

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

Evidenčné číslo: FEI-10848-16023

Ing. Adrián Kováč

Autoreferát dizertačnej práce

**Metódy zabezpečenia VoIP komunikácie
a modelovanie ich vplyvu na kvalitu služby
pomocou upraveného E-modelu**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe 5.2.15 Telekomunikácie

Bratislava, máj 2013

**Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia
na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave**

Predkladateľ: Ing. Adrián Kováč
Ústav telekomunikácií FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Miloš Orgoň, PhD.
Ústav telekomunikácií FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

Vážený pán

prof. Ing. Florián Makáň, CSc.

ÚEF FEI STU Bratislava

Vážený pán

doc. Ing. Jiří Mišurec, PhD.

Ústav Telekomunikácií VTU Brno

Technická 12

616 00 Brno

ČR

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná28.8.2013.....**o**10:30.....**h.**

na: Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

v: zasadacej miestnosti číslo.....B602.....

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD, dekan FEI STU

ANOTÁCIA

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Študijný odbor: Telekomunikácie
Študijný program: 5.2.15 Telekomunikácie
Autor: Ing. Adrián Kováč
Dizertačná práca: Metódy zabezpečenia VoIP komunikácie a modelovanie ich vplyvu na kvalitu služby pomocou upraveného E-modelu
Vedúci dizertačnej práce: doc., Ing. Miloš Orgoň, PhD.
Odborný konzultant: Ing. Michal Halás, PhD.
Mesiac a rok odovzdania: máj 2013

Práca sa zaoberá problematikou merania a vyhodnocovania kvality prenosu hlasu prostredníctvom technológie VoIP; modelovaním VoIP prevádzky pomocou Paretovho rozdelenia; modelovaním a meraním stratovosti vznikajúcej vplyvom kolísania oneskorenia (jitter) na vyrovnávacích pamätiach (buffers) na strane príjemcu (IP terminál) a nakoniec úpravou E-modelu ITU-T G.107 v.8.1 voči referenčnej metóde PESQ tak, aby zahŕňal ako vstupné parametre aj kolísanie oneskorenia a veľkosť vyrovnávacej pamäte.

ANNOTATION

Slovak University of Technology Bratislava
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

Study Specialization: Telecommunications
Degree Course: 5.2.12 Telecommunications
Author: Ing. Adrián Kováč
Dissertation Thesis: VoIP Communication Securing Methods and Modelling of Their Effects on QoS through Modified E-Model
Supervisor: doc. Ing. Miloš Orgoň, PhD.
Consultant: Ing. Michal Halás, PhD.
Month, Year: May 2013

This thesis deals with measurement and quality assessment of voice transmission and through VoIP technology; modeling of IP network traffic using Pareto distribution; modelling and measurement of packet loss occurring on jitter buffers on receiving side (IP terminals) under the influence of network jitter and at last with modification of an existing E-model ITU-T G.107 in its most up-to-date version v. 8.1 against a reference PESQ method so that the model would include two additional input parameters: network jitter and jitter buffer size.

Obsah

Úvod	4
Tézy dizertačnej práce	5
1 Metódy hodnotenia kvality QoS VoIP hovoru	6
1.1 Intruzívne metódy	7
1.2 Neintruzívne metódy	8
2 Prevádzkové parametre v IP sieťach	10
2.1 VoIP komunikačný reťazec	11
2.2 Oneskorenie	11
2.3 Kolísanie oneskorenia (Jitter)	11
3 Modelovanie VoIP prevádzky v IP sieťach	13
3.1 Modelovanie oneskorenia VoIP prevádzky	13
3.2 Modely M/D/1, G/D/1/K, MMPP/D/1/K a Pareto/D/1/K	14
3.3 Modelovanie oneskorenia IP sietí Paretovým rozdelením	16
4 Modifikácia E-modelu ITU-T G.107 zohľadňujúca vplyv kolísania sieťového oneskorenia a vyrovnávacích pamätí	17
4.1 Návrh metódy výpočtu efektívnej stratovosti paketov v sieti pre E-model – úprava výpočtu Impairment faktora	17
4.2 Vplyv vyrovnávacej pamäte na kvalitu hovoru a odhad MOS	18
5 Merania stratovosti a kvality prenosu hlasu	20
5.1 Meranie stratovosti vyrovnávacej pamäte	20
5.2 Meranie kvality prenosu VoIP pomocou vybraných metód	21
6 Experimentálne overenie výsledkov a test modelu	23
7 Vyhodnotenie výsledkov a záver	25
8 Prínos dizertačnej práce pre prax a rozvoj vednej disciplíny	27
9 Zoznam použitej literatúry	28
Účasť autora na výskumných projektoch	31
Pedagogická činnosť autora	31
Ostatné významné aktivity	31
Zahraničné stáže	31
Zoznam publikácií autora	32
Resumé	36

Úvod

IP telefónia je dnes rýchlo sa rozširujúci technologický fenomén, ktorý pri prechode klasických telekomunikačných sietí na konvergované a širokopásmové siete postupne vytlačá klasickú hlasovú sieť s prepínanými okruhmi. Na svoj prenos využíva IP telefónia, ako je z názvu zrejmé, asynchrónne siete, postavené na protokole IP, najčastejšie Ethernet a GPON. Médium je tak určené primárne na prenos dát - širokopásmového internetového pripojenia – a samotný hlas je pridaný len ako ďalší dátový tok zapuzdrený v protokole RTP a spojenie je inicializované protokolmi SIP alebo H.323. Základom pre úspešné plánovanie, realizáciu ale aj údržbu týchto sietí na požadovanej úrovni, vhodnej pre VoIP prenosy, je potrebný aj vhodný algoritmus poskytujúci spätnú väzbu o stavoch na sieti. Takýmto je napríklad analyzovaný ITU-T E-model, ktorému sa venujeme vo svojom výskume a predkladanej dizertačnej práci.

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá kvalitou služieb VoIP telefónie, mechanizmami zabezpečenia, prostriedkami na jej meranie a modelmi na predikciu. V práci je kladený dôraz na analýzu, kvantifikáciu a predikciu vplyvu kolísania sieťového oneskorenia na VoIP paketový tok, čo pomôže vytvoriť vhodný model na stanovenie reálnej kvality QoS hovorovej hlasovej VoIP služby a umožní tak v praxi implementovať v manažmente siete optimálne QoS mechanizmy.

Ciele práce sú stanovené ako tézy, ktoré sme vytvorili na základe doterajšieho výskumu vrámci diplomovej a minimovej práce, ako aj odborných publikácií. Venujeme sa modelovaniu vyrovnávacích pamätí na strane príjemcu VoIP – digitálneho koncového terminálu, vhodne modelujeme sieťovú IP prevádzku pomocou „long-tailed“ pravdepodobnostných rozdelení a napokon navrhujeme úpravu existujúceho E-modelu na objektívne stanovovanie kvality hovoru neintruzívnym spôsobom v reálnom čase podľa ITU-T G.107 v jeho najnovšej verzii ku dňu písania práce tak, aby zohľadňoval dva nové vstupné parametre – veľkosť kolísania sieťového oneskorenia (jitter) podľa RFC 3550 a veľkosť vyrovnávacej pamäte na prijímacej strane (buffer), ktoré priamo ovplyvňuje oneskorenie a stratovosť paketov s výsledným vplyvom na kvalitu hovoru – MOS skóre. Pri použití E-modelu v jeho pôvodnej implementácii nie je možné príčinu zníženia kvality vplyvom nedostatočnej vyrovnávacej pamäte alebo veľkého kolísania oneskorenia priamo odhaliť.

V texte práce budeme používať viaceré pojmy, ktorých význam si teraz vopred špecifikujeme. Pojmom „oneskorenie“ máme namysli oneskorenie doručenia VoIP paketov prenášaných IP sieťou, inak anglicky označované ako „delay“ alebo „network delay“. Pod pojmom „kolísanie oneskorenia“ máme namysli kolísanie sieťového oneskorenia (delay) pri doručovaní paketov vo VoIP sieti v čase, anglicky „jitter“. Pojmom „vyrovnávacia pamäť“ označujeme vyrovnávaciu pamäť na príjem VoIP paketov na vstupe zariadenia zo siete, ktorej účelom je znížiť vplyv kolísania oneskorenia (jitter) na plynulosť spracovávania vstupného prúdu paketov pri dekódovaní. Anglicky je táto pamäť označovaná ako „buffer“ alebo špeciálne „jitter buffer“ prípadne v niektorých zdrojoch ako „de-jitter buffer“. Pod termínom „paketizácia“ rozumieme preklad anglického výrazu „packetization“. Ide o proces delenia toku audio dát na strane odosielateľa do IP paketov istej veľkosti.

Tézy dizertačnej práce

Na základe analýzy súčasného stavu problematiky zabezpečovania, merania a odhadu kvality VoIP spojení v reálnom čase boli sformulované nasledujúce tézy dizertačnej práce:

1. Vytvoriť matematický model správania sa vyrovnávacích pamätí za účelom sledovania kolísania sieťového oneskorenia;

2. Navrhnuť metódu výpočtu efektívnej stratovosti paketov VoIP spojenia v dôsledku prítomnosti kolísania sieťového oneskorenia;

3. Modifikovať E-model ITU-T G.107 tak, aby výpočet predpokladanej kvality VoIP hovoru MOS zohľadňoval aj kolísanie sieťového oneskorenia a vplyv vyrovnávacej pamäte na jeho kompenzáciu

1 Metódy hodnotenia kvality QoS VoIP hovoru

Výskum v oblasti kvality prenosu hlasu začal určovaním pomeru užitočného signálu k šumu (SNR) v systémoch PCM. Nevhodnosť použitia analógových parametrov pre digitálnu IP telefóniu sa ako prvý pokúsil odstrániť model „BARK“, ktorý spresnil analýzu skreslenia spektra a stal sa v roku 1998 základom pre odporúčanie P.861, nazývané “Perceptual Speech Quality Measure (PSQM)”. Pretože táto metóda prístupu dáva korektné výsledky len pri bezchybnom kódovaní a prenose, je vo všeobecnosti nepoužiteľná na hodnotenie kvality prenosu technológiou VoIP, kde je stratovosť paketov s hlasovými vzorkami takmer vždy prítomná. Preto ďalším cieľom ITU-T bolo vyvinúť model a metódu hodnotenia vhodnú pre prostredia s istou tolerovanou mierou chybovosti a stratovosti, ako sú mobilné komunikácie (GSM) alebo IP siete.

Výsledkom snaženia ITU-T sa stal model PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), ktorý predstavuje kompromis medzi modelmi PAMS, PSQM a PSQM+.

Model PESQ, v roku 2001 schválený ako odporúčanie ITU-T P.862, v sebe kombinuje pozitíva všetkých troch uvádzaných modelov, ako napríklad verný psychoakustický model vnímania a dobrý časový súbeh aj v prostrediach s chybovosťou a stratovosťou paketov. Model PESQ je plne referenčný, tzn. vyžaduje aktívne meranie, kde sa na vstup systému privedie hlasový záznam, ktorý je po prechode komunikačným reťazcom porovnávaný s pôvodnou neskreslenou nahrávkou. Zistené nedostatky v odporúčaní P.862 viedli k vydaniu jeho opravy, odporúčania P.862.2, ktoré je v súčasnosti v širokej miere využívané v praxi. Autori Malfail a kol. zdôrazňujú vo svojej práci [29] dôležitosť konštantného oneskorenia na sieti a správnej synchronizácie porovnávaných hlasových vzoriek na vstupe a na výstupe reťazca, ktoré vstupujú do porovnávaného modelom PESQ na dosiahnutie hodnoverných a spoľahlivých výsledkov. So sústavne sa meniacim primerným oneskorením vo VoIP telefónii, najmä cez internet a WAN siete, sa toto stáva kameňom úrazu. V praxi je potrebné dosiahnuť presnosť zladenia vzoriek na +/-5 ms [29]. Ďalším plne referenčným modelom je P.AAM, ktorý zohľadňuje dokonca aj elektroakustické parametre terminálových zariadení.

Zložitosť a vyššia náročnosť realizácie meraní porovnávaním viedla k vytvoreniu tzv. pasívnych modelov, ktoré určujú kvalitu „za behu“ zbieraním údajov o prebiehajúcej komunikácii a prenose. Príkladom sú odporúčanie ITU-T P.563 a tzv. *bezreferenčný (no-reference)* model, ktoré predpokladajú štandardné elektroakustické vlastnosti terminálov a sú priamym protipólom k referenčnému P.862, resp. jeho revízii P.862.2, či P.AAM.

V súčasnosti je najaktuálnejšia metóda POLQA – P.863 [6] a [36], taktiež založená na algoritme korelácie pôvodného a preneseného signálu psychoakustickým modelom. Použitý psychoakustický model je obdobný, ako u audio kompresie MP3 a AAC. Rozdiel oproti PESQ spočíva v rozšírení modelu aj pre hodnotenie širokopásmovej – wideband – IP telefónie s rozšíreným akustickým pásmom 7 kHz a viac.

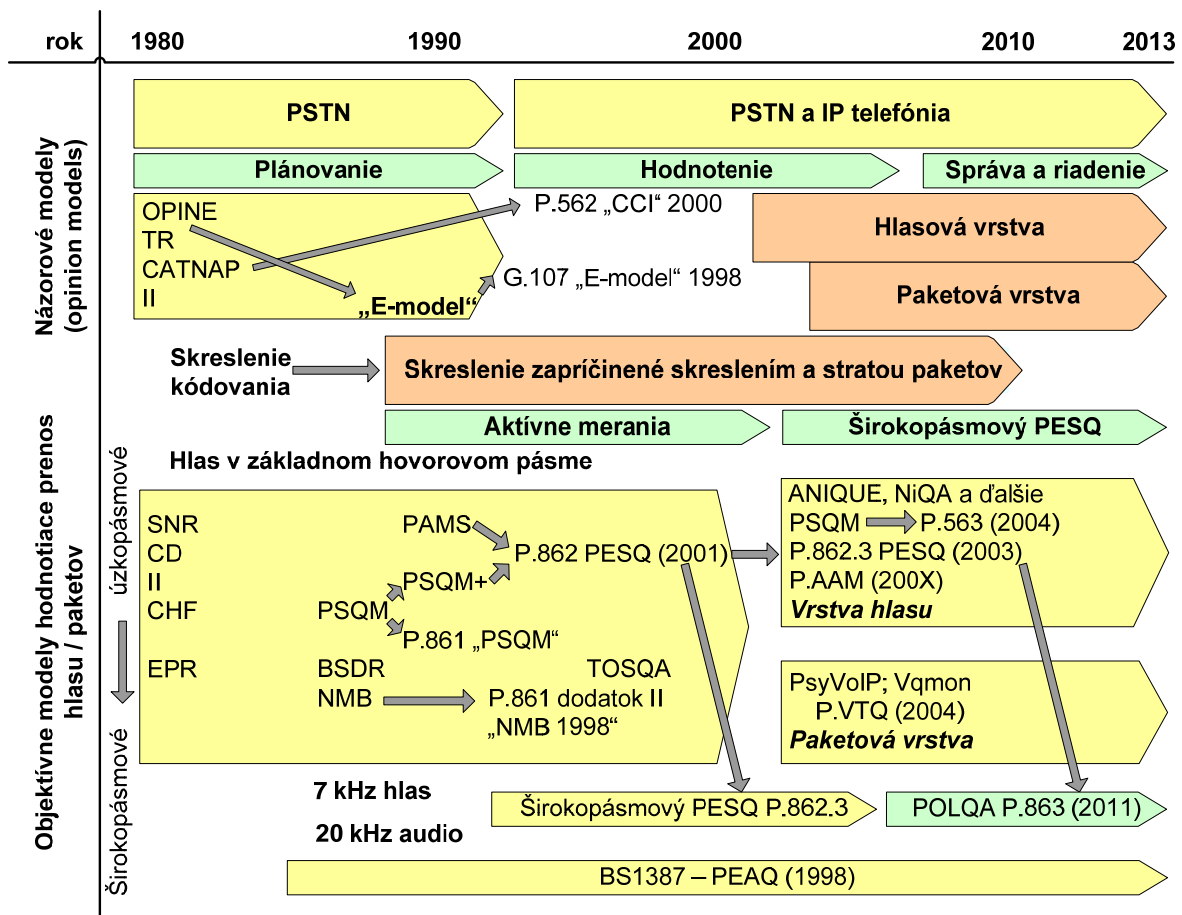
Za účelom administrácie sieťových prvkov, udržiavanie a vylepšovanie kvality spojenia ako i všeobecného rozvoja telekomunikačných služieb, sa do praxe aplikujú dve kategórie postupov hodnotenia kvality prenosu hlasu:

- **subjektívne** – hodnotí sa nimi najmä kvalita hlasu po kompresii kodekom pomocou názorov vzorky používateľov. Výsledkom hodnotenia je tzv. *MOS (Mean Opinion Score)* ukazovateľ z rozsahu 1 až 5 bodov (čím viac, tým lepšie).

- **objektívne** – pomocou merateľných prenosových vlastností siete a matematických modelov kodekov sa stanovuje objektívna miera hodnotenia kvality prenosovej cesty. V prípade preťaženia siete, alebo napr. veľkého rozptylu času doručenia, či zlej prioritizácie paketov, sa táto vlastnosť prejaví na výslednom hodnotení. Obr. 1.1. zobrazuje vývoj metód hodnotenia kvality.

Podľa miery zásahu do komunikačného reťazca a procesu poznáme metódy:

- **intruzívne metódy** – analýza je vykonaná nie na prenosových parametroch, ale na vzorkách signálu, kde je skúmaná miera zhody pôvodného a preneseného zvuku a charakter akustických degradácií. Intruzívne metódy merajú kvalitu prenosu porovnávaním prenesenej vzorky hlasu s referenčnou pôvodnou vzorkou. Je potrebné mať k dispozícii digitalizovaný hlas zo strany hovoriaceho.
- **neintruzívne metódy** – majú za cieľ stanoviť odhad kvality prenosu zvuku na základe parametrov komunikačného reťazca merateľných zvonku, ako je celková stratovosť, jej miera a charakter, oneskorenie a kolísanie oneskorenia za predpokladu použitia zariadení s vopred stanovenými parametrami.



Obr. 1.1 Chronologický vývoj metód merania kvality hovoru a služieb analógovej a digitálnej telefónie

1.1 Intruzívne metódy

Vo všeobecnosti si intruzívne metódy vyžadujú prítomnosť referenčného signálu na porovnanie vzoriek nasnímaných u hovoriaceho a vzoriek prenesených a degradovaných sieťou následne prijatých na strane počúvajúceho. Intruzívne metódy nie sú praktické

z dôvodu toho, že ich nie je možné aplikovať na reálnych hovoroch, ale je potrebné robiť osobitné testovacie hovory. Nie je možné merať ani okamžitú výkonnosť a kvalitu hovorov siete. Najčastejšie je používaná metóda PESQ určená na testovanie kvality a degradačných charakteristík kodekov. Na základe tejto metódy sú definované aj parametre P_{pl} a B_{pl} pre E-model [27], [32] a [33].

Časovú synchronizáciu realizuje PSQM pomocou tzv. kros-korelácie signálov. Oneskorenie sa v reálnom prostredí siete mení dynamicky a tento fakt PESQ metóda nedokáže aplikovať do výpočtu. Metóda PAMS je odporúčaná na meranie znevýhodnenia I_e kodekov s bitovou rýchlosťou 4 kbit/s a viac. Chyby transkódovania, prenosu kanálom / sieťou (bitová, paketová a bunková stratovosť) a rýchle zmeny kolísania oneskorenia (jitter) je možné pomocou PAMS merať dostatočne presne. PAMS nie je určená na meranie celkového oneskorenia a pomalých zmien oneskorenia, meranie úrovni signálu, hlasitosti a frekvenčnej odozvy komunikačného reťazca ako celku. Metódy PESQ a PAMS majú podobnú aplikáciu v praxi, pričom metóda PESQ poskytuje najvyššiu presnosť odhadu MOS [37].

Intruzívne metódy je možné zadeliť do troch kategórií podľa ich algoritmov:

- **Intruzívne metódy v časovej oblasti:**
 - odstup signál / šum – Signal to Noise Ratio (SNR) a
 - segmentovaný odstup signál / šum (SNRseg).

Vyznačujú sa jednoduchou implementáciou a nižšou vypovedacou hodnotou výslednej miery kvality z dôvodu principiálne odlišného prístupu kodekov k vzniku a minimalizácii šumu.

- **Intruzívne metódy vo frekvenčnej oblasti:**
 - LPC – lineárne prediktívne kódovanie a keprálna analýza (CD) [37].

Výpočtovo spoľahlivejšie a odolnejšie voči odchýlkam alebo chybám v korelácií v porovnaní s metódami v časovej oblasti signálu. Charakter hodnotenia závisí od typu implementovaného frekvenčného akustického modelu reči a svojim charakterom sa do značnej miery zhoduje s kódovaním a kompresiou hlasu súčasnými kodekmi (ACELP, iLBC).

- **Intruzívne metódy vo vnemovej oblasti:**
 - Perceptual Speech Quality Measure (PSQM);
 - Perceptual Analysis Measurement System (PAMS);
 - Measuring Normalizing Block (MNB);
 - Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMBSD) a
 - Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ);
 - Perceptual Objective Listening Quality Assessment POLQA.

Uvedené intruzívne metódy sú štandardizované ITU-T a zakladajú sa na psychoakustických modeloch vnímania hlasu človekom. Spomedzi všetkých intruzívnych metód dosahujú najlepšie výsledky [37].

1.2 *Neintruzívne metódy*

Neintruzívne alebo pasívne metódy sú určené na vykonávanie meraní a hodnotenie kvality prevádzky v reálnom čase. Na rozdiel od intruzívnych metód, odhad kvality sa vykonáva bez znalosti referenčného signálu. Neintruzívne metódy svoje výpočty a odhady zakladajú na objektívne merateľných veličinách, ako sú aktuálne prevádzkové parametre siete (oneskorenie, kolísanie oneskorenia, stratovosť). Medzi neintruzívne metódy sa radí:

- ***INMD – In Service Non-intrusive Measurement Device:***

Táto metóda bola vyvinutá na meranie hlasitosti, šumu, echa a strát v sieťach s prepínaním okruhov. Postupom času bola pridaná podpora sietí s prepínaním paketov. INMD bola štandardizovaná v roku 2000 ITU – T P.562. INMD parametre sú do značnej miery zhodné s parametrami E-modelu. INMD je zjednodušený model a je vhodný pre siete s jednoduchším charakterom strát a degradácie. Chýbajúca parametrická reprezentácia bola vyriešená vyvinutím novej metódy Call Clarity Index (CCI).

- ***CCI – Call Clarity Index:***

CCI model bol vypracovaný spoločnosťou British Telecom a zahŕňa vlastnosti INMD modelu. Je optimalizovaný na meranie kvality jedného hovoru s pomocou psychoakustického modelu a je vykonaný prevod na subjektívne hodnotenie – index CI (Clarity Index). Metóda testuje kvalitu spojenia a môže byť implementovaná aj na smerovačoch a aktívnych sieťových prvkoch. Model najprv odhadne sieťové parametre a následne vyhodnotí echo a okolitý šum a nakoniec zahrnie do výpočtu oneskorenie a echo.

- ***Non-intrusive Quality Assessment (NIQA):***

Metóda NIQA bola vyvinutá spoločnosťou Psytechnics ako rozšírenie metódy CCI, ktoré zahŕňa všetky typy skreslení a degradácie (oneskorenie, prázdne rámce, nízka bitová rýchlosť kodekov a pod.). Algoritmus NIQA môže byť implementovaný na všetkých aktívnych sieťových prvkoch:

- ***PsyVoIP:***

Metóda PsyVoIP je podobná INMD modelu, ale je špecificky pripravená pre VoIP prenosy. Dokáže monitorovať hovory a predpovedať ich kvalitu aj na základe sieťových parametrov. Podobnou metódou je aj Vqmon, ktorá je rozšírením E-modelu.

- ***Perceptual Single ended Objective Measure (PSOM):***

Metóda vyvinutá France Telecom na meranie a odhadovanie kvality hovoru. Analýza reči je vykonávaná a porovnávaná so štatistickým modelom ľudskej reči. Výstupom je sústava pravdepodobnostných parametrov, ktoré sa následne prepočítajú na kvalitatívne skóre.

- ***E-model:***

Metóda definovaná v ITU-T G.107 slúžiaca na odhad MOS na základe sieťových parametrov a (oneskorenie, stratovosť) a známych parametrov použitých kodekov. E-model v pôvodnej implementácii umožňuje testovať kvalitu kodekov, ktoré majú štandardnú šírku pásma hlasového kanála 300 – 3400 Hz a s istými úpravami parametrov je v modifikovanej podobe vhodný aj na hodnotenie zariadení typu hands-free alebo širokopásmových hlasových služieb (s rozšíreným frekvenčným rozsahom 150–7000 Hz).

Výstupom E-modelu je hodnota „R-value“, takzvaný R-faktor. Najprv sa určí stupeň degradácie hlasového signálu na základe vplyvu jednotlivých faktorov (hlasitosť, echo, oneskorenie, stratovosť, úroveň okolitého šumu, parametre popisujúce vlastnosti kodeku a ďalšie), ktorý sa vypočíta za pomoci matematických rovníc. Odporúčanie G.107 a jeho pridružené prílohy [14], [15], [16] obsahujú referenčné hodnoty, ktorých sa možno pridržovať pri výpočte. Index celkovej kvality má reprezentovať vnímanie a hodnotenie užívateľa používajúceho štandardný koncový terminál v bežných podmienkach prevádzky.

2 Prevádzkové parametre v IP sieťach

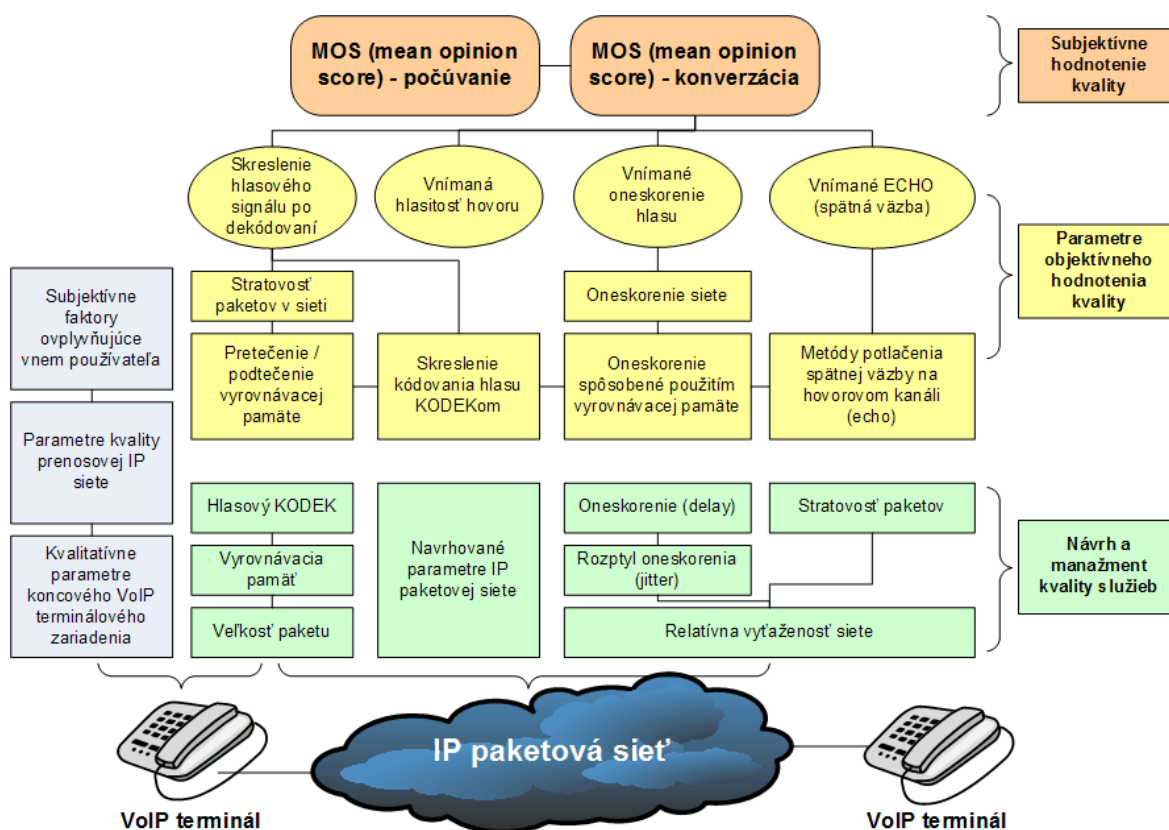
Vo VoIP technológii sa na charakteristiku vlastností kódovaného hlasu najčastejšie používajú nasledovné objektívne merateľné parametre:

- kvantizačné skreslenie [dB];
- úroveň hovoreného signálu [dB];
- dynamický rozsah [dB];
- úroveň okolitého šumu a hluku na strane hovoriaceho aj prijímajúceho [dB];
- echo [ΔT v ms, úroveň v dB].

Kvalitu komunikačného kanála charakterizujú parametre IP sietí rovnaké, ako pre klasickú dátovú prevádzku. Vo VoIP technológii sa na charakteristiku vlastností spojenia najčastejšie používajú nasledovné objektívne merateľné parametre:

- oneskorenie (delay) [ms];
- kolísanie oneskorenia (jitter) [rozptyl σ v ms];
- stratovosť paketov v sieti (packet loss) [%];
- kapacita linky a jej priepustnosť [kbit/s, %].

Stretávame sa tak s pojmom *QoS (Quality of Service)*, ktorý reprezentuje hodnotenie spoľahlivosti, kvality a užívateľského komfortu danej komunikačnej služby pomocou vybraných parametrov, definovaných na základe objektívne odmerateľných či vypočítateľných veličín, alebo subjektívnych ukazovateľov zisťiteľných testovaním štatistickými metódami a reálnych používateľoch. QoS vyjadruje pomocou rôznych veličín, najčastejšie *MOS (Mean Opinion Score)*, priemernú subjektívnu spokojnosť užívateľov s vybranou telekomunikačnou službou.



Obr. 2.1 Objektívne a subjektívne parametre v komunikačnom reťazci IP siete

2.1 VoIP komunikačný reťazec

Komunikačný reťazec VoIP spojenia zodpovedá modelu komunikácie v IP sieti a pozostáva z troch hlavných súčastí a to zdroja signálu, prenosovej cesty a prijímacieho zariadenia. Zameriame sa na popis prenosu samotných paketov hlasovej prevádzky prostredníctvom UDP/IP a abstrahujeme od procesu zostavenia spojenia založeného na TCP/IP, ktorý nemá na kvalitu hovoru, najmä čo sa týka zvukovej vnemovej stránky, priamy vplyv. QoS parametre, charakterizujúce IP sieť od odosielateľa až po najbližší aktívny sieťový prvok na strane príjemcu, sú prenášané ako parametre v hlavičke paketu protokolu RTP. Dokument RFC 3550 definuje formát a obsah informačných správ „Sender Report“ (SR) obsahujúcich aktuálne QoS parametre siete, na základe ktorých je možné vykonávať operatívny manažment siete vrátane odhadu okamžitej kvality služieb.

Podľa odporúčania „G.1020 Recommendation“ [34] majú štandardy zaoberajúce sa výkonnosťou IP paketového prenosu (ako napr. ITU-T Rec.Y.1540, Y.1541, a IETF RFC 2330, 2678 až 2681, 3357, a 3393) obsahovať a definovať nasledujúce QoS parametre a dátové polia: *jednosmerné oneskorenie (one-way delay)*, *kolísanie oneskorenia (jitter)* a *stratovosť (packet loss)*. Tieto parametre musia byť vhodne mapované na príslušné QoS procesy aplikačnej vrstvy [34].

2.2 Oneskorenie

Oneskorenie je prítomné vo všetkých fyzických komunikačných kanáloch. Je spôsobené konečnou rýchlosťou šírenia signálu vo fyzickom médiu a takisto konečnou rýchlosťou spracovania prenášanej informácie v uzloch komunikačného reťazca.

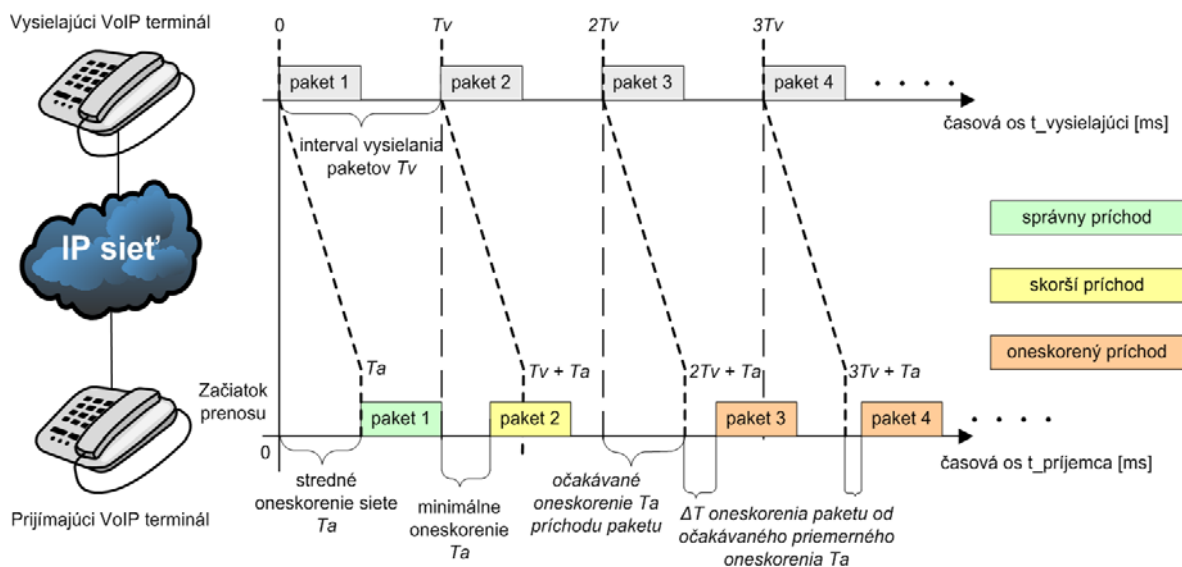
Oneskorenie (delay) vo VoIP sieti predstavuje oneskorenie hlasu pri prenose informácie komunikačným kanálom a je významným subjektívne postrehnuteľným parametrom kvality. Podľa odporúčania ITU-T G.114 je maximálna odporúčaná hodnota jednosmerného oneskorenia hovorového kanála $T_a = 150 \text{ ms}$. Táto hodnota vychádza zo spôsobu vnímania zvuku človekom. Po vyslovení vety alebo slova človek intuitívne očakáva odpoveď alebo začiatok odpovede po istej chvíli, pretože podvedome počíta s tým, že odpovedajúci potrebuje zvukovú informáciu prijať, spracovať a v myšlienkach vytvoriť odpoveď. Za predpokladu rovnakých vlastností spätného prenosového kanála bude oneskorenie odpovede o ďalších $T_a = 150 \text{ ms}$ cestou späť. Celkový čas potrebný na prenos informácie tam a späť sa nazýva RTT (Round Trip Time).

Aby si človek pri konverzácii „neskákala do reči“, je potrebné udržiavať celkové obojsmerné oneskorenie zvukového komunikačného kanála $T_{RTT} \leq \text{cca } 1 \text{ s}$. Oneskorenie má aditívny charakter a je možné ho vyjadriť súčtom čiastkových oneskorení.

2.3 Kolísanie oneskorenia (Jitter)

Kolísanie oneskorenia (Jitter), nazývané v slovenskom jazyku niekedy aj rozptyl oneskorenia alebo kolísanie sieťového oneskorenia, predstavuje neurčitnosť časovej polohy prenášaného paketu. Je druhotným efektom nestálosti hodnoty oneskorenia v čase a vyplýva zo stochastickej povahy riadenia prístupu a vzniku samotných tokov vrámci IP sietí.

Kolísanie oneskorenia (Jitter): okamžité výkyvy zaťaženia priamo ovplyvňujú dĺžku oneskorenia na aktívnych sieťových prvkoch T_{comp} , a tým aj celkového oneskorenia T_a . Pakety dorazia do cieľovej stanice spravidla v čase T_a , s určitou pravdepodobnosťou môžu doraziť skôr (dolné ohraničenie s oneskorením daným fyzickou rýchlosťou signálu), alebo omnoho neskôr (zhora neohraničené – stratu paketu je možné pokladať za nekonečné oneskorenie). Rozdiel skutočného a očakávaného príchodu označíme ako ΔT . Vplyv kolísania oneskorenia na čas doručenia znázorňuje obr. 2.2.



Obr. 2.2. Vplyv rozptylu oneskorenia na pravidelnosť príchodu paketov

Minimálna hodnota oneskorenia (dolná hranica), za ktorú môže paket doraziť je daná vzťahom (4.2.), ak oneskorenie spracovania minimalizujeme k nule $\Rightarrow T_{comp} \rightarrow 0$.

Maximálna hodnota oneskorenia nie je zhora ohraničená – paket sa môže stratiť a jeho oneskorenie bude z definície narastať do nekonečna.

Kolísanie oneskorenia (Jitter), označované ako J , je dané ako rozmedzie v [ms], alebo ako rozptyl odchýlok hodnôt oneskorenia so strednou hodnotou T_a .

Hodnoty kolísania oneskorenia do 20 ms je možné v IP sieti s nenulovou stratovosťou považovať za výborné, do 40 ms za postačujúce.

Kolísanie oneskorenia J [ms] sa v praxi v IP sieťach vypočítava v reálnom čase ako plávajúci priemer ostatných 16 diferencií časov doručenia (timestamps) paketov s hlasovými vzorkami. Časové značky (timestamps), z ktorých sa diferencie počítajú, sú obsiahnuté v hlavičke protokolu RTP. Výpočet plávajúceho priemeru kolísania oneskorenia J je exaktne definovaný v odporúčaní RFC 3550.

MPDV – Mean Packet to Packet Delay Variation (def. v RFC 3550) je metóda merania kolísania sieťového oneskorenia na základe výpočtu variancie diferencií časov príchodu po sebe idúcich paketov.

Podľa dokumentu ITU-T G.1020 [34] je definovaná metóda MAPDV – Mean Absolute Packet Delay Variation založená na výpočte strednej absolútnej hodnoty diferencií oneskorenia doručených paketov. Metóda MAPDV používa krátkodobý plávajúci priemer ako prvá metóda, avšak dôraz kladie aj na minimálnu hodnotu diferencií (Adjusted Absolute Packet Delay Variation), čím dokáže presnejšie kopírovať pomery vo vyrovnávacej pamäti na strane príjemcu a modelovať jej dynamické vlastnosti.

3 Modelovanie VoIP prevádzky v IP sieťach

Modelovanie vplyvu oneskorenia a stratovosti na charakter VoIP prevádzky, aplikovateľné vo všeobecnosti na paketové dátové toky protokolu IP, je založené na vzájomnej korelácii časového parametra oneskorenia a výkonnostného parametra stratovosti. V praxi je za stratený paket považovaný taký paket, ktorého oneskorenie presiahne istú akceptovateľnú hranicu. Vo VoIP komunikácii sú to rádovo desiatky až stovky ms, v extrémnych prípadoch do jednotiek sekúnd. Príčiny a dôsledky vzájomnej korelácie stratovosti a oneskorenia sú skúmané pomocou modelov založených na Markovovských reťazcoch a fraktálnej analýze [2], [3], [4], [8], [9], [39], [41] a [43] vychádzajúcich zo samopodobnosti intenzity a časového rozloženia IP prevádzky v čase. Vďaka týmto osciláciám a nárazovému charakteru prevádzky je zaťaženie alebo preťaženie siete charakterizovateľné krátkymi časovými sekvenciami – tzv. dávkami, počas ktorých dôjde ku strate viacerých po sebe idúcich paketov. V krátkom časovom meradle, rádovo v sekundách až jednotkách minút, čo približne zodpovedá dĺžke priemerného telefonického rozhovoru, možno považovať vlastnosti siete za stacionárne, štatistické momenty konštantné z hľadiska rádovo jednotiek sekúnd a oneskorenie i stratovosť popísať vhodnými pravdepodobnostnými distribučnými funkciami. Charakter VoIP prevádzky vykazuje vysokú mieru samopodobnosti v prácach [8], [9], [39] a práve kvôli tejto vlastnosti je potrebné pri modelovaní na dlhšom časovom úseku používať modely založené na fraktálovom prístupe, samopodobnosti a autokorelácii.

3.1 Modelovanie oneskorenia VoIP prevádzky

Vlastnosťou internetovej prevádzky alebo prevádzky v IP sieťach všeobecne je istá nenulová miera samopodobnosti postupne sa rozkladajúca v čase [8]. Oneskorenie alebo pravdepodobnostné distribučné funkcie oneskorenia doručenia paketu majú charakteristický predĺžený tvar smerom k extrémnym hodnotám. Graf exponenciálneho rozdelenia a tzv. „heavy-tailed“ rozdelení s väčším zastúpením extrémnych hodnôt sa líši v tom, že exponenciálne rozdelenie je na logaritmickom grafe reprezentované priamkou, avšak graf „heavy-tailed“ rozdelenia má aj v logaritmickej mierke charakter krivky.

Na modelovanie času príchodu IP paketov je potrebné použiť niektorý z prístupov, ktorý umožňuje pracovať so samopodobnosťou, alebo istou mierou korelácie prevádzky, ktorú nie je možné dostatočne presne modelovať procesmi bez pamäťového efektu. V doterajšej histórii výskumu bolo vytvorených a overených niekoľko vhodných metód na modelovanie procesov s extrémnymi hodnotami:

- FBM – Zlomkový Brownov pohyb;
- iteratívne mapy chaosu;
- IMMP – nekonečný Markovovský modulovaný proces;
- PPBP – Poissonovo-Pareto dávkový (burst) proces;
- FARIMA – čiastkový autoregresný integrovaný plávajúci priemer;
- MAP – Markovov proces obnovy
- MMPP – Markovovský modulovaný Poissonov proces ;
- fraktálové modely;

- Markovove reťazce v stacionárnom stave;
- iné maticové modely;
- waveletové modelovanie a ďalšie.

Problémom pri odhadovaní miery samopodobnosti reálnej paketovej prevádzky sú isté vzory správania sa aplikácií, opakujúce sa časy vysielania paketov a ďalšie faktory, ktoré skresľujú meranú mieru samopodobnosti. V dizertačnej práci bude riešený prístup abstrahujúci od externých vplyvov a pozornosť bude sústredená na analýzu paketovej prevádzky konkrétneho toku počas zostaveného spojenia, počas ktorého je možné považovať štatistické parametre za krátkodobu konštantné, pričom ich aproximácia bude priebežne počítaná metódou plávajúcich priemerov.

Autori Zhang a He v [43] ukázali, že časový rámec, v ktorom je možné spoľahlivo odhadovať budúce oneskorenie na základe súčasného oneskorenia s tým, že sa sleduje maximálna hodnota kovariancie časového radu, je časový úsek – mierka rádovo 1,25 sekundy. Z tohto zistenia vyplýva, že náš nasledujúci predpoklad je podľa RFC 3550 prípustný, keďže v najhoršom prípade uvažujeme časový interval $16 \times 30 \text{ ms} = 480 \text{ ms}$ (0,48 s). Predpokladáme totiž, že parametre oneskorenie, stratovosť a kolísanie oneskorenia sú stacionárne a budú v prípade uvažovaného časového úseku 16 po sebe idúcich vzoriek paketov také, ako je to udávané vo výpočte kolísania oneskorenia. Komplikáciou v oblasti modelovania a merania oneskorenia a jeho kolísania J v reálnych podmienkach IP siete je chýbajúca (spoľahlivá, alebo vôbec aspoň nejaká) synchronizácia času medzi odosielateľom a príjemcom IP paketov, čím je do merania a následného odhadu veličín vnesená systematická chyba, ktorú je ťažké eliminovať. Tu máme namysli synchronizáciu na úrovni aplikačnej vrstvy a protokolov, nie synchronizáciu hardvérových liniek. Ide o rozdielne meranie lokálneho času najmä pri rozľahlých WAN ale i LAN sieťach a sieť internet.

3.2 Modely M/D/1, G/D/1/K, MMPP/D/1/K a Pareto/D/1/K

Model M/D/1 s diskretným časom obsluhy je ďalším často využívaným systémom hromadnej obsluhy, ktorý sa využíva na odhad a dimenzovanie veľkosti pamäti reálnych systémov. Jeho nedostatkom je však menšia presnosť odhadu stratovosti pre systémy s krátkymi vyrovnávacími pamäťami, aké sú pre internatívnu komunikáciu VoIP potrebné (v systéme hromadnej obsluhy dĺžka radu K do cca max 10-20 paketov). Autori Karam a Tobagi navrhujú v [18] a svojich predchádzajúcich prácach zaviesť model $\Sigma_i/D/1$ založeného na modeli M/D/1 na simuláciu oneskorenia a kolísania J vznikajúceho vo VoIP sieťach pri procese smerovania paketov. Vylepšenie, ktoré model $\Sigma_i/D/1$ prináša, spočíva v možnosti nasimulovať štatistiku prichádzajúceho vstupného prúdu aproximovaním superpozíciou viacerých diskretných zdrojov. Týmto doslova „vyskladáme“ tvar nameranej funkcie pomocou viacerých funkcií popisujúcich diskretné zdroje s rôznymi parametrami.

Autori Mirtchev a Goleva vo svojich prácach [19] a [20] venovaných simuláciám limitnej stratovosti na vyrovnávacej pamäti pomocou modelov M/D/1/K a Pareto/D/1/K preukázali, že model s deterministickým konštantným časom obsluhy požiadavky (-D/-) sa pri ponúknutej prevádzke do systému $\rho \geq 1$ nezrúti (rad nenarastie donekonečna). Pritom sa predpokladá správanie systému, v ktorom ak požiadavka pri stupe do systému zbadá, že vyrovnávacia pamäť (buffer) je plná (veľkosť je obmedzená na dĺžku K paketov), dôjde

k jej zahodeniu (systém so stratami). Autori preukázali, že systém M/D/1/K vykazuje s nárastom dĺžky pamäte a znížením prevádzky rýchlejší úbytok stratovosti (strmšia vodopádová krivka) než model Pareto/D/1/K, čo bolo možné očakávať vzhľadom na vyššie zastúpenie extrémnych hodnôt (veľkých oneskorení) v Paretovom rozdelení.

Autor Kasahara vo svojich prácach [19] a [20] venovaných modelovaniu limitnej stratovosti na vyrovnávacej pamäti s konečnou dĺžkou a pseudo-samopodobným charakterom vstupnej prevádzky, úspešne dokázal, že stratovosť je možné úspešne odhadnúť a modelovať pomocou modelu MMPP/D/1/K v širokom rozsahu časovej mierky. Skratka MMPP predstavuje Markovovsky modulovaný Poissonov proces (Markov Modulated Poisson Process). Na aproximáciu stratovosti autor Kasahara v uvedených prácach využíva metódu „fitovania variancie“, tzv. „variance fitting“. V tejto metóde ide o hľadanie optimálnych parametrov popisujúcej funkcie hľadaním nie minima minimalizačnej funkcie, ale hľadanie takých parametrov, pri ktorých je variancia nameraného súboru a popisujúcej funkcie zhodná.. Táto metóda prináša dobré výsledky aj pri vysokých hodnotách Hurstovho parametra pre vybranú sieť a dĺžku radu. Model spĺňa pravidlo, že systém sa pri prevádzke blížiacей sa, rovnej alebo prekračujúcej zaťaženie $\rho = 1$ nezrúti, ale bude obsluhovať toľko požiadaviek, ako je to možné. Funkcia stratovosti a dĺžky radu je pre tento systém v okolí $\rho = 1$ spojitá. Vhodnosť MMPP procesu na popisovanie VoIP prevádzky vo svojich prácach preukázali aj autori Heffes a Lucantoni [11].

Autori Akar a Arikan sa vo svojej práci [1] venujú naopak výpočtu a odhadu zostávajúcej práce v systéme MAP/D/1/K, čo pri známej dĺžke radu K možno využiť na odhad pravdepodobnosti zahltenia takéhoto systému. Tento model je však pre VoIP nevyhovujúci, nakoľko počíta so zaťažením menším ako 1.

Pre potreby našej práce uvedené modely zjednodušíme a zovšeobecníme na úkor istej nepresnosti, čím sa však neporovnateľne zlepši výpočtová jednoduchosť a odpadne potreba merania Hurstovho parametra pre konkrétnu sieť a jeho prípadné opakované meranie v priebehu reálneho času, ako dochádza k zmenám charakteru prevádzky na sieti počas dňa či týždňa. Meranie Hurstovho parametra vstupného prúdu prevádzky je samostatná problematika, ktorou sa vo svojej práci so sieťami zaoberá Clegg v [5]. Obr. 3.1 znázorňuje zjednodušený model vyrovnávacej pamäte ako systému hromadnej obsluhy.



Obr. 3.1 Vyrovnávacia pamäť – jitter buffer – ako systém hromadnej obsluhy „Pareto/D/1/K“

Autori Mirtchev, Goleva a Statev vo svojich prácach [30] a [31] venovaných modelovaniu rozdielov časov príchodu paketov internetovej prevádzky, študujú systémy hromadnej obsluhy so vstupným prúdom s Paretovým rozdelením typu II, diskretným časom obsluhy, jedným serverom s radom dĺžky k (veľkosť vyrovnávacej pamäte v paketoch). Autori tento model konfrontujú s vlastnosťami všeobecného modelu M/D/1/K v širokom rozsahu časovej mierky.

3.3 Modelovanie oneskorenia IP sietí Paretoým rozdelením

Vzory oneskorenia paketov nevykazujú charakteristiku bieleho AWGN šumu, ale nesú isté kváziperiodické fraktálne vzory, ako to znázorňuje nasledujúci graf štatistiky difereencií časov príchodu po sebe idúcich paketov. Tmavšie oblasti grafu predstavujú najčastejšie sa opakujúce hodnoty. Pri modelovaní sa používajú opäť Markovovské modely obnovy a rozdelenia typu „heavy-tailed“ s väčším množstvom extrémnych hodnôt.

Podľa [8] je vhodné na popis štatistiky rozptylu oneskorenia Paretovo, Weibullovo a Log-normálne rozloženie, ktoré praktickým využitím pri modelovaní prevádzky sa budeme venovať v dizertačnej práci. V [42] a [43] autori Zhang a He s úspechom využívajú na modelovanie distribučnej funkcie end-to-end oneskorenia v IP sieťach model dvojparametrového Paretoého rozdelenia, ktoré neskôr predstavíme a v tejto práci označujeme ako Pareto typ I podľa [13]. Autori v zmieňovaných prácach poukázali na nevhodnosť rozdelenia normálneho a „log-normal“ na modelovanie oneskorenia v sieťach VoIP.

Ďalší predpoklad, ktorý používajú vo svojej práci [38] autori Resnick a Roetzen je, že aj keď je kolísanie oneskorenia vstupného prúdu paketov vysoké a matematicky jeho variancia dosahuje vysoké hodnoty, alebo sa až blíži nekonečnu, stále existuje stredná hodnota oneskorenia vstupného prúdu paketov. Táto podmienka je nutná preto, aby existovali stacionárne verzie procesov obnovy a štatistické procesy vo vnútri systému hromadnej obsluhy – vyrovnávacej pamäte – boli stabilné a nedošlo k zahlteniu systému. Toto je jednoducho splnené a dokázané, pretože existuje spočítateľné priemerné oneskorenie paketov a kolísanie oneskorenia času doručenia paketov podľa RFC 3550, ktoré majú reálnu konečnú hodnotu.

V práci [35] autori predstavili model riešenia Paretoého rozdelenia a jeho Laplaceovej transformácie, čo je dokázané a v praxi využité aj pri hľadaní optimálnych parametrov popisujúcej funkcie, tzv. „fitovaní“ funkcie, a analýzach skutočne nameraných hodnôt distribučnej funkcie oneskorenia paketov v IP sieťach v práci autorov [28]. V [13] autor popisuje možnosti a vlastnosti zovšeobecného Paretoého rozdelenia – GPD (Generalized Pareto Distribution) a jeho vlastnosti. V našich prácach [22], [23], [24] a [25] využívame pri modelovaní oneskorenia prenášaných paketov sieťou práve kvôli jeho univerzálnosti a širokým možnostiam uplatnenia. V tejto podkapitole načrtujeme základné vlastnosti Paretoého rozdelenia a niektoré špecifiká, ktoré ovplyvnili náš výber konkrétneho rozdelenia pre navrhovaný model správania sa vyrovnávacej pamäte.

Klasické Paretovo rozdelenie (z r. 1897) slúžilo na popis a aproximáciu javov v súvislosti s rozdelením príjmov medzi obyvateľmi krajín a popisovalo charakteristický vzťah $Cx^{-\alpha}$ medzi hodnotou x a jeho početnosťou pomocou parametrov C a α . Využitie Paretoého rozdelenia je vhodné na popis nielen ekonomických, ale aj iných druhov javov a praktických experimentov s polynomiálnou mierou poklesu pravdepodobnosti s rastom hodnoty. V nasledujúcich odstavcoch uvedieme hierarchiu foriem Paretoých rozdelení a zovšeobecnený model Feller-Paretoého rozdelenia [13]. Rozpravu o vlastnostiach Paretoého rozdelenia nájdeme aj v práci [18], ktorej autorom je Hardy. Autor Huerlimann poukazuje v práci [12], venovanej všeobecnej afinnej transformácii, na možnosť modelovať a riešiť vlastnosti radov s rozdelením vstupného prúdu Pareto typu IV v Laplaceovej oblasti, alebo za pomoci afinnej transformácie.

4 Modifikácia E-modelu ITU-T G.107 zohľadňujúca vplyv kolísania sieťového oneskorenia a vyrovnávacích pamätí

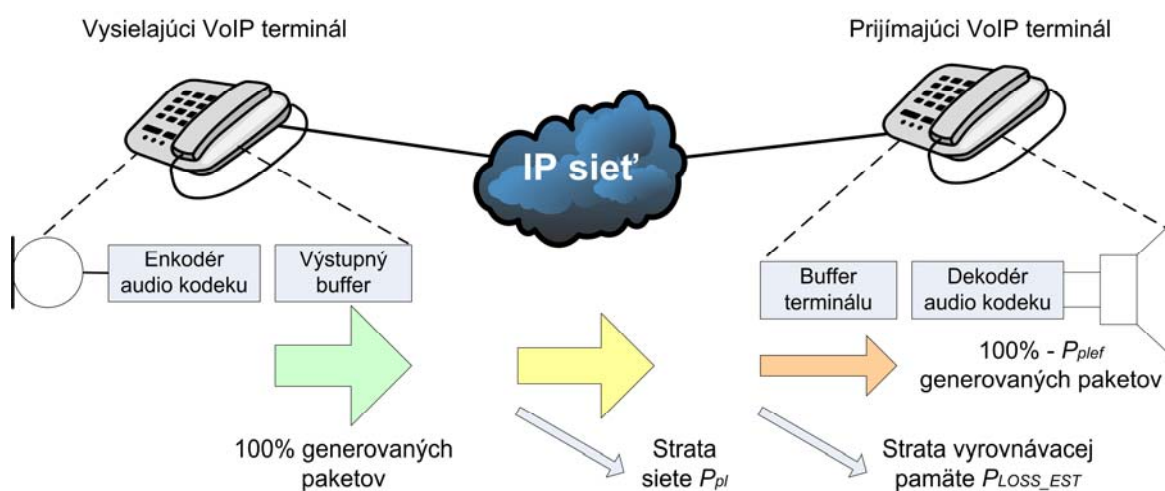
4.1 Návrh metódy výpočtu efektívnej stratovosti paketov v sieti pre E-model – úprava výpočtu Impairment faktora

V tejto kapitole sa zaoberáme možnosťou zakomponovania ďalších vstupných parametrov do E-modelu-u. Tieto parametre by brali do úvahy kolísanie oneskorenia a veľkosť vyrovnávacej pamäte a následnej stratovosti vplyvom oneskoreného doručenia paketu nad rámec dĺžky pamäte.

Navrhovaná úprava vychádza z aditívnej podstaty E-modelu. Navrhovaná zmena sa týka úpravy parametra I_{e-eff} E-modelu. Tento parameter reprezentuje celkovú mieru degradácie kvality prenášaného zvuku. Implementácia E-modelu z roku 2009 a 2011 [15] priniesla úpravu výpočtu faktora I_{e-eff} podľa rovnice 4.1, kde zaviedla nový parameter $BurstR$, ktorý reprezentuje mieru zhlukovosti stratovosti paketov a je v korelácii s Hurstovým parametrom prevádzky pre danú sieť. Podľa pôvodného odporúčania ITU-T [15] však hodnovernosť odhadu E-modelu s použitím parametra $BurstR$ vyhovuje len do hodnoty sieťovej stratovosti P_{pl} 2%. Nad touto hodnotou nie je presnosť odhadu kvality E-modelom garantovaná. Pri navrhovaných úpravách vychádzame z rovnice 4.1, pričom parameter $BurstR$ ponechávame vo východiskovej hodnote rozsahu odporúčaného ITU-T, a to $BurstR=1$.

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (4.1)$$

Parameter I_e predstavuje celkový faktor znevýhodnenia kodekom, jeho kompresiou a reprodukciou, B_{pl} je robustnosť kodeku voči náhodnej stratovosti (kvalita algoritmu PLC).



Obr. 4.1 Vznik stratovosti pri prenose hlasu prostredníctvom IP siete – kaskádovanie stratovosti

Pre stratovosť na vyrovnávacej pamäte a sieti platí kaskádovanie, teda zo 100% generovaných paketov na vysielaťacom IP telefóne bude cez sieť prepustených $(100\% - P_{pl})$ paketov. Z nich bude cez buffer prepustených $(100\% - P_{LOSS_EST})$ paketov. Výsledná

stratovosť paketov doručených dekodéru kodeku na prijímacej strane P_{plef} preto nie je prostým súčtom oboch stratovostí, ale vzájomný vzťah vyjadruje rovnica 4.2 a situáciu znázorňuje obr. 4.1.

$$P_{plef} = P_{pl} + P_{LOSS_EST} - P_{pl} \cdot P_{LOSS_EST} \quad (4.2)$$

kde P_{pl} je nameraná stratovosť siete a P_{LOSS_EST} je odhad stratovosti paketov na vyrovnávacej pamäti vplyvom kolísania sieťového oneskorenia.

Rovnica 4.3 predstavuje navrhovaný vzťah pre výpočet faktora znavyhodnenia I_{e-eff} po úprave rovníc 4.1 a dosadením 4.2. Táto úprava E-modelu zachováva jeho aditívny charakter a využíva substitúciu existujúceho parametra P_{pl} za P_{plef} a pridáva do modelu dva doplňujúci parameter stratovosti vyrovnávacej pamäte prijímajúceho zariadenia P_{LOSS_EST} .

$$\begin{aligned} I_{e-eff} &= I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{plef}}{\frac{P_{plef}}{BurstR} + B_{pl}} \\ &= I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl} + P_{LOSS_EST} - P_{pl} \cdot P_{LOSS_EST}}{\frac{P_{pl} + P_{LOSS_EST} - P_{pl} \cdot P_{LOSS_EST}}{BurstR} + B_{pl}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.2 Vplyv vyrovnávacej pamäte na kvalitu hovoru a odhad MOS

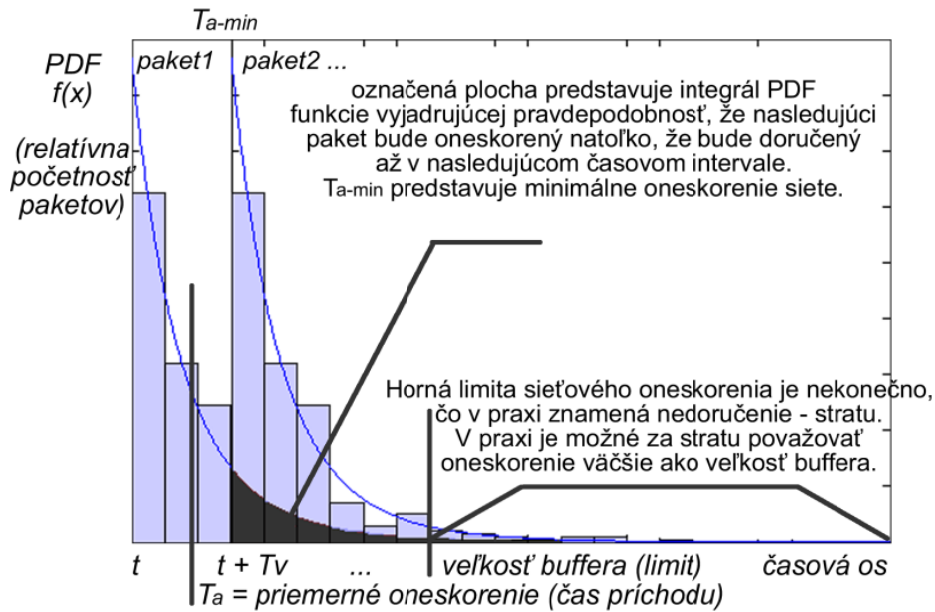
Pre sieťovú VoIP prevádzku podľa [20] a [40] následne platí, že medzipríchodový čas paketov „interarrival time“ vykazuje samopodobnosť druhého rádu „second-order self-similarity“ s hodnotou Hurstovho parametra vyjadrenou ako $H = 1 - \beta/2$, pričom platí rovnica (4.4) pre varianciu vstupného prúdu paketov.

$$r(k) = \frac{1}{2} \delta^2(k^{2-\beta}) \quad (4.4)$$

Na uvažovaných časových mierkach môžeme medzipríchodovú varianciu vstupného prúdu považovať za konštantnú a Hurstov parameter položiť rovný $H=1$.

Hlasové pakety sú na vysielajúcom zariadení generované ako homogénny tok paketov s konštantnými časovými odstupmi rovnajúcimi sa hodnote paketizačného intervalu kodeku (najčastejšie 10, 20 alebo 30 ms).

Homogénny sled VoIP paketov sa po prechode IP sieťou poruší a pevná časová poloha paketov nadobudne istý stupeň neurčitosti času príchodu paketov. Charakter prevádzky je možné opísať rozdeleniami z kategórie tzv. „long – tailed“, ktoré lepšie popisujú javy s väčším zastúpením extrémnych hodnôt než exponenciálne rozdelenie. Medzi takéto rozdelenia patria Weibullovo, Log-normálne alebo Paretovo. Rozdiely medzi jednotlivými časmi príchodu ja možné úspešne modelovať a popísať práve zovšeobecneným Paretovým rozdelením (GPD) ako to dokazujú viacerí autori vo svojich prácach [7], [20], [21], [30] a [43]. Nás však zaujímajú nie len agregované toky, ale individuálne toky reprezentujúce jednotlivé hovory, pre ktoré chceme individuálne v reálnom čase stanovovať kvalitu – skóre MOS použitím E-modelu. Obr. 4.2 znázorňuje spôsob, ako sa prejaví neurčitosť času príchodu paketov modelovaného GPD rozdelením na pôvodne homogénny dátový VoIP tok.



Obr. 4.2 Rozdelenie PDF medzi príchodových časov paketov s Paretovým rozdelením

Zmena sieťových prevádzkových parametrov (záťaž, zmeny v smerovacích tabuľkách, presmerovania a pod.) v reálnom čase sa v konečnom dôsledku prejaví ako variácie v oneskorení doručenia paketov sieťou. Rozdiely medzi príchodových časov nie sú konštantné a oscilujú medzi minimálnou možnou hodnotou oneskorenia (danou technickými možnosťami a použitým prenosovým médium za ideálnych podmienok nezaťaženej siete) T_{a-min} a „nekonečným“ oneskorením čo v praxi korešponduje so stratou paketu. Za stratený možno považovať aj príliš oneskorený paket. Tak, ako to znázorňuje obrázok 4.2, za stratený možno považovať paket, ktorý bude oneskorený viac, ako je dĺžka vyrovnávacej pamäte. Pri VoIP sa totiž jedná o synchronný prúdový dátový tok, kde je potrebné na rozdiel od prenosu súborov, zachovať poradie doručenia a prísne časové nároky doručenia paketu, inak už časový rámec, kedy má byť daná hlasová vzorka z doručovaného paketu prehraná, uplynie a je viac nepoužiteľná. Paretovo rozdelenie je vhodné pre modelovanie javov, ktoré majú ohraničenú minimálnu hodnotu, zhora sú neohraničené s konečnou strednou hodnotou. Pravdepodobnostná distribučná funkcia (PDF) GPD Paretovho rozdelenia je daná vzťahom 4.5 a kumulatívna distribučná funkcia (CDF) vzťahom 4.6.

$$f_{(\xi, \mu, \sigma)}(x) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi} - 1} \quad (4.5)$$

$$F_{(\xi, \mu, \sigma)}(x) = 1 - \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (4.6)$$

Kde parameter σ predstavuje štandardnú odchýlku, ξ je parameter tvaru, μ je parameter polohy (minimálna hodnota modelovanej náhodnej premennej). μ v našom modeli predstavuje offset Paretovho rozdelenia od nuly na časovej osi. Keďže nás zaujíma relatívna poloha od očakávanej pravidelnej časovej polohy, kedy bol príchod paketu očakávaný a kolísanie oneskorenia sa vypočítava ako stredná hodnota rozdielu z diferencií časov príchodov, absolútna hodnota oneskorenia nie je v tomto prípade prvoradá a parameter μ môžeme položiť rovný 0.

5 Merania stratovosti a kvality prenosu hlasu

5.1 Meranie stratovosti vyrovnávacej pamäte

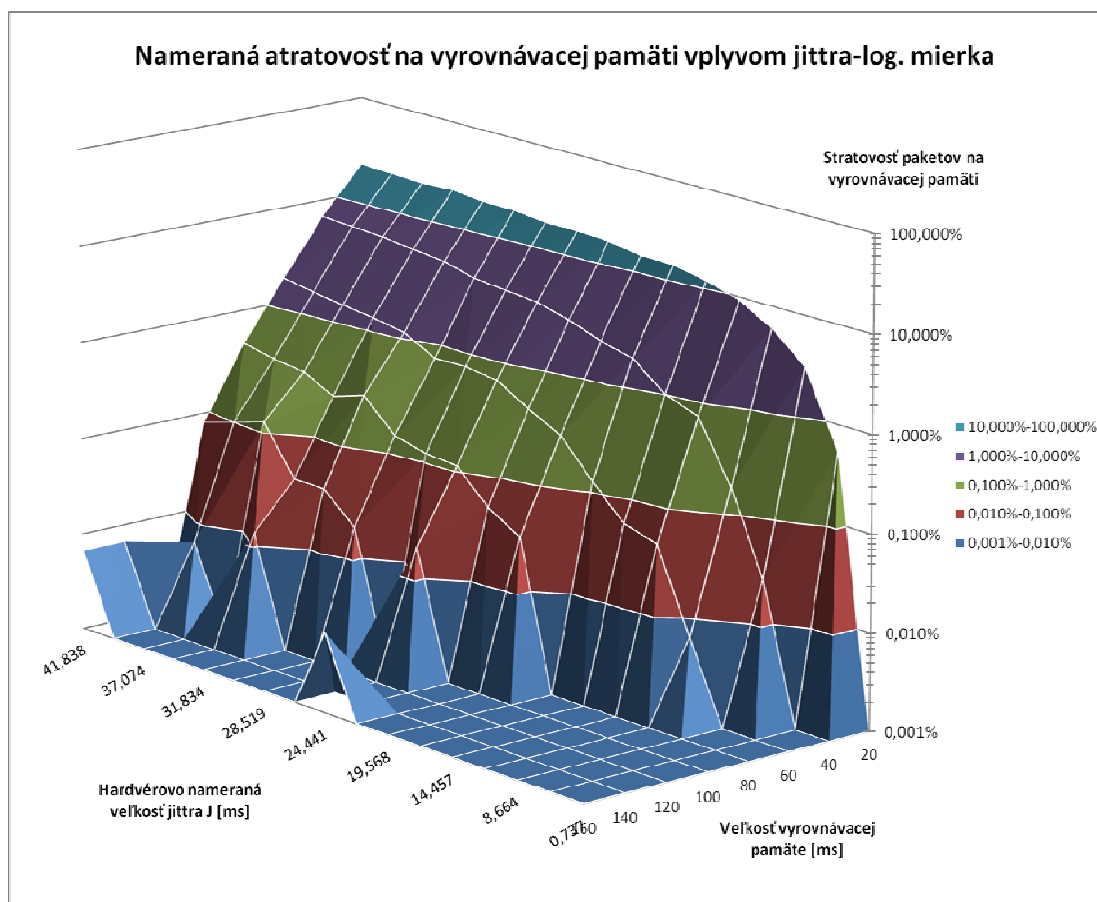
Aby sme mohli nájsť parametre modelu pre odhad stratovosti paketov na vyrovnávacej pamäti vplyvom jitra, musíme realizovať merania reálnej stratovosti na vyrovnávacej pamäti kodeku v závislosti od jej veľkosti a veľkosti jitra. Toto meranie je realizované v rámci druhej tézy. Na základe merania stratovosti hľadáme parametre modelu a to σ = parameter mierky (scale), ξ = parameter tvaru (shape) a μ je parameter polohy (location). Nás zaujíma relatívna poloha času doručenia paketu vo vyrovnávacej pamäti tak, ako to znázorňuje obrázok 6.1, je možné dosadiť parameter $\mu = 0$.

Pre meranie stratovosti sme vygenerovali sadu vždy 10000 náhodných hodnôt Paretoho rozdelenia s parametrami tvaru a polohy určenými podľa našich doterajších výsledkov prác [22], [23], [24] a [25], ktoré dobre predstavovali stochastickú long-tailed prevádzku na internete. Hodnoty kolísania oneskorenia (parameter sigma rozdelenia) sme krokovali v hodnotách 1, 5, 10, 15 ... 80 ms s krokom 5 ms tak, ako to uvádza tabuľka 9.1 nižšie. Pre každú sadu sme následne hardvérovo odmerali zodpovedajúce kolísanie oneskorenia podľa RFC 3550 na IXIA XM 2. Prejavom kolísania oneskorenia je následne aj odhadované nenulové priemerné oneskorenie koncovým zariadením. Pre následné simulácie a merania kvality hlasu pomocou PESQ sme použili hodnoty sigma modelu jitra 1, 10, 20, 30, 40, 50 a 60. V praxi zodpovedá hodnota $\sigma = 60$ kolísaniu oneskorenia až vyše 41, čo reálne predstavuje takmer nepoužiteľnú a nespoľahlivú neakceptovateľnú sieť. E-Model ITU-T pripúšťa celkovú stratovosť do 2 %, čo je možné veľmi ľahko dosiahnuť nevhodným dimenzovaním pamäte aj za predpokladu, že je stratovosť siete samotnej nulová.

Tab. 5.1 Nameraná stratovosť na vyrovnávacej pamäti pod vplyvom jitra pomocou IxChariot

		Veľkosť vyrovnávacej pamäte (buffer) [ms]							
		20	40	60	80	100	120	140	160
Hardvérovo odmerané kolísanie oneskorenia (jitter) na XM2 [ms]	0,737	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	4,701	0,533%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	8,664	3,060%	0,027%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	11,561	6,053%	0,180%	0,007%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	14,457	9,320%	0,753%	0,047%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	17,013	11,800%	1,007%	0,060%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	19,568	13,900%	1,880%	0,127%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	22,005	14,033%	2,267%	0,300%	0,033%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	24,441	15,993%	2,987%	0,447%	0,053%	0,000%	0,000%	0,000%	0,007%
	26,480	16,493%	3,687%	0,707%	0,113%	0,020%	0,000%	0,000%	0,000%
	28,519	16,600%	3,953%	0,780%	0,120%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
	24,260	17,947%	4,267%	0,760%	0,147%	0,020%	0,000%	0,000%	0,000%
	31,834	18,147%	5,160%	1,133%	0,307%	0,040%	0,000%	0,000%	0,000%
	34,692	19,560%	5,593%	1,307%	0,240%	0,040%	0,013%	0,000%	0,000%
	37,074	18,787%	6,127%	1,433%	0,347%	0,127%	0,000%	0,000%	0,000%
	39,456	19,373%	6,413%	1,580%	0,380%	0,100%	0,007%	0,000%	0,000%
41,838	19,993%	6,727%	1,800%	0,447%	0,080%	0,000%	0,007%	0,007%	

Obrázok 5.1 znázorňuje funkciu priebehu stratovosti na vyrovnávacej pamäti v závislosti od jej veľkosti a veľkosti hardvérovo odmeraného kolísania oneskorenia v logaritmickej mierke osi Z. Priebeh funkcie je možné normalizovať na jednotku dĺžky paketu.



Obr. 5.1 Nameraná stratovosť na vyrovnávacej pamäti v závislosti od jej veľkosti a hardvérovo odmeraného kolísania oneskorenia v logaritmickej mierke

5.2 Meranie kvality prenosu VoIP pomocou vybraných metód

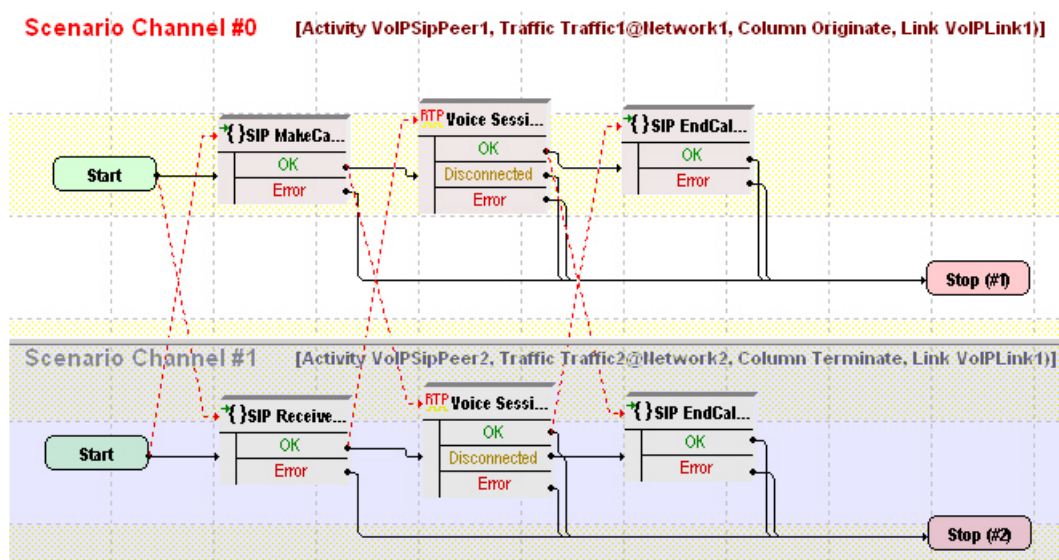
Po odmeraní stratovosti na vyrovnávacích pamätiach prichádza rad na odmeranie hodnotenia kvality referenčným PESQ modelom podľa ITU-T P.862 [17] a E-modelom podľa ITU-T G.107 [15] v závislosti od prítomnosti kolísania oneskorenia a veľkosti vyrovnávacej pamäte. Merania boli z dôvodu vyžadovanej presnosti realizované na hardvérovej platforme Ixia XM2 v spojení so samostatným vyhradeným počítačom na emuláciu WAN siete s nainštalovaným softvérom NetDisturb. Ixia XM2 je hardvérové zariadenie – platforma – umožňujúca generovanie prevádzky, dátových tokov a ich analýzu a zbieranie štatistik. V zariadení boli inštalované dva moduly:

- Karta so sieťovými rozhraniami 4 x 1 Gbit Ethernet XMV4;
- Karta s modulom analyzátora PESQ;

Softvérová základňa bola klientská aplikácia na počítači slúžiacom ako konzola a dátové úložisko. Hlavná aplikácia Aptixia IxLoad verzie 5.10.151.48 EA bola doplnená IxReporter-om 5.0.0.11 a slúžila na ovládanie serverovej aplikácie zodpovedajúcej verzie na Ixia XM2 testovacom šasi. Testovanie PESQ je následne realizované na 30 paralelne prebiehajúcich hovoroch v dĺžke trvania 1 minúty, teda každá 20 s hlasová sekvencia je

zopakovaná práve trikrát posebe. Testy pozostávajú z 3x zopakovanej sady 30 x 4 = 120 paralelných jednominútových hovorov (30 paralelných hovorov z každej zo štyroch rôznych hlasových sekvencií). Túto časovú súseďnosť možno vidieť na časovej osi na obr. 10.5. Dokopy tak bolo simulovaných a odmeraných 360 minút pre každú kombináciu kodeku, kolísania oneskorenia a veľkosti vyrovnávacej pamäte (spolu 360 x 8 x 7 x 4 = 80640 minút hovorov). Vzorky oneskorenia, kolísania oneskorenia, kvality MOS PESQ a E-modelu sú vzorkované s rozlíšením 2 sekúnd. Priemerné, maximálne a minimálne hodnoty pre jedinečnú kombináciu zo všetkých vzoriek pre každý kodek, veľkosť kolísania oneskorenia a veľkosť vyrovnávacej pamäte sú uvedené v tabuľkách v prílohe C.

Merania sú vykonané pre nulovú stratovosť, sieťové oneskorenie 0 ms (uplatňuje sa len oneskorenie vyvolané veľkosťou vyrovnávacej pamäte, uvádza to tab. 9.1), kolísanie oneskorenia podľa tab. 9.1 a veľkosť vyrovnávacej pamäte pre 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 a 8 paketov (20 – 160 ms pre kodeky s 20 ms paketizáciou a 30 – 240 ms pre 30 ms paketizáciu). Testované kodeky zahŕňajú G.711, G.723 ACELP, G.726 32 kbit/s a G.729.



Obr. 5.2 Detail testovacieho scenára priebehu VoIP spojenia medzi dvoma koncovými bodmi

Odporovali sme očakávanú závislosť kvality MOS PESQ, ktorá klesá s rastúcim kolísaním oneskorenia a veľkosťou vyrovnávacej pamäte. PESQ poskytuje presnejšie a vernejšie výsledky než E-model. E-model nereaguje dostatočne na pokles kvality vplyvom zvýšenej stratovosti na bufferi. Výsledky meraní sme následne využili ako referenčné pre porovnanie výkonnosti a úspešnosti nami navrhovanej úpravy E-modelu, aby sme vedeli posúdiť, či prináša zlepšenie a kvantifikovať, o aké zlepšenie ide.

6 Experimentálne overenie výsledkov a test modelu

V našom predchádzajúcom výskume a prácach [22], [23], [24] a [25] sme navrhli metódu odhadu strát vplyvom kolísania sieťového oneskorenia – jitter – na vyrovnávacích pamätiach na strane prijímača. GPD Paretovo rozdelenie je univerzálne vďaka množstvu parametrov – stupňov voľnosti. Takisto patrí do skupiny tzv „long-tailed“ rozdelení, ktoré sú napríklad podľa prác [7], [10], [40], [42], [43] alebo [44] najvhodnejšie na popis charakteru internetovej prevádzky v IP sieťach so smerovaním a prepínaním paketov. Vzhľadom na predošlé použitie Paretoho rozdelenia v našich prácach na simulovanie vstupného VoIP prúdu paketov [22], [25] sa charakter medzipríchodových intervalov paketov do vyrovnávacej pamäte zachováva aj pre individuálny tok, pre ktorý chceme MOS skóre kvality služby vyčíslieť, čo podporuje aj vlastnosť paretoho rozdelenia uvádzaná v [13]. V nasledujúcom texte sa budeme venovať optimalizácii nasledujúcej rovnice 6.1 vyjadrujúcej stratovosť na vyrovnávacej pamäti P_{LOSS_EST} :

$$P_{LOSS_EST}(x, \xi, \mu, \sigma) = \left[\left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right] \cdot \frac{1}{2} \quad (6.1)$$

Hľadanie vhodnej popisujúcej funkcie a jej optimálnych parametrov bolo realizované metódou „3D curve fitting“ v štatistickom softvéri od Systat. K realizovaným meraniam sme hľadali optimálne parametre $\xi = A$ a exponent = B rovnice 6.1 zovšeobecnenej do nasledujúcej rovnice 6.2.

$$P_{LOSS_EST}(x, A, \mu, \sigma, B) = \frac{1 - \left[1 - \left(1 + \frac{A(x - \mu)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{A}} \right]^B}{2} \quad (6.2)$$

Ako optimalizačnú funkciu sme vzhľadom na exponenciálny charakter Paretoho rozdelenia zvolili nelineárnu metódu optimalizácie „Pearson VII Limit“ s minimalizačnou funkciou f_{min} v tvare danom vzťahom 6.3, kde ε značí reziduálnu chybu:

$$f_{min}(P_{LOSS_EST}) = \sum \ln \sqrt{1 + \varepsilon^2} \quad (6.3)$$

Pre funkciu 11.2 musí platiť podmienka 11.4 ktorá vychádza z úvahy, že pri poprehadzovaní poradia paketov je na vyrovnávacej pamäti prinajhoršom každý druhý paket prijatý v nesprávnom poradí a pamäť sa reinitializuje pri prijíme ďalšieho paketu po takejto prehodenej dvojici, čo sa periodicky opakuje. Maximálnu teoretickú stratovosť na vyrovnávacej pamäti P_{LOSS_EST} , ktorá nastáva keď je kolísanie oneskorenia J rádovo väčšie ako veľkosť pamäte $x \ll \sigma$, je preto možné zapísať ako:

$$\lim_{x/\sigma \rightarrow 0} (P_{LOSS_EST}) = 0,5 \quad (6.4)$$

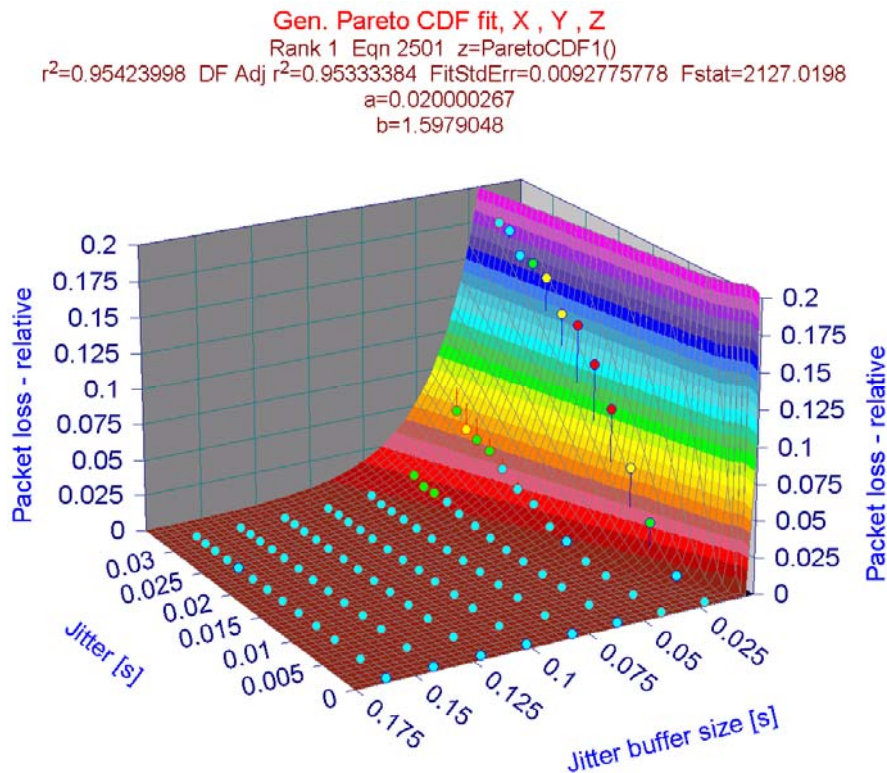
Funkcia 11.2 musí byť definovaná pre všetky prípustné hodnoty $x > 0$ a $\sigma > 0$. Zovšeobecnené Paretovo rozdelenie GPD (Generalized Pareto Distribution) ako funkcia vhodná pre popis javov s veľkými výkyvmi (tzv. „peaks and threshold analysis“), nadobúda tri formy v závislosti od hodnoty parametra tvaru ξ [13]:

- Ak je parameter $k < 0$ (v našich výpočtoch ďalej využívame substitúciu $k = \xi$), rozdelenie GPD sa zmení na Pareto typu II definované podľa rovnice 5.15, ktorého definičný obor je definovaný pre hodnoty parametrov $\mu \leq x \leq \mu - \sigma / \xi$;
- Ak sa parameter tvaru $k = \xi = 0$, GPD degeneruje na exponenciálne rozdelenie;
- Ak $(k = \xi) > 0$, GPD sa transformuje na rozdelenie Beta prvého druhu, pričom definičný obor funkcie je $x > 0$ a $\sigma > 0$.

Pre parametre funkcie 6.2 sme v optimalizačnom behu stanovili nasledujúce podmienky:

- $5 > \xi = A > 0$; $\mu = 0$; $1 \leq B \leq 5$;

Na optimalizáciu a fitovanie sme použili nelineárnu robustnú metódu „Pearson VII Limit“. Podmienkou pre hľadajú funkciu je, že sa stratovosť P_{LOSS_EST} musí blížiť k 0,5 (50%) pre hodnoty kolísania oneskorenia oveľa väčšie ako vyrovnávacia pamäť, t.j. $x \ll \sigma$ a musí byť definovaná pre všetky $x > 0$ a $\sigma > 0$.



Obr. 6.1 Optimalizovaná funkcia odhadu stratovosti na vyrovnávacej pamäti P_{LOSS_EST} pri obmedzení parametra tvaru $\xi > 0$; optimalizované hodnoty parametra tvaru $A = \xi = a$ a korelačného parametra $B = b$.

Optimalizačný beh viedol k funkcii znázornenej na obrázku 6.1 s optimalizovanými hodnotami parametrov $A = 0,020$, $B = 1,598$ (zaokrúhlenými na tri desatinné miesta), pričom v porovnaní s prvým behom došlo k značnému zlepšeniu koeficientu determinancie $R^2 = 0,95423998$. Pre výpočtovú jednoduchosť si dovoľíme zaokrúhliť parametre A a B . Vzhľadom na hodnoty dôjde ku drobnej chybe len pri parametri B . Citlivosť modelu na zmenu hodnoty parametra tvaru na tisícinných miestach je zanedbateľná. Preto pre ďalšie použitie modelu stanovíme $A = 0,02 = 1/50$ a $B = 1,60 = 8/5$.

Test F-štatistiky vychádza $F = 2127,0198$ a $P > F$, pričom pravdepodobnosť je 0,000. Týmto je hypotéza H_0 zamietnutá a prijímame hypotézu H_A , že funkcia dobre popisuje model.

7 Vyhodnotenie výsledkov a záver

Rovnice 7.1 a 7.2 predstavujú už nové navrhnuté hranice, ktoré až na uvedenú hranicu presnosti pri stratovosti blížiacej sa nule vyhovujú v celom rozsahu realizovaných meraní. Všimnime si exponent – parameter tvaru Paretovho rozdelenia, ktorý je pri dolnej hranici rovný 3 a pri hornej hranici rovný 1. V závislosti od charakteru prevádzky na sieti sa preto aj parameter tvaru nami hľadanej optimálnej popisnej funkcie musí nachádzať v intervale $\langle 1,3 \rangle$. Nájdená hodnota parametra tvaru funkcie je 1,6.

$$P_{LOWER_BOUND}(x, A, \sigma) = \frac{1 - \left[1 - \left(1 + \frac{A(x)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{A}} \right]^3}{2} \quad (7.1)$$

$$P_{UPPER_BOUND}(x, A, \sigma) = \frac{1 - \left[1 - \left(1 + \frac{A(x)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{A}} \right]^1}{2} \quad (7.2).$$

Vzorec pre hornú hranicu je možné zjednodušiť úpravou na tvar 12.3 nasledovne:

$$P_{UPPER_BOUND}(x, A, \sigma) = \frac{\left(1 + \frac{A(x)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{A}}}{2} \quad (7.3).$$

Ako sme už ukázali v našich predchádzajúcich prácach [22], [23], [24], [25], a takisto ako naznačujú zistenia mnohých štúdií, za ktoré spomenieme aspoň niektoré [2], [7], [8], [68] a [26], distribučná funkcia časového oneskorenia (delay) a rozdielov časov doručania paketov (interarrival times) v IP sieťach a na sieti Internet má tvar modelovateľný najlepšie pomocou tzv. „long-tailed“ rozdelení s dlhodobou závislosťou (LRD).

Pri hľadaní vhodnej popisnej funkcie stratovosti na vyrovnávacej pamäti v kapitole 12 sme brali do úvahy aj jednoduchosť numerického výpočtu s minimalizovanou chybou, pričom sme si stanovili, že hľadané parametre majú byť po aproximácii vhodne zaokrúhlené na blízke racionálne číslo s čo najjednoduchším vyjadrením v tvare p/q . Po procese hľadania optimálnych parametrov funkcie a zaokrúhlení môžeme výslednú funkciu popisujúcu odhad stratovosti na vyrovnávacej pamäti „jitter buffer-a“ zapísať v tvare vzťahu 7.4:

$$P_{LOSS_EST}(x, \sigma) = \frac{\left[\left(1 + \frac{x}{50\sigma} \right)^{-50} \right]^{8/5}}{2} \quad (7.4),$$

kde σ je parameter mierky (scale), zhodný so vstupom, je namerané kolísanie oneskorenia na koncovom zariadení podľa RFC 3550 v sekundách a $x = T_{buff}$ = veľkosť vyrovnávacej pamäte na strane príjemcu v sekundách. Výstupom je pravdepodobnosť straty v intervale $\langle 0;0,5 \rangle$.

Efektívna stratovosť paketov po prechode sieťou a vyrovnávacou pamäťou sa vypočíta kaskádovo podľa už uvedenej rovnice 9.3 ako súčin priepustností siete a vyrovnávacej pamäte. Rovnica 7.5 je po úpravách finálnym vzorcom pre navrhovanú zmenu E-modelu a výpočtu efektívneho faktora degradácie I_{e-eff} tak, aby zahŕňal dva nové vstupné parametre, a to veľkosť vyrovnávacej pamäte a veľkosť kolísania oneskorenia (jitter) prostredníctvom efektívnej stratovosti na vyrovnávacej pamäti (buffer) P_{plef} .

$$\begin{aligned}
 I_{e-eff} &= I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{plef}}{\frac{P_{plef}}{BurstR} + B_{pl}} \\
 &= I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl} + P_{LOSS_EST} - P_{pl} \cdot P_{LOSS_EST}}{\frac{P_{pl} + P_{LOSS_EST} - P_{pl} \cdot P_{LOSS_EST}}{BurstR} + B_{pl}} \\
 I_{e-eff} &= I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl} + \frac{\left[\left(I + \frac{x}{50\sigma} \right)^{-50} \right]^{8/5}}{2} - P_{pl} \cdot \frac{\left[\left(I + \frac{x}{50\sigma} \right)^{-50} \right]^{8/5}}{2}}{\frac{P_{pl} + \frac{\left[\left(I + \frac{x}{50\sigma} \right)^{-50} \right]^{8/5}}{2} - P_{pl} \cdot \frac{\left[\left(I + \frac{x}{50\sigma} \right)^{-50} \right]^{8/5}}{2}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (12.5).
 \end{aligned}$$

Navrhovanými zmenami výpočtu degradačného faktora I_{e-eff} E-modelu sme dosiahli zlepšenie a presnenie výpočtu odhadu MOS skóre a posunuli ho z príliš optimistického na menej optimistickjší a miestami pesimistickjší odhad kvality MOS v porovnaní s PESQ.

Tabuľka 7.1 obsahuje stručnú sumarizáciu výsledkov porovnania modelu pred úpravami a modelu po úpravách v porovnaní s PESQ ako referenčným modelom. Relatívne zhoršenie odhadu u približne tretiny je vo väčšine prípadov len zmena na treťom desatinnom mieste smerom k negatívnemu odhadu, kde model predpovedá minimálnu ale nenulovú stratovosť (rádovo pod 0,1%). Celkový ukazovateľ reziduálnej chybovosti odhadu sa pre novo navrhovaný model značne znížil a preto je možné model považovať za prínos využitelný v technickej praxi.

Tab. 7.1 Nameraná stratovosť na vyrovnávacej pamäti pod vplyvom kolísania oneskorenia pomocou IxChariot

Zo 105 modelovaných prípadov	Percentuálne vyjadrenie
zlepšenie - 53	50,5%
bez zmeny - 15	14,3%
zhoršenie - 37	35,2%

Variancia výsledkov predpovede MOS E-modelu pre kodek G.711a poklesla z pôvodných 0,187 na 0,08 MOS skóre, pre kodek G.726 32 kbit/s z pôvodných 0,197 na 0,124 a u kodeku G.729A z pôvodných 0,183 na súčasných 0,143 MOS kategórie.

8 Prínos dizertačnej práce pre prax a rozvoj vednej disciplíny

Dizertačná práca sa zaoberala analýzou súčasného stavu problematiky závislosti, vplyvu sieťových parametrov, merania a odhadu kvality VoIP spojení v reálnom čase. Účelom bolo navrhnuť modely a modifikácie existujúcich modelov na využitie pre dohľad nad VoIP sieťami a kvalitou digitálnych IP hlasových služieb (IP telefónov).

Prínos našej práce pre vedu predstavujú:

- analýza možností využitia Paretových rozdelení pre modelovanie IP prevádzky;
- návrh systému hromadnej obsluhy pre popis vyrovnávacej pamäte Pareto/D/1/K;
- matematické odvodenie možného vplyvu kolísania oneskorenia na stratovosť vyrovnávacej pamäte s konečnou dĺžkou v systéme Pareto/D/1/K;

Prínosy našej práce pre prax zahŕňajú:

- simulácia, modelovanie stratovosti a aproximácia správania sa vyrovnávacej pamäte (buffer) na vstupe VoIP terminálu s konečnou dĺžkou v prítomnosti kolísania sieťového oneskorenia (jitter);
- praktické overenie správania sa vyrovnávacej pamäte meraniami efektívnej stratovosti na vyrovnávacej pamäti;
- úprava odporúčania ITU-T G.107 pre odhad a meranie kvality služby QoS vo VoIP telefónii - E-model. E-model sme rozšírili o dva vstupné parametre (kolísanie oneskorenia a veľkosť vyrovnávacej pamäte) tak, aby do odhadu kvality bol zahrnutý aj vplyv vyrovnávacej pamäte na vstupe VoIP terminálu (IP telefónu) a kolísania oneskorenia na sieti (jitter);
- odmeranie referenčných hodnôt hodnotenia skóre kvality MOS pomocou metódy PESQ pre rôzne hodnoty kolísania oneskorenia (jitter) a veľkosti vyrovnávacej pamäte (buffer);
- optimalizácia výsledkov upraveného E-modelu tak, aby bol odhad MOS skóre E-modelu výpočtovo nenáročný a pritom spresnený oproti pôvodnej ITU-T G.107 implementácii. E-model po úprave podáva vernejšie výsledky blížiac sa výsledkom výpočtovo omnoho náročnejšej intruzívnej metódy PESQ považovanej za referenčnú.

9 Zoznam použitej literatúry

- [1.] AKAR, N., ARIKAN, E.: A numerically efficient method for the MAP/D/1/K queue via rational approximations. *Queueing systems*, 1996, 22.1: 97-120.
- [2.] CAO, J., CLEVELAND, W. S., SUN, D. X.: Bandwidth estimation for best-effort internet traffic. *Statistical Science*, 2004, 518-543.
- [3.] CAO, J., CLEVELAND, W., SUN, D.: Bandwidth estimation for best-effort Internet traffic. *Statistical Science*, Vol. 19, Number 3 (2004), p. 518-543.
- [4.] CAO, J., RAMANAN, K.: A Poisson limit for buffer overflow probabilities, INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE , vol.2, no., pp. 994- 1003 vol.2, 2002 doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019347
- [5.] CLEGG, R. G.: A Practical Guide to Measuring the Hurst Parameter. Department of Mathematics, University of York, YO10 5DD, UK Performance Engineering Workshop, July 2005.
- [6.] COTANIS, I.: Moving from PESQ to POLQA: The Next-Generation Mobile Voice Quality Testing Standard. ASCOM 2011.
- [7.] CROVELLA, M. E., BESTAVROS, A.: Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, No. 6, December 1997
- [8.] DANG, T.D.,SONKOLY, B., MOLNÁR, S.: Fractal analysis and modeling of VoIP traffic, Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. NETWORKS 2004, 11th International , vol., no., pp. 123- 130, 13-16 June 2004.
- [9.] ESTRADA, L., TORRES, D., TORAL, H.: Characterization and Modeling of Packet Loss of a VoIP Communication, In: World Academy of Science, Engineering and Technology 66 2010, pp. 926 – 930, 2010
- [10.] GREINER, M., JOBMANN, M., LIPSKY, L.: The importance of power-tail distributions for modeling queueing systems. *Operations Research*, 1999, 47.2: 313-326.
- [11.] HEFFES, H., LUCANTONI, D. M.: A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, SAC: p. 856–868, september 1986.
- [12.] HUERLIMANN, W.: From the General Affine Transform Family to a Pareto Type IV Model. In: *Journal of Probability and Statistics*, Volume 2009, Article ID 364901, Hindawi Publishing Corporation 2009.
- [13.] CHOTIAPANICH, D., ARNOLD, B. C.: Pareto and Generalized Pareto Distributions. In: *Modelling Income Distributions and Lorenz Curves: Economic Studies in Inequality, Social Exclusion and Well-Being*, Volume 5, Springer, 2008, DOI: 10.1007/978-0-387-72796-7
- [14.] ITU-T, Recommendation ITU-T G.107 (2006), Amendment 1, Provisional Impairment Factor Framework for Wideband Speech Transmission, ITU-T Recommendation G.107, ITU-T. Geneva, Switzerland: June 2006.
- [15.] ITU-T, Recommendation ITU-T G.107 (2012, v 8.1), The E-model, a computational model for use in transmission planning, ITU-T Recommendation G.107, ITU-T. Geneva, Switzerland: 2012.

- [16.] ITU-T, Recommendation ITU-T G.109 (1999), Definition of categories of speech transmission quality, ITU-T Recommendation G.109, ITU-T. Geneva, Switzerland: September 1999. Dostupné na internete <<http://web.itu.int/rec/T-REC-G.109>>
- [17.] ITU-T, Recommendation ITU-T P.862 (2001), Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. Dostupné na internete <<http://web.itu.int/rec/T-REC-P.862>>
- [18.] KARAM, M. J., TOBAGI, F. A.: Analysis of the delay and jitter of voice traffic over the internet. In: INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. IEEE, 2001. p. 824-833.
- [19.] KASAHARA, S.: Blocking Behavior of Queueing System with Finite Buffer and Pseudo Self-similar Input. Parameters, 2000, 2: 2.
- [20.] KASAHARA, S.: Internet traffic modeling: Markovian approach to self-similar traffic and prediction of loss probability for finite queues. IEICE transactions on communications, 2001, 84.8: 2134-2141.
- [21.] KOH, Y., KISEON K.: Loss probability behavior of Pareto/M/1/K queue. In: Communications Letters, IEEE, vol.7, no.1, p. 39-41, January 2003. DOI: 10.1109/LCOMM.2002.806469
- [22.] KOVAC, A., HALAS, M., ORGON, M., VOZNAK, M.: E-model MOS Estimate Improvement through Jitter Buffer Packet Loss Modelling, In Journal Advances in Electrical and Electronic Engineering , Volume 9, Number 5, December 2011, pp. 233-242, ISSN: 1336-1376.
- [23.] KOVAC, A., HALAS, M., ORGON, M.: Determining Buffer Behaviour under Different Traffic Conditions as MMPP/D/1/K System. In RTT 2011. Research in Telecommun Technology: 13th Int Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. Brno: University of Technology, 2011, s. 143--147. ISBN 978-80-214-4283-2.
- [24.] KOVAC, A., HALAS, M., VOZNAK, M.: Impact of Jitter on Speech Quality Estimation in Modified E-Model. In: RTT 2010. Research in Telecommunication Technology: 12th International Conference. Velke Losiny, Czech Republic, 8.-10.9.2009.: Technical University of Ostrava, Ostrava (2010), ISBN 978-80-248-2261-7. - CD-Rom.
- [25.] KOVAC, A., HALAS, M.: Analysis of Influence of Network Performance Parameters on VoIP Call Quality. In Proc. Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010, Ostrava, pp 26-30.
- [26.] KRATZ, M., RESNICK, S. I.: The QQ-estimator and heavy tails. Stochastic Models, 1996, 12.4: 699-724.
- [27.] LEWCIO, B. et al.: E-model supported switching between narrowband and wideband speech quality, Quality of Multimedia Experience, 2009. QoMEX 2009. International Workshop, p. 98-103, 29-31 July 2009. DOI: 10.1109/QOMEX.2009.5246970
- [28.] LI, H., MASON, L.: Estimation and simulation of network delay traces for voip in service overlay network. In: Signals, Systems and Electronics, 2007. ISSSE'07. International Symposium on. IEEE, 2007. p. 423-425.
- [29.] MALFAIT, L., GRAY, P., REED, M. J.: Objective listening quality assessment of speech communication systems introducing continuously varying delay (time-warping): A time alignment issue. In: Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008. p. 4213-4216.

- [30.] MIRTICHEV, S., GOLEVA, R.: Evaluation of Pareto/D/1/K Queue by Simulation. In: International Book Series "Information Science and Computing". Technical University of Sofia. Sofia, Bulgaria: jún 2008.
- [31.] MIRTICHEV, S., STATEV, S.I.: Study Of Queuing Systems With A Generalized Departure Process. In: Serdica, Journal of Computing, vol.2, no.1, pp. 57--72, Sofia (2008)
- [32.] MOELLER, S., et al.: Impairment Factor Framework for Wide-Band Speech Codecs, Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions, vol.14, no.6, p. 1969-1976, Nov. 2006. DOI: 10.1109/TASL.2006.883262
- [33.] MOLLER, S., et al.: Impairment factor framework for wide-band speech codecs. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on, 2006, 14.6: 1969-1976.
- [34.] MORTON, A., et al.: Draft new Recommendation G.1020 (formerly G.IPP): Performance Parameter Definitions for Quality of Speech and other Voiceband Applications Utilising IP Networks, TIA (2003)
- [35.] NADARAJAH, S., KOTZ, S.: On the Laplace transform of the Pareto distribution. Queueing Systems, 2006, 54.4: 243-244.
- [36.] POMY, J.: POLQA - The Next-Generation Mobile Voice Quality Testing Standard. ZNIIS / ITU Workshop, OPTICOM GmbH, Moscow, 27-29 April 2011.
- [37.] RANGO, F. De. et al: Overview on VoIP: Subjective and Objective Measurement Methods, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.6 No.1B, January 2006.
- [38.] RESNICK, S., ROOTZÉN, H.: Self-similar communication models and very heavy tails. Annals of Applied Probability, 2000, 753-778.
- [39.] TAO, T., LU, J., GONG, K., GU, J.: A four-states Markov model for burst error analysis in satellite communications. International Conference on Communication Technology .Vol. 1, pp. 930-934, August 2000.
- [40.] TORAL, H., TORRES, D., HERNANDEZ, C., ESTRADA, L.: Self-Similarity, Packet Loss, Jitter, and Packet Size: Empirical Relationships for VoIP. In: Electronics, Communications and Computers, 2008. CONIELECOMP 2008, 18th Int. Conference, vol., no., pp.11-16, 3-5 March 2008
- [41.] WAI-KI, Ch., NG, M. K.: Markov Chains: Models, Algorithms and Applications. Springer, 2006.
- [42.] ZHANG, W., HE, J.: Modeling end-to-end delay using pareto distribution. In: Internet Monitoring and Protection, 2007. ICIMP 2007. Second International Conference on. IEEE, 2007. p. 21-21.
- [43.] ZHANG, W., HE, J.: Statistical Modeling and Correlation Analysis of End-to-End Delay in Wide Area Networks. In: Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing: IEEE, 2007.
- [44.] ZHENG, L., ZHANG, L., XU D.: Characteristics of network delay and delay jitter and its effect on voice over IP (VoIP). In: Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on. IEEE, 2001. p. 122-126.

Získané doplňujúce vzdelanie a certifikáty

- VEGA 1/0106/11 „Analýza a návrh pokročilých optických prístupových sietí v konvergovanej infraštruktúre NGN využívajúcich pevné prenosové médiá pre podporu multimediálnych služieb“;
- 2013 – ITSM Systém manažérstva informačných technológií ISO/IEC 20000, certifikát interného audítora podľa ISO/IEC 20000, TÜV NORD,
- 2012 – ISMS Systém manažérstva informačnej bezpečnosti ISO/IEC 27001, certifikát interného audítora podľa ISO/IEC 27001, TÜV NORD, Licence Accreditation 319/2010/35/5, protocol no. 011/2012;
- 2012 – Osvedčenie o odbornej spôsobilosti v elektrotechnike podľa zákona č. 124/2006 z.z., Elektrotechnik §21, Bezpečnosť elektrických zariadení;
- 2010 – CAE – certifikát Cambridge certificate in Advanced English, A grade;

Účasť autora na výskumných projektoch

- VEGA 1/0106/11 „Analýza a návrh pokročilých optických prístupových sietí v konvergovanej infraštruktúre NGN využívajúcich pevné prenosové médiá pre podporu multimediálnych služieb“;
- ITMS 26240120029, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja;
- VEGA 1/0186/12 (Modelovanie parametrov multimediálnej prevádzky v IMS sieťach).
- PAMKVIS „Predikcia, modelovanie a zabezpečenie kvality VoIP hlasových služieb“, projekt v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov STU.

Pedagogická činnosť autora

- Cvičiaci a vedúci cvičení predmetu „Bezpečnosť komunikačných sietí a služieb (BKSS)“ v ak. rokoch 2010/2011, 2011/2012 a 2012/2013;
- Cvičiaci predmetu „Komunikačné protokoly“ v ak. roku 2010/2011.

Ostatné významné aktivity

- Tajomník na inžinierskych štátnych skúškach na Ústave telekomunikácií FEI STU Bratislava v ak. rokoch 2010/2011 a 2011/2012;
- Tajomník a člen komisie na bakalárskych štátnych skúškach na Ústave telekomunikácií FEI STU Bratislava v ak. rokoch 2010/2011 a 2011/2012;

Zahraničné stáže

- Pracovná stáž Erasmus v období marec – jún 2012 na Katedre telekomunikácií VŠB TUO Ostrava pod vedením doc. Ing. Miroslava Vozňáka, Ph.D.

Zoznam publikácií autora

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

ADE1 Kováč, Adrián - Halás, Michal - Orgoň, Miloš - Vozňák, Miroslav: E-Model MOS Estimate Improvement through Jitter Buffer Packet Loss Modelling. In: *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. - ISSN 1336-1376. - Vol. 9, No.5 (2011), s. 233-242 [jazyk: angličtina]

Ohlasy(2):

[o3] x2012 Chromý, Erik - Weber, Matúš - Behúl, Tomáš: Admission Control Methods and Quality of Service. In: *Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012*. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 36-40.

[o3] x2012 Chromý, Erik - Mišuth, Tibor: Application of Erlang Formulas in Contact Center Environment. In: *Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012*. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 27-30.

ADE2 Kováč, Adrián - Halás, Michal: E-Model MOS Estimate Precision Improvement and Modelling of Jitter Effects.

In: *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. - Zilina : Žilinská univerzita. - ISSN 1336-1376. - Vol. 10, No. 4. - , 2012, s. 276-281 [jazyk: angličtina]

ADE3 Kováč, Adrián - Orgoň, Miloš: Forezná analýza a bezpečnosť mobilných telefónov. In: *Data Security Management*. - ISSN 1211-8737. - Roč. 15, č. 4 (2011), s. 14-17 [jazyk: slovenčina]

ADE4 Kováč, Adrián - Halás, Michal - Orgoň, Miloš: Influence of Jitter and Buffer Size on E-model MOS Estimate Modeled Using Pareto/D/1/K and MMPP/D/1/K System. In: *Elektrorevue [elektronický zdroj]*. - ISSN 1213-1539. - Vol. 3, No. 4 (2012), online [jazyk: angličtina]

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

ADF1 Kováč, Adrián - Halás, Michal: Analýza vplyvu QOS parametrov paketovej prenosovej siete na kvalitu VOIP hovoru.

In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 16, mimoriadne č. : ELOSYS. Trenčín, 5.-8.10.2010 (2010), s. 86-90 [jazyk: slovenčina]

ADF2 Kováč, Adrián - Halás, Michal: Hodnotenie kvality hlasových služieb VOIP technológie. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 14, mimoriadne číslo (2008), s. 290-294 [jazyk: slovenčina]

ADF3 Orgoň, Miloš - Kováč, Adrián: Bezpečnosť sietí IMS. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 3 (2012), s. 24-28 [jazyk: slovenčina]

ADF4 Orgoň, Miloš - Kováč, Adrián: Bezpečnosť sietí NGN. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 1 (2012), s. 24-27 [jazyk: slovenčina]

ADF5 Orgoň, Miloš [50%] - Kováč, Adrián [50%]: Bezpečnosť v sieťach A-IMS. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 6 (2012), s. 14-17 [jazyk: slovenčina]

ADF6 Orgoň, Miloš - Kováč, Adrián: Bezpečnostné mechanizmy v sieťach NGN a riešenie

bezpečnosti v dôveryhodnej a nedôveryhodnej zóne.
In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 2
(2012), s. 26-32 [jazyk: slovenčina]

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC1 Halás, Michal - Kováč, Adrián - Orgoň, Miloš - Bešťák, Ivan: Computationally Efficient E-Model Improvement of MOS Estimate Including Jitter and Buffer Losses. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2012 : 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic, July 3-4, 2012. - Brno : VUT v Brně, 2012. - ISBN 978-1-4673-1116-8. - S. 86-90 [jazyk: angličtina]
- AFC2 Halás, Michal - Javorček, Ľuboš - Kováč, Adrián: Impact of SRTP Protocol on VoIP Call Quality. In: Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 13-15 [jazyk: angličtina]
- AFC3 Halás, Michal [50%] - Kováč, Adrián [50%]: Improvement of E-Model MOS Estimation. In: Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 1-5 [jazyk: angličtina]
- AFC4 Halás, Michal - Bešťák, Ivan - Orgoň, Miloš - Kováč, Adrián: Performance Measurement of Encryption Algorithms and their Effect on Real Running in PLC Networks. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2012: 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic, July 3-4, 2012. - Brno : VUT v Brně, 2012. - ISBN 978-1-4673-1116-8. - S. 161-164 [jazyk: angličtina]
- AFC5 Kováč, Adrián - Halás, Michal: Analysis of Influence of Network Performance Parameters on VoIP Call Quality. In: Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010 : Czech Republic, Ostrava-Poruba, 2010. - Ostrava : Technical University of Ostrava, 2010. - ISBN 978-80-248-2330-0. - S. 26-30 [jazyk: angličtina]

Ohlasy(4):

[o3] x2012 Chromý, Erik - Weber, Matúš - Behúl, Tomáš: Admission Control Methods and Quality of Service. In: Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 36-40.

[o3] x2012 Chromý, Erik - Mišuth, Tibor: Application of Erlang Formulas in Contact Center Environment. In: Workshop Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic (KTTO 2012) : 12th International Conference. Malenovice, Czech Republic, November 14-16, 2012. - Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2012. - ISBN 978-80-248-2810-7. - S. 27-30.

[o3] x2012 Mišuth, Tibor - Baroňák, Ivan: Application of M/G/1/K Model for Aggregated VoIP Traffic Packet Loss Estimation. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2012 : 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic, July 3-4, 2012. - Brno : VUT v Brně, 2012. - ISBN 978-1-4673-1116-8. - S. 42-46.

[o3] x2012 Mišuth, Tibor - Baroňák, Ivan: Application of M/G/1/K Model for Aggregated VoIP Traffic Packet Loss Estimation. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-

2012 : 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic, July 3-4, 2012. - Brno : VUT v Brně, 2012. - ISBN 978-1-4673-1116-8. - S. 42-46.

- AFC6 Kováč, Adrián - Halás, Michal - Orgoň, Miloš: Determining Buffer Behaviour under Different Traffic Conditions as MMPP/D/1/K System. In: RTT 2011. Research in Telecommunication Technology : 13th International Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. - Brno : University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-214-4283-2. - S. 143-147 [jazyk: angličtina]
- AFC7 Murín, Ján - Taraba, Juraj - Kováč, Adrián - Orgoň, Miloš [25%]: Data Connection Security in Mobile Environment. In: RTT 2011. Research in Telecommunication Technology : 13th International Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. - Brno : University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-214-4283-2. - II-28-32 [jazyk: angličtina]
- AFC8 Orgoň, Miloš - Bešťák, Ivan - Halás, Michal - Kováč, Adrián: Finding the Best Encryption Algorithms for PLC Technology. In: Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2011 : Szczyrk, Poland, June 22-24, 2011. - Ostrava : Technical University of Ostrava, 2011. - ISBN 978-80-248-2399-7. - S. 152-156 [jazyk: angličtina]
- AFC9 Partila, Pavol - Voznak, Miroslav - Kováč, Adrián - Halás, Michal: Impact of Emotions on Fundamental Speech Signal Frequency. In: Latest Trends in Information Technology : Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Information Technology and Computer Networks (ITCN'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Cloud Computing (CLC'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Programming Languages and Compilers (PRLC'12); Vienna, Austria, 10-12 November 2012. - : WSEAS Press, 2012. - ISBN 978-1-61804-134-0. - S. 409-414 [jazyk: angličtina]
- AFC10 Partila, Pavol - Voznak, Miroslav - Kováč, Adrián - Halás, Michal: Impact of Network Jitter of Effective Equipment Impairment Factor. In: Latest Trends in Information Technology : Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Information Technology and Computer Networks (ITCN'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Cloud Computing (CLC'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Programming Languages and Compilers (PRLC'12); Vienna, Austria, 10-12 November 2012. - : WSEAS Press, 2012. - ISBN 978-1-61804-134-0. - S. 415-419 [jazyk: angličtina]
- AFC11 Tisovský, Adam - Kováč, Adrián - Baroňák, Ivan: IPsec Performance Dependency from the Ingress Flow Rate. In: RTT 2011. Research in Telecommunication Technology : 13th International Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. - Brno : University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-214-4283-2. - S. 157-161
- AFC12 Vozňák, Miroslav - Kováč, Adrián - Halás, Michal: Effective Packet Loss Estimation on VoIP Jitter Buffer. In: NETWORKING 2012 : International IFIP TC 6 Workshops. Prague, Czech Republic, May 25, 2012. - Heidelberg : Springer, 2012. - ISBN 978-3-642-30039-4. - S. 157-162 [jazyk: angličtina]
- AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách
- AFD1 Kováč, Adrián - Babic, Dominik - Ľupták, Andrej - Labuda, Ivan - Voleník, Marek - Vido, Patrik - Orgoň, Miloš: Bezpečnosť sietí a služieb - výučbový modul. In: ŠVOČ 2009 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 29.4.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3094-5. - CD-Rom [jazyk: slovenčina]

BAB Odborné knižné práce vydané v domácich vydavateľstvách

BAB1 Bohuš, Ján - Ďordža, Milan - Ďuračková, Kristína - Halásová, Zuzana - Horský, Roman - Hrnčiar, Martin - Hrubý, Dušan - Jakubíková, Daniela - Kováč, Adrián - et al.: Green IT. Príručka manažéra. - Bratislava : E International Slovakia, s.r.o., 2010. - 398 s. - ISBN 978-80-969747-4-0 [jazyk: slovenčina]

BEE Odborné práce v zahraničných nerecenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEE1 Neduchal, Lukáš - Kováč, Adrián: Mobilné technológie v podnikovom prostredí. In: Bezpečnosť IT : Odborná konferencia " Mobile IT ve firemním prostředí". Praha, 12.-13.6.2012. - Prague : Institut for International Research, 2012. - USB [19] s. [jazyk: slovenčina]

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch indexovaných v databáze SCOPUS

ADM1 Partila, Pavol [25%] – Kováč, Adrián [25%] - Vozňák, Miroslav [25%] – Halás Michal [25%]: *Jitter Buffer Loss Estimate for Effective Equipment Impairment Factor*

In: *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Issue 3, Volume 7, pp. 241-248, 2013, ISSN 1998-0159, North Atlantic University Union 2013*

Resumé

Práca sa zaoberá problematikou merania a vyhodnocovania kvality prenosu hlasu a poskytovaných služieb prostredníctvom technológie VoIP v prostredí IP sietí; modelovaním IP a VoIP prevádzky pomocou Paretovho pravdepodobnostného rozdelenia; modelovaním a meraním stratovosti vznikajúcej vplyvom kolísania oneskorenia (jitter) na vyrovnávacích pamätiach (buffers) na strane príjemcu (IP terminál) a nakoniec úpravou E-modelu ITU-T G.107 v.8.1. Teoretická rozprava, matematické modely a analýzy sú podložené praktickými meraniami prevádzkových parametrov (oneskorenie, kolísanie oneskorenia, stratovosť), stratovosti na vyrovnávacej pamäti a hodnotenia kvality hlasu MOS modelmi PESQ, E-modelom a nami vytvoreným upraveným E-modelom. Narhovaný model je optimalizovaný z hľadiska výpočtovej náročnosti a je užitočný pri dohľade nad sieťou a manažmentom kvality poskytovaných služieb.

Ciele práce sú zhrnuté v tézach a v stručnosti predstavujú: vytvorenie matematického modelu správania sa vyrovnávacích pamätí za účelom sledovania kolísania sieťového oneskorenia; návrh metódy výpočtu efektívnej stratovosti paketov VoIP spojenia v dôsledku prítomnosti kolísania sieťového oneskorenia; a modifikáciu E-modelu ITU-T G.107 tak, aby výpočet predpokladanej kvality VoIP hovoru MOS zohľadňoval aj kolísanie sieťového oneskorenia a vplyv vyrovnávacej pamäte na jeho kompenzáciu.

Resume

This thesis deals with measurement and quality assessment of voice transmission and related services through VoIP technology via IP networks; modeling of IP network traffic using Pareto distribution functions; modelling and measurement of packet loss occurring on jitter buffers on receiving side (IP terminals) under the influence of network jitter and at last with modification of an existing E-model ITU-T G.107 in its most up-to-date version v. 8.1. Theoretical treatise, mathematical models and analyses are supported by practical measurements of operational parameters of IP networks (delay, packet loss, jitter), packet loss due to packet dropping on input jitter buffer and voice quality assessment of MOS using PESQ, E-model and our proposed modified E-model. Proposed mode is computationally optimized and is applicable in network oversight and management of quality of VoIP services.

Aims of our work were described in theses and in short they represent: an elaboration of a mathematical model of behaviour of jitter buffers under varying network delay conditions (jitter); proposal of method for calculating effective packet loss of VoIP packets occurring on jitter buffers due to jitter; and a modification of an existing ITU-T G.107 E-model so that the estimate of MOS call quality would also account for jitter and jitter buffer size for its compensation as additional input parameters.