VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016 Bc. Filip Spiššák

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KVALITA SLUŽBY V MOBILNÝCH SIEŤACH
QUALITY OF SERVICE IN CELLULAR NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Filip Spiššák**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Radko Krkoš**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Filip Spiššák ***ID:*** 146959
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Kvalita služby v mobilných sieťach

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popíšte problematiku podpory kvality služby v mobilných bunkových sieťach so zameraním na siete EPS, popíšte architektúru podpory QoS v mobilnej sieti, jednotlivé prvky a ich rozhrania. Vypracujte metodiku merania a vyhodnocovania kvality služby v mobilnej sieti z pohľadu používateľa venujúcu sa podpore QoS pre jednotlivé služby naprieč celou sieťou. Overte možnosti podpory QoS v experimentálnej mobilnej sieti na UTKO FEKT VUT v Brne. Vykonajte merania podľa vypracovanej metodiky, s rôznou úrovňou konfigurácie experimentálnej mobilnej siete pre podporu QoS, merania vyhodnoťte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] 3GPP 23.107. Quality of Service (QoS) concept and architecture. Release 12. 3GPP, 2014. Dostupné z: http://www.3gpp.org/dynareport/23107.htm

[2] 3GPP 23.207. End-to-end Quality of Service (QoS) concept and architecture. Release 12. 3GPP, 2015. Dostupné z: http://www.3gpp.org/dynareport/23207.htm

[3] 3GPP 29.213. Policy and charging control signalling flows and Quality of Service (QoS) parameter mapping. Release 13.3.0. 3GPP, 2015. Dostupné také z: http://www.3gpp.org/dynareport/29213.htm

Termín zadání: 1.2.2016 ***Termín odevzdání:*** 25.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Radko Krkoš
Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., *předseda oborové rady*

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá problematikou zabezpečenia kvality služby (QoS) v mobilných sieťach EPS. Stručne je popísaná základná architektúra a charakteristické vlastnosti EPS. Definovaný je koncept QoS. Následne sú popísané prvky, ich funkcie a procedúry spojené so zabezpečením kvality služby v EPS. Navrhnutá je metodika merania a vyhodnocovania QoS z pohľadu používateľa naprieč celou mobilnou sieťou. Táto metodika je aplikovaná v rámci experimentálnej siete na UTKO FEKT VUT v Brne. Napokon je navrhnutá konfigurácia pre optimalizáciu podpory QoS v experimentálnej sieti.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

kvalita služby, QoS, EPS, LTE, PCC

ABSTRACT

This thesis deals with the quality of service (QoS) mechanism in Evolved Packet System (EPS). The basic architecture and characteristics of the EPS are introduced. The concept of QoS is defined. Furthermore, QoS related entities, their functions and corresponding procedures are described. The methodology for measuring and evaluating of end-to-end QoS as seen from a user's point of view is designed. This methodology is used to measure QoS of experimental cellular network at UTKO FEEC BUT. Finally, configuration change for optimizing the QoS support of experimental cellular network is designed.

KEYWORDS

quality of service, QoS, EPS, LTE, PCC

SPIŠŠÁK, Filip *Kvalita služby v mobilných sieťach*: diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 97 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš,

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovoú prácu na tému „Kvalita služby v mobilných sieťach“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb.

Brno ....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Radkovi Krkošovi za odborné vedenie, konzultácie a podnetné návrhy k práci.

Brno ....

(podpis autora)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
http://www.six.feec.vutbr.cz

POĎAKOVANIE

Výskum popísaný v tejto diplomovej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno . . . . . .

. . . . . .
(podpis autora)

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

OBSAH

Úvod **12**

1 Systém EPS **13**
1.1 Vlastnosti EPS . . . 13
1.2 Architektúra EPS . . . 14

2 Koncept kvality služby v EPS **16**
2.1 Štruktúra IP spojenia . . . 16
2.1.1 PDN spoj . . . 16
2.1.2 EPS nosič . . . 16
2.1.3 Dátový tok služby . . . 18
2.2 QoS parametre . . . 20
2.2.1 QoS parametre EPS nosičov . . . 20
2.2.2 QoS parametre dátových tokov služieb . . . 21

3 Architektúra EPS z pohľadu kvality služby **22**
3.1 Prvky a ich funkcie . . . 22
3.2 Rozhrania a ich funkcie . . . 25
3.3 Procedúry . . . 26
3.3.1 Vysoko-úrovňový popis procedúr . . . 27
3.3.2 Vytvorenie väzieb . . . 31
3.3.3 Procedúry spojené s nosičmi . . . 31
3.3.4 Detekcia a riadenie aplikácie (ADC) . . . 33
3.3.5 Riadenie brány . . . 34
3.3.6 Hlásenie udalostí . . . 34

4 End-to-end podpora kvality služby **35**
4.1 Zabezpečenie QoS na úrovni nosičov . . . 36
4.1.1 Štandardizované QCI charakteristiky . . . 36
4.1.2 ARP charakteristiky . . . 38
4.2 Zabezpečenie QoS na úrovni transportnej siete . . . 38
4.2.1 Zaobchádzanie s paketmi v P-GW . . . 38
4.2.2 Prenos paketu GTP-U tunelom . . . 39
4.2.3 Diferencované služby . . . 39

5 Možnosti podpory kvality služby v experimentálnej sieti **41**
5.1 PCC . . . 41
5.2 Základný koncept techniky SA . . . 42

5.3 Možnosti konfigurácie techniky SA 43
5.3.1 Používateľský profil 43
5.3.2 Filter 44
5.3.3 L7 pravidlo 44
5.3.4 Pravidlo 45

6 Návrh metodiky merania a vyhodnocovania kvality služby 46
6.1 Stanovenie účelu použitia 47
6.2 Požiadavky na merací systém 47
6.2.1 Požiadavky na mobilné testovacie zariadenie 48
6.2.2 Požiadavky na pevné testovacie zariadenie 49
6.2.3 Všeobecné požiadavky na merací systém 49
6.3 Zaznamenávané údaje 50
6.4 Definícia parametrov pre meranie a vyhodnocovanie dátových služieb 51
6.5 Meranie a vyhodnocovanie služby prenosu súboru (FTP) 52
6.5.1 Pomer zlyhania prístupu k službe FTP 55
6.5.2 Čas vytvorenia služby FTP 55
6.5.3 Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP 56
6.5.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP 57
6.5.5 Pomer zlyhania relácie služby FTP 57
6.5.6 Čas relácie služby FTP 58
6.6 Meranie a vyhodnocovanie služby
prehliadania webových stránok (HTTP) 59
6.6.1 Pomer zlyhania prístupu k službe HTTP 60
6.6.2 Čas vytvorenia služby HTTP 61
6.6.3 Pomer zlyhania relácie služby HTTP 61
6.6.4 Čas relácie služby HTTP 62
6.6.5 Pomer prerušenia prenosu dát služby HTTP 62
6.6.6 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby HTTP 63
6.7 Meranie a vyhodnocovanie služby video-streaming 63
6.7.1 Oneskorenie paketov služby video-streaming 65
6.7.2 Kolísanie oneskorenia paketov služby video-streaming 65
6.7.3 Stratovosť paketov služby video-streaming 67
6.7.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming 67

7 Aplikácia navrhnutej metodiky 68
7.1 Meranie a vyhodnotenie služby FTP 68
7.1.1 Pomer zlyhania prístupu k službe FTP 70
7.1.2 Čas vytvorenia služby FTP 70

7.1.3 Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP 70
7.1.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP 70
7.1.5 Pomer zlyhania relácie služby FTP 71
7.1.6 Čas relácie služby FTP 71
7.1.7 Diskusia výsledkov merania služby FTP 71
7.2 Meranie a vyhodnotenie služby video-streaming 72
7.2.1 Kolísanie oneskorenia paketov služby video-streaming 74
7.2.2 Stratovosť paketov služby video-streaming 74
7.2.3 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming 74
7.2.4 Diskusia výsledkov merania služby video-streaming 75
7.3 Návrh rekonfigurácie siete 75

8 Záver **79**

Literatúra **81**

Zoznam skratiek **87**

Zoznam príloh **93**

A Ukážka analýzy služby FTP v programe Wireshark **94**

B Ukážka analýzy paketov RTP v programe Wireshark **95**

C Ukážka výstupu programu iPerf **96**

D Obsah priloženého média **97**

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1 Architektúra systému EPS (spracované podľa [11]) 14
2.1 Architektúra nosičov v EPS (spracované podľa [9]) 17
2.2 Koncept PDN spoj – EPS nosič – SDF tok (spracované podľa [13]) . . 18
2.3 Mapovanie SDF tokov do EPS nosičov v smere downlink (spracované podľa [11]) 19
3.1 Architektúra EPS z pohľadu zaistenia QoS (spracované podľa [11]) . . 22
3.2 Vysoko-úrovňový popis PCC procedúr pre „on-path“ model, sieťou iniciované riadenie QoS a online účtovanie (spracované podľa [23]) . . 28
3.3 Vysoko-úrovňový popis PCC procedúr pre „off-path“ model, terminálom iniciované riadenie QoS a offline účtovanie (spracované podľa [23]) 29
3.4 Procedúra vytvorenia vyhradeného nosiča (spracované podľa [23]) . . 32
3.5 Procedúra žiadosti terminálu o vyhradenie/modifikáciu/uvoľnenie zdrojov (spracované podľa [23]) 33
4.1 Štandardizované QCI charakteristiky pre komunikáciu klient/server (hore) a peer/peer (dole) (spracované podľa [11]) 36
4.2 Detail S5/S8 GTP-U tunela v rámci end-to-end prenosu paketu v smere downlink (spracované podľa [24]) 39
5.1 Princíp techniky povedamia o službe (SA), spracované podľa [48] . . . 43
5.2 Koncept používateľských profilov v experimentálnej sieti, spracované podľa [48] 44
6.1 End-to-end kvalita služby, spracované podľa [39] 46
6.2 Mobilné/pevné testovacie zariadenie pre meranie kvality služby, spracované podľa [35] 48
6.3 Schématické znázornenie sťahovania súboru prostredníctvom služby FTP v aktívnom (vľavo) a pasívnom (vpravo) režime, spracované na základe [41], [42] a vlastnej analýzy 54
6.4 Schématické znázornenie služby prehliadania webových stránok, spracované podľa [33] 60
6.5 Schématické znázornenie služby video-streaming, spracované na základe [29], [33] a vlastnej analýzy 64
7.1 Architektúra merania služby FTP 69
7.2 Architektúra merania služby video-streaming 73
A.1 Ukážka analýzy paketov FTP služby v programe Wireshark 94
B.1 Ukážka analýzy paketov RTP v programe Wireshark 95
C.1 Ukážka výstupu programu iPerf 96

ZOZNAM TABULIEK

2.1 Charakteristiky nosičov dátových tokov 17
4.1 Prehľad prvkov a ich funkcií spojených so zabezpečením QoS v EPS v používateľskej rovine 35
4.2 Štandardizované QCI charakteristiky 37
4.3 Mapovanie QCI do DSCP 40
6.1 Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania prístupu k službe FTP . 55
6.2 Hraničné body pre meranie času vytvorenia služby FTP 56
6.3 Hraničné body pre meranie pomeru prerušenia prenosu dát služby FTP 56
6.4 Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti prenosu dát služby FTP 57
6.5 Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania relácie služby FTP . . . 58
6.6 Hraničné body pre meranie času relácie služby FTP 58
6.7 Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania prístupu k službe HTTP 60
6.8 Hraničné body pre meranie času vytvorenia služby HTTP 61
6.9 Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania relácie služby HTTP . . 61
6.10 Hraničné body pre meranie času relácie služby HTTP 62
6.11 Hraničné body pre meranie pomeru prerušenia prenosu dát služby HTTP 62
6.12 Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti prenosu dát služby HTTP 63
6.13 Hraničné body pre meranie oneskorenia paketov služby video-streaming 65
6.14 Hraničné body pre meranie kolísania oneskorenia paketov služby video-streaming 66
6.15 Hraničné body pre meranie stratovosti paketov služby video-streaming 67
6.16 Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti služby video-streaming 67

ÚVOD

Podporou kvality služby je možné zaistiť požadovanú spoľahlivosť služieb realizovaných v mobilnej sieti. V okamihu veľkého vyťaženia siete je tak možné zabezpečiť pre používateľa požadované parametre pre „dôležité“ služby na úkor tých „menej dôležitých“. Operátori sietí zase môžu v týchto prípadoch rozlišovať jednotlivých používateľov a uprednostniť tak napríklad služby realizované majiteľmi prémiových balíkov služieb pred majiteľmi bežných balíkov služieb. Cieľom tejto práce je popísať problematiku podpory kvality služby v mobilných sieťach so zameraním na siete EPS, vypracovať metodiku jej merania a následne ju aplikovať v rámci experimentálnej mobilnej siete na UTKO FEKT VUT v Brne.

Teoretická časť práce je tvorená kapitolami 1–5. Na úvod je čitateľ zoznámený s charakteristickými vlastnosťami mobilných sietí EPS a ich architektúrou. Následne je predstavený koncept kvality služby a funkcie a procedúry prvkov siete, ktoré ju zabezpečujú. Ďalej sú popísané štandardné spôsoby zabezpečenia podpory kvality služby naprieč celou mobilnou sieťou, a v závere teoretickej časti sú diskutované konkrétne možnosti podpory kvality služby v experimentálnej sieti na UTKO FEKT VUT v Brne.

Praktická časť práce je tvorená kapitolami 6–7 a je zameraná na návrh metodiky merania a vyhodnocovania kvality služby. Následne je táto metodika použitá v rámci experimentálnej mobilnej siete. Výsledky merania sú interpretované a diskutované. V závere praktickej časti je popísaný návrh konfigurácie experimentálnej siete za účelom optimalizácie podpory kvality služby.

1 SYSTÉM EPS

EPS (Evolved Packet System – Vyvinutý paketový systém) je označenie pre tzv. „all-IP“ riešenie mobilnej siete, teda infraštruktúry, kde je všetka komunikácia založená na princípe spínania paketov. Často sa nesprávne označuje pojmom **LTE** (UMTS Long Term Evolution – Dlhodobý vývoj UMTS[1]), ktorý však podľa 3GPP[2] označuje len prístupovú časť EPS. Štandard LTE bol prvý krát špecifikovaný spoločenstvom 3GPP v dokumentoch Rel. 8. Tento ešte nespĺňal požiadavky pre zaradenie do sietí 4. generácie, ktoré špecifikuje ITU (International Telecommunication Union – Medzinárodná telekomunikačná únia) v dokumente IMT-Advanced. Plnohodnotne ich spĺňa až nasledujúci štandard **LTE-Advanced**, špecifikovaný od Rel. 10 [1], [2].

1.1 Vlastnosti EPS

Paketovo spínaný prenos dát bol implementovaný už v systéme GPRS (General Packet Radio Service – Všeobecná paketová rádiová služba), ktorý touto funkcionalitou doplnil štandard sietí 2. generácie GSM (Global System for Mobile communications – Globálny systém pre mobilné komunikácie) [21]. EPS je však prvým, ktorý prostredníctvom IP protokolu prenáša aj služby v reálnom čase, typicky službu hovorovú. Nasleduje výpis vybraných charakteristík EPS (Rel. 8) [1], [4], [22]:

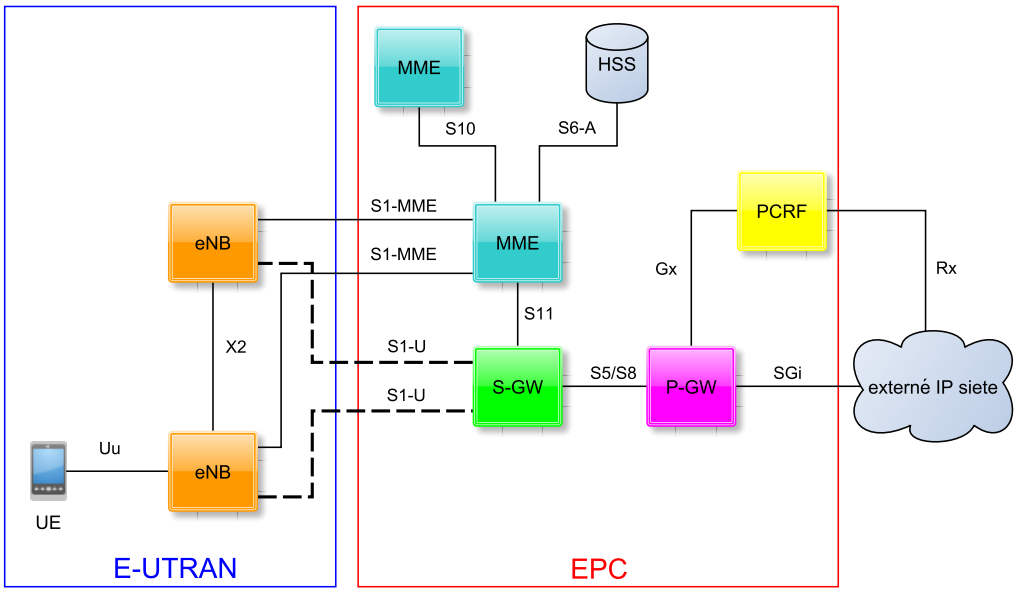
- max. teoretická prenosová rýchlosť 75 Mb/s v smere uplink a až 300 Mb/s v smere downlink využitím:
  - MIMO (Multiple Input Multiple Output – Viac vstupov, viac výstupov) – využitie technológie viacanténneho systému (max. 4x4) umožňujúceho priestorový multiplex,
  - SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – Kmitočtovo delený viacnásobný prístup s jednou nosnou) v smere uplink,
  - OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Ortogonálny kmitočtovo delený viacnásobný prístup) v smere downlink,
  - modulačných techník až 64QAM,
  - kmitočtových pásiem šírky 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz a 20 MHz,
- nízka latencia:
  - do 5 ms pre používateľskú rovinu,

[1] UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – Univerzálny mobilný telekomunikačný systém) – súhrnný názov pre rádiové technológie 3. generácie vyvinuté spoločenstvom 3GPP [20].

[2] 3GPP (3rd Generation Partnership Project – Projekt partnerstva tretej generácie) – projekt zjednocujúci organizácie vyvíjajúce štandardy v oblasti telekomunikácií [3].

  - do 100 ms medzi stavmi „idle“ a „active“, do 50 ms medzi stavmi „dormant (spánok)“ a „active“ pre riadiacu rovinu,
- jednoduchšia architektúra znížením počtu prvkov siete,
- možnosť prostredníctvom technológie CSFB (Circuit Switched FallBack – Pád do siete so spínaním okruhov) opätovne využiť existujúcu okruhovo spínanú infraštruktúru (napr. hovor prostredníctvom siete štandardu GSM),
- mobilita mobilného terminálu je optimalizovaná pre rýchlosti 15 km/h, max. až 500 km/h,
- podpora TDD (Time Division Duplex – Časovo delený duplex) i FDD (Frequency Division Duplex – Kmitočtovo delený duplex),
- pokrytie (rozmer) buniek do 100 km,
- TTI (Transmission Time Interval – Časový interval vysielania) – 1 ms.

1.2 Architektúra EPS



Obr. 1.1: Architektúra systému EPS (spracované podľa [11])

Ako už bolo uvedené v podkap. 1.1, EPS prišiel so zjednodušenou architektúrou, ktorá je naznačená na obr. 1.1., kde sú zároveň uvedené rozhrania medzi jednotlivými prvkami siete. EPS môžeme rozdeliť na 2 subsystémy [5], [1], [6], [10]:

- **E-UTRAN** (Evolved Universal Terrestrial Access Network – Vyvinutá univerzálna pozemná prístupová sieť) – je tvorená sieťou inteligentných základňových staníc **eNB** (evolved NodeB – Vyvinutý uzol B), na ktoré sa pripájajú terminály **UE** (User Equipment – Používateľské vybavenie). Narozdiel od

predchádzajúcich generácií sietí tu neexistuje kontrolér (jeho funkcie prebrala samotná eNB) a stanice sú spojené prostredníctvom rozhrania S1 priamo do jadra siete. Ďalej sú stanice medzi sebou prepojené rozhraním X2. Takáto distribúcia správy siete medzi stanice má za následok zníženie doby potrebnej na zostavenie spojenia či vykonanie handoveru (predanie spojenia z jednej eNodeB do inej). Samotné stanice potom zabezpečujú funkcie ako pokrytie oblasti rádiovým signálom, prideľovanie rádiových zdrojov, riadenie vysielacieho výkonu atď.

- **EPC** (Evolved Packed Core – Vyvinuté jadro siete) – tvorené prvkami:
  - **MME** (Mobility Management Entity – Entita správy mobility) – riadiaci uzol (riadiaca rovina), ktorý realizuje signalizáciu spojenú s mobilitou pri prístupe do E-UTRAN, má na starosti autentizáciu používateľov, správu nosičov, výber prvkov P-GW, S-GW, príp. samotného MME pri handoveri.
  - **S-GW** (Serving Gateway – Obsluhujúca brána) – pracuje s používateľskými tokmi dát (používateľská rovina), smeruje pakety medzi eNB a P-GW, plní úlohu „kotviaceho“ bodu pri handoveroch medzi jednotlivými stanicami eNB.
  - **P-GW** (Packet data network Gateway – Brána paketovej dátovej siete) – taktiež sa stará o používateľskú rovinu, prepojuje jadro siete EPC s externými IP sieťami, označovanými PDN (Packet Data Network), realizuje na tomto spoji smerovanie paketov, alokáciu IP adries terminálov UE.
  - **HSS** (Home Subscriber Server – Domovský účastnícky server) – databáza obsahujúca informácie o identifikácii používateľa, jeho polohe a používateľskom profile, ktoré poskytuje prvku MME napr. v prípade autentizácie používateľa, kontrole integrity správ či šifrovaní medzi UE a mobilnou sieťou.
  - **PCRF** (Policy control and Charging Rules Function – Funkcia riadenia politiky a účtovacích pravidiel) – prvok podieľajúci sa na funkcii **PCC** (Policy and Charging Control - Riadenie politiky a účtovania). Na základe nastavených pravidiel poskytuje rozhodnutia ohľadom zaistenia požadovanej politiky, uplatňujúcej sa pre konkrétne dátové toky služieb/aplikácií a riadenia účtovania. Následne tieto údaje poskytuje do entity **PCEF** (Policy and Charging Enforcement Function – Funkcia uplatňovania politiky a vykonávania účtovania) zaisťujúcej ich vlastné vykonanie, typicky umiestnenej v prvku P-GW.

Podrobnejší popis architektúry siete, zameraný na prvky podieľajúce sa na zaisťovaní kvality služby, bude uvedený v kap. 3.

2 KONCEPT KVALITY SLUŽBY V EPS

V súčasnej dobe, s prudkým rozvojom mobilných terminálov napr. v podobe tzv. „chytrých“ telefónov, sa spektrum služieb využívaných prostredníctvom mobilných sietí výrazne rozšírilo. Jedná sa najmä o IP služby ako prehliadanie webových stránok, IM (Instant messaging – rýchle správy), video-streaming či VoIP (Voice over IP – prenos hlasu cez IP). Zároveň pokles využívania pevných telefónnych sietí znamená ďalšie zvýšenie záťaže i samotnej hovorovej služby práve na mobilné siete, ktoré ich z veľkej časti nahradili. Z dôvodu obmedzených zdrojov a zároveň širokej palety poskytovaných služieb je najmä v dobe vyššej záťaže potrebné uprednostniť niektoré zo služieb (napr. hovorovú) pred inými (napr. prehliadanie webových stránok). Zároveň z pohľadu operátora je záujem diferencovať i jednotlivých účastníkov či skupiny účastníkov siete. Typicky podnikoví vs. súkromní zákazníci, zákazníci platiaci paušálne vs. majitelia kreditných systémov, predplatený prémiový vs. základný balík služieb či roamingoví vs. domáci účastníci. Reguláciu prevádzky na základe týchto požiadaviek je možné zaistiť podporou QoS (Quality of Service – kvalita služby) čím sa dosiahne požadovaná garancia kvality služby.

2.1 Štruktúra IP spojenia

V systéme EPS existujú podľa 3GPP dva koncepty, ktoré definujú IP spojenie medzi terminálom UE a sieťami PDN [7]:

- **PDN spoj**[3] (PDN connection),
- **EPS nosič** (EPS bearer).

2.1.1 PDN spoj

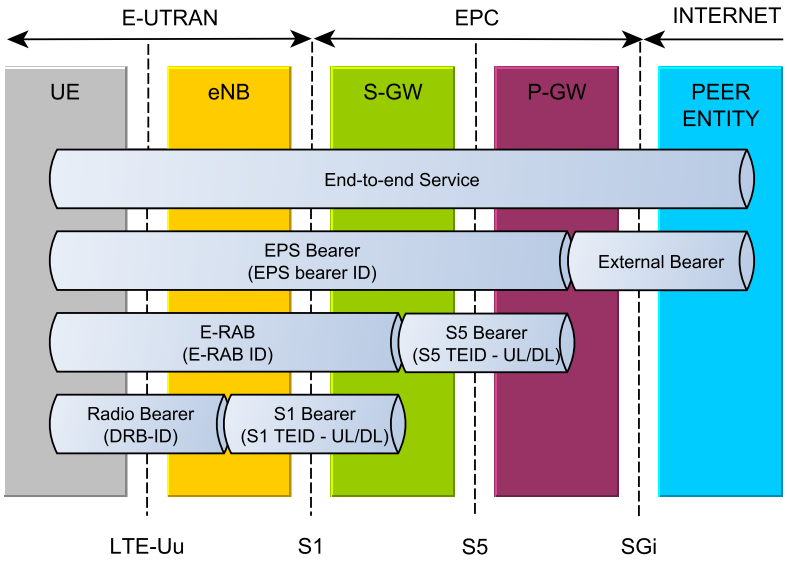
PDN spoj (EPS ekvivalent PDP kontextu v GPRS) je asociácia reprezentovaná IP adresou terminálu UE na jednej strane a APN (Access Point Name – Názov prístupového bodu), označovaným tiež PDN ID, na strane PDN [8].

2.1.2 EPS nosič

V rámci jedného PDN spoja môže existovať viacero EPS nosičov. Kvalita služieb v EPS je zaistená práve prostredníctvom nosičov dátových tokov. Sú to virtuálne spojenia špecifikované súborom parametrov, ktoré určujú ako sa bude s daným tokom dát zaobchádzať (politika plánovania, politika správy front, úprava

[3] Často označovaný tiež **EPS relácia** (EPS session).

rýchlosti atď.). V rámci jedného PDN spoja sa vždy zostaví jeden implicitný nosič – tzv. **default bearer**. V prípade, že je nutné zabezpečiť špecifické správanie (odlišné od toho, ktoré poskytuje implicitný nosič) pre určitú službu (typicky napr. uprednostňovať služby v reálnom čase) vytvorí sa jeden, príp. viacero vyhradených nosičov – tzv. **dedicated bearers**. Vyhradené nosiče sú vždy viazané na jeden implicitný, neprideľuje sa im teda nová IP adresa. Viazanosť na konkrétny implicitný nosič je indikovaná parametrom LBI (Linked EPS Bearer Identity – Identita prepojených EPS nosičov). Nosiče dátových tokov sú definované na konkrétnych úrovniach komunikácie a pre určité rozhrania viď obr. 2.1 [7], [8], [9].



Obr. 2.1: Architektúra nosičov v EPS (spracované podľa [9])

Potom platí, že EPS nosič je definovaný naprieč celou sieťou EPS, t. j. medzi UE a P-GW. Keďže UE môže disponovať viacerými EPS nosičmi, rozlišujú sa pomocou identifikátoru EPS bearer ID, alokovaného prvkom MME. Charakteristiky ďalších nosičov uvádza tab. 2.1 [12].

Tab. 2.1: Charakteristiky nosičov dátových tokov

Protiľahlé prvky	**Označenie nosiču**	**Médium**	**ID**	**Prvok alokujúci ID**
UE – eNB	Rádiový nosič (DRB)	DRB	DRB ID	eNB
eNB – S-GW	S1 nosič	GTP tunel	TEID	eNB a S-GW
S-GW – P-GW	S5 nosič	GTP tunel	TEID	S-GW a P-GW

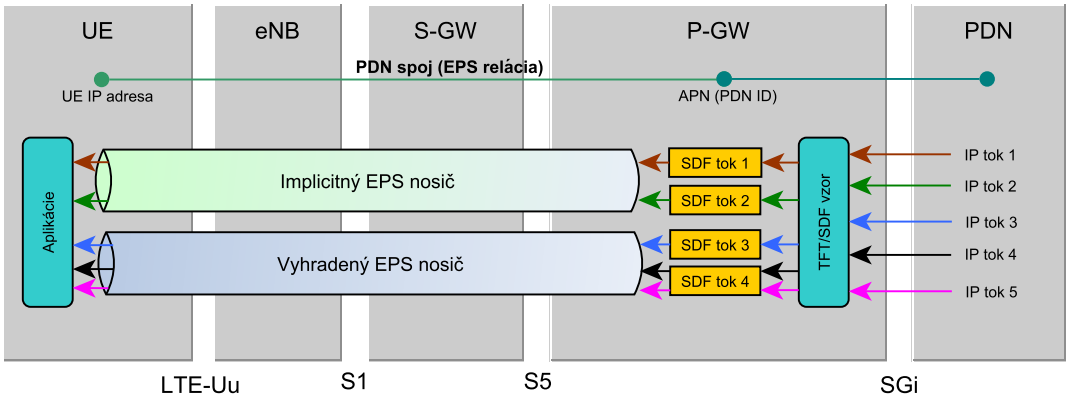
Uveďme upresňujúce poznámky [14], [12]:

- GTP tunel je tunel vytvorený protokolom **GTP** (GPRS Tunneling Protocol – GPRS tunelovací protokol) z protokolovej sady TCP/IP a v LTE poskytuje

mobilitu – IP adresa UE zostane rovnaká i v prípade zmeny obsluhujúceho eNB a pakety sú ďalej smerované prostredníctvom tunelu medzi P-GW a eNB cez S-GW. Identifikátorom tunelu je TEID (Tunnel Endpoint IDentifier – Identifikátor konca tunela).

- Nosič E-RAB je zreťazením rádiového (DRB) a S1 nosiča, a je jednoznačne určený identifikátorom E-RAB ID alokovaným prvkom MME.
- Medzi EPS nosičom, E-RAB a DRB existuje na rádiovom rozhraní vzájomné mapovanie 1:1.
- Externý nosič spoločne s EPS nosičom zabezpečujú end-to-end QoS.

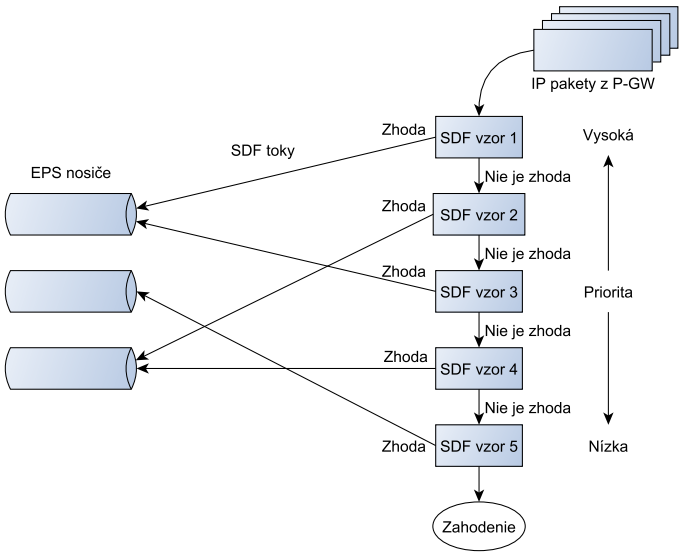
2.1.3 Dátový tok služby



Obr. 2.2: Koncept PDN spoj – EPS nosič – SDF tok (spracované podľa [13])

Koncept PDN spojov a EPS nosičov môžeme ďalej rozšíriť o **SDF** (Service Data Flow – Dátový tok služby – ďalej len SDF tok). SDF tok reprezentuje už samotný IP tok používateľských dát príp. agregáciu týchto tokov klasifikovaných podľa typu používanej služby, a predstavuje tak ešte jemnejšie delenie než poskytujú nosiče. Vzťah PDN spoja, EPS nosiča a SDF toku je naznačený na obr. 2.2. Obrázok zároveň predstavuje príklad mapovania medzi IP tokmi, SDF tokmi a EPS nosičmi v smere downlink: najprv sú IP toky (1–5) s rovnakými charakteristickými vlastnosťami služby filtrované pomocou tzv. **SDF templates** (Vzory dátového toku služby – ďalej len SDF vzory) do spoločných SDF tokov. Agregácia dvoch IP tokov do jedného SDF toku je evidentná u IP tokov 4 a 5 (SDF tok 4). Následne sú SDF toky pomocou tzv. **TFTs** (Traffic Flow Templates – Vzory prevádzkového toku) namapované do konkrétnych EPS nosičov, aby napokon mohli byť doručené do UE a predané konkrétnym aplikáciám. SDF toky s rovnakou triedou QoS sú doručené agregovane cez jeden EPS nosič, zatiaľ čo toky s inou spoločnou triedou QoS sú doručené cez iný EPS nosič (SDF toky 1 a 2 cez implicitný, SDF toky 3 a 4 cez vyhradený).

TFT je teda vlastne jeden alebo súbor viacerých SDF vzorov (zdieľajúcich triedu QoS). Napokon, samotný SDF vzor je definovaný jedným alebo súborom viacerých paketových filtrov (označovaných tiež SDF filtrov), ktoré sú vopred nakonfigurované operátorom v súlade s jeho politikou. Každý z týchto filtrov je typicky definovaný päticou tzv. „5-tuple“, teda zdrojovou a cieľovou IP adresou, zdrojovým a cieľovým portom a identifikátorom protokolu transportnej vrstvy. Zároveň je možné definovať ďalšie typy paketových filtrov na základe parametrov spojených s IP tokom, napr. rozsahy zdrojových a cieľových portov, typ služby (IPv4)/trieda prevádzky (IPv6), identifikátor toku (IPv6) atď. Samotný princíp filtrovania potom spočíva v porovnávaní týchto parametrov s parametrami jednotlivých IP tokov. Na príklade z obr. 2.3 je naznačený princíp filtrovania pre prípad piatich SDF vzorov v smere downlink. Každý SDF vzor má priradený index priority, ktorý určuje v akom poradí budú jednotlivé SDF vzory testované za účelom zhody parametrov. Prichádzajúce IP toky sú najprv testované v SDF vzore č. 1 s najvyššou prioritou (najnižším indexom priority). V prípade, že zhoda nastane, pakety sú namapované a odoslané EPS nosičom asociovaným s týmto SDF vzorom (na základe TFT). V prípade, že zhoda nenastane, postup sa opakuje pre nasledujúci SDF vzor. V prípade, že zhoda nenastane ani v poslednom SDF vzore (č. 5), pakety sú odoslané prostredníctvom EPS nosiča, neasociovaného s žiadnym SDF vzorom. Ak sú však všetky EPS nosiče, vrátane implicitného (vyhradené musia byť vždy), asociované s jedným či viacerými SDF vzormi, pakety sú zahodené. V uvedenom smere (downlink) sa o mapovanie stará P-GW resp. S-GW, v závislosti od použitého protokolu mobility (viď nižšie kap. 3). V opačnom smere (uplink) túto činnosť vykonáva UE [10], [13], [23].



Obr. 2.3: Mapovanie SDF tokov do EPS nosičov v smere downlink (spracované podľa [11])

2.2 QoS parametre

QoS parametre sú definované ako na úrovni SDF tokov, tak na úrovni EPS nosičov [13].

2.2.1 QoS parametre EPS nosičov

V prípade, že pri zostavení/modifikácii EPS nosiča sú mu permanentne pridelené vyhradené sieťové zdroje, nazývame tento nosič typu **GBR** (Guaranteed Bit Rate – Garantovaná prenosová rýchlosť). Tento potom poskytuje garantovanú prenosovú rýchlosť. V opačnom prípade nosič zaručenú prenosovú rýchlosť neposkytuje a označujeme ho ako **Non-GBR** (Non-Guaranteed Bit Rate – Negarantovaná prenosová rýchlosť). Implicitný nosič môže byť len typu Non-GBR, zatiaľ čo vyhradený nosič môže byť typu GBR i Non-GBR [10]. Oba typy sú ďalej špecifikované nasledujúcimi QoS parametrami [9],[11]:

- **QCI** (QoS Class Identifier – Identifikátor triedy QoS) – určuje priradenie toku dát k určitej a jedinej triede QoS špecifikovanou:
  - **typom zdroja** – GBR/Non-GBR,
  - **úrovňou priority** – nižšie číselné označenie zodpovedá vyššej priorite pridelenej v plánovači paketov,
  - **oneskorením paketov** – horná hranica povoleného oneskorenia pre 98 % prenesených paketov medzi UE a PCEF,
  - **paketovou chybovosťou** – horná hranica pre pomer neprijatých k celkovému počtu odoslaných paketov.

  Parameter samotný neurčuje konkrétne zaobchádzanie s paketmi, ale je len akýmsi ukazovateľom/referenciou pre prvky siete, akým spôsobom by tieto mali zaobchádzať s daným nosičom pri jeho spracovaní (t.j. na základe QCI nastaviť konkrétnu hodnotu pre plánovač paketov – váhu, nakonfigurovať protokol linkovej vrstvy atď.). Tieto konkrétne hodnoty sú prednastavené výrobcom prvku, príp. operátorom vlastniacim prvok (napr. eNB). Použitím QCI parametru je teda možné vyhnúť sa vysielaniu súboru všetkých parametrov spojených s QoS a zvýšiť tak efektivitu signalizácie.
- **ARP** (Allocation and Retention Priority – Priorita pridelenia a udržania) – rozhoduje o prijatí resp. zamietnutí žiadosti o zostavenie/modifikáciu nosiča na základe dostupnosti zdrojov (typicky dostupná rádiová kapacita pre GBR nosiče). ARP môže byť rovnako použitá stanicou eNB v prípade rozhodovania o uvoľnení toho-ktorého nosiča/nosičov v prípadoch výnimočnej limitácie zdrojov, napr. v prípade handoveru. ARP zahŕňa nasledujúce parametre:

- **Úroveň priority** (1 – 15, kde 1 je najvyššia priorita) – definuje relatívnu dôležitosť žiadosti o pridelenie zroja.
- **Preemptívna spôsobilosť** (Áno/Nie) – určuje či môžu byť nosiču pridelené zdroje, ktoré už v danej chvíli sú pridelené inému nosiču s nižšou prioritou.
- **Preemptívna zraniteľnosť** (Áno/Nie) – určuje či môžu byť nosiču odobraté pridelené zdroje za účelom zostavenia nosiča s vyššou prioritou.

Parameter ARP je uvažovaný len pri samotnom rozhodovaní, t. j. po úspešnom zostavení nosiča nemá vplyv na ďalšie zaobchádzanie s paketmi a nie je ani obsiahnutý v QoS profile odosielaného do UE. Narozdiel od QCI, ktorý ovplyvňuje zaobchádzanie s paketmi prenášaného daným nosičom v používateľskej rovine, ARP tak činí v riadiacej rovine.

Každý nosič typu GBR je ďalej dodatočne špecifikovaný parametrami:

- **GBR** (Guaranteed Bit Rate) – zaručená prenosová rýchlosť poskytovaná nosičom typu GBR.
- **MBR** (Maximum Bit Rate) – maximálna možná prenosová rýchlosť poskytovaná nosičom typu GBR. MBR môže byť väčšia alebo rovná GBR.

Z pohľadu UE sa špecifikuje parameter **AMBR** (Aggregate Maximum Bit Rate – Agregovaná maximálna prenosová rýchlosť):

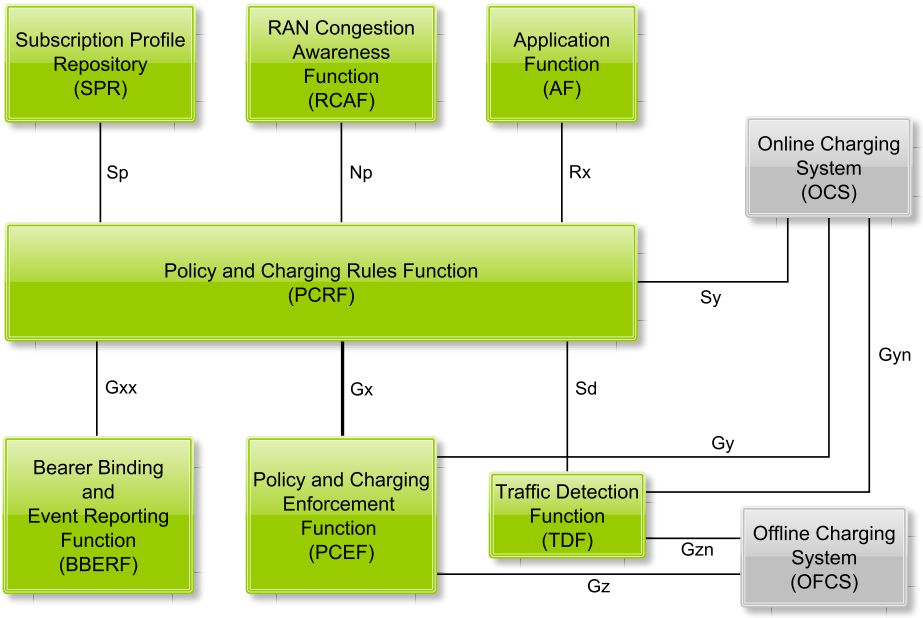
- **APN-AMBR** – maximálna agregovaná prenosová rýchlosť dostupná naprieč všetkými Non-GBR nosičmi pripojenými k jednému spoločnému APN.
- **UE-AMBR** – maximálna agregovaná prenosová rýchlosť dostupná naprieč všetkými Non-GBR nosičmi ku všetkým APN dohromady.

2.2.2 QoS parametre dátových tokov služieb

Na úrovni tokov SDF rozlišujeme len parametre QCI, ARP, GBR a MBR. Agregované toky SDF s rovnakou hodnotou QCI a ARP sú mapované do jedného EPS nosiča. Zároveň platí, že hodnoty ARP a QCI sú pre SDF tok(y) a jemu (im) zodpovedajúci EPS nosič totožné [13], [10].

3 ARCHITEKTÚRA EPS Z POHĽADU KVALITY SLUŽBY

V rámci EPS sa na podpore kvality služby podieľajú najmä prvky zaisťujúce funkciu PCC, konkrétne jej segment riadenia politiky (Policy control). Model architektúry týchto prvkov vrátane použitých rozhraní je vyobrazený na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Architektúra EPS z pohľadu zaistenia QoS (spracované podľa [11])

3.1 Prvky a ich funkcie

AF (Application Function – Aplikačná funkcia)

Prvok komunikujúci s aplikáciami vyžadujúcimi dynamické PCC. Poskytuje PCRF informácie o reláciách daných aplikácií (na základe protokolov SIP[4]/SDP[5]) potrebných pre jeho rozhodovaciu činnosť. Typicky sa jedná o informácie ako identifikátor účastníka, typ a formát média, indikátor priority (za účelom garancie služby pre danú aplikačnú reláciu) atď. Príkladom AF je P-CSCF (Proxy-Call Session Control Function – Proxy-funkcia riadenia hovorovej relácie), ktorý slúži UE ako vstupná brána do systému IMS[6] [11].

[4]SIP (Session Initiation Protocol) – RFC 3261 [27].
[5]SDP (Session Description Protocol) – RFC 4566 [28].
[6]IMS (IP Multimedia Subsystem) – zjednocujúci systém poskytujúci obojsmerný prenos multimediálnej konverzačnej komunikácie v reálnom čase.

SPR (Subscription Profile Repository – Repozitár účastníckych profilov)

Logický prvok obsahujúci informácie o účastníkoch a ich profiloch, ako povolené služby a ich priorita, špecifikácia dohodnutej QoS vrátane garantovanej šírky pásma, kategórie účastníkov, informácie spojené s účtovaním atď. [11].

PCRF (Policy and Charging Rules Function – Funkcia riadenia politiky a účtovacích pravidiel)

Prvok vykonávajúci rozhodnutia ohľadom riadenia politiky na základe vstupov obdržaných od AF a ďalších zdrojov, napr. konfigurácie operátora či účastníckych informácií obdržaných od SPR. PCRF tiež kontroluje či vstupy od AF sú v súlade s politikou operátora [16].

PCRF autorizuje zdroje (šírku pásma atď.) pre AF reláciu. Autorizácia zahŕňa vyčlenenie maximálnych možných alokovaných zdrojov pre skupiny IP tokov a obmedzenia pre jednotlivé IP toky (napr. cieľová IP adresa a port) [16].

PCRF definuje **PCC pravidlá** pre každý SDF tok a poskytuje ich prvku PCEF. PCEF kontroluje prijaté pakety pomocou SDF filtrov (popis viď 2.1.3) každého PCC pravidla v poradí danom prioritou PCC pravidla. Pre pakety zodpovedajúce niektorému z SDF filtrov je týmto proces aplikácie PCC pravidla dokončený. Z hľadiska riadenia politiky PCC pravidlo môže pozostávať z identifikátora pravidla, priority, SDF vzoru (zoznam SDF filtrov/ identifikátor aplikácie), stavu brány, QoS parametrov a i. [11]. Rozlišujeme dva typy pravidiel [17], [23]:

- **Vopred definované** – predkonfigurované jednotlivo alebo ako skupina pravidiel v PCEF. Môžu byť aktivované a deaktivované kedykoľvek prvkom PCRF. Typicky sú využité na základe štandardizovaných QoS charakteristík.
- **Dynamické** – dynamicky poskytované prvkom PCRF prvku PCEF prostredníctvom Gx rozhrania. Tieto pravidlá môžu byť nielen kedykoľvek zavedené a odstránené, ale i modifikované. Typicky sú rezervované pre špecifickejšie aplikácie.

PCEF (Policy and Charging Enforcement Function – Funkcia uplatňovania politiky a vykonávania účtovania)

Prvok je situovaný v P-GW a zabezpečuje detekciu SDF a uplatňuje politiku na základe komunikácie s PCRF.

Zabezpečuje tiež funkciu riadenia brány (gating control) – proces zahadzovania/prepustenia paketov daných SDF tokov do požadovaného koncového bodu [16].

BBERF (Bearer Binding and Event Reporting Function – Funkcia vytvárania väzieb medzi nosičmi a hlásenia udalostí)

Prvok zabezpečuje vytvorenie väzieb medzi nosičmi a tokmi SDF, overovanie týchto väzieb a hlásenie udalostí do PCRF. BBERF pri tom využíva **QoS pravidlá** odvodené z PCC pravidiel [11].

Tento prvok je typicky implementovaný v S-GW, a to v prípade, že je na rozhraní S5 resp. S8 (v prípade roamingu) pre mobilitu použitý protokol PMIP (Proxy Mobile IP) – tzv. „off–path model“. V prípade, že je použitý protokol GTP (uvažovaný i pri popise nosičov v kap 2.1.2), funkciu BBERF plní prvok PCEF – tzv. „on-path model“ [11].

TDF (Traffic Detection Function – Funkcia detekcie prevádzky)

Prvok vykonávajúci funkciu ADC (Application Detection and Control – Detekcia a riadenie aplikácie) – teda detekciu aplikácie a hlásenie informácií o týchto aplikáciach a ich SDF tokoch prvku PCRF. TDF deteguje spustenie a ukončenie aplikačnej prevádzky. Využíva k tomu ADC pravidlá, ktoré môžu pozostávať z hľadiska QoS z identifikátoru pravidla, identifikátoru aplikácie, priority, stavu brány, MBR v smere uplink/downlink [11]. Rozlišujeme ADC pravidlá [17]:

- **Dynamické** – môžu byť kedykoľvek aplikované a odstránené a ľubovoľne modifikované prvkom PCRF.
- **Vopred definované** – dopredu nakonfigurované v TDF, taktiež môžu byť kedykoľvek aktivované resp. deaktivované prvkom PCRF, nemôžu však byť modifikované.

V prípade, že tento prvok nie je implementovaný, funkciu ADC môže plniť PCEF rozšírený o ADC prostredníctvom aplikácie PCC pravidiel [11].

RCAF (RAN Congestion Awareness Function – Funkcia upovedomovania o zahltení rádiovej prístupovej siete)

Prvok odosielajúci údaj **RUCI** (RAN User plane Congestion Information – Informácia o zahltení používateľskej roviny rádiovej prístupovej siete) do PCRF, aby ten ho vzal v úvahu pri rozhodovaní ohľadom politiky. RUCI zahŕňa informácie o stave zahltenia a jeho úrovni a identifikátory objektu, ktorého sa dané zahltenie týka (IMSI, eNB, APN či bunky E-UTRAN) [11].

Prvky **OCS** (Online Charging System – Systém online účtovania) a **OFCS** (Offline Charging System – Systém offline účtovania) súvisia najmä so segmentom

PCC pre riadenie účtovania, pričom OCS zabezpečuje účtovanie v reálnom čase (správa transakcií či zostatku na účte) a OFCS účtovanie, ktoré nemá vplyv na používanú službu v reálnom čase (zbieranie a spracovanie záznamov pre fakturačnú doménu) [19].

3.2 Rozhrania a ich funkcie

Rx (AF – PCRF)

Rozhranie používané pre výmenu informácií o nastavenej politike a hlásenie udalostí medzi AF a PCRF. Jeden prvok PCRF je schopný obsluhovať viacero AF a zároveň jeden prvok AF je schopný komunikovať s viacerými PCRF. Medzi zasielané informácie patrí [11]:

- informácie paketového filtru pre identifikáciu SDF tokov za účelom riadenia politiky a/alebo odlišného účtovania v smere z AF do PCRF,
- požiadavky na šírku pásma v smere z AF do PCRF,
- v prípade, že si to AF vyžiada, hlásenie udalostí používateľskej roviny, napr. že PDN spoj bol ukončený, príp. že UE bolo predané odlišnej prístupovej technológii atp. a to v smere z PCRF do AF.

Gx (PCEF – PCRF)

Rozhranie umožňuje PCRF dynamicky spravovať PCC v PCEF prostredníctvom signalizácie o jednotlivých rozhodnutiach. Dôležitou úlohou je z hľadiska riadenia politiky najmä poskytovanie a odstraňovanie PCC pravidiel. PCEF môže byť obsluhovaný viacerými PCRF na základe PDN, do ktorej je aktuálne pripojený [17]. Rozhranie podporuje nasledujúce funkcie [11]:

- žiadosť PCEF o rozhodnutie ohľadom PCC od PCRF,
- poskytnutie rozhodnutia od PCRF prvku PCEF,
- hlásenie o spustení/ukončení detegovaných aplikácií, prenos identifikačných údajov o SDF tokoch a inštanciách aplikácií z PCEF do PCRF,
- hlásenie o aktuálnom využití sieťových zdrojov z PCEF do PCRF,
- doručovanie parametrov špecifikujúcich PDN spoj v oboch smeroch.

Gxx (BBERF – PCRF)

Rozhranie umožňuje PCRF dynamickú správu činnosti prvku BBERF [11]:

- poskytovanie, aktualizovanie a odstraňovanie QoS pravidiel z PCRF do BBERF,
- odosielanie udalostí z BBERF do PCRF.

Sp (SPR – PCRF)

Umožňuje PCRF vyžiadanie informácií o účastníkoch od SPR na základe účastníckych identifikátorov (napr. unikátny identifikátor pridelený operátorom – IMSI) či PDN ID. V prípade, že si to PCRF vyžiada, môže byť pravidelne informovaný o zmenách týchto informácií [11].

Sd (TDF – PCRF)

Rozhranie umožňuje prvku PCRF dynamickú kontrolu nad detekciou aplikácií a správou TDF, teda najmä poskytovanie a žiadosť o ADC rozhodnutia medzi PCRF a BBERF [11].

Np (RCAF – PCRF)

Rozhranie umožňuje prenos RUCI pre všetkých alebo vybraných účastníkov (podľa politiky operátora) medzi RCAF a PCRF [11].

Rozhrania **Sy**, **Gy**, **Gyn**, **Gzn** a **Gz** slúžia pre signalizáciu ohľadom riadenia účtovania, teda komunikáciu s prvkami OCS a OFCS [11].

3.3 Procedúry

V tejto podkapitole budú popísané fundamentálne procedúry, ktoré prebiehajú v rámci riadenia politiky pri komunikácii prvkov prostredníctvom rozhraní popísaných v predchádzajúcich podkap. 3.1 a 3.2.

Na začiatok pripomeňme, že v závislosti od použitého protokolu mobility na rozhraní S5/S8, teda GTP resp. PMIP rozoznávame tzv. „on-path“/„off-path“ model. V prvom prípade funkciu vytvárania väzieb zabezpečuje PCEF na základe PCC pravidiel, v druhom prípade BBERF na základe QoS pravidiel.

Procedurálny postup sa tiež bude líšiť v závislosti od „strany“, ktorá si vyžiada aplikáciu určitej QoS. V EPS to môže byť ako terminál, tak aj sieť. Potom hovoríme buď o **terminálom** alebo **sieťou iniciovanom riadení QoS** [23].

V prípade terminálom iniciovaného riadenia QoS v rámci E-UTRAN prístupu, terminál žiada o vyhradenie zdrojov. Požadovaná QoS musí byť známa samotnej aplikácii. Tá prostredníctvom interného prístupového rozhrania/API (Application Programming Interface – Aplikačné programovacie rozhranie) kontaktuje E-UTRAN. API nemusí byť štandardizované, naopak, často môže byť špecifické pre výrobcu terminálu či konkrétnu prístupovú sieť. Inými slovami terminálom iniciované riadenie QoS môže byť použité len pre klientské aplikácie, ktoré poznajú

špecifiká QoS modelu danej prístupovej technológie, teda také ktoré musia byť naprogramované často výrobcom špecifickým API. Najmä preto sa použitie terminálom iniciovaného riadenia QoS typicky hodí pre služby neznáme/nekontrolované operátorom, kedy aplikácia v terminále napriek tomu chce zaistiť pre túto službu zvláštnu QoS za účelom zvýšenia subjektívnej kvality služby z pohľadu používateľa, teda za účelom podpory QoE (Quality of Experience – Kvalita zážitku). Typicky sa môže jednať o prípad, kedy napr. používateľ pristupuje k serveru (operátorovi neznámemu) v sieti Internet, poskytujúcemu službu video-streaming. Predpokladom tiež je, že operátor takúto možnosť povolí [23], [15].

V prípade sieťou iniciovaného riadenia QoS v rámci E-UTRAN prístupu je to sieť, ktorá vyžiada vytvorenie vyhradeného nosiča. Táto žiadosť je obdržaná typicky od sieťových prvkov AF v spolupráci s PCRF prostredníctvom štandardizovaných rozhraní (Rx, Gx). Klientská aplikácia v tomto prípade môže spoliehať na sieť, že zabezpečí potrebné QoS procedúry, špecifické pre danú prístupovú sieť. Samotná aplikácia sa použitým modelom QoS nemusí zaoberať, môže však disponovať znalosťou o jej vyžadovanej QoS, nezávislej na použitej prístupovej technológii. Požadovanú QoS môže od siete vyžiadať prostredníctvom aplikačnej vrstvy, napr. pomocou aplikačnej signalizácie protokolu SIP či RTSP[7] v kombinácii s SDP. Predpokladom pre použitie sieťou iniciovaného riadenia QoS je, že samotná sieť je schopná rozpoznať požiadavky na QoS jednotlivých aplikácií. S výhodou sa teda používa pre služby poskytované operátorom prístupovej siete, príp. poskytovaných na základe dohody s iným operátorom, tzv. treťou stranou (typicky peering). Operátor potom aplikuje patričnú QoS na SDF toky týchto (jemu známych) služieb. Jedná sa o služby ako sú prístup k Internetu, mobilná TV či hovor v rámci IMS. Ďalším možným použitím sú aplikácie umiestnené v prvku fyzicky oddelenom od terminálu (napr. prenosný PC či set-top box) [23], [15].

3.3.1 Vysoko-úrovňový popis procedúr

Pred podrobnejším popisom jednotlivých procedúr si najprv uvedieme ich vysoko-úrovňový popis v rámci PCC. Na dvoch prípadoch pritom vysvetlíme i odlišnosti v jednotlivých krokoch, ktoré spôsobujú vyššie uvedené faktory.

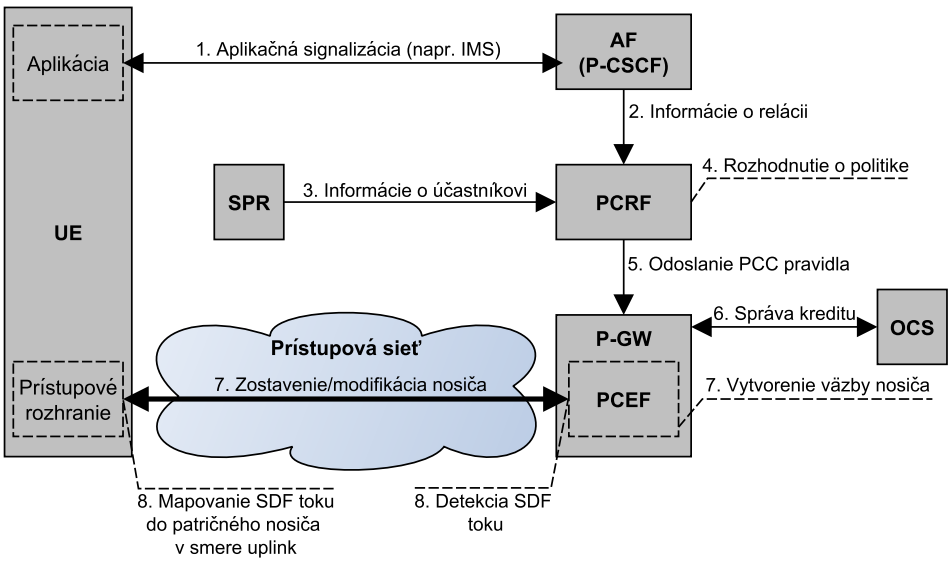
Prvý prípad z obr. 3.2 ilustruje zostavenie relácie služby použitím „on-path“ PCC, sieťou iniciovaného riadenia QoS a online účtovania. Pozostáva z nasledujúcich krokov [23]:

1. Účastník iniciuje službu, napr. hovor v rámci IMS a realizuje end-to-end signalizáciu aplikačnej relácie, ktorú zachytí AF (P-CSCF v prípade IMS). V prípade IMS signalizácia používa protokol SIP. Popis služby je súčasťou tejto

[7] RTSP (Real-Time Streaming Protocol) – RFC 2326 [29].

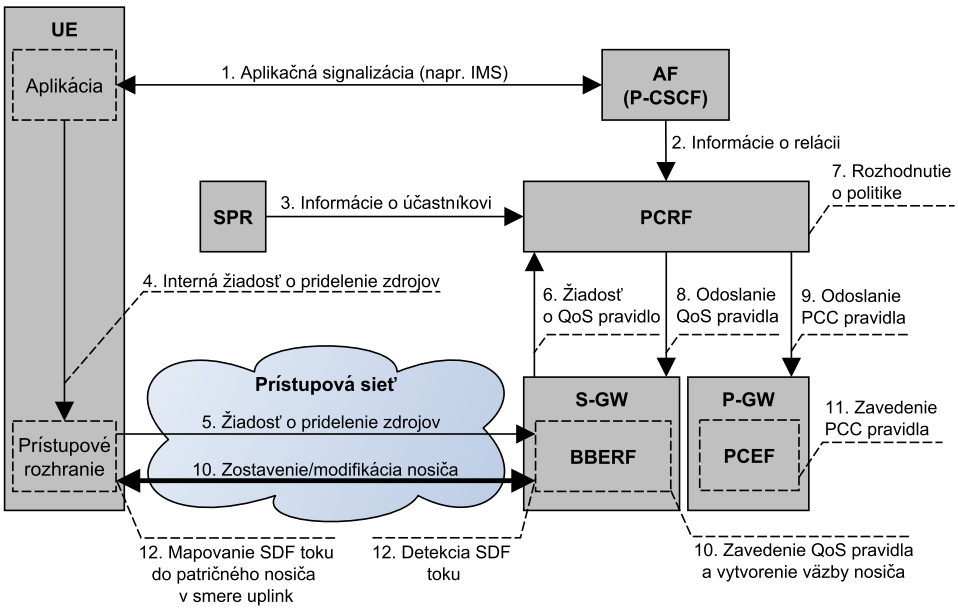
signalizácie. V tomto prípade je pre popis služby použitý protokol SDP.

2. Na základe popisu služby poskytne AF prvku PCRF informácie spojené s danou službou prostredníctvom rozhrania Rx. Informácie o relácii sú v AF mapované do Rx správ odosielaných prvku PCRF. Typicky sa jedná o QoS informácie (typ služby, požiadavky na prenosovú rýchlosť) a parametre prevádzky (napr. IP 5-tuple), ktoré umožňujú identifikáciu IP tokov korešpondujúcich s touto reláciou.
3. PCRF si môže vyžiadať informácie o účastníkovi zo SPR.
4. PCRF na základe informácií o relácii, operátorom definovanej politiky vztiahnutej k danej službe, informácií o účastníkovi a ďalších buduje rozhodnutia o politike. Tie sú formulované ako PCC pravidlá.
5. PCRF odošle PCC pravidlá do PCEF. Ten na základe obdržaných pravidiel vykoná rozhodnutia o politike. Všetky dáta používateľskej roviny pre daného účastníka a dané IP spojenie sú prenášané do PCEF situovaného v P-GW.
6. V prípade že PCC pravidlo špecifikuje zavedenie online účtovania, PCEF kontaktuje OCS prostredníctvom rozhrania Gy a vyžiada potrebný kredit.
7. PCEF zavedie pravidlá a vykoná vytvorenie väzby nosiča, aby zabezpečil patričnú QoS pre prevádzku danej služby. To môže viesť k zostaveniu nového či modifikáciu existujúceho nosiča.
8. Pakety relácie služby sú prenášané naprieč sieťou, PCEF vykonáva detekciu SDF toku za účelom detegovania IP toku danej služby. Tieto IP toky sú prenášané vhodným nosičom.



Obr. 3.2: Vysoko-úrovňový popis PCC procedúr pre „on-path“ model, sieťou iniciované riadenie QoS a online účtovanie (spracované podľa [23])

Druhý prípad z obr. 3.3 ilustruje obdobnú situáciu, avšak tentokrát sa jedná o použitie „off-path“ modelu, terminálom iniciované riadenie QoS a offline účtovanie. V tomto prípade PCEF nevykonáva kontrolu prístupu na základe dostupného kreditu a nie je teda uvažovaný v ďalšom popise.



Obr. 3.3: Vysoko-úrovňový popis PCC procedúr pre „off-path“ model, terminálom iniciované riadenie QoS a offline účtovanie (spracované podľa [23])

Prvé tri kroky popisu sú identické ako v predchádzajúcom prípade, uvedieme ich teda už len v skrátenej forme [23]:

1. Účastník iniciuje službu, opäť uvažujme napr. hovor v rámci IMS, a vykoná signalizáciu aplikačnej relácie prostredníctvom AF.
2. Na základe popisu služby poskytne AF prvku PCRF informácie spojené s danou službou.
3. PCRF si môže vyžiadať informácie o účastníkovi zo SPR.

   Od nasledujúceho bodu bude zrejmá odlišnosť medzi terminálom a sieťou iniciovanými procedúrami. V predchádzajúcom prípade PCRF odoslal pravidlá do P-GW a ten inicioval procedúru vytvárania väzieb za účelom zabezpečenia vhodnej QoS pre danú službu. V tomto prípade však PCRF čaká na vyžiadanie pravidiel od samotného terminálu UE:

4. Aplikácia v UE vygeneruje internú žiadosť pre prístupové rozhranie (API), aby to žiadalo o pridelenie zdrojov potrebných pre novo spustenú aplikáciu.
5. UE odošle žiadosť o pridelenie zdrojov pre danú službu sieti. Žiadosť zahŕňa

triedu QoS, paketové filtre asociované s danou službou, príp. vyžiadanie konkrétnej hodnoty parametru GBR. Presné detaily žiadosti závisia od prístupovej technológie, ktoré UE práve využíva. Pre E-UTRAN, UE posiela terminálom vyžadovanú modifikáciu zdrojov nosiča.

6. Keďže je použitý „off-path“ model, je to BBERF, ktorý podnecuje PCRF k interakcii v prípade, že obdrží žiadosť od UE. Pre porovnanie, v prípade „on-path“ modelu by bola žiadosť UE odoslaná z S-GW do P-GW a P-GW by odoslal žiadosť o PCC pravidlá do PCRF.
7. Podobne ako v 4. kroku v predchádzajúcom prípade, PCRF buduje rozhodnutia, formulované v podobe PCC pravidiel. V tomto prípade zároveň z PCC pravidiel odvodzuje QoS pravidlá.
8. PCRF odošle QoS pravidlá do BBERF.
9. PCRF odošle korešpondujúce PCC pravidlá do PCEF.
10. BBERF (situovaný v S-GW) zavedie QoS pravidlá a vykoná vytvorenie väzby nosiča, aby zabezpečil patričnú QoS pre prevádzku danej služby. To môže viesť k zostaveniu nového či modifikáciu existujúceho nosiča.
11. PCEF zavedie PCC pravidlá a vykoná proces zahadzovania/prepustenia paketov (gating control), zabezpečenie prenosovej rýchlosti a účtovanie na úrovni služby tak, ako je definované v PCC pravidle.
12. Pakety relácie služby sú prenášané naprieč sieťou. UE používa paketové filtre pre smer uplink, aby určil, ktorým nosičom by mali byť prenesené pakety v tomto smere. BBERF i PCEF vykonávajú detekciu SDF toku za účelom detegovania IP toku danej služby. BBERF odosiela pakety v smere downlink prostredníctvom vhodného nosiča.

Vyššie uvedené prípady nevyčerpávajú všetky možné scenáre a konfigurácie ktoré môžu nastať. Napríklad pre služby neposkytujúce AF je možné použiť vopred definované QoS/PCC pravidlá. V takomto prípade by bol krok č. 2 z vyššie uvedených prípadov vynechaný a PCRF by autorizovalo PCC/QoS pravidlá na základe prednastavenej politiky bez nutnosti explicitnej signalizácie aplikačnej relácie. Od špecifikácie Rel. 11 je tiež možné pre aplikácie bez možnosti vykonania explicitnej signalizácie túto autorizáciu vykonať na základe funkcie ADC prostredníctvom TDF resp. PCEF s rozšírením o danú funkciu. ADC narozdiel od vopred definovaných pravidiel navyše umožňuje dynamické poskytovanie prevádzkových a QoS parametrov od PCRF (napr. úprava max. povolenej prenosovej rýchlosti) i pre takéto aplikácie [23].

Prejdime k popisu jednotlivých procedúr.

3.3.2 Vytvorenie väzieb

Mechanizmus vytvárania väzieb už bol popísaný v podkap. 2.1.3. Procedurálne pozostáva z [11]:

1. Vytvorenia väzieb relácií – Asociácia informácií o relácii služby (získaných prostredníctvom signalizácie od AF) s jediným PDN spojom. Na základe týchto informácií by PCRF mal identifikovať patričné PCC pravidlá vztiahnuté k tejto relácii, zahŕňajúc vytvorenie nových i modifikáciu/odstránenie existujúcich pravidiel.
2. Autorizácie PCC pravidiel príp. vytvorenie QoS pravidiel – autorizácia PCC pravidiel je výber QoS parametrov ako QCI, ARP, GBR, MBR atď. pre tieto pravidlá. V prípade „off-path“ modelu v tomto kroku PCRF zaisťuje že každé PCC pravidlo v PCEF má korešpondujúce (pre rovnaký SDF tok) aktívne QoS pravidlo v BBERF, teda že ich SDF vzor, priorita a QoS informácie sú zhodné.
3. Vytvorenia väzieb nosičov – priradenie PCC pravidla a QoS pravidla (ak je použité) k EPS nosiču.

3.3.3 Procedúry spojené s nosičmi

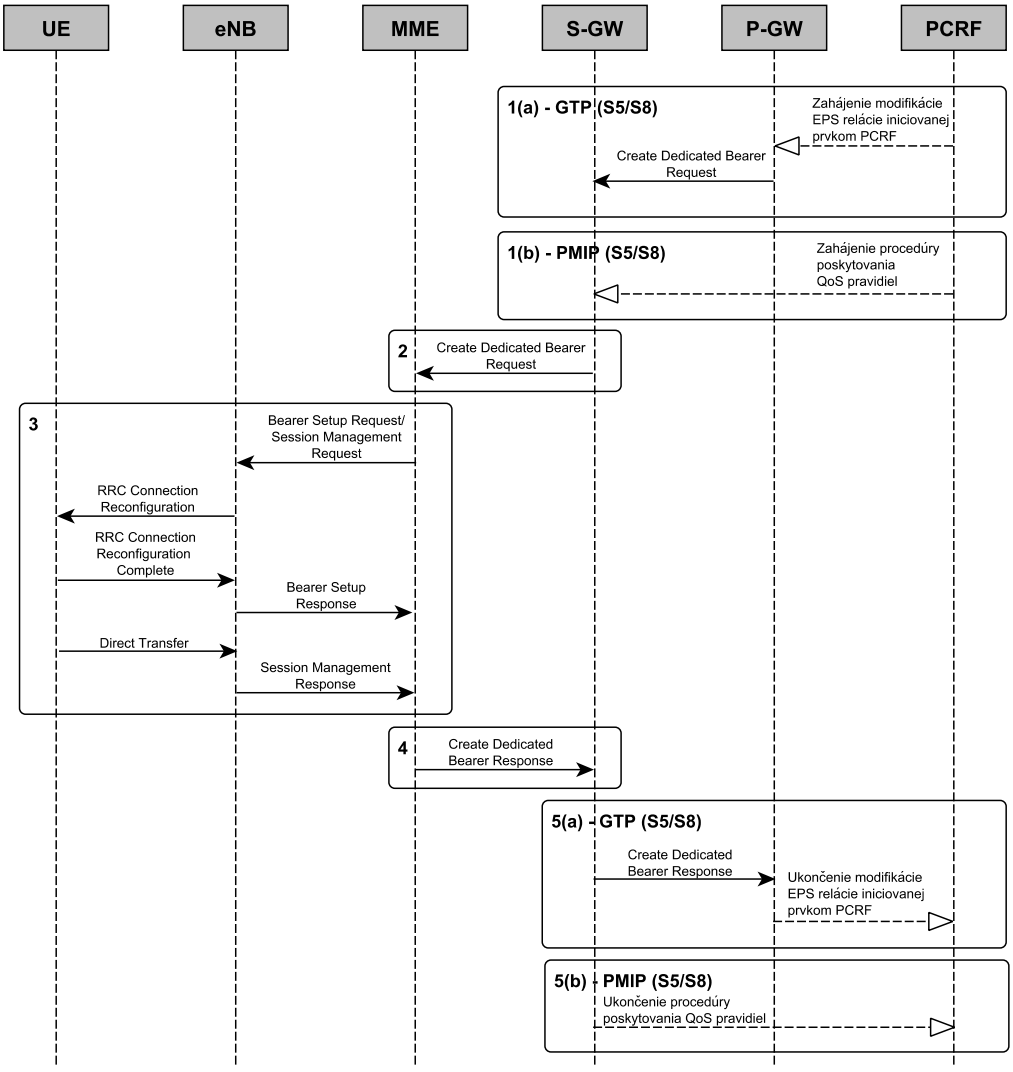
EPS nosiče môžu byť dynamicky vytvárané, modifikované a uvoľňované podľa potrieb aplikácie používanej v terminále UE. V rámci E-UTRAN prístupu je procedúra vytvorenia vyhradeného nosiča vždy iniciovaná sieťou. UE môže odoslať sieti len žiadosť o pridelenie zdrojov a tá následne iniciuje patričnú procedúru [23].

Vytvorenie vyhradeného nosiča

Impulzom pre vytvorenie vyhradeného nosiča je typicky obdržanie nových PCC/QoS pravidiel prvkami P-GW/S-GW od PCRF, ktoré vyžadujú vytvorenie nového nosiča. Procedúra je naznačená na obr. 3.4. Popis sledu správ je nasledovný [23]:

1. Na základe signalizácie od AF prostredníctvom rozhrania Rx alebo žiadosti od UE učiní PCRF rozhodnutie o politike.
   (a) Pre „on-path“ model PCRF odošle nové PCC pravidlá do P-GW, na základe ktorých P-GW rozhodne o vytvorení nového vyhradeného nosiča a odošle správu `Create Dedicated Bearer Request` do S-GW.
   (b) Pre „off-path“ model PCRF odošle nové QoS pravidlá priamo do S-GW a ten podľa nich rozhodne o vytvorení nového vyhradeného nosiča.
2. S-GW odošle žiadosť `Create Dedicated Bearer Request` do MME.

3. MME odošle príkaz do eNB aby inicioval v rámci E-UTRAN potrebné procedúry k vytvoreniu patričného rádiového nosiča. Následne sa vykoná patričná rekonfigurácia RRC[8] spojenia medzi UE a eNB.
4. MME odošle do S-GW potvrdenie o vytvorení vyhradeného nosiča správou Create Dedicated Bearer Response (EPS bearer ID, S1-TEID).
5. S-GW potvrdí nastavenie vyhradeného nosiča.
   (a) Pre „on path“ model, S-GW odošle `Create Dedicated Bearer Respond` (EPS bearer ID, S5/S8 TEID) do P-GW, P-GW odošle potvrdenie do PCRF.
   (b) Pre „off path“ model, S-GW odošle toto potvrdenie priamo do PCRF.



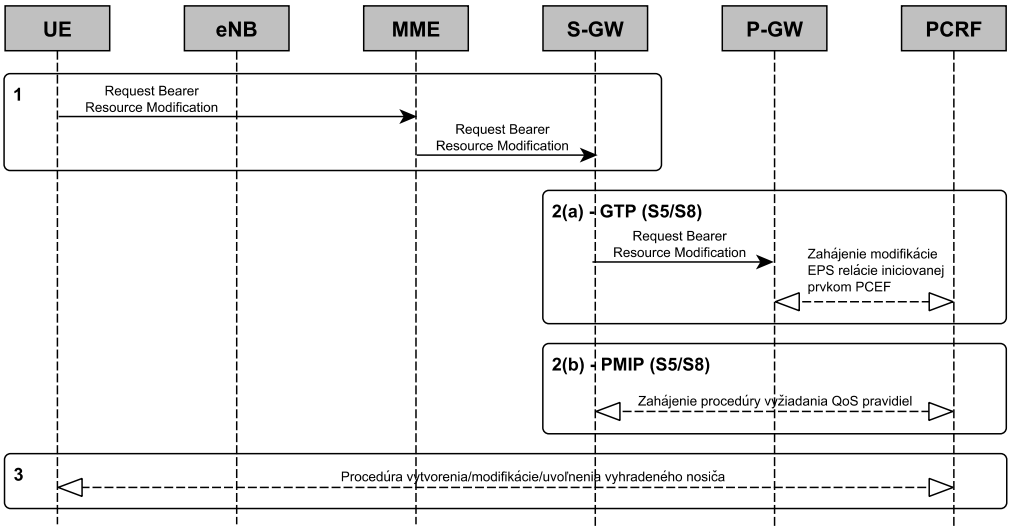
Obr. 3.4: Procedúra vytvorenia vyhradeného nosiča (spracované podľa [23])

[8]RRC (Radio Resource Control) – podvrstva rádiového rozhrania Uu na 3. vrstve, ktorá zabezpečuje signalizáciu v riadiacej rovine.

Žiadosť terminálu o modifikáciu či uvoľnenie zdrojov

V rámci terminálom iniciovaného riadenia QoS je procedúra vyhradenia zdrojov či modifikácie/uvoľnenia už pridelených zdrojov totožná. Sled správ je naznačený na obr. 3.5. Popis je nasledovný [23]:

1. Na základe napr. žiadosti aplikácie odošle UE žiadosť o modifikáciu pridelených zdrojov pre daný tok služby (informácie o paketových filtroch a QoS parametroch). MME prepošle žiadosť do S-GW.
2. Žiadosť je ďalej preposlaná do PCRF:
   (a) Pre „on path“ model cez P-GW.
   (b) Pre „off path“ model priamo.
3. PCRF učiní rozhodnutie o politike a poskytne ho P-GW/S-GW. Na základe nového, modifikovaného alebo odstráneného PCC/QoS pravidla, P-GW/S-GW iniciuje patričné procedúry.



Obr. 3.5: Procedúra žiadosti terminálu o vyhradenie/modifikáciu/uvoľnenie zdrojov (spracované podľa [23])

3.3.4 Detekcia a riadenie aplikácie (ADC)

ADC podporuje 2 režimy hlásenia o aplikácii [11], [23]:

- **Vyžiadané** – PCRF dáva TDF/PCEF pokyn, ktoré aplikácie by mal detegovať a ohlasovať aktivovaním (autorizáciou) vhodných ADC/PCC pravidiel v TDF/PCEF. V dynamických ADC/PCC pravidlách môže tiež špecifikovať určité akcie, ktoré sa majú vykonať pre detegovanú aplikačnú prevádzku ako je presmerovanie aplikačnej prevádzky na inú cieľovú adresu, riadenie brány a obmedzenie šírky pásma. PCRF zohľadňuje pri autorizácii pravidiel informácie

o účastníkovi, preto musí účastnícky profil povolovať použitie ADC na základe súhlasu daného účastníka.

- **Nevyžiadané** – aplikácie, ktoré majú byť detegované a ohlasované sú predkonfigurované v TDF, pričom všetky vopred poskytnuté ADC pravidlá v TDF sú autorizované a nemôžu byť dynamicky aktivované. Zároveň nezohľadňujú informácie o účastníkovi a teda povolenie použitia ADC v konfigurácii účastníckeho profilu nie je potrebné, nakoľko detekcia prebieha pre každého účastníka rovnakým spôsobom. TDF v tomto prípade tiež nevykonáva žiadne z akcií uvedených v predchádzajúcom prípade.

3.3.5 Riadenie brány

Prepúštanie alebo blokovanie paketov patriacim SDF tokom/detegovaným aplikáciam vykonáva PCEF/TDF. Rozhodnutie o prepustení/blokovaní je definované paramterom „stav brány“ (otvorená/zatvorená) zahrnutým v PCC/ADC pravidle. Rozhodnutia vykonáva PCRF [11].

3.3.6 Hlásenie udalostí

Funkcia hlásenia udalostí vykonáva detekciu spúšťača určitej udalosti prvku PCRF. Funkciu vykonáva PCEF alebo BBERF (ak je implementovaný) alebo TDF (ak je implementovaný) pre vyžiadané hlásenie o aplikácii. Spúšťače udalostí definujú, za akých podmienok má byť hlásenie udalostí do PCRF realizované po zostavení PDN spojenia. V prípade, že nastane udalosť definovaná spúšťačom udalosti, táto je ohlásená do PCRF. Pre PCRF je to signál k poskytnutiu PCC/QoS/ADC pravidiel. Príkladmi spúšťačov udalostí je zmena QoS alebo žiadosť o modifikáciu vyhradeného zdroja [11].

4 END-TO-END PODPORA KVALITY SLUŽBY

V predchádzajúcej kapitole sme popísali mechanizmus zabezpečenia QoS jednotlivých prvkov najmä z pohľadu signalizačných procedúr riadiacej roviny, teda procedúr v rámci PCC. Súhrn funkcií, ktoré plnia prvky EPS pri zabezpečení QoS v používateľskej rovine uvádza tab. 4.1[9] [23].

Tab. 4.1: Prehľad prvkov a ich funkcií spojených so zabezpečením QoS v EPS v používateľskej rovine

-	**Prvky siete** / **Funkcie**	UE	eNB	Transportná sieť	P-GW
Funkcie „per bearer"	Filtrovanie paketov	X (UL)			X (DL)
	Riadenie prístupu a preemptivita (ARP)		X		X
	Úprava rýchlosti (GBR, MBR, UE/APN AMBR)		X		X
	Správa front	X	X		
	UL+DL plánovanie		X		
	Konfigurácia protokolov 1. a 2. vrstvy		X		
	Mapovanie QCI do DSCP		X		X
Funkcie „per DSCP"	Správa front			X	
	UL+DL plánovanie			X	

Niektoré z funkcií už boli predstavené v predchádzajúcich kapitolách, najmä funkcie ktoré sa vykonávajú na úrovni nosičov (per EPS bearer - podľa EPS nosičov). Pre úplnosť uveďme doplňujúce poznámky k funkciám [23]:

- UL+DL plánovanie v eNB – funkcia zodpovedná za distribúciu sieťových zdrojov medzi zostavenými nosičmi na základe ich QoS charakteristík.
- Konfigurácia protokolov 1. a 2. vrstvy – zahŕňa konfiguráciu protokolov riadenia chýb (modulácia, kódovanie, opakovaný prenos na linkovej vrstve) za účelom dodržania požadovaných QoS charakteristík, oneskorenia paketov a paketovej chybovosti.

Na úrovni transportnej IP siete, ktorá zahŕňa medziľahlé prvky jadra siete, akými sú bežné smerovače, nie je povedomie o koncepte EPS nosičov. Zaobchádzanie s pa-

[9] Prehľad je vztiahnutý k „on-path" modelu, pre „off-path" model sú funckie P-GW spojené s nosičmi vykonávané v S-GW.

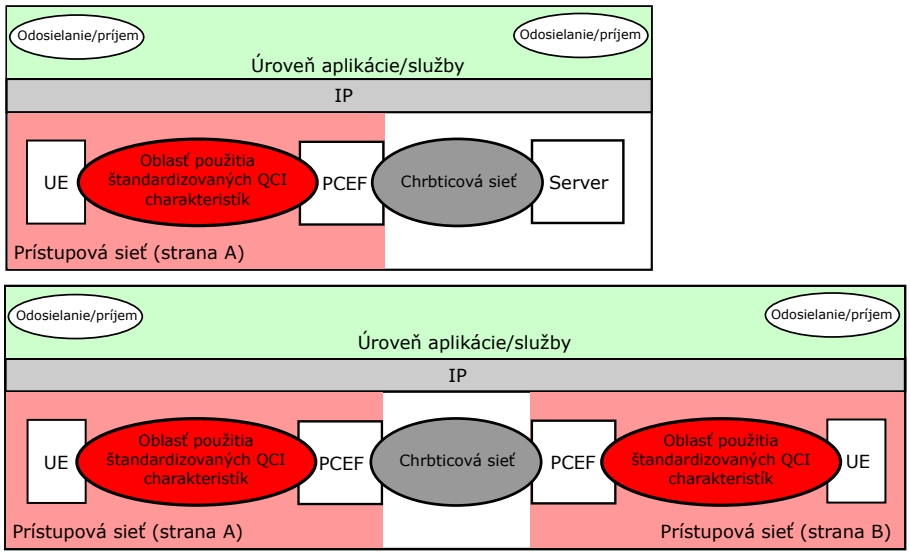
ketmi podľa požadovanej politiky je zabezpečené mechanizmami transportnej vrstvy, typicky **DiffServ** (Differentiated services – Diferencované služby), využívajúci pole **DSCP**(DiffServ Code Point – Kódový bod diferencovaných služieb) [24].

V nasledujúcich podkapitolách popíšeme spôsob zabezpečenia QoS naprieč celou mobilnou sieťou (end-to-end) s uvažovaním parametrov QoS vyžadovanými konkrétnymi službami, a to ako na úrovni nosičov (typicky priradenie QoS parametrov QCI, ARP), tak na úrovni transportnej siete (typicky mapovanie QCI do DSCP).

4.1 Zabezpečenie QoS na úrovni nosičov

Vychádzajúc z podkap. 2.2, každý SDF tok je asociovaný s jedinou hodnotou parametru QCI. V rámci jedného PDN spoja môže tiež existovať viacero agregovaných SDF tokov zdieľajúcich spoločnú hodnotu QCI a ARP.

4.1.1 Štandardizované QCI charakteristiky



Obr. 4.1: Štandardizované QCI charakteristiky pre komunikáciu klient/server (hore) a peer/peer (dole) (spracované podľa [11])

S ohľadom na požiadavky na kvalitu konkrétnej služby sú definované **štandardizované QCI charakteristiky** (viď tab. 4.2). Účelom štandardizovania QCI s korešpondujúcimi charakteristikami je zabezpečiť, aby aplikácie/služby namapované do tohto QCI obdržali rovnakú minimálnu úroveň QoS v sieti rôznych operátorov a v prípade roamingu, a to nezávisle na prístupovej technológii (3GPP/Nie-3GPP). Štandardizované charakteristiky určujú spôsob zaobchádzania s paketmi

daných SDF tokov medzi UE a PCEF s ohľadom na typ komunikácie, ako naznačuje obr. 4.1 [11].

Tab. 4.2: Štandardizované QCI charakteristiky

QCI	Typ zdroja	Úroveň priority	Oneskorenie paketov	Paketová chybovosť	Príklad služieb
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Hlasový hovor
2		4	150 ms	10^{-3}	Videohovor (živý prenos)
3		3	50 ms	10^{-3}	Hranie hier v reálnom čase
4		5	300 ms	10^{-6}	Nie-konverzačné video (prenos s vyrovnávacou pamäťou)
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	IMS signalizácia
6		6	300 ms	10^{-6}	Video (prenos s vyrovnávacou pamäťou), TCP-využívajúce služby (www, e-mail, chat, ftp, p2p zdieľanie súborov, progresívne video)
7		7	100 ms	10^{-3}	Hlasové služby, video (živý prenos), hranie interaktívnych hier
8		8	300 ms	10^{-6}	Video (prenos s vyrovnávacou pamäťou), TCP-využívajúce služby (www, e-mail, chat, ftp, p2p zdieľanie súborov, progresívne video)
9		9	300 ms	10^{-6}	Video (prenos s vyrovnávacou pamäťou), TCP-využívajúce služby (www, e-mail, chat, ftp, p2p zdieľanie súborov, progresívne video)

Pre údaje z tab. 4.2 platí [11]:

- Oneskorenie paketov medzi eNB a PCEF sa v závislosti od ich vzájomnej vzdialenosti pohybuje od približne 10 ms pri využití lokálneho PCEF až po približne 50 ms (Európa – západné pobrežie Spojených štátov amerických) pri využití „vzdialeného“ PCEF, typicky pri roamingu. Pre odvodenie oneskorenia na rádiovom rozhraní je preto nutné odčítať priemernú hodnotu týchto oneskorení t. j. 20 ms (uvažuje sa menej časté použitie roamingu) od hodnoty oneskorenia uvedenej v QCI charakteristikách (medzi UE a PCEF). Pre určitú hodnotu QCI je oneskorenie rovnaké pre uplink i downlink.
- QCI 1–5 a 7 sú asociované s operátorom riadenými službami, teda službami, pre ktoré sú pri autorizácii známe SDF filtre (pre E-UTRAN okamih vytvorenia/modifikácie korešpondujúceho vyhradeného nosiča).
- QCI 6 je typicky použitý pre zaistenie priority služby/aplikácie neprebiehajúcej v reálnom čase pre účastníka tzv. MPS (Multimedia Priority Services – Multimediálne prioritné služby). Takýmito účastníkmi sú vláda či

bezpečnostné zložky, ktoré musia mať i vo výnimočných prípadoch (napr. prírodné katastrofy) zaistené prostredníctvom operátora (zriadený MPS profil v HSS) možnosť realizovať dané služby a to naprieč rôznymi doménami.
- QCI 8 môže byť použitý pre vyhradené nosiče ľubovoľného používateľa/skupinu používateľov, príp. implicitný nosič „prémiového“ účastníka.
- QCI 9 môže byť použitý pre implicitné nosiče neprivilegovaných účastníkov. Diferencovanie účastníkov medzi skupinami účastníkov pripojenými do rovnakej PDN s rovnakým QCI umožňuje parameter AMBR.

4.1.2 ARP charakteristiky

Parameter ARP sa definuje v rozsahu priorít 1–15. Priority 1–8 by mali byť priradené len zdrojom vyhradeným pre služby, ktoré sú autorizované v rámci operátorovej domény, teda obsluhujúcej siete. Výnimkou je existencia patričnej roamingovej dohody medzi operátormi, zabezpečujúcej zhodné použitie úrovní priorít, kedy je možné použiť tieto priority i v prípade, že UE je v roamingu. V tomto rozsahu sa nachádza napr. služba tiesňového hovoru. Priority 9–15 môžu byť priradené pre zdroje autorizované v domácej sieti a následne aplikované v rámci roamingu [11].

4.2 Zabezpečenie QoS na úrovni transportnej siete

Implementácia QoS mechanizmov na úrovni transportnej siete v EPC je možná v prípade mapovania QoS parametrov do vhodných formátov pri prechode paketov patriacim jednotlivým službám GTP-U tunelom[10]. V rámci nasledujúceho textu nebudeme uvažovať využitie protokolu PMIP na rozhraní S5/S8 („off-path model“).

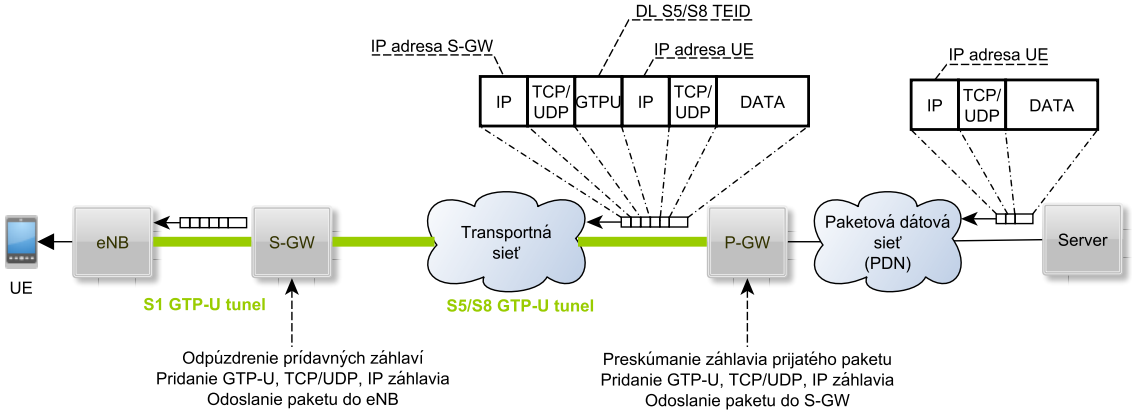
4.2.1 Zaobchádzanie s paketmi v P-GW

V prípade, že chce server pripojený do PDN odoslať paket do UE, odošle tieto na IP adresu, ktorú pre dané UE alokoval P-GW z vlastného adresného priestoru. P-GW preskúma záhlavia prijatého paketu, porovná ich s paketovými filtrami ktoré si uložil pri konfigurácii nosiča, a tým identifikuje cieľové UE, SDF tok a EPS nosič a vyhľadá korešpondujúci S5/S8 nosič a GTP-U tunel. Následne P-GW overí, že pre SDF tok nebude prekročené MBR a uloží záznam prevádzky pre potreby účtovania [24].

[10]GTP-U (GPRS Tunnelling Protocol User plane) tunel je určený pre prenos používateľských dát.

4.2.2 Prenos paketu GTP-U tunelom

P-GW pridá GTP-U záhlavie (obsahujúce S5/S8 TEID), záhlavie protokolu transportnej vrstvy (TCP[11]/UDP[12]) a následne ďalšie IP záhlavie s IP adresou S-GW aktuálne obsluhujúcou cieľové UE. Takto vytvorenú jednotku odošle do S-GW prostredníctvom nižšej transportnej siete. S-GW odpuzdruje prídavné záhlavia, preskúma TEID tunelu, z ktorého paket prijal, vyhľadá korešpondujúci EPS nosič. Následne identifikuje cieľové UE a jeho obsluhujúce eNB, pridá vlastné GTP-U, TCP/UDP a IP záhlavia a odošle paket do eNB, ktorý napokon prostredníctvom transportných mechanizmov rádiového rozhrania doručí paket do UE [24]. Celý vyššie uvedený proces naznačuje obr. 4.2 s detailom na prenos na rozhraní S5/S8.



Obr. 4.2: Detail S5/S8 GTP-U tunela v rámci end-to-end prenosu paketu v smere downlink (spracované podľa [24])

4.2.3 Diferencované služby

Mechanizmus diferencovaných služieb umožňuje rozlišovanie paketov SDF tokov v transportnej sieti. 3GPP špecifikuje použitie diferencovaných služieb na rozhraní S1-U a X2, mechanizmus sa však bežne používa v rámci EPC. Princíp spočíva v klasifikovaní prijatého paketu do určitej triedy vstupným smerovačom pri vstupe do DiffServ domény. Klasifikácia prebieha na základe **SLA** (Service Level Agreement – Dohoda o úrovni služby) typicky medzi operátorom a účastníkom. Klasifikovaný paket je následne označený pomocou DSCP využitím prvých 6b oktetu Typ služby/Trieda prevádzky v záhlaví IPv4/IPv6 paketu. V rámci DiffServ domény potom interné smerovače na základe DSCP daných paketov aplikujú algoritmy pre

[11]TCP (Transmission Control Protocol) – RFC 793 [30] – pre služby vyžadujúce spoľahlivý prenos dát s potvrdzovaním prijatých segmentov, napr. prostredníctvom FTP

[12]UDP (User Datagram Protocol) – RFC 768 [31] – pre služby vyžadujúce nízku hodnotu oneskorenia a jeho kolísania, typicky služby v reálnom čase

správu front, zahadzovanie a odosielanie týchto paketov. Dôsledkom toho je, že toky dát prislúchajúce danému DSCP majú určité **PHB** (Per Hop Behavior – Správanie podľa skoku). Medzi typicky používané patria [26], [24]:

- **Best effort** (Maximálna snaha) – implicitné správanie, pri ktorom sú pakety odosielané rovnakým spôsobom a nezaručujú teda žiadnu garanciu QoS.
- **Expedited forwarding** (Urýchlené odosielanie) – emulácia siete so spínaním okruhov, z čoho vyplýva nevýhoda vysokých požiadaviek na sieťové zdroje a teda ich neefektívne využívanie. Preto sa aplikuje len pre služby s vysokou prioritou, typicky vyžadujúce najmä nízku hodnotu oneskorenia a jeho kolísania (služby v reálnom čase).
- **Assured forwarding** (Zaručené odosielanie) – poskytuje najjemnejšie rozlišovanú garanciu. Je definovaná ako AFXY. X reprezentuje jednu zo 4 tried priorít odoslania definovaných na základe SLA (vyššia hodnota znamená vyššiu prioritu a teda väčšie množstvo vyhradených prostriedkov, napr. priestoru vo vyrovnávacej pamäti). Pakety sú odosielané v poradí danom prioritou. Každej triede potom zodpovedajú 3 priority zahodenia Y, na základe ktorých bude smerovač rozhodovať o zahodení paketu v prípade naplnenia vyrovnávacej pamäte (vyššia hodnota zodpovedá vyššej pravdepodobnosti zahodenia). Celkovo tak vznikne $4 \times 3 = 12$ možných konfigurácii.

V nadväznosti na prípad z podkap. 4.2.2 je mapovanie QCI do DSCP realizované v okamihu, kedy P-GW pridáva vlastné záhlavie pred odoslaním paketu do nižšej transportnej IP siete. Na základe preskúmania QCI nadradeného nosiča odvodí patričné DSCP. Špecifické mapovanie týchto parametrov v pomere 1:1 stanovuje Asociácia GSM v dokumente [25] a je uvedé v tab. 4.3 [24].

Tab. 4.3: Mapovanie QCI do DSCP

QCI	**PHB**	**AF priorita odoslania**	**AF priorita zahodenia**	**DSCP**
1	EF			101110
2	EF			101110
3	EF			101110
4	AF	4	1	100010
5	AF	3	1	011010
6	AF	3	2	011100
7	AF	2	1	010010
8	AF	1	1	001010
9	BE			000000

5 MOŽNOSTI PODPORY KVALITY SLUŽBY V EXPERIMENTÁLNEJ SIETI

Mobilná experimentálna sieť LTE-WiFi-EPC-IMS na FEKT VUT Brno disponuje z hľadiska architektúry štandardnými prvkami uvedenými v podkap.1.2 vyhovujúcimi štandardu 3GPP Rel. 10. Hardvér i softvér väčšiny prvkov pochádza od spoločnosti Huawei Technologies Co., Ltd. [49].

5.1 PCC

Kvalita služby je zaisťovaná prostredníctvom proprietárneho riešenia označovaného „Smart Policy Control“ (Inteligentné riadenie politiky), ktoré preberá funkcionalitu PCC architektúry. V rámci EPS sa na nej podieľajú najmä prvky [48]:

- **UGW9811** (Unified packet GateWay – Jednotná paketová brána) – zlučuje funkcie prvkov P-GW a S-GW,
- **HSS9860** – plní funkciu prvku HSS,
- **UPCC** (Unified Policy and Charging Controller – Jednotná riadiaca jednotka politiky a účtovania) – zvláštna riadiaca platforma s funkcionalitou PCRF.
- **UIM** (Unified Identity Management – Jednotná správa identity) – zahŕňa funkciu AAA (Authentication, Authorization, and Accounting – Autentizácia, autorizácia a účtovanie) servera podporujúceho protokoly RADIUS a DIAMETER.

PCC zahŕňa z pohľadu sietí EPS nasledujúce funkcie, pričom každá z nich je voliteľnou súčasťou vyžadujúcou zvláštnu licenciu [48]:

- **Základná funkcia riadenia politiky a účtovania** – Prvok UGW9811 (ďalej len UGW) zahŕňa ako svoju logickú súčasť prvok PCEF a implementuje PCC pravidlá na základe impulzov od UPCC prostredníctvom rozhrania Gx alebo UIM prostredníctvom rozhrania SGi. PCC je implementovaná pomocou nasledujúcich pravidiel:
  - **Vopred definované** – názov a obsah pravidla je vopred uložený v prvku UGW a rovnaké pravidlo je uložené v UPCC/UIM. Pre aktiváciu pravidla UPCC/UIM doručí do UGW len jeho názov a ten následne identifikuje jeho obsah (napr. identifikátor služby, klasifikačnú skupinu, parametre kvality služby.
  - **Dynamické** – názov a obsah pravidla je uložený len v UPCC. Pre jeho aktiváciu UPCC doručí do UGW názov i obsah. UIM nepodporuje dynamické pravidlá.

– **Lokálne statické** – názov a obsah pravidla je uložený v UGW. Pre jeho aktiváciu UGW identifikuje pakety s dátami konkrétnej služby a zavedie korešpondujúce pravidlo. Tento typ pravidiel je využitý v prípade, že prvky UPCC/UIM nie sú zavedené.

Pri rovnakej priorite pravidiel doručených z UPCC, UIM a lokálnych statických pravidiel je výsledná priorita zavedenia pravidiel v zostupnom poradí od najvyššej priority. Riadenie politiky môže byť definované na základe zmeny lokalizácie v sieti (využívané najmä pri roamingu), časovom segmente (napr. obmedzenia pre služby na sťahovanie súborov v dobe najväčšieho zaťaženia siete), typu prístupovej siete (napr. UTRAN/E-UTRAN) atď., pričom niektoré z nich vyžadujú jeden či viac z ďalej menovaných funkcií.

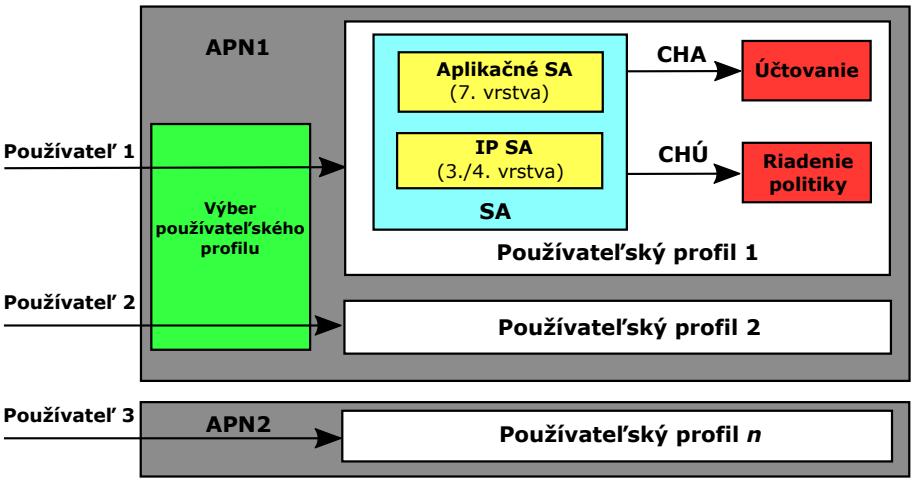
- **Riadenie politiky na základe prevádzky** – funkcia orientovaná na aplikovanie rozličných politík podľa objemu dát využitého používateľom za určité časové obdobie. Vyžaduje zavedenie prvku UPCC a využíva tzv. FUP (Fair Use Policy – Politika spravodlivého používania). Operátor touto politikou môže obmedziť dostupnú prenosovú rýchlosť po vyčerpaní predplateného množstva dát používateľom. Obmedzenie sa môže so zvyšujúcim sa prekračovaním tohto množstva ľubovoľne zvyšovať, a pri prekročení hraničnej hodnoty môže byť prístup i zablokovaný.

- **Riadenie prevádzky na základe povedomia o službe** – umožňuje operátorovi riadiť a optimalizovať prenosovú rýchlosť a ďalšie parametre kvality služby na základe typu použitej služby a zabezpečiť aby jej využitie nelimitovalo zdroje vyhradené pre obsluhu požiadavkov ďalších používateľov. Podľa potrieb operátora sa môže jednať o globálnu správu prenosovej rýchlosti, správu prenosovej rýchlosti na základe používateľa či skupiny používateľov, prípadne implementáciu mechanizmu DiffServ. Pre využívanie tejto funkcie je nutné nakonfigurovať v sieti techniku **SA** (Service Awareness – Povedomie o službe).

5.2 Základný koncept techniky SA

Spôsob implementácie SA po prechode používateľských dát prvkom UGW naznačuje obr 5.1. SA umožňuje na základe analýzy paketov na 3./4. (sieťovej/transportnej) a 7. (aplikačnej) vrstve získať informácie o týchto paketoch a následne vykonať patričné charakteristiky akcie (CHA) a účtovania (CHÚ). Hovoríme o **IP SA** (IP Service Awareness – IP povedomie o službe) a **aplikačnej SA**. Práve charakteristiky

akcie (CHA) zahŕňajú dodržanie korešpondujúcich parametrov kvality služby. UGW rozlišuje prevádzku podľa APN a v rámci každého APN definuje používateľské profily pre používateľov s rovnakými charakteristikami [48].



Obr. 5.1: Princíp techniky povedamia o službe (SA), spracované podľa [48]

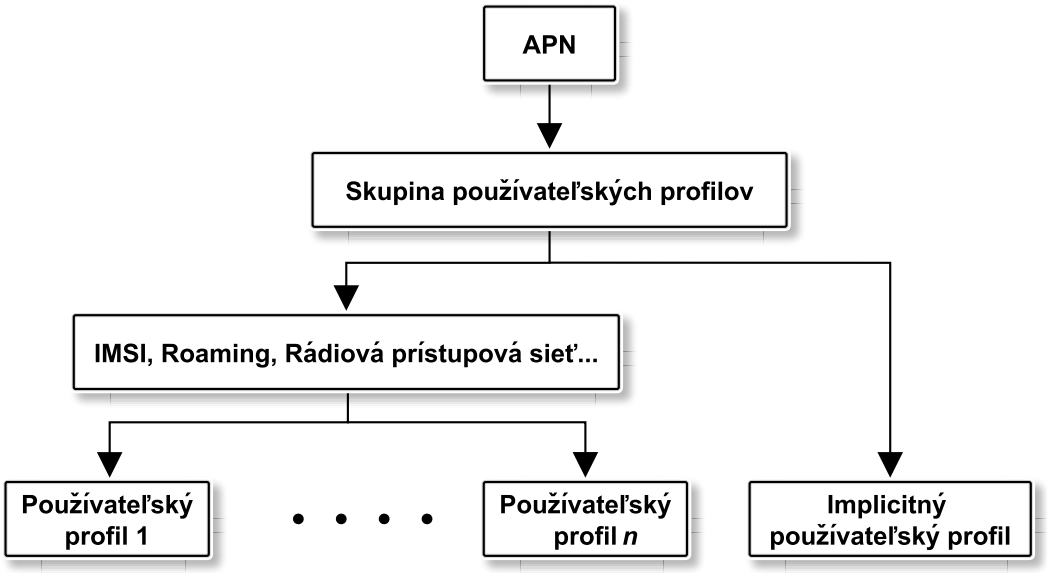
5.3 Možnosti konfigurácie techniky SA

Dostupná technická dokumentácia [48] k prvkom experimentálnej siete nezahŕňa špecifikáciu prvkov UPCC a UIM, preto budú ďalej uvedené možnosti konfigurácie SA dostupné výhradne z dokumentácie k prvku UGW. Konfigurácia sa bude sústrediť najmä na kroky potrebné k definovaniu parametrov kvality služby pre konkrétne služby. Preto budú uvedené parametre obsahovať všetky povinné a niektoré voliteľné položky (súvisiace s nastavením kvality služby). Príkazy pre definovanie jednotlivých parametrov sa zadávajú do UGW prostredníctvom aplikácie **Local Maintenance Terminal** (Terminál lokálnej údržby) [48].

5.3.1 Používateľský profil

Prvým krokom je vytvorenie **používateľského profilu** a **skupiny používateľských profilov** definovaním ich názvu. V rámci každého APN je možné vytvoriť jednu skupinu používateľských profilov a v rámci tej definovať maximálne 200 používateľských profilov. Skupina používateľských profilov môže byť obdržaná tiež dynamicky od UIM. Implicitný používateľský profil sa vytvorí automaticky a bude aplikovaný v prípade nezhody so žiadnym vytvoreným profilom (vid obr. 5.2). V prípade viacerých vyhovujúcich profilov bude vybraný ten s najvyššou prioritou. Prioritu definujeme pri vytváraní väzieb medzi každým profilom a skupinou profilov

pričom sa jedná o číselnú hodnotu z rozsahu 1–250 (menšia hodnota označuje vyššiu prioritu). Voliteľne môžeme zvoliť typ rádiovej prístupovej technológie (UTRAN, E-UTRAN atď), IMSI či definovať domáceho používateľa, návštevníka, či používateľa v rámci roamingu. Priradenie APN ku skupine používateľských profilov docielime opäť vytvorením väzby bez definovania ďalších parametrov [48].



Obr. 5.2: Koncept používateľských profilov v experimentálnej sieti, spracované podľa [48]

5.3.2 Filter

Druhým krokom je vytvorenie **filtrov** a **skupiny filtrov** podieľajúcich sa na IP SA (analýza 3. a 4. vrstvy). Na základe filtrov sú pakety vyberané na ďalšie spracovanie. Je možné vytvoriť až 1000 filtrov pre každú z ďalších až 1000 možných skupín filtrov. Pre vytvorenie filtra je nutné definovať názov a protokol sieťovej/transportnej vrstvy. Ďalej je možné definovať hodnotu oktetu ToS (Type of Service – Typ služby), IP adresu a port serveru či mobilnej stanice [48].

5.3.3 L7 pravidlo

Tretím krokom je definícia **L7 pravidla** podieľajúceho sa na aplikačnej SA. Pred vytvorením samotného pravidla je možné vytvoriť **L7-informáciu** a **skupinu L7-informácií**. Pomocou parametru L7-informácia môžeme definovať výber paketov na základe URL adresy, príkazov/metód aplikačných protokolov (napr. príkaz

`GET` protokolu HTTP), poľa *používateľský agent* paketu protokolu HTTP (napr. typ mobilného telefónu, typ webového prehliadača) atď. Skupina L7-informácií definuje pomocou hodnoty sekvenčného čísla (z rozsahu 1-65535) prioritu poradia vyhodnocovania L7-informácií (nižšia hodnota znamená vyššiu prioritu). Výsledné L7 pravidlo pozostáva z názvu, skupiny L7-informácií definovaných v predchádzajúcom kroku, protokolu aplikačnej vrstvy (podporované sú všetky štandardné ako FTP, HTTP, RTSP, p2p atď.) a ďalších možností v prípade ešte jemnejšieho delenia pravidiel na kategórie skupín [48].

5.3.4 Pravidlo

Pravidlom je označované komplexné PCC pravidlo tvorené najmä jeho názvom, skupinou filtrov a L7 pravidlom definovaných v predchádzajúcich kap. 5.3.2 a 5.3.3, časovým rozsahom platnosti pravidla a parametrami kvality služby (QCI, ARP, GBR, MBR atď). Napokon PCC pravidlá sú vyhodnocované v poradí danom prioritou z rozsahu 1–65535 (nižšia hodnota znamená vyššiu prioritu). Jedno PCC pravidlo sa môže viazať len na jednu skupinu filtrov. Výsledné PCC pravidlo je nutné pomocou vytvorenia väzby spárovať s používateľským profilom definovaným v podkap. 5.3.1 [48].

Po analýze paketu pomocou IP SA a aplikačnej SA v UGW a nájdení zhody s výsledným PCC pravidlom sa uplatní politika k nemu vztiahnutá. Tou je z pohľadu kvality služby charakteristika akcie (CHA), ako bolo naznačené na obr. 5.1. Charakteristika akcie je ďalší rozsiahly parameter, ktorý umožňuje definovať konkrétne hodnoty pre riadenie brány (prepúšťanie/zahadzovanie paketov), CAR (Committed Access Rate – Záväzná prístupová rýchlosť), označenie paketu konkrétnou hodnotou PHB v rámci mechanizmu DiffServ a ďalšie. Pomocou týchto parametrov charakteristík akcie je možné dodržať konkrétne hodnoty napr. pre oneskorenie či chybovosť paketov za účelom dodržania štandardizovaných QCI charakteristík či ARP charakteristík (viď podkap. 4.1). Definovaním parametrov kvality služby v rámci vytvárania (PCC) pravidla sa zaistí, že pakety zodpovedajúce pravidlu obdržia tieto parametre. To znamená, že ak pre pravidlo definujeme napr. hodnotu QCI odlišnú od hodnoty implicitného nosiča (typicky hodnota 9), zaistíme vytvorenie vyhradeného nosiča pre pakety „vyhovujúce“ danému pravidlu [48].

6 NÁVRH METODIKY MERANIA A VYHODNOCOVANIA KVALITY SLUŽBY

Pojem „kvalita služby“ môže byť definovaný ako „Súhrn charakteristík telekomunikačnej služby, ktoré súvisia so schopnosťou uspokojovať stanovené a predpokladané potreby používateľa tejto služby“ [39]. Z tejto definície vyplýva, že kvalita služby vychádza z vnímania a očakávania zo strany používateľa danej služby. Celková vnímaná end-to-end kvalita služby je však ovplyvňovaná výkonnosťou jednotlivých častí siete i terminálov. Tým vzniká vzájomný vzťah medzi očakávanou a dosiahnutou kvalitou služby. Poskytovateľ sa pritom snaží docieliť v tomto ohľade vzájomný prienik. Hodnotenie kvality služby je teda vždy posudzované z dvoch rôznych perspektív, a to z pohľadu používateľa resp. z pohľadu poskytovateľa. Cieľom tejto kapitoly je navrhnúť metodiku merania a objektívneho vyhodnocovania end-to-end kvality služby z pohľadu používateľa. Prenosový reťazec typu end-to-end naznačuje obr.6.1 pre prípad peer/peer komunikácie. Podobne sa však môže jednať i o služby typu klient/server [32].

Obr. 6.1: End-to-end kvalita služby, spracované podľa [39]

Každý z prvkov uvedených v tomto prenosovom reťazci ovplyvňuje dosiahnutú kvalitu služby. Terminály UE môžu byť limitované výpočtovým výkonom, prístupové siete napr. šírkou prenosového pásma. Vplyv má tiež prípadné nedodržanie SLA medzi dvoma poskytovateľmi prepojenými spoločným jadrom siete. Dôležité je, že pri meraní end-to-end QoS z pohľadu používateľa nehodnotíme požiadavky samotného používateľa. V takom prípade by sa totiž už jednalo o subjektívne orientovanú kvalitu zážitku (QoE). Zjednodušene sa dá povedať, že pri kvalite služby hodnotíme výkonnosť realizovaných služieb (efektivitu mechanizmov zabezpečenia QoS), zatiaľ čo pri kvalite zážitku spokojnosť používateľa s touto výkonnosťou. Napríklad pre službu FTP by hodnoteným parametrom QoS mohla byť priemerná rýchlosť sťahovania dát a z nej odvodeným parametrom QoE spokojnosť používateľa s časom potrebným na stiahnutie týchto dát na stupnici o určitom rozsahu. Pri empirických výskumoch je následne vypočítané priemerné hodnotenie od viacerých účastníkov výskumu do tzv. MOS (Mean Opinion Score – Priemerné hodnotenie názoru) [32].

Pre dosiahnutie spoľahlivých, hodnoverných a reprodukovateľných výsledkov bude uvedená metodika vychádzať z viacdielneho dokumentu ETSI TS 102 250-1–7 [32],

[33], [34], [35], [36], [37], [38] vytvoreného technickou komisiou STQ (Speech and multimedia Transmission Quality – Kvalita prenosu hovoru a multimédií) štandardizačnej organizácie ETSI (European Telecommunications Standards Institute – Európsky inštitút pre telekomunikačné normy), ktorá zahŕňa popis aspektov kvality služby pre najpoužívanejšie služby v mobilných sieťach, vrátane referenčných procesov od stanovenia požiadaviek na meranie po samotné vyhodnotenie získaných dát.

6.1 Stanovenie účelu použitia

Metodika môže byť aplikovaná pre:

- **jednorazové** meranie siete,
- meranie za účelom **optimalizácie siete**,
- **porovnanie výkonnosti** rôznych sietí.

Meranie siete by malo byť založené na emulácii prevádzky, kde používateľ realizuje typické služby poskytované v rámci mobilnej siete. Vychádzajúc z obr. 6.1 môže meranie prebiehať pre služby peer/peer i klient/server. Z hľadiska delenia v rámci mobilnej siete môžeme rozlišovať služby [35]:

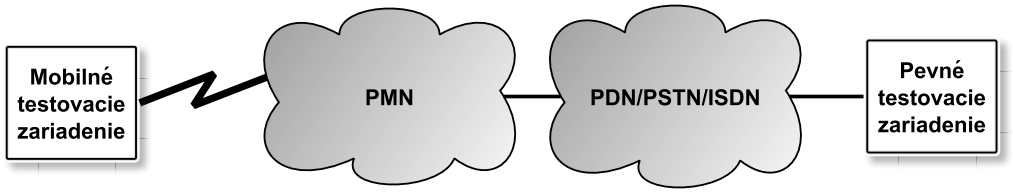
- **„používateľ-používateľ“**(napr. hovorová služba),
- **„ulož-a-odošli“**(SMS – Short Message Service – Služba krátkych správ),
- **„push“ služby** (využívané napr. pri službe e-mail),
- **„informačné/dátové služby“**(TCP/UDP-využívajúce služby, napr. prehliadanie webových stránok).

Keďže metodika predpokladá nasadenie v EPS, pozornosť je venovaná práve poslednej menovanej kategórii informačných/dátových (ďalej len dátových) služieb, ktoré s príchodom týchto sietí zaznamenávajú najväčší rozmach v používaní.

6.2 Požiadavky na merací systém

Emuláciu a meranie prevádzky je možné zabezpečiť pomocou meracieho systému zloženého z **mobilných** a **pevných testovacích zariadení**, viď obr. 6.2. Mobilné testovacie zariadenie je pripojené do PMN (Public Mobile Network – Verejná mobilná sieť) a emuluje služby dostupné priamo z tejto siete. Pevné testovacie zariadenie je pripojené do iných sietí, ako napr. PDN, PSTN (Public Switched Telephone Network – Verejná prepínaná telefónna sieť) či ISDN (Integrated Services Digital

Network – Digitálna sieť integrovaných služieb), a emuluje tak služby dostupné mimo mobilnej siete [35].



Obr. 6.2: Mobilné/pevné testovacie zariadenie pre meranie kvality služby, spracované podľa [35]

6.2.1 Požiadavky na mobilné testovacie zariadenie

Mobilné testovacie zariadenie by malo zahŕňať nasledujúce časti a spĺňať tieto požiadavky [35]:

- **testovací terminál UE** emulujúci bežné používateľské zariadenie, teda koncové zariadenie poskytujúce doručené dáta používateľovi. Z pohľadu merania poskytuje informácie na rôznych komunikačných vrstvách od najvyššej aplikačnej vrstvy cez informácie nižších vrstiev, ako sú udalosti na úrovni operačného systému, informácie transportnej vrstvy či informácie získané na základe signalizácie sieťovej vrstvy. Terminál musí byť v súlade s korešpondujúcou špecifikáciou ako je 3GPP. Terminál môže byť pevne umiestnený alebo pohyblivý, a zároveň nemusí byť súčasťou testovacieho zariadenia, ale môže byť lokalizovaný mimo neho. V takom prípade by mal umožňovať vzdialené ovládanie pre iniciovanie testov s požadovanými parametrami. V prípade merania za účelom porovnávania výkonnosti sietí môžu byť použité len totožné zariadenia (pre zaistenie totožných výkonnostných parametrov),
- **anténu**, a to buď internú – vstavanú v testovacom terminále UE, alebo externú – typicky využívanú pri meraní pohybujúcich sa terminálov vo vozidlách (napr. v externou anténou vybavenom automobile),
- **kontrolér** ovládajúci všetky aktívne časti testovacieho zariadenia, pričom jeho výkonnosť musí byť dostatočná na to, aby nemala merateľný vplyv na správnosť merania dát,
- **procesor** riadiaci testovací terminál UE a predbežne spracúvajúci namerané dáta, pričom jeho výkonnosť musí byť dostatočná na to, aby nemala merateľný vplyv na správnosť merania dát,
- **úložisko** nameraných dát, analyzačného softvéru nameraných dát, pričom jeho výkonnosť a kapacita musí byť dostatočná na to, aby nemala merateľný vplyv na správnosť merania dát,

- **rozhranie MMI** (Man Machine Interface – Rozhranie človek – stroj) umožňujúce konfiguráciu testovacieho zariadenia operátorom, monitorovanie funkcionality a poskytujúce hlásenie a diagnostiku porúch,
- **systém polohovania** zaznamenávajúci geografické údaje (pozíciu, rýchlosť, kurz) pri mobilnom meraní, a to čo možno najčastejšie, pričom formát súradníc by mal spĺňať štandard WGS-84 (World Geodetic System 1984 – Svetový geodetický systém 1984) a presnosť <15 m pre meranie v exteriéri a <10 m pre meranie v interiéri,
- **napájací zdroj**.

Pre prípad merania dátových služieb reprezentuje mobilné testovacie zariadenie stranu klienta pre rozličné aplikácie. Klient môže byť buď súčasťou aplikácie mobilného testovacieho zariadenia, alebo sa môže jednať o externú aplikáciu, vzdialene ovládanú mobilným testovacím zariadením [35].

6.2.2 Požiadavky na pevné testovacie zariadenie

Pevné testovacie zariadenie sa môže výrazne líšiť v závislosti od typu emulovaného zariadenia a typu pripojenia. Všeobecne zahŕňa fyzický stroj a aplikáciu danej služby. Pri meraní určitých služieb môže byť nutná obojstranná analýza dát. V takom prípade môže zahŕňať časti totožné s mobilným testovacím zariadením a vzťahujú sa naň i totožné požiadavky (typicky nároky na hardvérové súčasti pre analyzačný softvér) (viď podkap.6.2.1) [35].

Pre prípad merania dátových služieb reprezentuje stranu serveru a obsluhuje žiadosti zo strany klienta (mobilného testovacieho zariadenia). Je nutné zabezpečiť, aby maximálna priepustnosť meraného serveru bola vyššia než predpokladaná priepustnosť dosiahnutá počas merania [35].

6.2.3 Všeobecné požiadavky na merací systém

Mobilné i pevné testovacie zariadenia musia spĺňať nasledujúce spoločné požiadavky [35]:

- **zdroje času** – hodiny meracích systémov by mali byť periodicky synchronizované, pričom relatívna odchýlka časových značiek jednotlivých článkov systému by mala byť 20 ms a absolútna 250 ms,
- **environmentálne podmienky** – funkcionalita meracieho systému i testovacích terminálov UE (ak ich nezahŕňa merací systém) musí byť zaručená pri teplotách okolitého prostredia minimálne v rozsahu +5 C° až +40°C a pri vlhkosti do 90%. Dostupné by mali byť informácie o napájacom zdroji systému.

6.3 Zaznamenávané údaje

Podmienky a nastavenie merania by mali byť za účelom neskoršej reprodukcie merania a interpretácie výsledkov zaznamenané. Medzi odporúčané zaznamenávané údaje patria [35]:

- **údaje o nastavení merania**:
  - všeobecné údaje o prvkoch meracieho systému:
    - verzia hardvéru,
    - verzia softvéru meracej aplikácie,
    - verzia operačného systému,
    - dátum, čas – UTC (Coordinated Universal Time – Koordinovaný svetový čas) + časová zóna,
    - používateľ,
    - upresňujúce poznámky/komentár,

  - údaje o testovacích termináloch UE:
    - typ UE,
    - verzia firmvéru,
    - identifikátor UE (IMEI[13], sériové číslo, MAC[14] adresa, ďalšie),
    - IMSI,
    - verzia softvéru ovládača pre OS (Operating System – Operačný systém), ak je použitý,
    - nastavenia ovládacieho softvéru,
    - typ a parametre antény (útlm, celkové straty na vedení),

  - údaje o nastavení dátových služieb:
    - údaje o serveroch – OS, veľkosť MTU (Maximum Transmission Unit – Maximálna prenosová jednotka), logické umiestnenie serveru (napr. verejný internet), maximálna priepustnosť v oboch smeroch
    - konfigurácia parametrov protokolovej sady, v prípade, že je odlišná od štandardnej konfigurácie v rámci použitého OS (napr. zmeny parametrov protokolu TCP),
    - konfigurácia špecifická pre dané dátové služby:
      - FTP – typ klienta/serveru, použitý režim (aktívny/pasívny)
      - HTTP – typ prehliadača, informácie o použitej referenčnej webovej stránke (štruktúra, veľkosť dokumentov atď.)
      - Video-streaming – typ serveru/klienta, použitý protokol,

[13] IMEI – International Mobile Equipment Identity – Medzinárodná identita mobilného vybavenia.
[14] MAC – Media Access Control – Riadenie prístupu k médiu.

- **merané položky** opatrené časovou značkou,
- **záznam hraničných bodov**,
- **informácie o stave** prebiehajúceho merania,
- **parametre kvality služby** zobrazované v reálnom čase prostredníctvom MMI v prípade priebežného výpočtu, príp. ako výsledok následného spracovania,
- **identifikátory a parametre** mobilnej siete, bunky.

6.4 Definícia parametrov pre meranie a vyhodnocovanie dátových služieb

Pre každú meranú položku v rámci emulovaných dátových služieb je nutné stanoviť nasledujúce parametre [33], [35], [40]:

- **KPI** (Key Performance Indicators – Kľúčové výkonnostné indikátory) – ukazovatele výkonnosti siete pre danú službu. Združujú merané položky („surové dáta“) do ľahšie vyhodnotitelnej podoby (napr. vo forme pomeru), na základe ktorej je možné určiť kvalitu realizovaných služieb a identifikovať prípadné problémy pri ich realizácii od zostavenia po riadne ukončenie služby. Na rozdiel od „surových“ dát sú definované všeobecne a je tak možné učiniť spoločnú interpretáciu aj pre agregáciu rôznych dát a z viacerých zdrojov.
- **Hraničné body** – dvojica spúšťacieho a ukončovacieho bodu určujúceho interval priebehu meranej udalosti. Z pohľadu reťazca udalostí akciu typicky iniciuje používateľ na úrovni aplikačnej vrstvy, následkom čoho je vyvolanie akcií na postupne nižších vrstvách. Nevyhnutnou súčasťou tohto sledu udalostí je vloženie určitého časového oneskorenia pri každej fáze spracovania/komunikácie. V závislosti od pohľadu merania sú potom hraničné body volené na adekvátnych komunikačných vrstvách. V prípade, že je meranie orientované viac zo strany terminálu, hraničné body by mali byť volené na vyšších vrstvách (spúšťacím bodom na úrovni aplikačnej vrstvy môže byť napr. príkaz `GET` protokolu HTTP), v prípade sieťovo-orientovaného merania skôr na nižších vrstvách (ekvivalentným spúšťacím bodom na úrovni sieťovej vrstvy môže byť napr. prijatie prvého paketu obsahujúceho dáta – pre názornosť viď obr. 6.4). Vzájomne porovnateľné sú potom len tie parametre kvality služby, ktoré boli merané na základe hraničných bodov definovaných na totožnej komunikačnej vrstve.
- **Časovače** – doba po uplynutí ktorej je ukončovací hraničný bod považovaný za nedosiahnutý. Hodnota časovača priamo ovplyvňuje príslušné merané parametre kvality služby a je nutné ju zvoliť individuálne s ohľadom na povahu

služby. Príliš nízka hodnota časovača vedie štatisticky k zhoršeniu parametrov typu „pomer zlyhania služby/relácie“, i keď tieto mohli byť napokon úspešné, naopak príliš vysoká hodnota vedie k zbytočne dlhému čakaniu na ukončovací bod, ktorý nebude nikdy dosiahnutý. Nastavenie časovačov je najdôležitejšie pri kontinuálnom monitorovaní siete, kde bez implementácie časovačov by mohlo nastať nekonečne dlhé čakanie na ukončovací bod. Pri ostatných časovo nenáročnejších typoch merania je možné nedosiahnutie ukončovacieho bodu stanoviť na základe jeho nedosiahnutia počas doby merania, teda bez implementácie časovačov.

V nasledujúcich kapitolách bude navrhnutá sada KPI kvantifikujúcich parametre kvality služby, ktoré sú relevantné pre konkrétne služby, teda také parametre, ktoré do značnej miery ovplyvňujú spokojnosť používateľa s týmito službami. V rámci každého bude stanovený názov, všeobecná rovnica a k nej korešpondujúce hraničné body. Tieto parametre budú definované na základe analýzy procesov konkrétnej služby, uvedenej v úvode každej kapitoly venujúcej sa jednej službe. Rozsah analýzy bude len do miery potrebnej k stanoveniu uvedených parametrov.

Pre hraničné body v rámci všetkých služieb stanovíme, že ich zdrojová vrstva bude transportná z dôvodu väčšej nezávislosti od konkrétnej služby (viac sieťovo orientovaný variant), a tým pádom možnosť relevantnejšieho porovnávania totožných KPI naprieč službami. Keďže metodika nie je určená pre kontinuálne meranie, ale skôr pre krátkodobé testy (viď 6.1), druhou globálnou podmienkou stanovme, že za vypršanie časovača budeme považovať nedosiahnutie hraničného bodu počas doby merania. Predpokladom pre úspešné zahájenie používania akejkoľvek služby, a tým aj prerekvizitou pre meranie ďalej navrhnutých KPI (orientovaných na úroveň transportnej vrstvy), je vytvorenie spojenia na úrovni nosičov (viď podkap. 2.1.2), ktorých testovanie je nad rámec tejto práce, a preto budeme ďalej predpokladať jeho úspešné vytvorenie naprieč celou prenosovou trasou.

6.5 Meranie a vyhodnocovanie služby prenosu súboru (FTP)

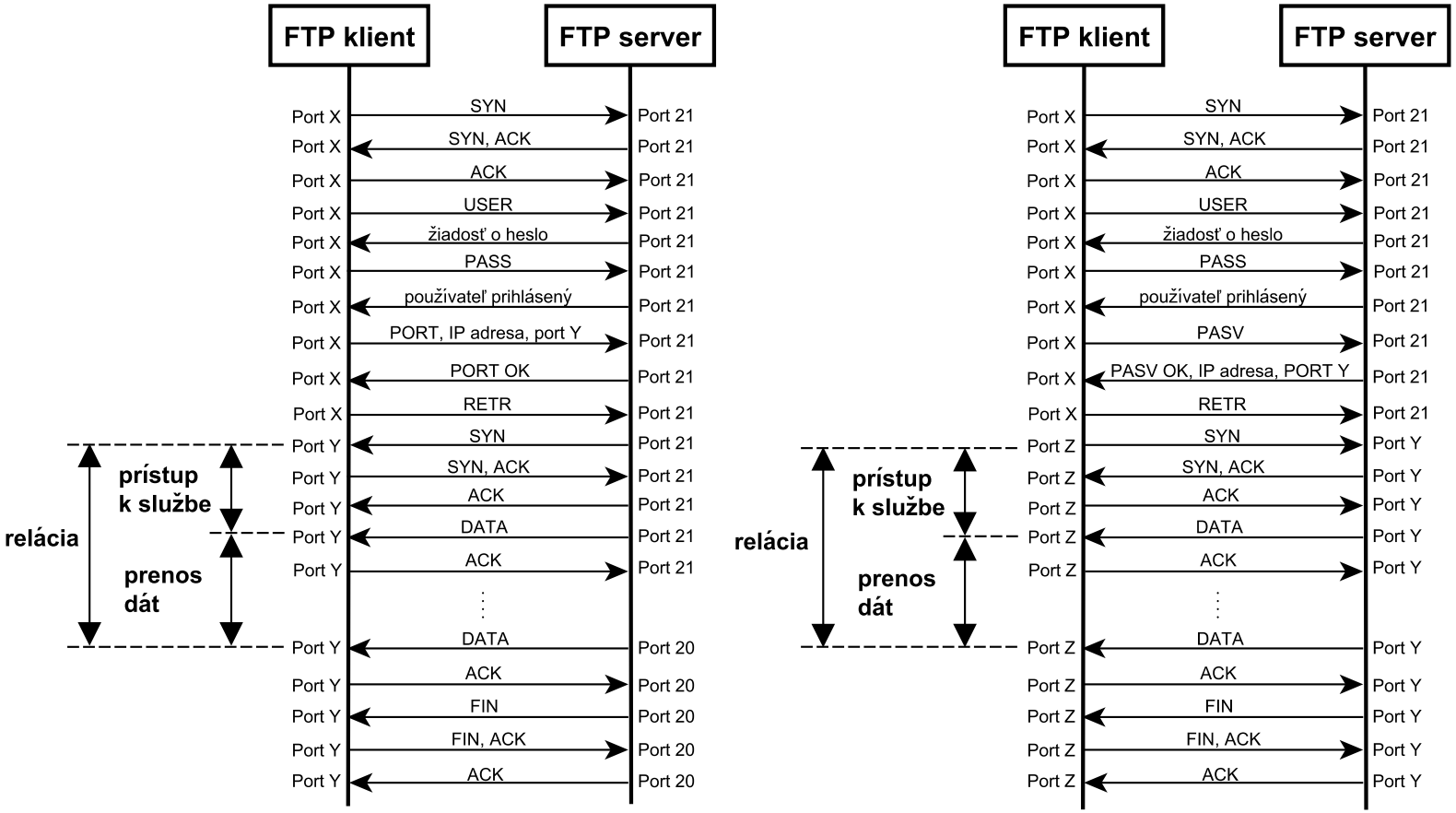
Operácia merania služby prenosu súboru prostredníctvom protokolu FTP (File Transfer Protocol – Protokol prenosu súboru) spočíva v testovaní nadviazania spojenia FTP klienta s FTP serverom, nasledované operáciou sťahovania/nahrávania súborov určitej veľkosti. FTP server by mal podporovať aktívny i pasívny režim [34], [36].

Proces sťahovania súboru v oboch režimoch schematicky znázorňuje obr. 6.3. V prípade aktívneho režimu klient použitím zdrojového dynamického (z rozsahu

49152–65535) portu X nadviaže tzv. riadiace spojenie so serverom pomocou kombinácie[15] cieľovej IP adresy a známeho portu 21. Vytváranie spočíva vo výmene troch TCP segmentov s nastavenými príznakmi postupne [SYN], [SYN, ACK], [ACK] (ďalej zapisované v skrátenom formáte „paket [*príznak(y)*]“) so smerom v súlade s obr. 6.3. Toto spojenie využíva klient pre zadávanie FTP príkazov a server pre FTP odpovede. Klient sa voči serveru autentizuje používateľským menom a heslom (príkazy `USER`, `PASS`). Server overí správnosť údajov a prípadne umožní prístup k súborom. V prípade, že používateľ chce odoslať/prijať súbor (príkazy `STOR`/`RETR`), klient odošle príkaz `PORT` pomocou ktorého špecifikuje nový dynamický port Y a IP adresu (tá zostane typicky rovnaká). Server na túto kombináciu nadviaže použitím zdrojového portu 20 nové, tzv. dátové spojenie. Toto spojenie je využívané na samotný prenos dát, pričom každý prijatý paket so žiadaným dátovým obsahom je protistranou potvrdzovaný paketom [ACK]. O dokončení prenosu odosielajúca strana informuje protistranu odoslaním paketu [FIN]. Príjmacia strana reaguje odoslaním paketu [FIN, ACK], a počká na prijatie finálneho potvrdenia paketom [ACK], čím je dátové spojenie ukončené z oboch strán. V prípade pasívneho režimu nastáva odlišnosť v spôsobe nadväzovania dátového spojenia, ktoré tu iniciuje klient. V prípade keď chce používateľ odoslať/prijať súbor, klient odošle príkaz `PASV`, čím žiada server o použitie pasívneho režimu. Server obratom odošle odpoveď v ktorej špecifikuje IP adresu a dynamický port Y. Klient na poskytnutú kombináciu nadviaže dátové spojenie pomocou nového zdrojového dynamického portu Z. Ďalší postup je totožný s aktívnym režimom [41], [42].

Na základe analýzy vyššie uvedených procesov sme definovali hraničné body, ktorých grafická reprezentácia je súčasťou obr. 6.3, a ktorými sme vymedzili fázu prístupu k službe, fázu dátového prenosu a fázu relácie. Pri vymedzovaní sme stanovili kritérium, že žiadna z fáz nesmie zahŕňať komunikáciu potrebnú pre autentizáciu používateľa, keďže tento proces je výrazne závislý od možností použitého klienta, ale najmä od ľudského faktoru (rýchlosť písania v prípade neautomatizovaného zadávania prihlasovacích údajov, chybné zadanie hesla atď.). Ďalším kritériom bolo, aby fáza relácie, teda celého procesu od iniciovania prenosu súboru používateľom po jeho dokončenie, z časového hľadiska zahŕňala všetky ostatné fázy. Tretím a posledným kritériom je dodržanie globálnej podmienky, že hraničným bodom by nemal byť žiadny z príkazov na úrovni aplikačnej vrstvy (viď 6.4). Z uvedených kritérií vyplýva, že nie je možné vymedziť fázu prístupu k službe dobou vytvorenia riadiaceho spojenia, i keď sa skutočne jedná o prvotný kontakt so serverom. Preto sme určili za spúšťací bod fázy prístupu (a zároveň fázy relácie) až okamih pokusu o vytvorenie dátového spojenia za účelom stiahnutia/nahratia súboru používateľom.

[15] Kombinácia IP adresy a portu sa označuje tiež pojmom **soket**.



Obr. 6.3: Schématické znázornenie sťahovania súboru prostredníctvom služby FTP v aktívnom (vľavo) a pasívnom (vpravo) režime, spracované na základe [41], [42] a vlastnej analýzy

Definovaním týchto hraničných bodov sme si umožnili definovať hraničné body už pre konkrétne KPI, ktoré budú popisovať kvalitu služby v týchto fázach komunikácie. Grafická reprezentácia tiež zjednoduší čitateľovi identifikáciu jednotlivých hraničných bodov, ďalej reprezentovaných len textovou formou.

6.5.1 Pomer zlyhania prístupu k službe FTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že používateľ nemôže úspešne zostaviť dátové TCP/IP spojenie so serverom.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Pomer zlyhania prístupu k službe FTP (Download/Upload)} = \\ &= \frac{\textit{neúspešné pokusy o zostavenie dátového spojenia so serverom}}{\textit{všetky pokusy o zostavenie dátového spojenia so serverom}} \cdot \\ &\cdot 100 \ \ [\%] \end{aligned} \tag{6.1}$$

Hraničné body

Tab. 6.1: Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania prístupu k službe FTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Pokus o prístup k službe	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN] na dátový soket servera.
Úspešný pokus	Ukončovací (Download): Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Odoslanie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Neúspešný pokus	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.5.2 Čas vytvorenia služby FTP

Jedná sa o dobu potrebnú na zostavenie dátového TCP/IP spojenia so serverom. Hodnota časov sa počíta pre každú jednu procedúru zostavenia dátového spojenia a KPI môže tento parameter kvantifikovať v podobe napr. aritmetického priemeru či mediánu.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Čas vytvorenia služby FTP (Download/Upload)} = \\ &= t_{\text{úspešný prístup k službe}} - t_{\text{začiatok vytvárania prístupu k službe}} \ [s] \end{aligned} \tag{6.2}$$

Hraničné body

Tab. 6.2: Hraničné body pre meranie času vytvorenia služby FTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas začiatku vytvárania prístupu k službe	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN] na dátový soket servera.
Čas úspešného prístupu k službe	Ukončovací (Download): Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Odoslanie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.5.3 Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že úspešne začatý prenos dát nebude úplne dokončený.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP (Download/Upload)} = \\ &= \frac{\textit{neúplné prenosy dát}}{\textit{úspešne začaté prenosy dát}} \cdot 100 \quad [\%] \end{aligned} \tag{6.3}$$

Hraničné body

Tab. 6.3: Hraničné body pre meranie pomeru prerušenia prenosu dát služby FTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Úspešne začatý prenos dát	Spúšťací (Download): Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom. Spúšťací (Upload): Odoslanie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Úplný prenos dát	Ukončovací (Download): Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Prijatie paketu [FIN, ACK] potvrdzujúceho doručenie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Neúplný prenos dát	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.5.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP

Vyjadruje priemernú hodnotu rýchlosti sťahovania/nahrávania dát v kb/s[16] počas celej doby prenosu dát.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP (Download/Upload)} = \\ &= \frac{\textit{množstvo prenesených používateľských dát}}{t_{\text{dokončenie prenosu dát}} - t_{\text{začiatok prenosu dát}}} \ [kb/s] \end{aligned} \tag{6.4}$$

Hraničné body

Tab. 6.4: Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti prenosu dát služby FTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas úspešne začatého prenosu dát	Spúšťací (Download): Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom. Spúšťací (Upload): Odoslanie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Čas dokončenia prenosu dát	Ukončovací (Download): Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Prijatie paketu [FIN, ACK] potvrdzujúceho doručenie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.5.5 Pomer zlyhania relácie služby FTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že úspešne začatá relácia nebude dokončená.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Pomer zlyhania relácie služby FTP (Download/Upload)} = \\ &= \frac{\textit{nedokončené relácie}}{\textit{úspešne začaté relácie}} \cdot 100 \ \ [\%] \end{aligned} \tag{6.5}$$

[16] V kontexte prenosovej rýchlosti platí, že 1 kb/s = 1000 b/s.

Hraničné body

Tab. 6.5: Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania relácie služby FTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Úspešne začatá relácia	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN] na dátový soket servera.
Dokončená relácia	Ukončovací (Download): Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Prijatie paketu [FIN, ACK] potvrdzujúceho doručenie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Nedokončená relácia	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.5.6 Čas relácie služby FTP

Jedná sa o dobu potrebnú k úspešnému dokončeniu relácie služby FTP. Hodnota časov sa počíta pre každú jednu procedúru relácie a KPI môže tento parameter kvantifikovať v podobe napr. aritmetického priemeru či mediánu.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Čas relácie služby FTP (Download/Upload)} = \\ &= t_{\text{koniec relácie}} - t_{\text{začiatok relácie}} \quad [s] \end{aligned} \tag{6.6}$$

Hraničné body

Tab. 6.6: Hraničné body pre meranie času relácie služby FTP

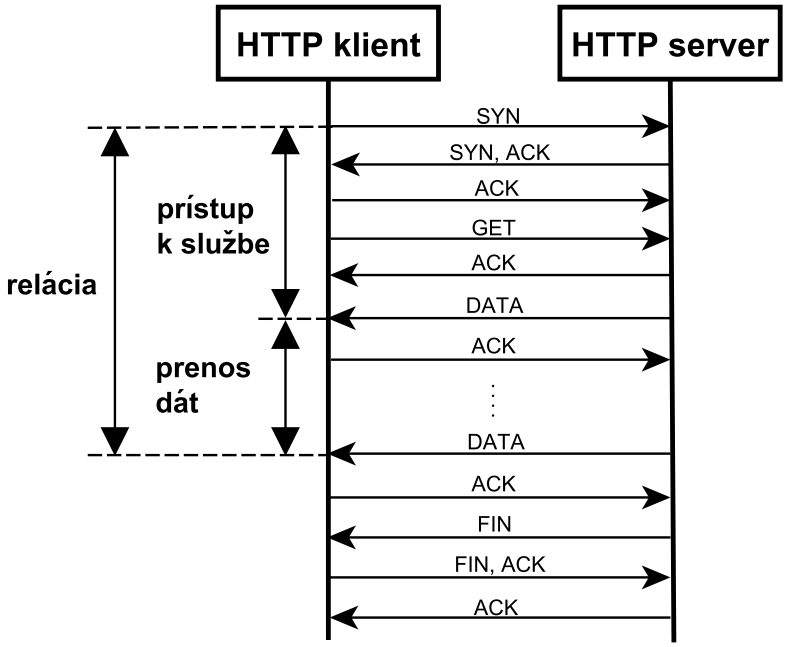
Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas úspešne začatej relácie	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN] na dátový soket servera.
Čas ukončenia relácie	Ukončovací (Download): Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom. Ukončovací (Upload): Prijatie paketu [FIN, ACK] potvrdzujúceho doručenie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.6 Meranie a vyhodnocovanie služby prehliadania webových stránok (HTTP)

Testovanie služby prehliadania webových stránok prostredníctvom protokolu HTTP (HyperText Transfer Protocol – Hypertextový prenosový protokol) spočíva v testovaní prístupu do siete internet nasledovaného stiahnutím webovej stránky jednoznačne definovanej pomocou URL (Uniform Resource Locator – Jednotný lokátor zdroja). Referenčný webový prehliadač na strane klienta by mal zodpovedať svojimi vlastnosťami a schopnosťami (napr. podpora rovnakých hlavičiek HTTP) jednému z najčastejšie používaných webových prehliadačov. Server by mal obsahovať jednu z referenčných webových stránok schválených technickou komisiou STQ inštitútu ETSI a dostupných na jej portáli [43]. Po každom stiahnutí referenčnej stránky by pred nasledujúcim cyklom malo dôjsť k vymazaniu vyrovnávacej pamäti prehliadača a ukončeniu všetkých TCP spojení s HTTP serverom [34], [36], [44].

Proces prehliadania webových stránok je schematicky znázornený na obr. 6.4. Ak chce používateľ zobraziť webovú stránku, vyžaduje vlastne stiahnutie HTML (HyperText Markup Language – Hypertextový značkovací jazyk) súboru a prípadne ďalších dát (napr. obrázky) a následné zobrazenie všetkých prijatých dát vo webovom prehliadači so štruktúrou definovanou práve HTML súborom. Proces začína pokusom klienta o nadviazanie TCP spojenia so serverom pomocou paketov [SYN], [SYN, ACK], [ACK], podobne ako u služby FTP. Cieľovým portom je však port 80, resp. 443 pri využití zabezpečeného variantu protokolu označovaného HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure – Zabezpečený hypertextový prenosový protokol). Následne klient odošle príkaz `GET`. Server reaguje potvrdením paketom [ACK], a následne začne odosielať pakety so žiadaným dátovým obsahom. Každý takýto paket je potvrdzovaný klientom paketom [ACK]. Po dokončení prenosu nasleduje procedúra obojstranného ukončenia spojenia paketmi [FIN], [FIN,ACK], [ACK] so smerom v súlade s obr. 6.4 [33], [44], [45], [46].

Z hľadiska stanovenia fáz prístupu k službe, relácie a prenosu dát odkazujeme čitateľa opäť na obr. 6.4, ktorý graficky zobrazuje zvolené hraničné body vymedzujúce jednotlivé fázy. Za fázu prístupu k službe sme zvolili dobu od okamihu potvrdenia zadanej URL do webového prehliadača do začiatku jej zobrazovania (stiahnutia prvých používateľských dát). Od tohto okamihu po bod v čase, kedy je prijatý posledný paket so žiadaným dátovým obsahom (stránka je kompletne stiahnutá a zobrazená) sme definovali fázu prenosu dát. Fáza relácie je potom ohraničená trvaním oboch predchádzajúcich fáz dohromady. Pri návrhu hraničných bodov sme zároveň dbali na dodržanie globálnych podmienok z kap. 6.4.



Obr. 6.4: Schématické znázornenie služby prehliadania webových stránok, spracované podľa [33]

6.6.1 Pomer zlyhania prístupu k službe HTTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že používateľ nemôže úspešne zostaviť TCP/IP spojenie so serverom.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Pomer zlyhania prístupu k službe HTTP} = \\ &= \frac{\textit{neúspešné pokusy o zostavenie TCP/IP spojenia so serverom}}{\textit{všetky pokusy o zostavenie TCP/IP spojenia so serverom}} \cdot \\ &\cdot 100 \quad [\%] \end{aligned} \tag{6.7}$$

Hraničné body

Tab. 6.7: Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania prístupu k službe HTTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Pokus o prístup k službe	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN].
Úspešný pokus	Ukončovací: Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Neúspešný pokus	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.6.2 Čas vytvorenia služby HTTP

Jedná sa o dobu potrebnú na zostavenie TCP/IP spojenia so serverom. KPI vyjadruje aritmetický priemer či medián časov naprieč všetkými nameranými pokusmi o vytvorenie služby.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Čas vytvorenia služby HTTP} = \\ &= t_{\text{úspešný prístup k službe}} - t_{\text{začiatok vytvárania prístupu k službe}} \ [s] \end{aligned} \tag{6.8}$$

Hraničné body

Tab. 6.8: Hraničné body pre meranie času vytvorenia služby HTTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas začiatku vytvárania prístupu k službe	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN].
Čas úspešného prístupu k službe	Ukončovací: Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.6.3 Pomer zlyhania relácie služby HTTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že úspešne začatá relácia nebude dokončená.

Všeobecná rovnica

$$\textit{Pomer zlyhania relácie služby HTTP} = \frac{\textit{nedokončené relácie}}{\textit{úspešne začaté relácie}} \cdot 100 \ \ [\%] \tag{6.9}$$

Hraničné body

Tab. 6.9: Hraničné body pre meranie pomeru zlyhania relácie služby HTTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Úspešne začatá relácia	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN].
Dokončená relácia	Ukončovací: Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Nedokončená relácia	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.6.4 Čas relácie služby HTTP

Jedná sa o dobu potrebnú na úspešné dokončenie relácie služby HTTP. KPI vyjadruje aritmetický priemer či medián časov naprieč všetkými nameranými reláciami.

Všeobecná rovnica

$$\textit{Čas relácie služby HTTP} = t_{\text{koniec relácie}} - t_{\text{začiatok relácie}} \quad [s] \tag{6.10}$$

Hraničné body

Tab. 6.10: Hraničné body pre meranie času relácie služby HTTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas úspešne začatej relácie	Spúšťací: Odoslanie prvého paketu [SYN].
Čas ukončenia relácie	Ukončovací: Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.6.5 Pomer prerušenia prenosu dát služby HTTP

Vyjadruje pravdepodobnosť, že úspešne začatý prenos dát nebude úplne dokončený.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Pomer prerušenia prenosu dát služby HTTP} = \\ &= \frac{\textit{neúplné prenosy dát}}{\textit{úspešne začaté prenosy dát}} \cdot 100 \quad [\%] \end{aligned} \tag{6.11}$$

Hraničné body

Tab. 6.11: Hraničné body pre meranie pomeru prerušenia prenosu dát služby HTTP

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Úspešne začatý prenos dát	Spúšťací: Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Úplný prenos dát	Ukončovací: Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Neúplný prenos dát	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.6.6 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby HTTP

Vyjadruje priemernú hodnotu rýchlosti sťahovania dát v kb/s počas celej doby prenosu dát.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby HTTP} = \\ &= \frac{\textit{množstvo prenesených používateľských dát}}{t_{\text{dokončenie prenosu dát}} - t_{\text{začiatok prenosu dát}}} \ [kb/s] \end{aligned} \tag{6.12}$$

Hraničné body

Tab. 6.12: Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti prenosu dát služby HTTP

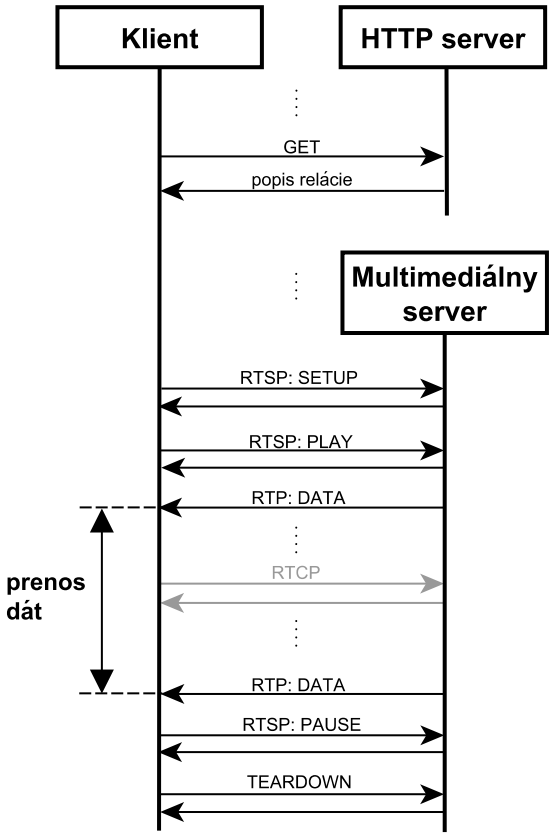
Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas úspešne začatého prenosu dát	Spúšťací: Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom.
Čas dokončenia prenosu dát	Ukončovací: Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom.

6.7 Meranie a vyhodnocovanie služby video-streaming

Meranie služby video-streaming spočíva v testovaní operácie prehrávania video obsahu z multimediálneho serveru klientom (multimediálny prehrávač). Zdrojom môže byť buď vopred nahratý video obsah (video na vyžiadanie), alebo živý prenos. V oboch prípadoch sa jedná o jednosmerné vysielanie (nie-konverzačné video).

Priebeh jedného z možných procesov prehrávania je naznačený na obr. 6.5 a vychádza z dokumentu [29]. Pred prístupom k multimediálnemu serveru môže byť nutné nadviazať TCP spojenie s HTTP serverom, ktorý poskytne popis relácie pre vysielanie žiadaného obsahu použitím protokolu HTTP, a až následne prebehne fáza komunikácie s multimediálnym serverom. V prípade priameho prístupu k multimediálnemu serveru sa s týmto nadviaže TCP spojenie. Ďalší postup je totožný. Pomocou RTSP protokolu klient vyžiada od serveru vyhradenie zdrojov pre dátový tok (metóda `SETUP`), čím vytvorí RTSP reláciu (ďalej len reláciu). Následne spustí (metóda `PLAY`) prenos prostredníctvom vytvoreného dátového toku a ďalej slúži klientovi ako „diaľkový ovládač“, umožňujúci napr. pozastaviť (metóda `PAUSE`) prenos

či regulérne ukončiť reláciu (metóda `TEARDOWN`). Pre samotný prenos dát je využívaný protokol RTP (Real-time Transport Protocol - Protokol prenosu v reálnom čase). V prípade súčasného prenosu obrazu i zvuku sa tieto prenášajú v samostatných dátových tokoch. Tretím aplikačným protokolom, ktorý sa podieľa na relácii je RTCP (RTP Control Protocol – RTP riadiaci protokol). Ten poskytuje pomocou vzájomných periodických hlásení všetkým účastníkom relácie informácie o kvalitatívnych parametroch, identifikáciu zdroja paketov RTP atď., na základe čoho môže server napr. upraviť kvalitu vysielania podľa možností klienta. RTSP, RTP i RTCP môžu využívať transportné protokoly TCP i UDP. Pre prípad multimediálneho prenosu je však z pohľadu jednoduchosti a rýchlosti, najmä pre protokol RTP, vhodnejší „nespoľahlivý“ protokol UDP (napr. prítomnosť kontrolných mechanizmov doručenia paketov u TCP by spôsobovala, že opätovne odoslaný paket by v čase doručenia už nebol pre používateľa dôležitý). Jeho využitie budeme uvažovať pri nasledujúcich návrhoch [29], [47].



Obr. 6.5: Schématické znázornenie služby video-streaming, spracované na základe [29], [33] a vlastnej analýzy

Návrh hraničných bodov pre KPI súvisiace s touto službou bude vymedzený z hľadiska času výhradne trvaním fáze prenosu dát tak, ako je vyznačené na obr.6.5.

Sústrediť sa teda budeme na parametre kvality služby súvisiace so samotným prenosom obrazu (prípadne i zvuku) od prijatia prvého po prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom, bez ohľadu na čas a smer iniciovania ukončenia prehrávania. Používateľ totiž nie vždy potrebuje video obsah zhliadnuť kompletný a nemusí sa teda nutne jednať o pakety obsahujúce prvé resp. posledné dáta vysielaného súboru. Vo všetkých prípadoch je zároveň možné (prípadne nutné) počítať dané KPI pre každý paket.

Špecifikom merania tejto služby je tiež nutná súčinnosť mobilného i pevného testovacieho zariadenia viď. podkap. 6.2.2 z dôvodu nemožnosti identifikovania doručenia paketov v rámci jediného zariadenia vychádzajúcej z použitia protokolu UDP.

6.7.1 Oneskorenie paketov služby video-streaming

Vyjadruje oneskorenie paketu so žiadaným dátovým obsahom od jeho vyslania serverom po jeho prijatie klientom v jednotkách času. Hodnota oneskorenia sa počíta s každým prichádzajúcim paketom a KPI môže tento parameter kvantifikovať v podobe aritmetického priemeru či mediánu za určitý časový úsek.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Oneskorenie paketov služby video-streaming} = \\ &= t_{\text{doručenie paketu}} - t_{\text{odoslanie paketu}} \quad [ms] \end{aligned} \tag{6.13}$$

Hraničné body

Tab. 6.13: Hraničné body pre meranie oneskorenia paketov služby video-streaming

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas odoslania paketu	Spúšťací: Odoslanie paketu so žiadaným dátovým obsahom zo servera.
Čas doručenia paketu	Ukončovací: Prijatie tohto paketu klientom.

6.7.2 Kolísanie oneskorenia paketov služby video-streaming

Vyjadruje kolísanie oneskorenia paketov so žiadaným dátovým obsahom v jednotkách času. Toto kolísanie vzniká rôzne dlhým zdržovaním paketov vo vyrovnávacích pamätiach ako následok mechanizmov správy front v medziľahlých aktívnych prvkoch na ceste od zdroja k cieľu. Tento parameter kvality služby je označovaný pojmom jitter (časové chvenie), a je definovaný v dokumente RFC 3550 [47] ako

stredná odchýlka rozdielu D, ktorý vyjadruje časový rozdiel medzi oneskorením medzi dvoma prijatými paketmi v príjmači (klientovi) a oneskorením medzi dvoma odoslanými paketmi z vysielača (v našom prípade multimediálneho servera). Hodnota kolísania oneskorenia sa počíta s každým prichádzajúcim paketom a KPI môže tento parameter kvantifikovať v podobe aritmetického priemeru či mediánu za určitý časový úsek.

Všeobecná rovnica

Pre výpočet využijeme vzťah z uvedeného dokumentu [47], pričom pre prehľadnosť dodržíme tiež značenie veličín, teda KPI *Kolísanie oneskorenia paketov služby video-streaming* označíme veličinou J a pre jej výpočet platí [47]:

$$J_{(i)} = J_{(i-1)} + \frac{\left|D_{(i-1,i)}\right| - J_{(i-1)}}{16} \quad [ms], \tag{6.14}$$

kde:

- i je poradové číslo prijatého paketu,
- $D_{(i-1,i)}$ vypočítame pomocou vzťahu:

$$D_{(i-1,i)} = (R_{(i)} - R_{(i-1)}) - (S_{(i)} - S_{(i-1)}) \quad [ms], \tag{6.15}$$

kde:

- R je čas doručenia paketu,
- S je časová značka protokolu RTP paketu.

Z toho vyplýva, že ak ku kolísaniu oneskorenia nedochádza, platí, že $D = 0$.

Hraničné body

Tab. 6.14: Hraničné body pre meranie kolísania oneskorenia paketov služby video-streaming

Udalosť z všeobecnej rovnice	**Hraničný bod**
Čas odoslania paketu s poradovým číslom *i*	Spúšťací: Odoslanie paketu s poradovým číslom *i* so žiadaným dátovým obsahom zo servera.
Čas doručenia paketu s poradovým číslom *i*	Ukončovací: Prijatie tohto paketu klientom.

6.7.3 Stratovosť paketov služby video-streaming

Vyjadruje pravdepodobnosť, že odoslaný paket so žiadaným dátovým obsahom nebude úspešne doručený.

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Stratovosť paketov služby video-streaming} = \\ &= \frac{\textit{nedoručené pakety so žiadaným dátovým obsahom}}{\textit{odoslané pakety so žiadaným dátovým obsahom}} \cdot 100 \quad [\%] \end{aligned} \tag{6.16}$$

Hraničné body

Tab. 6.15: Hraničné body pre meranie stratovosti paketov služby video-streaming

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Úspešne odoslaný paket	Spúšťací: Odoslanie paketu so žiadaným dátovým obsahom zo servera.
Úspešne doručený paket	Ukončovací: Prijatie tohto paketu klientom.
Nedoručený paket	Ukončovací bod nedosiahnutý.

6.7.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming

Všeobecná rovnica

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming} = \\ &= \frac{\textit{množstvo prenesených používateľských dát}}{t_{\text{dokončenie prenosu dát}} - t_{\text{začiatok prenosu dát}}} \quad [Mb/s] \end{aligned} \tag{6.17}$$

Hraničné body

Tab. 6.16: Hraničné body pre meranie priemernej rýchlosti služby video-streaming

Udalosť z všeobecnej rovnice	Hraničný bod
Čas úspešne začatého prenosu dát	Spúšťací: Prijatie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom klientom.
Čas dokončenia prenosu dát	Ukončovací: Prijatie posledného paketu so žiadaným dátovým obsahom klientom.

7 APLIKÁCIA NAVRHNUTEJ METODIKY

V tejto kapitole bude popísaná realizácia merania a vyhodnocovania kvality služby na základe navrhnutej metodiky z kap. 6 v rámci mobilnej experimentálnej siete LTE-WiFi-EPC-IMS na FEKT VUT Brno, a to pre služby FTP a video-streaming. Predpokladaným účelom aplikácie metodiky bola optimalizácia siete z pohľadu podpory kvality služby, avšak z technických dôvodov nie je v súčasnej dobe možné zasahovať do konfigurácie jednotlivých prvkov, a uskutočniť tak meranie pri jej rôznych úrovniach. Z tohto dôvodu bude v prvej resp. druhej podkap. 7.1 a 7.2 popísaná realizácia jednorazového merania s cieľom overiť výkonnosť siete z pohľadu podpory kvality služby pre službu FTP resp. video-streaming v súčasnom stave konfigurácie (bez implementácie konkrétnej QoS). Namerané údaje budú spracované do výsledných KPI navrhnutých v kap. 6.5 a 6.7, a tieto následne diskutované. V poslednej podkapitole bude navrhnutý spôsob možnej rekonfigurácie siete bez jeho následného implementovania a overenia jeho vplyvu na výslednú kvalitu realizovaných služieb z pohľadu používateľa.

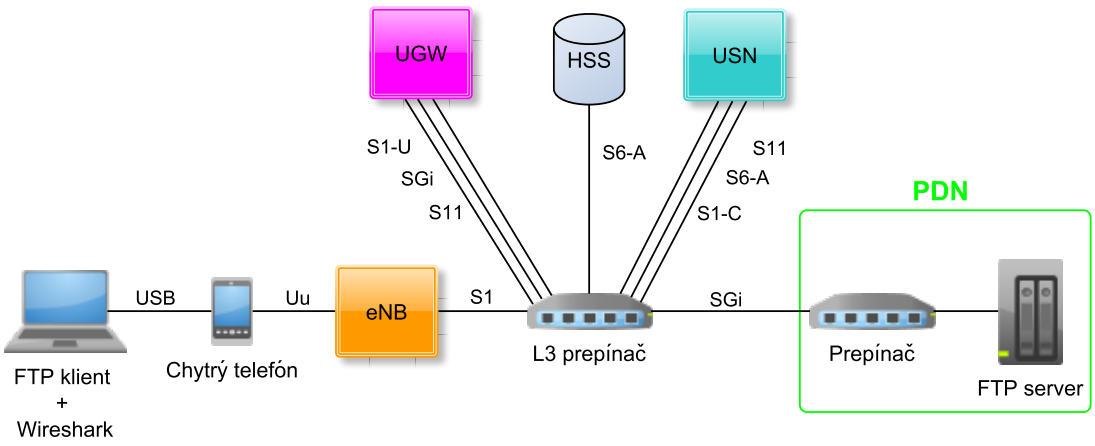
7.1 Meranie a vyhodnotenie služby FTP

Schéma zapojenia meracieho pracoviska je zobrazená na obr. 7.1. Mobilné testovacie zariadenie sa skladalo z 2 zariadení. Prvým bol chytrý telefón s OS Android pripojený prostredníctvom APN s názvom VUT do PDN. Ten prostredníctvom rozhrania USB (Universal Serial Bus – Univerzálna sériová zbernica) a fukcie tethering (privä-zovanie) zdieľal toto pripojenie s druhým zariadením, ktorým bol prenosný počítač s OS Windows 10. Zariadenia sa počas celého merania nachádzali v bunke pracujúcej v kmitočtovom pásme 700 MHz využívajúcej kanál s šírkou pásma 5 MHz. Počítač reprezentoval stranu FTP klienta s využitím voľne dostupnej aplikácie WinSCP [50]. Zároveň slúžil i pre analýzu zachytenej komunikácie. V rámci služby FTP sme za vhodný analyzačný softvér zvolili voľne dostupný sieťový protokolový analyzátor Wireshark [52]. Pevné testovacie zariadenie (FTP server) tvorilo NAS (Network-Attached Storage – Úložisko pripojené do siete), ktoré bolo logicky umiestnené vo vzdialenosti jedného zariadenia linkovej vrstvy za rozhraním SGi (vyznačená oblasť PDN).

Proces merania spočíval v procedúrach sťahovania/nahrávania referenčného súboru veľkosti 10 MB[17] z/na FTP server. Použitý bol pasívny režim prenosu. Počas merania Wireshark zachytával všetku komunikáciu na rozhraní USB prenosného počítača. Po dokončení zachytávania Wireshark umožňuje výslednú komunikáciu

[17] V kontexte veľkosti súboru platí, že $1\,\mathrm{MB} = 2^{20}\,\mathrm{B}$, takže $10\,\mathrm{MB} = 10 \times 2^{20} = 10485760\,\mathrm{B}$.

uložiť do súboru rôznych formátov, implicitne sa jedná o súbor s príponou *.pcapng. Takto vytvorený súbor je možné kedykoľvek otvoriť a ďalej s ním pracovať. V našom prípade bolo za účelom výpočtu navrhnutých KPI potrebné vyfiltrovať pakety reprezentujúce korešpondujúce hraničné body. Wireshark umožňuje definovať niekoľko filtrov pre pakety na rôznych komunikačných vrstvách od parametrov rámca až po parametre aplikačných protokolov. Napríklad pre výpočet prvého KPI *Pomer zlyhania prístupu k službe FTP* bolo nutné vyhľadať prvý paket [SYN] odoslaný na dátový soket servera. Na základe analýzy komunikácie FTP služby z kap. 6.5 je možné uvážiť niekoľko možností definovania filtrov. Pravdepodobne najjednoduchšou cestou je zadanie filtra v tvare `ftp.request.command == RETR` resp. `ftp.request.command == STOR`, ktorý zobrazí pakety obsahujúce žiadosť o stiahnutie/nahratie súboru. Nasledujúcou komunikáciou je práve paket [SYN] odoslaný na dátové spojenie servera (spúšťací bod). Prijatie/odoslanie prvého paketu so žiadaným dátovým obsahom (ukončovací bod) môžeme identifikovať ako prvý paket s označením FTP-DATA. Ukážka popísaného prípadu v prostredí Wireshark je vyobrazená v prílohe A. Alternatívnou možnosťou pre vyhľadanie spúšťacieho bodu tohto KPI môže byť vyfiltrovanie paketu s príkazom `PASV`, identifikácia portu určeného pre nadviazanie dátového spojenia so serverom a následná aplikácia filtru v tvare `tcp.port [číslo portu]`, kde prvým zobrazeným paketom z pohľadu času by mal byť práve spúšťací bod, teda prvý paket [SYN] odoslaný na dátové spojenie. Ukončovací bod je možné nájsť podobne ako v predchádzajúcom prípade. Časový rozdiel medzi takto vyhľadanými paketmi je možné vypočítať rozdielom časov detekcie týchto paketov (uvedené v stĺpci „Time“ – „Čas“. Všetky potrebné hraničné body boli zaznamenané do prehľadových tabuliek v elektronickej podobe (dokument formátu *.xlsx) umiestneného na priloženom médiu.



Obr. 7.1: Architektúra merania služby FTP

7.1.1 Pomer zlyhania prístupu k službe FTP

Výpočet KPI podľa vťahu 6.1:

$$\textit{Pomer zlyhania prístupu k službe FTP (Download)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.1}$$

$$\textit{Pomer zlyhania prístupu k službe FTP (Upload)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.2}$$

7.1.2 Čas vytvorenia služby FTP

Na základe vzťahu 6.2 boli vypočítané časy pre každý z nameraných pokusov o vytvorenie služby (dátového spojenia) a za relevantný ukazovateľ bol zvolený medián týchto časov, ktorý na rozdiel od aritmetického priemeru eliminuje zriedka sa vyskytujúce extrémne hodnoty nevypovedajúce o trende, ktorý však operátora zaujíma predovšetkým. Pre hodnoty časov platí:

$$\textit{Čas vytvorenia služby FTP (Download)} = 38\,\text{ms} \tag{7.3}$$

$$\textit{Čas vytvorenia služby FTP (Upload)} = 36\,\text{ms} \tag{7.4}$$

7.1.3 Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP

Fáza prenosu dát môže úspešne začať až po nadviazaní dátového spojenia, teda úspešnom dokončení fáze prístupu k službe, ktoré je tak prerekvizitou pre meranie tohto KPI. V našom prípade to bolo 100 % prípadov. Podľa vzťahu 6.3 sme vypočítali, že:

$$\textit{Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP (Download)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.5}$$

$$\textit{Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP (Upload)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.6}$$

7.1.4 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP

Pre výpočet tohto KPI je nutné identifikovať množstvo prenesených používateľských dát (čitateľ) a čas fáze prenosu dát (menovateľ). Za množstvo prenesených dát sme určili medián množstva dát prenesených počas všetkých prenosov v Mb, za čas fáze

prenosu medián časov získaných pri výpočte KPI *Pomer prerušenia prenosu dát služby FTP* z podkap. 7.1.3. Potom podľa vzťahu 6.4 platí:

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP (Download)} = \\ &= \frac{5 \cdot (10,49 \cdot 8)}{6,66} = 12,6\,\mathrm{Mb/s} \end{aligned} \tag{7.7}$$

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby FTP (Upload)} = \\ &= \frac{5 \cdot (10,49 \cdot 8)}{27,67} = 3\,\mathrm{Mb/s} \end{aligned} \tag{7.8}$$

7.1.5 Pomer zlyhania relácie služby FTP

Relácia je úspešne dokončená len vtedy, ak je úspešne dokončená fáza prístupu k službe i fáza prenosu dát. Preto sa v podstate jedná o KPI súhrnne popisujúce úspešnosť oboch fáz, teda z pohľadu používateľa úspešnú celú operáciu stiahnutia/nahratia súboru. Výpočet KPI podľa vzťahu 6.5:

$$\textit{Pomer zlyhania relácie služby FTP (Download)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.9}$$

$$\textit{Pomer zlyhania relácie služby FTP (Upload)} = \frac{0}{5} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.10}$$

7.1.6 Čas relácie služby FTP

Pre výpočet tohto KPI sme opäť zvolili medián všetkých časov relácií vypočítaných podľa vzťahu 6.6. Pre výsledné časy relácií v oboch smeroch prenosu dát platilo:

$$\textit{Čas relácie služby FTP (Download)} = 6,699\,\mathrm{s} \tag{7.11}$$

$$\textit{Čas relácie služby FTP (Upload)} = 27,708\,\mathrm{s} \tag{7.12}$$

7.1.7 Diskusia výsledkov merania služby FTP

Vypočítané hodnoty KPI môžeme interpretovať ako parametre kvality služby, ktoré v sieti nastanú s najväčšou pravdepodobnosťou v prípade, že podmienky prevádzky (napr. veľkosť súboru, počet pripojených zariadení) a stav siete (mobilnej i PDN) bude totožný s podmienkami merania. S ohľadom na túto skutočnosť môžeme konštatovať, že po nadviazaní riadiaceho spojenia sa používateľovi vo všetkých prípadoch podarí nadviazať i dátové spojenie s FTP serverom a začať príjmať/odosielať požadované dáta. Vytváranie tohto spojenia bude vo väčšine prípadov trvať 38 ms

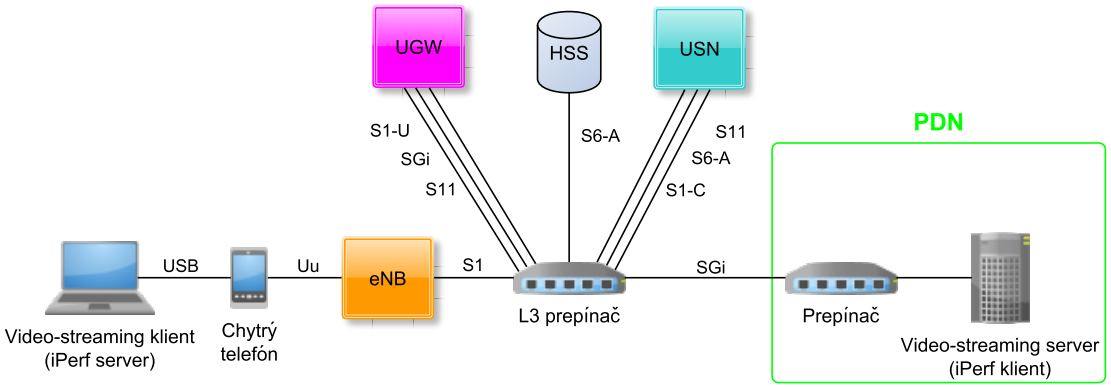
pri sťahovaní súboru resp. 36 ms pri nahrávaní súboru. Po nadviazaní tohto spojenia bude každý používateľ schopný úspešne prijať/odoslať celý požadovaný súbor, a to s prenosovou rýchlosťou 12,6 Mb/s resp. 3 Mb/s. Celkový čas od iniciovania prenosu dát (súbor o veľkosti 10 MB) používateľom po jeho úspešné dokončenie bude 6,699 s (sťahovanie) a 27,708 s (nahrávanie).

Z hľadiska úspešnosti a času vytvorenia dátového spojenia a úspešnosti dokončenia prenosu dát nemáme k stavu siete žiadne výhrady, a pre operátora je úroveň konfigurácie dostatočná. Hodnoty prenosových rýchlostí sú pomerne nízke, vzhľadom k teoretickým špičkovým hodnotám, ktorými disponuje štandard USB 2.0 (480Mb/s [53]) použitý pri komunikácii prenosného počítača s chytrým telefónom, či štandard samotnej mobilnej siete Rel. 10 (3 Gb/s resp. 1,5 Gb/s [2]). Okrem samotnej konfigurácie siete mohli byť hodnoty čiastočne ovplyvnené i konštrukčnými prekážkami a vzdialenosťou terminálu od antény eNB (približne 10 m) či réžiou funkcie tethering. Rozdiel časov medzi smermi uplink a downlink je pomerne výrazný a pravdepodobne nebude len dôsledkom asymetrickej rýchlosti vychádzajúcej napr. z modulačných techník pre oba smery prenosu. Z uvedených skutočností, i vzhľadom k nízkemu zaťaženiu bunky siete (1 pripojené zariadenie) pri meraní, bola prenosová rýchlosť a s tým spojená doba potrebná k dokončeniu celej relácie nedostatočná a vyžadovala by zásah do konfigurácie siete, kde by bolo možné identifikovať príčiny tohto stavu. Celkovo tak hodnotíme súčasnú výkonnosť siete z pohľadu podpory kvality služby pre službu FTP ako nedostatočnú.

7.2 Meranie a vyhodnotenie služby video-streaming

Meranie tejto služby bolo z pohľadu architektúry a podmienok pracoviska podobné ako pri meraní služby FTP (viď obr. 7.2). Mobilné testovacie zariadenie (prehrávač video obsahu) tvoril opäť chytrý telefón a prenosný počítač. Pevné testovacie zariadenie (multimediálny server) reprezentoval server s OS Fedora (Linux). Na oboch zariadeniach bol nainštalovaný program iPerf, ktorý slúžil na vytvorenie služby i na analýzu komunikácie. Na rozdiel od služby FTP je u služby video-streaming komplikáciou najmä štandardné použitie UDP ako transportného protokolu pre pakety RTP s používateľskými dátami (obraz/video + zvuk/audio). Datagramy nie sú potvrdzované, a preto nie je možné identifikovať doručenie paketov, čo komplikuje detegovanie hraničných bodov. Výpočet narhnutých KPI v podkap. 6.7 navyše vyžaduje kontinuálny výpočet s príchodom každého paketu, čím sa stáva použitie programu Wireshark neefektívne. Z týchto dôvodov bol použitý práve program iPerf, pomocou ktorého môžeme simulovať a súčasne i analyzovať prenos videa s presne

definovanými parametrami. Klient programu iPerf dokáže vytvoriť dátový tok využívajúci protokol UDP s cieľovou IP adresou a portom iPerf servera. Z tohto pohľadu sú úlohy klienta a servera opačné ako u samotnej služby.



Obr. 7.2: Architektúra merania služby video-streaming

Za účelom vytvorenia dátového toku s dôveryhodnými parametrami sme najprv realizovali skúšobnú komunikáciu medzi multimediálnym serverom a klientom pomocou programu VLC media player (ďalej len VLC) [51]. Prenášané pakety sme na strane klienta VLC analyzovali pomocou programu Wireshark. Server VLC vysielal pakety RTP v dvoch tokoch, jeden pre obraz a druhý pre zvuk (viď ukážka v prílohe B). Priemerná veľkosť používateľských dát v paketoch RTP naprieč oboma tokmi bola 993 B. Vysielali sme pritom referenčný video obsah v podobe súboru s nasledujúcimi parametrami:

- Veľkosť súboru: 174 MB
- Dĺžka súboru: 21,07 min (1264 s)
- Prenosová rýchlosť (obraz + zvuk): 1002 kb/s + 157 kb/s = 1159 kb/s
- Počet snímkov za 1 sekundu: 23
- Rozlíšenie snímkov: 624 × 352 px
- Typ kodeku (obraz/zvuk): MPEG-4/MPEG Audio Layer 3

Subjektívna kvalita video-obsahu zobrazovaného na strane klienta VLC bola pritom podľa autora práce plne dostačujúca a zhodná s kvalitou zdrojového súboru. Na základe vlastností súboru a predošlej analýzy priemernej dĺžky používateľských dát sme mohli nakonfigurovať totožný prenos v programe iPerf. Ten implicitne neobsahuje grafické rozhranie a príkazy sa zadávajú pomocou príkazového riadka. Na strane iPerf klienta (servera služby) sme zadali príkaz:

- `-iperf -c 172.30.20.1 -u -l 993B -b 1159k -t60`,

čím sme postupne špecifikovali úlohu klienta, cieľovú IP adresu iPerf servera, použitie protokolu UDP, veľkosť používateľských dát datagramu v bajtoch, prenosovú rýchlosť v kb/s a napokon čas trvania prenosu v sekundách. Na strane iPerf servera (klient služby) stačilo zadať príkaz:

- `-iperf -s -u -i5`,

teda sme špecifikovali úlohu servera, použitie protokolu UDP a napokon vypisovanie štatistík prenosu s periódou 5 s. Po potvrdení oboch príkazov prebehol nami nakonfigurovaný prenos. Ukážka výstupu programu dokončeného prenosu je vyobrazená v prílohe C. Výstupné štatistiky sú tiež zahrnuté v súbore *.xlsx umiestnenom na priloženom médiu. Zo zobrazených štatistík bolo možné zaznamenať nasledujúce KPI.

7.2.1 Kolísanie oneskorenia paketov služby video-streaming

Program iPerf používa pre výpočet kolísania oneskorenia algoritmus popísaný v podkap. 6.7.2 a zaznamenáva ho do stĺpca „jitter“ vštatistikách. Jeho hodnota sa pohybovala v rozmedzí 3,014–4,980 ms.

7.2.2 Stratovosť paketov služby video-streaming

Údaje potrebné pre výpočet tohto KPI je možné vyčítať zo stĺpca „Lost/Total Datagrams“ (Stratené/Všetky datagramy). Percentuálne vyjadrenie tak ako ho definuje i vzťah 6.16 je priamo uvedený v štatistikách (0 %). Pre úplnosť sme ho vyjadrili i matematicky v súlade s navrhnutým vzťahom:

$$\textit{Stratovosť paketov služby video-streaming} = \frac{0}{8755} \cdot 100 = 0\,\% \tag{7.13}$$

7.2.3 Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming

Priemerná rýchlosť prenosu dát je uvedená v stĺpci „bandwidth“ (šírka pásma) a vypočítaná je podľa vzťahu 6.17 z množstva prenesených dát zo stĺpca „Transfer“ (Prenos) a času prenosu (stĺpec „Interval“):

$$\begin{aligned} &\textit{Priemerná rýchlosť prenosu dát služby video-streaming} = \\ &= \frac{(8,29 \cdot 2^{20}) \cdot 8}{59,9} = 1160960,94\,\mathrm{b/s} = 1,16\,\mathrm{Mb/s} \end{aligned} \tag{7.14}$$

7.2.4 Diskusia výsledkov merania služby video-streaming

Výsledné KPI pre službu video-streaming môžeme z pohľadu používateľa zhodnotiť na základe analýz jej požadovaných parametrov kvality služby vypracovaných spoločnosťou Cisco Systems, Inc., uvedených v literatúre [54]. Hodnotu oneskorenia paketov program iPerf priamo nevyhodnocuje. Tolerancia služby voči oneskoreniu je však pomerne vysoká, hodnota by nemala prekročiť 4–5 s. S oneskorením úzko súvisí kolísanie oneskorenia. Video-streaming nevyžaduje „výrazné“ požiadavky na jeho hodnotu. V našom prípade sa pohybovala v rozmedzí 3,014–4,980 ms. Vychádzať môžeme z požiadaviek na službu konverzačného videa, ktoré sú v tomto smere oveľa vyššie ako u video-streamingu, a pre ktorú platí, že hodnota by nemala presiahnuť 30 ms. Stratovosť paketov bola 0 %, pričom požiadavka pre túto službu je neprekročenie hranice 5 %. Priemerná rýchlosť prenosu dát bola 1,16 Mb/s daná prenosovou (bitovou) rýchlosťou konkrétneho video obsahu.

Na základe vyššie uvedených porovnaní dosiahnutých a vyžadovaných parametrov môžeme prehlásiť, že používateľ pri sledovaní video obsahu s nami nadefinovanými parametrami nebude pozorovať degradáciu jeho kvality ako následok prenosu. V prípade, že by prenášaným video obsahom bol „kvalitnejší“ súbor napr. s väčším rozlíšením či väčším množstvom snímkov za 1 s, vzrástli by i nároky na prenosovú rýchlosť. V prípade, že budeme uvažovať prenosovú rýchlosť v smere downlink u služby FTP (12,6 Mb/s) a zhodné zaobchádzanie s paketmi týchto služieb, je rezerva využiteľnej prenosovej rýchlosti takmer 11-násobok dosiahnutej prenosovej rýchlosti pri meraní nami definovaného video obsahu. Z pohľadu kolísania oneskorenia takisto existuje dostatočná rezerva, keďže koncové zariadenia tejto služby spravidla disponujú vyrovnávacou pamäťou, ktorá ho kompenzuje tak, že zdržiava rôzne oneskorené pakety a následne ich periodicky predáva na výstup. Ani takto vzniknuté celkové oneskorenie paketov používateľovi u tejto služby spravidla nevadí, keďže nevyžaduje interakciu s protistranou. Z uvedených dôvodov hodnotíme súčasnú výkonnosť siete z pohľadu podpory kvality služby pre službu video-streaming ako dostatočnú.

7.3 Návrh rekonfigurácie siete

Keďže v dobe merania nebol v sieti mechanizmus kvality služby zavedený, navrhli sme spôsob jej možnej implementácie v prvku UGW9811 pomocou funkcie povedomia o službe (SA) na základe jej analýzy v podkap. 5.3:

1. Najprv je nutné prepnúť terminál postupne z implicitného režimu *používateľký pohľad* úrovne 1 terminálu cez režim *sytémový pohľad* úrovne 2 terminálu do

režimu *služobný pohľad* úrovne 3 terminálu:

- `system-view`
- `service-view`

2. Vytvoríme používateľský profil s názvom „profil“ a skupinu používateľských profilov s názvom „skupinaprofilov“:
   - `user-profile profil`
   - `user-profile-group skupinaprofilov`

3. Vytvoríme väzbu s najvyššou prioritou (1) medzi vytvoreným profilom a skupinou profilov pre prístupovú technológiu E-UTRAN:
   - `user-profile-binding user-profile-group skupinaprofilov user-profile profil priority 1 rat eutran`

4. Priradíme skupinu profilov k APN:
   - `system-view`
   - `apn VUT`
   - `user-profile-group-binding skupinaprofilov`

5. Vytvoríme filter „tcpdatovesluzby“ pre selekciu segmentov protokolu TCP (pre službu FTP) a filter „udpdatovesluzby“ pre selekciu datagramov protokolu UDP (pre službu video-streaming) a oba zahrnieme do spoločnej skupiny filtrov „dátové služby“:
   - `service-view`
   - `filter tcpdatovesluzby l34-protocol tcp`
   - `filter udpdatovesluzby l34-protocol udp`
   - `filter-group datovesluzby filter tcpdatovesluzby`
   - `filter-group datovesluzby filter udpdatovesluzby`

6. Vytvoríme L7-pravidlá „ftp“ a „rtp“ pre aplikačné protokoly FTP (služba FTP) a RTP (služba video-streaming):
   - `l7rule ftp protocol ftp`
   - `l7rule rtp protocol rtp`

7. Definujeme parametre kvality služby tak, aby obe služby boli prenášané nosičmi, ktoré spĺňajú tieto parametre. Najprv definujeme parameter QCI v súlade so štandardizovaným QCI charakteristikami (viď podkap. 4.1.1), teda napr. QCI 4 pre video-streaming a QCI 8 pre FTP. Ďalej obom službám nastavíme parameter ARP s prioritami 2 resp. 3, povolíme využiť zdroje

pridelené službám s nižšou prioritou a na druhej strane povolíme tiež uvoľniť zdroje vyhradené pre tieto služby iným službám s vyššou prioritou. Pre službu video-streaming, ktorej sme priradili GBR nosič (QCI 4), ďalej definujeme postupne garantovanú prenosovú rýchlosť v smere uplink (30 Mb/s) a downlink (50 Mb/s), a maximálnu prenosovú rýchlosť v smere uplink (40 Mb/s) a downlink (60Mb/s).

- `qos-property videoqos qci 4 arp 2 pre-emption-capability enable pre-emption-vulnerability disable gbruplk 30000 gbrdnlk 50000 mbruplk 40000 mbrdnlk 60000`
- `qos-property ftpqos qci 8 arp 3 pre-emption-capability enable pre-emption-vulnerability disable`

8. Vytvoríme zvláštne PCC pravidlo pre každú službu zahrnutím spoločnej skupiny filtrov vytvorenej v 5. bode, keďže sa jedná v oboch prípadoch o služby dátové. Ďalej zahrnieme L7 pravidlá vytvorené v 6. bode pre aplikačné protokoly skúmaných služieb a obom službám priradíme parametre kvality služby vytvorené v 7. bode. Napokon definujeme priority:
   - `rule pccvideo filter-group datovesluzby qos-service-property videoqos l7-rule rtp priority 20`
   - `rule pccftp filter-group datovesluzby qos-service-property ftpqos l7-rule ftp priority 10`

9. V poslednom kroku obe PCC pravidlá priradíme k používateľskému profilu vytvorenému v 2. bode, definujeme prioritu a zavedieme zmeny konfigurácie do systému:
   - `user-profile profil`
   - `rule-binding pccftp priority 3`
   - `rule-binding pccrtp priority 2`
   - `service-view`
   - `refresh-service`

Sledom týchto príkazov docielime, že pri detegovaní paketov služby FTP a video-streaming tieto obdržia zaobchádzanie v súlade s nami špecifikovanými parametrami QCI, ARP, GBR a MBR. Ďalej by bolo možné pomocou parametru charakteristika akcie definovať konkrétne spôsoby zaobchádzania od špecifikácie prepúšťania/zahadzovania týchto paketov až po nastavenie značkovania paketov pre mechanizmus DiffServ tak, aby tieto parametre boli skutočne dodržané. Priority definované v navrhnutých príkazoch sú voliteľným parametrom, ich význam rastie až s rastúcim počtom pravidiel, ktorý je v našom prípade minimálny a sú uvedené len pre ukážku

spôsobu ich nastavenia.

Komplexné nastavenie kvality služby tak, ako bolo popísané v teoretickej časti tejto práce, je v réžii viacerých prvkov a nevystačíme si tak s konfiguráciou prvku UGW9811 (P-GW + S-GW). Ďalej je potrebné nastaviť súčinnosť s prvkami eNB, UPCC (PCRF), UIM (AAA server) a ďalšími, čo však nebolo možné vzhľadom k nedostupnosti technickej dokumentácie k daným prvkov zahrnúť do tohto návrhu. Implementácia takýchto mechanizmov kvality služby by mohla viesť napr. k zlepšeniu výkonnosti služby FTP. Výrazný dopad by mala najmä pri prevádzke s veľkým zaťažením kedy platí, že komplexná konfigurácia kvality služby je jediným účinným spôsobom ako uplatniť požadovanú politiku operátorov.

8 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo analyzovať podporu kvality služby (QoS) v mobilných sieťach EPS, navrhnúť metodiku pre jej meranie a túto aplikovať v rámci experimentálnej siete na UTKO FEKT VUT v Brne.

Prvým bodom zadania bolo popísať problematiku ohľadom podpory QoS v sieťach EPS a jej architektúry. Tento bod je splnený v kapitolách 1–4. Popísané sú tu základné vlastnosti sietí EPS, koncept kvality služby v týchto sieťach, kde boli vysvetlené pojmy ako PDN spoj, EPS nosič, SDF tok a ich vzájomné vzťahy. Ďalej boli predstavené prvky zabezpečujúce QoS v EPS, teda najmä prvky podieľajúce sa na riadení politky a účtovania (PCC), ich funkcie a procedúry spojené so zabezpečením QoS naprieč celou mobilnou sieťou a to ako na úrovni nosičov, tak na úrovni transportnej siete.

Druhým bodom zadania bolo vypracovať metodiku merania a vyhodnocovania QoS z pohľadu používateľa naprieč celou mobilnou sieťou. Tento bod je splnený v kapitole 6, kde boli navrhnuté vlastnosti testovacích zariadení, podmienky pre meranie a napokon vhodné kľúčové výkonnostné indikátory (KPI) pre hodnotenie parametrov QoS relevantných k daným službám. Konkrétne sa návrh venoval službe prenosu súboru pomocou protokolu FTP, prehliadaniu webových stránok pomocou protokolu HTTP a službe video-streaming s využitím protokolov ako sú RTP, RTSP a RTCP.

Tretím bodom zadania bolo overiť možnosti podpory QoS v experimentálnej sieti na UTKO FEKT VUT v Brne. Tento bod zadania je splnený v kapitole 5, kde boli na základe dostupnej technickej dokumentácie rozobraté možnosti implementácie QoS so zameraním na prvok UGW9811 od spoločnosti Huawei Technologies Co., Ltd., ktorý zlučuje fukcie P-GW a S-GW a je tak jedným z najdôležitejších prvkov vykonávajúci riadenie politiky na základe pravidiel, ktoré zabezpečia pre služby korešpondujúcu QoS. Rozobratá bola funkcia „Povedomie o službe“ (SA), ktorá bola neskôr využitá i pri návrhu rekonfigurácie siete.

Štvrtým a posledným bodom zadania bolo realizovať meranie podľa navrhnutej metodiky pri rôznej úrovni konfigurácie experimentálnej siete a výsledky diskutovať. Tento bod je splnený v kapitole 7. V podkapitole 7.1 a 7.2 bol popísaný postup merania služby FTP a video-streaming, výpočet korešpondujúcich KPI a zhodnotenie nameraných výsledkov. Výsledky ukázali, že výkonnosť siete pre službu FTP je vzhľadom k jej možnostiam nedostatočná najmä z pohľadu nízkej prenosovej rýchlosti v oboch smeroch prenosu. Naopak pri službe video-streaming bola výkonnosť vyhodnotená ako dostatočná a používateľ by pri jej realizácii nemal pozorovať zhoršenie kvality prehrávaného video obsahu oproti kvalite samotného súboru. V podkapitole 7.3 je navrhnutý spôsob možnej rekonfigurácie siete za účelom

optimalizácie podpory kvality služby. Návrh je zameraný výhradne na konfiguráciu prvku UGW9811, ktorého dokumentácia bola k dispozícii. Realizácia rekonfigurácie a následné opätovné aplikovanie metodiky nebolo z technických dôvodov (nemožnosť zasiahnuť do konfigurácie siete) uskutočnené.

Na základe splnenia všetkých bodov zadania s ohľadom na dostupné možnosti považujem cieľ práce za naplnený. Medzi hlavné prínosy tejto práce patrí objektívne vyhodnotenie podpory QoS v experimentálnej sieti z pohľadu používateľa služieb FTP a video-streaming, a ktoré môže byť v budúcnosti rozšírené i o službu prehliadania webových stránok, ktorej testovanie je taktiež súčasťou návrhov tejto práce. Navrhnutú metodiku je ďalej možné aplikovať pre mobilné siete rôznych štandardov za účelom optimalizácie siete z pohľadu QoS, porovnania výkonnosti rôznych sietí či vykonania jednorazového merania pre zistenie súčasného stavu podpory QoS. Popis možností implementácie prvku UGW9811 a návrh konkrétnej konfigurácie môže slúžiť ako referencia pri konfigurácii siete v budúcnosti.

LITERATÚRA

[1] NOHRBORG, M. *LTE: LTE Overview*. [online]. [cit. 2015-10-26]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

[2] WANNSTROM, J. *LTE-Advanced*. [online]. 2013 [cit. 2015-10-26]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>

[3] *About 3GPP*. [online]. [cit. 2015-12-14]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/about-3gpp>

[4] BAKER, M. *LTE-Advanced: Physical Layer*. [online]. 2009. [cit. 2015-10-26] Dostupné z URL: <ftp://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090003-r1.pdf>

[5] 3GPP TS 23.002. *Network architecture*. Release 13.3.0. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/dynareport/23002.htm>

[6] FIRMIN, F. *The Evolved Packet Core*. [online]. [cit. 2015-10-26]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>

[7] FIRMIN, F. *NAS: EPS Session Management*. [online]. [cit. 2015-10-26]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas>

[8] IETF. RFC 6459: *IPv6 in 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Evolved Packet System (EPS)*. [online]. 2012. [cit. 2015-10-26] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6459>

[9] 3GPP TS 36.300. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*. Release 13.1.0. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/dynareport/36300.htm>

[10] 3GPP TS 23.401. *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access* . Release 13.4.0. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23401.htm>

[11] 3GPP TS 23.203. *Policy and charging control architecture*. Release 13.5.1. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23203.htm>

[12] *LTE Identification III: EPS Session/Bearer Identifiers*. [online]. 2013 [cit. 2015-10-26]. Dostupné z URL: <http://www.netmanias.com/en/post/techdocs/5907/identification-identifier-lte/lte-identification-iii-eps-session-bearer-identifiers>

[13] *LTE QoS: SDF and EPS Bearer QoS*. [online]. 2013 [cit. 2015-10-31]. Dostupné z URL: <http://www.netmanias.com/en/post/techdocs/5908/eps-lte-qos-sdf/lte-qos-sdf-and-eps-bearer-qos>

[14] *GPRS Tunneling Protocol (GTP) in LTE*. [online]. 2013 [cit. 2015-10-31]. Dostupné z URL: <http://4g-lte-world.blogspot.sk/2013/03/gprs-tunneling-protocol-gtp-in-lte.html>

[15] EKSTROM, H. *QoS control in the 3GPP evolved packet system*. [online]. 2009, vol. 47, issue 2, s.76–83 [cit. 2015-10-31]. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4785383. Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4785383&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F35%2F4785366%2F04785383.pdf%3Farnumber%3D4785383>

[16] 3GPP TS 23.207. *End-to-end Quality of Service (QoS) concept and architecture*. Release 12.0.0. 3GPP, 2014. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23207.htm>

[17] 3GPP TS 29.212. *Policy and Charging Control (PCC); Reference points*. Release 13.3.0. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/29212.htm>

[18] 3GPP TR 21.905. *Vocabulary for 3GPP Specifications*. Release 12.0.0. 3GPP, 2013. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/21905.htm>

[19] 3GPP TS 32.240. *Telecommunication management; Charging management; Charging architecture and principles*. Release 12.6.0. 3GPP, 2014. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/32240.htm>

[20] *UMTS*. [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/103-umts>

[21] *GPRS & EDGE: General Packet Radio Service / Enhanced Data rates for Global Evolution*. [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/102-gprs-edge>

[22] 3GPP TS 23.272. *Circuit Switched (CS) fallback in Evolved Packet System (EPS); Stage 2*. Release 13.1.0. 3GPP, 2015. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23272.htm>

[23] OLSSON, M., et al. *EPC and 4G packet networks: driving the mobile broadband revolution.* Second edition. Boston: Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2013, xxxvi, 582 p. ISBN 01-239-4595-X

[24] COX, C. *An introduction to LTE LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications.* Second edition. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2014, 487 p. ISBN 978-1-118-81802-2

[25] GSM Association Official Document IR.34 *Guidelines for IPX Provider networks*. Version 9.1, 2013. Dostupné z URL: <http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2013/05/IR.34-v9.1.pdf>

[26] *DiffServ – The Scalable End-to-End QoS Model*. [online]. 2005 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z URL: <http://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk766/technologies_white_paper09186a00800a3e2f.html>

[27] IETF. RFC 3261: *SIP: Session Initiation Protocol*. [online]. 2002. [cit. 2015-12-14] Dostupné z URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>

[28] IETF. RFC 4566: *SDP: Session Description Protocol*. [online]. 2006. [cit. 2015-12-14] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4566>

[29] IETF. RFC 2326: *Real Time Streaming Protocol (RTSP)*. [online]. 1998. [cit. 2015-12-14] Dostupné z URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2326.txt>

[30] IETF. RFC 793: *Transmission Control Protocol*. [online]. 1981. [cit. 2015-12-14] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc793>

[31] IETF. RFC 768: *User Datagram Protocol*. [online]. 1980. [cit. 2015-12-14] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc768>

[32] ETSI TS 102 250-1. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 1: Assessment of Quality of Service*. V2.2.1. ETSI, 2011. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225001/02.02.01_60/ts_10225001v020201p.pdf>

[33] ETSI TS 102 250-2. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation*. V2.4.1. ETSI, 2015. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225002/02.04.01_60/ts_10225002v020401p.pdf>

[34] ETSI TS 102 250-3. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 3: Typical procedures for Quality of Service measurement equipment*. V2.3.2. ETSI, 2015. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225003/02.03.02_60/ts_10225003v020302p.pdf>

[35] ETSI TS 102 250-4. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 4: Requirements for Quality of Service measurement equipment*. V2.2.1. ETSI, 2011. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225004/02.02.01_60/ts_10225004v020201p.pdf>

[36] ETSI TS 102 250-5. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 5: Definition of typical measurement profiles*. V2.4.2. ETSI, 2015. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225005/02.04.02_60/ts_10225005v020402p.pdf>

[37] ETSI TS 102 250-6. *Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ);QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks;Part 6: Post processing and statistical methods*. V1.2.1. ETSI, 2004. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225006/01.02.01_60/ts_10225006v010201p.pdf>

[38] ETSI TS 102 250-7. *Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 7: Network based Quality of Service measurements*. V1.1.1. ETSI, 2009. Dostupné z URL: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225007/01.01.01_60/ts_10225007v010101p.pdf>

[39] ITU-T. E.800: *Definitions of terms related to quality of service* [online]. 2009 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>

[40] 3GPP TS 32.410. *Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM*. Release 13.0.0. 3GPP, 2016. Dostupné z URL: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23207.htm>

[41] IETF. RFC 959: *FILE TRANSFER PROTOCOL (FTP)*. [online]. 1985. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc959>

[42] IETF. RFC 5797: *FTP Command and Extension Registry*. [online]. 2010. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5797>

[43] *Development of a Reference Web page*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z URL: <https://portal.etsi.org/TBSiteMap/STQ/HTLMReferenceWebPage.aspx>

[44] IETF. RFC 2616: *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. [online]. 1999. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2616>

[45] IETF. RFC 2818: *HTTP Over TLS*. [online]. 2000. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2818>

[46] IETF. RFC 1866: *Hypertext Markup Language - 2.0*. [online]. 1995. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1866>

[47] IETF. RFC 3550: *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*. [online]. 2003. [cit. 2016-05-16] Dostupné z URL: <https://tools.ietf.org/rfcmarkup?rfc=3550&draft=&url=#section-6.1>

[48] HUAWEI. *Product Documentation*. 2014. [cit. 2016-05-20].

[49] NOVOTNÝ V., KRKOŠ R., ŠEDÝ J. *Mobilní experimentální síť LTE-WiFi-EPC-IMS na FEKT VUT Brno*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2015. 53s.

[50] PŘIKRYL M., et al. *WinSCP*. Ver. 5.7.7. 2016. [cit. 2016-05-20] Dostupné z URL: <http://winscp.net/>

[51] VideoLAN. *VLC media player*. Ver. 2.2.1. 2015. [cit. 2016-05-20] Dostupné z URL: <http://www.videolan.org/vlc/>

[52] COMBS G., et al. *Wireshark*. Ver. 2.0.3. 2016. [cit. 2016-05-20] Dostupné z URL: <https://www.wireshark.org/>

[53] Compaq Computer Corporation., et al. *Universal Serial BusSpecification*. Revision 2.0. 2000. [cit. 2016-05-20] Dostupné z URL: <http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/>

[54] SZIGETI, T., HATTINGH C. *End-to-end QOS network design.* Indianapolis, IN: Cisco Press, 2005. ISBN 15-870-5176-1.

ZOZNAM SKRATIEK

3GPP	3rd Generation Partnership Project – Projekt partnerstva tretej generácie
AAA	Authentication, Authorization, and Accounting – Autentizácia, autorizácia a účtovanie
ADC	Application Detection and Control – Detekcia a riadenie aplikácie
AF	Application Function – Aplikačná funkcia (v kontexte mimo podkap.4.2.3)
AF	Assured Forwarding – Zaručené odosielanie (v kontexte podkap.4.2.3)
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate – Agregovaná maximálna prenosová rýchlosť
API	Application Programming Interface – Aplikačné programovacie rozhranie
APN	Access Point Name – Názov prístupového bodu
ARP	Allocation and Retention Priority – Priorita pridelenia a udržania
BBERF	Bearer Binding and Event Reporting Function – Funkcia vytvárania väzieb medzi nosičmi a hlásenia udalostí
BE	Best Effort – Maximálna snaha
BPSK	Binary Phase-Shift Keying – Binárne kľúčovanie fázovým posunom
CAR	Committed Access Rate – Záväzná prístupová rýchlosť
CSFB	Circuit Switched FallBack – Pád do siete so spínaním okruhov
DiffServ	Differentiated Services – Diferencované služby
DL	DownLink – Zostupný smer (od základňovej stanice k používateľskému vybaveniu/terminálu)
DRB	Data Radio Bearer – Dátový rádiový nosič
DSCP	DiffServ Code Point – Kódový bod diferencovaných služieb
EF	Expedited Forwarding – Urýchlené odosielanie
eNB	evolved NodeB – Vyvinutý uzol B

EPC	Evolved Packed Core – Vyvinuté jadro siete
EPS	Evolved Packet System – Vyvinutý paketový systém
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer – Rádiový prístupový nosič vyvinutej univerzálnej pozemnej prístupovej siete
E-RAB ID	E-UTRAN Radio Access Bearer IDentifier – Identifikátor rádiového prístupového nosiča vyvinutej univerzálnej pozemnej prístupovej siete
ETSI	European Telecommunications Standards Institute – Európsky inštitút pre telekomunikačné normy
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network – Vyvinutá univerzálna pozemná prístupová sieť
FDD	Frequency Division Duplex – Kmitočtovo delený duplex
FTP	File Transfer Protocol – Protokol prenosu súboru
FUP	Fair Use Policy – Politika spravodlivého používania
GBR	Guaranteed Bit Rate – Garantovaná prenosová rýchlosť
GPRS	General Packet Radio Service – Všeobecná paketová rádiová služba
GSM	Global System for Mobile communications – Globálny systém pre mobilné komunikácie
GTP	GPRS Tunneling Protocol – GPRS tunelovací protokol
GTP-U	GPRS Tunnelling Protocol User plane – GPRS tunelovací protokol používateľskej roviny
HSS	Home Subscriber Server – Domovský účastnícky server
HTML	HyperText Markup Language – Hypertextový značkovací jazyk
HTTP	HyperText Transfer Protocol – Hypertextový prenosový protokol
HTTPS	HyperText Transfer Protocol Secure – Zabezpečený hypertextový prenosový protokol
CHA	Charakteristika akcie
CHÚ	Charakteristika účtovania
ID	IDentity – Identita

IM	Instant Messaging – Rýchle správy
IMEI	International Mobile Equipment Identity – Medzinárodná identita mobilného vybavenia
IMS	IP Multimedia Subsystem – IP multimediálny subsystém
IMSI	International Mobile Subscriber Identity – Medzinárodná identita mobilného účastníka
IP	Internet Protocol – Internetový protokol
IPv4	Internet Protocol version 4 – Internetový protokol verzie 4
IPv6	Internet Protocol version 6 – Internetový protokol verzie 6
ISDN	Integrated Services Digital Network – Digitálna sieť integrovaných služieb
ITU	International Telecommunication Union – Medzinárodná telekomunikačná únia
KPI	Key Performance Indicators – Kľúčové výkonnostné indikátory
LBI	Linked EPS Bearer Identity – Identita prepojených EPS nosičov
LTE	UMTS Long Term Evolution – Dlhodobý vývoj UMTS
MAC	Media Access Control – Riadenie prístupu k médiu
MBR	Maximum Bit Rate – Maximálna prenosová rýchlosť
MIMO	Multiple Input Multiple Output – Viac vstupov, viac výstupov
MME	Mobility Management Entity – Entita správy mobility
MMI	Man Machine Interface – Rozhranie človek – stroj
MOS	Mean Opinion Score – Priemerné hodnotenie názoru
MPS	Multimedia Priority Services – Multimediálne prioritné služby
NAS	Network-Attached Storage – Úložisko pripojené do siete
Non-GBR	Non-Guaranteed Bit Rate – Negarantovaná prenosová rýchlosť
OCS	Online Charging System – Systém online účtovania

OFCS	Offline Charging System – Systém offline účtovania
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Ortogonálny kmitočtovo delený viacnásobný prístup
OS	Operating System – Operačný systém
P2P	Peer-to-Peer – Rovný s rovným
PC	Personal Computer – Osobný počítač
PCC	Policy and Charging Control – Riadenie politiky a účtovania
PCEF	Policy and Charging Enforcement Function – Funkcia uplatňovania politiky a vykonávania účtovania
PCRF	Policy control and Charging Rules Function – Funkcia riadenia politiky a účtovacích pravidiel
P-CSCF	Proxy-Call Session Control Function – Proxy-funkcia riadenia hovorovej relácie
PDN ID	Packet Data Network IDentity – Identita paketovej dátovej siete
PDN	Packet Data Network – Paketová dátová sieť
PDP	Packet Data Protocol – Paketový dátový protokol
P-GW	Packet data network GateWay – Brána paketovej dátovej siete
PHB	Per Hop Behavior – Správanie podľa skoku
PMIP	Proxy Mobile IP – Proxy mobilný IP
PMN	Public Mobile Network – Verejná mobilná sieť
PSTN	Public Switched Telephone Network – Verejná prepínaná telefónna sieť
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – Kvadratúrna amplitúdová modulácia
QCI	QoS Class Identifier – Identifikátor triedy QoS
QoE	Quality of Experience – Kvalita zážitku
QoS	Quality of Service – Kvalita služby

RCAF	Radio access network Congestion Awareness Function – Funkcia upovedomovania o zahltení rádiovej prístupovej siete
RFC	Request For Comments – Žiadosť o komentáre
RRC	Radio Resource Control – Riadenie rádiových zdrojov
RTCP	RTP Control Protocol – RTP riadiaci protokol
RTP	Real-time Transport Protocol – Protokol prenosu v reálnom čase
RTSP	Real-Time Streaming Protocol – Protokol vysielania v reálnom čase
RUCI	Radio access network User plane Congestion Information – Informácia o zahltení používateľskej roviny rádiovej prístupovej siete
SA	Service Awareness – Povedomie o službe
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access – Kmitočtovo delený viacnásobný prístup s jednou nosnou
SDF	Service Data Flow – Dátový tok služby
SDP	Session Description Protocol – Protokol popisu relácie
S-GW	Serving GateWay – Obsluhujúca brána
SIP	Session Initiation Protocol – Protokol inicializácie relácie
SLA	Service Level Agreement – Dohoda o úrovni služby
SMS	Short Message Service – Služba krátkych správ
SPR	Subscription Profile Repository – Repozitár účastníckych profilov
STQ	Speech and multimedia Transmission Quality – Kvalita prenosu hovoru a multimédií
TCP	Transmission Control Protocol – Protokol riadenia prenosu
TDD	Time Division Duplex – Časovo delený duplex
TDF	Traffic Detection Function – Funkcia detekcie prevádzky
TEID	Tunnel Endpoint IDentifier – Identifikátor konca tunela
TFT	Traffic Flow Templates – Vzory prevádzkového toku

ToS	Type of Service – Typ služby
TTI	Transmission Time Interval – Časový interval vysielania
TV	Television – Televízia
UDP	User Datagram Protocol – Používateľský datagramový protokol
UE	User Equipment – Používateľské vybavenie
UIM	Unified Identity Management – Jednotná správa identity
UGW	Unified packet GateWay – Jednotná paketová brána
UL	UpLink – Vzostupný smer (od používateľského vybavenia/terminálu k základňovej stanici)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System – Univerzálny mobilný telekomunikačný systém
UPCC	Unified Policy and Charging Controller – Jednotná riadiaca jednotka politiky a účtovania
URL	Uniform Resource Locator – Jednotný lokátor zdroja
USB	Universal Serial Bus – Univerzálna sériová zbernica
USN	Unified Serving Node – Jednotný obslužný uzol
UTC	Coordinated Universal Time – Koordinovaný svetový čas
VoIP	Voice over IP – Prenos hlasu cez IP
WGS-84	World Geodetic System 1984 – Svetový geodetický systém 1984
WWW	World Wide Web – Celosvetová pavučina

ZOZNAM PRÍLOH

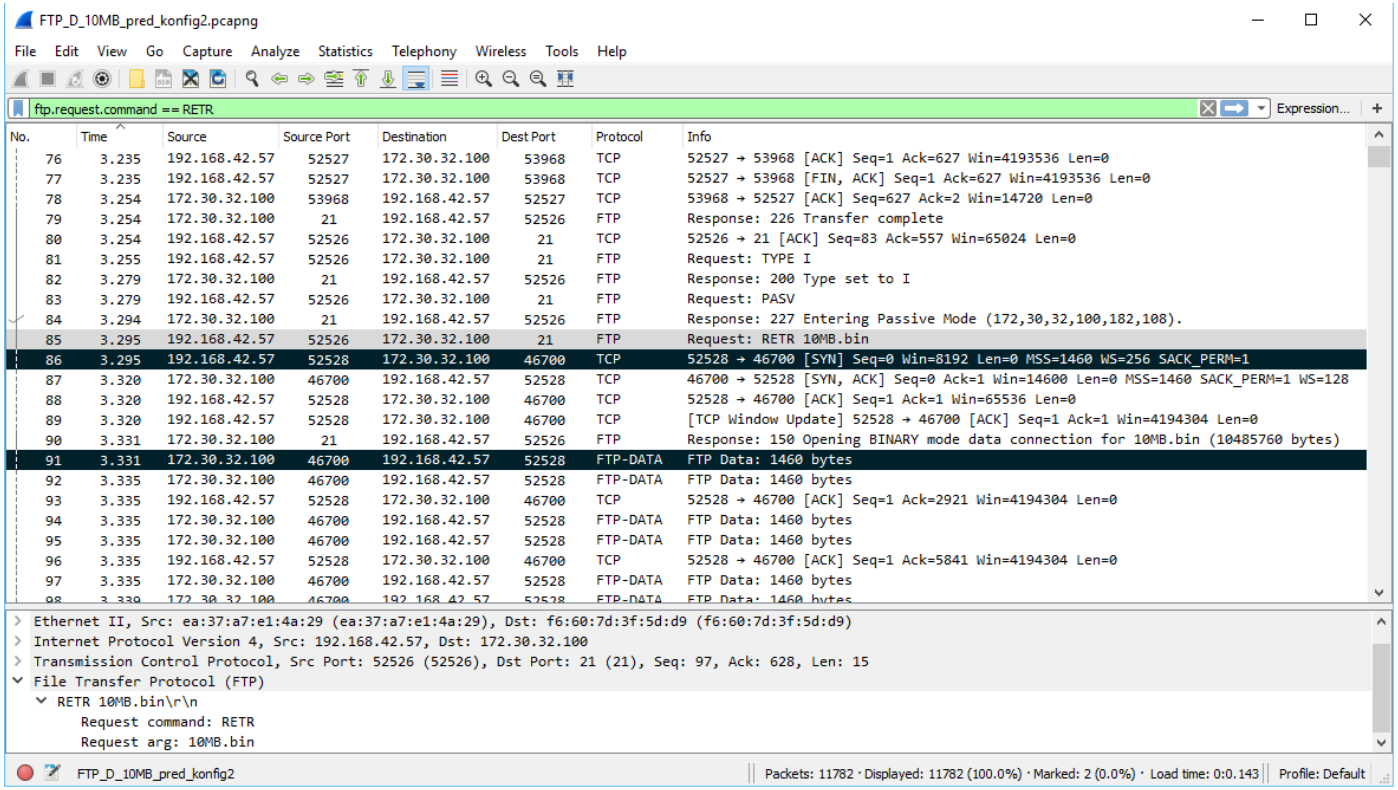
A Ukážka analýzy služby FTP v programe Wireshark **94**

B Ukážka analýzy paketov RTP v programe Wireshark **95**

C Ukážka výstupu programu iPerf **96**

D Obsah priloženého média **97**

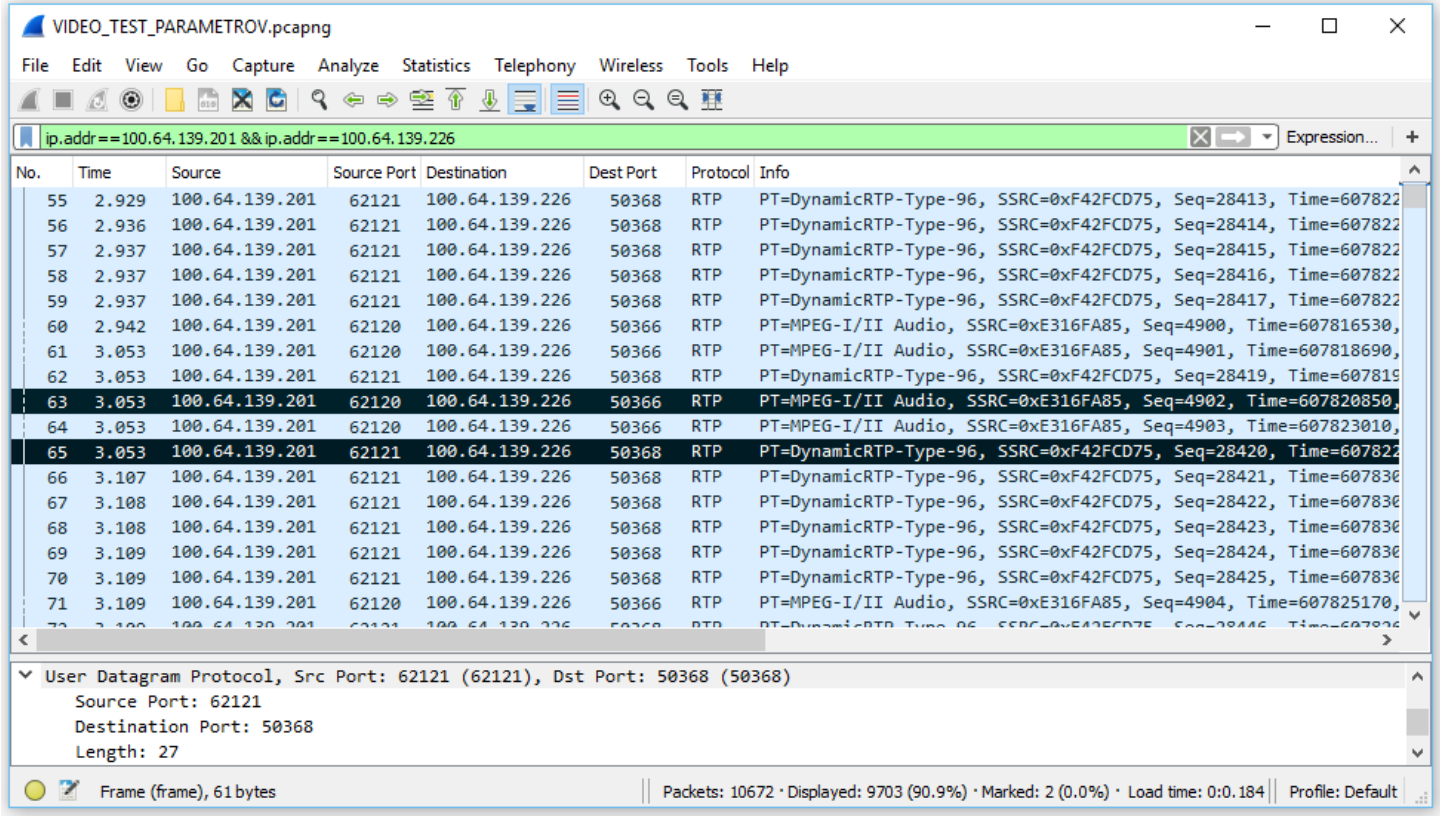
A UKÁŽKA ANALÝZY SLUŽBY FTP V PROGRAME WIRESHARK



Obr. A.1: Ukážka analýzy paketov FTP služby v programe Wireshark

Zelenou farbou je vyznačená oblasť pre zadávanie filtrov, tmavou farbou sú vyznačené hraničné body pre KPI *Pomer zlyhania prístupu k službe FTP*. Filter je uvedený pre ukážku. Po potvrdení filtru by zostali zobrazené len pakety vyhovujúce filtru.

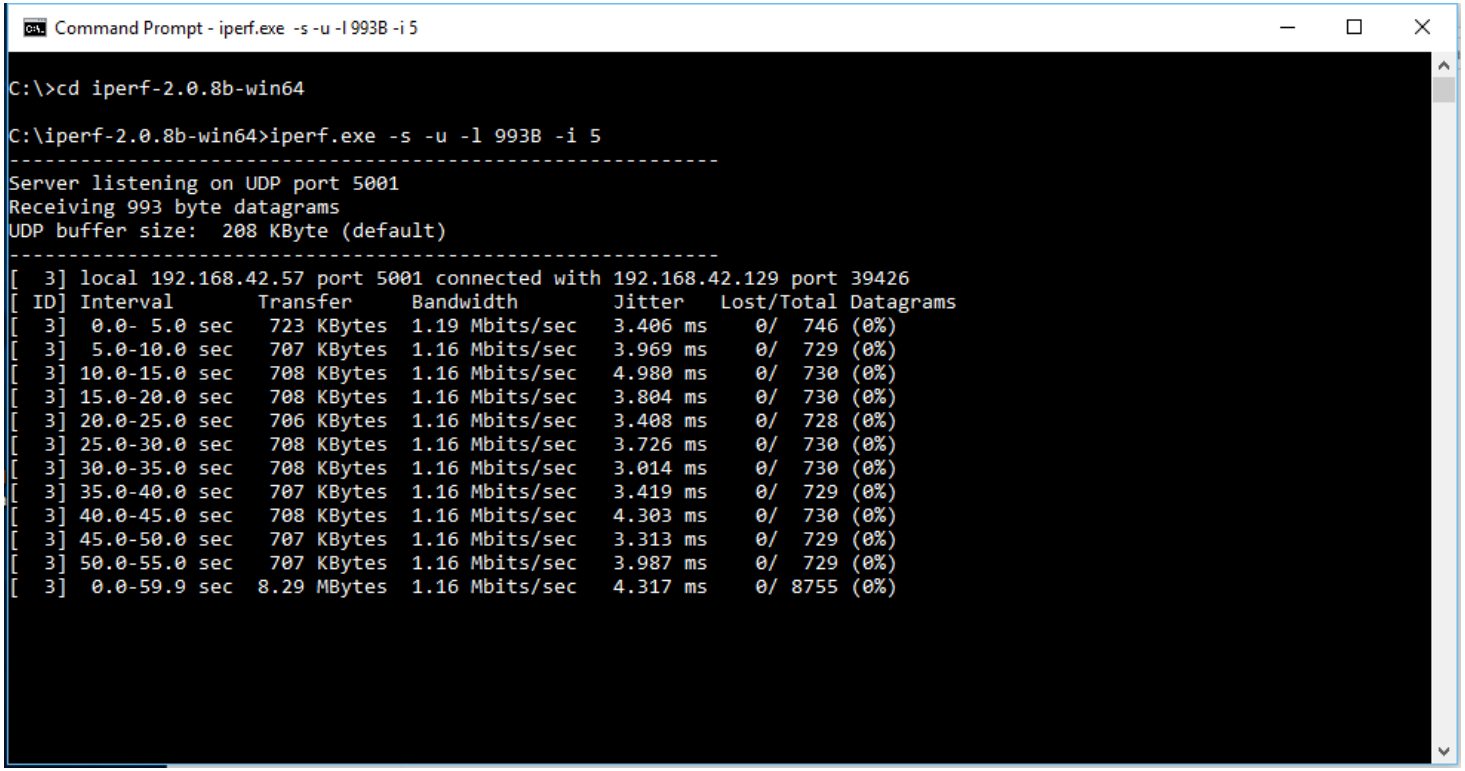
B UKÁŽKA ANALÝZY PAKETOV RTP V PROGRAME WIRESHARK



Obr. B.1: Ukážka analýzy paketov RTP v programe Wireshark

Tmavou farbou je pre rozoznanie tokov vyznačený jeden paket audio-toku (vrchný) a jeden paket video-toku (spodný).

C UKÁŽKA VÝSTUPU PROGRAMU IPERF



Obr. C.1: Ukážka výstupu programu iPerf

D OBSAH PRILOŽENÉHO MÉDIA

Médium obsahuje:

- elektronickú verziu práce vo formáte *.pdf,
- výsledky merania spracované do prehľadových tabuliek vo formáte *.xlsx.