu MPLS záhlavie. Týmto záhlavím je paket označený počas celej doby svojho putovania až spravidla k okrajovému smerovaču domény, kde ju paket opúšťa a toto záhlavie je mu odobrané. Obsah MPLS záhlavia sa počas cesty doménou môže môže meniť.

Záhlavie je hierarchicky umiestnené medzi druhú a tretiu vrstvu referenčného modelu ISO OSI, čo sa niekedy v hovorovom slangu označuje ako dva-a-poltá vrstva. Tento fakt, pri ktorom MPLS zapúzdruje dáta tretej a vyššej vrstvy, určuje samotnú povahu multiprotokolovosti MPLS a umožnuje prenášať prakticky čokoľvek pomocou transportnej siete tohoto typu [5] [7]. Praktické využitie znázorňuje prístup AToM (Any Transport over MPLS).



Obr. 3: Referenčný model ISO OSI a zaradenie MPLS vrstvy

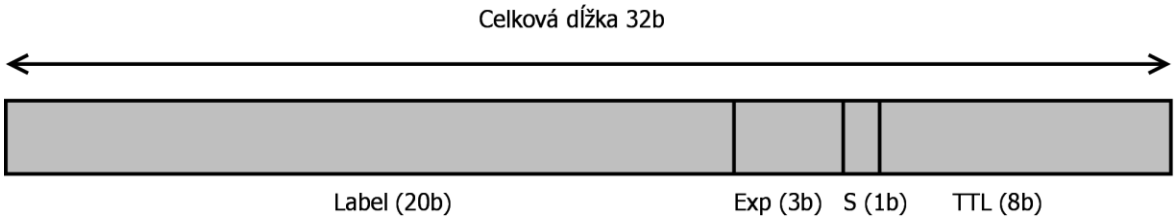
Štruktúra samotného MPLS záhlavia je veľmi jednoduchá, čo predurčuje mechanizmus k rýchlemu spracovávaniu a samotnému prepínaniu. Má konštantnú dĺžku 32bitov (4bajty), čo je relatívne málo oproti záhlaviu napr. Ethernetového rámca DOPLNIT, či záhlaviu IPv4, alebo IPv6 datagramu [8]. Pre svoju neveľkosť a vkladanie medzi druhú a tretiu vrstvu sa niekedy slangovo označuje ako tzv. Shim-header.



Obr. 4: Umiestnenie MPLS hlavičky v rámci

Obsahuje štyri polia:

- Značka (label)
- Experimentálne pole (exp)
- Príznak „dna zásobníka“ (Bottom-of-the-stack)
- Time to live



Obr. 5: Záhlavie MPLS

Label (20b)
Prvých 20 bitov MPLS záhlavia plní funkciu smerovej značky, ktorá sa používa pri prepínaní paketu medzi LSR smerovačmi počas cesty MPLS doménou. Spravidla sa mení každým preskokom v závislosti od požadovanej destinácie.

Samotná priraďovaná label v hlavičke MPLS môže korenšpondovať s cieľovým prefixom adries, jednoznačne identifikovať VPN koncového zákazníka, označovať QoS triedu s patričným zachádzaním a pod.

Experimental (3b)
Trojbitové pole bolo pôvodne rezervované na experimentálne účely, dnes sa však našlo uplatnenie v praxi pre nasadenie mechanizmu zaistenia kvality služieb QoS v technológií MPLS.

Bottom-of-the-Stack (1b)
MPLS architektúra umožňuje zo svojej špecifikácie transportujúcemu paketu priradiť a niesť viac než jedno záhlavie. Záhlavia MPLS sú pred paket vkladané princípom zásobník, to znamená, že sa pridávajú a odoberajú spôsobom Last-in-First-out (LIFO). Z teoretického hľadiska môže paket niesť v doméne neobmedzené množstvo záhlaví, a teda ľubovoľnú úroveň zanorenia, no z praktického je táto možnosť obmedzená

vlastnosťou Maximal Transfer Unit (MTU), ktorá sa priamo viaže k používaným technológiám nižších vrstiev. Nakoľko sa úroveň zanorenia vôbec nečísluje, je potrebné aspoň minimálne odlíšiť prvú úroveň od ostatných. K tomuto účelu je práve vyhradený jednobitový príznak „dna zásobníka“ (Bottom-of-the-Stack) v záhlaví MPLS. Jeho hodnota je nastavená na úroveň logickej 1 vtedy, keď sa jedná o záhlavie prvej úrovne, tzn. bezprostredne za záhlavím sa nachádzajú dáta prenášanej tretej vrstvy referenčného modelu. Logickú hodnotu 0 nadobúdajú záhlavia druhej a vyšších úrovní.

Hierarchická schopnosť značkovania má univerzálne použitie a rozširuje možnosti MPLS. Táto metóda može byť použitá ako nástroj, ktorý umožňuje vysokú flexibilitu a škálovateľnosť v zjednocovaní menších MPLS domén do väčších celkov. Taktiež sa používa pre potreby VPN v MPLS, či iné.

Time-to-Live (8b)

Podobne ako v záhlaví IP paketu, tak aj v MPLS záhlaví slúži toto osembitové pole ako bezpečnostný mechanizmus proti smerovacím/prepínacím slučkám v rámci MPLS domény. Na začiatku domény sa po dekrementovaní políčka TTL v IP záhlaví (nakoľko sa jedná o bežnú súčasť IP smerovania) nakopíruje jeho hodnota do ôsmych bitov MPLS záhlavia, a ďalej je táto hodnota počas prepínania na každom preskoku dekementovaná o jedno. Pri výstupe sa podľa ďalšieho nastavenia siete buď nakopíruje finálna hodnota TTL z MPLS do TTL IP hlavičky, alebo sa hodnota IP hlavičky (po dekrementovaní na prvom smerovači) nezmení [7]. Tento princíp použitý pri druhej variante umožňuje transportnej sieti tváriť sa z pohľadu koncového zákazníka ako jeden preskok, a tak poskytujúc ochranu nemožnosťou trasovať MPLS sieť dátového poskytovateľa, a teda zistiť jej topológiu.

1.2.2. TYPY LSR SMEROVAČOV

Smerovač ako entita používajúca MPLS prepínací mechanizmus, z ktorých sa doména skladá, je taktiež označovaný *Label Switch Router* (LSR). Ten sa ďalej rozlišuje podľa toho, v akej pozícií sa v MPLS doméne nachádza.

Hraničný smerovač (edge)

Niekedy nazývaný aj *Label Edge Router* (LER). Smerovač sa stáva hraničným smerovačom, pokiaľ má aspoň jedného suseda nespadajúceho do MPLS domény, a smerujúceho na báze (spravidla) IP protokolu (v prípade IP siete), typicky sa nachádzajúci na okraji domény.

Smerovač jadra (core)
Smerovače jadra sa nachádzajú vnútri domény na ceste medzi hraničnými smerovačmi. Pracujú výhradne s označenými paketmi[4], ktoré na základe hodnoty label v záhlaví prepínajú skrz MPLS doménu k výstupnému okrajovému smerovaču.

Hraničné smerovače LER v topológií s ohľadom na smer dátového prúdenia sa rozdeľujú na:

- vstupný smerovač (ingress)
- výstpný výstupný (egress)

Vstupný hraničný smerovač
Úlohou vstupného smerovača je zvážiť, či príchodzí paket bude prenesený MPLS sieťou a teda vstúpi do domény, alebo nie. Ak áno, tak mu priradí podľa potreby minimálne jedno MPLS záhlavie s patričnou hodnotou značky a odošle sa výstupným rozhraním k nasledujúcemu preskoku v ceste.

Výstupný hraničný smerovač
Hraničný smerovač na výstupe z domény odstráni zostávajúce záhlavia a vyšle výstupným rozhraním už bežný IP datagram smerom k nasledujúcemu preskoku v IP sieti.

1.3. SMEROVANIE V MPLS SIETI

1.3.1. PRECHOD PAKETU SIEŤOU
Prechod paketu MPLS sieťou sa líši od tradičného smerovania v sieti IP. Smerovanie v IP sieti prebieha na každom skoku, teda smerujúcom zariadení (tretej L3) sieťovej vrstvy. Paket je skok čo skok vyšetrovaný o cieľovú IP adresu, ktorá sa však bežne zostáva do cieľa nezmenená, a typicky pomocou zhody najdlhšieho prefixu medzi záznamami v smerovacej tabuľke a cieľovej IP adresy z IP záhlavia paketu je určené ďalšie smerovanie. Každý smerovač o smerovaní paketu rozhoduje nezávisle na základe svojej smerovacej tabuľky, čo môže pri nekonzistentnom nastavení smerovania na trase viesť k stavom, keď cieľová sieť bude nedosiahnuteľná, k smerovacím slučkám, či mylným informáciám ohľadom smerovania a adresovania sietí.

[4] označené pakety – v kontexte MPLS sa tým myslia pakety vyššej vrstvy nesúce aspoň jedno MPLS záhlavie

Pri transporte paketu cez MPLS doménu sa rozhodovanie ohľadom trasy učiní len raz. Keď vstupný LER uváži, že príchodzí paket sa prenesie cez MPLS sieť, ingress LER paket prešetrí, zaradí si ho do vhodnej *Forward Equivalent Class* (FEC), na jeho základe mu pridelí (akcia PUSH) MPLS záhlavie (v špecialnych prípadoch viac než jedno) s hodnotou značky odpovedajúcej pre danú FEC. Takto zaopatrený paket pošle výstupným rozhraním smerom k ďalšiemu LSR smerovaču v ceste (typicky je to typ core). Ten ho spracováva na základe hodnoty značky v MPLS hlavičke príchodzieho paketu, typicky vymení (akcia SWAP) záhlavie s inou značkou a pošle výstupným rozhraním paket ďalšiemu LSR v ceste, kde sa proces z pohľadu ďalšieho smerovača zopakuje.

Počas putovania sieťou môže byť label ponechaná, vymenená, pridaná ďalšia úroveň hlavičky, či aj odobraná (akcia POP). V prípade ďalšej úrovne značky sa ďalšia hlavička MPLS s vlastným políčkom label umiestni „nad“ hlavičku predchádzajúcej úrovne zásobníkovým spôsobom.

Až paket nakoniec dorazí na egress LER, odstránia sa (akcia POP) všetky MPLS záhlavia (ak zostali nejaké), ďalej je paket smerovaný už tradične podľa IP adresy. Sú prípady, kedy sa táto činnosť odstraňovania vykonáva už jeden skok pred výstupným LER. Výhodou je rozloženie záťaže na dva smerovače, kde predposledný odstraňuje záhlavia a posledný uskutočňuje IP smerovanie, ktoré inak obe bežne vykonáva sám egress LER. Táto metóda sa nazýva *Penultimate Hop-Popping* [7].

Počas prechodu doménou žiaden zo smerovačov jadra nesiahal za MPLS záhlavie do polí vyšších vrstiev za akýmkoľvek účelom, nebolo potrebné opakovane zistovať cieľovú adresu počas priebehu prepínania. Z tohoto taktiež vypýva, že pokiaľ sa má na paket označený MPLS záhlavím uplatňovať zachádzanie podľa QoS, musí byť tento fakt, a teda príznak dostupný, čiže uvedený už v záhlaví MPLS.

Forward Equivalent Class

V jednej triede FEC sa nachádzajú všetky pakety, ktoré požadujú rovnaký spôsob zaobchádzania počas prepínania v doméne a spájajú ich spoločné vlastnosti i nároky.

V základnom poňatí môžeme pre názornosť nasledujúceho príkladu do rovnakej FEC považovať a radiť pakety s rovnakým cieľovým prefixom IP adresy, trebárs 10.1.2.0/24 . Keď sa paket má dostať do tohoto cieľa, ingress LER použije patričnú hodnotu značky v pridávanom MPLS záhlaví, následne odosielajúc paket patričným smerom výstupným rozhraním (čím dodržiava danú FEC). Na základe hodnoty značky v záhlaví je paket prepínaný po vopred vytvorenej *Label Switched Path* (LSP). Samotná LSP sa dá považovať ako ekvivalent virtuálneho okruhu VC v ATM sieti.

Keď sa na rovnaký ingress LER dostaví paket smerujúci do iného prefixu, a teda vyžadujúci inú FEC - čiže iné zachádzanie, ingress LER ho zaopatrí inou hodnotou značky v pridanom MPLS záhlaví a odošle iným, eventuelne aj rovnakým smerom, avšak pre danú značku (vzhľadom k odlišnej FEC) bude následne uplatňovaný iný prístup počas prepínania, i keď eventuelne aj rovnaká LSP.

Pakety zdieľajú rovnakú FEC v prípade, keď sú prieposielané:

- do rovnakého cieľa
- tou istou cestou
- s rovnakými požiadavkami a prístupom, s ohľadom na QoS počas prepínania

Hoci je v praxi FEC často typicky spájaná s cieľovou adresou, je všeobecnejšia než len adresa príjemcu spadajúca do rovnakého cieľového prefixu. Môže byť podmienená taktiež zdrojom paketov, alebo hodnotou poľa DSCP, ktoré môžu spôsobiť vytvorenie odlišnej FEC, a teda aj následne zaobchádzania.

Čo sa týka analógie FEC s IP sieťou, tam sa taktiež koná proces ohľadom FEC, a síce prešetruje sa na každom preskoku cieľová IP adresa zo záhlavia IP datagramu. Na základe tejto informácie (prípadne aj ďalších možných faktorov, ako je DSCP pole zo záhlavia, či iné) sa prehľadá smerovacia tabuľka a z nej sa istia informácie o ďalšom prepínaní paketu. V tomto okamihu už pozná smerovač FEC pre daný paket – vie IP adresu ďalšieho preskoku, vie výstupné rozhranie, vie ako s ním zachádzať v zaraďovaní do fronty. Pakety, ktoré zdieľajú tieto tri informácie, sa považujú za rovnakú FEC.

Zásadný rozdiel medzi IP sieťou a MPLS sieťou vzhľadom na FEC je, že FEC sa v IP sieti zisťuje na každom preskoku, v MPLS sieti len raz – a to na začiatku LSP.

1.3.2. INFORMAČNÉ BÁZY SMEROVAČA V IP SIETI

Aby paket mohol byť korektne smerovaný a prepínaný IP sieťou, je k tejto činnosti potrebné učiniť rozhodnutie o voľbe toho správneho smeru. Pod pojmom „voľba správneho smeru“ sa v IP sieti rozumie voľba takej trasy z pohľadu rozhodujúceho sa smerovača, ktorá sa relatívne k rozhodujúcemu sa smerovaču javí ako najvhodnejšia, čo v IP sieti znamená cesta najlacnejšia, s najnižšou cenou do cieľa (cost). Aby sa smerovač pracujúci so smerovým protokolom IP vedel rozhodnúť pre správny smer, ktorý sa bude pre jeho subjektívny pohľad javiť ako najvýhodnejší, musí mať znalosti o okolitej topológií a jej adresovaní v jeho tzv. „širšom okolí“.

Pod pojmom „širšie okolie“ sa rozumejú siete, do ktorých smerovač nie je priamo pripojený svojimi rozhraniami, ale eventuálne sa do nich vie dostať cez ďalší

preskok (typicky cez ďalší smerovač, či reťazec smerovačov). Siete, ktoré sú priamo pripojené, sú považované za „bližšie okolie“ a smerovač vie o nich automaticky, pretože má v nich zapojené svoje rozhrania, pokiaľ majú správne nastavenú fyzickú, linkovú a sieťovú vrstvu.

Informácie o všetkých cieľových sieťach a smeroch smerovač získava jednak z vlastných rozhraní pre priamo pripojené siete v „blízkom okolí“, tak aj pomocou smerovania pre „širšie okolie“, ku ktorému smerovač nemá priamy prístup. Toto smerovanie môže byť statické a teda z jednotlivých smerovacích záznamov zadaných manuálne administrátorom, alebo dynamické - z výmeny informácií smerovacími protokolmi, ako sú napr. RIP, OSPF, IS-IS, BGP. Všetky tieto informácie o nadobudnutých smeroch vrátane preskokov k nim, si smerovač ukladá do svojej *Router Information Base* (RIB).

Routing Information Base **(RIB)**

RIB je dátová štruktúra, do ktorej smerovač zhromažďuje zo všetkých nadobudnutých smerovacích informácii spôsobom vyššie uvedeným, tie s najlepšou cenou do daných prefixov pre jednotlivé smerovacie protokoly či ostatné spôsoby (statický záznam, resp. priamo pripojená sieť). Obsahuje dôležité údaje ako sú prefix cieľovej siete, cena (cost) cesty, nasledujúcí preskok (IP adresa smerovača alebo výstupné rozhranie), a spôsob, odkiaľ bola táto informácia získaná (napr. konkrétny smerovací protokol, či statický záznam). Týmto pričinením obsahuje RIB to najlepšie (teda najvýhodnejšie cesty s najnižšou cost) napr. z RIPu, z OSPF, zo statického smerovania pre dané prefixy cieľových sietí. Z týchto informácií smerovač zostaví smerovaciu tabuľku s ohľadom na čo najnižšiu administratívnu vzdialenosť, ktorá reprezentuje „dôveryhodnosť“ smerovacieho protokolu. Smerovacia tabuľka je menšia a kompaktnejšia, a používa sa na smerovanie IP datagramov s dôrazom na čo s najdlhšiu zhodu v prefixe voči cieľovej IP adrese zo záhlavia paketu.

Smerovanie podľa smerovacej tabuľky máva však aj svoje rýchlostné úskalia. Tými je napríklad dvojitý prechod záznamami v smerovacej tabuľke, kde sa pri prvom prechode hľadá IP adresa nasledujúceho preskoku, a v druhom prechode hľadá sa výstupné rozhranie do priamo pripojenej siete, ktorá tento preskok obsahuje. Taktiež na rýchlosti nepridáva opakované prehľadávanie ARP tabuľky s cieľom zistiť fyzickú adresu ďalšieho preskoku, pokiaľ sa nachádza na zdieľanom médiu, ako je ethernet a je potrebné pripojené zariadenia na druhej vrstve odlišovať a náležite adresovať. Firma Cisco Systems, Inc. s cieľom znížiť dobu potrebnú na smerovanie paketu a zvýšiť smerovací výkon vyvinula technológiu *Cisco Expres Forwarding* (CEF) [5]. Táto technológia používa k smerovaniu svoju vlastnú dátovú štruktúru zvanú *Forwarding Information Base* (FIB).

***Forwarding Information Base* (FIB)**
Táto informačná báza obsahuje koncentrované informácie z tabuliek RIB a ARP. Jej výhodou je jej kompaktnosť a úplnosť s ohľadom na smerovacie informácie potrebné k prepínaniu paketu. Obsahuje konkrétny prefix cieľovej adresy, identifikátor výstupného rozhrania a informácie ohľadom ďalšieho preskoku v ceste (ako sú napríklad jeho IP a fyzická adresa). Týmto pričinením je smerovač schopný jediným prehľadaním tabuľky FIB získať všetky potrebné informácie, ktoré použije pri konštrukcií spracovávaného paketu a jeho odoslaní.

1.3.3. INFORMAČNÉ BÁZY MECHANIZMU MPLS
Pri rozšírení smerovacích schopností smerovača o mechanizmus MPLS, smerovač získava dve nové dátové štruktúry, ktoré sa slúžia na prácu s paketmi nesúcimi MPLS záhlavie.

Label Information Base (LIB)
Tabuľka, ktorá má prehľad o všetkých známych prefixoch[5] a väzbách k značkám, ktoré ponúkli priľahlé LSR, tak ako aj samotný smerovač sa nazýva *Label Information Base* (LIB). Jej úlohou je zhromažďovať a udržovať informácie párovania prefixu voči značke, ktoré boli oznámené protokolom distribúcie značiek od priľahlých smerovačov MPLS, tak vlastnú značku k danému prefixu, ktorú smerovač oznamuje priľahlým LSR . Ako bolo uvedené, táto dátová štruktúra obsahuje všetky zozbierané informácie ohľadom párovania prefix – značka, a podieľa sa na tvorbe tabuľky Label Forwarding Information Base (LFIB),

Label Forwarding Information Base (LFIB)
Jedná sa o tabuľku, ktorá v podstate je ekvivalentná voči FIB. Táto tabuľka je optimalizovaná pre prepínanie paketov nesúcich MPLS záhlavie na základe hodnoty značky v záhlaví príchodzieho MPLS paketu. Obsahuje infomácie ako je značka z príchodzieho paketu, uskutočňovaná akcia, výstupné rozhranie a informácia o nasledujúcom preskoku LSR. Túto tabuľku využívajú všetky smerovače MPLS domény.

Pre úplnosť je nutné uviesť, že po nasadení MPLS prepínania na smerovač sa rožšíri jeho štruktúra RIB o ďalší atribút, a síce príznak pre MPLS, kde sa uvedie spravidla akcia PUSH a značka, s ktorou bude paket označený pri samotnom odosielaní. V prípade, že sa tento prípad naskytne (je uvedená akcia PUSH s hodnotou

[5] Slová „prefix“ či „cieľová podsieť“ označujú vo voľnejšom ponímaní „FEC“, a sú tomto rozsahu kontextu voľne navzájom zameniteľné, pokial sa jedná a párovanie značka=FEC

značky) pri zázname daného prefixu, jedná sa tu o MPLS prepínanie, kde sa tento smerovač stáva v tomto okamihu ingress LER a paket vstupuje do domény. Ide o začiatok tzv. *Label Switched Path* (LSP).

1.3.4. POUŽITIE INFORMAČNÝCH BÁZ PRI PREPÍNANÍ PAKETU

V prípade MPLS sa prepína na základe zhody Label značky a nehľadá sa na každom preskoku čo najdlhší prefix ako pri smerovaní v IP sieti. Úvodná značka v hlavičke MPLS sa vyberie už na začiatku v Ingress LER. Značka sa volí s ohľadom na FEC. Štandardne je to na základe cieľovej adresy, ktorá sa získa z IP hlavičky, avšak ako bolo uvedené – nemusí byť FEC obmedzená len na cieľovú adresu.

Pre prípad, že značka sa bude priraďovat na základe cieľovej adresy, vstupný hraničný smerovač prehľadá svoju databázu FIB, nájde v nej záznam so zhodou pre čo najdlhší prefix. Na základe informácií uvedených v tomto zázname uskutoční akciu PUSH, čím priradí paketu MPLS hlavičku s danou hodnotou značky. Takto označený paket enkapsuluje s ohľadom na spojovú vrstvu, kam uvedie prípadne fyzickú adresu zo záznamu FIB nasledujúceho preskoku, a následne vyexpeduje rámec výstupným rozhraním taktiež uvedenom v zázname v tabuľke FIB.

Paket prichádza na smerovač jadra. Nakoľko core LSR pracujú výhradne s paketmi obsahujúcimi MPLS záhlavie, na ich prepínanie sa použije databáza LFIB. Príchodzí paket smerovač vyšetrí a zistí hodnotu značky (label) zo záhlavia. Na základe tejto hodnoty vyhľadá záznam so zhodou v tabuľke LFIB pre atribút „lokálna značka“. Je to povaha značky, ktorú vytvoril tento konkrétny smerovač jadra pre daný cieľový prefix a oznámil ostatným priľahlým smerovačom. Z tohoto záznamu vyčíta dôležité parametre ako sú vykonaná akcia a výstupná hodnota značky. V roli smerovača jadra je typickou akciou SWAP, ktorá zamieňa záhlavie MPLS s pôvodnou hodnotou značky za záhlavie s hodnotou pre výstup. Následne použije ostatné dáta zo záznamu pre vyexpedovanie paketu tak ako predchádzajúci LSR , čím predáva paket ďalšiemu smerovaču v ceste, kde sa proces spracovania opakuje.

Až takýmto spôsobom dorazí paket na výstupný smerovač domény, uskutoční sa rovnaký začiatok procedúry, až po vyhľadávanie v tabuľke LFIB. Tam nájde egress LER v zázname položku s akciou POP. To znamená, že smerovač odstráni MPLS záhlavie. Pokiaľ je to záhlavie prvej úrovne, čo smerovač zistí pri odstraňovaní podľa príznaku S bitu v záhlavi nastaveného na 1, paket v tomto mieste cestu v doméne končí. Smerovač po odstránení MPLS záhlavia preskúma IP hlavičku a podľa cieľovej IP adresy určí, kadiaľ sa bude paket smerovať. To konkrétne zistí prehľadaním svojej FIB tabuľky a paket vyexpeduje.

Sumárne sa dá zrhnúť, že na prepínanie transportovaných paketov používajú okrajové smerovače FIB databázu, zatiaľ čo LFIB tabuľku všetky. Paket na začiatku

dostane záhlavie, je prepínaný sústavou smerovačov na základe meniacej sa značky, čím kopíruje LSP medzi okrajovými LER spojenú smerovačmi jadra.

1.3.5. TVORBA LABEL SWITCHED PATH

Keď sa hraničný smerovač MPLS domény získa informáciu (spravidla zo smerovacieho protokolu) o novom smerovateľnom prefixe, pridelí mu (vytvorí pár) tzv. lokálnu značku (lebo bola vytvorená lokálne) a rozošle protokolom distribúcie značiek tento fakt priľahlým LSR smerovačom oznamujúc prefix a hodnotu značky. Priľahlý smerovač túto správu protokolu distribúcie značiek akceptuje a uloží si do svojej LIB, eventuálne i LFIB informáciu o prefixe, vzdialenej značke a rozhraní, na ktorom túto správu prijal – použije ho ako výstupné rozhranie. Sám smerovač novooznámenému prefixu vytvorí vlastnú značku lokálnej povahy, ktorú použije k nemu ako pár a pomocou protokolu distribúcie značiek túto skutočnosť oznámi svojim susedom. Šírenie týchto značiek je smerom Downstream -> Upstream, kde Downstream je smerovač ten bližšie k cieľovému prefixu, od ktorého sa správa o cieľovom prefixe typicky šíri.

Na distribúciu značiek sa používajú *Label Distribution Protocol* (LDP), alebo *Tag Distribution Protocol* (TDP). Šírenie značiek od výstupného smerovača k vstupnému pomocou LDP, resp. TDP a náväznosť značiek v sieti vytvára spojité LSP.

2. MPLS QoS

2.1. QoS všeobecne

Z pohľadu moderných konvergovaných sietí, keď je snahou integrovať všetky služby sietí do jednej zjednotenej siete, je mechanizmus QoS nevyhnutnou súčasťou moderných konvergovaných sietí.

Rastúce požiadavky na moderné konvergované dátové siete, ktoré na rozdiel od legacy dátových sietí prenášajú okrem typických dát aj ostatné typy premávky reprezentované službami, ako je hlas, či videostream v reálnom čase. Tradičná dátová sieť bola určená výhradne pre prenos dát, kde určujúcim parametrom siete bola jej šírka pásma. Tento prístup však pri nasadzovaní nových služieb do siete ako sú hlas, video a iné interaktívne služby citlivé na odozvu a bezchybový prenos nebol dostatočný. Preto bolo potrebné zabezpečiť daným službám adekvátnu kvalitu počas doručovania. Na to, aby s nimi bolo možné odlišne zachádzať, bolo nutné jednotlivé typy premávky dát rozlišovať. V QoS sa na to používajú mechanizmy inšpekcie a klasifikácie paketov.

2.2. Klasifikácia premávky

Prakticky sa to rieši, že najskôr sa príchodziemu paketu preskúmajú vyššie vrstvy hĺbkovou inšpekciou a na základe ich obsahu sa paketu v IP záhlaví nastaví do príslušného poľa príznak [7]. Takto označený paket sa stáva klasifikovaným. To znamená, že pri prechode sieťou bude naň pri smerovaní braný ohľad podľa prednastavených pravidiel.

2.3. Triedy premávky a ich požiadavky

Hlas

Jeho charakteristikou nepatrný dátový tok v závislosti od použitého audio kodeku. No na druhú stranu jeho najvyššia citlivosť pre oneskorenie (delay) a kolísanie oneskorenia (jitter). Tieto parametre spojenia majú priamy dopad na kvalitu telefonického hovoru pre telefonujúceho. Tento typ dátovej premávky by mal byť na smerovači expedovaný prioritne [8].

Video

Video-streaming je ďalšou real-time službou, ktorá spolieha na nízke oneskorenie. Avšak vzhľadom k bufferovaniu nie je natoľko citlivá na menej významné kolísanie jitter-u. Dátový tok sa líši najmä od použitého video-kodeku a prenášanej kvality videa.

HTTP

Interaktívne web-aplikácie sa zvyčajne vyznačujú premávkou nárazovitého typu rôznych objemov. Z hľadiska interakujúceho koncového užívateľa sa očakáva odozva v rozumnom čase. Taktiež sa modernej internetovej dobe používa na presnos súborov i väčších objemov, dôkazom sú toho mnohé veľké filehostingové služby webových rôznych portálov na internete.

FTP

Tento typ dátového prúdu je nenáročný na latenciu ci jitter, avšak generuje najväčšie objemy dát a preto vyžaduje pre prenos najväčšiu šírku pásma. V prípade nenasadených QoS mechanizmov na sieti má tendenciu svojou mohutnosťou zmonopolizovať väčšinu zo šírky dostupného pásma a tak degradovať kvalitu ostatných delay-citlivých služieb na sieti.

2.4. ZAISTENIE KVALITY SLUŽIEB V MPLS

Kedže prepínacie mechanizmy smerovačov v jadre MPLS (core LSR smerovače) siete nepristupujú vôbec do IP záhlavia, bolo potrebné toto označenie preniesť do MPLS hlavičky. K tomuto účelu sa použili 3 bity označované ako EXP [6][7] umožnujúce odlíšiť tak 8 rôznych klasifikovaných tried premávky, a teda osem rôznych prístupov prepínaniu takto označenej premávky. Tie následne môžu byť aplikované na paket po celej dĺžke trasy LSP počas prenášania MPLS doménou a tak prispieť k zaisteniu kvality služieb v transportnej sieti.

3. SMEROVANIE A RIADENIE PREMÁVKY V TRANSPORTNÝCH SIEŤACH TRAFFIC ENGINEERING

3.1. VŠEOBECNE

Výkonosť siete a jej schopnosť efektívne prenášať premávku je záležitosťou dvoch navzájom príbuzných činnosti, nimi sú plánovanie kapacity siete a riadenie premávky v sieti.

Zatiaľ čo plánovanie kapacity siete je z časového hľadiska dlhodobou záležitosťou, ktorá poukazuje na budúcnosť siete, vývoj jej topológie a optimalizáciu infraštruktúry, počíta s predpokladanými trendmi nárastu dopytu po službách, čo následne vyžaduje navyšovanie kapacity liniek a nasadzovanie nových technológií, riadenie premávky v sieti má inú povahu.

Pre riadenie premávky z časového hľadiska ide o pohľad na výkonnosť siete omnoho krátkodobejší. Je to pohľad na situáciu, ktorá odzrkadľuje aktuálnosť a jej blízku budúcnosť [11]. Je to činnosť, ktorá pružne reaguje na vzniknuté udalosti plánované, tak aj náhle neočakávané so snahou zabezpečiť a dodržať výkonnosť siete a s orientáciu na kvalitu poskytovanej služby.

Traffic Engineering (TE), v preklade riadenie premávky. Je to pojem, ktorý vychádza ešte z čias telekomunikačnej techniky, avšak jeho prístup pre širokopásmové siete je principiálne iný [8]. Myšlienka TE poníma manipuláciu dátových tokov v prenosovej sieti za účelom ich riadenia kvantity a smeru podľa vyžadovanej situácie, majúc dopad na premávku v sieti, jej výkon a kvalitu poskytovaných služieb.

V konkrétnom ponímaní je TE súborom nástrojov a metód, ktorými dokáže poskytovateľ dátových služieb spolu v kombinácií s mechanizmami na zaistenie kvality služieb riadiť dátovú premávku, menovite ju:

- diferencovať – rozlišovať aplikácie vyšších vrstiev a zaobchádzanie s nimi,
- prioritizovať – uprednostňovať real-time prevádzku pred best-effort,
- tvarovať – regulovať kvantitu toku, čím predchádzať zahlteniu liniek,
- rozdeľovať – jeden mohutný dátový tok na viaceré menšie,
- smerovať – dátové toky explicitne skrz transportnú sieť,
- agregovať – združovať prístupové siete pred napojením sa na chrbticu,

a nimi riadiť celkový výkon transportnej siete, umožňujúc mu jej lepšiu spravovateľnosť majúc dopad na všeobecnú kvalitu poskytovaných služieb.

Metódami vyššie uvedenými a ich kombináciou je schopný dátový poskytovateľ dosiahnúť ciele ako sú rozkladanie záťaže na sieti, odolnosť proti zahlteniu pri nárazových dátových tokoch, zaistenie kvality služby podľa povahy protokolov aplikačnej vrstvy, zaistenie dostupnosti služieb pri plánovaných údržbách siete či rôznych havarijných scenároch, a iné.

3.2. TRAFFIC ENGINEERING V TRANSPORTNÝCH SIEŤACH

Nakoľko sa použité technológie fyzických a linkových vrstiev od seba líšia (a oficiálne zadanie poukazuje na MPLS), a teda aj ich metódy smerovania, rozhodol som sa poňať a riešiť túto VŠKP v duchu riadenia premávky nad druhou vrstvou referenčného modelu ISO OSI. Týmto pričinením nie je poskytovateľ limitovaný z technologického aspektu na homogénnu transportnú sieť a obmedzenia jej technógie, čím nadobúda toto riešenie na univerzálnosti a prenositeľnosti.

Transportné siete zo svojej povahy majú vo fyzickej topológii zahrnutých mnoho sekundárnych liniek z dôvodu zálohy liniek primárnych pre prípad poruchy, nadobúdajúc nimi topológiu partial-mesh, snažiac sa priblížiť full-mesh každého s každým. Z pohľadu bežného smerovania v IP sieti je premávka prepravovaná cez primárne linky, čo aj viac-menej je štandardne zabezpečené pomocou *Interior Gateway protocol* (IGP) smerovacieho protokolu nasadeného v transportnej sieti, ako napríklad *Open Shorthest Path First* (OSPF). Je to protokol zohľadňujúci šírku pásma do výpočtu metriky, v prípade OSPF je to práve:

$$metrika\ linky = \frac{100000}{vp} \tag{2}$$

kde vp je prenosová rýchlosť linky v kb/s, a 100000 je referenčná hodnota, ktorej sa počítaná metrika vzťahuje [13].

V prípade OSPF smerovací protokol svojou funkciou rozširuje informácie o topológií v rámci svojho pôsobenia v doméne pomocou svojich *Link State Advertisment* (LSA) o jednotlivých podsietiach a stavoch liniek v doméne a externých sieťach redistribuovaných do smerovacieho protokolu. Následne pomocou Dijkstrovho algoritmu si smerovač z vlastnej perspektívy vypočíta najkratšiu cestu do každej podsiete z dát svojej topologickej tabuľky. Po výpočetnom procese si zákonite tie najlacnejšie cesty s najnižšou metrikou do všetkých cieľových podsietí umiestni do svojej smerovacej tabuľky. Sieť sa stáva skonvergovanou, smerovanie funguje správne. Nakoľko všetky smerovače v rámci domény z povahy smerovacieho

protokolu OSPF majú rovnaké informácie a teda rovnaký pohľad na topológiu, všetky vypočítali metriku do cieľovych sietí s použitím tých najrýchlejších liniek, ~liniek s najnižšími cenami, a teda budú jednotne používať tie metricky najvýhodnejšie trajektórie sieťou.

Sieťová premávka prúdi po najvýhodnejších (z pohľadu OSPF najrýchlejších) linkách, či ich kombináciách, transportnou sieťou. V prípade poruchy linky, je smerovací protokol OSPF plne schopný prepočítať nový stav topológie a pri dostatočnej dostupnosti v závislosti na fyzickej topológií nájsť náhradnú trasu sieťou. Toto správanie je normálne a za bežných okolností vítané. V transportnej sieti sa avšak stáva obmedzujúcim činiteľom.

V transportných sieťach nie zas tak ojedinele sa môže naskytnúť scenár, pri ktorej následkom nejakej služby (napríklad pravidelnej synchronizácie distribuovaných databáz) sa nárazovo objaví enormné množstvo dát prevyšujúce dostupnú kapacitu linky. Pokiaľ nie sú aplikované ani základne metódy diferencovania služieb, radenia do front a tvarovania, zákonite linka s najnižšou kapacitou ako súčasť prenosovej cesty sa stane zahltenou, degradujúc kvalitu všetkých prenášaných služieb, obzvlášť tých spoliehajúcich na real-time prenos a nízke hodnoty jitteru. V prípade že aplikované sú, kvalita real-time služieb zostáva relatívne zachovaná, no linka pretrváva v stave zahltenia. Tento fakt nie je žiadúci, nakoľko záložné cesty transportnou sieťou medzi okrajmi vstupu a výstupu dát do transportnej siete zostávajú s nevyužitou kapacitou. Cieľom teda je realizovať prenos viacerými cestami v IP prostredí, aby došlo k lepšej optimalizácií výkonu, rozloženiu záťaže a rovnomernejšiemu vyžívaniu dostupných sieťových prostriedkov.

3.3. MOŽNOSTI SMEROVANIA A PRENOSU

Dosiahnutie rozloženia záťaže počas smerovania v IP sieti medzi okrajovými bodmi A a B na viac ciest dá realizovať ovplyvnením smerovacieho procesu.

Smerovací proces je založený na rozhodovaní výberu smeru na základe údajov zo smerovacej tabuľky. Do smerovacej tabuľky je umiestnený záznam o cieľovej podsieti ten, ktorý:

- má najnižšiu administratívnu vzdialenosť,
- v prípade zhodnej administratívnej vzdialenosti má nižšiu metriku
- v prípade zhodnej najnižšej metriky sa ich do smerovacej tabuľky umiestni viac (maximálne však 6)

Pokiaľ sa v smerovacej tabuľke nachádza viac záznamov do rovnakého cieľového prefixu s rovnakou metrikou, smerovač ich bude striedať a vykonávať tak vyrovnávanie záťaže cez viac liniek s rovnakou cenou [14].

Táto metóda za účelom load-balacing-u sa používava, hoci z praktického hľadiska je v komplexnej fyzickej topológií transportnej siete celkom nepravdepodobná situácia, že sa naskytne dve či viac ciest s rovnakou metrikou, ktoré by mohli byť za týmto účelom použité, čo v prípade rôznorodosti prenosových kapacít záložných liniek i prípadných technologií by bolo možné. Z týchto dôvodov sa dielčia cena jednotlivých liniek siete, z ktorej sa počíta celková metrika, ovplyvňovala - administratívne upravovala. Výsledkom bolo, že sa v smerovacích tabuľkách objavila iná metrika pre novo vypočítanú SPF nahradzujúc záznam a cestu pôvodnú, a tým sa docielila regulácia smerovania podľa potreby a požiadaviek poskytovateľa. Podľa Cisco by prideľovanie ceny linkám malo byť inverzné im kapacitám. Štúdiá Fortza však ukázali, že optimálnymi nastaveniami cien liniek v OSPF prostredí sa dá vyťažiť z potenciálu tejto metódy omnoho viac [15] [16].

Ďalšou metódou je použitie *IP Source Routing* – smerovanie podľa pravidiel strany odosielateľa, v nej si odosielacia strana nadefinuje do záhlavia IP paketu cestu, po ktorej bude paket následné smerovaný. Táto metóda sa však na účely Traffic Engineeringu v transportnej sieti nehodí, pretože má početné obmedzenia a odosielajúca strana v prístupovej sieti nemôže poznať topológiu v transportnej sieti [16] a sledovať jej zmeny.

Možnou metódou je taktiež aj použitie *Constraint-Based Routing* (CBR), konkrétne prístup administratívne-orientovaný, alebo službovo-orientovaný.

Policy Based Routing (PBR), vo voľnom preklade explicitné smerovanie na základe pravidiel je administratívne orientovaný prístup k CBR. V Cisco prostredí je toho princípom tzv. objekt *Route Ma*p, ktorý obsahuje sadu nadefinovaných pravidiel, podľa nich je následne vykonávané rozhodovanie o smerovaní nehľadiac na smerovaciu tabuľku a smerovacie protokoly. Jedná sa o metódu celkom použiteľnú, avšak vhodnú len na malé siete z dôvodu nutnosti konfigurácie na každom smerovači individuálne pre každý tok.

Alternatívne k PBR, ktoré je orientované povahou smerovania podľa administratívnych pravidiel a príkazov, existuje aj varianta orientovaná smerom k službe. Jej príkladom je napr. *IntServ*. Táto služba však spolieha na kooperáciu s aplikáciami v koncových uzloch siete, majúc dosť obmedzujúci charakter.

Poslednou mnou zvažovanou možnosťou bolo použitie protokolu *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) a jej nadstavby Traffic Engineering. Je pravdepodobné, že okrem vymenovaných možností riadenia smerovania existujú ďalšie metódy, ktoré som počas bádania nezvážil.

4. TRAFFIC ENGINEERING V MPLS

Hoci bolo MPLS primárne vyvíjané ako mechanizmus rýchleho prepínania, jedným z rozširujúcich nástrojov, ktoré poskytujú pridanú hodnotu poskytovateľovi siete je implementácia TE nad MPLS.

MPLS spolu s rozšírením TE slúži ako nástroj umožňujúci poskytovateľovi služieb nastaviť jasne stanovenú trasu (taktiež označovanú ako TE tunel) transportnou sieťou spĺňajúcou isté, vopred požadované kritéria. Jeho priebeh sa môže zabezpečiť buď smerovacím protokolom vyššie uvedeného typu, alebo manuálnou konfiguráciou po celej dĺžke trasy od vstupného LSR (označovaný taktiež ako Head-end) až po výstupný LSR (Tail-end)

Nakoľko v štandardnej IP sieti medzi dvomi miestami je dátová premávka smerovaná optimálnou (najlacnejšou) cestou trasou najnižšej metriky, stáva sa bežnou situáciou pri redundantných prepojeniach v sieťovej topológií, že ostatné sub-optimálne cesty vedúce do rovnakej podsiete zostanú nevyužité. Tento prípad pri nadmernej premávke spravidla vedie na zahltenie optimálnej cesty vyúsťujúc do vysokej odozvy, značného jitteru, stratovosti paketov až k úplnej strate dostupnosti služieb.

Pokiaľ sa používa LDP protokol na rozhlasovanie návestí, zo svojej povahy kopíruje svoju LSP podľa cesty IGP (napríklad OSPF), čím je obmedzený z hľadiska možnosti realizovať Traffic Engineering, a teda exiplicitne definovať LSP vedúce sub-optimálnymi trasami.

Rozšírenou verziou protokolu LDP je *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP). Obsahuje rozšírenia, pomocnou nich je tento protokol schopný vytvoriť cestu mimo bežný IP routing ako to robieva LDP. Je možné zadať podmienky, ktoré musí vytváraná LSP spĺňať, ako je napr. minimálna šírka pásma. Začiatkom roka 2003 sa IETF rozhodla upustiť od protokolu CR-LDP zameriavajúc sa výhradne na rozvoj RSVP-TE [18].

4.1. RSVP-TE

4.1.1. RSVP

RSVP-TE vychádza z koncepcie pôvodného protokolu *Resource Reservation Protocol* (RSVP) a rozširuje ho o možnosti Traffic Engineeringu.

Protokol RSVP pracuje na transportnej vrstve, hoci zo svojej špecifikácie neprenáša (netransportuje) dáta aplikačnej vrstvy. Jeho úlohou je zabezpečiť rezerváciu prostriedkov siete potrebných na prenos dát v IP sieťach typu IntServ. Ku

svojmu šíreniu používa informácie zo smerovacích protkolov. Činnosť protokolu RSVP pozostáva z dvoch krokov:

- vyslanie správy PATH z zdroja informácií skrz smerovanú IP sieť k príjemcovi
- vyslanie správy RESV od príjemcu proti prúdu opisujúc trasu PATH

Proces rezervácie je započatý, keď zdroj dátového toku potrebuje vysielať dátový tok príjemcovi cez sieť typu IntServ. Zdroj vyšle správu PATH adresovanú príjemcovi obsahujúc požadované parametre toku. Správa je smerovaná podľa smerovacieho protokolu, kopírujúc najlacnejšie smerovanú cestu. Do správy sa postupne zapisujú smerovače, ktoré si postupne predávajú správu PATH a aj vlastnosti trasy smerom k príjemcovi. Pokiaľ sa na ceste na niektorom smerovači vyskytne chyba, spracovávajúci smerovač preruší reťazec predávania a odošle tvorcovi správy PATH správu, nesúcu oznámenie o chybe spolu s číslom chyby. V tom prípade sa musí správa PATH opakovať.

Ak správa dôjde úšpešne k príjemcovi, príjemca správy PATH v ten okamih presne pozná cestu, po ktorej budú k nemu smerované dáta zo zdroja. Na základe informácii o parametroch toku a celkovom stave trasy vie príjemca špecifikovať svoje kvantitatívne požiadavky na QoS, tak i popísať dátový tok, na ktorý sa QoS požiadavky vzťahujú. Uložiac tieto informácie do rezervačnej správy RESV následne príjemca dátového toku odosiela požiadavky rezervácie sieťových prostriedkov smerovačom proti prúdu, na základe reverzného poradia zo zoznamu z prijatej správy PATH. Pokiaľ rezervácia prostriedkov zlyhá, je oboznámený chybovou správou s čísleným identifikátorom chyby príjemca dátového toku realizujúci rezerváciu a celý proces počínajúc správou PATH sa musí opakovať. Odosielanie správ PATH a RESV sa periodicky pravidelne opakuje, nakoľko je rezervácia časovo obmedzená a rezervované prostriedky je potrebné udržiavať počas celého prenosu žiadaného dátového toku sieťou.

4.1.2. UPLATNENIE RSVP V MPLS-TE

Schopnosť rezervovať sieťové kapacity pozdĺž vytýčenej trasy sa ďalej využíva pre Traffic Engineering v MPLS. Protokol RSVP dostal rozšírenia pre možnosť vytvárať trasy LSP v MPLS sieti, berúc do zváženia obmedzenia ako sú počet preskokov, či minimálna šírka pásma. Tieto vytvorené LSP pomocou protokolu RSVP-TE sa nazývajú *TE tunely.*

Analógia RSVP-TE je RSVP v IntServ sieťach rovnako podobná. Na začiatku vyšle ingress LER správu PATH obsahujúcu navrhovanú trasu cesty. Smerovače v ceste si obdobne správu PATH predávajú a kontrolujú vo svojich prostriedkoch, či

sú schopné vytýčiť trasu v správe PATH. Pokiaľ LSR smerovač nie je toho z nejakého dôvodu schopný, preruší predávanie správy a pošle spätnou cestou k ingress LER správu oznamujúc chybu vo vytyčovanej ceste, na čo môže LER patrične reagovať.

Po úspešnom prechode správy PATH doménou až k egress LER, výstupný smerovač zaháji rezerváciu prostriedkov odosielaním správ RESV v reverznom poradí. Súčasťou zasielania správ RESV je aj nastavenie značiek na smerovačoch, kopírujúc LSP od výstupného LSR smerom k vstupnému. Pokiaľ LSR nie je schopný rezervovať požadovanú časť zo svojej kapacity, oznámi tento fakt egress LER. Tým sa tvorba LSP musí začať znova. Po úspešnom dokončení RESV správ v spätnom kanáli je TE tunel kopírujúc požadovanú trasu nastavený s požadovanými rezervovanými sieťovými prostriedkami [19]. Z povahy pôvodného protokolu RSVP, tak aj v prípade RSVP-TE sa musia správy PATH a RESV pre udržiavanie LSP pravidelne opakovať.

Vytváranie konkrétnej trasy TE tunelu spočíva vo výbere súvislej postupnosti navzájom susediacich LSR smerovačov jadra domény MPLS, ktoré spájajú ingress a egress LER. Výber tejto postupnosti môže byť uskukočnený administrátorom, a síce postupnosť LSR v ceste bude definovaná administrátorom explicitne skok po skoku LSR za LSR, alebo sa tento výber prenechá na smerovací protokol pracujúci so stavom linky. Takým protokolom je napríklad OSPF [19].

4.2. OSPF-TE

Smerovací protokol OSPF je typu *link-state*, čím získava mnohé výhody nad smerovacími protokolmi typu *distance-vector*. Medzi výhody link-state protokolov patrí napríklad rýchlosť konvergencie na základe schopnosti de facto okamžite reagovať na zmenu topológie v sieti. Smerovače si udržujú databázu informácií o celej fyzickej topológií siete vrátane jednotlivých stavov liniek. Na základe týchto informácií sa spúšťa *Dijkstrov algoritmus Shortest Path First* (SPF), ktorý počíta najlacnejšiu cestu do každej podsiete z relatívneho postavenia smerovača v sieti, teda cestu s najväčšou prenosovou kapacitou.

Smerovací protokol OSPF počas počítania najlacnejšej cesty do cieľa nezohľadňuje vyťaženosť liniek a zostávajúce voľné kapacity. To máva za následok optimálne smerovanie, avšak častokrát po vyťažených cestách s najväčšou prenosovou kapacitou. Alternatívou k tomuto priamočiaremu prístupu je *Constrained Shortest Path First* (CSPF). Tento prístup využíva rozšírenie smerovacieho protokolu v podobe OSPF TE.

OSPF bolo rozšírené o ďalšie parametre o stave linky, ktoré zbiera počas vytvárania topológie, akými sú napríklad maximálne rezervovateľné pásmo pre vytváraný tunel, voľné nerezervované pásmo, či administratívna skupina. Na základe topologickej tabuľky smerovacieho protokolu s podrobnejšími informáciami

o stavoch liniek a ich využitých kapacitách, a administrátorsky zadaných požiadaviek (constraints – obmedzení) sa spúšťa SPF zohľadňujúc tieto faktory, hľadajúc cestu z relatívnej pozície smerovača do požadovaného cieľa. Pokiaľ je možné takú cestu zostaviť, CSPF ju vracia ako odpoveď s postupnosťou všetkých LSR kopírujúc trasu od zdroja k cieľu.

Praktické využitie sa naskytuje pri kombinácií RSVP-TE a OSPF-TE pre účely riadenia premávky smerovaním cez sieť. RSVP-TE vykonáva rezerváciu prostriedkov a nastavuje značky pre LSP od egress LER k ingress. Riadi sa odovzdaným zoznamom obsahujúcim postupnosť LSR v sieti. Tento zoznam môže byť generovaný dynamicky, a teda pomocou smerovacieho protokolu, akým je napr. OSPF-TE hľadajúci najlepšiu cestu a berúc do úvahu stav vyťaženia siete a požadované obmedzenia. [21] Vtedy je výsledkom presná (tzv. *strict* – striktná) postupnosť za sebou nasledujúcich LSR, nakoľko počítajúci LER smerovač vie z topologickej tabuľky presnú cestu, ktorú bude LSP kopírovať.

Taktiež zoznam môže byť nakonfigurovaný manuálne administrátorom, a síce skok po skoku používajúc slová *strict* a *loose*. Ten sa odovzdá spolu s požiadavkami na pásmo protokolu RSVP-TE, ktorý sa pokúsi túto cestu zostaviť. Ak uspeje, vracia sa vytvorená LSP, TE tunel, v opačnom prípade chybová hláška. Veľká výhoda Traffic Engineeringu v MPLS je, že explicitná cesta LSP sa nastavuje (manuálne, alebo dynamicky smerovacím protokolom s patričným rozšírením) len na okrajovom LER smerovači a nie pozdĺž celej trasy, ako je tomu napr. v prípade virtuálnych okruhov v technológií ATM

5. REALIZÁCIA

5.1. PRÍPRAVNÁ FÁZA

5.1.1. VÝBER VARIANTY RIEŠENIA

Nakoľko bude nutné, aby každý prúd premávky dát prechádzal cez sieť rôznymi cestami, táto sa nedá vyriešiť použitím čistého IP. Smerovanie v IP sieti je uskutočňované len na základe cieľovej IP adresy, ktorá nie je vôbec určujúca pre obsah, ktorý IP datagram nesie. Okrem toho štandardne sú dáta posielané výhradne cestou najnižšej metriky, čo je spravidla jedna trasa, pokiaľ sa nenasadí vyrovnávanie záťaže (Load Balancing).

Load Balancing v základe vie vyrovnávať záťaž tým, že bude dátovú premávku rozosielať dvomi či viacerými smermi najlacnejšími smermi so zhodnou metrikou do rovnakého cieľa. Avšak toto je zaručené málokedy. Používajú sa metódy na administratívne ladenie metriky, jedná sa však skôr o núdzové riešenie multi-homed sietí. Smerovací protokol EIGRP od firmy Cisco je schopný Unequal Load-Balancing [9], avšak jeho nevýhodou jeho propietárnosť a rieši situáciu len z pohľadu smerovača na vzdialenosť najbližšieho preskoku, na ktorom je technológia implementovaná. Uvedené metódy nezohľadňujú typ/triedu/prúd premávky.

Použitie IP Source Routing sa spolieha na vodpred definovanú cestu pomocou skokov na ceste, či už striktne (strict source and record route – SSRR), alebo „voľne“ (loose source and record route - LSRR) definovanú cestu. Nakoľko tieto skoky si musí zaistiť zdroj IP paketu, metóda nepripadá v úvahu.

Pre implementáciu Policy-Based Routing (PBR) by bolo nutné nakonfigurovať na každom smerovači LSR Route-Map, čo pri veľkých sieťach a mnohých dátových prúdoch sa stáva neúnosným.

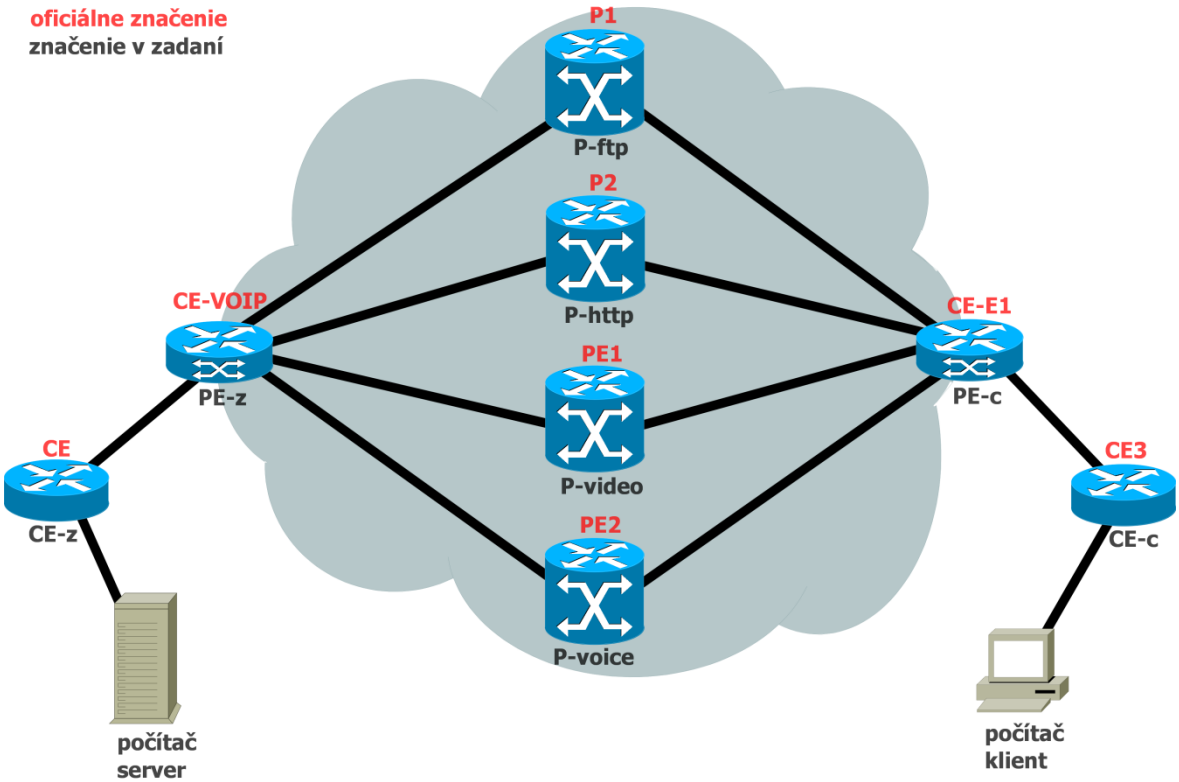
Mnou vybraná realizácia bude spoliehať na prepínací mechanizmus MPLS s použitím jeho nástrojov nadstavby pre Traffic Engineering.

5.1.2. NÁVRH RIEŠENIA

Realizácia praktickej časti bude prebiehať na vybavení vysokorýchlostného komunikačného systému z racku v učebni číslo 429 na Ústave telekomunikácií fakulty FEKT. Použijú sa z neho prepínač spolu so smerovačmi, menovite: P1, P2, PE1, PE2, CE-VOIP, CE-E1, CE, CE3. Všetky smerovače (okrem posledného menovaného) sú zo série 2800, typu 2821. Jednotlivé smerovače sa líšia svojou výbavou hardware, avšak pre potrebu nášho zadania majú dostatok spoločných znakov. Nainštalovaný operačný systém IOS je verzie 12.4(24)T11, číslo vydania fc3. Konkrétne meno

binárky súboru operačného systému je „c2800nm-advipservicesk9-mz.124-24.T1.bin“. Z názvu je patrné (advanced IP services), že obsahuje pokročilé služby potrebné na realizáciu.

Smerovač s oficiálnym označením CE3 je zo série 1800, typu 1812, má naištalovaný IOS verzie Version 12.4(6)T3. IOS je načítavaný zo súboru „c181x-advipservicesk9-mz.124-6.T3.bin“.



Obr. 6: Použité smerovače

Kabelážna infraštruktúra je zapojená do gigabitového ethernetového prepínača Cataly 2960 typového označenia WS-C2960G-48TC-L. Naištalovaný operačný sytém je 12.2(35)SE5, zavádzaný zo súboru„c2960-lanbase-mz.122-35.SE5.bin“.

Prístup ku smerovačom a prepínaču konzolovým pripojením je realizovaný pomocou konzolového serveru na smerovači 1841.

Okrem uvedenej sieťovej infraštruktúry budú použité dva osobné počítače konfigurácie Intel C2Duo6300, 2GB operačnej pamäte RAM, s naištalovaným operačným systémom. Ich funkcia bude v úlohe koncových staníc generujúcich a zachytávajúcich všetku potrebnú rôznorodú premávku, a síce ftp, http, streamované video a hlas VoIP telefónie. Toto riešenie bolo zvolené s ohľadom na dostačujúcu funkčnosť sústrediac sa primárne na problematiku transportnej siete. Použité programové vybavenie pre rôznorodú premávku je nasledovné.

Strana serveru (generátor premávky):

- FileZilla ftp server, verzia 0.9.37 beta, ako ftp server
- Apache webový server, verzia 2.2.19, ako webserver
- VLC multimediálny prehrávač, verzia 1.1.9, ako streamovací server
- linphone softvérový VoIP telefón, verzia 3.4.3, ako účastník VoIP hovoru

Strana klienta (konzument premávky):

- FileZilla univerzálny ftp-like klient, verzia 3.5.0, ako ftp klient
- Opera webový prehliadávač, verzia 11.11, ako webklient
- VLC multimediálny prehrávač, verzia 1.1.9, ako klient prehrávajúci stream
- SJphone soférový VoIP telefón, verzia 1.65.377a, ako účastník VoIP hovoru

Prenos rôznorodej premávky prebiehal majoritne zo strany počítača server na počítač klient. Pre prenos pomocou ftp protokolu bol použitý ako objekt prenosu multimediálny súbor videa s veľkosťou 814MB. Ten istý súbor bol použitý pre prenos pomocou http protokolu. Video stream menovaného videa vo Full-HD bol prenášaný použitím RTP / MPEG transport stream spolu na unicastovú IP adresu klienta formou UDP prenosu. Rovnako ten istý video súbor bol použitý ako zdroj zvuku do VoIP komunikácie, ktorá prebiehala jednosmerne medzi počítačmi server→klient. Zostavovanie hovoru bolo avšak iniciované zo strany softérového VoIP telefónu na klientskom počítači. Použitý kodek na prenos hlasu bol referenčný priemyselný štandard ITU-T G.711 konštantného dátového toku 64kbit/s. Vzorky (patterny) zachytené sieťovým analyzátorom Wireshark týchto jednotlivých typov premávok sú uvedené v prílohe.

Situácia počas prenosu na strane serveru i klienta je zachytená na snímkoch ich pracovných plôch v prílohe. Takiež je patrné, že ich hardvéru boli značne počas prenosov vyťažené. Išlo hlavne o početné diskové operácie pre prenos ftp a http, a záťažové operácie procesoru a grafickej karty ako sú prehrávanie videa vo Full-HD rozlíšení, rovnako ako aj jeho prekódovávanie a streamovanie po sieti.

V pôvodnej fyzickej infraštruktúre zapojenia tieto dva počítače nahradia IP telefóny a tak získajú pripojenie do prepínača a teda experimentálnej siete.

5.1.3. POSTUP REALIZÁCIE

Realizácia riešenia vyžaduje sadu postupných krokov a je rozdelená na niekoľko implementačných etáp:

1. Návrh a konfigurácia logickej štruktúry siete
2. Návrh a konfigurácia IP adresovania siete
3. Návrh a konfigurácia smerovacích domén
4. Implementácia prepínacieho mechanizmu MPLS
5. Implementácia VPN do MPLS
6. Konfigurácia explicitných ciest (TE tunelov)
7. Konfigurácia klasifikácie premávky
8. Konfigurácia smerovacej politiky

Každá etapa pozostáva z dielčích, tematicky súvisejúcich krokov, uzatvára kapitolu a posúva funkcionalitu siete a riešenie ďalej.

5.2. IMPLEMENTAČNÉ ETAPY

5.2.1. NÁVRH A KONFIGURÁCIA LOGICKEJ ŠTRUKTÚRY SIETE

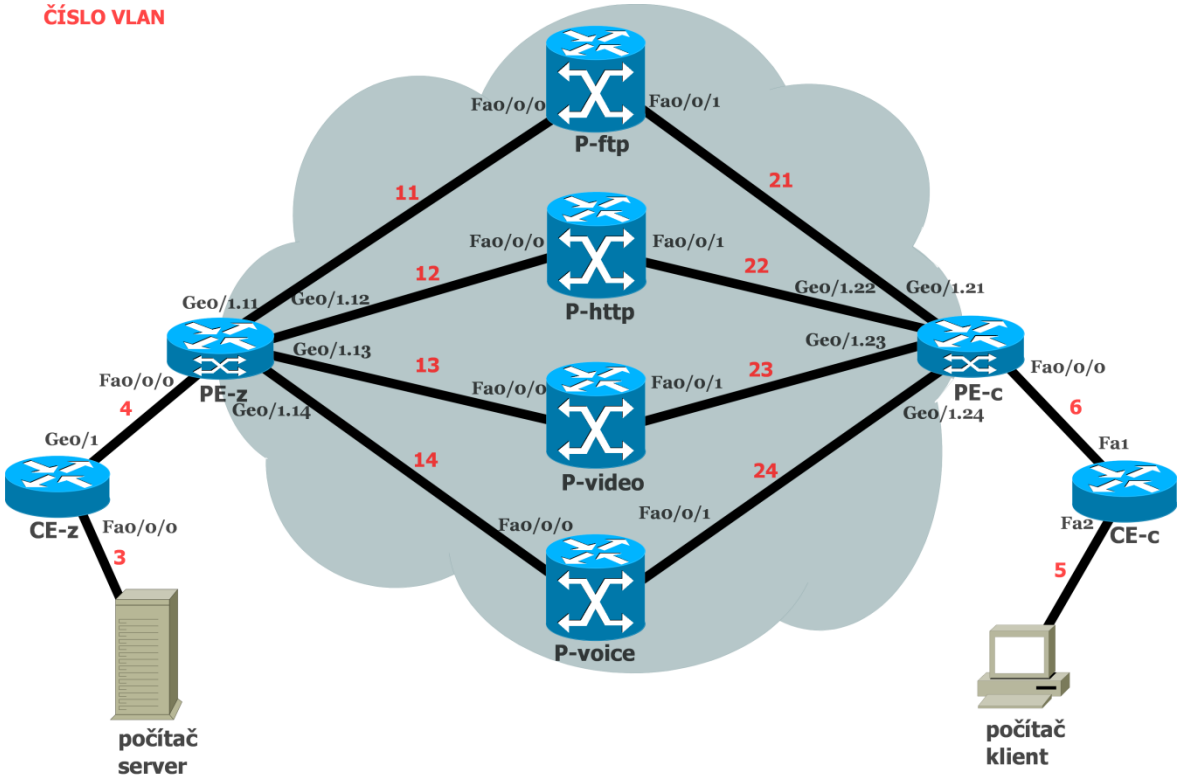
Logická topológia mnou vybranej siete spolieha na tradičnú zostavu dielčich sietí zákazníka zapojených do transportnej siete uprostred. V logickom zapojení siete je kladený dôraz na viac paralelných spojení medzi hraničnými smerovačmi transportnej siete. Fyzická štrukúra je pevne daná, modifikácia jej logickej štruktúry je možná pomocou segmentovania kolíznych a broadcastových domén použitím technológie virtuálnych sietí, *Virtual LAN* (VLAN). „Priame[6]“ spojenia medzi smerovačmi segmentácie dosiahnutej až do tretej úrovne sa realizujú priradením portov smerovačov do jednej zoskupujúcej VLANy.

Pre nízky počet počet fyzických rozhraní na hraničných smerovačoch transportnej siete jadra sa použije technológia trunkov. Tá umožňuje v spolupráci s protokolom .1Q zoskupenie viacerých VLAN nad jednou fyzickou linkou formou tagovania, ktorá v konjunkcií s trunkovým nastavením portu prepínača umožňuje vytvoriť viac podsietí na jednom rozhraní.

Konečná forma logickej topológie bola navrhnutá ako je znázornené na Obr. 7: Logické rozdelenie virtuálnych LAN. Port smerovača zdieľajúci viac sietí VLAN bol rozdelený na virtuálne podrozhrania (sub-inteface), kde každý sub-interface prináleží

[6] „Priame“ je relatívny pojem v patričnom kontexte, nakoľko všetky prepojenia medzi smerovačmi idú cez jediný zdieľaný prepínač

do patričnej VLAN. K nim bolo následne priradené zapúzdrovanie (encapsulation) pre tú danú konkrétnu VLAN, čiže logickú linku.



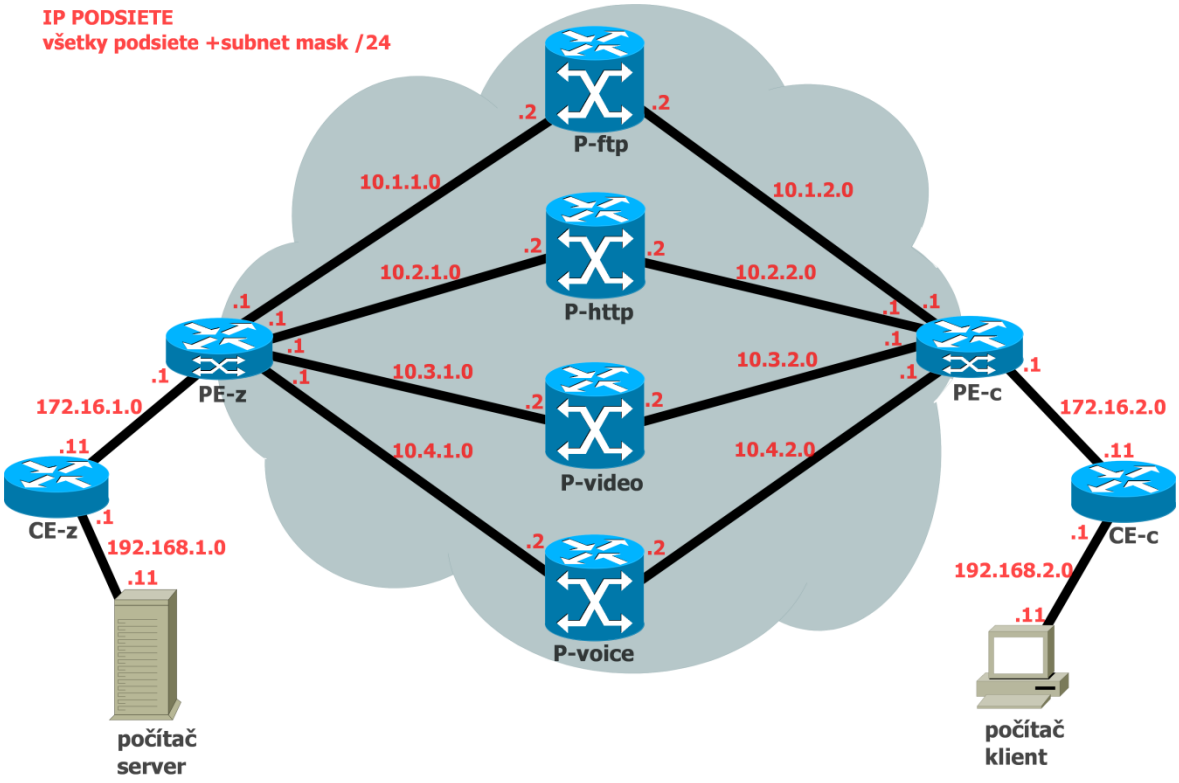
Obr. 7: Logické rozdelenie virtuálnych LAN

5.2.2. NÁVRH A KONFIGURÁCIA IP ADRESOVANIA SIETE

Rozdelenie podsietí bolo vykonané nasledovne, s ohľadom na systematickosť. Transportná sieť zdieľa podsiete z 10.0.0.0/8. Jednotlivé trasy pre ftp, http, video a hlas (voice) sú koncipované ako 10.1.X.X, 10.2.X.X, 10.3.X.X, a 10.4.X.X. Vertikálne polovice zdieľajú masku adresovania 10.X.1.X, resp. 10.X.2.X ako je názorné z obrázku. Prístupové siete sú 172.16.1.0/24 a 172.16.2.0/24, a siete koncových staníc 192.168.1.0/24 a 192.168.2.0. Ucelený pohľad na adresovanie znázoňuje Obr. 8: Plán IP adresovania.

IP adresy na hraničných smerovačoch poskytovateľa sú prideľované až k podrozhraniam adekvátne k VLANám. Rozhrania (porty) FastEthernet 0/0/0 prepínacích modulov v smere downstreamu na hraničných smerovačoch poskytovateľa PE a zákazníka CE boli použité z dôvodu nedostatočného počtu plnohodnotných L3 portov. Tieto porty boli priradené do VLANy číslo 1 lokálneho pôsobenia daného sieťového zariadenia. Následne na *Switche Virtual Interface* (SVI) tejto VLANy bola nastavená IP adresa umožňujúca smerovanie, a teda úplnú

funkcionalitu sieťovej vrstvy. Z mnou získaných znalostí z Cisco akadémie pre potreby našej siete by funkčnosť nemala byť nijak limitovaná.



Obr. 8: Plán IP adresovania

Na všetkých použitých rozhraniach prepínacích modulov smerovačov vzniklo varovanie o nezhode v natívnych VLANách voči prepínaču. Táto skutočňosť bola oznámená servisným protkolom firmy Cisco – *Cisco Discovery Protocol* (CDP). Nakoľko na strane smerovača je switchport nastavený do módu prístupového (access) a teda daná linka poníma len jednu VLANu, je hlásenie o nezhode natívnych VLAN bezpredmetné; VLAN pre prepínacie moduly má len lokálne pôsobenie na smerovači z dôvodu funkcionality tretej vrstvy switchportu.

Pre efektívnejšiu debugovateľnosť a ladenie siete z hľadiska jej logickej topológie a adresovania na tretej vrstve sa na prepínači nastavili IP adresy na SVI ku každej VLANe so vzorom X.X.X.5 opisujúc adresu danej podsiete.

Po úspešnom zavŕšení tejto fázy pri správnej funkcionalite je smerovač schopný pomocou požiadavky Echo Request protokolu ICMP úspešne zistiť dostupnosť IP adries zo zariadení podieľajúcich sa k nemu pripojených VLANách.

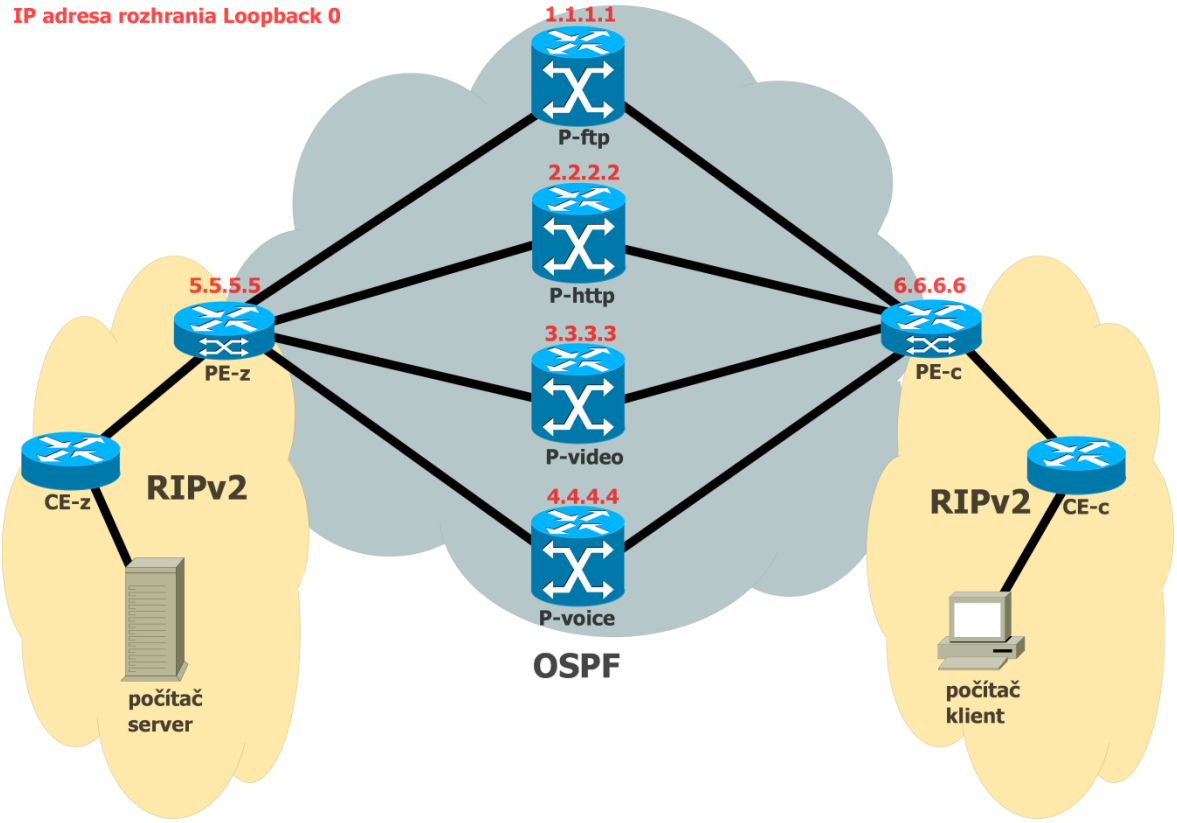
5.2.3. Návrh a konfigurácia smerovacích domén

Pre transportnú doménu, v ktorej má byť nasadené MPLS s možnosťami Traffic Engineeringu bol zvolený smerovací protokol OSPF z dôvodov skôr opísaných

v teoretickej časti tejto VŠKP. Celá transportná sieť bude z pohľadu OSPF umiestnená v chrbticovej oblasti (Area 0). Pre stabilnejšiu funkčnosť protokolu OSPF boli nakonfigurované aj tzv. virtuálne rozhrania *Loopback* s adresami 1.1.1.1 až 6.6.6.6.

Pre účely nášho OSPF bola taktiež upravená konštanta referenčnej šírky pásma, z nej počíča smerovací protokol cenu jednotlivých liniek. Štandardná hodnota zohľadňuje rýchlosť linky do 100Mbit/s vrátane, pre náš prípad bola upravená zo 100 na 100000 (v Mbit/s).

Na prístupové a koncové siete bola zvolená beztriedna (classless) varianta v podaní smerovacieho protokolu *Routing Information Protocol* (RIP) verzie 2. Jeho funkcionalita potrebná pre oznamovanie týchto sietí typu „stub network" je úplne dostačujúca. Pohľad na situáciu ilustruje nasledujúci obrázok-



Obr. 9: Smerovacie domény

Uvedené smerovacie protokoly boli aplikované na prináležiace sieťové rozhrania smerovačov do patričných smerovacích domén. V prípade CE smerovačov bolo aplikované pravidlo pasívneho rozhrania (passive interface) z pohľadu smerovacieho protokolu RIPv2 na rozhrania koncových sietí, čo obmedzilo zasielanie smerovacích informácií na koncové stanice. Napriek tomuto obmedzeniu RIP tieto siete (192.168.X.X/24) rozhlasuje aj naďalej, čo je v rámci výsledku realizácie žiadané.

Na konci tejto etapy majú smerovače jadra (P) úplnú znalosť o smerovaní v transportnej sieti. Hraničný smerovač PE má znalosť okrem ciest do posietí transportnej siete aj ohľadne prístupovej a koncovej siete na svojej strane domény. Smerovač na hrane zákazníka (CE) pôsobí ako zdroj smerovacích informácií zo strany zákazníkového členenia siete pre nepriamo pripojené siete voči transportnej siete.

5.2.4. Implementácia prepínacieho mechanizmu MPLS

Implementácia MPLS bola pomerne jednoduchá. Po globálnom „zapnutí" a označení rozhraní prináležiacich v MPLS doméne sa explicitne nastavil protokol distribúcie značiek. Uprednostnil sa protokol LDP, nakoľko je priemyselným štandardom a spĺňa rovnakú funkcionalitu ako TDP.

Ako prax ukázala, mechanizmy MPLS dedia identifikátor smerovača z IP adresy rozhrania Loopback a pre správnu funkčnosť je potrebné, aby tieto IP boli oznámené a smerovateľné z pohľadu záznamu smerovacej tabuľky smerovača LSR v doméne. LDP rovnako OSPF využíva tieto adresy na identifikáciu, avšak na rozdiel od OSPF, LDP vyžaduje si k nim smerovateľnú cestu. Bez nej neprebehne automatická výmena párovania značiek medzi LSR smerovačmi. Z tohoto dôvodu boli rozhrania Loopback 0 dodatočne priradené do rozhlasovania smerovacieho protokolu OSPF.

Úspešným zavŕšením tejto sate je funkčnosť prepínania MPLS spolu s naplnenou databázou párovania značiek voči FEC, a to o záznamy svoje i susedných LSR. Funkcia MPLS sa dá otestovať trasovaním.

5.2.5. Implementácia VPN do MPLS

Ďalším veľmi dôležitým krokom v implementačnom postupe je konfigurácia VPN nad MPLS sieťou. V našej experimentálnej sieti sa pokúsime nastaviť typ VPN L3, čo znamená transport smerovacích informácií medzi smerovačmi zákazníka CE. Z pohľadu smerovačov CE budú mať vedomosti o svojich prístupových a koncových sieťach získané pomocou smerovacieho protokolu RIP.

K tomuto účelu musíme vytvoriť virtuálnu smerovaciu tabuľku *Virtual Routing and Forwarding* (VRF), ktorá bude obsahovať informácie z protokolu RIP. Táto tabuľka obsahuje smerovacie informácie, ktoré je potrebné označiť unikátnym identifikátorom *Route Distinguisher* (RD) viažúcim sa k danej VRF (v našom prípade 65001:1), umožňujúc ich odlíšiť v prípade použitia viacerých VRF a zákazníckych sietí. Následne sa VRF umiestni na rozhrania VLAN 1 hraničných smerovačov PE. Pre výmenu smerovacích informácií medzi VRF tabuľkami navzájom sa použije smerovací protokol *Border Gateway Protocol* (BGP) pracujúci vnútri jedného autonómneho systému.

Posledným dielčím krokom tejto implementačnej fázy je zapnutie redistribúcií medzi smerovacími protokolmi, a to sú nasledovné dve:

- z RIP do BGP, kde BGP následne prenesie smerovacie informácie z jednej VRF cez MPLS sieť do VRF na druhom PE
- z BPG do RIP, kde sa smerovač CE na druhej strane siete dozvie z protokolu RIP o existencií druhej časti koncovej siete zákazníka a jej prístupovej sekcii

Funkčné naplnenie tejto fázy je stav, v ktorom CE smerovače zákazníka zdieľajú vedia smerovacie informácie pomocou RIPu a koncové stanice sú schopné vzájomnej komunikácie.

5.2.6. KONFIGURÁCIA EXPLICITNÝCH CIEST (TE TUNELOV)

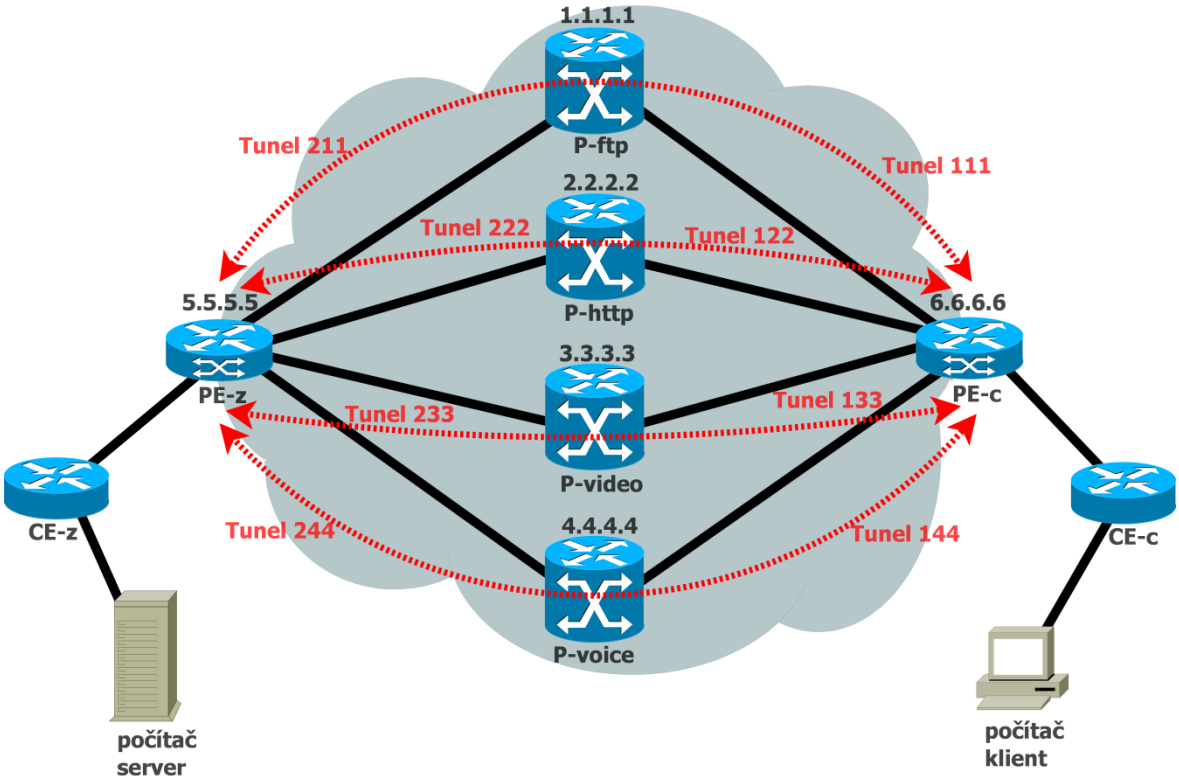
Implementácia TE do MPLS sa skladá z viacerých krokov. Najskôr je potrebné aplikovať na všetky rozhrania a podrozhrania, ktoré budú použitie pre technológiu „tunelovania“, maximálne rezervovateľné pásmo, tak aj maximálnu možnú veľkosť rezervovateľného pásma pre jeden tunel (v našom prípade boli použité hodnoty 70Mbit a 65Mbit).

Následne je potrebné zapnúť možnosť vytvárania MPLS TE tunelov v globálnom konfiguračnom režime tam, kde je to potrebné (v našom prípade na všetkých LSR), tak aj na konkrétnych fyzických rozhraniach podieľajúcich sa v MPLS doméne, na nich sa budú TE tunely realizova (taktiež všetky MPLS rozhrania).

Po tejto konfigurácií je nutné oznámiť smerovaciemu protokolu OSPF fakt, že sa nadstavba pre TE bude používať, a teda aktivovať jeho rozširujúce funkcie OSPF-TE identifikujúc mu pole jeho pôsobnosti na oblasť chrbticovej siete (Area 0), taktiež nastavenie idetifikátoru smerovača použitím virtuálneho rozhrania Loopback 0.

Takto nastavené LSR v MPLS doméne sú pripravené prevádzkovať Traffic Engineering. Konfigurácia samotných tunelov sa vykonáva už len na hraničných smerovačoch LER. Tunel (či LSP) je zo svojej povahy záležitosť jednosmerná, takže bolo potrebné nakonfigurovať dva tunely na jednu trasu (jeden v smere zdroj-cieľ, druhý v smere cieľ-zdroj), dohromady 8 tunelov: dvojice pre FTP, HTTP, VIDEO, VOICE. Každému tunelu bola priradená požiadavka na alokáciu prenosových prostriedkov o veľkosti 60Mbit/s. Situáciu a jednotlivé tunely vykresľuje Obr. 10: Tunely Traffic Engineeringu v MPLS doméne. Znázornené sú obojsmerné tunely, avšak v skutočnosti sa jedná o páry protichodných tunelov medzi smerovačmi PE. Tunelom boli pridelené IP adresy z virtuálneho rozhrania Loopback 0, a zadané cieľové IP adresy taktiež virtuálneho rozhrania druhého smerovača LER. Trasy boli nadefinované explicitne skok po skoku, ako je uvedené v konfiguračných súboroch

v elektronickej prílohe. Taktiež bolo pri všetkých tuneloch zadaná požiadavka na umiestnenie do smerovacích tabuliek smerovačov LER, kde nahradili pôvodné OSPF oznámenia.



Obr. 10: Tunely Traffic Engineeringu v MPLS doméne

Na konci tejto implementačnej etapy máme nadefinovaných osem explicitných trás, po nich sa rozosiela premávka (pretože boli umiestnené do smerovacej tabuľky) formou load-balancingu, nakoľko tunelom bolo priradené rovnaké pásmo. V prípade komplexnejšej logickej topológie by bola názornejšia použiteľnosť ich kofigurácie (napr. pri full-mesh prepojení smerovačov jadra).

5.2.7. KONFIGURÁCIA KLASIFIKÁCIE A ZNAČKOVANIA PREMÁVKY

Pôvodná myšlienka implementácie mala spoliehať na funkcie značkovania (marking) premávky, podľa nej by sa premávka rozlíšila – klasifikovala (classification) v mape politiky (policy-map) použitím tried map (class-map) pre definovanie pravidiel zhody jednotlivých typov premávky. Takto klasifikovaná premávka mala byť označená poľom IPP (IP precedence) v záhlavi IP paketu, jeho hodnota mala byť rozhodujúca pre zatrieďovanie do kontrétneho tunelu pri použití smerovacej mapy (route-map). Avšak ako sa mi v praxi ukázalo, tak konštrukcia route-map pravdepodobne nedokáže zohľadňovať svoje rozhodnutia na základe hodnot z informačných polí

používaných v QoS službách, a teda myšlienka klasifikácie a značkovania neuspela a ich konfigurácia nie je vo finálnych konfiguračných súboroch zahrnutá.

5.2.8. KONFIGURÁCIA SMEROVACEJ POLITIKY

Nakoľko pôvodný plán s klasifikáciou a značkovaním premávky sa ukázal ako nerealizovateľný, bolo potrebné použiť iný prístup.

Druhým prístupom bolo použitie štyroch policy-máp pre individuálne typy premávky, kde každá policy map zahŕňala v sebe jednu class-map, jej úlohou bola klasifikácia jednotlivých typov. Následne tieto policy-mapy boli zahrnuté ako podmienky zhody v jednodlivých záznamov route-map ako podmienky zhody. Táto konfigurácia – hoci tentokrát syntakticky možná a správna, v sebe zahrňovala pravdepodobne sémantickú chybu, lebo nefungovala vôbec.

Ako poslednou vyskúšanou možnosťou bolo podľa [22]použitie rozšírených prístupových zoznamov – extended Access-List (ACL) v konštrukcií route-mapy. Toto riešenie taktiež sa pre zadanie práce nejavilo ako funkčné, a teda cieľ zostáva nenaplnený.

Pre všetky tri varianty bolo samozrejmosťou zahrnutie vrf do pravidiel nastavenia pre použitú route-mapu.

5.3. ROZBOR PROBLÉMU

Správanie použitej tretej varianty (viac-menej oficiálneho zo strany výrobcu) riešenia PBR v našej experimentálnej sieti bolo rozobrané.

Sieť bola sledovaná v stave počas implementácie riešenia. Po aplikovaní route-mapy na rozhranie a odstránení VRF tabuľky sa automaticky systémom odstrálnila IP adresa, ktorá bola zviazaná s VRF tabuľkou. Týmto okamihom stratila koncová a prístupová sieť konektivitu so svojou druhou polovicou za transportnou sieťou. Použitím trasovania z koncového uzla siete (počítača) sa zistilo, že blízky PE smerovač nemá dostupnú nami vybranú cieľovú sieť (konkrétne počítač na opačnom konci). Následne pozorovaním smerovacej tabuľky priľahlého smerovača CE sa zistilo, že záznamy oznamované protokolom RIP starnú, až sa formou časovačov stanú neplatnými a sú zo smerovacej tabuľky odstránené.

Z tohoto správania siete som zhodnotil, že aplikáciou route-mapy na rozhranie prístupovej siete smerovača PE sa prerušuje konektivita s druhou časťou siete zákazníka. Smerovacie informácie nie sú z nejakého dôvodu prenášané pomocou BGP medzi PE smerovačmi, čo vyúsťuje k starnutiu smerovacích informácií v smerovacej tabuľke, a následnej strate aj tej čiastočnej konektivity od koncového uzlu po bližší smerovač PE.

Otáznym taktiež zostáva, či má byť odstránená VRF tabuľka z rozhrania VLAN 1, alebo nie. Avšak ako zdroj REFERENCIA uvádza,

%% Policy Based Routing is NOT supported for VRF" interfaces

no dané riešenie podľa zdroja nevedie k úspechu.

Daná situácia je dosť už komplexná, nakoľko v nej hrá veľa faktorov navzájom sa ovplyvňujúcich, menovite:

- používanie VRF na rozhraní
- redistribúcia medzi VRF navzájom pre potreby VPN
- prístupové zoznamy vyhodnocujúce premávku
- route-mapa nejasnej konštrukcie (pokiaľ má byť VRF jej súčasťou alebo nie) spoliehajúca na správne podmienky prístupových zoznamov
- usmiestnenie route-mapy kolidujúce s použitím VRF na rozhraní

Pravdepodobným problémom bude redistribúcia VRF po aplikovaní route-mapy, kde tento fakt musí byť pravdepodobne do route-mapy explicitne zahrnutý.

Na ujasnenie tejto komplexnej situácie by bola potrebná pomoc tretej strany v podobe skúseného odborníka v roli konzultanta, a konzultácií s ním ohľadom riešenia problému, nakoľko dostupná literatúra popisuje jednotlivé problematiky učebnicovo a osobitne, nie ich vzájomnú súvislosť, ovplyvňovanie sa a vylučovanie navzájom. Avšak podstúpením tohoto kroku by sa táto VŠKP a jej vypracovanie dostalo do rozporu s čestným prehlásením, a to spôsobiť nechcem.

5.4. VÝSLEDNÁ PODOBA REALIZÁCIE

Nakoľko triedenie premávky podľa typu do TE tunelov nefungovalo ako bolo v pláne zaumienené, časť zadania uvádzajúca rôznu kvalitu transportnej siete nebola do výslednej realizácie zahrnutá, keďže správanie siete na PBR nástroja nekorenšpondovalo s predpokladaným, a zmenalo by výber cesty podľa najlacnejšej linky. Ten by sa dal ovplyvniť zmenou OSPF ceny pre daný tunel za účelom load-balancingu, avšak pri linkách s rôznou kvalitou by to nebolo férové správanie pri nezohľadňovaní kvality služieb.

Samotné nastavenie liniek pre rôznu kvalitu sa dá jednoducho ovplyvniť upravením množstva dostupného a rezervovateľného pásma v protokole RSVP, tak prípadne aj pri vytváraní na TE tunela.

V terajšom stave bez aplikovaného PBR je na transportnej sieti vykonávaný load-balancing rozkladania záťaže, ako aj znázorňuje snímka trasovania zo smerovača na Obr. 11: Load-balancing medzi LER. Sieť dosahuje aj pod plným

nasadením premávky z koncových počítačov výbornú odozvu, ako je možné vidieť na snímkoch pracovných plôch serveru aj klienta. Snímky sú priložené v prílohe.

```
PE-z#traceroute
Protocol [ip]:
Target IP address: 6.6.6.6
Source address: 5.5.5.5
Numeric display [n]: 8
Timeout in seconds [3]: 1
Probe count [3]: 4
Minimum Time to Live [1]:
Maximum Time to Live [30]:
Port Number [33434]:
Loose, Strict, Record, Timestamp, Verbose[none]: Verbose
Loose, Strict, Record, Timestamp, Verbose[V]:
Type escape sequence to abort.
Tracing the route to 6.6.6.6

  1 10.3.1.2 [MPLS: Label 29 Exp 0] 0 msec
    10.1.1.2 [MPLS: Label 23 Exp 0] 0 msec
    10.4.1.2 [MPLS: Label 24 Exp 0] 0 msec
    10.2.1.2 [MPLS: Label 23 Exp 0] 0 msec
  2 10.3.2.1 0 msec
    10.1.2.1 0 msec
    10.4.2.1 0 msec
    10.2.2.1 0 msec
PE-z#
```

Obr. 11: Load-balancing medzi LER

5.5. ZHRNUTIE

V praktickej realizácií sa nám podarilo nakonfigurovať MPLS sieť vo funkcií transportnej siete spájajúcej dve okrajové smerovacie domény.

Bol implementovaný mechanizmus VPN pre zachovanie privátnosti riešenia (jedna z typických požiadaviek na transportnú sieť) z pohľadu koncových sietí, a možnú škálovateľnosť.

Taktiež do experimentálnej siete bolo aplikované rozšírenie MPLS o možnosti Traffic Engineeringu. Vytvorili sa explicitné trasy, avšak korektné nasmerovanie rôznorodej premávky do nich už bolo problematické, ako je opísané v sekcii vyššie. Samotný problém a jeho možná príčina je v časti „Rozbor problému“. Sieť je i napriek tomu funkčná, nastavená do módu load-balancingu. Konfiguračné súbory smerovačov a prepínača sú umiestnené v elektronickej podobe v prílohe.

Samotné nastavenie liniek s rôznou hodnotou sa nepoužilo z dôvodu, opísaného v predchádzajúcej sekcií. Samotný proces je jednoduchý, avšak činnosť stráca význam bez funkčného PBR. Toto je taktiež opísané v predchádzajúcej sekcií.

K úplnému naplneniu zadania postačuje pravdepodobne len jedna, avšak sofistikovane konštruovaná route-mapa.

ZÁVER

Bakalárska práca popísala problematiku a princíp smerovania paketov v transportnej sieti postavenej na prepínacom mechanizme MPLS s dôrazom na porovnávanie smerovania a prepínania v IP sieti.

Ďalej pojednala o princípe, metódach a možnostiach Traffic Engineeringu v transportných sieťach. Na základe vlastností jednotlivých metód bol uskutočnený výber jednej metódu pre realizáciu praktickej časti experimentálnej siete podľa zadania. K danej metóde bola venovaná ešte samostatná kapitola použiteľných nástrojov.

Praktická časť tejto VŠKP obsahuje úvahy ohľadom možných riešení, opis praktickej realizácie a implementačný postup konfigurácie siete. Konfigurácia bola zvládnutá korektne skoro do posledného kroku, ako bolo uvedené a zhodnotené v texte k praktickej časti.

Z celého zadania zostala posledná vec, ktorú je potrebné implementovať. Je ňou route-map sofistikovanej konštrukcie (pravdepodobne).

LITERATÚRA

[1] **PETERKA, J.** *Báječný svět počítačových sítí, Část XXVI: ATM, technologie, která nezvítězila.* e-archiv Jiřího Peterky. [Online] Posledná aktualizácia: Marec 2007 http://earchiv.cz/b07/b0600001.php3.

[2] **REKHTER, Y.; DAVIE, B.; KATZ, D.** *RFC 2105 - Cisco Systems' Tag Switching Architecture Overview.* The Internet Engineering Task Force (IETF). [Online] Február 1997. http://tools.ietf.org/html/rfc2105.

[3] **ROSEN, E.; VISWANATHAN, A.; CALLON, R.** RFC 3031 - Multiprotocol Label Switching Architecture. The Internet Engineering Task Force (IETF). [Online] Január 2001. http://tools.ietf.org/html/rfc3031.

[4] **REED, D. P.** *That Sneaky Exponential.* The Website of David P. Reed and his family. [Online] http://www.reed.com/dpr/locus/gfn/reedslaw.html.

[5] **DE GHEIN, L.** *MPLS Fundamentals.* s.l. : Cisco Press, 2007. 1-58705-197-4

[6] **ALVAREZ, S.** *QoS for IP/MPLS networks.* s.l. : Cisco Press, 2006. ISBN 1-58705-233-4.

[7] **Cisco Systems, Inc.** *Any Transport over MPLS.* [dokument pdf] 2007.

[8] **BENVENUTI, Ch.** *Understanding Linux Network Internals.* s.l. : O'Reilly Media, 2005. ISBN 0596002556.

[9] **ODOM, W.; HEALY, R.; MEHTA, N.** *Směrování a přepínání sítí.* s.l. : Computer Press, 2009. 978-80-251-2520-5.

[10] **ŠMRHA, P.; VERICH, J.** *QoS Design and IMplementation in the CESNET2 MPLS-based Backbone.* s.l. : PB tisk, 2009. ISBN 978-80-904173-4-2.

[11] **CHRIS.** MPLS-TE and network traffic engineering. *TechnologyInside.* [Online] [Dátum: 15. April 2011.] http://technologyinside.com/2007/04/02/traffic-engineering-capacity-planning-and-mpls-te/.

[12] **KALUNGA, J.** *What is the role of teletraffic engineering in broadband networks?* Connexions®. [Online] Február 2006. http://cnx.org/content/m13376/latest/.

[13] **Cisco Systems, Inc.** *OSPF Design Guide.* Cisco Systems. [Online] Aug 2005. [Dátum: 28. April 2011.] http://www.cisco.com/en/US/tech/tk365/technologies_white_paper09186a0080094e9e.shtml. Document ID: 7039.

[14] **Cisco Systems, Inc.** *How Does Load Balancing Work?* [Online] August 2005. [Dátum: 1. May 2011.] http://www.cisco.com/en/US/tech/tk365/technologies_tech_note09186a0080094820.shtml. Document ID: 5212.

[15] **FORTZ, B.** *Internet Traffic Engineering by optimizing OSPF weights***.**

[16] **FORTZ, B.** *Traffic Engineering with traditional IP routing protocols.*

[17] **ARGYRAKI, K.***Loose source routing as mechanism for traffic policies.*

[18] **ANDERSSON, L.; SWALLOW, G.** *RFC 3468: The Multiprotocol Label Switching (MPLS) Working Group decision on MPLS signaling protocols.* 2003.

[19] **DOYLE, J.** *Understanding Signaling in MPLS Networks.* Network World. [Online] 27. March 2008. [Dátum: 5. May 2011.] http://www.networkworld.com/community/node/26395.

[20] **KATZ, D.; KOMPELLA, K.; YEUNG, D.** *RFC 3630 - Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2.* 2003.

[21] **OSBORNE, E.; SIMHA, A.** *Traffic Engineering with MPLS.* s.l. : Cisco Press, 2002. IBSN 1-58705-031-5.

[22] **Cisco Systems, Inc.** *How Does Unequal Cost Path Load Balancing (Variance) Work in IGRP and EIGRP?* [Online] http://www.cisco.com/en/US/tech/tk365/technologies_tech_note09186a008009437d.shtml.

[23] **Cisco Systems, Inc.** *MPLS VPN VRF Selection using Policy Based Routing.* Cisco Systems. [Online] 2007. http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_2s/feature/guide/fs_pbrsv.html.

[24] **AWDUCHE, D.; BERGER, L.; GAN, D.** *RFC 3209 - RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels.* The Internet Engineering Task Force (IETF). [Online] December 2001. http://tools.ietf.org/html/rfc3209.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

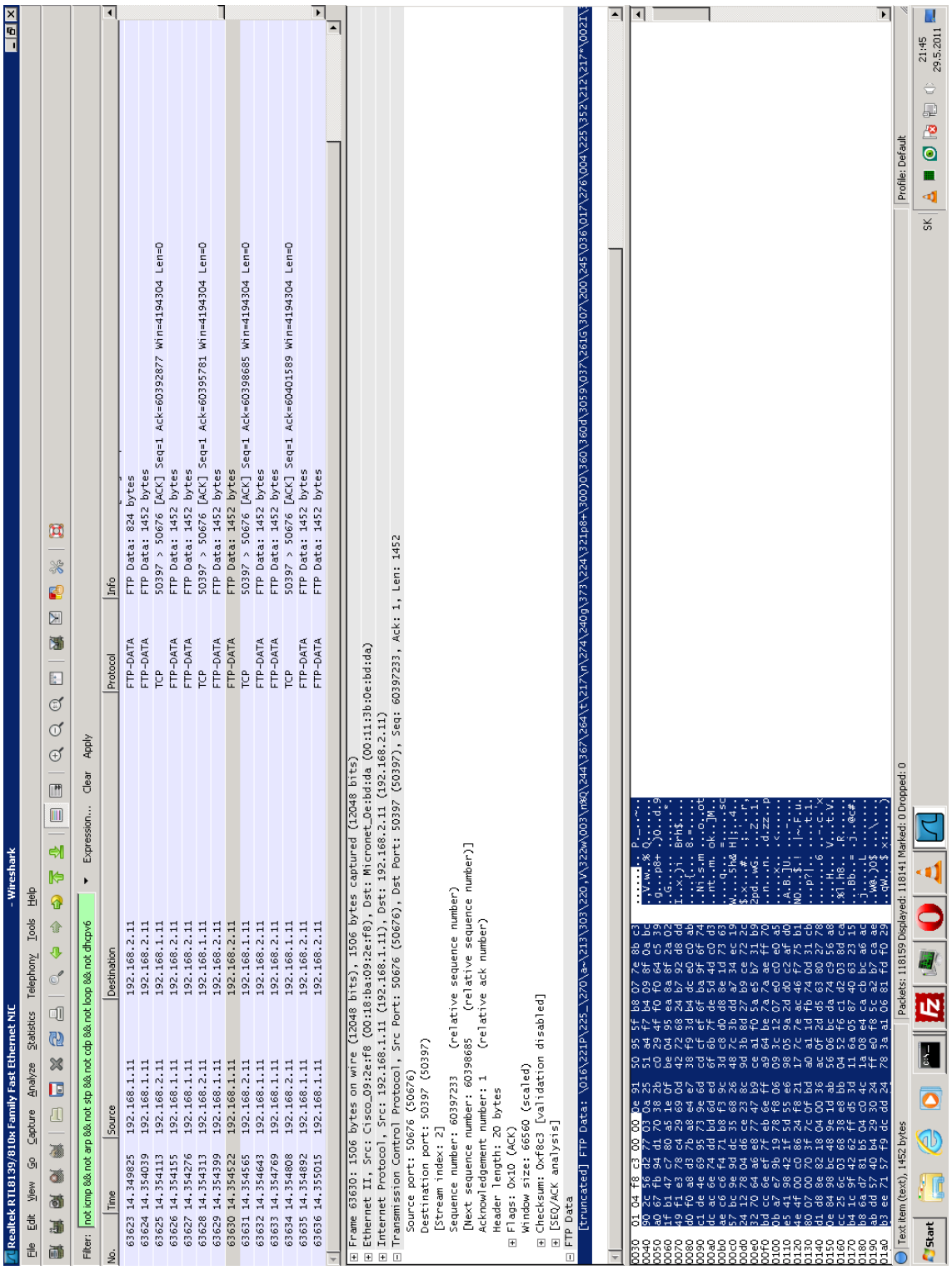
ATM – Asynchronou Transfer Mode
BGP – Border Gateway Protocol
CDP – Cisco Discovery Protocol
CE – Customer Edge
CR LDP – Constraint-based Routing Label Distribution Protocol
CSPF – Constrained Shortest Path First
DiffServ – Differentiated Services
DSCP – Differentiated Services Code Point
EIGRP – Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
EXP – Experimental
FIB – Forwarding Information Base
ftp – file transfer protocol
http – hypertext transport protocol
IETF – Internet Engineering Task Force
IntServ – Integrated services
IOS – Internetwork Operating System
IP – Internet Protocol
IS-IS – Intermediate System – Intermediate System
ISO OSI – International Organization for Standardization
Open Systems Interconnection
LDP – Label Distribution Protocol
LER – Label Edge Router
LFIB – Label Forwarding Information Base
LIB – Label Information Base
LIFO – Last in-First out
LSP – Label Switched Path
LSR – Label Switched Router
LSRR – Loose Source and Record Route
MPLS – Multiprotocol Label Switching
OSPF – Open Shortest Path Frist
PBR – Policy Based Routing

PE	–	Provider Edge
PVC	–	Private Virtual Circtuit
QoS	–	Quality of Service
RD	–	Route Destinguisher
RIP	–	Routing Information Protocol
RSVP	–	Resource Reservation Protocol
SPF	–	Shortest Path First
SSRR	–	Strict Source and Record Route
SVI	–	Switch Virtual Interface
TE	–	Traffic Engineering
TTL	–	Time to Live
VC	–	Virtual Circuit
VLAN	–	Virtual LAN
VoIP	–	Voice over IP
VPN	–	Virtual Private Network
VRF	–	Virtual Routing and Forwarding
WAN	–	Wide Area Network

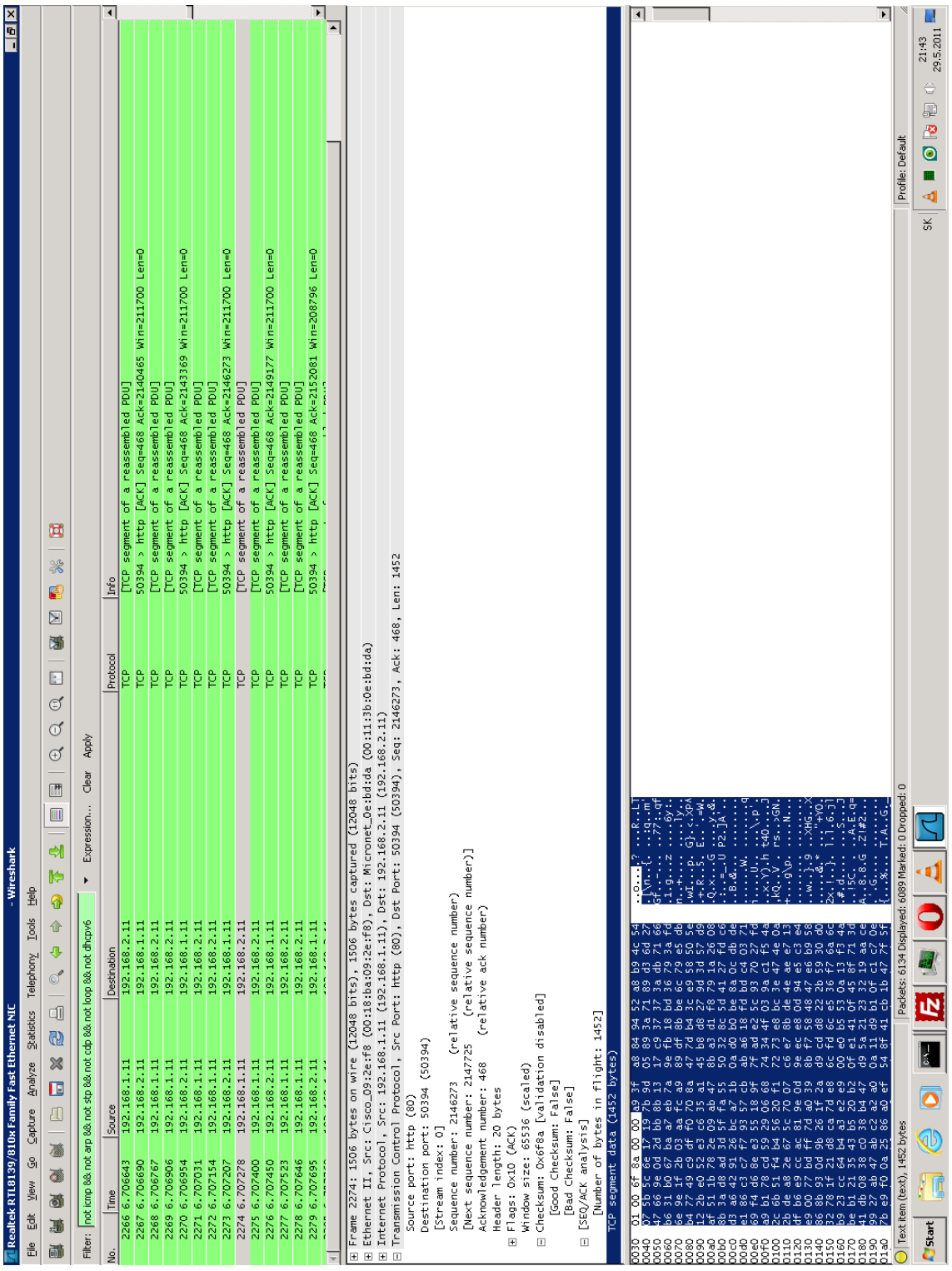
PRÍLOHY:

A1: PATTERN FTP PREMÁVKY
A2: PATTERN HTTP PREMÁVKY
A3: PATTERN VIDEO PREMÁVKY
A4: PATTERN VOICE PREMÁVKY
A5: PROSTREDIE PRACOVNEJ PLOCHY SERVERA
A6: PROSTREDIE PRACOVNEJ PLOCHY KLIENTA

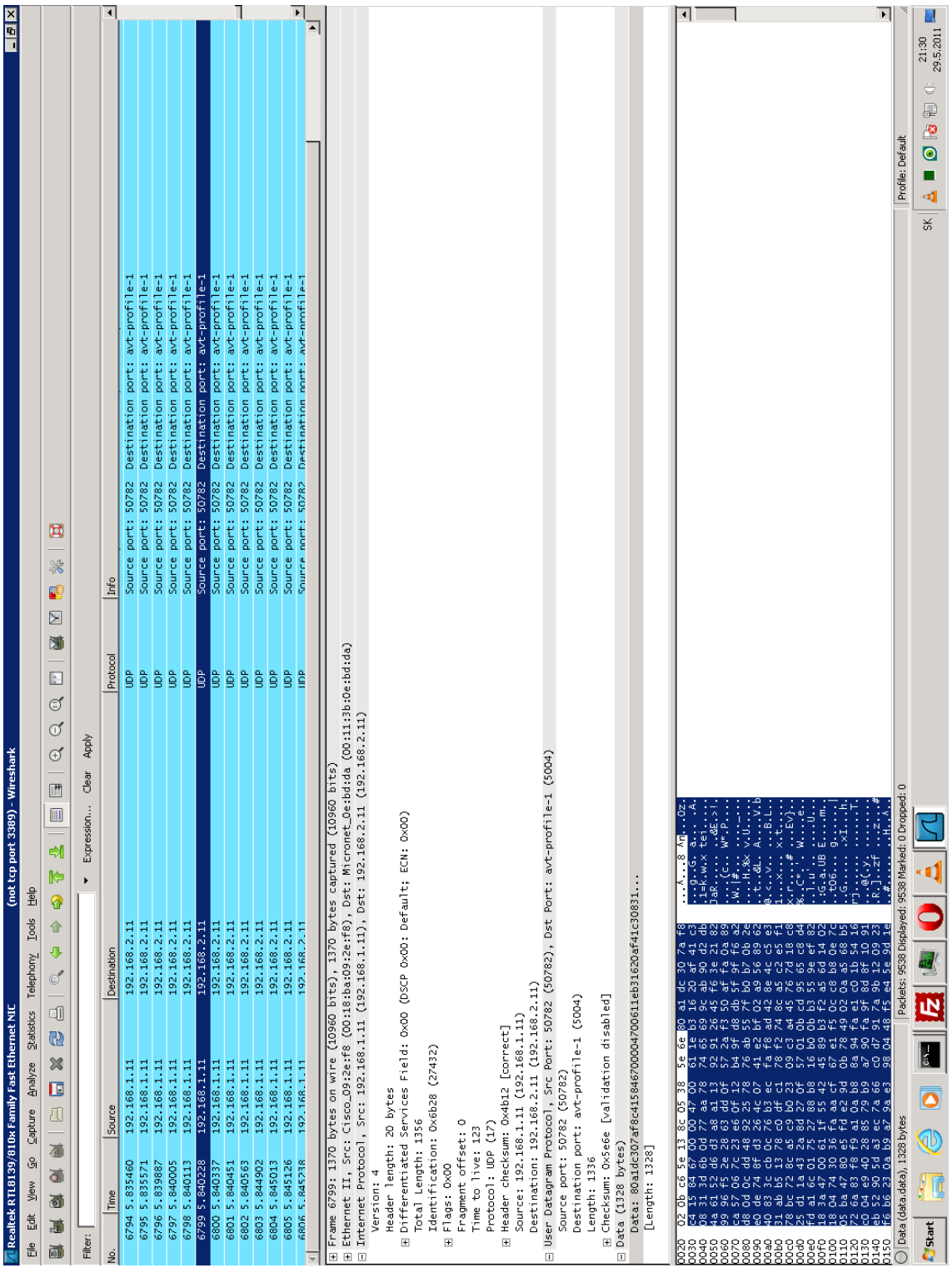
A1


Realtek RTL8139/810x Family Fast Ethernet NIC - Wireshark
File Edit View Go Capture Analyze Statistics Telephony Tools Help
Filter: not icmp && not arp && not stp && not cdp && not loop && not dhcpv6
Expression... Clear Apply
No. Time Source Destination Protocol Info
63623 14.349825 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 824 bytes
63624 14.354039 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63625 14.354113 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50397 > 50676 [ACK] Seq=1 Ack=60392877 Win=4194304 Len=0
63626 14.354155 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63627 14.354276 192.168.2.11 192.168.1.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63628 14.354313 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50397 > 50676 [ACK] Seq=1 Ack=60395781 Win=4194304 Len=0
63629 14.354399 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63630 14.354522 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63631 14.354565 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50397 > 50676 [ACK] Seq=1 Ack=60398685 Win=4194304 Len=0
63632 14.354643 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63633 14.354769 192.168.2.11 192.168.1.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63634 14.354808 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50397 > 50676 [ACK] Seq=1 Ack=60401589 Win=4194304 Len=0
63635 14.354892 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
63636 14.355015 192.168.1.11 192.168.2.11 FTP-DATA FTP Data: 1452 bytes
Frame 63630: 1506 bytes on wire (12048 bits), 1506 bytes captured (12048 bits)
Ethernet II, Src: Cisco_09:2e:f8 (00:18:ba:09:2e:f8), Dst: Micronet_0e:bd:da (00:11:3b:0e:bd:da)
Internet Protocol, Src: 192.168.1.11 (192.168.1.11), Dst: 192.168.2.11 (192.168.2.11)
Transmission Control Protocol, Src Port: 50676 (50676), Dst Port: 50397 (50397), Seq: 60397233, Ack: 1, Len: 1452
Source port: 50676 (50676)
Destination port: 50397 (50397)
[Stream index: 2]
Sequence number: 60397233 (relative sequence number)
[Next sequence number: 60398685 (relative sequence number)]
Acknowledgement number: 1 (relative ack number)
Header length: 20 bytes
Flags: 0x10 (ACK)
Window size: 66560 (scaled)
Checksum: 0xf8c3 [validation disabled]
[SEQ/ACK analysis]
FTP Data
[truncated] FTP Data: \016\221P\225_\270\a~\213\303\220 V\322eW\003\rRQ\244\367\264t\217?\n\274\240g\373\224\321p8+\300)O\360\360d\3059\037\261G\307\200\245\036\017?\276\004\225\352\212\217r*\002\1
Text Item (text), 1452 bytes
Packets: 118159 Displayed: 118141 Marked: 0 Dropped: 0
Profile: Default
Start
21:45
29.5.2011

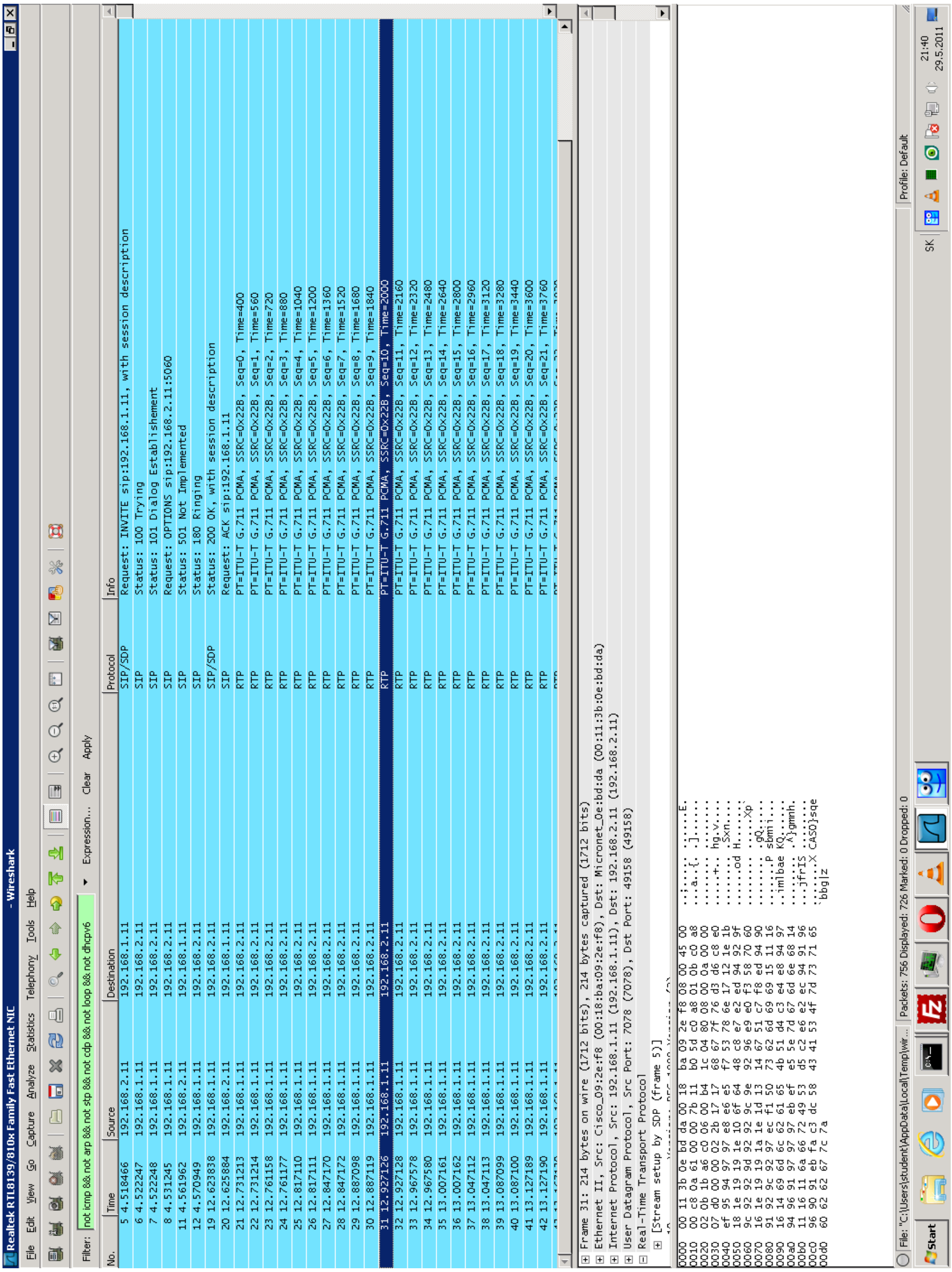
A2


Realtek RTL8139/810x Family Fast Ethernet NIC - Wireshark
File Edit View Go Capture Analyze Statistics Telephony Tools Help
Filter: not icmp && not arp && not stp && not cdp && not loop && not dhcpv6
Expression... Clear Apply
No. Time Source Destination Protocol Info
2266 6.706643 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2267 6.706690 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50394 > http [ACK] Seq=468 Ack=2140465 Win=211700 Len=0
2268 6.706767 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2269 6.706906 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2270 6.706954 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50394 > http [ACK] Seq=468 Ack=2143369 Win=211700 Len=0
2271 6.707031 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2272 6.707154 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2273 6.707207 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50394 > http [ACK] Seq=468 Ack=2146273 Win=211700 Len=0
2274 6.707278 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2275 6.707400 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2276 6.707450 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50394 > http [ACK] Seq=468 Ack=2149177 Win=211700 Len=0
2277 6.707523 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2278 6.707646 192.168.1.11 192.168.2.11 TCP [TCP segment of a reassembled PDU]
2279 6.707695 192.168.2.11 192.168.1.11 TCP 50394 > http [ACK] Seq=468 Ack=2152081 Win=208796 Len=0
Frame 2274: 1506 bytes on wire (12048 bits), 1506 bytes captured (12048 bits)
Ethernet II, Src: Cisco_09:2e:f8 (00:18:ba:09:2e:f8), Dst: Micronet_0e:bd:da (00:11:3b:0e:bd:da)
Internet Protocol, Src: 192.168.1.11 (192.168.1.11), Dst: 192.168.2.11 (192.168.2.11)
Transmission Control Protocol, Src Port: http (80), Dst Port: 50394 (50394), Seq: 2146273, Ack: 468, Len: 1452
Source port: http (80)
Destination port: 50394 (50394)
[Stream index: 0]
Sequence number: 2146273 (relative sequence number)
[Next sequence number: 2147725 (relative sequence number)]
Acknowledgement number: 468 (relative ack number)
Header length: 20 bytes
Flags: 0x10 (ACK)
Window size: 65536 (scaled)
Checksum: 0x6f8a [validation disabled]
[Good Checksum: False]
[Bad Checksum: False]
[SEQ/ACK analysis]
[Number of bytes in flight: 1452]
TCP segment data (1452 bytes)
Text Item (text), 1452 bytes
Packets: 6134 Displayed: 6089 Marked: 0 Dropped: 0
Profile: Default
Start
21:43
29.5.2011

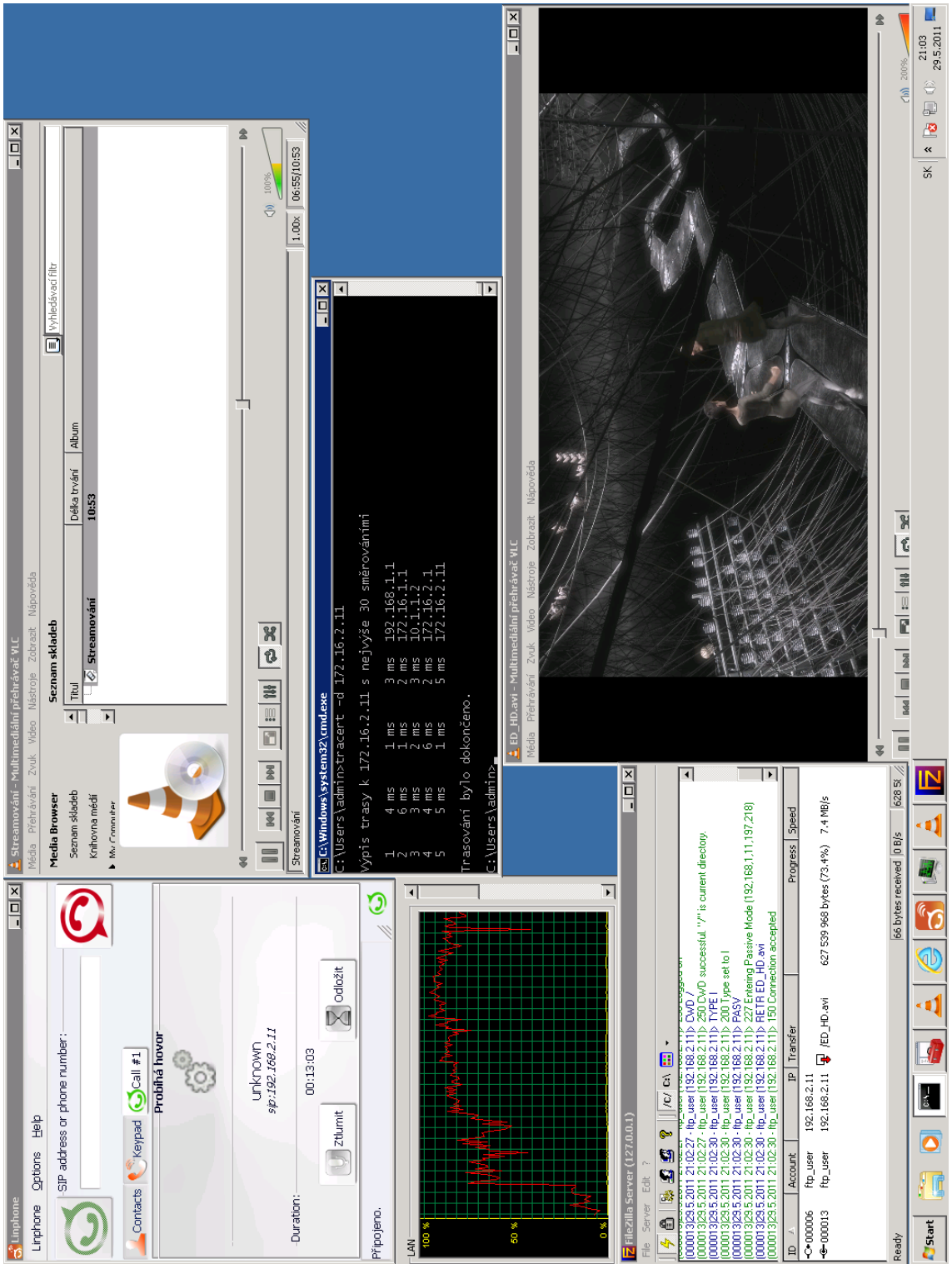
A3


Realtek RTL8139/810x Family Fast Ethernet NIC (not tcp port 3389) - Wireshark
File Edit View Go Capture Analyze Statistics Telephony Tools Help
Filter: Expression... Clear Apply
No. Time Source Destination Protocol Info
6794 5.835460 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6795 5.835571 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6796 5.839887 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6797 5.840005 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6798 5.840113 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6799 5.840228 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6800 5.840337 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6801 5.840451 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6802 5.840563 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6803 5.844902 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6804 5.845013 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6805 5.845126 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
6806 5.845238 192.168.1.11 192.168.2.11 UDP Source port: 50782 Destination port: avt-profile-1
Frame 6799: 1370 bytes on wire (10960 bits), 1370 bytes captured (10960 bits)
Ethernet II, Src: Cisco_09:2e:f8 (00:18:ba:09:2e:f8), Dst: Micronet_0e:bd:da (00:11:3b:0e:bd:da)
Internet Protocol, Src: 192.168.1.11 (192.168.1.11), Dst: 192.168.2.11 (192.168.2.11)
Version: 4
Header length: 20 bytes
Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP 0x00: Default; ECN: 0x00)
Total Length: 1356
Identification: 0x6b28 (27432)
Flags: 0x00
Fragment offset: 0
Time to live: 123
Protocol: UDP (17)
Header checksum: 0x4b12 [correct]
Source: 192.168.1.11 (192.168.1.11)
Destination: 192.168.2.11 (192.168.2.11)
User Datagram Protocol, Src Port: 50782 (50782), Dst Port: avt-profile-1 (5004)
Source port: 50782 (50782)
Destination port: avt-profile-1 (5004)
Length: 1336
Checksum: 0x5e6e [validation disabled]
Data (1328 bytes)
Data: 80a1dc307af8c4158467000047006611eb31620af41c30831...
[Length: 1328]
Data (data.data), 1328 bytes
Packets: 9538 Displayed: 9538 Marked: 0 Dropped: 0
Profile: Default
Start
21:30
29.5.2011

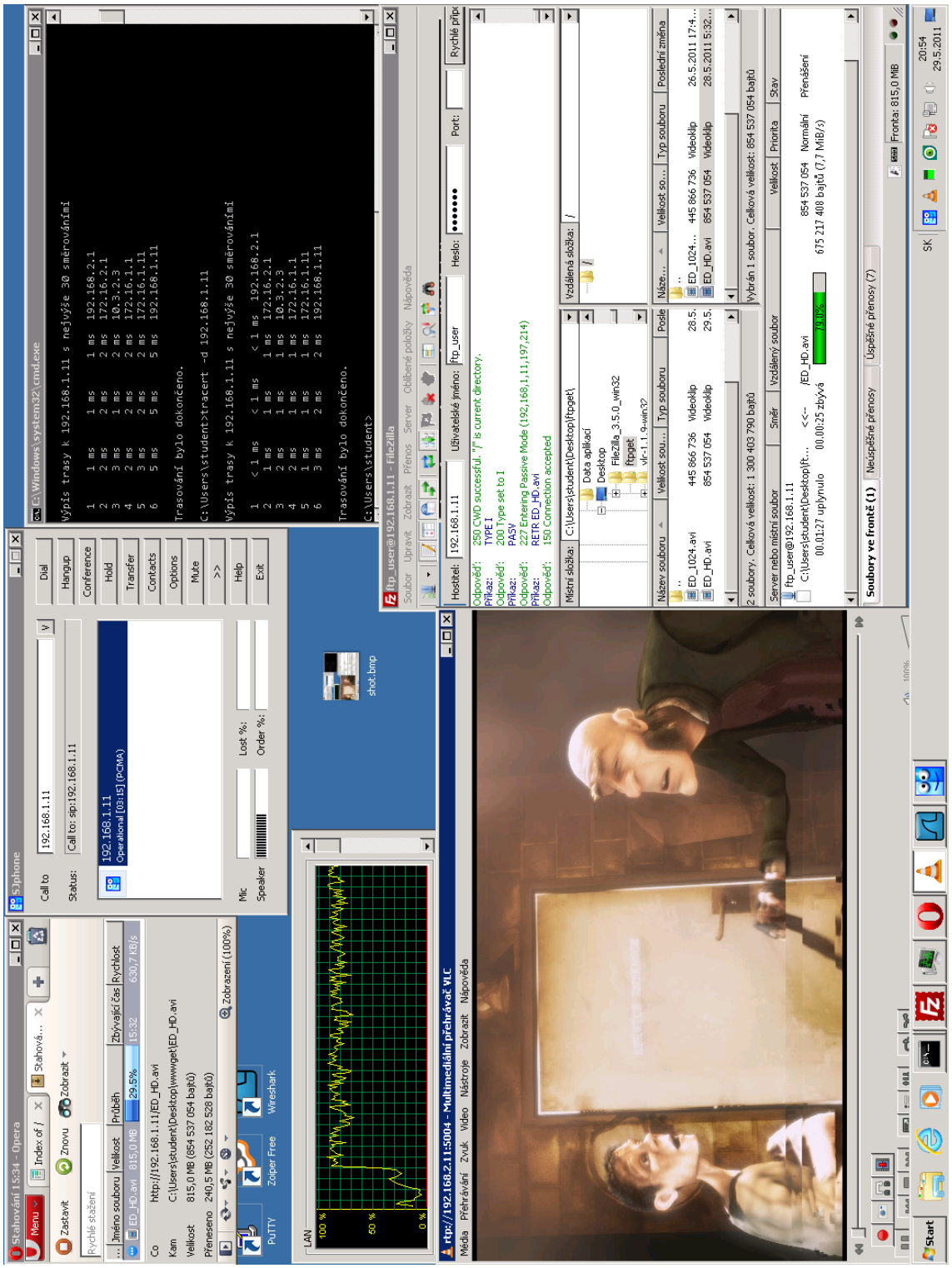
A4


Realtek RTL8139/810x Family Fast Ethernet NIC - Wireshark
File Edit View Go Capture Analyze Statistics Telephony Tools Help
Filter: not icmp && not arp && not stp && not cdp && not loop && not dhcpv6
Expression... Clear Apply
No. Time Source Destination Protocol Info
Request: INVITE sip:192.168.1.11, with session description
Status: 100 Trying
Status: 101 Dialog Establishement
Request: OPTIONS sip:192.168.2.11:5060
Status: 501 Not Implemented
Status: 180 Ringing
Status: 200 OK, with session description
Request: ACK sip:192.168.1.11
Frame 31: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits)
Ethernet II, Src: Cisco_09:2e:f8 (00:18:ba:09:2e:f8), Dst: Micronet_0e:bd:da (00:11:3b:0e:bd:da)
Internet Protocol, Src: 192.168.1.11 (192.168.1.11), Dst: 192.168.2.11 (192.168.2.11)
User Datagram Protocol, Src Port: 7078 (7078), Dst Port: 49158 (49158)
Real-Time Transport Protocol
Packets: 756 Displayed: 726 Marked: 0 Dropped: 0
Profile: Default
Start
21:40
29.5.2011

A5


Linphone
Options
Help
SIP address or phone number:
Contacts
Keypad
Call #1
Probíhá hovor
unknown
sip:192.168.2.11
Duration:
00:13:03
Ztlumit
Odložit
Připojeno.
Streamování - Multimediální přehrávač VLC
Média
Přehrávání
Zvuk
Video
Nástroje
Zobrazit
Nápověda
Media Browser
Seznam skladeb
Knihovna médií
Vyhledávací filtr
Titul
Délka trvání
Album
Streamování
10:53
06:55/10:53
Streamování
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\admin>tracert -d 172.16.2.11
Výpis trasy k 172.16.2.11 s nejvýše 30 směrováními
1 4 ms 1 ms 3 ms 192.168.1.1
2 6 ms 1 ms 2 ms 172.16.1.1
3 3 ms 2 ms 3 ms 10.1.1.2
4 4 ms 6 ms 2 ms 172.16.2.1
5 5 ms 1 ms 5 ms 172.16.2.11
Trasování bylo dokončeno.
C:\Users\admin>
ED_HD.avi - Multimediální přehrávač VLC
Média
Přehrávání
Zvuk
Video
Nástroje
Zobrazit
Nápověda
LAN
100 %
50 %
0 %
FileZilla Server (127.0.0.1)
File
Server
Edit
?
ID
Account
IP
Transfer
Progress
Speed
000006
ftp_user
192.168.2.11
000013
ftp_user
192.168.2.11
/ED_HD.avi
627 539 968 bytes (73.4%)
7.4 MB/s
Ready
66 bytes received
0 B/s
628 Sk
Start
SK
21:03
29.5.2011

A6


C:\Windows\system32\cmd.exe
Výpis trasy k 192.168.1.11 s nejvýše 30 směrováními
Trasování bylo dokončeno.
C:\Users\student>tracert -d 192.168.1.11
C:\Users\student>
Sphone
Call to
Status:
Dial
Hangup
Conference
Hold
Transfer
Contacts
Options
Mute
>>
Help
Exit
Mic
Speaker
Lost %:
Order %:
shot.bmp
FileZilla - ftp_user@192.168.1.11
Hostitel:
Uživatelské jméno:
Heslo:
Port:
Rychlé připoj
Místní složka:
Vzdálená složka:
Název souboru
Velikost
Typ souboru
Poslední změna
Server nebo místní soubor
Směr
Vzdálený soubor
Priorita
Stav
Soubory ve frontě (1)
Úspěšné přenosy
Neúspěšné přenosy
Fronta: 815,0 MB
VLC - Multimediální přehrávač
Opera
Stahování 15:34
PuTTY
Zoiper Free
Wireshark
LAN
Start