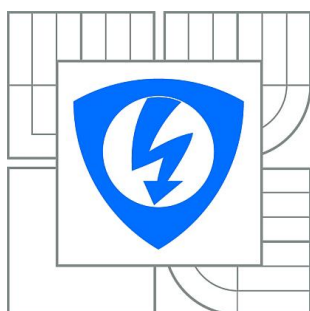


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MERANIE VPLYVU NEŽIADÚCICH JAVOV V IP SIETI NA KVALITU VOIP HOVORU

MEASUREMENT OF INFLUENCE OF NETWORK IMPAIRMENTS ON VOIP CALL QUALITY

BAKALÁRSKA PRÁCA

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

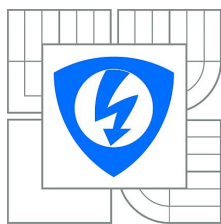
MARTIN ZELENAY

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠILHAVÝ, Ph.D.

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalárska práca

bakalársky študijný obor
Teleinformatika

Študent: Martin Zelenay
Ročník: 3.

ID 136599
Akademický rok: 2012/2013

NÁZOV TÉMY:

Meranie vplyvu nežiaducich javov v IP sieti na kvalitu VoIP hovoru

POKYNY PRE VYPRACOVANIE:

Nastudujte problematiku nežiadoucích jevů v IP síti a metodiky měření kvality hovoru v IP sítích. S pomocí testovacího systému Spirent TestCenter C1 a emulátoru IP sítě Spirent ověřte vliv jednotlivých nežádoucích jevů na kvalitu hovoru. Na systému Spirent TestCenter C1 vytvořte několik scénářů odpovídajících reálným podmínkám. Rozsah testovaných vlivů je dán vlastnostmi použitého emulátoru.

DOPORUČENÁ LITERATÚRA:

- [1] Collins, D. Carrier grade voice over IP / 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-140634-4.
- [2] Bosse, J.G.. Signaling in telecommunication networks. John Wiley & Sons, Ltd. En-gland 2002 , ISBN 0-471-66288-7.
- [3] Hersent, O., Petit, J., Gurle, D. Beyond VoIP protocols: understanding voice technology and networking techniques for IP telephony. Chichester: John Wiley & Sons, 2005, 261 s. ISBN 0-470-02362-7.

Termín zadania: 11.2.2013

Termín odovzdania: 5.6.2013

Vedúci práce: Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

Konzultanti bakalárskej práce:

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

UPOZORNENIE:

Autor bakalárskej práce nesmí pri vytváraní práce porušiť autorská práva tretích osôb, zejména nesmí zasahovať nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a musí si byť plne vedom následku porušenia ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práca skúma, analyzuje a vyhodnocuje vplyv nežiaducich faktorov v IP sieťach na prenos hlasu VoIP. Rozoberá problematiku prenosu hlasu cez paketové siete v rámci noriem a zaužívaných pravidiel. V teoretickej časti sú vysvetlené pojmy a problematika VoIP sietí, so zameraním sa na fakty, potrebné k plnému pochopeniu skúmaných dejov a meraní. V praktickej časti je zhrnutá realizácia konkrétnych testov, podľa zadania práce s orientáciou na prvotné overenie si zariadení i hodnotiacich modelov a následné meranie vplyvu javov na kvalitu hovorov, s použitím týchto zariadení a ústredne Asterisk.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

VoIP, nežiadúce javy, vplyv, kvalita hovoru, oneskorenie, stratovosť, kolísanie oneskorenia paketov, kodeky

ABSTRACT

This work explores, analyzes and rates influence of network impairments on VoIP traffic. It describes how voice over IP is carried according to standards. There are described concepts and basics of VoIP networks with orientation on facts necessary to understand analyzed actions and measurements in theoretical part. In practical part, there is described realization of tests according to instructions with orientation on initial checking of devices and rating models and then measurement of influence of network impairments on quality of calls with use of these devices and Opensource PBX Asterisk.

KEYWORDS

VoIP, network impairments, influence, quality of call, delay, packet loss, jitter, codecs

ZELENAY, Martin *Meranie vplyvu nežiaducich javov v IP sieti na kvalitu VoIP hovoru*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 72 s. Vedúci práce bol Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „*Meranie vplyvu nežiaducich javov v IP sieti na kvalitu VoIP hovoru*“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušením ustanovení § 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 trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....
(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Pavlovi Šilhavému, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Zvláštna vďaka patrí mojej priateľke Evke za morálnu podporu a rodine za materiálnu podporu počas štúdia.

V Brne dňa

.....
(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 bakalárskej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených z projektu SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

OBSAH	7
ÚVOD	9
1. HLASOVÉ SLUŽBY VOIP	10
1.1 KONCEPT	11
1.2 ARCHITEKTÚRY A FUNKČNÉ ELEMENTY.....	12
1.2.1 Centralizovaná architektúra	13
1.2.2 Decentralizovaná architektúra	14
1.3 PBX ÚSTREDNE	15
1.3.1 Open source ústredňa Asterisk.....	15
2. PROTOKOLY VOIP.....	18
2.1 SIGNALIZAČNÉ PROTOKOLY	18
2.2 PROTOKOL H.323	19
2.2.1 Architektúra.....	19
2.3 PROTOKOL SIP	21
2.3.1 Adresovanie.....	21
2.3.2 Architektúra.....	21
2.3.3 Správy.....	23
2.3.4 Žiadosti.....	23
2.3.5 Odpovede	24
2.4 TRANSPORTNÉ PROTOKOLY	24
2.4.1 Protokol RTP.....	24
2.4.2 Protokol RTCP.....	27
3. KVALITA PRENOSU	30
3.1 NEPRIAZNIVÉ JAVY	30
3.1.1 Oneskorenie.....	31
3.1.2 Kolísanie oneskorenia.....	31
3.1.3 Stratovosť.....	32
3.2 HODNOTENIE A MERANIE KVALITY	33
3.2.1 Hodnotiaci model MOS.....	34
3.2.2 Hodnotenie R-faktor.....	35
3.3 KODEKY	38
3.3.1 Kodek G.711	39
3.3.2 Kodek G.723.1	39
3.3.3 Kodek G.726	39
3.3.4 Kodek G.729	40
4. PRAKTICKÁ ČASŤ	41
4.1 POUŽITÉ PRÍSTROJE A ICH NASTAVENIA	41
4.1.1 Spirent TestCenter C1 s kartou 4x1GE	41
4.1.2 Spirent MAUI 2-BLADE Emulátor.....	43
4.1.3 EXFO FTB-1 860G NetBlazer prenosný tester	44
4.2 REALIZÁCIA KONKRÉTNÝCH TESTOV	45
4.2.1 Testy stratovosti paketov	45
4.2.2 Testy stratovosti paketov s použitím ústredne Asterisk	55
4.2.3 Testy oneskorenia paketov.....	61

4.2.4	<i>Test kolísania paketov</i>	63
4.2.5	<i>Test transkódovania</i>	66
ZÁVER		67
POUŽITÁ LITERATÚRA		69
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK		72
PRÍLOHY		73

Úvod

Cieľom tejto práce je zanalyzovať vplyv nežiaducich javov na kvalitu VoIP hovoru. K tomu je potrebné pochopiť problematiku VoIP, vrátane používaných protokolov. V prvej časti práce je tak vysvetlená podstata a pozadie VoIP komunikácie. Počínajúc signalizačnými protokolmi so zameraním sa na SIP, ktorý bol nasadený aj pri samotnej realizácii testov. Ďalej stručne rozobraná problematika transportných protokolov so zameraním sa znova na tie využité v testovaní, tj. RTP a RTCP.

Problematika kvality prenosu a hovoru je vysvetlená v samostatnej kapitole, nakoľko je kľúčovou pre túto prácu. Postupne sú vysvetlené základné skúmané nepriaznivé javy – oneskorenie a stratovosť. Hodnotenie kvality pomocou objektívnych i subjektívnych metód a hodnotiace modely, tvoria jadro pre správne porozumenie výsledným poznatkom.

Druhá časť práce je zameraná na splnenie praktických požiadaviek z pokynov k vypracovaniu. To bolo uskutočnené pomocou testera firmy Spirent TestCenter C1, emulátora Spirent a neplánovane aj EXFO prenosného testera. Výsledky testov sú rozanalyzované a doplnené príslušnými prehľadnými tabuľkami a grafmi.

Realizovanými testami boli overené merania pomocou jednotlivých prístrojov a hodnotenie modelov MOS a E-modelu ku vzťahu k použitému kodeku a nežiaducemu javu. Následne ďalšími testami realizovanými s použitím ústredne Asterisk, bol nasimulovaný reálny charakter VoIP prenosu a overené vplyvy týchto javov na kvalitu hovoru. Na emulátore boli vytvorené profily odpovedajúce reálnym scenárom rozličných sieťových technológií.

1. Hlasové služby VoIP

VoIP (z anglického Voice over IP) je v podstate prenos hlasu pomocou Internet protokolu IP. Podľa názvu, z ktorého vyplýva zameranie na hlas a odkedy je hlavnou protokolovou architektúrou TCP/IP, je VoIP termín používaný vtedy, ak hovoríme o prenose hlasových tokov paketovými sieťami.

Od počiatočného nadšenia, ktoré tento pojem v oblasti telekomunikácii na konci deväťdesiatych rokov vyvolal prešlo mnoho rokov. Dnes prežilo iba niekoľko z počiatočných budúco generačných firiem, ktoré sa predbiehali s ponukami nových služieb a skvelých aplikácii, ktoré navždy zmenia telekomunikačné odvetvie. Technológie sa vyvíjali tak rýchlo, že protokoly vytvorené v 1998 roku sa o rok neskôr označovali za zastaralé. V skutočnosti každý vývojár tvrdil, že jeho technológia je o toľko lepšia od inej - konkurenčnej, že vzájomná kompatibilita nebola takmer žiadna [3]. To ale netrvalo dlho a objavili sa prvé štandardy. S vývojom technológií a rastom sietí sa postupne začalo ukazovať, že prenos hlasu cez moderné siete je efektívnejší než klasický. Užívatelia mali dostatočné prenosové pásma na použitie kvalitnejších hlasových kodekov, ktoré sa približovali kvalite klasickej siete a mohli využívať VoIP služby popri iných programoch. Na trhu sa objavili aj cenovo dostupné sluchátka s mikrofónom tzv. plug and play headsety a čoskoro na to sa objavil Skype.

Umožnil bežným užívateľom komunikáciu z PC na PC skrz internet zadarmo a takisto obsahoval textovú časť na písanie. Spoločnosť rapídne priniesla aj podporu volania z PC na telefónnu linku za výrazne nižšie ceny ako boli dovtedy v telefónnom odvetví. To odštartovalo prudký nárast konkurenčných aplikácii. V roku 2005 umožnili aj prenos videa v rámci hovoru, v tom období bola spoločnosť už vnímaná ako priekupnícka a bola svetovou jednotkou v tejto oblasti. Veľké firmy po celom svete prešli z klasickej internej telefónnej komunikácie na VoIP práve vďaka vysokej kvalite a takmer nulovej cene. Vývoj IP telefónov a softwarových ústrední začal výrazne napredovať a v priebehu desiatich rokov úplne zatienil bežnú telefóniu, ku ktorej prepadu prispel aj vývoj mobilnej komunikácie.

Internet je dnes množstvo vzájomne prepojených sietí bežiacich práve na IP. Spojenia medzi týmito sieťami sú používané všetkými na prenos rôznych dát. Ako bude popísané neskôr, jednou z hlavných výziev pre VoIP je práve kvalita hlasu a kľúčovým aspektom k jej dosiahnutiu, je dostupná šírka prenosového pásma (z ang. *bandwidth*). Ak chceme zabezpečiť dostatočnú šírku prenosového pásma pre vysoko kvalitné hlasové služby, potrebujeme najprv kontrolovať a správne voliť prístup k nemu. To býval v internete problém. V počiatkoch býval

každý používateľ internetu odkázaný na milosť iným. Jeden používateľ prenášajúci obrovské súbory ovplyvnil rýchlosť prenosu iných. Vo výsledku sa kvalita prenášaného hlasu internetom mohla líšiť od akceptovateľnej po veľmi neuspokojivú. S vývojom internetu však narástli aj možnosti na zdokonalenie. A tak je dnes neodmysliteľnou súčasťou pre VoIP aj pojem spoľahlivosti.

VoIP technológia sa tak priebehom rokov vyvinula a dnes je dominantnou alternatívou pre hlasové komunikácie, konkrétne pre klasickú telefóniu, ktorú poznáme desiatky rokov. Nielenže ponúka priame telefonické spojenia, ale aj množstvo dodatkových funkcií k tomu (prenos videa) a to s rovnakou kvalitou služieb QoS na akú sme zvyknutý z klasickej telefónnej siete. [1]

1.1 Koncept

Ako už bolo spomenuté vyššie VoIP je dnes favoritom nad klasickou telefónnou sieťou PSTN. Tá na prenos využíva tzv. prepínateľné okruhy v samostatných káblových sieťach, po ktorých sú dáta (hlasový tok) prenášané ako súvislý celok [4]. VoIP na rozdiel od toho využíva už existujúcu infraštruktúru internetu a hlasové dáta vo forme paketov sú smerované k cieľu. V posledných rokoch je VoIP vďaka vývoju vzájomne kompatibilné s PSTN. Môže byť implementované do už existujúcej ústredne PBX alebo pridané softwarovo inštaláciou virtuálnej ústredne, ktorá prepojí lokálne telefónne linky s internetom. [5]

Dosiahnuť podobnej kvality služby ako u PSTN je technologicky náročný proces, obzvlášť ak sú paketové siete optimalizované na dátovú komunikáciu. U VoIP rozlišujeme dve hlavné zložky prenosu:

- Prenos sekvencií hlasových vzorkov, označovaných ang. *media streams*, *media (bearer) connections* alebo *user plane*.
- Prenos signalizačných správ používaných na vytvorenie, riadenie a ukončenie spojení medzi účastníkmi komunikácie, označovaných ang. *signaling (control) channels* alebo *control plane*.

Najväčšie problémy vznikajú v prenose hlasových tokov (z ang. *media streams*). Signalizácia sa adaptuje do paketových sietí podstatne jednoduchšie nakoľko má podobný dátový charakter. [2]

Kontrolovať meškanie hlasových vzorkov - paketov je najväčší technologický problém. Meškanie je spôsobené ako výsledok týchto faktorov: paketizácie, kontrolou kolísania veľkosti meškania paketov (*jitter control*) a kontrolou toku dát (*flow control*).

Paketizačné meškanie je spôsobené časom, ktorý je potrebný na akumulovanie určitého množstva hlasových vzorkov pred prenosom, typicky býva vložených 20-30 ms hlasového vzorku do rámca, ktorý je potom zapúzdrený do paketu. Najväčšie meškanie spôsobujú zásobníky kontroly toku dát, pretože je nepredvídateľné. Podľa štandardu ITU-T G.114 je akceptovateľné meškanie medzi dvoma koncovými užívateľmi 150 ms, neakceptovateľné je meškanie nad 400 ms a hodnoty medzi tým sú akceptovateľné, ale spozorovateľné užívateľmi [6]. Oneskorenie každého paketu je ovplyvnené počtom skokov (smerovačov) k cieľu. Prudký nárast premávky alebo nezvyčajne veľké pakety v zásobníkoch môžu mať vážny vplyv na ich oneskorenie.

Prvým krokom k zníženiu oneskorenia je použitie UDP protokolu namiesto TCP na transportnej vrstve, ktorý je vďaka svojej spoľahlivej štruktúre moc pomalý na prenos médií. UDP má nevýhodu nespoľahlivého prenosu, čo je však čiastočne riešené aplikáciami s algoritmami ako je PLC (packet loss concealment), ktorý kompenzuje stratovosť paketov až do 5% bez výraznejšieho vplyvu na kvalitu hlasu. Ale ani UDP v kombinácii s PLC nie je dostatočné, takže musia byť použité ďalšie metódy ako konštrukcia siete tak, aby aj pri vysokej premávke bol dostatok priestoru na uplatnenie QoS požiadaviek alebo prioritizácia hlasu nad dáta.

Ďalším dôležitým aspektom je efektívne využitie šírky prenosového pásma, čo je možné pomocou dvoch techník: kompresie hlasu a potlačeniu ticha [2].

1.2 Architektúry a funkčné elementy

Poznáme dva základné typy architektúr: Centralizovanú a Decentralizovanú, ktoré sú podrobnejšie opísané ďalej v texte. Výhodou VoIP je, že môže byť implementované u oboch typoch architektúr zároveň.

Všetky nižšie opísané elementy sú paketové koncové stanice (z ang. *endpoints*), pretože v nich sú tvorené alebo prijímané paketové zložky prenosu.

- **Gatekeeper (GK)** – Tento element nazývaný aj *proxy server* poskytuje preklad adres a kontrolu prístupu. Chová sa ako bod prístupu k sieti a ako smerovací prvok na ceste od vysielajúceho zariadenia ku koncovému. Spravuje niekoľko paketových terminálov v doméne a je tak podstatným prvkom pre hierarchickú architektúru.
- **Media Gateway (MG)** – Nazývaný aj hlasová brána alebo len brána. Sprostredkúva rozhranie medzi odlišnými formátmi alebo štandardmi

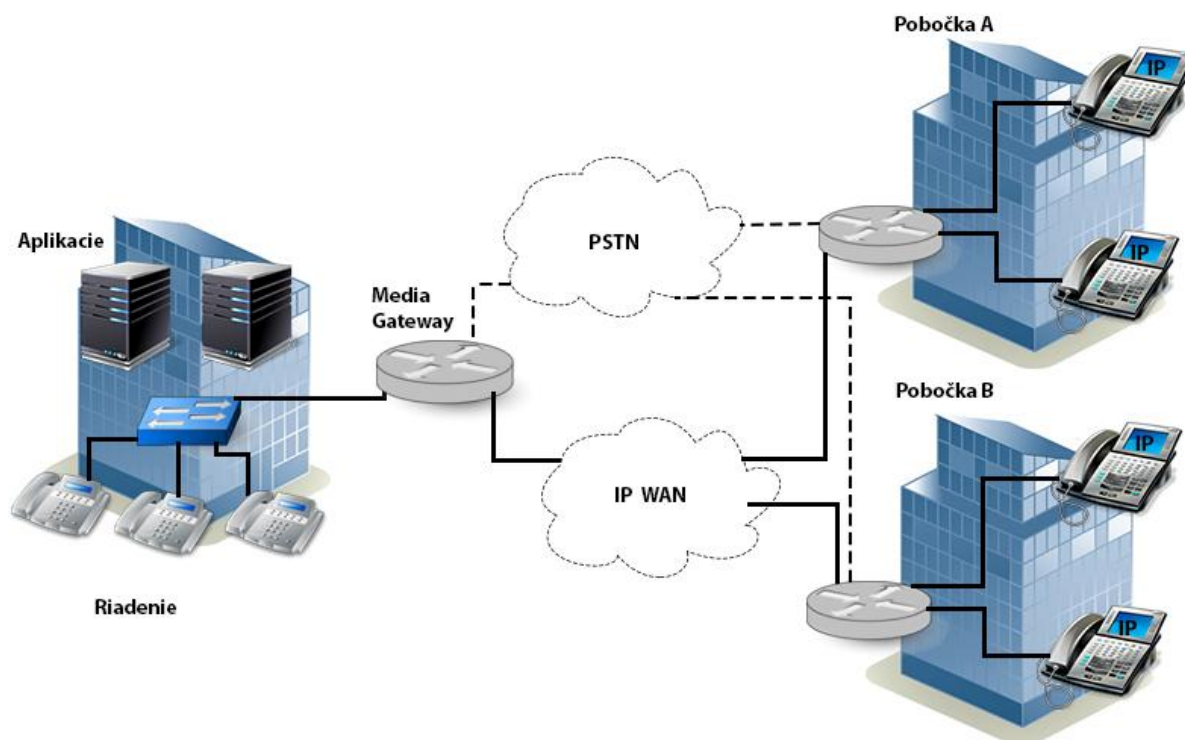
a médiiovými tokmi pod kontrolou MGC. Typicky prepojuje linky PSTN siete a kanály v paketovej sieti.

- **Signaling Gateway (SG)** -- Nazýva sa aj telefónna brána, riadi rozhranie medzi SS7 signalizačnou sieťou PSTN siete a paketovou sieťou. Ukončuje signalizačné dátové linky v PSTN a je riadená MGC.
- **Media Gateway Controller (MGC)** – Riadi MG a SG a obsahuje ekvivalent k hovorovej procesnej logike telefónneho spojenia
- **User Agent (UA)** – Má podobnú funkciu ako MGC, ale riadi jednotlivé užívateľské stanice (paketové terminály). Obsahuje hovorovú procesnú jednotku a vystupuje v užívateľovom mene ako volajúci alebo volaný.
- **Multipoint Control Unit (MCU)** – Stará sa o viac užívateľské konferencie.
- **Application Server (AS)** – Poskytuje sieti servisnú a spravovaciu inteligenciu na logickej úrovni. Pod GK môže takisto poskytovať AAA aplikácie (authentication, authorization a accounting). [3]

MGC, MG a SG sú používané v centralizovanej architektúre, ktorá primárne podporuje PSTN rozhrania, GK a UA v distribuovanej architektúre, ktorá zas primárne podporuje paketové terminály. MCU a AS sú využívané v oboch architektúrach. Všetky tieto elementy okrem UA môžu byť implementované do architektúry samostatne, ale zväčša sú zoskupené v rozličných kombináciách.

1.2.1 Centralizovaná architektúra

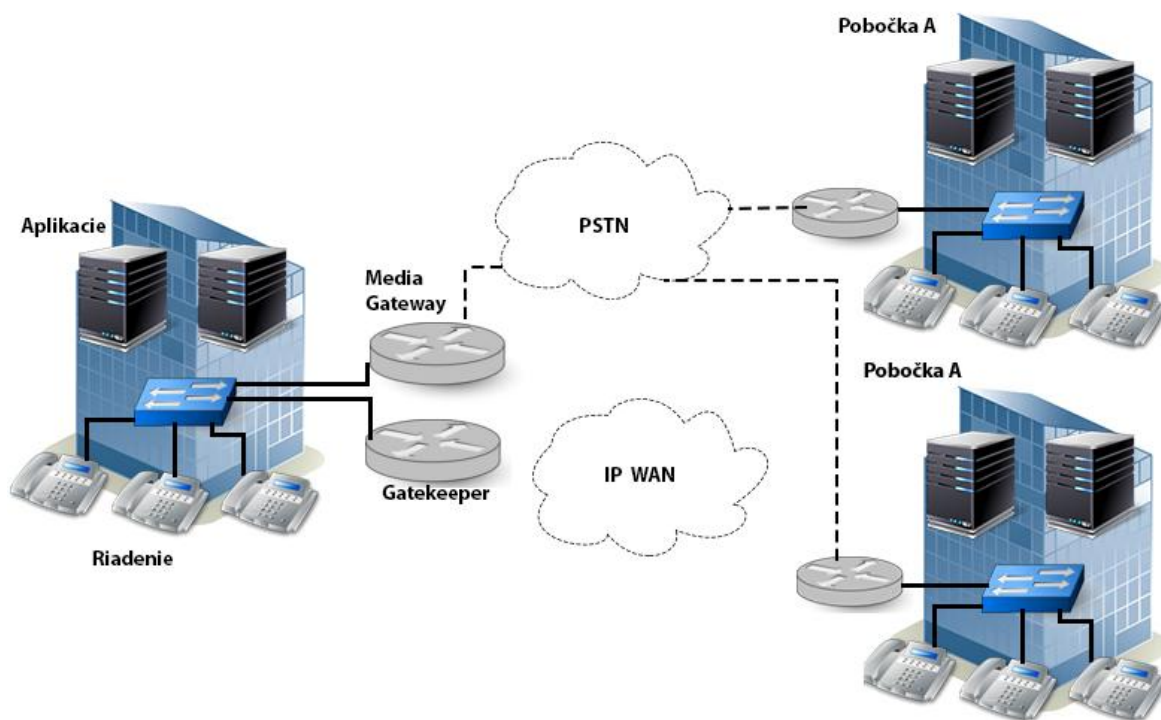
Je analógiu ku klasickej PSTN sieti, má centralizovanú správu a riadenie hovorov. Typickým príkladom využitia centralizovanej architektúry je hlavná (riadiaca) časť, ku ktorej sú pripojené zvyšné vzdialené časti. V riadiacej časti sa nachádzajú aj aplikácie ako hlasová schránka alebo IVR. Nie je možné využívať iné aplikácie, kým nie sú podporované centrálnou časťou. Najčastejšie využíva *MGCP* alebo *Megaco/H.248* protokoly na riadenie koncových zariadení a brán. Na príklade na obrázku 1.1 sú vzdialené časti vpravo pripojené k riadiacej vľavo pomocou WAN liniek podporujúcich QoS. Každá časť je individuálne pripojená aj záložne k PSTN. [8]



Obr. 1.1 : Príklad centralizovanej architektúry [8]

1.2.2 Decentralizovaná architektúra

Umožňuje väčšiu komplexnosť siete. Koncové zariadenia sú nezávislé, čo je oproti centralizovanej architektúre najväčší rozdiel. Na obrázku 1.2 nie je WAN sieť nositeľom signalizácie kontroly hovorov pre internú a vonkajšiu časť, pretože tie sú spravované vlastným manažérom hovorov. Typicky PSTN býva ako náhrada v prípade výpadku. Táto architektúra pracuje s H.323 a SIP signalizačnými protokolmi, ktoré orientujú inteligenciu siete na koncové zariadenia a zariadenia kontroly hovorov. [7]



Obr. 1.1: Príklad decentralizovanej architektúry [8]

1.3 PBX ústredne

Pobočková telefónna ústredňa (PBX) je zariadenie, ktoré zjednocuje výstupné body všetkých firemných telefónov do verejnej telefónnej siete. Medzi jej najväčšie prednosti patrí vysoká spoľahlivosť, jednoduchá implementácia do analógových sietí a centralizovaná štruktúra celej jej organizácie. Najrozšírenejšia je v dnešnej dobe realizácia softwarových ústrední pomocou tzv. *open source* (voľne modifikovateľných), nakoľko voľnosť modifikácií a prístupu nie sú limitované a sú zadarmo. Existuje pomerne veľké množstvo open source PBX, medzi najznámejšie patria *Asterisk*, *FreeSWITCH* a *YATE*.

1.3.1 Open source ústredňa Asterisk

Asterisk vytvoril Mark Spencer v roku 1999, dôvodom jeho vzniku bola potreba nekomerčného PBX systému. V roku 2004 sa jednalo o prvý plnohodnotný open source PBX systém. V dnešnej dobe existuje Asterisk vo verzii 11, predchádzajúca verzia systému bola 10. Avšak verzia 11 je LTS (Long Term Support), takže sa jedná o verziu kde je zaručená dlhodobá podpora [41]. V tabuľke 1.1 sú znázornené jednotlivé vývojové rady Asterisku.

Tab. 1.1: Vývojové rady ústredne Asterisk [41]

Verzia	Typ	Dátum vydania	Bezpečnostné záplaty do:	Koniec podpory
1.2.X		21/11/05	8/7/07	21/11/10
1.4.X	LTS	23/12/06	21/4/11	21/4/12
1.6.0.X	Standard	1/10/08	1/5/10	1/10/10
1.6.1.X	Standard	27/4/09	1/5/10	27/4/11
1.6.2.X	Standard	18/12/09	21/4/11	21/4/12
1.8.X	LTS	21/10/10	21/10/14	21/10/15
10.X	Standard	15/12/11	15/12/12	15/12/13
11.X	LTS	31/10/12	25/12/16	25/10/17

Jedná sa o najrozšírenejší open source systém pre VoIP technológie. Je dostupný na operačných systémoch Linux, BSD, Windows (emuláciou) a MacOS X, poskytuje všetky funkcie, ktoré sú očakávané od pobočkových ústrední. Asterisk je softwarová pobočková ústredňa umožňujúca ako IP telefóniu, tak digitálnu ISDN aj analógovú telefóniu. Medzi funkcie, ktoré podporuje, patria napríklad IVR (Interactive Voice Response) a ACD (Automatic Call Distribution) [42].

Podporované signalizačné protokoly:

- IAX - Inter-Asterisk Exchange – jedná sa o protokol vytvorený tvorcami Asterisku
- H.323
- SIP - Session Initiation Protocol
- MGCP - Media Gateway Control Protocol
- SCCP - Cisco Skinny

Podporované kodeky:

- ITU-T G.711 (A-Law a μ -Law), G.726, G.723.1, G.729,
- GSM, iLBC, LPC-10 a Speex. [40]

Architektúra pobočkovej ústredne Asterisk

Okolo centrálného jadra PBX sú definované špecifické API (Application Programming Interface). Jadro ovláda vnútorné prepojenie PBX, špecifické protokoly, kodeky a hardwarové rozhrania telefónnych aplikácií.

- **PBX prepojovacie jadro** – základným prvkom systému Asterisk je prepojovací systém pobočkovej ústredne, slúžiaci k spojovaniu rôznorodých užívateľov a automatizovaných úkonov.

- **Spúšťač aplikácií** - slúži k spúšťaniu aplikácii ako je hlasová pošta, prehrávanie súborov a prechádzanie adresárov.

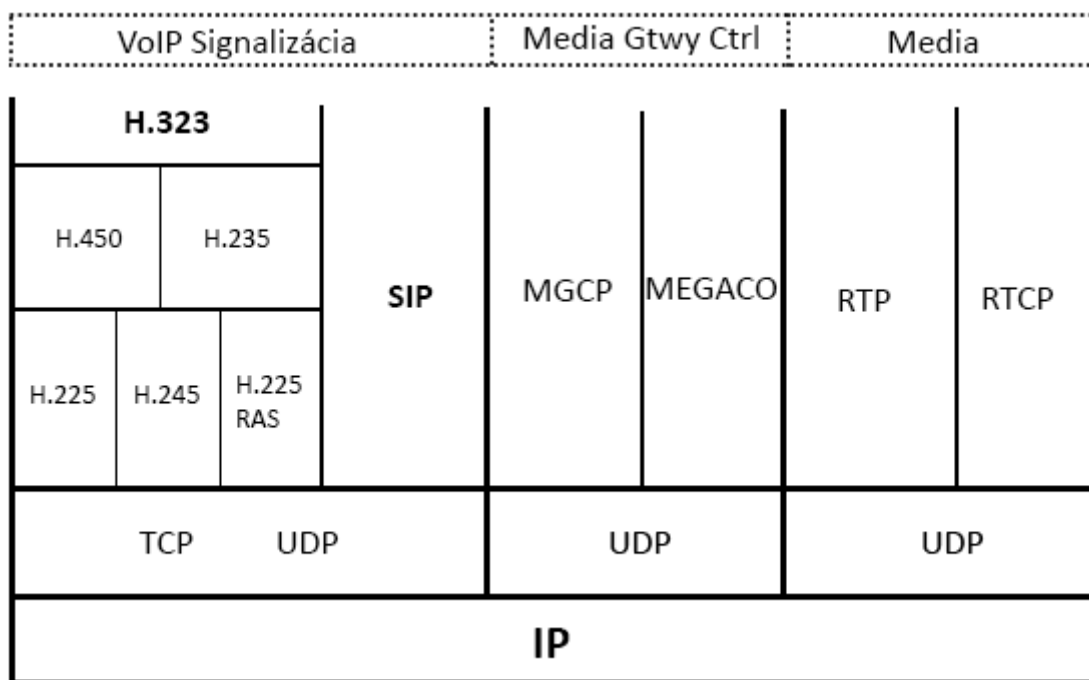
- **Prekladač kodekov** - používa moduly s kodekmi pre kódovanie a dekódovanie rôznych audio formátov, ktoré sa používajú v telefónnom prostredí. Má k dispozícii dostatočne veľkú škálu kodekov, aby vyhovoval rozdielnym potrebám a dosahoval čo najlepších výsledkov v pomere medzi audio kvalitou a využitou šírkou pásma.

- **Scheduler a I/O Manager** - zaisťuje plánovanie úloh na najnižšej úrovni a zaisťuje optimálne využitie výkonu systému za akýchkoľvek podmienok. [40]

Ústredňa Asterisk vo verzii 1.8 bola použitá v praktickej časti práce na simuláciu reálneho charakteru VoIP prenosu medzi Spirent testerom a touto ústredňou. Podrobné nastavenie a priebeh testovania viz kapitola 4.

2. Protokoly VoIP

VoIP využíva dva druhy protokolov *signalizačné* (určené na signalizáciu) a *transportné* (na samotný prenos mediálnych dát). Z obrázku 2.1 je graficky vidieť rozdelenie protokolov. Ich podrobnejší rozbor je v nasledujúcich podkapitolách.



Obr. 2.1: Rozdelenie protokolov VoIP [9]

2.1 Signalizačné protokoly

slúžia k naviazaniu spojenia, riadeniu toku a jeho ukončovaniu. Najpoužívanéjšie z nich sú porovnané v tabuľke 2.1. Dajú sa rozdeliť na dve kategórie:

- **Session Control protokoly** – sú zodpovedné za vytvorenie, udržiavanie a ukončovanie hovorových spojení, sú zodpovedné za vyjednanie parametrov prenosu ako kodeky, tóny, šírky prenosového pásma. Sem patria SIP a H.323.
- **Media Control protokoly** – sú zodpovedné za vytvorenie a ukončovanie médiových spojení, komunikáciu s bránami (*media gateways*) medzi IP a PSTN sieťou. Sem patria MGCP a Megaco. [9]

Tab. 2.1: Porovnanie VoIP signalizačných protokolov [18]

	H.323	SIP	MGCP/H.248/Megaco
Štandard	ITU-T	IETF	MGCP/Megaco – IETF H.248 – ITU-T
Architektúra	Distribúovaná	Distribúovaná	Centralizovaná
Kontrola volania	Gatekeeper	Proxy/Redirect Server	Call agent/Media Control Gateway / Softswitch
Koncové zariadenia	Gateway, Terminal	User Agent	Media Gateway
Signalizácia prenosu	TCP/UDP	TCP/UDP	MGCP – UDP H.248/Megaco – TCP/UDP
Multimédiá	Áno	Áno	Áno
DTMF-relay transport	RTP	RTP	RTP

2.2 Protokol H.323

Vznikol štandardizáciou ITU-T. Tento štandard popisuje audio–video komunikáciu v IP sieti s predpokladom, že v nej nie sú dostupné QoS. Pôvodne bol navrhnutý pre multimediálne konferencie v LAN sieťach, ale neskôr v 1996 bol upravený na pokrytie VoIP služieb [10]. Tento štandard v sebe zahŕňa definície ďalších protokolov, ktoré sú s ním používané ako *H.225*, *H.245* (signalizačné) a *RTP*, *RTCP* (transportné).

2.2.1 Architektúra

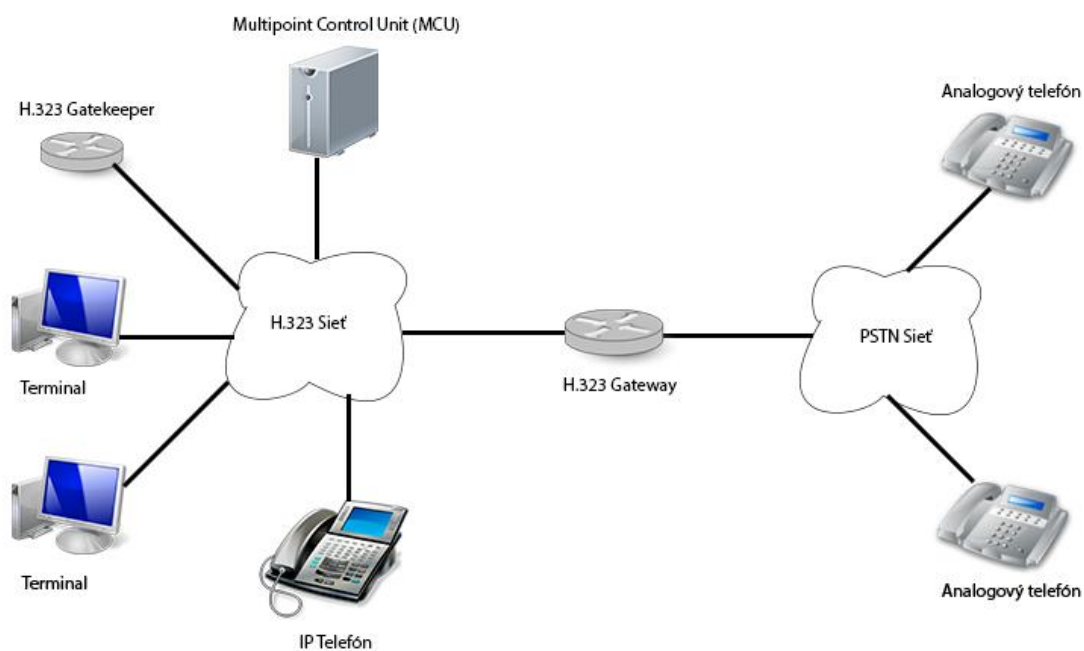
Názorná schéma je na obrázku 2.2. Tieto elementy VoIP siete podľa štandardu H.323 sú prvkami logickej topológie:

- **Terminal** - je základným a jediným povinným komponentom H.323 siete. Je koncovým zariadením klienta v LAN a je zdrojom obojstrannej komunikácie v reálnom čase. Musí podporovať RTP protokol na prenos hlasových dát a RAS protokol na komunikáciu s *gatekeeperom*.
- **Gateway / Media Gateway (MG)** - Tento element tvorí rozhranie medzi rozličnými formátmi a štandardmi pre hlasové toky. Zabezpečuje tak preklad

medzi rôznymi prenosovými formátmi. Dokáže takisto prekladať medzi audio a video kodekmi. Tvorí rozhranie medzi IP a PSTN sieťami. Je voliteľným komponentom, pretože terminály dokážu spolu komunikovať samostatne. [11]

- **Gatekeeper (GK)** - Má na starosti veľmi dôležité služby ako autorizáciu, preklad telefónnych čísel na IP adresy, účtovanie, smerovanie hovorov. Je voliteľnou časťou. Najčastejšie je realizovaný softwarom a ak je implementovaný jeho služby musia využívať koncové body (terminály).
- **Multipoint Control Unit (MCU)** – zaisťuje komunikáciu medzi tromi a viac terminálmi (konferenčné hovory). Umožňuje prevádzať centralizované konferenčné spojenie na decentralizované a naopak. Obsahuje dva moduly, kontrolér a procesor. [12]

Štandard H.323 v sebe definuje aj využitie tzv. kodekov, ktoré slúžia na zakódovanie analógového hlasu do digitálnej formy s rôznou náročnosťou na šírku pásma. V základe je podpora videa voliteľnou zložkou H.323, ale ak je podporované musí implementovať aspoň video-kodek H.261 (QCIF). Podpora audia je však povinná a tak v základe implementuje aspoň kodek G.711, ktorý má však vysoké nároky na prenosové pásmo (v porovnaní s inými bežnými kodekmi). Takmer vždy ale bývajú koncovými stanicami podporované viaceré audio kodeky. [1] Kodekom je venovaná jedna z nasledujúcich kapitol.



Obr. 2.2: Príklad H.323 architektúry [1]

2.3 Protokol SIP

Signalizačný protokol, ktorý bol prvý raz definovaný štandardom RFC 2543 organizácie IETF. [13] Je založený na princípe HTTP (využíva takisto žiadosti a odpovede) a je alternatívou k H.323. Podobne ako on aj SIP je používaný s ďalšími IETF protokolmi ako SDP, RTSP a SAP. Jeho základné funkcie sú vyhľadanie volaného pri inicializácii hovoru, špecifikovanie vlastností volajúcich zariadení (použiteľné kodeky), prenos informácií o dostupnosti a nastavenie i riadenie relácie.

2.3.1 Adresovanie

Princíp signalizácie spočíva vo výmene správ v relácii (spojení) medzi účastníkmi. Signalizácia prebieha zvlášť od prenosu hlasových dát (sú logicky oddelené) čo je dôležité, pretože signalizačné dáta môžu prechádzať viacerými *proxy* alebo *redirect* servermi a tok hlasových dát ide priamejšou cestou [1]. Na signalizáciu je využívaný protokol SDP. Pred zahájením relácie je dôležité najprv účastníka presne zamerať, aby ho bolo možné adresovať. Ten je identifikovateľný vďaka *SIP URL* resp. *URI*. Tá je podobná emailovej adrese a je zložená z dvoch častí – užívateľského mena (číslo) a názvu domény, vyzerá takto:

SIP: username@domain.com. [14]

Voliteľnou zložkou je číslo portu (najčastejšie 5060 [16]), ktorý je definovaný za názvom domény, heslom a pred ďalšími parametrami. Adresná hlavička tak môže mať tvar:

sip:<user>[:<password>]@<host>[:<port>] [;<uri-parameters>] [?<headers>]

Podľa RFC 3261 existujú aj zabezpečené adresy, tzv. *SIPS URI*. Tie sú zašifrované pomocou *SSL* resp. *TSL*. Ako predvolený port pre zabezpečenú komunikáciu sa používa 5061. [15]

2.3.2 Architektúra

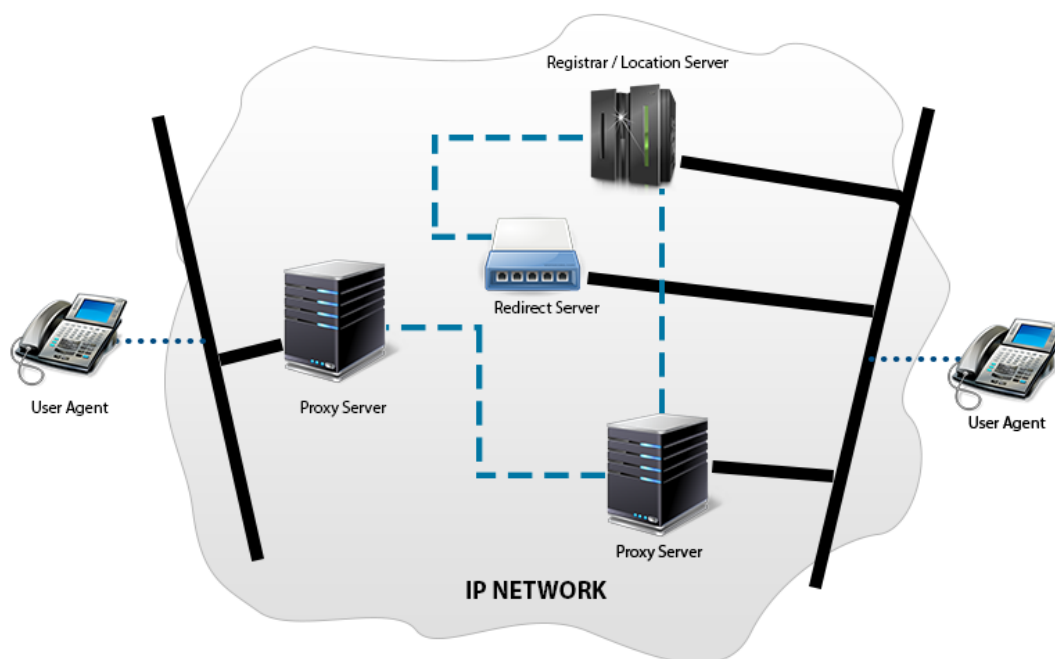
Podobne ako štandard *H.323* aj SIP definuje niekoľko elementov v každej VoIP sieti, ktorá využíva tento protokol. V základe sa dajú rozdeliť na *klientov* a *servery*, pričom klient je aplikačný program, ktorý vysiela SIP požiadavky (*request*) a servery na ne reagujú. Z toho vyplýva, že SIP je tzv. klient-server protokol. Príklad architektúry SIP je na obrázku 2.3. Definované sú tieto druhy elementov:

- **User Agent (UA)** – Klient. Generuje a posiela žiadosti, prijíma i spracováva odpovede. Okrem neho existujú aj tzv. *Presence Agent* (prijíma registračné požiadavky a generuje stavové notifikácie, zbiera prezenčné informácie)

a *Back-to-back User Agent* (prijaté požiadavky preformuluje a preposiela ďalej, napr. pre zachovanie anonymity účastníkov). [16]

V praxi je obsiahnutý v koncovom zariadení spolu s UA Serverom, ktorý generuje odpovede na prijaté žiadosti, ktoré posiela späť a udržiava signalizáciu stavu hovorov, v ktorých sa zúčastňuje.

- **Proxy Server** – Jeho primárnou funkciou je smerovanie požiadaviek a odpovedí. Po preposlaní sa správa javí iným serverom akože pochádza od Proxy servera a nie od klienta za ním. Obsahuje databázu, podľa ktorej riadi smerovanie na ďalší skok. Dokáže žiadosť preposlať na viacero zariadení súčasne (*forking*) a zaistiť autorizáciu i autentifikáciu užívateľov. [14]
- **Redirect Server** – Prijíma požiadavky, zmapuje cieľové adresy a pošle ich naspäť klientovi. Ten tak môže priamo odoslať požiadavku na správnu adresu. Redirect Server dokáže na základe priorít vybrať vhodnú adresu. Nie vždy však pošle koncovú adresu, môže poslať adresu najbližšieho servera, ktorý by ju mal poznať. Na rozdiel od *Proxy Servera* teda požiadavky len prijíma a odpovedá na ne. [14]
- **Registrar Server** – Prijíma registračné požiadavky. Keďže SIP uplatňuje princíp registrácie, čím určuje, že registrovaný účastník je dostupný na registrovanej adrese. Prispieva tak k mobilite užívateľov. Typicky býva v kombinácii s iným serverom (*Redirect* alebo *Proxy*). [1]



Obr. 2.3: Príklad SIP architektúry [17]

2.3.3 Správy

Na signalizáciu tento protokol využíva SIP správy, ktoré je možné rozdeliť do dvoch kategórií: žiadosti (*requests* alebo *methods*) a odpovede (*responses*). Správy majú nasledujúcu štruktúru:

- štartovací riadok,
- jeden alebo viac riadkov hlavičky,
- prázdny riadok indikujúci koniec hlavičky,
- voliteľné telo správy.

Pričom štartovací riadok je u žiadostí nazvaný *Request Line* a má napr. takúto štruktúru:

```
INVITE sip:9103682854@192.168.16.140 SIP/2.0.
```

U odpovedí sa nazýva *Status Line* a vyzerá napr. takto:

```
SIP/2.0 100 Trying. [17]
```

2.3.4 Žiadosti

V doporučení RFC 3261 je definovaných šesť žiadostí: *INVITE*, *ACK*, *OPTIONS*, *BYE*, *CANCEL* a *REGISTER*. Ostatné (*INFO*, *REFER*, a *UPDATE*) sú definované v iných odporučeniach [15]. Sú vysielané klientom. V tabuľke 2.2 je prehľad rôznych druhov SIP žiadostí, popis ich funkcie a odporúčenie, v ktorom boli uvedené.

Tabuľka 2.2: Typy žiadostí SIP [15]

Typ žiadosti	Funkcia	RFC odporúčenie
INVITE	určená k nadväzovaniu spojenia, alebo k zmene parametrov existujúceho spojenia	RFC 3261
ACK	slúži ako potvrdenie od užívateľa, že prijal požiadavku	RFC 3261
CANCEL	žiadosť o zrušenie prebiehajúcej žiadosti INVITE	RFC 3261
REGISTER	žiadosť o registráciu klienta v <i>Registrar</i> serveri	RFC 3261
OPTIONS	slúži k výmene informácii podporovaných funkcií	RFC 3261
BYE	žiadosť o ukončenie spojenia	RFC 3261
REFER	požiadavka iného UA k relácií (napr. inicializácia spojenia cez web)	RFC 3515
SUBSCRIBE	slúži ako požiadavka pre zistenie stavu vzdialeného prvku	RFC 3265
NOTIFY	slúži k informovaniu koncového prvku	RFC 3265
UPDATE	aktualizácia informácie o stave relácie	RFC 3331
INFO	slúži k prenosu informácie počas relácie	RFC 2976

2.3.5 Odpovede

Sú odpoveďou servera na prijatie žiadosti klienta a sú rozdelené do šiestich kategórii po stovkách označených od 100 do 699. Všetky sú zahrnuté v doporučení RFC 3261. Ich názorne rozdelenie s vysvetlením princípu zobrazuje tabuľka 2.3.

Tab. 2.3: SIP odpovede [15]

Označenie	Funkcia	Príklad
1xx	Informačná odpoveď, požiadavka bola prijatá a spracováva sa (dočasná odpoveď)	100 Trying 180 Ringing
2xx	Úspech, tj. kladná odpoveď, požiadavka bola úspešne prijatá a spracovaná (finálna odpoveď)	200 OK 202 Accepted
3xx	Presmerovanie	302 Multiple Choices 305 Use Proxy
4xx	Chyba na strane klienta	487 Request Terminated 403 Forbidden
5xx	Chyba na strane servera	501 Not Implemented 503 Service Unavailable
6xx	Globálna chyba	600 Busy Everywhere 603 Decline

2.4 Transportné protokoly

Ako už bolo spomenuté v kapitole 1.1, pre prenos multimedialných dát je na transportnej vrstve uprednostňovaný UDP nad TCP. Dôvodom je práve to, že UDP protokol ako nespoľahlivý, je oveľa menej náročnejší na prenos a zároveň je rýchlejší, pretože nevyžaduje potvrdenia o doručení. Pretože ako vyplýva z vlastností prenosu hlasu, strata jedného alebo dvoch paketov, ktoré nesú milisekundy reči nespôsobí žiadne výrazné problémy, no na druhej strane práve ich meškanie spôsobuje neschopnosť plynulej komunikácie. [1]

Medzi aplikačné protokoly najčastejšie využívané VoIP sieťami na prenos patria RTP, RTCP a RTSP, ktoré slúžia k vlastnému prenosu multimedialných dát, tj. audia a videa (viz obr. 2.1).

2.4.1 Protokol RTP

Bol definovaný v odporučení RFC 3550. Nezaručuje včasné doručenie dát, ani negarantuje kvalitu služieb. [19] Ako bolo spomenuté v úvode do kapitoly transportných protokolov, UDP nie je schopné kontrolovať doručenie paketov, ale RTP pomáha pomocou

sekvenčného čísla paketu, aby si prijímateľ mohol kontrolovať stratené pakety alebo časovú známku, pomocou ktorej si môže vypočítať meškanie alebo jitter (viz kapitolu *Kvalita prenosu*).

RTP prenáša digitálne kódovaný hlas tak, že vezme niekoľko digitálnych vzoriek (záťaž – *payload*) a priradí im hlavičku [1]. Jednotlivé typy záťaží definuje štandard RFC 3551 do rôznych profilov, ktoré v sebe zahrňujú audio/video kodeky. Hlavným dôvodom ich rôznorodosti je historický vývoj. Ich prehľad je v tabuľke 2.4. Typy záťaží od 96 do 127 sú rezervované pre dynamické priradenie kodekov, ktoré sú v danej relácii použité. [21]

Tab. 2.4: Druhy profilových záťaží RTP [19], [20]

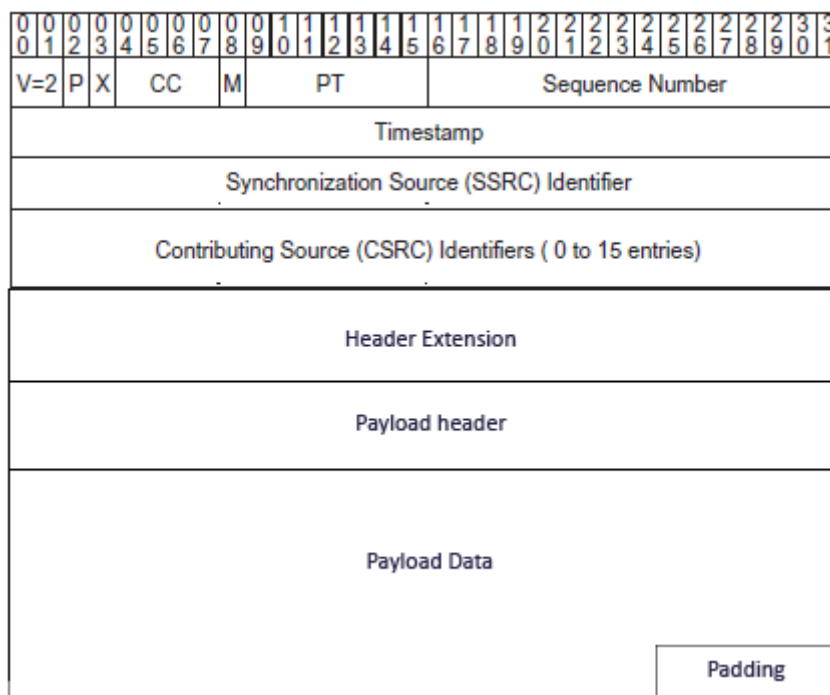
PT	Názov	Audio/Video (A/V)	Taktovací kmitočet (Hz)	Kanály	Referencie
0	PCMU	A	8000	1	[RFC3551]
1	Rezervovaný				
2	Rezervovaný				
3	GSM	A	8000	1	[RFC3551]
4	G723	A	8000	1	[RFC3551]
5	DVI4	A	8000	1	[RFC3551]
6	DVI4	A	16000	1	[RFC3551]
7	LPC	A	8000	1	[RFC3551]
8	PCMA	A	8000	1	[RFC3551]
9	G722	A	8000	1	[RFC3551]
10	L16	A	44100	2	[RFC3551]
11	L16	A	44100	1	[RFC3551]
12	QCELP	A	8000	1	[RFC3551]
13	CN	A	8000	1	[RFC3389]
14	MPA	A	90000		[RFC3551][RFC2250]
15	G728	A	8000	1	[RFC3551]
16	DVI4	A	11025	1	[RFC3551]
17	DVI4	A	22050	1	[RFC3551]
18	G729	A	8000	1	[RFC3551]
19	Rezervovaný	A			
20	Nepripravený	A			
21	Nepripravený	A			
22	Nepripravený	A			
23	Nepripravený	A			
24	Nepripravený	V			
25	CeLB	V	90000		[RFC2029]
26	JPEG	V	90000		[RFC2435]
27	Nepripravený	V			
28	nv	V	90000		[RFC3551]
29	Nepripravený	V			

30	Nepripravený	V			
31	H261	V	90000		[RFC4587]
32	MPV	V	90000		[RFC2250]
33	MP2T	AV	90000		[RFC2250]
34	H263	V	90000		[RFC4629]
35-71	Nepripravený	?			
72-76	Rezervovaný				[RFC3551]
77-95	Nepripravený	?			
96-127	Dynamické	?			[RFC3551]

Hlavička RTP paketu má nasledujúcu štruktúru (na obrázku 2.4):

- **Verzia (V)** – Aktuálna je v2 (definovaná RFC 3550)
- **Výplň (P)** – Doplnkové oktety na konci užívateľských dát. V poslednom je zahrnuté číslo ich počtu, tie sú ignorované pri dekódovaní.
- **Rozšírenie (X)** – Podľa *payload* profilu môže byť použitá rozšírená hlavička. Ak je, tak toto pole je označené jednotkou.
- **Počet prispievajúcich zdrojov (PT)** – Indikuje počet CSRC záznamov, viz CSRC.
- **Marker (M)** – Označuje dôležitý význam daného paketu pre aplikáciu, je definovaný profilom.
- **Typ záťaže** – Určuje konkrétny typ záťaže podľa tabuľky profilov (tab. 2.4).
- **Sekvenčné číslo (Sequence number)** – Používané k identifikácii paketov ako bolo spomenuté vyššie, vďaka nemu je možné kontrolovať poradie doručenia alebo chýbajúce pakety. Inkrementuje sa vždy o jednotku. Začína náhodne vygenerovaným číslom.
- **Časové razítko (Timestamp)** – Určuje kedy bola vygenerovaná prvá vzorka záťaže. Vďaka nemu je možné naplánovať prehrávanie dát. Rastie v závislosti od toho koľko vzoriek obsahuje daný paket.
- **Identifikátor zdroja synchronizácie (SSRC)** – Slúži k identifikácii jednotlivých účastníkov spojenia. Každý má náhodne vygenerované a používa ho po celý čas spojenia. RTP má implementované aj riešenie kolízie (ak majú dvaja rovnaký SSRC).
- **Identifikátor prispievajúceho zdroja (CSRC)** – Ak k vytvoreniu paketu prispelo viac účastníkov, CSRC určuje číslo, ktorým je v tomto poli paket označený. (viz *mixery*).

- **Rozšírená hlavička (Extension Header)** – Používa sa ak je potrebné zahrnúť viac informácií, než dovoľuje klasická hlavička.
- **Hlavička záťaže (Payload Header)** – Poskytuje informácie o záťažových profiloch. Pre optimálne fungovanie profil väčšinou potrebuje viac informácií, tie sú umiestnené v tomto poli.
- **Dáta (Payload data)** – Samotné prenášané dáta. [15], [22]



Obr. 2.4: RTP paket [22]

Mixéry a Prekladače

Mixér umožňuje zmiešať viacero médiových tokov z rôznych zdrojov do jedného. Využíva sa napríklad pri konferenciách. Prekladač preposiela RTP pakety cez firewall, ktorý ich neprepúšťa. Na rozdiel od mixéra, ale ich SSRC identifikátor nezmení.

2.4.2 Protokol RTCP

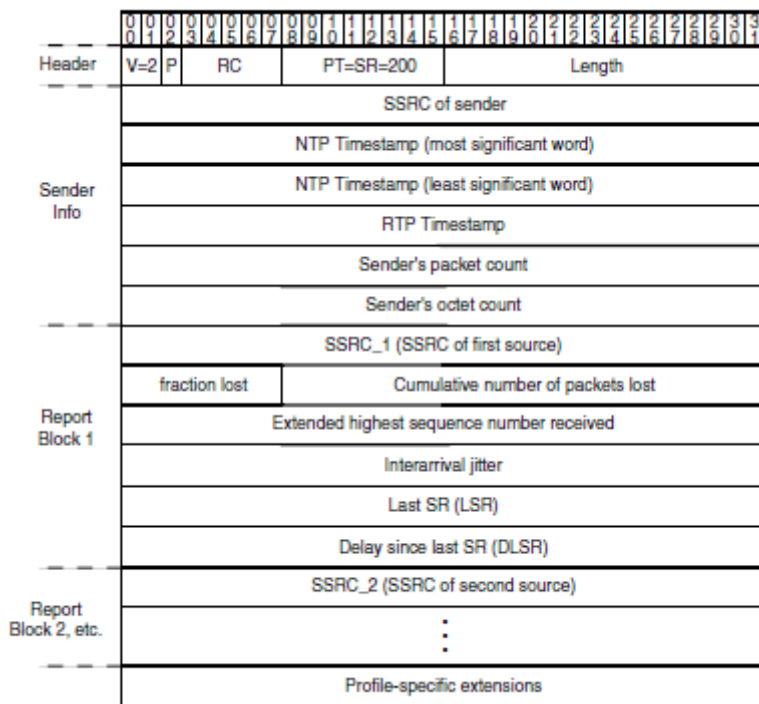
Je súčasťou celku, ktorý tvorí spolu s RTP protokolom. Na rozdiel od neho sa stará o kontrolu a riadenie spojenia. Takisto je definovaný odporúčením RFC 3550 a na prenos používa UDP protokol. Obvykle používa v spojení číslo portu o jedno vyššie ako RTP.

Jeho hlavnou úlohou je teda periodická výmena správ medzi účastníkmi s cieľom zabezpečiť uspokojivú kvalitu spojenia. Medzi ďalšie funkcie patrí identifikácia a odhad veľkosti relácie (sleduje počet účastníkov, ktorý periodicky o sebe dávajú vedieť).

RTCP pracuje s viacerými druhmi paketov, ale nikdy neposiela iba jeden druh samostatne, kombinuje viaceré do jedného. Podľa odporúčenia RFC 3550 musí každý celkový paket obsahovať SR alebo RR a SDES paket. [19]

Známe sú tieto druhy RTCP paketov:

- **Sender Report (SR)** – Je používaná účastníkmi, ktorý aktívne posielajú a prijímajú RTP pakety. Má tri nezávislé oblasti, hlavičku, informácie odosielaťa a niekoľko RR blokov. Na obrázku 2.5 je vidieť jej formát.



Obr. 2.5: RTCP SR formát [1]

Dôležité pole je *NTP Timestamp*, ktoré zobrazuje čas v sekundách uplynutý od 1.januára 1900. Je využívané na merania času medzi dvoma paketmi. Podobného charakteru je aj pole *RTP Timestamp*, ktoré však používa rovnaké jednotky ako Timestamp v RTP pakete. Tieto dve polia umožňujú prijímateľovi SR lepšie sa zosynchronizovať s odosielaťom SR. [1]

- **Receiver Report (RR)** – Používa ju účastník, ktorý prijíma RTP pakety, ale žiadne ešte neodoslal. Je takmer identická s SR, ale na rozdiel od nej neobsahuje *Sender Specific Information* a má inú *payload type* hodnotu.
- **Source Description (SDES)** – Poskytuje identifikáciu a iné informácie pre účastníkov spojenia. Nesie prvky ako meno, email, telefónne číslo. Povinný je len *CNAME*. Je to unikátny identifikátor a nemení sa počas celého spojenia

(narozdiel od SSRC, ktoré ak majú vygenerované náhodou dvaja rovnaké jeden musí zmeniť).

- **Goodbye (BYE)** – Indikuje, že jeden alebo viacero zdrojov už nie je aktívnych. Môže obsahovať aj textový reťazec s dôvodom odpojenia.
- **Application specific (APP)** – Je používaný pre prenos dát medzi neštandardnými aplikáciami, kde formát dát nie je špecifikovaný. Využíva ASCII reťazec na identifikáciu. [19]

Jednou z funkcií SR a RR je kalkulácia tzv. *round-trip delay*, čo je meškanie vzniknuté medzi odoslaním paketu a prijatia odpovede. Je to dôležitá funkcia v meraní VoIP kvality prenosu. Výpočet sa dá realizovať podľa vzťahu: $T_4 - T_3 + T_2 - T_1$, kde T_1 je čas, v ktorom odosielateľ odoslal report, v čase T_2 ho dostal prijímateľ, ktorý následne odoslal report v čase T_3 a ten dorazil k pôvodnému odosielateľovi v čase T_4 . Hodnoty sú čerpané z polí *Timestamp*. [1]

3. Kvalita prenosu

VoIP môže byť ovplyvnené problémami spojenými s kvalitou prenášaného hlasu. Preto je potrebné, aby pre zrozumiteľné a spoľahlivé spojenie boli zaistené určité kvality služieb. Tie môžu byť zaručené z hľadiska objektívneho (QoS) alebo subjektívneho (QoE).

QoS sa snaží objektívne hodnotiť služby podľa vzťahu k médiu a prenosu. Stanovuje tak na základe rozličných parametrov siete odlišné spôsoby riešenia problémov. [24] Vyhodnocuje vplyv a rieši teda aj nepriaznivé javy, ktoré sú rozobrané nižšie.

QoE zas naopak hodnotí subjektívne zo strany účastníka. [23] V praxi sa u VoIP uplatňujú dva modely hodnotenia, ktoré sú rozpísané nižšie. Okrem toho existujú rôzne metódy pre vyhodnocovanie kvality hovoru, ktoré môžeme takisto rozdeliť na objektívne a subjektívne, resp. odhad systému.

Na rozličnej výslednej kvalite prenosu hrajú dôležitú rolu aj použité kodeky.

3.1 Nepriaznivé javy

Sú javy, ktoré spôsobujú degradáciu výslednej kvality a preto je potrebné ich vplyv minimalizovať alebo eliminovať. Vznikajú v reálnych podmienkach pri prenose dát. Súvisia s použitým kodekom, pretože jednotlivé kodeky sa s nimi inak vysporiadajú. Rovnaká hodnota tak môžu odlišne ovplyvniť výslednú kvalitu. Medzi najbežnejšie patria: oneskorenie paketov (*delay* alebo *latency*), stratovosť paketov (*packet loss* alebo *drop*) a kolísanie oneskorenia paketov (*jitter*).

Typické hodnoty týchto javov v rôznych druhoch sieťových technológií používaných vo VoIP sú zhrnuté v tabuľke 3.1. Ich hodnoty sú zidealizované v rámci možností danej technológie na prístupovej časti siete a v skutočnosti sú ešte ovplyvnené rôznymi faktormi, počnúc použitým kodekom, končiac vlastnosťami konkrétneho spojenia. Preto sú skôr orientačné a tabuľka slúži na ilustráciu rozdielnych kvalitatívnych vlastností týchto prenosových technológií. Hodnoty javov pre mobilné technológie sú zvlášť citlivé na použitý kodek a dané hodnoty sa vzťahujú na vlastný kodek GSM. Hodnoty pre ISDN a káblovú TV, typicky realizovanú optickými rozvodmi, sa blížia nule a nárast oneskorenia je ovplyvnený najmä procesom kódovania použitým kodekom než sieťou. [46]

Tab. 3.1: Typické hodnoty nežiadúcich javov v rozličných VoIP technológiach [44], [45], [46], [47]

Technológia	~ Oneskorenie [ms]	~ Jitter [ms]	~ Stratovosť [%]
Káblová TV	5	2	0
ADSL	15	5	0
ISDN	5	1	0
WiMAX	80	10	1
WiFi	40	20	1
GPRS	100	50	10
EDGE	50	30	5
UMTS	40	20	5

Výstupom tabuľky bolo následné vytvorenie konkrétnych profilov pre danú technológiu s príslušnými typickými hodnotami nepriaznivých javov v emulátore, no emulátor podporuje iba jeden profil pre jeden port. Preto sú tieto konfigurácie nastavené a vyexportované po jednej, viz. príloha.

3.1.1 Oneskorenie

Z anglického *delay* alebo *latency*, popisuje čas, za ktorý prejde hlas od úst zdroja po ucho poslucháča [30]. Odporúčenie ITU-T G.117 definuje pre hovor s vysokou kvalitou ako prijateľné oneskorenie do 150 ms, ktoré býva aj garantované poskytovateľmi v zmluvách SLA. Do 300 ms je kvalita akceptovateľná, vyššia je nevyhovujúca [31], [43]. Celkové oneskorenie je spôsobené viacerými jeho zložkami, ktoré je možné zhrnúť do troch typov:

- **Obslužné** – Vzniká v mieste vzniku RTP toku a v mieste jeho následného prijatia a spracovania, značný vplyv tu má kódovanie.
- **Prístupové** – Vzniká radením paketov do front smerovačov a ich následným odosielením na prístupovú linku
- **Prenosové** – Vzniká fyzickým prenosom informácii prenosovým médiom, je spôsobené obmedzenou rýchlosťou šírenia signálu v prostredí.

Konkrétne zložky oneskorenia sú: oneskorenie kódera, paketizácie hlasových dát (packetization), radenia paketov do výstupnej fronty (queuing), prístupu na sériovú linku (serialization), prenosu dát dátovou linkou (propagation), eliminácie kolísania paketov vo vyrovnávacej pamäti a dekódovania hlasových dát. [30]

3.1.2 Kolísanie oneskorenia

Alebo aj jitter. Je vypočítavaný v čase z poľa *Timestamp* (časové razítko) v RTCP paketoch. Jeho výpočet je daný vzťahom 3.1 a každý konkrétny rozdiel je daný vzťahom 3.2 .

Obidva výpočty sú kodifikované podľa RFC 1889, pričom R vyjadruje časové razítka, v čase kedy bol paket prijatý, S v čase kedy bol odoslaný a ij sú rastúce čísla paketov. Pre presné zmeranie jitteru je potrebná presná synchronizácia hodín v sieti.

$$J = J + (D_{(i-1,i)} - J)/16 \text{ [ms]}, \quad (3.1)$$

$$D_{(i,j)} = (R_j - R_i) - (S_j - S_i) \text{ [ms]}, \quad (3.2)$$

V komunikácii sú pakety na strane klienta generované v presných časových intervaloch. Vplyvom sieťových zápch, nesprávneho radenia na smerovačoch alebo chybné konfigurácie sa tento rovnomerný tok od odosielaťa naruší, oneskorenie medzi každým paketom bude iné a nie konštantné. [43]

Na vyhladenie týchto vplyvov sa používa v smerovačoch zásobník (buffer). Dočasne uchováva prichádzajúce pakety v správnom poradí. Typicky býva nakonfigurovaný na 30 až 50 ms, čo je aj bežná povolená hodnota vo VoIP sieťach [39]. Ak príde paket s väčším oneskorením ako je povolená veľkosť v bufferi, tak je zahodený. Ak je buffer nastavený zbytočne veľký (nad 100ms), tak k dôjde k väčšiemu oneskoreniu, čo sa prejaví na výslednej kvalite v konverzácii.

3.1.3 Stratovosť

Dochádza k nej v každej IP sieti a môže byť spôsobená viacerými faktormi, počnúc degradáciou signálu na sieťovom médiu až po zahľtenosť prenosového kanálu [32]. Vo VoIP však na rozdiel od bežných IP sietí nie je možné stratené pakety znovu vyslať, pretože prenos dát je vždy v čase. Stratovosť, ako aj iné nepriaznivé javy, má na každý kodek iný vplyv. Pri ojedinelej strate paketu sa používa algoritmus maskovania PLC s rôznymi technikami. [26]

- **Vkladaním** – Prázdny úsek sa vyplní tichom (nulami), šumom alebo predchádzajúcim paketom. Nahradenie do 20 ms je považované za akceptovateľné.
- **Interpoláciou** – Predĺži sa signál z predchádzajúceho paketu, prípadne nasledujúceho a výsledok je ich prienik. Takto je možné nahradiť maximálne 40 ms chýbajúceho signálu.
- **Regeneráciou** – Vychádza z dopredného zabezpečenia opravy chybovosti (*Forward Error Correction*), kedy sú najdôležitejšie časti informácie zasielané redundantne. [33]

Hodnota stratovosti by v bežnej komunikácii nemala vo VoIP sieťach prekročiť hranicu 1%, hodnota nad 1,5% je neakceptovateľná [39], [43].

3.2 Hodnotenie a meranie kvality

Ako už bolo spomenuté v úvode do tejto kapitoly, na strane účastníka je hodnotenie kvality subjektívne, jednak pretože účastník nikdy neurčí jednotlivé parametre ovplyvňujúce kvalitu hovoru a jednak pretože tie mu v praxi veľa nepovedia ako sa to prejaví vo výsledku. Subjektívna kvalita dojmu (QoE) teda určuje celkovú akceptáciu aplikácie alebo servisu (hovoru) užívateľom a jeho spokojnosť s ním. [23]

V praxi sú zavedené dva modely hodnotenia MOS a podľa R-faktoru (E-model podľa ITU-T G.107). Pričom výsledkom je u oboch číslo, ktoré podľa stupnice zodpovedá určitej kvalite a teda aj spokojnosti účastníka.

V subjektívnom meraní kvality poznáme tri kategórie, ktoré sú skúmané:

- **Listening quality (LQ)** – Označuje kvalitu, ktorú účastníci hodnotia na základe toho čo počujú.
- **Conversational quality (CQ)** – Označuje ako účastníci hodnotia ich schopnosť počuť a zároveň konverzovať počas hovoru, zahŕňajúc všetky problémy s javmi ako ozvena alebo meškanie.
- **Transmission (Talking) quality (TQ)** – Označuje kvalitu sieťového spojenia použitého na prenos hlasu. Je to miera sieťovej kvality použitej služby ku kvalite daného hovoru. [25]

Cieľom merania kvality hovoru je teda získať spoľahlivý výsledok jednej z práve uvedených druhov kvalít s použitím objektívnych alebo subjektívnych testovacích metód.

Subjektívne metódy využívané v praxi sú:

- **ACR (Absolute Category Rating)** – Skupina poslucháčov hodnotí kvalitu hovoru v špeciálne upravenej miestnosti číslicami od 0 do 5. Aby bolo hodnotenie ustálené je potrebné testovať na čo najväčšom množstve poslucháčov. [25]
- **DCR (Degradation Category Rating)** – Poslucháči porovnávajú pôvodný signál a signál degradovaný po priechode telekomunikačným reťazcom. Výsledkom je skóre DMOS. [27]
- **CCR (Comparison Category Rating)** – Poslucháči porovnávajú originálny a degradovaný signál. Tie sú im však prehrávané v náhodnom poradí a s pomocou stupnice 3 až -3 určujú, či im je signál lepší alebo horší než predchádzajúci. Výsledkom je skóre CMOS. [26]

Objektívne metódy pracujú najčastejšie na princípe porovnania pôvodného a degradovaného signálu, alebo priamym výpočtom pomocou algoritmov z degradovaného signálu. Najznámejšie sú:

- **PSQM (Perceptual Speech Quality Measure)** – Staršia, už nepoužívaná verzia, definovaná podľa odporúčenia ITU-T P.861, je v súčasnosti nahradená PSQM+. Funguje na princípe porovnania. Neráta s QoS a nepriaznivými parametrami (oneskorenie, stratovosť,...). Hodnotí kvalitu hlasu telefónneho pásma 300 až 3400 Hz v použitých hlasových kodekoch. [28]
- **PAMS (Perceptual Analysis Measurement System)** – Podobná PSQM. Navrhnutá a využívaná firmou British Telecom. [26]
- **PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality)** – Je založená na psychoakustickom modeli, hodnotení vzorkov z PSQM+ a metóde rekurentnej časovej korelácie z PAMS. V dnešnej dobe je celosvetovo používaná výrobcami na hodnotenie kvality. [26], [29]
- **POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Assessment)** – Je nová metóda, definovaná v odporúčení ITU-T P.863. Pri jej vzniku bol braný ohľad na vlastnosti nových kodekov. Umožňuje meranie v telefónnom pásme 0,3-3,4 kHz i v širokom pásme 50 Hz až 14 kHz. [26]

3.2.1 Hodnotiaci model MOS

Model hodnotenia, ktorý je pôvodne definovaný v odporúčení ITU-T P.10/G.100 ako priemer hodnôt z preddefinovanej škály podľa názoru subjektov, ktorí ich priradujú telefónnemu prenosu, obsahujúcemu rozhovor alebo iba materiál na počúvanie. Na rozdiel od subjektívneho hodnotenia (test ACR), je ale aj faktorom MOS vyjadrené hodnotenie od objektívnych metód ako *PESQ*, *POLQA*. V súčasnosti je to najuniverzálnejší model hodnotenia kvality vo VoIP. [27]

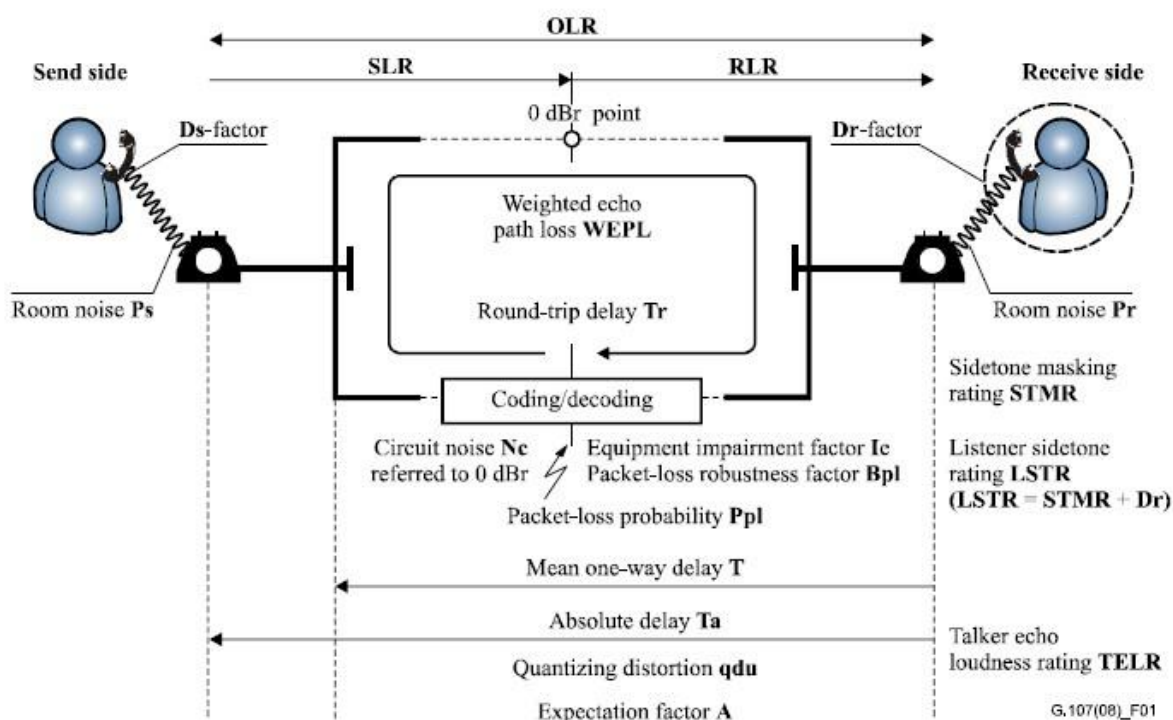
Podľa odporúčenia ITU-T P.800 sa zaviedli identifikátory, ktoré popisujú oblasť použitia. Pričom N značí úzkopásmové (narrow-band), W širokopásmové (wideband), *LQ*, *CQ*, *TQ* už boli spomenuté vyššie, *S* označuje subjektívne, *O* objektívne a *E* odhadnuté (estimated) hodnotenie. V tabuľke 3.2 sú vzťahy medzi príslušnou spokojnosťou účastníka s kvalitou hovoru a tomu odpovedajúcim faktorom MOS.

Tab. 3.2: MOS faktor [25, 26]

Vyjadrenie kvality užívateľom	Hodnotenie QoS	MOS (ITU)	MOS (ACR test)
Veľmi spokojný	Veľmi dobrá	4,3 – 5,0	4,1 – 5,0
Spokojný	Dobrá	4,0 – 4,3	3,7 – 4,1
Niektorý užívatelia spokojní	Uspokojivá	3,6 – 4,0	3,4 – 3,7
Veľa užívateľov nespokojných	Neuspokojivá	3,1 – 3,6	2,9 – 3,4
Takmer všetci nespokojný	Veľmi neuspokojivá	2,6 – 3,1	2,4 – 2,9
Neodporúčaná	Nevyhovujúca	1,0 – 2,6	1,0 – 2,4

3.2.2 Hodnotenie R-faktor

Je výslednou hodnotou tzv. E-modelu, ktorý definuje odporúčenie ITU-T G.107. Sú v ňom započítané všetky faktory, ktoré ovplyvňujú hlasovú kvalitu (obrázok 3.1). Tie sú podrobne definované v ITU-T G.109 a ich typický rozsah je v tabuľke 3.3.



Obr. 3.1: Parametre E-modelu [34]

Výpočet R-faktoru je daný vzťahom:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e\text{-eff}} + A,$$

R_0 – základný koeficient pomeru signál – šum

I_s – súčet všetkých faktorov, ktoré počas prenosu negatívne ovplyvňujú hovor

I_d – vplyv meškania na kvalitu hovoru

I_{e-eff} – „efektívny faktor“ vplyvu koncových zariadení na kvalitu hovoru (napr. použité kodeky)

A – zvyhodňujúci faktor (závisí od prístupnosti služby užívateľovi). [34]

Tab. 3.3: Parametre E-modelu [34]

Parameter	Skratka	Jednotka	Predvolená hodnota	Povolený rozsah
Send loudness rating	SLR	dB	8	0 ... +18
Receive loudness rating	RLR	dB	2	−5 ... +14
Sidetone masking rating	STMR	dB	15	10 ... 20
Listener sidetone rating	LSTR	dB	18	13 ... 23
D-Value of telephone, send side	Ds	–	3	−3 ... +3
D-Value of telephone, receive side	Dr	–	3	−3 ... +3
Talker echo loudness rating	TELR	dB	65	5 ... 65
Weighted echo path loss	WEPL	dB	110	5 ... 110
Mean one-way delay of the echo path	T	ms	0	0 ... 500
Round-trip delay in a 4-wire loop	Tr	ms	0	0 ... 1000
Absolute delay in echo-free connections	Ta	ms	0	0 ... 500
Number of quantization distortion units	qdu	–	1	1 ... 14
Equipment impairment factor	Ie	–	0	0 ... 40
Packet-loss robustness factor	Bpl	–	4.3	4.3 ... 40
Random packet-loss probability	Ppl	%	0	0 ... 20
Burst ratio	BurstR	–	1	1 ... 8
Circuit noise referred to 0 dBr-point	Nc	dBm0p	−70	−80 .. −40
Noise floor at the receive side	Nfor	dBmp	−64	–
Room noise at the send side	Ps	dB(A)	35	35 ... 85
Room noise at the receive side	Pr	dB(A)	35	35 ... 85
Advantage factor	A	–	0	0 ... 20

Hodnoty I_e (Equipment impairment factor) a Bpl (Packet-loss robustness factor) sú stanovené pre rozličné hlasové kodeky v odporúčení ITU-T G.113 Ap.I. a neskôr aj v dodatkovej správe ITU-T SG12 D106.

Výsledná hodnota R-faktoru má rozsah od 0 do 100 a môže byť určená pre kvalitu počutia (LQ) alebo konverzačnú (CQ) viz vyššie. V tabuľke 3.4 je zobrazená príslušná hodnota R-faktoru a jej odpovedajúca kvalita.

Tab. 3.4: R-faktor [26, 34]

Vyjadrenie kvality užívateľom	Hodnotenie QoS	R-faktor
Veľmi spokojný	Veľmi dobrá	90 -100
Spokojný	Dobrá	80 - 90
Niektorý užívatelia spokojní	Uspokojivá	70 - 80
Veľa užívateľov nespokojných	Neuspokojivá	60 -70
Takmer všetci nespokojný	Veľmi neuspokojivá	50 -60
Neodporúčaná	Nevyhovujúca	0 -50

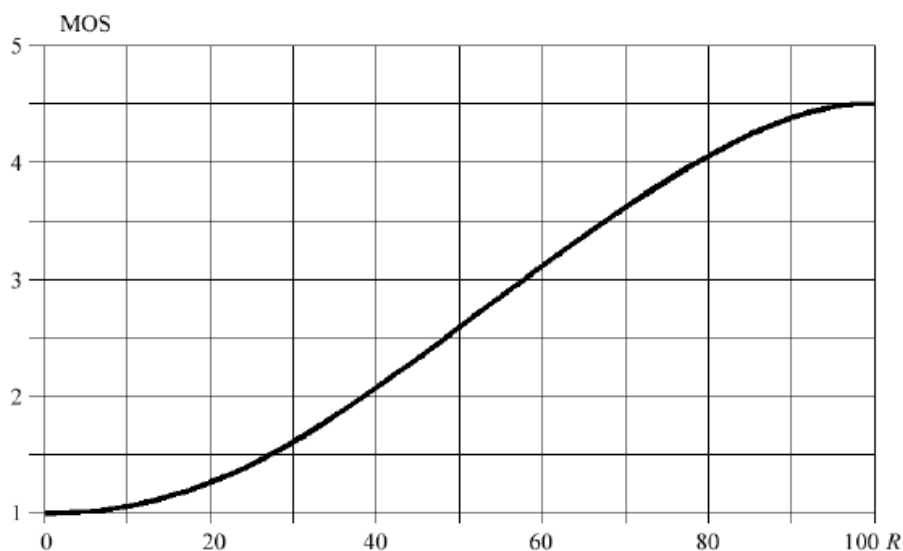
Odporúčenie G.107 obsahuje aj kalkulačtor R-faktoru, ktorý je verejnosti prístupný zo stránky:

<http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/calcul.php> (3.1)

Medzi hodnotou MOS a R-faktorom existuje prepočet podľa ITU-T G.107, ktorý je znázornený graficky v diagrame na obrázku 3.1. Hodnota MOS je pre $R < 0$ až $100 >$ rovná:

$$MOS = 1 + 0,035R + R(R - 60)(100 - R) \cdot 7 \cdot 10^{-6}$$

pre $R \geq 100$ je $MOS = 4,5$ a pre $R \leq 0$ je $MOS = 1$. [34]



Obr. 3.1: Diagram pre prevod hodnôt MOS do R-faktoru [34]

3.3 Kodeky

Ich úlohou je kódovanie resp. dekódovanie multimedialných dát za účelom prenosu, uloženia, prehratia alebo zašifrovania. Rozlišujeme audio, video a textové kodeky, ktoré môžu realizovať kompresiu stratovú alebo bezstratovú.

Ako už bolo spomenuté v úvode do 3. kapitoly, tak použité hlasové kodeky majú vplyv na kvalitu hovoru vo VoIP sieti. Líšia sa náročnosťou na šírku prenosového pásma, výpočtovými nárokmi, dosiahnuteľnou kvalitou atď. Ich prehľad je v tabuľke 3.5. Každé zariadenie alebo program typicky podporuje viacero hlasových kodekov a pred začatím komunikácie sa dohodnú na použití konkrétneho kodeku pomocou signalizačného protokolu.

Hlasové kodeky je možné deliť aj na základe prenosového pásma na:

- Úzkopásmové (Narrowband) – NB 300 – 3400 Hz / $f_{vz} = 8$ kHz
- Širokopásmové (Wideband) – WB 50 – 7000 Hz / $f_{vz} = 16$ kHz
- „Super“ širokopásmový (Super WB) 50 – 14 000 Hz / $f_{vz} = 32$ kHz
- Hi-Fi audio pásmo (Full band) – FB 20 – 20 000 Hz / $f_{vz} = 48$ kHz. [26]

Tab. 3.5: Náročnosť hlasových kodekov na šírku prenosového pásma [35]

Informácia o kodeku				Náročnosť na šírku prenosového pásma (bandwidth)				
Kodek a Bit Rate (Kbps)	Veľkosť vzorku (Bytes)	Vzorkovací interval (ms)	Mean Opinion Score (MOS)	Veľkosť hlas. záťaž (Bytes)	Veľkosť hlas. záťaž (ms)	Paketov za sekundu (PPS)	Bandwidth MP alebo FRF.12 (Kbps)	Bandwidth Ethernet (Kbps)
G.711 (64 Kbps)	80	10	4,10	160	20 ms	50,0	82,8	87,2
G.729 (8 Kbps)	10	10	3,92	20	20 ms	50,0	26,8	31,2
G.723.1 (6.3Kbps)	24	30	3,90	24	30 ms	33,3	18,9	21,9
G.723.1 (5.3Kbps)	20	30	3,80	20	30 ms	33,3	17,9	20,8
G.726 (32 Kbps)	20	5	3,85	80	20 ms	50,0	50,8	55,2
G.726 (24 Kbps)	15	5	-	60	20 ms	50,0	42,8	47,2
G.728 (16 Kbps)	10	5	3,61	60	30 ms	33,3	28,5	31,5
G722_64k (64 Kbps)	80	10	4,13	160	20 ms	50,0	82,8	87,2

3.3.1 Kodek G.711

Je bezkompresný a najkvalitnejší hlasový kodek, ktorý je používaný aj PSTN a ISDN sieťami. Vďaka tomu, že nepoužíva kompresiu má aj najnižšie oneskorenie. No je najnáročnejší na šírku prenosového pásma (*bandwidth*) – 64Kbps.

Je založený na pulzne kódovej modulácii hlasových frekvencií. Štandardizovaný bol v rovnomennom odporúčení v 1988 roku, vyvinutý bol už v sedemdesiatych rokoch. Vzorkuje s frekvenciou 8000 vzorkov za sekundu pri 8 bitoch na vzorku. Využíva logaritmické kódovanie, čo umožňuje zakódovať vzorky s nižšou intenzitou zvuku, na ktoré je aj ľudské ucho citlivejšie, presnejšie. Existujú jeho dve verzie, používajúce odlišné kódovacie funkcie:

- **A-law** – Verzia používaná v celom svete okrem Ameriky, na rozdiel od μ -law pracuje s dynamickejšim rozsahom logaritmickej stupnice výsledkom čoho je, že zvukové artefakty sú lepšie potlačované.
- **μ -law** – Je používaný na Americkom kontinente. [1]

Podľa odporúčenia je v medzinárodnej komunikácii využitý A-law, ak ho jedna z komunikujúcich strán používa. [36]

V roku 2008 vyšlo rozšírenie G.711.1, ktorého hlavným cieľom je rozšírenie na široké pásmo, obsahuje štyri režimy a má nižšie oneskorenie.

3.3.2 Kodek G.723.1

Je komerčný a pomerne rozšírený hlasový kodek vydaný v roku 1996 [14]. Používa sa hlavne v linkách (sieťach) s veľmi obmedzeným dátovým tokom. Používa dva odlišné algoritmy: MP-MLQ s dátovým tokom **6,3 kbit/s** a ACELP s dátovým tokom **5,3 kbit/s**. Vzorkovacia frekvencia je 8 kHz. Kvalita tohto formátu býva hodnotená ako citeľne nižšia v porovnaní s G.711. Pôvodne bol navrhnutý pre štandard H.324 na použitie vo videotelefónoch pre klasické telefónne linky. Celý názov tohto formátu je "Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s". Použitie formátu G.723.1 môže vyžadovať zakúpenie licencie. [22]

3.3.3 Kodek G.726

Bol vydaný v roku 1990 a je pomerne rozšírený a podporovaný. Je určený na konverziu formátu G.711 (64 kbit/s, 8 kHz) do a z dátových tokov 40, 32, 24 alebo 16 kbit/s. Základné využitie G.726 s dátovými tokmi 16 a 24 kbit/s je pre preťažené kanály prenášajúce hlas vo formáte G.711. Najčastejšie sa používa s tokom **32 kbit/s**. Formát G.726 nahradil staršie formáty G.721 a G.723 (iný - starší kodek než G.723.1), ktoré obsahovali čiastkové definície, neskôr spojené do G.726. (G.721 definoval audio kódované s ADPCM pri 32 kbit/s

a G.723 pri 40 a 24 kbit/s). Celý názov tohto tohto kodeku je "40, 32, 24, 16 kbit/s Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)". Formát G.726 je možné používať bezplatne. [22]

3.3.4 Kodek G.729

Bol definovaný v roku 1996 a spomedzi najpoužívanejších hlasových kodekov má veľmi nízku náročnosť na šírku prenosového pásma – 8 Kbps. Vzorkuje signál na frekvencii 8 Khz, do 10 ms dlhých rámcov, ku ktorým pridáva ešte 5 ms rezervu. Je veľmi komplexný a využíva metódu *CS-ACELP* (Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction), ktorá zahŕňa použitie zložitého schematického postupu pomocou algoritmov. [37]

Postupne boli definované viaceré verzie tohto kodeku označené písmenami abecedy. Najznámejšie sú:

- **G.729A** – Zjednodušuje kódovací mechanizmus, je teda menej náročný na výpočtový výkon.
- **G.729B** – Obsahuje VAD (Voice Activity Detection) modul, dokáže tak detekovať hlasovú aktivitu v signále a ošetriť ticho.
- **G.729AB** – Kombinuje obidve predchádzajúce verzie a je najpoužívanejšou verziou tohto kodeku.

4. Praktická časť

4.1 Použité prístroje a ich nastavenia

Hlavnou náplňou tejto práce je simulácia scenárov VoIP hovorov pomocou určených zariadení, skúmanie a analýza vplyvu nežiaducich javov na ne. To bolo uskutočnené pomocou testera firmy Spirent TestCenter C1, emulátora Spirent, EXFO prenosného testera a PC s ústredňou Asterisk. Realizovanými prvotnými testami bolo overené meranie pomocou jednotlivých prístrojov, hodnotenie modelov MOS a E-modelu ku vzťahu k použitému kodeku i nežiaducemu javu a takisto preverené schopnosti zadaných zariadení. Ďalšími testami boli simulované a analyzované reálne podmienky pre hovory medzi softwarovou ústredňou Asterisk a týmito zariadeniami. Zaradením ústredne do testov sa malo priblížiť k reálnemu charakteru VoIP premávky a tak zvýšiť výpovednosť tejto práce.

4.1.1 Spirent TestCenter C1 s kartou 4x1GE

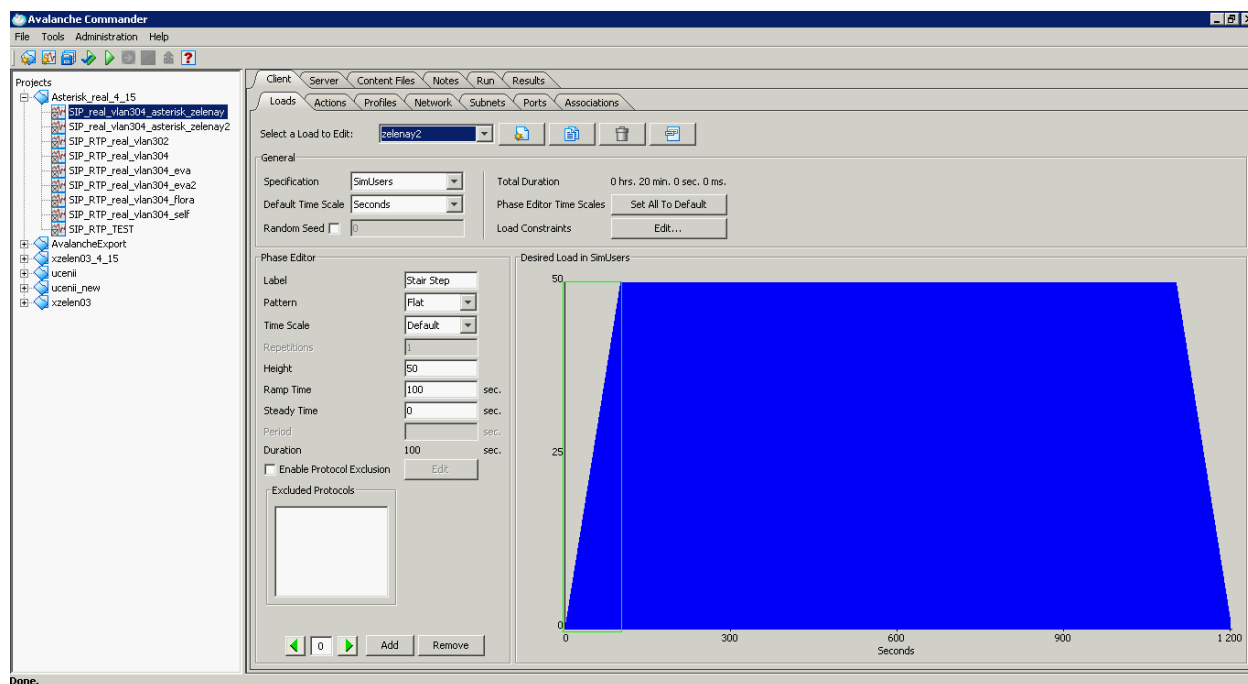
Umožňuje komplexné testovanie sieťovej infraštruktúry na vrstvách L2 až L7 vrátane generovania reálneho prenosu a simulovať chovanie tisícov užívateľov a takisto aj aplikačných serverov. Simuluje teda stranu klienta (klientov) ale aj servera. Pre každú stranu sú v grafickom rozhraní programu samostatné konfiguračné karty. Tento program na obsluhu je Avalanche Commander a je pravidelne aktualizovaný firmou Spirent. Testy boli realizované s verziou 4.0 a neskôr 4.15, ktorá ale neodstránila jednu kritickú chybu, ktorá bola objavená a je popísaná ďalej v texte. Okrem neho je k zariadeniu priložená sada podporných aplikácií (Attack Designer, Results Reporter a iné).

TestCenter C1 obsahuje štyri porty, ktoré je možné použiť k simulácii i generovaniu prenosu a ktoré sú ovládané pomocou grafického užívateľského prostredia. Dokáže generovať hlasové (VoIP), video (streaming, VoD) a dátové záťaže. Podporuje protokoly IPv4 a IPv6, HTTP, HTTPS, FTP, VoIP/SIP, RTSP/RTP, RTMP, SMTP/POP3/MAP4, DNS, Telnet, PPPoX, 802.1Q VLAN tagging, Q-in-Q tagging, NAC, IPSEC, RADIUS a ďalšie. K tomu, aby bolo možné konfigurovať test pre jeden z protokolov, ktoré nie sú v základnej licencií, je potrebné vlastniť na daný protokol licenciú, ktorá musí byť dodatočne dokúpená k zariadeniu.

Súčasťou sú aj detailné štatistiky, či už grafické alebo tabuľkové. A takisto aj kompatibilita s programom Wireshark, kde je možné si prezerať konkrétne pakety.

Testovacia záťaž je nastaviteľná podľa požiadaviek, vrátane jej priebehu a názorne zobrazená v grafe viz obrázok [4.1](#), kde sa v ľavej časti nachádza menu s vytvorenými profilmi

a v centrálnej časti hore jednotlivé karty na konfiguráciu strany klienta, servera, beh testu, výsledky a poznámky.



Obr. 4.1: Rozloženie zátiaže v karte klienta

Počas simulácie v čase vykresľuje množstvo priebehov a závislostí podľa voľby užívateľa (pre testy v rámci tejto práce to bola voľba QoE R-faktoru).



Obr. 4.2: Spirent TestCenter C1

Jeho obsluha a nastavovanie, sa po fyzickom prepojení portov a oboznámení sa s obsluhou, bola realizovaná cez VPN pripojenie na lokálnu školskú sieť a následne pripojením na vzdialenú plochu virtuálneho počítača bežiacom na serveri.

Na realizáciu cieľa tejto práce boli realizované viaceré skúšobné testy a následne výskumné, ktorých výsledky sú predmetom práce. Tieto testy boli dvojakého charakteru, prvotne spúšťané s cieľom preveriť schopnosť testera simulovať obidve strany VoIP prenosu (klient a server), neskôr bola nasadená softwarová ústredňa Asterisk s cieľom preveriť a nasimulovať reálny charakter VoIP prenosu.

4.1.2 Spirent MAUI 2-BLADE Emulátor

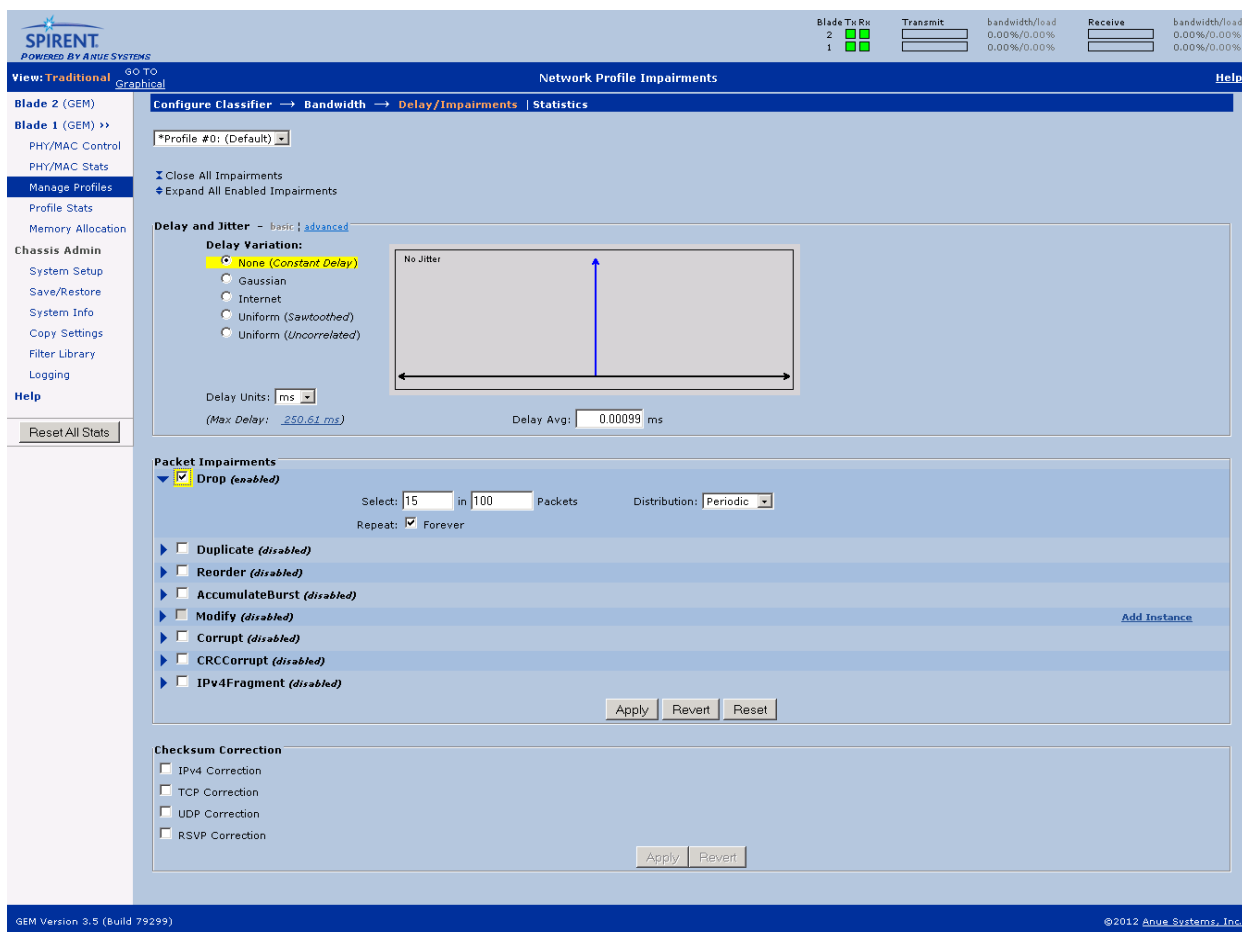
Ide o typ AS-MAUI-B a je to tzv. GEM (*Gigabit Ethernet Multi-Profile*) sieťový emulátor. Umožňuje testovať produkty a sieťovú premávku proti nežiaducim javom, ktoré vznikajú v IP sieťach. Obsahuje dva porty nazvané *Blade 1* a *Blade 2*. Podporuje vytváranie vlastných profilov a podrobné sledovanie štatistík. To je možné prostredníctvom HTML rozhrania po pripojení sa na jeho IP adresu. Primárne sa na ňom dajú nastaviť javy ako oneskorenie paketov (*delay*), zmena kolísania oneskorenia (*jitter*), zahadzovanie tj. stratovosť paketov (*packet loss*) a ďalej zmena poradia, duplikovanie, poškodenie CRC súčtov a poškodzovanie bitov.



Obr. 4.3: Spirent MAUI2-BLADE Emulátor

Pomocou emulátora bolo postupne počas testu na testery C1 nastavované zahadzovanie paketov s postupným zvyšovaním, čo sa prejavilo na výslednom priebehu na testery. Následne v ďalšom teste bol sledovaný vplyv oneskorenia, ktoré sa však pri konštatnej hodnote na testery C1 neprejavilo a po preskúmaní výsledkov vo *Wiresharku* sa prišlo k zisteniu, že hodnota *Timestamp* v RTCP paketoch bola stále nulová. Táto chyba bola nahlásená vedúcemu, ktorý ju následne reportoval dodávateľovi. Oneskorenie bolo teda zamerané neplánovane pomocou EXFO prenosného testera, no nakoľko cieľom tejto práce je meranie vplyvu nežiaducich javov na kvalitu, a oneskorenie je významný jav, tak jeho neanalyzovanie by bolo neuspokojivé k výsledku práce. Nakoniec bolo realizované meranie jitteru popísané samostatnej kapitole.

Užívateľsky nenáročné HTML rozhranie, ktorým sa emulátor konfiguruje je na obrázku 4.4. V ľavej časti sa nachádza menu s voľbou aktuálneho portu (*Blade*). V pravej hornej časti je zelenými štvorčkami znázornené, že port nemá aktivovaný žiaden jav (modrá značí prítomnosť javu, červená chybu) a vedľa je dynamická štatistika percentuálnej zaťaženia daného portu (aktuálne nulová).



Obr. 4.4: Grafické rozhranie konfiguácie emulátora Spirent

Samotné nastavenie požadovaného javu je vidieť v centrálnej časti, kde sa jednoducho zakliknutím a zapísaním hodnôt rozsahov zvolia požadované parametre (aktuálne 15% zahadzovanie – stratovosť s periodickým filtrom, ostatné javy sú deaktivované).

4.1.3 EXFO FTB-1 860G NetBlazer prenosný tester

Podporuje jak metalické, tak aj optické pripojenia káblov. Dokáže simulovať VoIP spojenie s rozličnými použitými hlasovými kodekmi, no na rozdiel od Spirent C1 iba jedno a fyzicky na konkrétny VoIP telefón. Výsledky zobrazuje v prehľadnej štatistike.



Obr. 4.5: EXFO FTB-1 860G NetBlazer prenosný tester

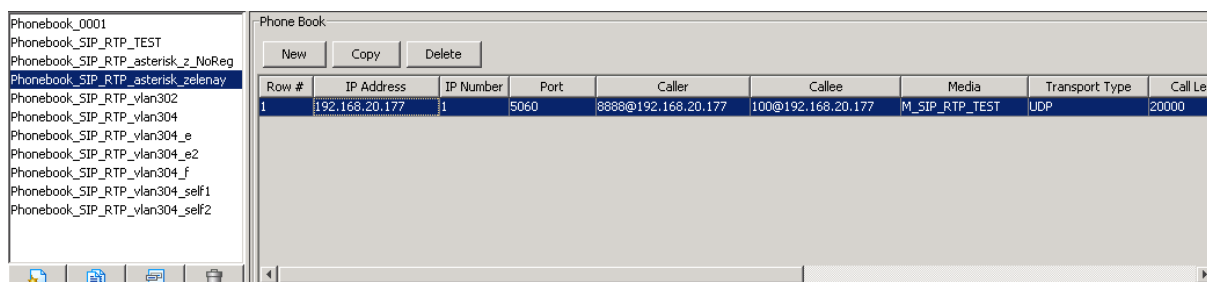
Týmto testerom boli analyzované vplyvy rastúceho oneskorenia, nastavovaného na emulátore, na kvalitu hovoru u dvoch typických kodekov, tých istých ako aj v teste so Spirent C1. Testovanie ale na rozdiel od práce s C1 už prebiehalo fyzicky v laboratóriu a jednalo sa iba o realizáciu jedného hovoru a tak výsledky nie sú celkom presné v porovnaní s priemerom z veľkého množstva hovorov ako u C1.

4.2 Realizácia konkrétnych testov

4.2.1 Testy stratovosti paketov

Účelom tohto testu bolo overenie nežiaduceho vplyvu stratovosti paketov na výslednú kvalitu (hodnotenie MOS a R-faktor), ale bez použitia ústredne ako reálneho prvku na druhej strane. Test bol realizovaný najprv na Spirent Test Centri C1 a potom dodatočne na EXFO prenosnom testerí.

Nastavený bol konštantný priebeh záťaže, 1100 účastníckych spojení a pracovalo sa s profilmi klienta aj servera, kde bol postupne nakonfigurovaný príslušný protokol k VoIP signalizácii – SIP, ktorý má výrobca, tj. firma Spirent v aplikácii v podobe rozšírených nastavení nazvaný SIPng. V profile klienta bol vytvorený tzv. *Phonebook*, kde bolo nastavené číslo a klapky pre volajúceho a volaného a príslušné parametre pre zrealizovanie hovoru. Tu bola nadefinovaná aj dĺžka hovoru, ktorá bola nastavená na minimum 10 sekúnd a maximum 30, viz obrázok 4.6.



Obr. 4.6: Phonebook v konfigurácii klienta

V karte servera bol nadefinovaný tzv. *SIPng endpoint*. Ďalej bolo nastavené v oboch stranách (klient a server) použitie RTP protokolu na prenos hlasových dát, kde bol zvolený 30 sekundový lineárny (PCM), 8000 Hz, 16-bit, mono .wav súbor obsahujúci ľudskú komunikáciu v anglickom jazyku. Následne bol vybraný požadovaný hlasový kodek (viz obr. 4.7), ktorý bol v ďalšom teste zmenený podľa zamerania testu.

General

Select a Server Profile to Edit: **S_SIP_RTP_asterisk_zelenay**

Description: **SIP_RTP_asterisk_vlan**

Type: **SIPMG_Endpoint**

Connection Properties

Port: **5060** ☐ Enable GRE

ToS (Hex): ☐ Ignore ARP/NDP Requests

MSS:

Endpoint Properties

Endpoint SIP URI: **100@192.168.20.177**

Transport Layer: **UDP**

Probability of Busy Calls: **0** %

Off Hook Time: **0** ~ **0** ms

Call Holding Time: **20000** ~ **400000** ms

Timer T1: **500** ms

Timer T2: **4 000** ms

First RTP Port: **10000**

☒ Register Enabled

Registrar IP: **192.168.20.177**

Registrar Port: **5060**

Expiration Timeout: **3600** sec

Password:

☒ Unregister All Before Register

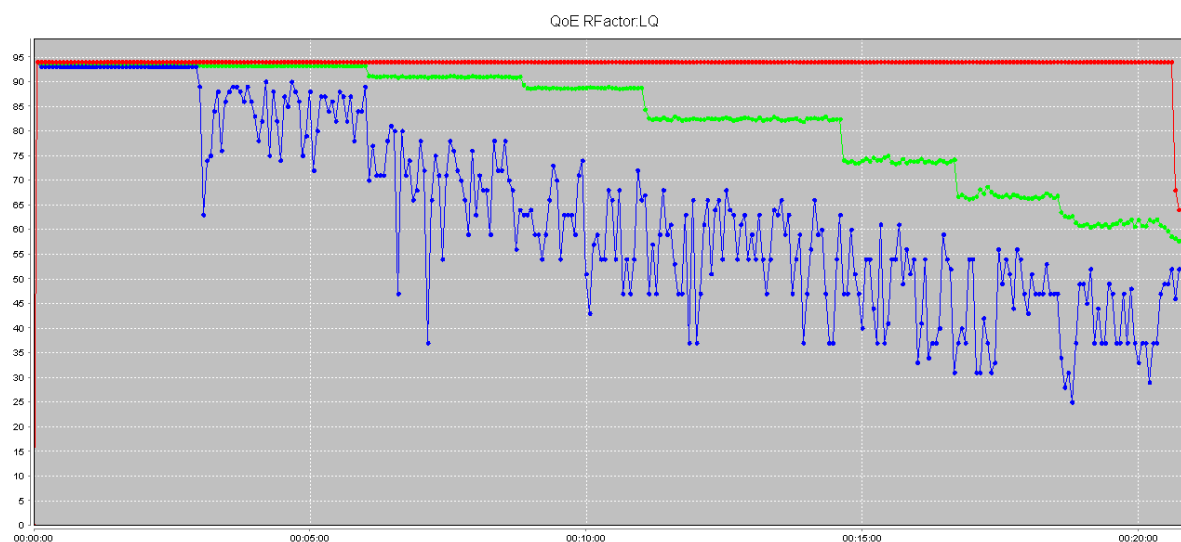
Media Properties

Selected	Name	Description	
☐	G.729	G.729AB	New
☐	723	723	Delete
☐	726-32	g726 32kbps	
☒	G.711	G.711a	Edit

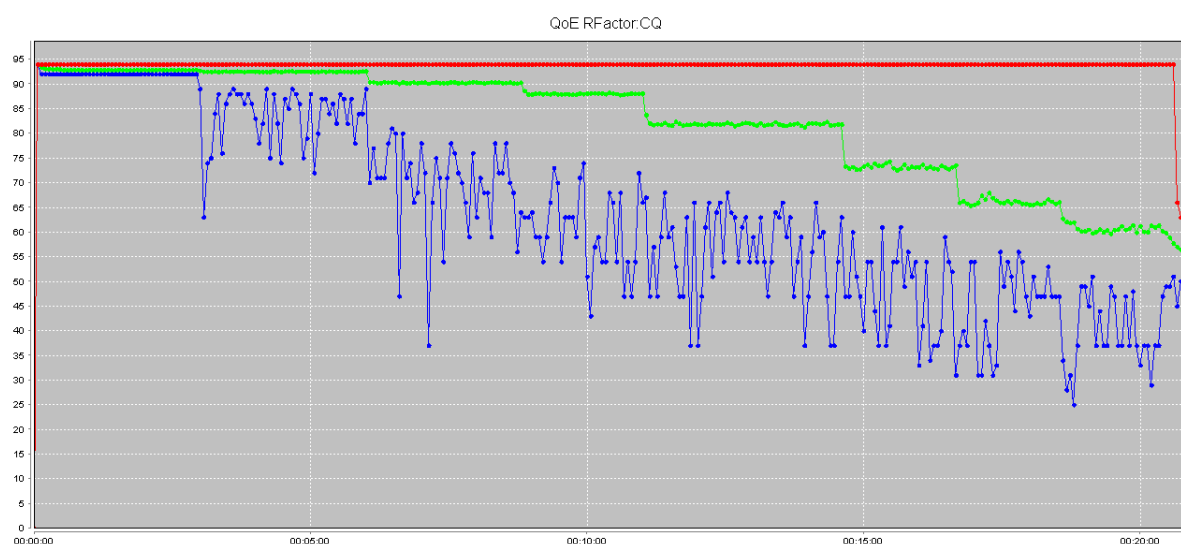
Obr. 4.7: Karta profilu na strane Servera s typom SIP Endpointu a kodekmi

Pre simuláciu bola nastavená príslušná podsieť a asociované profily s portami. Výsledkom bol priebeh grafu R-faktor LQ a CQ kvalít. Hodnotenie MOS a ani voľbu hodnotiaceho algoritmu tester nepodporuje.

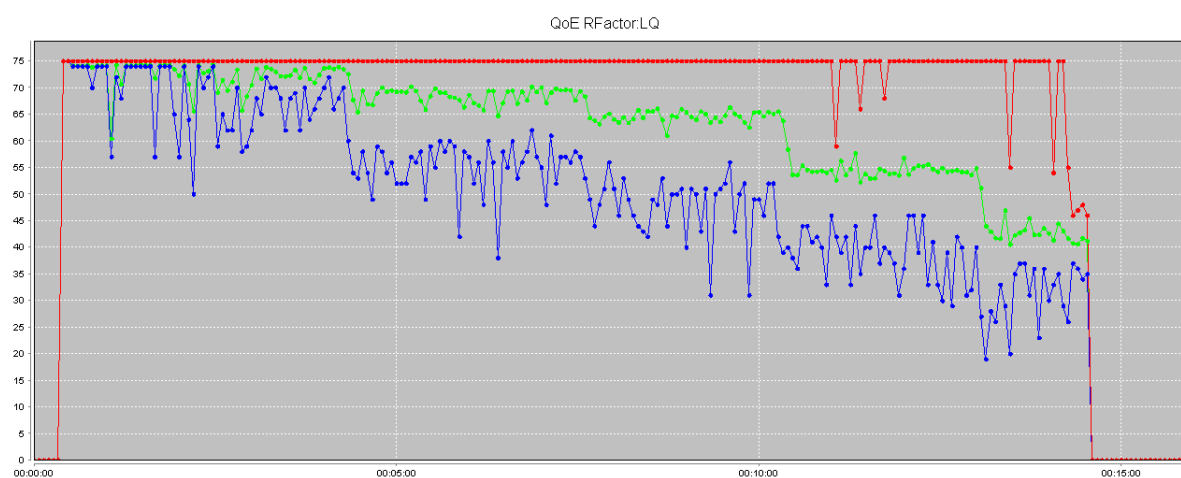
Na test boli zvolené, rovnako aj na ďalšie, tri základné kodeky – G.711, G.723.1 a G.729. Ako bolo spomenuté vyššie pre test na testeri Spirent bola nakonfigurovaná simulácia až s 1100 spojeniami, aby bola minimalizovaná odchýlka výslednej hodnoty priemeru a zároveň využitý potenciál zariadenia nasimulovať veľké množstvo pripojení. Na emulátore bolo postupne zvyšované percento zahadzovania paketov, pričom bol použitý periodický filter. Iné nežiaduce javy neboli prítomné, aby sa dokázal prejav samotnej stratovosti na výslednú kvalitu. Testy trvali dvadsať minút a počas ich priebehov sa menili údaje v štatistike, po ich ukončení bola vygenerovaná správa. Výsledný priebeh testov hodnotenia R-faktoru (LQ a CQ) pre zvolené kodeky je vidieť na obrázkoch 4.8 až 4.13. Pričom zelená je priemerná zmeraná hodnota, modrá minimálna a červená ideálna to jest maximálna.



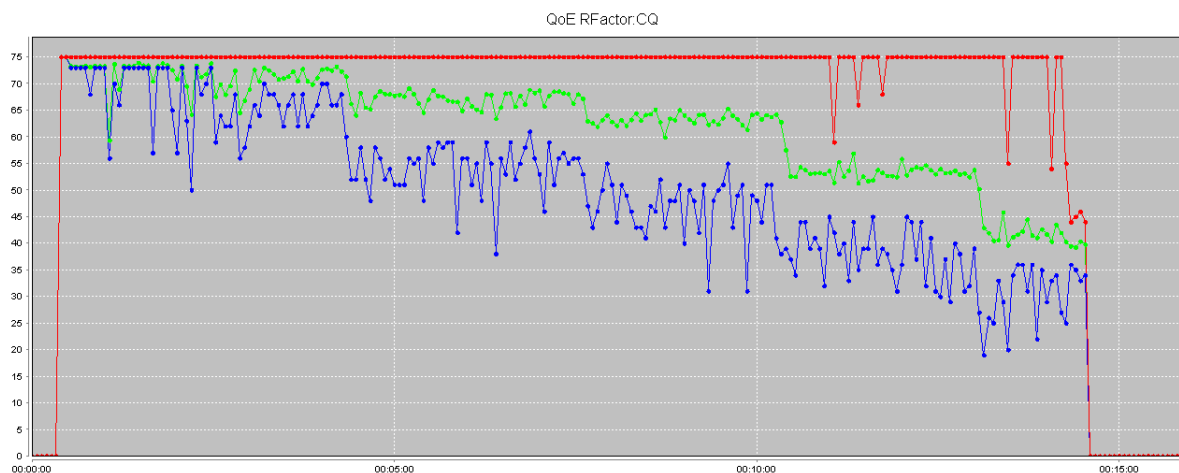
Obr. 4.8: R-faktor LQ pre G.711a



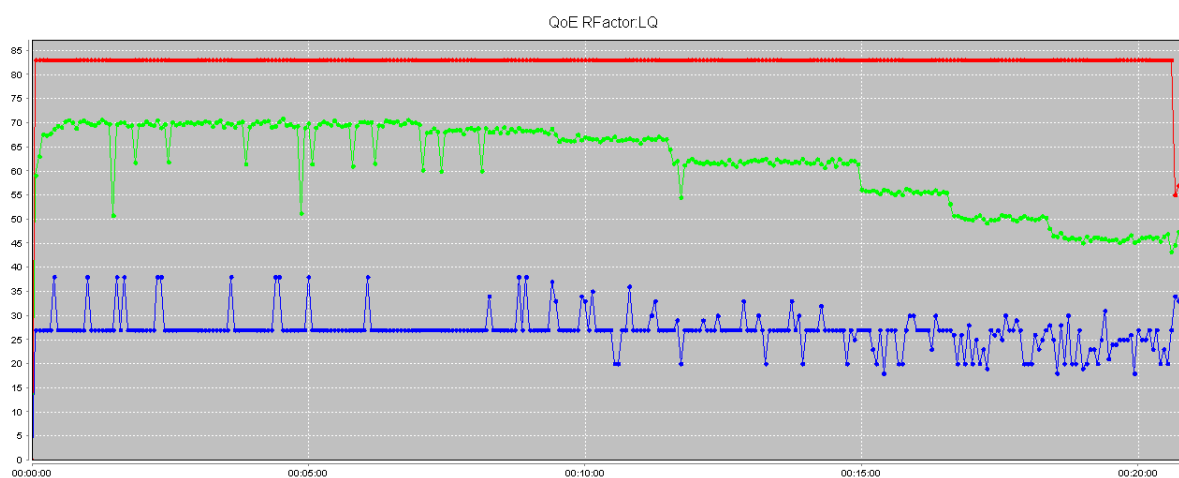
Obr. 4.9: R-faktor CQ pre G.711a



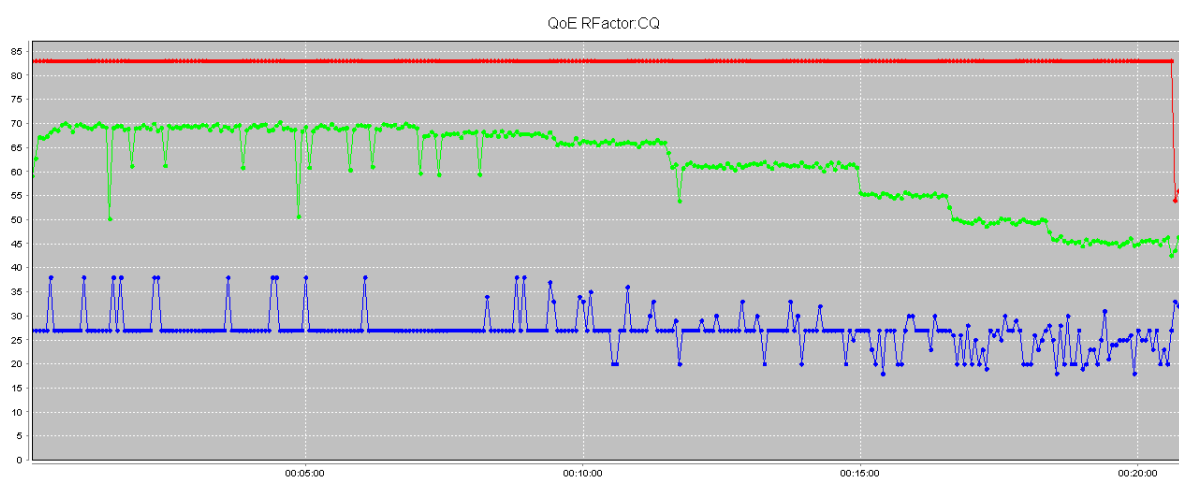
Obr. 4.10: R-faktor LQ pre G.723.1



Obr. 4.11: R-faktor CQ pre G.723.1



Obr. 4.12: R-faktor LQ pre G.729AB



Obr. 4.13: R-faktor CQ pre G.729AB

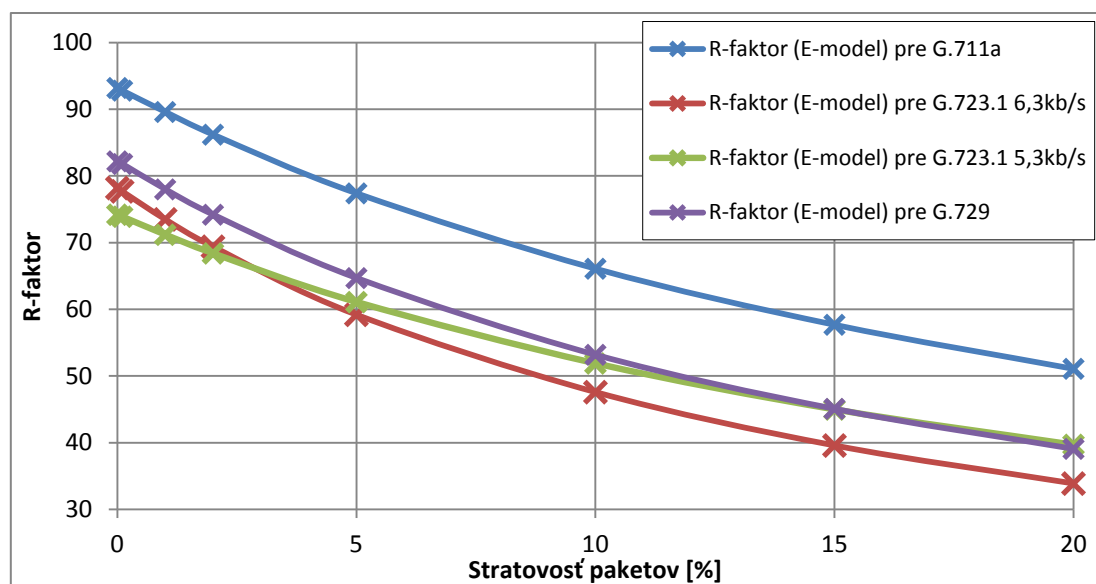
Z vyššie zobrazených grafov bola postupne počas testu odčítavaná zmeraná hodnota, ktorá pripadala na práve nastavenú hodnotu stratovosti paketov na emulátore. Tie boli potom porovnané s hodnotami vypočítanými podľa E-modelu, pričom jediné hodnoty, ktoré boli

zmenené vo výpočte sú, na emulácii nastavené nulové oneskorenie a faktor Ppl vyjadrujúci percentuálnu stratovosť paketov (viz tabuľka 3.3). Okrem nich bolo pre presný výpočet kalkulátoru (odkaz stránky 3.1) potrebné dosadiť správny faktor Ie a Bpl (viz tabuľka 3.3), ktorých hodnoty pre konkrétne kodeky sa líšia a sú určené v odporúčení ITU-T G.113 Ap.I. a neskôr aj v správe ITU-T SG12 D106, ktorá rozširuje tieto parametre pre rôzne iné kodeky a podmienky. No napriek tomu nebolo možné z týchto správ presne vybrať hodnoty, pretože v Sprint C1 testerí sú verzie kodekov buď nepresne definované (G.723.1 nie je určený či sa jedná o 5,3 alebo 6,3 kb/s) alebo mal k dispozícii inú verziu (obsahuje iba G.729AB, ktorá v odporúčeníach nemá stanovené hodnoty). Aj vzhľadom k týmto faktom došlo pravdepodobne k menším odchýlkam a nie je známe aké hodnoty faktorov tester do kalkulácie R-faktoru počas testov dosádza.

Ostatné položky z tabuľky mali ponechané svoje implicitne nastavené hodnoty, čo je pravdepodobne takisto jeden z faktorov ovplyvňujúcich výsledné odchýlky v zameranom výsledku a vykalkulovanom, no ich presné zistenie nebolo možné realizovať. Porovnanie kodekov pre rôzne hodnoty stratovosti daných E-modelom je v tabuľke 4.1 a k nej odpovedajúcemu grafu (obr. 4.14).

Tab. 4.1: Zrovnanie kodekov R-faktorom podľa stratovosti

Stratovosť paketov [%]	R-faktor (E-model) pre G.711a	R-faktor (E-model) pre G.723.1 6,3kb/s	R-faktor (E-model) pre G.723.1 5,3kb/s	R-faktor (E-model) pre G.729
0,0	93,2	78,2	74,2	82,2
0,1	92,8	77,7	73,9	81,8
1,0	89,6	73,5	71,2	78,0
2,0	86,2	69,4	68,4	74,2
5,0	77,4	59,2	61,1	64,7
10	66,1	47,6	51,9	53,2
15	57,7	39,6	45,0	45,1
20	51,1	33,9	39,7	39,1

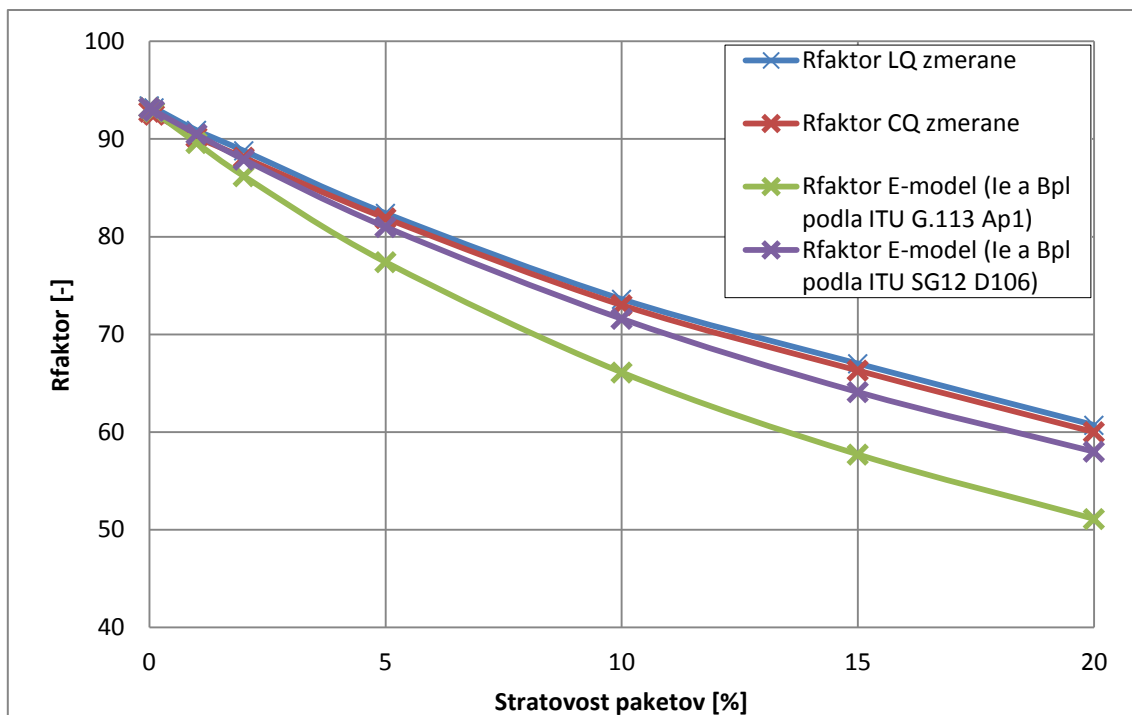


Obr. 4.14: Grafické zrovnanie kodekov R-faktorom podľa stratovosti

Výsledné hodnoty získané z výsledkov z testera a dosadením do E-modelu sú porovnané pre použité kodeky v tabuľkách 4.2, 4.3, 4.4 a k nim odpovedajúcich grafoch je názorne vidieť presnosť merania testera Spirent C1, ktorá sa pre kodek G.711 približuje výpočtu E-modelu. Pre kodek G.723.1 sa v počiatočných hodnotách stratovosti do 2% približuje hodnotám pre verziu 5,3 kb/s, no s rastúcou stratovosťou sa približuje k hodnotám pre verziu 6,3 kb/s. Tento test bol realizovaný dodatočne a pri poklese kvality pod nevyhovujúcu úroveň bol ukončený. Pre kodek G.729 došlo k výraznejšej odchýlke, čo mohlo byť pravdepodobne spôsobené inými výpočtovými hodnotami faktorov E-modelu, s ktorými tester pracuje a na základe, ktorých generuje výsledok simulácie.

Tab. 4.2: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.711a

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané	R-faktor CQ zmerané	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	93,4	92,8	93,2	93,2
0,1	93,2	92,5	92,8	92,9
1,0	90,9	90,2	89,6	90,5
2,0	88,8	88,1	86,2	87,9
5,0	82,4	81,9	77,4	81,0
10	73,6	73,0	66,1	71,6
15	67,0	66,3	57,7	64,1
20	60,7	60,0	51,1	58,0

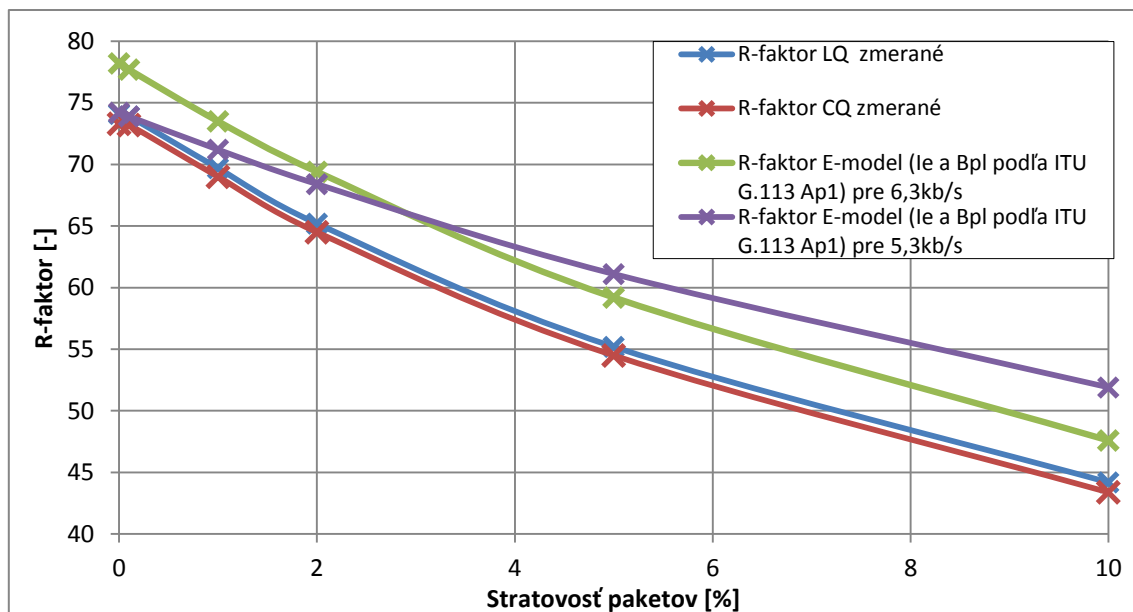


Obr. 4.15: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.711a

Z výsledkov vyplýva, že kodek G.711 dosahuje neuspokojivú kvalitu až pri stratovosti okolo 10% a viac.

4.3: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.723.1

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané	R-faktor CQ zmerané	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1) pre 6,3kb/s	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1) pre 5,3kb/s
0,0	74,1	73,3	78,2	74,2
0,1	73,9	73,2	77,7	73,9
1,0	69,7	69,0	73,5	71,2
2,0	65,2	64,5	69,4	68,4
5,0	55,2	54,5	59,2	61,1
10	44,2	43,4	47,6	51,9

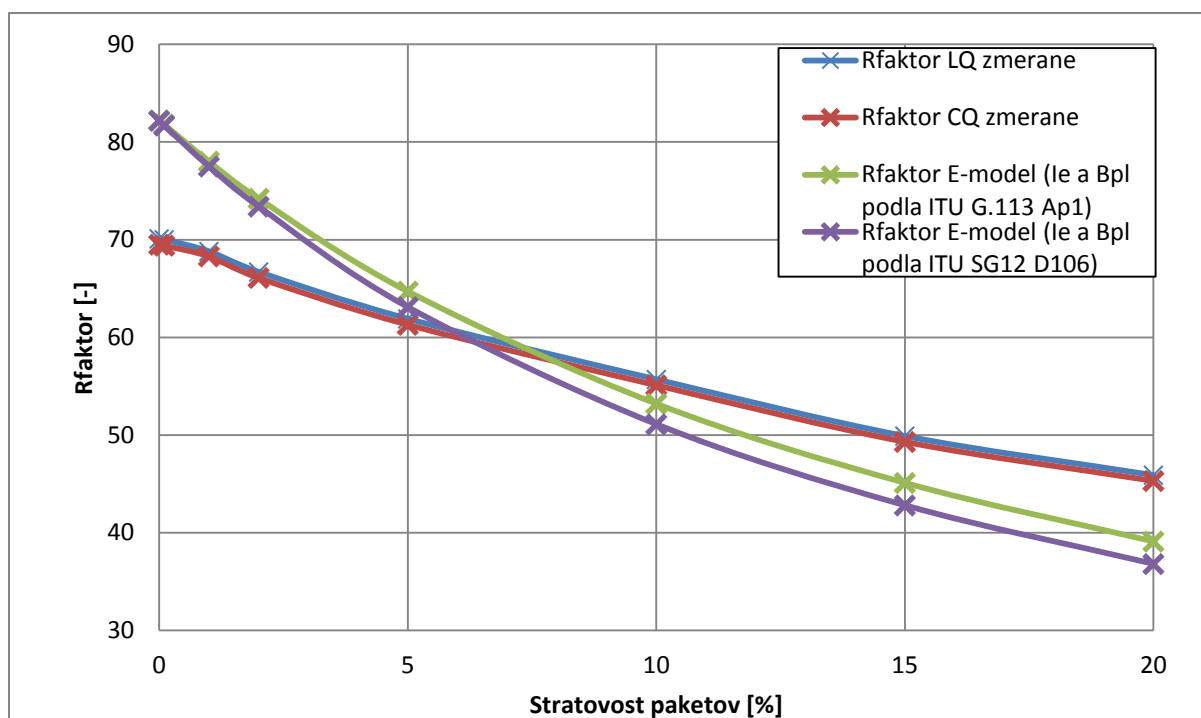


Obr. 4.16: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt R-faktoru pre G.723.1

Kvalita hovoru pri použití kodeku G.723.1 bola Spirent testerom vyhodnotená pri ešte povolenej stratovosti do 1% ako vypočítaná z E-modelu pre verziu 5,3 kb/s, no s rastúcou stratovosťou bol trend približný k verzii 6,3 kb/s. Nakoľko tester neuvádza, ktorú z týchto verzií pre daný kodek implementuje, dalo by sa z merania určiť, že to je práve tá s nižším nárokom na prenosové pásmo, keďže v počiatočných hodnotách sa k jej hodnotám R-faktoru priebehom približuje. To sa rovnako potvrdilo aj pri meraní s ústredňou.

Tab. 4.4: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.729

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané	R-faktor CQ zmerané	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	70,1	69,5	82,2	82,2
0,1	70,0	69,4	81,8	81,7
1,0	68,8	68,3	78,0	77,5
2,0	66,7	66,1	74,2	73,4
5,0	61,9	61,3	64,7	63,1
10	55,7	55,1	53,2	51,1
15	49,9	49,3	45,1	42,8
20	45,9	45,3	39,1	36,8



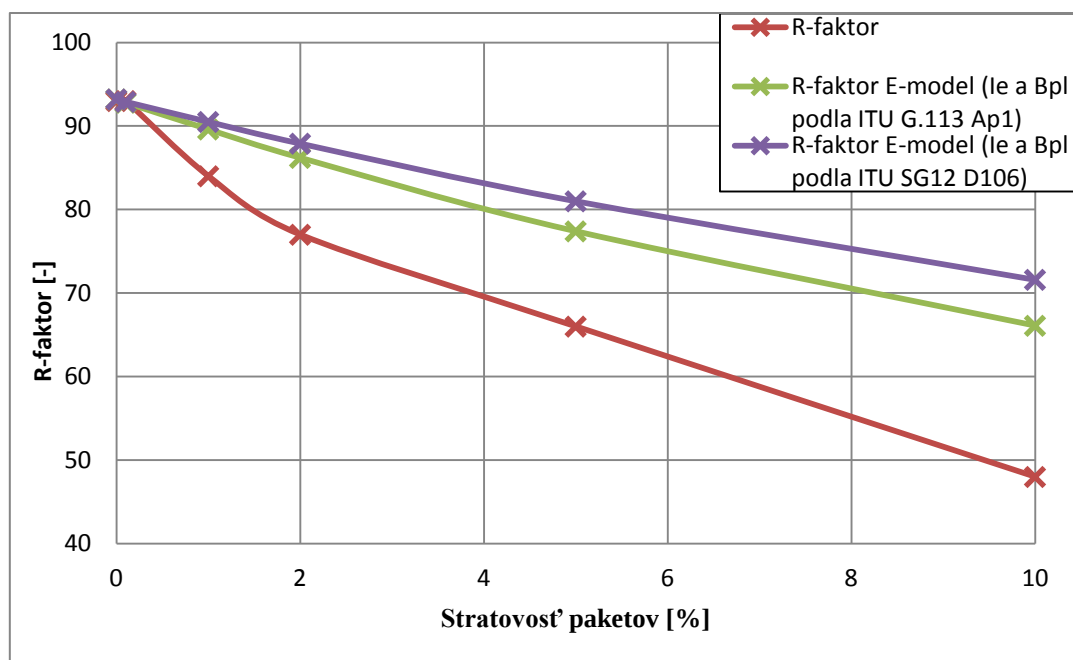
Obr. 4.17: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.729

Kodek G.729 má podľa merania neuspokojivú kvalitu takmer pri minimálnej stratovosti, no výpočet vygenerovaný E-modelom ukazuje, že to je až pri stratovosti viac ako 2% .

Po tejto analýze bolo realizované aj meranie a testovanie pomocou EXFO prenosného testera, ktorý bol primárne využitý pri meraní vplyvu oneskorenia. Ten však nedokázal naviazat' spojenie u oboch kodekoch pri stratovosti viac ako 10% a to ani po viacerých pokusoch. Výsledky sú porovnané rovnakým princípom ako v testovaní so Spirent C1 (viz tabuľky 4.5, 4.6 a k nim odpovedajúce grafy na obrázkoch 4.18 a 4.19), navyše tester EXFO generoval priamo aj MOS hodnotenie, ktoré je vo výsledkoch zahrnuté.

Tab. 4.5: Hodnoty R-faktoru a MOS pre G.711 na EXFO testery

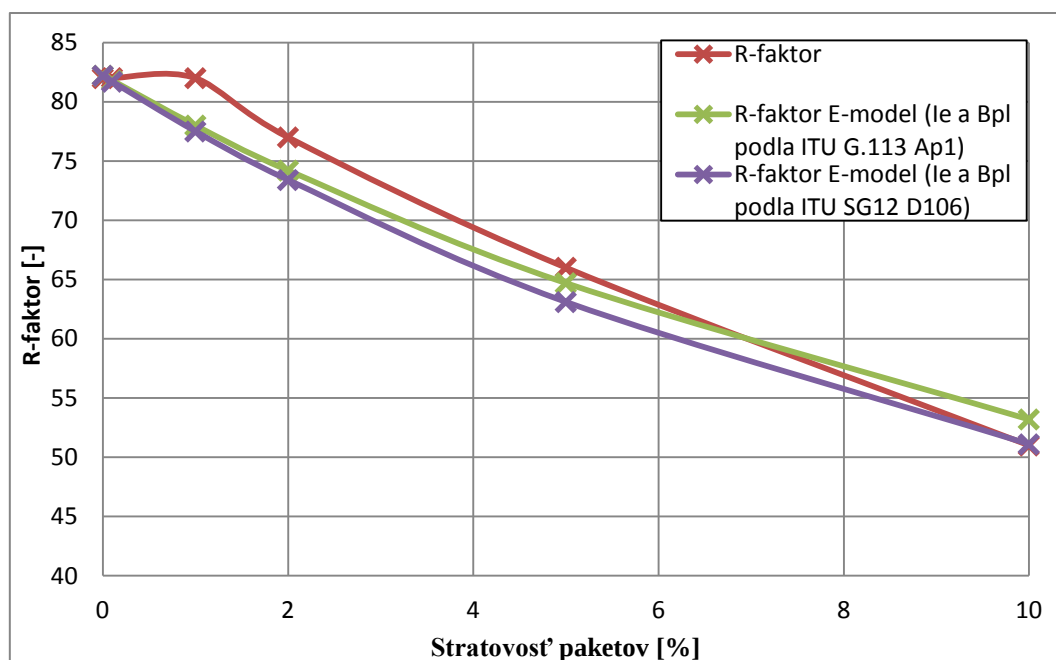
Stratovosť paketov [%]	MOS	R-faktor	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	4,4	93	93,2	93,2
0,1	4,4	93	92,8	92,9
1,0	4,1	84	89,6	90,5
2,0	3,9	77	86,2	87,9
5,0	3,4	66	77,4	81,0
10	2,4	48	66,1	71,6



Obr. 4.18: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.711 na EXFO testery

Tab. 4.6: Hodnoty R-faktoru a MOS pre G.729 na EXFO testery

Stratovosť paketov [%]	MOS	R-faktor	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	4,1	82	82,2	82,2
0,1	4,1	82	81,8	81,7
1,0	4,1	82	78,0	77,5
2,0	3,9	77	74,2	73,4
5,0	3,4	66	64,7	63,1
10	2,6	51	53,2	51,1

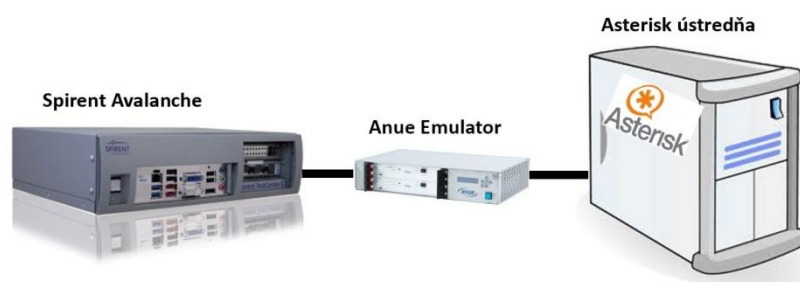


Obr. 4.19: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.729 na EXFO testery

Z merania vyplýva, že tester EXFO oproti Spirent C1, zmeral vhodnejšie hodnotu R-faktoru pre kodek G.729 vzhľadom k hodnotám z E-modelu. Ale pre kodek G.711 s rastúcou stratovosťou nadobudol väčšej nepresnosti v stanovení výsledného hodnotenia kvality. Každý z testerov sa tak javí vhodnejší k testovaniu iného kodeku.

4.2.2 Testy stratovosti paketov s použitím ústredne Asterisk

Účelom tohto testu bolo overenie nežiaduceho vplyvu stratovosti paketov na výslednú kvalitu (vyjadrená R-faktorom), s použitím ústredne ako reálneho prvku na druhej strane. Test bol nakonfigurovaný na Spirent Test Centri C1, stratovosť na emulátore, podobne ako v predchádzajúcej realizácii. Ilustračná schéma simulácie je na obr. 4.2.2.



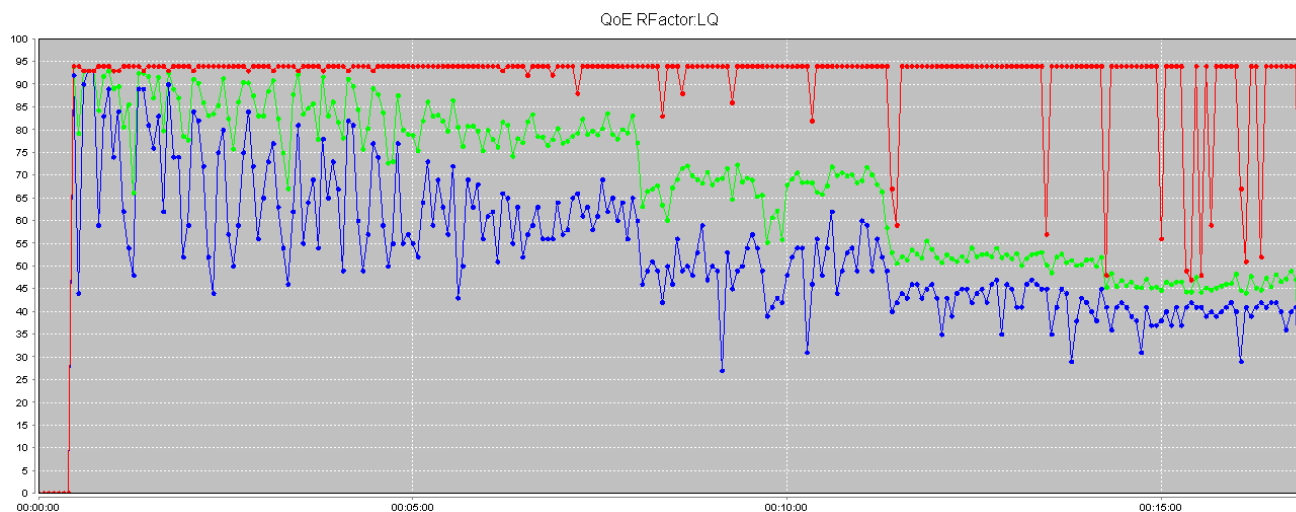
Obr.4.2.1: Ilustračné prepojenie zariadení počas testov

Pre tento test však bolo nevyhnutné nainštalovať a nakonfigurovať virtuálny PC bežiaci na serveri, kde bude spustená ústredňa. Ako operačný systém bol zvolený Ubuntu vo verzii 12.04 pre server, ktorý má v sebe implementovaný Asterisk vo verzii 1.8. Ďalej bolo nutné stiahnuť a nainštalovať vhodné kodeky G.729 a G.723.1 (pre danú verziu ústredne a typ

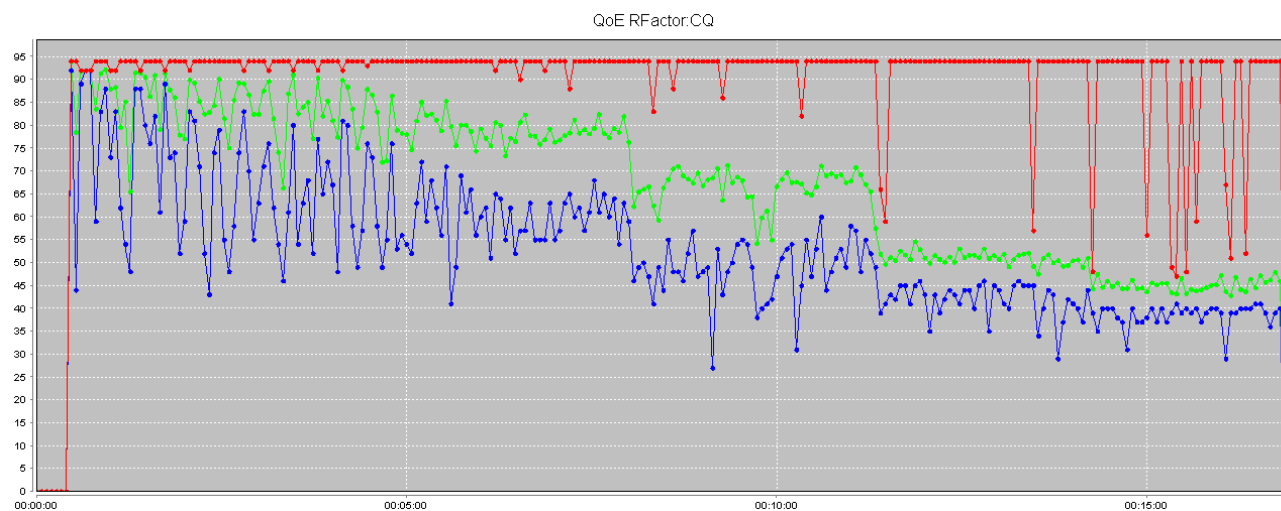
procesoru na serveri), ktorý implicitne Asterisk nemá v podpore. V konfiguračných súboroch *sip.conf* a *extensions.conf* boli nastavené podporované kodeky, parametre spojenia, klapky ako je vidieť vo výpise kódov týchto súborov v prílohe.

Na testeri Spirent C1 bol, oproti predchádzajúcej realizácii bez ústredne, pozmenený počet účastníckych spojení na 50, z dôvodu, že ústredňa je schopná registrovať a poňať maximálne pár stoviek spojení. To je síce znova menej (v testoch bez ústredne je 1100 spojení asi desatina maxima testeru) ako funkčné maximum, ale vhodné, pretože účelom práce nie je testovať maximálne schopnosti zariadení. V profiloch klienta na testeri bol upravený *Phonebook*, s odpovedajúcimi klapkami pre volajúceho a volaného a príslušné parametre pre zrealizovanie hovoru. Dĺžka hovoru bola nastavená na 20 sekúnd. V profile servera bol upravený *SIPng endpoint* o adresu registračného servera, čiže v tomto prípade PC s ústredňou. Prenášané hlasové dáta neboli zmenené.

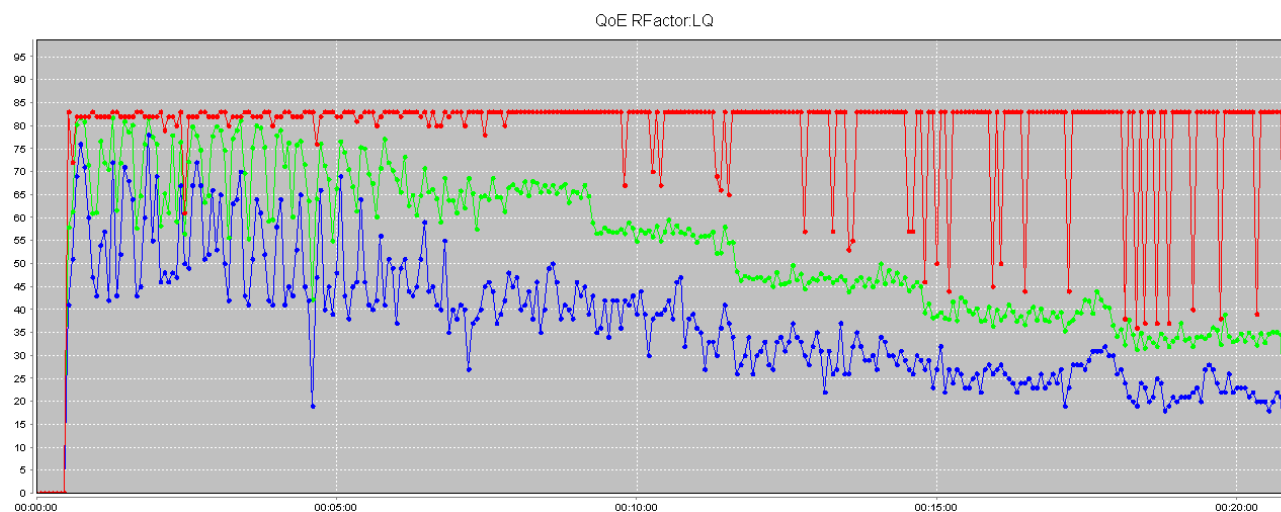
Na emulátore bolo postupne zvyšované percento zahadzovania paketov s periodickým filtrom. Iné nežiaduce javy neboli prítomné, aby sa dokázal prejav samotnej stratovosti na výslednú kvalitu. Výsledný priebeh testov pre použité kodeky s hodnotením R-faktor (LQ a CQ) je vidieť na obrázkoch 4.20 až 4.25. Pričom znova zelená je priemerná (aktuálna) zmeraná hodnota, modrá minimálna a červená ideálna to jest maximálna.



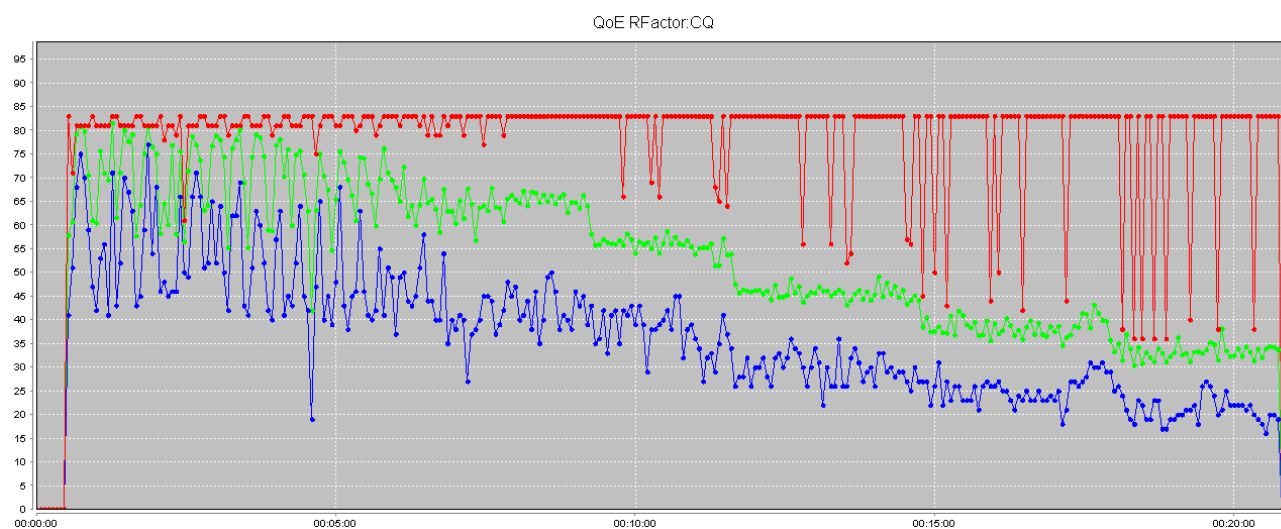
Obr. 4.20: R-faktor LQ pre G.711a s Asteriskom (vplyv stratovosti)



Obr. 4.21: R-faktor CQ pre G.711a s Asteriskom (vplyv stratovosti)

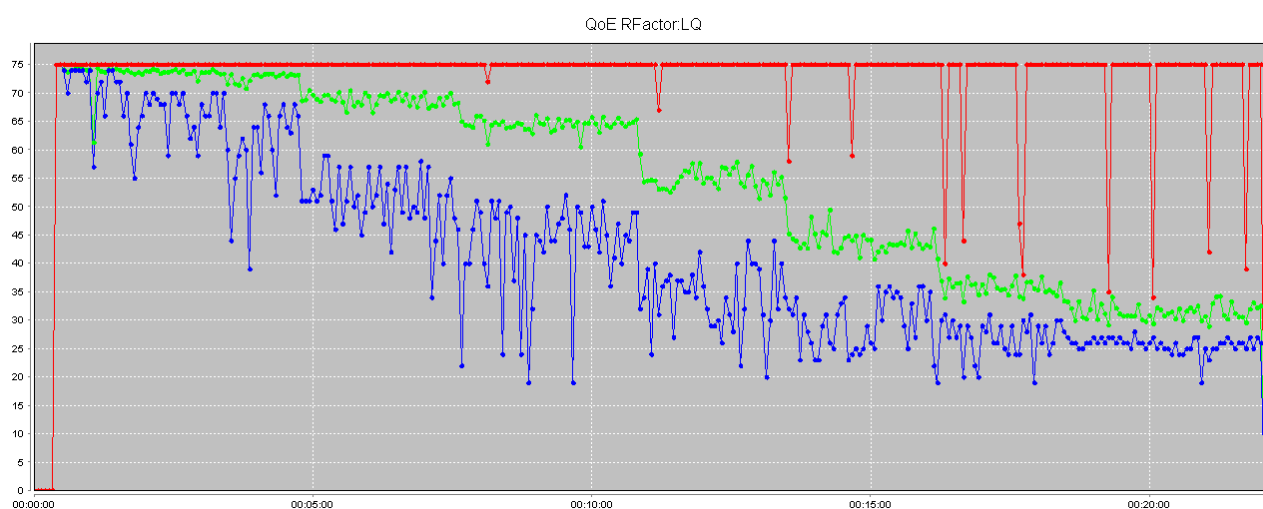


Obr. 4.22: R-faktor LQ pre G.729 s Asteriskom (vplyv stratovosti)

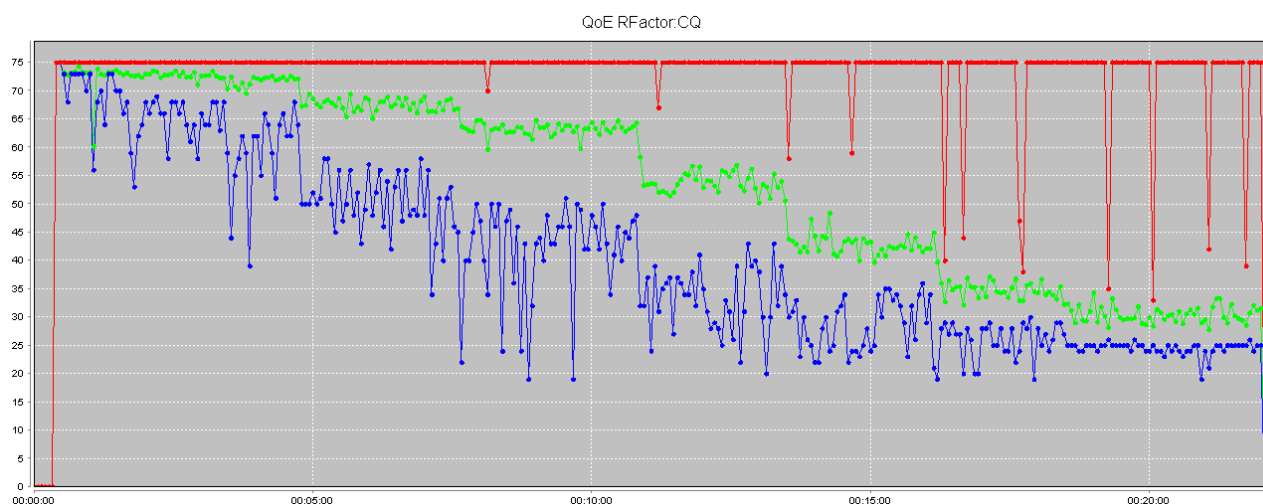


Obr. 4.23: R-faktor CQ pre G.729 s Asteriskom (vplyv stratovosti)

Z výsledných priebehov pre kodeky G.711a a G.729 je vidieť, že priemerná hodnota R-faktoru už nie je tak ideálna ako v prípade testov bez pripojenej ústredne, čo je dôkazom skutočného charakteru spojenia ovplyvneného chovaním ústredne. Po počiatočnom niekoľko minútovom kolísaní, ktoré je pravdepodobne spôsobené prudkým nárastom požiadaviek na ústredňu, dochádza k miernemu ustáleniu a pravidelnému poklesu kvality, ktorý odpovedá nárastu hodnoty stratovosti nastavenej na emulátore. V bežnom 20 minútovom teste bolo ústredňou spracovaných takmer 3000 hovorov s priemerom okolo 10 hovorov za sekundu pri nastavených 50 účastníkoch. S hodnotami a kalkuláciou s E-modelom sa pracovalo rovnako ako v testoch bez ústredne. Ich spracovanie a porovnanie je v tabuľkách a k nim príslušných grafoch.



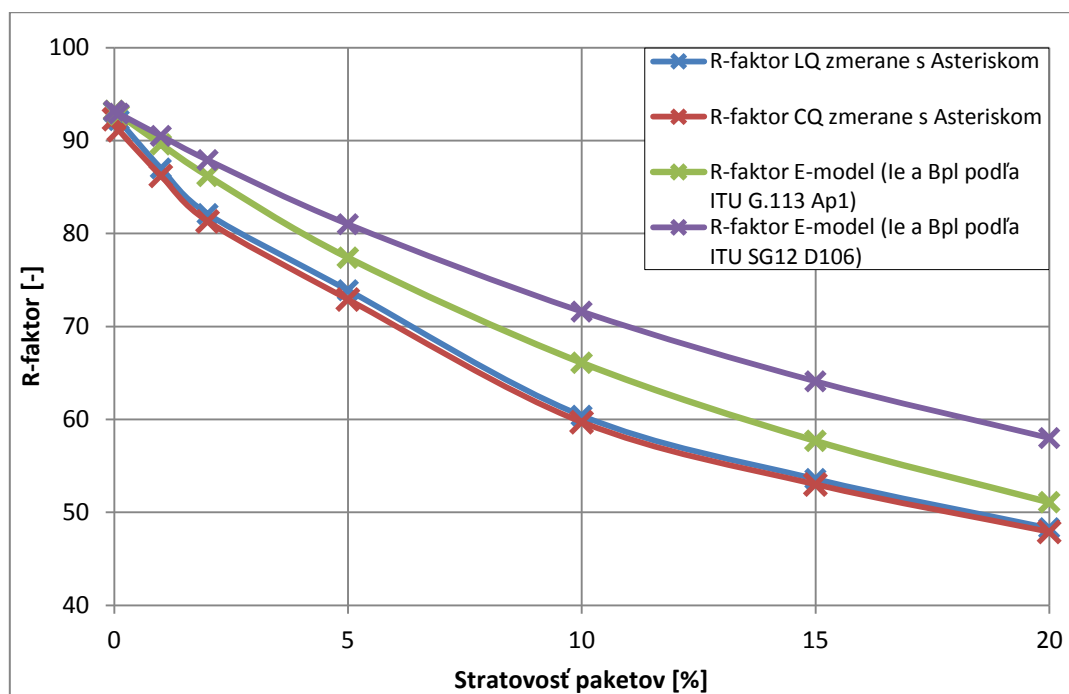
Obr. 4.24: R-faktor LQ pre G.723.1 s Asteriskom (vplyv stratovosti)



Obr. 4.25: : R-faktor CQ pre G.723.1 s Asteriskom (vplyv stratovosti)

Tab. 4.7: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.711a s ústredňou Asterisk

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané s Asteriskom	R-faktor CQ zmerané s Asteriskom	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	93,1	92,3	93,2	93,2
0,1	92,2	91,1	92,8	92,9
1,0	87,0	86,2	89,6	90,5
2,0	82,1	81,3	86,2	87,9
5,0	73,9	72,9	77,4	81,0
10	60,4	59,7	66,1	71,6
15	53,6	53,0	57,7	64,1
20	48,3	47,9	51,1	58,0

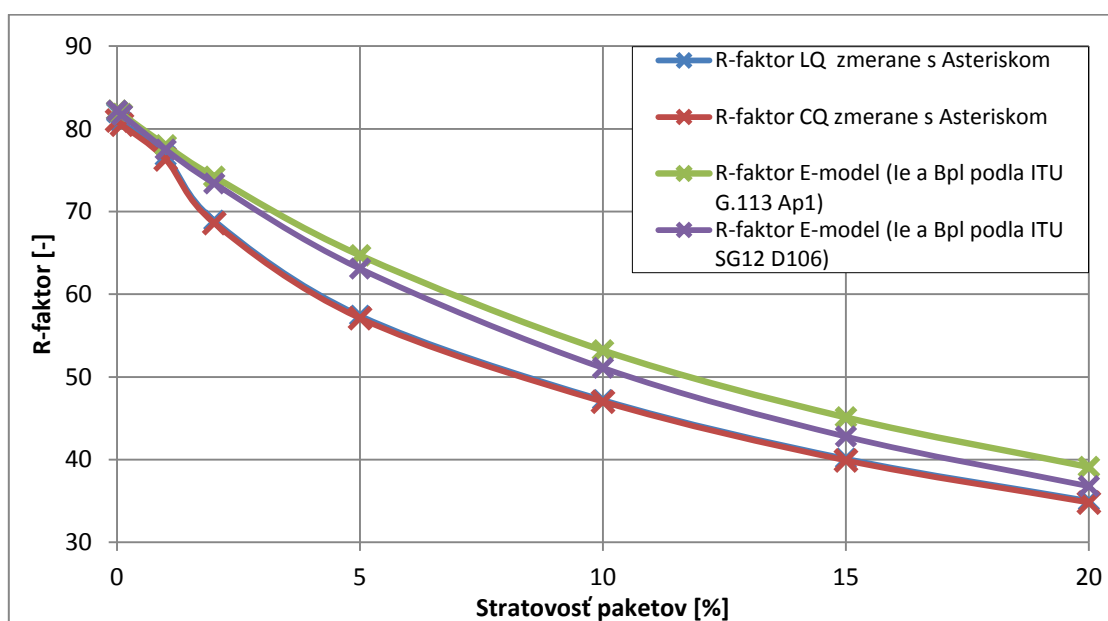


Obr. 4.26: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.711a s Asteriskom

Pri nasadení ústredne sa trend výrazne zmenil a výsledná zmeraná kvalita je nižšia ako kalkulovaná z E-modelu. Neuspokojivá kvalita bola testerom vyhodnotená už pri stratovosti okolo 10% na rozdiel od vypočítanej z E-modelu, ktorá bola až pri 15% stratovosti.

Tab. 4.8: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.729 s ústredňou Asterisk

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané s Asteriskom	R-faktor CQ zmerané s Asteriskom	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU SG12 D106)
0,0	82,0	81,0	82,2	82,2
0,1	80,8	80,5	81,8	81,7
1,0	76,7	76,3	78,0	77,5
2,0	68,9	68,6	74,2	73,4
5,0	57,4	57,1	64,7	63,1
10	47,2	47,0	53,2	51,1
15	40,1	39,9	45,1	42,8
20	35,0	34,8	39,1	36,8

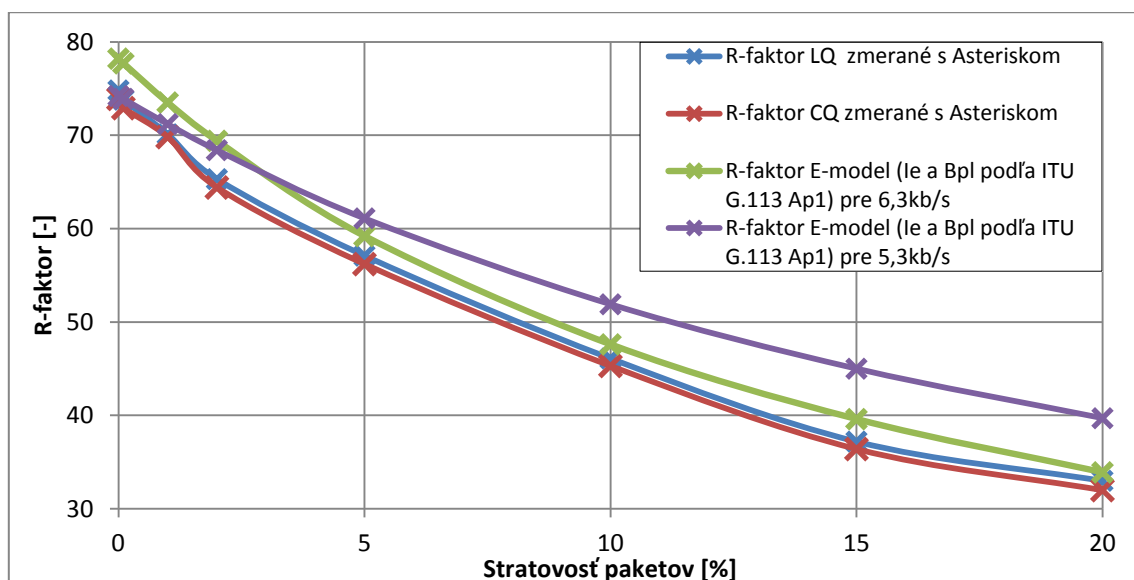


Obr. 4.27: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.729 s Asteriskom

Kvalita hovoru pri použití kodeku G.729 bola Spirent testerom vyhodnotená pri ešte povolenej stratovosti do 1% ako vypočítaná z E-modelu. Odchýlka nastala pri väčšej stratovosti, čo bolo pravdepodobne ovplyvnené vyššie spomenutými nepresnosťami pri výpočtoch. Nevyhovujúca kvalita je dosiahnutá pri stratovosti okolo 5%.

Tab. 4.9: Zmerané a vypočítané hodnoty R-faktoru pre G.723.1 s ústredňou Asterisk

Stratovosť paketov [%]	R-faktor LQ zmerané s Asteriskom	R-faktor CQ zmerané s Asteriskom	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1) pre 6,3kb/s	R-faktor E-model (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1) pre 5,3kb/s
0,0	74,8	73,9	78,2	74,2
0,1	73,8	72,9	77,7	73,9
1,0	70,1	69,8	73,5	71,2
2,0	65,3	64,4	69,4	68,4
5,0	57,1	56,2	59,2	61,1
10	46,1	45,3	47,6	51,9
15	37,2	36,4	39,6	45,0
20	33,0	32,0	33,9	39,7



Obr. 4.28: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.723.1 s Asteriskom

Najbližšie k hodnotám kalkulovaným sa priblížil kodek G.723.1, ktorý pri stratovosti 5% vykazoval už neuspokojivú kvalitu R-faktoru.

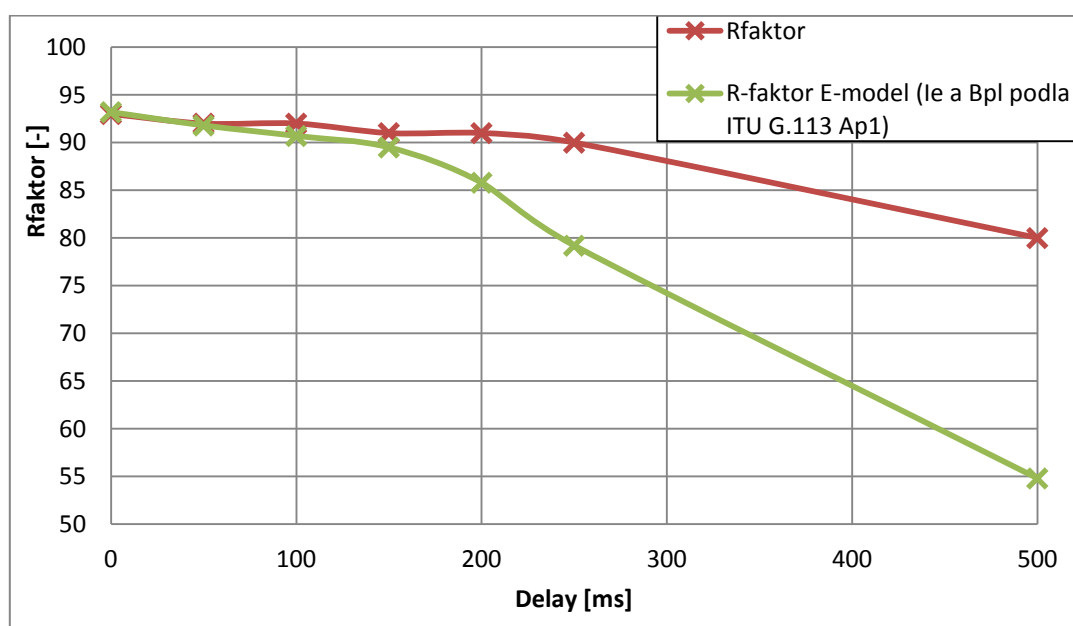
4.2.3 Testy oneskorenia paketov

Ako bolo spomenuté v kapitole 4.1.2, tak oneskorenie bolo nutné testovať pomocou EXFO prenosného testera. V tomto teste boli použité len dva základné kodeky pre porovnanie a to G.711 a G.729. Pri testovaní bolo postupne na emulátore zvyšované oneskorenie s použitým konštantným filtrom, bez prítomnosti javov kolísania paketov a stratovosti. Na EXFO testerí bola nadefinovaná SIP komunikácia a dĺžka hovoru na jednu minútu.

Výsledky sú podobné ako v predchádzajúcom teste zhrnuté do tabuliek 4.10, 4.11 pre obidva kodeky a porovnané v grafoch (obrázky 4.29 a 4.30).

Tab. 4.10: Vplyv oneskorenia na kvalitu pre G.711 na EXFO testery

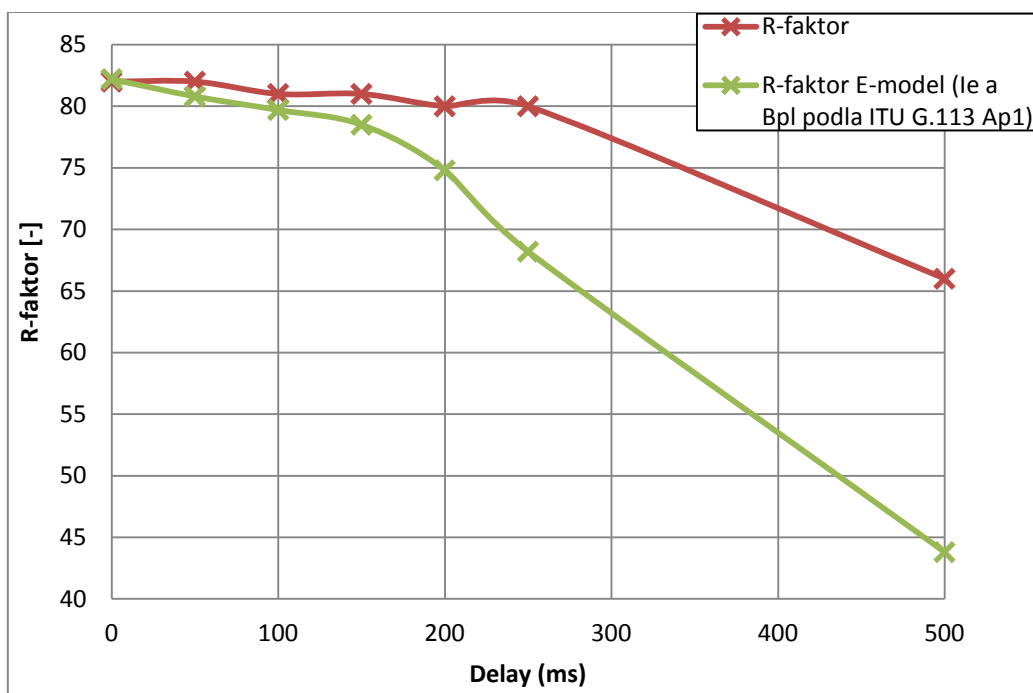
Nastavené oneskorenie (ms)	Zmerané oneskorenie (ms)	MOS zmeraný	R-faktor zmeraný	R-faktor podľa E-modelu (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)
0,00	1,800	4,4	93	93,2
50,0	51,60	4,3	92	91,8
100	101,5	4,3	92	90,7
150	151,5	4,3	91	89,5
200	201,4	4,3	91	85,8
250	251,5	4,3	90	79,2
500	501,3	4,0	80	54,8



Obr. 4.29: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.711 na EXFO testery

Tab. 4.11: Vplyv oneskorenia na kvalitu pre G.729 na EXFO testery

Nastavené oneskorenie (ms)	Zmerané oneskorenie (ms)	MOS zmeraný	R-faktor zmeraný	R-faktor podľa E-modelu (Ie a Bpl podľa ITU G.113 Ap1)
0,00	1,8	4,1	82	82,2
50,0	51,7	4,1	82	80,8
100	100,7	4,0	81	79,7
150	151,8	4,0	81	78,5
200	200,2	4,0	80	74,8
250	251,3	4,0	80	68,2
500	501,6	3,4	66	43,8



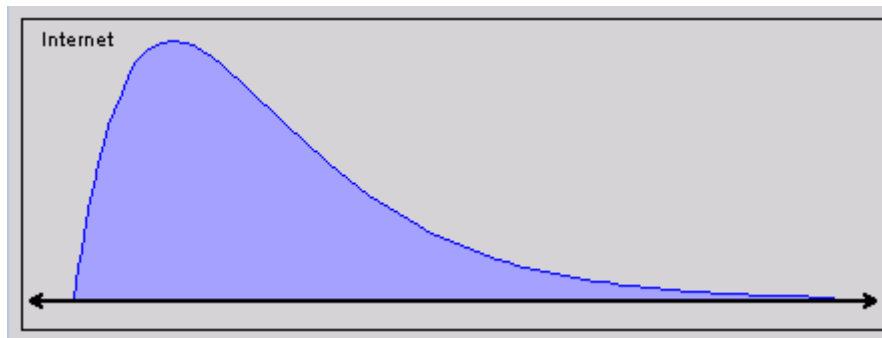
Obr. 4.30: Porovnanie zmeraných a vypočítaných hodnôt pre G.729 na EXFO testery

Z výsledkov vyplýva, že pre oneskorenie okolo 200 ms dochádza k nepresnosti v určení výslednej kvality pomocou R-faktoru v porovnaní s vypočítanou hodnotou z E-modelu na čo malo pravdepodobne vplyv aj to, že EXFO tester generuje iba jeden hovor a z neho určuje výslednú kvalitu.

Ďalej môžeme konštatovať, že oneskorenie nemá na výslednú kvalitu tak výrazný vplyv ako stratovosť. Pre kodek G.711 je aj pri oneskorení 250 ms akceptovateľná kvalita a do 150 ms dokonca veľmi dobrá, čo potvrdzuje aj odporúčenie (viz kapitola 3.1.1). Pre kodek G.729 sa kvalita výraznejšie prejaví až pri oneskorení nad 200 ms, kedy klesne pod hranicu uspokojiteľnosti.

4.2.4 Test kolísania paketov

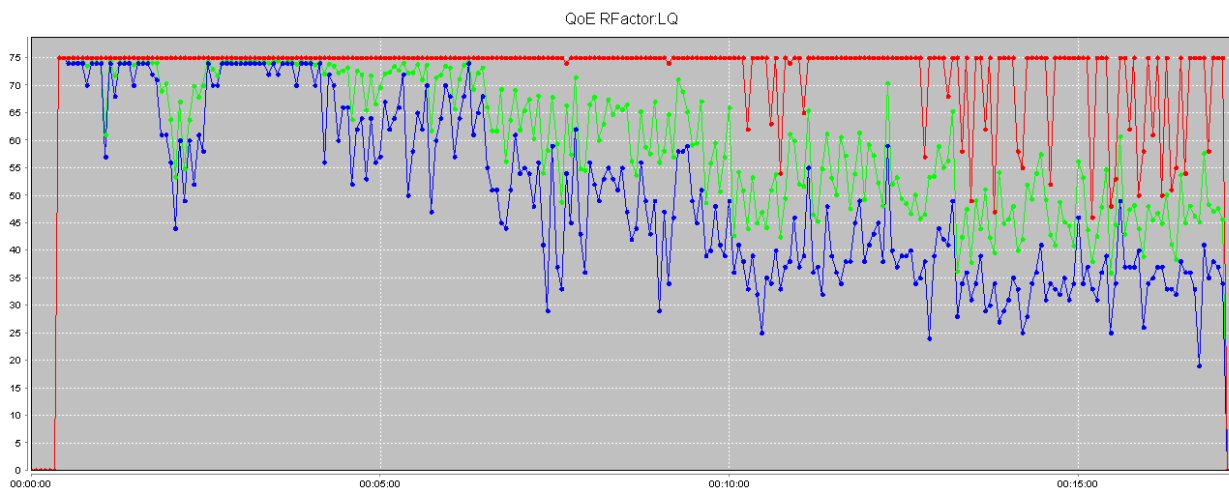
Bol realizovaný v zapojení s ústredňou pre jednotlivé kodeky. Na emulátore bola postupne menená hodnota rozptylu oneskorenia paketov pri zvolenom filtri typu „Internet“, ktorý predstavuje rozloženie jitteru typické pre veľké siete. Jeho priebeh je na obrázku 4.31.



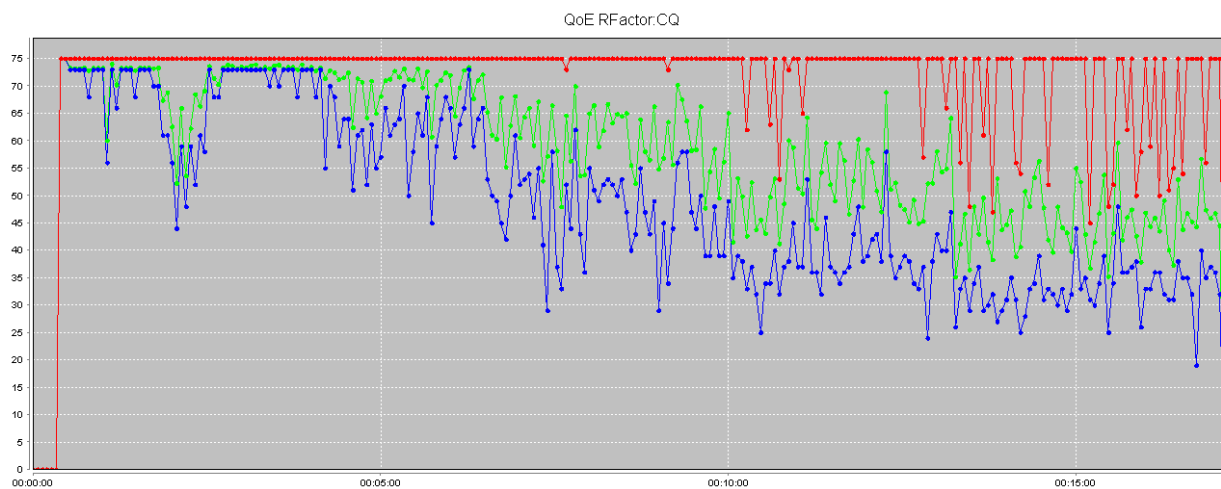
Obr. 4.31: Rozloženie jitteru typické pre Internet, nakonfigurované na emulátore

Hodnoty boli volené postupne od nulového kolísania po 100 ms rozptyl. Ako je vidieť z priebehov hodnotenia výslednej kvality hovoru, tak R-faktor periodicky kolísal v dekadických výkyvoch, čo odpovedá zvolenému rozloženiu typu „Internet“ tj. v špičke tohto filtru sa výsledná kvalita dostala do špičky minima v danom výkyve R-faktor hodnotenia.

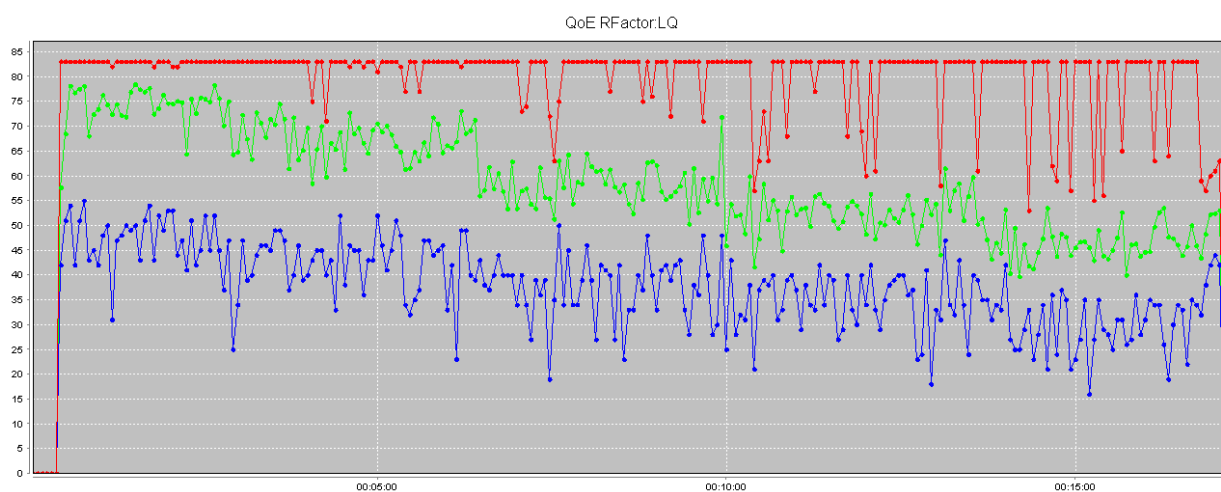
V tabuľke 4.12 sú rozsahy hodnôt R-faktoru, ktoré počas testu boli vyhodnotené k danému jitteru pre meraný kodek. Ale nakoľko z hľadiska dynamicky sa meniaceho oneskorenia, ktoré v danom okamžiku nebolo presné určiť, nebolo možné ani vykalkulovať hodnotu R-faktoru podľa jitteru z E-model kalkulátora.



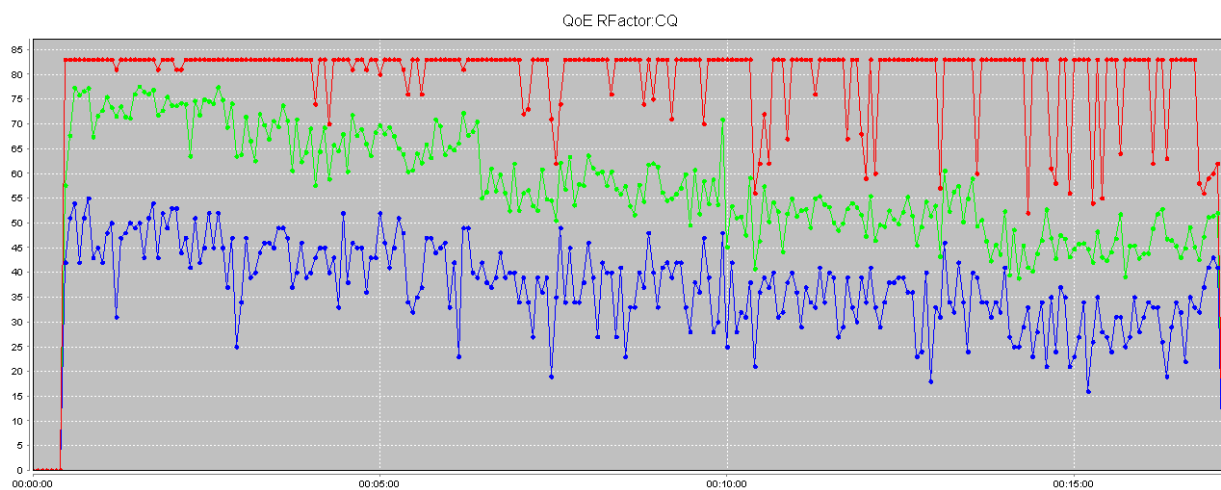
Obr. 4.32: Vplyv jitteru na R-faktor (LQ) pre G.723.1



Obr. 4.33: Vplyv jitteru na R-faktor (CQ) pre G.723.1



Obr. 4.34: Vplyv jitteru na R-faktor (LQ) pre G.729



Obr. 4.35: Vplyv jitteru na R-faktor (CQ) pre G.729

Tab. 4.12: Vplyv jitteru na jednotlivé kodeky

Jitter [%]	R-faktor LQ zmerané s Asteriskom pre G.723.1	R-faktor CQ zmerané s Asteriskom pre G.723.1	R-faktor LQ zmerané s Asteriskom pre G.729	R-faktor CQ zmerané s Asteriskom pre G.729
0	74	73	82	81
20	73	72	80	79
40	72-66	71-65	77-72	76-71
60	65-56	64-54	70-62	69-61
80	55-44	54-43	62-56	61-55
100	55-36	54-34	56-47	55-46

Typicky garantovaná býva hodnota jitteru okolo 30 ms maximálne, čo by pri porovnaní s hodnotami z tabuľky odpovedalo (kvalita je stále relatívne blízko ideálnej tj. maximálnej) [39], [43].

4.2.5 Test transkódovania

Pojem transkódovanie sa používa na označenie prevodu hlasových dát z jedného formátu (kodeku) do iného. V konkrétnej realizácii v rámci tejto práce to predstavuje nastavenie rozdielnych kodekov na strane klienta a servera v testeri. Aj keď transkódovanie nie je nežiadúci jav, jeho vplyv na kvalitu hlasu sa prejaví kvôli času, ktorý trvá prekódovanie a aj kvôli rozdielnym kvalitám medzi samotnými kodekmi.

Tester Spirent však pri vyhodnocovaní kvality nedokázal správne interpretovať výsledný priebeh R-faktoru, čo bolo pravdepodobne ovplyvnené rôzne veľkými zapúzdreniami dát ovplyvnenými zmenou kodeku na výstupe a na vstupe. Preto tento test nebol zaradený do výsledkov práce, ale neschopnosť testeru v tomto smere je poznatok vhodný pre zaradenie do práce, ktorá má aj okrem iného preveriť schopnosti tohto prístroja.

Záver

Tester Spirent C1 sa ukázal ako dostačujúci prístroj na skúmanie VoIP trafiky, aj keď počas testovania boli zistené niektoré nedostatky, najmä nesprávne generovanie RTCP, čo bolo nahlásené dodávateľovi (viz kapitola [4.1.2](#)). Jeho možnosti vyhodnocovania kvality sú limitované, nakoľko vyhodnocuje len R-faktor a to nie priamo pomocou vyhodnocovacích objektívnych algoritmov ako PESQ či iné, ale pravdepodobne len E-modelovou kalkuláciou, čo však výrobca nikde neuvádza. No aj tento jeho interný výpočet R-faktoru sa ukázal byť presný len pri nižších hodnotách nežiadúcich javov, s narastajúcimi hodnotami dochádzalo k väčším odchýlkam a to jednak bez ústredne, ale aj pri jej použití. Ďalším výrazným nedostatkom je stabilita aplikácie, ktorou je prístroj ovládaný. Často po spustení testu zamrzala alebo nezačala vykresľovať grafické priebehy zvolených parametrov. Výnimočne dochádzalo aj k problému, kedy aplikácia spadla, ale test na zariadení bežal a bolo potrebné resetovať a znovu rezervovať jeho záťažové porty. Tieto komplikácie neodstránil ani prechod na novšiu verziu.

Emulátor Spirent je efektívny nástroj na nasimulovanie základných nežiaducich javov a jeho konfigurácia je užívateľsky nenáročná a nie je tak komplexná ako s testerom. Na rozdiel od neho sa funkcionálna a stabilita emulátora ukázala byť veľmi spoľahlivá.

Nakoľko je práca zameraná na preskúmanie vplyvu nepriaznivých javov vo vzťahu k hodnoteniu kvality R-faktor, bol emulátor využitý na tri základné javy, popísané v kapitole [3.1](#). Ostatné javy by nebolo možné implementovať do výpočtov z E-modelu a vyjadriť tak R-faktor.

Pozorovaním vplyvu nežiaducich javov oneskorenia, stratovosti a kolísania oneskorenia na výslednú kvalitu hovoru a rozanalýzovaním výsledkov môžeme povedať, že najväčší vplyv má stratovosť, ktorá sa typicky vo VoIP službách pohybuje v hodnote do 1 %, čo zaručujú aj jednotliví poskytovatelia služieb vo svojich zmluvách tzv. SLA (Service Level Agreement).

Vplyv kolísania oneskorenia paketov môže výrazne znížiť kvalitu v rozptyle nad 50 ms, čo aj potvrdzuje fakt, že jeho maximálna hodnota je v bežnej VoIP premávke garantovaná poskytovateľmi práve na túto hranicu.

Vplyv oneskorenia na výslednej kvalite je najmenší a v realite sa jeho hodnota pohybuje do 100 ms, rovnako zdrojom tohto tvrdenia je garancia poskytovateľa v SLA. [38], [39]

Prenosný tester EXFO bol použitý neplánovane, kvôli už spomínaným nedostatkom testera C1. Je vhodný na rýchlu analýzu a jednoduché testovanie. Jeho schopnosť zmerať výslednú kvalitu je však limitovaná iba v rámci nižších hodnôt nepriaznivých javov. S rastúcimi hodnotami od tých typicky garantovaných, dochádza k odchýlkam v určení výslednej kvality R-faktor. To je pravdepodobne ovplyvnené vnútornými, výrobcom známymi, mechanizmami na jeho určenie.

V porovnaní kodekov, dosahuje G.711a najvyššiu kvalitu, čo je ale v protiváhe s jeho najvyšším nárokom na prenosové pásmo. Oproti kodeku G.729 dosahuje približne o 10% lepšiu výslednú kvalitu a oproti kodeku G.723.1 o 15%. Ten má ale len desatinnú náročnosť na šírku prenosového pásma oproti G.711. Preto je nevyhnuté, aby pri ich nasadzovaní, bol vzatý ohľad nielen na ich výslednú kvalitu, ale aj ich náročnosťou na prenosové pásmo a bolo tak zvolené optimálne riešenie.

Použitá literatúra

- [1] COLLINS, Daniel. *Carrier grade voice over IP*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003, xviii, 522 s. ISBN 00-714-0634-4.
- [2] VAN BOSSE, John G a Fabrizio U. DEVETAK. *Signaling in telecommunication networks*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007, xiv, 810 s. ISBN 978-047-1662-884.
- [3] HERSENT, Olivier a Fabrizio U. DEVETAK. *Beyond VoIP protocols: understanding voice technology and networking techniques for IP telephony*. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2005, 261 s. ISBN 04-700-2362-7.
- [4] Definition of the Public Switched Telephone System (PSTN). In: *InetDaemon.Com* [online]. 7.7.2012 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: <http://www.inetdaemon.com/tutorials/telecom/pstn/definition.shtml>
- [5] Voice Over IP: VoIP vs. PSTN. In: *trijos.com.au* [online]. 2005 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: http://www.trijos.com.au/newsletters/newsletter_March05.html
- [6] ITU-T G.114: *One-way transmission time* [online]. 2003 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.114-200305-I!!PDF-E&type=items
- [7] Central vs. Distributed. *Securitymagazine.com* [online]. 2003 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: <http://www.securitymagazine.com/articles/central-vs-distributed-1>
- [8] VoIP Network Architectures: Cisco Voice over IP Cvoice. *Flylib.com* [online]. 2006 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: <http://flylib.com/books/en/3.437.1.41/1/>
- [9] VoIP Signaling Protocols: Introducing VoIP Signaling Protocols. *Trainsignal.com* [online]. 2.6.2010 [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: <http://www.trainsignal.com/blog/voip-signaling-protocols>
- [10] ITU-T H.323: Packet-based multimedia communications systems. In: *Recommendation H.323* [online]. 12.2009 [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.323/en>
- [11] ALVAREZ, Miguel Rodríguez a Jaime Gómez GIL. Distributed Architecture for Voice Integration in Data Networks. In: *Distributed Architecture for Voice Integration in Data Networks* [online]. International Journal of Computer Science and Network Security, 12.2006 [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: http://paper.ijcsns.org/07_book/200612/200612B09.pdf
- [12] Úvod do VoIP: Protokol H.323. *Mbdata.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: http://www.mbdata.cz/uvoddovoip.htm#_Architektura_a_protokoly
- [13] HANDLEY, M. ai. SIP: Session Initiation Protocol. In: *RFC 2543* [online]. Internet Engineering Task Force, 1999. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2543.txt>
- [14] CAMARILLO, Gonzalo. *SIP demystified*. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 00-713-7340-3.
- [15] Kolektív autorov. SIP: Session Initiation Protocol. In: *RFC 3261* [online]. Internet Engineering Task Force, 2002. Dostupné z: <http://www.rfceditor.org/rfc/rfc3261.txt>
- [16] JOHNSTON, Alan B. *SIP: understanding the Session Initiation Protocol*. Boston: Artech House, 2001, xxi, 201 s. ISBN 15-805-3168-7.
- [17] JENKINS, Tom. A Guide To Session Initiation Protocol (SIP) [online]. 2010 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/54600750/SIP-Tutorial-A-Guide-to-Session-Initiation-Protocol-SIP>
- [18] Voice Over IP and VOIP Protocols. *Javvin.com* [online]. 2012 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.javvin.com/protocolVOIP.html>

- [19] Schulzrinne, H.; Casner, S.; Frederick, R.; et al. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. In: *RFC 3550* [online]. Internet Engineering Task Force, 2003. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>
- [20] Real-Time Transport Protocol (RTP) Parameters. *Iana.org* [online]. 2012 [cit. 2012-11-05]. Dostupné z: <http://www.iana.org/assignments/rtp-parameters/rtp-parameters.xml>
- [21] PERKINS, Colin. *RTP: audio and video for the Internet*. Boston: Addison-Wesley, 2003, 414 s. ISBN 06-723-2249-8.
- [22] ČÍKA, Petr. *Multimediální služby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, 1.vyd., ISBN 978-80-214-4443-0.
- [23] ITU-T FG IPTV-IL-0050: *Definition of Quality of Experience (QoE)*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 12.2009 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www.itu.int/md/T05-FG.IPTV-IL-0050/en>
- [24] ITU-T E.800: *Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 08.2009 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800/en>
- [25] Voice Quality Measurement: Understanding VoIP Performance. In: *Telchemy.com* [online]. 2008 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: www.telchemy.com/~telchem1/appnotes/TelchemyVoiceQualityMeasurement.pdf
- [26] ŠILHAVÝ, Pavel. *Telekomunikační a informační systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [27] ITU-T P.800: *Methods for subjective determination of transmission quality*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 08.1996 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-l/en>
- [28] ITU-T P.861: *Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 08.1996 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.861-199608-S/en>
- [29] ITU-T P.862: *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 02.2001 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-l/en>
- [30] DAVIDSON, Jonathan. *Voice over IP fundamentals*. 2.vyd. Indianapolis: Cisco Press, 2007, xxiv, 394 s. ISBN 978-1-58705-257-6.
- [31] ITU-T G.114: *One-way transmission time*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 11.2003 [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-l/en>
- [32] KUROSE, James F a Keith W ROSS. *Computer networking: a top-down approach*. 5.vyd. New York: Addison-Wesley, c2010, xxiv, 862 s. ISBN 978-0-13-607967-5.
- [33] HALÁS, Michal. *VoIP - Technické a kvalitatívne aspekty*. *Ktl.elf.stuba.sk* [online]. 2012 [cit. 2012-11-19]. Dostupné z: http://www.ktl.elf.stuba.sk/~halas/ntss/NTSS_VoIP_QoS.pdf
- [34] ITU-T G.107: *The E-model: a computational model for use in transmission planning*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 03.2005 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107>

- [35] Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption. *Cisco.com* [online]. 02.2006 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: http://www.cisco.com/en/US/tech/tk652/tk698/technologies_tech_note09186a0080094ae2.shtml
- [36] ITU-T G.711: *Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 11.1988 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711-198811-l/en>
- [37] ITU-T G.729: *Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP)*. In: *ITU-T Recommendations* [online]. 06.2012 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.729-201206-P/en>
- [38] Service Level Agreements for VoIP. *Telchemy.com* [online]. 2005 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: <http://www.telchemy.com/Conferences/2005/Catalyst%202005%20-%20Alan%20Clark.pdf>
- [39] VOIP QoS Requirements. *Voip-info.org* [online]. 2012 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: <http://www.voip-info.org/wiki/view/QoS>
- [40] VOZŇÁK, Miroslav. TELEFONNÍ ÚSTŘEDNY ASTERISK. In: *Teorie a praxe IP telefonie* [online]. 2008 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.iptelefon.cz/archiv/dok_osta/ipt-2008_Telefonni_ustredny_Asterisk.pdf
- [41] RUSSELL, Bryant. Asterisk Versions. Asterisk [online]. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <https://wiki.asterisk.org/wiki/display/AST/Asterisk+Versions>
- [42] VAN MEGGELEN, J., MADSEN, L., SMITH, J. AsteriskTM: The Future of Telephony, Second Edition. USA: O'Reilly Media, Inc., 2007. ISBN-13: 978-0-596-51048-0
- [43] SZIGETI, Tim a Christina HATTINGH. *End-to-end QoS network design*. Indianapolis: Cisco Press, 2005, 734 s. ISBN 15-870-5176-1.
- [44] ROSENBERG, M. *Vysokorychlostní přenos dat v mobilních a bezdrátových sítích*: diplomová práce Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 99 s.
- [45] BALEJ, Jiří. *Simulace zpoždění při přenosu dat mezi stanicemi v IP sítích*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64 s.
- [46] LUCKIN, Emina a Vlatko LIPOVAC. *Practical QoS Testing of Open Source and Commercial IMS Solution for Various Wireless Access Networks* [online]. 2010 [cit. 2013-05-17]. DOI: 10.1109/CTRQ.2010.36. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=5532766>
- [47] QoS of VoIP over WiMAX Access Networks. In: LUCKIN, Emina a Vlatko LIPOVAC. *International Journal of Computer Science and Telecommunications* [online]. [Volume 3, Issue 4, April 2012], 2010 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: http://www.ijcst.org/Volume3/Issue4/p18_3_4.pdf

Zoznam použitých skratiek

ACELP	-	Algebraic Code-Excited Linear Prediction
CRC	-	Cyclic Redundancy Check
HTML	-	HyperText Markup Language
IETF	-	Internet Engineering Task Force
IP	-	Internet Protocol
ISDN	-	Integrated Services Digital Network
ITU	-	International Telecommunication Union
IVR	-	Interactive Voice Response
LAN	-	Local Area Network
MGCP	-	Media Gateway Control Protocol
MOS	-	Mean Opinion Score
MP-MLQ	-	Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization
NTP	-	Network Time Protocol
PBX	-	Private Branch eXchange / Public Based eXchange
PLC	-	Packet Loss Concealment
PSTN	-	Public Switched Telephone Network
QCIF	-	Quarter Common Intermediate Format
QoE	-	Quality of Experience
QoS	-	Quality of Service
RAS	-	Registration Admission Status
RTCP	-	Real-Time Transport Control Protocol
RTP	-	Real-Time Transport Protocol
RTSP	-	Real-Time Streaming Protocol
SAP	-	Session Announcement Protocol
SDP	-	Session Description Protocol
SS7	-	Signaling System č.7
SSL	-	Secure Socket Layer
TCP	-	Transmission Control Protocol
TSL	-	Transport Layer Security
UDP	-	User Datagram Protocol
URI	-	Uniform (Unique) Resource Identifier
URL	-	Uniform (Unique) Resource Locator
VoIP	-	Voice over Internet Protocol
WAN	-	Wide Area Network

Prílohy

A. Emulator profily.zip

B. Konfiguračné súbory extensions.conf a sip.conf

```
[general]
static=yes
autofallthrough=yes
clearglobalvars=no

[globals]
CONSOLE=Console/dsp                ; Console interface for demo
;CONSOLE=DAHDI/1
;CONSOLE=Phone/phone0
IAXINFO=guest                      ; IAXtel username/password
;IAXINFO=myuser:mypass
TRUNK=DAHDI/G2                    ; Trunk interface
TRUNKMSD=1                        ; MSD digits to strip (usually 1 or 0)

[kontext1]
exten => 8888,1,Dial(SIP/8888)
exten=> 100,1,Dial(SIP/100)
;exten => _.,2,Hangup
exten => 8888,n,Hangup
exten => 100,n,Hangup
```

```
[general]
bindport=5060
language=cz
disallow=all
allow=alaw
allow=g729
allow=g723
canreinvite=no
transport=udp

context=default
;kontext1                ; Default context for incoming calls
allowoverlap=no          ; Disable overlap dialing support. (Default is yes)
udpbindaddr=0.0.0.0      ; IP address to bind UDP listen socket to
tcpenable=no             ; Enable server for incoming TCP connections
tcpbindaddr=0.0.0.0      ; IP address for TCP server to bind to
srvlookup=yes            ; Enable DNS SRV lookups on outbound calls

[100]
type=friend
username=100
;secret=asdf
host=dynamic
context=kontext1
nat=no

[8888]
type=friend
username=8888
;secret=asdf
host=dynamic
context=kontext1
nat=no
```