

Mendelova univerzita v Brně
Provozně ekonomická fakulta

Metodika sledování a hodnocení počítačové sítě podniku

Disertační práce

Školitel:
doc. Ing. Arnošt Motyčka, CSc.

Ing. Petr Zach

Brno 2015

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Arnoštu Motyčkovi, CSc. za vytvoření kvalitních podmínek pro doktorské studium. Velké poděkování patří v neposlední řadě Ing. Martinu Pokornému, Ph.D. za podporu, spolupráci a cenné rady.

Abstract

Zach, P. 2015. Methodology of monitoring and evaluation of enterprise computer network. Dissertaion thesis. Brno.

The final thesis deals with the issue of quality assurance for voice services in a computer network from the QoS (Quality of Service) and the QoE (Quality of Experience) point of view. The theoretical aim of this work is to propose a methodology for voice services quality assessment based on the QoE in the computer network. The practical aim of this work is to create the quality estimation methods for VoIP (Voice over IP) calls in the computer network. The introductory chapters describe underlying theoretical background covering the QoS, QoE area and the relationships between them. The review summarizes selected scientific publications focusing on the area of the QoS, QoE and the Wi-Fi networks. The observed findings are further used for the two-phase methodology proposal. In the first phase, the relationships between the QoS and QoE metrics are examined. The second phase finds the causes of the QoS metrics variation in physical and datalink layer of the wireless computer network. Using the results gained according the first phase of the methodology, the impacts of delay, packet delay variation (PDV) and packet loss on the final degree of the perceived quality of the voice service called MOS (Mean Opinion Score) are observed in the network emulator using the network traffic generation and analysis. The tested VoIP calls use G.711 and G.729 codecs. The regression models of VoIP calls containing a music record, a sequence of men speech and a sequence of women speech are derived from the obtained data. Afterwards, various configuration of the wireless network are simulated using a network simulator to discover how the different wireless network configurations can affect the values of the QoS metrics mentioned above and consequently the QoE of present services (VoIP). In the end, the employability of the regression models (the first phase of methodology) in fixed computer network is tested. The results of dissertation thesis including the suggestions for further development are summarized in the discussion.

Keywords

QoS, Quality of Service, QoE, Quality of Experience, VoIP, Wi-Fi, MOS

Abstrakt

Zach, P. 2015. Metodika sledování a hodnocení počítačové sítě podniku. Disertační práce. Brno.

Závěrečná práce se zabývá problematikou zajištění kvality hlasových služeb v počítačové síti z pohledu QoS (Quality of Service) a QoE (Quality of Experience). Cílem práce je v teoretické rovině navrhnout metodiku pro hodnocení hlasových služeb z pohledu QoE a v praktické rovině vytvořit objektivní odhadové metody pro hodnocení kvality VoIP (Voice over IP) hovorů v počítačové síti. Úvodní kapitoly závěrečné práce popisují základní teoretické poznatky z oblasti QoS a QoE a vztahů mezi nimi. Literární rešerše shrnuje vybrané vědecké publikace zaměřené na oblasti QoS, QoE a Wi-Fi sítí. Získané poznatky z rešerše byly dále využity v praktické části práce pro návrh dvoufázové metodiky měření. První fáze zkoumá vztah mezi QoE a QoS metrikami, druhá fáze hledá příčiny změn QoS metrik na fyzické a datalinkové vrstvě bezdrátové počítačové sítě. Dle první fáze metodiky jsou prostřednictvím generování a analýzy síťového provozu v síťovém emulátoru testovány vlivy zpoždění, variace ve zpoždění (PDV) a ztrátovosti paketů na výslednou úroveň ukazatele úrovně vnímané kvality hlasové služby nazývaného MOS (Mean Opinion Score). Byly testovány VoIP hovory s kodekem G.711 a G.729. Ze získaných dat jsou navrženy regresní modely pro VoIP hovor obsahující hudební nahrávku, sekvenci řeči několika mužů a sekvenci řeči několika žen. Ve druhé fázi jsou pomocí síťového simulátoru simulovány různé konfigurace bezdrátové sítě, které mají za cíl odhalit, jak různá nastavení mohou ovlivnit hodnoty výše zmíněných QoS metrik a tudíž i QoE přítomných služeb (VoIP). V závěru je navíc testována uplatnitelnost regresních modelů (první fáze metodiky) v pevné počítačové síti. Výsledky disertační práce včetně námětů na další vývoj jsou zhodnoceny v rámci diskuse.

Klíčová slova

QoS, Quality of Service, QoE, Quality of Experience, VoIP, Wi-Fi, MOS

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Metodika sledování a hodnocení počítačové sítě podniku**

vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 2. června 2015

.....

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Úvod do problematiky	8
1.2	Cíl práce	10
1.3	Organizace práce	10
2	Aktuální stav řešené problematiky	13
2.1	Quality of Service	15
2.2	Quality of Experience	19
2.3	Závislost mezi QoS a QoE	23
2.4	QoE hlasových služeb	27
2.5	Voice over IP	32
2.6	Bezdrátové sítě standardu IEEE 802.11	35
2.7	Statistické metody	44
3	Literární rešerše	48
3.1	RFC dokumenty	48
3.2	Přehled doporučení ITU-T	48
3.3	Vědecké publikace	49
3.4	Závěrečné práce	59
3.5	Rešerše nástrojů pro testování QoS	61
3.6	Rešerše nástrojů pro testování QoE	62
3.7	Závěry z rešerší	63
4	Zařazení QoE v procesu hodnocení kvality služeb	65
5	Metodika hodnocení počítačové sítě z pohledu QoE	69
5.1	Metodika hodnocení QoE	69
5.2	Testování vlivu QoS na kvalitu zvuku (QoS-to-QoE)	71
5.3	Testování vlivu Wi-Fi sítě na hodnoty QoS (L1,2-to-QoS)	74
5.4	Metodika měření konfigurace 1 (L1,2-to-QoS)	77
5.5	Metodika měření konfigurace 2 (L1,2-to-QoS)	78
6	Výsledky měření fáze QoS-to-QoE	81
6.1	Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející hudbu	81
6.2	Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející ženský hlas	83
6.3	Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející mužský hlas	85
6.4	Shrnutí dosažených výsledků	86
7	Výsledky měření fáze L1,2-to-QoS	88
7.1	Vliv Wi-Fi sítě na QoS (konfigurace 1)	88
7.2	Vliv Wi-Fi sítě na QoS (konfigurace 2)	93
7.3	Vliv pevné sítě na QoS a QoE VoIP hovoru	99

8	Testování statistických hypotéz	108
9	Diskuse	112
10	Závěr	115
11	Literatura	116
	Přílohy	130
A	Regresní model MOS hudební nahrávky (normální rozdělení)	131
B	Regresní model MOS ženského hlasu (normální rozdělení)	132
C	Regresní model MOS mužského hlasu (normální rozdělení)	133
D	NED soubor konfigurace 1	134
E	INI soubor konfigurace 1	135
F	NED soubor konfigurace 2	137
G	INI soubor konfigurace 2	138

1 Úvod

1.1 Úvod do problematiky

Sítě s přepínáním okruhů se z pohledu kvality poskytovaných služeb velmi osvědčily. Jsou spolehlivé a zpoždění mezi komunikujícími stranami je malé. Zásadní nevýhodou sítí s přepínáním okruhů je plýtvání infrastrukturních a finančních zdrojů. Komunikační kanály jsou vyhrazeny často trvale i v případě, že jsou komunikující strany neaktivní. Zpravidla také neumožňují sdílet médium s jinými komunikujícími uzly, tzn. vyhrazení celý spoj pro sebe. Naopak, dnes nejrozšířenější, síť s přepínáním paketů využívají zdroje velmi efektivně. Vedle původních datových toků (např. webový provoz) se v sítích s přepínáním paketů začínají objevovat i datové toky původně přenášené v dedikovaných spojích – zejména zvuk (telefonní hovory). Vznikají tedy konvergované sítě¹, které výrazně snižují náklady na provoz infrastruktury, odpadají redundantní spoje a celá topologie se zjednodušuje. Kromě původních dat cestují sítí data multimediální – telefonní hovory (VoIP, Voice over IP), přenos videa (IPTV), Video on Demand (VoD), Triple Play, aj. Dále se jedná o data firemních služeb (transakční databáze, konferenční přenosy), které vyžadují různorodé podmínky přenosu pro každou službu zvlášť. Jak popisuje následující odstavec, k dosažení těchto prostředků je zpravidla nezbytné v síti implementovat mechanismy *Quality of Service* (QoS).

Quality of Service

Quality of service is the ability of the network to provide better or special service to a set of users and applications at the expense of other users and applications.

J. Cioara

V síti s přepínáním paketů se na každém směrovači zachází s každým pakem jednotlivě podle aktuálních podmínek, tzv. *Per-Hop Behaviour* (PHB). Každý paket je na sdíleném mediu nejrychlejším možným způsobem přenesen k cíli, tzv. *Best-Effort*. Není však zajištěna konstantní alokace zdrojů, kterou multimediální služby potřebují. Aby bylo možno provozovat konvergované sítě, je nutné v síti zavádět soubor nástrojů QoS, který rozlišuje jednotlivé toky a podle potřeb emuluje podmínky sítě s přepínáním okruhů. Hens a Caballero (2008) definují QoS jako schopnost sítě poskytovat služby s předvídatelným výkonem.

QoS je soubor mechanismů a algoritmů provozovaný na aktivních síťových prvcích, kde zajišťuje požadavky pro provoz aplikačních služeb. Ačkoliv jsou pakety přenášející multimediální data (zvuk, video) typicky malé, nemohou při cestě sítí

¹Kombinují přenos původních dat (soubory, emaily) a současně přenos hlasu, videa nebo protokolů iSCSI, FCoE apod. pomocí sady protokolů TCP/IP.

tolerovat velké zpoždění a variaci ve zpoždění, telefonní hovor by byl nesrozumitelný nebo by bylo spojení přerušeno. Naopak pakety přenášející soubory jsou často velké, ale jsou schopny ustát větší zpoždění a ztráty paketů. Nedoručené pakety přenášeného souboru lze díky TCP přeposlat, ale přeposílání části telefonního hovoru postrádá smysl. Na jedné straně tedy stojí konstantní přenos malých paketů, který je nutné rychle a plynule přenést. Na druhé straně je nárazový provoz s vysokým datovým tokem (TCP), který je odolný vůči neočekávaným změnám v síti.

Quality of Experience

Quality of experience is human perception of how good the service is.

F. J. Hens

Problematika QoS je zaměřena na zajištění technických (exaktních) požadavků na prostředky sítě. Nijak však nezohledňuje, jak dobře dokázala služba, pro kterou bylo QoS aplikováno, uspokojit očekávání koncového uživatele v podmínkách vytvořených pomocí QoS. Vzniká proto nová vědní disciplína nazývaná *Quality of Experience* (QoE/QoX). QoE určuje stupeň uspokojení uživatele z používání poskytované služby (Aroussi, Bouabana-Tebibel, Mellouk, 2012). QoE říká, jak uživatel vnímá užitnou hodnotu služby, jak je spokojený se službou ve smyslu použitelnosti, dostupnosti, rentability a integrity (Soldani, Li, Cuny, 2006). Na rozdíl od QoS je QoE kvalitativní, subjektivní hodnocení ovlivňované vedle QoS i sociálními faktory uživatele či okolními vlivy. Snahou firem je poznat QoE uživatele co nejlépe, odhalit vztahy mezi QoS a QoE a dosáhnout tak maximálního uspokojení uživatele za minimální náklady, přičemž vznikají nové studie, které zkoumají, jak QoE ovlivňuje zakázníkovu ochotu koupit si danou službu (opakovaně).

Zajištění kvality služeb v bezdrátových sítích

S rozvojem mobilních zařízení roste využití bezdrátových sítí, zejména standardu IEEE 802.11 (Wi-Fi). Ve srovnání s pevnými sítěmi se musí bezdrátová síť vypořádat s celou řadou rušivých vlivů, což zvyšuje celkovou režii komunikace a snižuje výkon a stabilitu bezdrátové sítě. Současně roste mezi uživateli obliba multimediálních služeb se specifickými požadavky na zajištění podmínek přenosu (viz výše). Na rozdíl od pevných sítí, ve standardu IEEE 802.11 v podstatě neexistují mechanismy QoS (s výjimkou IEEE 802.11e). Z tohoto důvodu je velmi přínosné získat přesnější znalosti toho, jak vlastnosti bezdrátové sítě ovlivňují kvalitu těchto služeb. Tato poměrně mladá vědní oblast získává v poslední době na důležitosti. Lepším poznáním těchto vzájemných vztahů se zabývá i tato disertační práce, zejména se orientuje na službu VoIP v bezdrátových sítích (WVoIP – Wireless VoIP²).

²Lze se také setkat s výrazy VoWLAN, VoWi-Fi, wVoIP.

1.2 Cíl práce

Cílem disertační práce je návrh metodiky pro hodnocení zajištění kvality poskytovaných služeb v počítačové síti. Konkrétně se práce zaměřuje na kvalitu hlasových služeb v bezdrátových sítích. K dosažení tohoto cíle byly definovány následující dílčí cíle:

- Popsat dostupné nástroje a metodiky pro hodnocení kvality služeb v síti.
- Analyzovat vlivy počítačové sítě na kvalitu přenosu hlasových služeb.
- Vytvořit matematický model (modely) pro hodnocení kvality hlasových služeb na základě zjištěných vlivů se zaměřením na Wi-Fi síť.
- Navrhnout metodiku pro hodnocení kvality služeb v počítačové síti s využitím navrženého modelu.
- Ověřit hypotézy (účelnost a opodstatnitelnost QoS, aj.).

Teoretickým přínosem práce je tedy rozšíření poznání v oblasti poskytování hlasových služeb v bezdrátových sítích a zejména metodika pro výpočet úrovně zajištění kvality hlasových služeb. Praktickým přínosem práce jsou matematické *neintrusivní* (viz část 2.2) modely, jejichž implementací do monitorovacích nástrojů lze v reálném čase získat cenný zdroj informací pro odhad kvality hlasových služeb.

1.3 Organizace práce

Úvod disertační práce je zaměřen na teoretický přehled zkoumané problematiky. Na základě získaných poznatků jsou popsány základní principy a nástroje mechanismů QoS. Dále je shromážděn seznam nejčastěji používaných objektivních QoS metrik.

Těžiště teoretické části práce je zejména v přehledu problematiky QoE. Tato kapitola popisuje metriky pro měření uspokojení koncového uživatele během konzumace obsahu vybrané služby. Přístupy k měření úrovně QoE se dělí na subjektivní metriky (hodnocení uživatelem), kterými se zabývá např. Reichel (2010) a (dnes již převažují) objektivní metriky (hodnocené softwarově), kterými se zabývá např. Khirman a Henriksen (2002), Li-yuan (2006) nebo Kim a Choj (2010). Disertační práce se orientuje na objektivní přístup. Jádrem objektivního přístupu je najít efektivní způsob, jak bez participace osob co nejpřesněji odhadnout výslednou úroveň QoE. Dostupné přístupy jsou proto popsány v teoretické části práce.

Charakteristiky bezdrátové sítě se významně liší od pevných sítí (drátových, optických) zejména proto, že se vždy jedná o sdílené médium komunikující v half-duplex módu. Jediným dostupným mechanismem pro QoS je standard IEEE 802.11e. V teoretické části závěrečné práce je proto nutné popsat základní pravidla komunikace bezdrátových sítí a principy standardu IEEE 802.11e.

Dále je součástí práce podrobná literární rešerše shrnující dostupnou literaturu v podobě odborných knih, vědeckých publikací a závěrečných prací z období za posledních pět let, popř. i více. Cílem literární rešerše je získat přehled o aktuálním stavu výzkumu v dané oblasti, zejména v problematice objektivního hodnocení QoE

a odhalování závislostí mezi parametry počítačové sítě a výslednou úrovní QoE s důrazem na bezdrátové sítě. Současně je nutné získat přehled v dostupných metodikách pro hodnocení kvality služeb.

Na základě poznatků z literární rešerše bude navržena vlastní metodika hodnocení kvality hlasových služeb v bezdrátové síti, která bude využívat modelů regresní analýzy. Metodika tak bude zohledňovat následující aspekty z oblasti QoS/QoE:

- výchozí podmínky infrastruktury (použité technologie, přenosová média),
- parametry poskytované služby (zvukový kodek, vzorkovací frekvenci),
- aplikované QoS mechanismy (IEEE 802.11e),
- QoS metriky (delay, jitter, ztrátovost paketů),
- QoS/QoE korelace (např. objektivní QoE algoritmy, matematické modely).

Metodika měření

Společně s metodikou popsanou výše je výstupem závěrečné práce i návrh statistických modelů pro real-time odhad kvality přenosu VoIP hovorů ve Wi-Fi sítích z pohledu QoE. Pomocí síťového emulátoru, simulátoru i reálných testů v bezdrátové infrastruktuře Mendelovy univerzity v Brně budou získány podklady pro přesnější poznání vztahů mezi různými atributy bezdrátové sítě na vrstvách L1 a L2 (např. síla signálu, SNR, 802.11e) a MOS (Mean Opinion Score, škála 1–5) hodnotou WVoIP hovorů. V případě implementace výsledků do monitorovacích nástrojů lze získat podklady pro real-time odhad kvality WVoIP bez nutnosti měření kvality samotných hovorů pomocí specializovaných nástrojů s nemalou pořizovací cenou jako např. VoIP & Network Quality Manager (Solarwinds, Inc., 2014), VoIP Call Performance Analysis Software (EXFO, Inc., 2014), VQM Asterisk (Sevana Oy, 2014).

Definice hypotéz

Jako podpora navrhované metodiky jsou vysloveny a na základě výsledků měření následně ověřeny hypotézy uvedené v následujícím výčtu. Tyto hypotézy se zabývají dnes již zodpovězenými otázkami. Jejich cílem proto není primárně ověřit známá tvrzení, ale verifikovat výsledky práce. Hypotézy se snaží ukázat, že i na základě navržené metodiky lze potvrdit obecně platné předpoklady.

1. Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 (resp. G.729) se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro mužský i ženský hlas.
Předpokládáme, že se v případě obou kodeků potvrdí, že mužský i ženský hlas reaguje na zhoršení přenosových podmínek stejně.
2. Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 (resp. G.729) se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro lidský hlas i hudbu.
Předpokládáme, že hudba je náchylnější na zhoršení přenosových podmínek než lidský hlas.
3. Kodek G.729 je schopen zajistit stejnou úroveň vnímané kvality jako kodek G.711.

Předpokládáme, že kodek G.711 zajistí lepší kvalitu vnímané služby než kodek G.729.

4. Testovaná pravděpodobnostní rozdělení zpoždění v síti nemají významný vliv na hodnoty MOS VoIP hovorů s kodekem G.711 (resp. G.729).

Předpokládáme, že pravděpodobnostní rozdělení zpoždění má statisticky významný vliv na výsledné hodnoty MOS VoIP hovorů, a to v případě obou VoIP kodeků.

5. Zavádění QoS mechanismů do bezdrátové sítě nemá pozitivní vliv na kvalitu přenášených služeb.

Předpokládáme, že QoS mechanismy mají pozitivní vliv na kvalitu přenášených služeb.

6. WMM je schopno zajistit stejnou úroveň QoS pro kodek G.711 i G.729.

Předpokládáme, že WMM je schopno zajistit stejnou úroveň QoS pro oba kodeky.

2 Aktuální stav řešené problematiky

Zpoždění

Zpoždění (D) je zpravidla chápáno jako jednosměrné zpoždění udávané v ms , které vzniklo při přenosu paketu i od odesílatele k příjemci (Švec, 2011). Lze se také setkat s výrazem *latence*. Latencí se ale rozumí obousměrné delay, tedy součet delay (zpoždění) ve směru od odesílatele k příjemci a zpět (Švec, 2011). V případě obousměrného zpoždění se lze také setkat s ustáleným výrazem RTT (Round-Trip Time).

Zpoždění vznikající během přenosu dat v počítačové síti lze rozdělit podle různých kritérií. Nejčastěji se zpoždění dělí následovně (Cisco Systems, 2006a):

- Fixní delay (D_d , deterministické) – tvořeno fixními komponentami sítě, je předvídatelné a v čase neměnné.
- Variabilní delay (D_s , stochastické) – v čase proměnlivé, obtížně předvídatelné.

Bovy a kol. (2002) uvádí druhy zpoždění podle toho, jakou přenosovou komponentou bylo zpoždění generováno:

- Processing delay (D_p) – čas potřebný ke zpracování paketu na každém uzlu. D_p je ovlivněno komplexností použitých protokolů a výpočetním výkonem uzlů. Obecně lze D_p rozdělit na fixní D_{pd} a variabilní D_{ps} , protože se proměnlivá složka odvíjí od aktuálního vytížení stroje.
- Transmission delay (D_t) – doba potřebná k přenosu celého paketu (rámce). D_t je determinováno rychlostí linku a pro každý stejně dlouhý paket je stejné.
- Propagation delay (D_{pr}) – čas, za který je jeden byt přenesen komunikačním médiem. Tato hodnota je zanedbatelná a má význam např. v satelitních sítích.
- Queuing delay (D_q) – doba, po kterou je paket odložen do fronty při zahlcení linku.

Na základě výše uvedených složek tvořící end-to-end zpoždění lze definovat vztahy pro výpočet fixního (1) a variabilního zpoždění (2).

$$D_d = D_{pd} + D_t + D_{pr} \quad [ms] \quad (1)$$

$$D_s = D_{ps} + D_q \quad [ms] \quad (2)$$

Jitter

Jitter (J) bývá překládán jako variace ve zpoždění. Současně je velmi často nesprávně zaměňován s metrikou PDV (viz níže). Jitter i -tého paketu je definován jako absolutní hodnota rozdílu daného paketu a paketu předcházejícího (3), kde D_i reprezentuje jednosměrné zpoždění při přenosu i -tého paketu. Pakety ztracené během přenosu nejsou do výpočtu zahrnuty, v takovém případě je jitter počítán ze dvou po sobě úspěšně doručených paketů (IETF, 2006a). Celková hodnota jitteru je vyjadřována jako průměr dílčích hodnot.

$$J_i = |D_i - D_{i-1}| \quad [ms] \quad (3)$$

Jitter (i PDV) je zapříčiněn změnou zpoždění (D) během přenosu v síti. Při zahlcení spoje jsou některé pakety úspěšně přeneseny bez nutnosti odložení do fronty, přičemž některé pakety jsou „pozdrženy“ ve výstupní frontě (bufferu), aby nemusely být zahozeny, tím vzniká jitter, resp. PDV (Cisco Systems, 2006b). Jitter (PDV) je naznačen na obr. 1.



Obr. 1: Rozdíl ve zpoždění paketů zapříčiněný zahlcením média.
Zdroj: Cisco Systems (2006b).

Variace ve zpoždění

Variace ve zpoždění (PDV – Packet Delay Variation) lze popsat jako rozdíl jednosměrného zpoždění vybraného paketu a referenčního zpoždění, přičemž ztracené pakety nejsou brány v potaz. Nízké hodnoty PDV (stejně jako jitter) jsou velmi důležité pro kvalitu přenosu zvuku a videa, kde hrozí při větší variaci přetečení nebo podtečení bufferu na zařízení příjemce. ITU-T (2011c) a IETF (2002) definují PDV vztahem (4), kde D_i značí absolutní jednosměrné zpoždění i -tého paketu a D_r značí referenční zpoždění, vůči kterému budou zpoždění jednotlivých paketů vyhodnocovány. Výše zmíněné zdroje doporučují jako referenční zpoždění zvolit:

- zpoždění prvního přijatého paketu,
- minimální dosažené zpoždění – všechny další hodnoty D_i budou kladné,
- zpoždění mediánu – lze použít pouze v případě, že bude délka všech paketů stejná.

$$PDV_i = |D_i| - |D_r| \quad [ms] \quad (4)$$

Celková hodnota PDV se podobně jako jitter vyjadřuje jako průměr. Pokud je u PDV jako referenční hodnota zvolen medián, bude za předpokladu normálního rozdělení zpoždění výsledná hodnota rovna nule. Naopak v případě jitteru bude průměrná hodnota kladná (IETF, 2006a). V této práci je jako referenční hodnota zvoleno minimální dosažené zpoždění, a to zejména proto, že dosahovaná zpoždění v simulacích neměla charakter normálního, ale spíše log-normálního nebo Paretova rozdělení (viz kap. 5)³. Navíc je dále v textu PDV chápáno jako maximální PDV, tj. rozdíl mezi maximálním dosaženým a referenčním (minimálním) zpožděním.

³Vzhledem k výsledkům zkušebních měření bylo nakonec ve fázi QoS-QoE použito Paretovo rozdělení pravděpodobnosti.

Ztrátovost paketů

Švec (2011) definuje ztrátovost paketů jako množství ztracených paketů vyslaných z odesílatele k příjemci prostřednictvím počítačové sítě. Vyjadřuje se v procentech jako poměr počtu ztracených paketů vůči celkovému počtu paketů, který měl být přenesen. Ke ztrátě nebo poškození paketu může dojít vlivem chyby přenosového média nebo přetečením fronty při zahlcení média (Cisco Systems, 2006b).

2.1 Quality of Service

QoS je v síti implementováno pomocí výběru a konfigurace různých algoritmů a protokolů. Kvalita sítě je podle Cioary a Valentineho (2012) hodnocena podle čtyř základních metrik, které charakterizují stav dat přenášných v dané síti, tedy výkonem, který QoS poskytuje:

- jednosměrně zpoždění,
- jitter,
- ztrátovost paketů,
- dostupná šířka pásma (bandwidth).

Na tyto metriky navazuje celá řada dalších, zabývá se jimi například Jha a Hassan (2002), podrobnou rešerši rozšiřujících QoS parametrů poskytuje také Cholda a kol. (2009). Pro tuto závěrečnou práci jsou ale stěžejní pouze výše zmíněné.

Implementovat QoS v síti lze několika způsoby. Množina specifikací RFC 1812 (IETF, 1995), RFC 1633 (IETF, 1994), RFC 2474 (IETF, 1998b), RFC 2475 (IETF, 1998c) standardizovala trojici QoS modelů:

- Best-Effort,
- Integrated services,
- Differentiated services.

Best-Effort model je výchozí stav každé sítě, jednotlivé toky nejsou klasifikovány a prioritizovány a každý paket je co nejrychleji přenášen k cíli. Vhodný pro síť s dostatečnou šířkou pásma.

Integrated services model (tzv. „*hard QoS*“) je založený na principu dynamické alokace zdrojů napříč všemi síťovými prvky v cestě. Pro vyjednání podmínek přenosu používají koncové uzly signalizační protokol RSVP. Síťové prvky pak vyhradí pro daný tok zdroje pro celou dobu přenosu. Jedná se o analogii s okruhy v sítích s přepínáním okruhů. Výhodou modelu je pevná garance zdrojů a jejich alokace pro každý tok zvlášť. Nevýhodou je však režije v podobě signalizačního protokolu a zejména špatná škálovatelnost – při přenosu v Internetu není reálné vyjednat podmínky na všech směrovačích v cestě.

Differentiated services model (tzv. „*almost guaranteed*“) je v současnosti nejrozšířenější QoS model v sítích s nedostatečnou šířkou pásma. Řeší nedostatky obou předchozích modelů. Nepoužívá signalizační protokol, ale je založený na PHB, kdy je provoz na každém směrovači identifikován (označen) a klasifikován do tříd, přičemž každá třída představuje různou prioritu, jak pakety v dané třídě vkládat na výstupní

zahrncené rozhraní. Lze tak každé třídě zajistit různé požadavky na QoS. Tento model poskytuje vysokou škálovatelnost požadavků, které však nelze absolutně garantovat v celé cestě, protože každý směrovač pracuje samostatně (PHB).

Proces zajištění QoS modelu DiffServ je zpravidla složen z těchto částí a nástrojů v nich obsažených (Cisco Systems, 2005):

1. Classification and Marking,
2. Policing,
3. Queuing and Scheduling,
4. Link-specific tools.

Classification and Marking

První část mechanismu QoS tvoří identifikace a klasifikace provozu. Zařazovat provoz do tříd lze pomocí údajů v záhlaví paketů označované jako *Marking* (značkování). Nejčastěji lze pro značkování využít pole DSCP. Klasifikace na základě jedné značky (DSCP) se označuje jako *Behaviour Aggregate* – BA. Kromě DSCP hodnoty v záhlaví IP paketů lze dále klasifikovat pomocí IP adres, transportního protokolu či signatur aplikačních dat (tzv. *Multifield Identifier* – MF). Jak popisuje text výše, model DiffServ pracuje na principu PHB, proto každý router pracuje samostatně. Aby bylo možné zajistit homogenní end-to-end kvalitu pro konkrétní službu, je nutné, aby se všechny routery chovaly k danému datovému toku stejně za předpokladu, že data klasifikují do stejné množiny tříd se stejnými požadavky. Poté postačí provoz naznačkovat pouze na prvním zařízení v cestě, které tvoří tzv. *Trust Boundary* (TB). Na výstupním rozhraní TB zařízení je paket značkován identifikátorem do záhlaví paketu. Další síťové prvky během cesty šetří výpočetní čas a příchozí pakety automaticky klasifikují podle jejich značky⁴.

Policing

Další částí je tzv. *Traffic Policer*. Jedná se o mechanismus, který měří množství příchozího provozu a kontroluje, zda nepřesahuje povolenou (zákazníkem zaplacenou) horní mez. Provoz, který je nad povolený limit, buď zahodí (v případě paketů s nízkou prioritou), nebo paket přeznačuje na nižší prioritu. Podrobně se této problematice věnuje například Molnár (2008) nebo Jha a Hassan (2002). V souvislosti s měřením a omezováním síťového provozu je vhodné představit několik parametrů zpravidla udávaných v dokumentu SLA (Service Level Agreement) uzavíraném mezi dodavatelem a odběratelem služby. Molnár (2008) označuje za nejčastější: garantovaná přenosová rychlost, která se označuje jako Committed Information Rate (CIR), maximální přenosová rychlost (Peak Information Rate – PIR). K CIR se váže pojem *Burst Size*, neboli velikost garantovaného shluku (Committed Burst Size – CBS).

⁴Během přenosu v síti je možné změnit identifikátor a tím upřednostnit provoz s nižší prioritou. Odsud vznikl pojem Trust Boundary. Značkování je prováděno na zařízení, které je dále považováno za důvěryhodné.

Označuje množství paketů, které je možné přenést (zpravidla během několika ms), pokud je CIR vyčerpáno. Pro řízení CBS se zpravidla používá algoritmus *Token Bucket* (Jha, Hassan, 2002).

Queuing and Scheduling

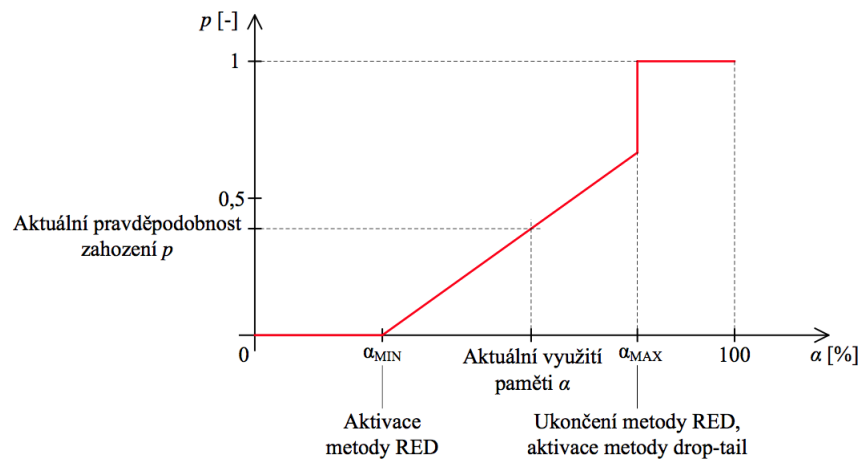
Další fází jsou *Queuing* (zařazování do front) a *Scheduling* (obsluha front). Do okamžiku zahlcení sítě není v Best-Effort síti třeba zavádět QoS mechanismy. V okamžiku, kdy dojde k zahlcení linky (vyčerpání dostupné šířky pásma), aktivuje se QoS. Jinými slovy, pakety jsou odkládány do fronty, která náleží dané třídě. Délka každé fronty je omezená buď počtem paketů nebo počtem bytů. Pokud je objem příchozích paketů tak velký, že se obsah fronty stále zvětšuje, dojde nakonec k úplnému zaplnění fronty. Následující příchozí paket nemůže být do fronty odložen a je proto zahozen, tzv. *Tail-drop*. Aby k zahazování paketů nedocházelo (nebo alespoň ne v třídě s multimediálními daty), zajišťuje obsluha front.

Obsluha front se stará o to, kdy daný paket opustí výstupní rozhraní v případě, že data na vstupním rozhraní přicházejí rychleji, než je výstupní rozhraní schopné zpracovat. Každá třída má vlastní frontu, kam se pakety v případě zahlcení odkládají. Nástroje pro obsluhu front lze rozdělit na *Congestion-Management Tools* (obsluha front) a *Congestion Avoidance Tools* (aktivní správa front). První skupina představuje frontové mechanismy (algoritmy), které definují, jakým způsobem obsluhovat jednotlivé fronty v případě, že nastane zahlcení výstupního rozhraní.

Základními frontovými mechanismy dle Kotona (2014) jsou:

- *FIFO* – všechny pakety se bez rozdílu odkládají a odebírají z jedné fronty. Nerozeznává třídy.
- *Priority Queuing* (PQ) – provoz dělí do m front, kde nižší pořadové číslo značí vyšší prioritu fronty. V případě zahlcení výstupního rozhraní jsou nejdříve odebírány pakety z fronty s nejvyšší prioritou. Na obsluhu další fronty s nižší prioritou se přistoupí až po úplném vyčerpání obsluhované fronty. Používá se pro prioritizaci služeb pracujících v reálném čase s nízkou šířkou potřebného pásma, typicky VoIP. Pokud bude datový tok s vyšší prioritou příliš silný, data v nižších frontách se nemusí nikdy dostat na řadu a mohou být považovány za ztracené.
- *Round Robin Queuing* (RRQ) – někdy označovaný jako *Fair Queuing* (Koton, 2014). Cyklicky odebírá jeden paket z každé fronty, čímž je zajištěno, že se data všech front dostanou na řadu se stejnou pravidelností. Toto řešení má ale dvě stěžejní nevýhody. První je, že všechny fronty tak dostanou stejnou šířku pásma, i kdyby některá fronta měla jiný požadavek. Druhá nevýhoda je, že RRQ nehledí na velikost paketů a fronta s delšími pakety je tak zvýhodněna. Rozšířením je *Weighted Round Robin Queuing*, kdy je počet odebraných paketů závislý na prioritě fronty.
- *Weighted Round Robin Queuing* (WRRQ) – vážená cyklická obsluha je schopna jednotlivým třídám přiřazovat šířku pásma podle požadavků. Jednotlivé datové toky uvnitř dílčí fronty jsou obsluhovány principem Fair Queuing.

- *Weighted Fair Queuing* (WFQ) – dělí jednotlivé datové toky do m tříd. Vytváří třídy dynamicky podle příchozích datových toků. Výhodou tohoto mechanismu je rovnoměrná obsluha všech toků, čímž tato metoda řeší druhý nedostatek mechanismu RRQ, tzn. zohledňuje i délky paketů. Naopak nevýhodou je, že nelze garantovat minimální šířku pásma, která je zejména pro multimediální toky kritická.
- *Class Based Weighted Fair Queuing* (CBWFQ) – je rozšířením předchozího modelu. Administrátor dopředu definuje počet tříd. Každé třídě lze přiřadit minimální garantovanou šířku pásma. V každé takové třídě jsou poté jednotlivé datové toky obsluhovány metodou WFQ (na rozdíl od WRR, kde byly toky obsluhovány mechanismem FQ).
- *Low Latency Queue* (LLQ) – nízkolatenční fronta pro správu zvukových dat. Operační systém Cisco IOS používá tuto frontu ve spojení s CBWFQ. LLQ se používá pro VoIP datové toky. LLQ je vždy přednostně odbavovaná, má vyhrazenou šířku pásma, ovšem data nad přidělený limit jsou obsluhována způsobem Best-Effort, aby nedošlo k zahlcení pásma jedním typem provozu.



Obr. 2: Funkce Random Early Detection.
Zdroj: Koton (2014).

Pokud je fronta některé třídy naplněna, další paket, který do ní má být vložen, musí být zahozen (*Tail-drop*). V případě fronty pro odkládání zvukových dat může být tato situace kritická. Druhá skupina algoritmů *Congestion Avoidance Tools* je komplementem k *Congestion-Management Tools*, protože se snaží přetečení fronty zabránit náhodným zahazováním paketů. Tento přístup se označuje jako *Random Early Detection* (RED). Implementuje prediktivní algoritmus, který zahazuje pakety podle pravděpodobnosti vzniku zahlcení fronty. Pravděpodobnostní funkce je znázorněna na obr. 2. Pokud je zahozen TCP paket, komunikující uzly sníží přenosovou rychlost. Tím tak lze dočasně uvolnit dostupnou šířku pásma. Důležité je zmínit, že algoritmus RED nemá žádný vliv na transportní protokol UDP, který

generuje konstantní datový tok bez ohledu na ztracené (zahozené) pakety. Rozšířením je *Weighted Random Early Detection*, který umožňuje vytvářet a aplikovat více profilů RED.

Link-specific tools

Do poslední skupiny QoS nástrojů patří například *Traffic Shaping*, který pracuje podobně jako *Traffic Policing*, data nad povolenou mez ale nezahazuje, pouze odkládá a pošle později. Dalším nástrojem jsou například komprese záhlaví nebo těla přenášených paketů.

QoS v bezdrátových sítích IEEE 802.11

IEEE 802.11e je doplněk W-iFi standardu IEEE 802.11 vylepšující tzv. Media Access Control (MAC) podvrstvy linkové vrstvy rozšířením podpory QoS. Standard je důležitý pro aplikace citlivé na zpoždění jako jsou Voice over Wireless IP (WVoIP). Standard je také organizací Wi-Fi Alliance označován jako Wireless Multimedia Extensions (WMM).

Rozšíření využívá čtyř kategorií (kompatibilních se standardem IEEE 802.11p, který je dnes součástí standardu IEEE 802.11D), k nim náležejících interních front a náhodného intervalu čekání před vstupem na médium, který je kratší pro provoz (frontu) s větší prioritou⁵, tzn. prioritní provoz má větší šanci pro přenesení paketu (Henry, 2012). Podrobně je princip standardu IEEE 802.11e popsán v sekci 2.6.

2.2 Quality of Experience

QoE je multidisciplinární vědní oblast, protože faktory které ji ovlivňují mají svůj původ v technických i humanitních vědách. Na rozdíl od exaktních empirických parametrů QoS je vyhodnocení úrovně QoE mnohem složitější, protože mj. zahrnuje i subjektivní dojmy jednotlivých uživatelů, kulturní a sociální aspekty, které se liší a lze je jen obtížně zobecnit. Není to tedy jen otázka například kvality zvuku a videa. Vliv na výsledné QoE (v intervalu MOS) v případě IPTV má například i čas, který je potřebný pro přepnutí mezi kanály, naopak jiné očekávání zahrnují hlasové služby nebo online hry. Obecně však lze klasifikovat faktory ovlivňující QoE do tří skupin (Kuipers a kol., 2010):

1. Výchozí (původní) kvalita zvuku/video na zdroji.
2. QoS, které ovlivňuje přenos obsahu po síti.
3. Lidské vnímání (zahrnuje očekávání, dojem z užívání služby, atd.).

Kvalita obsahu (bod 1) závisí například na použitém kodeku, velikosti bit rate, atd. QoS parametry (bod 2), které mají vliv na výkon streamovaných služeb, jsou zejména bandwidth, delay, jitter a packet loss (popsáno v části 2.1). Tyto první dvě

⁵Původně je čekací doba využívána pouze pro oddělení řídicích a uživatelských dat.

kategorie jsou snadno kvantifikovatelné, poslední bod (bod 3) má ale spíše kvalitativní charakter.

Základní jednotkou pro vyhodnocování QoE je MOS (Mean Opinion Score), tj. škála zpravidla od 1 do 5, kde nejvyšší možná kvalita služby znamená hodnotu 5, nejnižší možná kvalita hodnotu 1. V oblasti služeb poskytovaných v počítačové síti se QoE nejčastěji aplikuje na hlasové služby, dále na video služby i webový provoz, které tato sekce stručně popisuje. Vyhodnocováním QoE hlasových služeb je věnována samostatná sekce 2.4.

Způsoby vyhodnocování MOS

Hodnotu MOS lze získávat různými metodami, které lze dělit do několika skupin. Autoři se ale v dělení metod a jejich označování mírně liší. V zásadě lze však podle doporučení P.800 (ITU-T, 1996) a Kuiperse a kol. (2010) způsoby vyhodnocování MOS rozdělit následovně:

1. Subjektivní
2. Objektivní
 - a. Intrusivní (*Full-Reference* – FR)
 - b. Neintrusivní (*Reduced-Reference* – RR)
 - c. Odhadové (*No-Reference* – NR)

Metody subjektivní jsou založené na participaci samotných uživatelů, resp. reprezentativního vzorku. Vybraní uživatelé poté vystupují v roli hodnotitelů služby, přičemž jim je služba za předepsaných podmínek předkládána v podobě sestavy ukázek dané služby v různých úrovních kvality a na hodnotitelích je, aby vyjádřili k danému případu svoji preferenci. Subjektivní metody dosahují nejvyšší přesnosti, protože výsledky pocházejí od samotných uživatelů. Naopak je současně zřejmá i časová i finanční náročnost takových metod, proto se využívají zejména při zavádění nových kodeků, standardů, apod.

Objektivní metody reagují na výše zmíněné slabé stránky subjektivních metod, kvalitu služby jsou totiž schopny odhadovat algoritmicky bez spolupráce respondentů. Vychází však z poznatků získaných subjektivním přístupem a na základě srovnání originálních a degradovaných (přenesených) dat se snaží co nejpřesněji odhadnout, jak by reagovali samotní koncoví uživatelé. Tato skupina objektivních metod, které mají plný přístup ke zdrojovému souboru, se označuje jako *intrusivní* nebo *Full-Reference*. Druhá skupina objektivních metod, označované jako *neintrusivní*, popř. *Reduced-Reference*, odhaduje vnímanou kvalitu pouze na základě detekce chyb v degradovaném souboru. Na základě analýzy (detekce ztracených vzorků, analýza šumu, apod.) přijatého (degradovaného) souboru jsou tyto metody schopny mapovat zjištěné chyby do výsledné hodnoty MOS.

Poslední skupinou jsou metody *odhadové*, neboli *No-Reference*. Ty nemají žádnou znalost obsahu originálních ani přenesených dat a pokouší se odhadnout QoE sledováním různých QoS parametrů. Je důležité zmínit, že často se odhadové me-

tody označují také jako neinstrusivní, protože jednoduše nezasahují do originálních dat.

Platí, že metody subjektivní mají nejvyšší přesnost, ale jsou v mnoha ohledech nejnáročnější. Naopak metody odhadové dosahují nejnižší přesnosti, která je však vyvážena rychlostí získávání výsledků. Ve směru od subjektivních k odhadovým tedy klesá přesnost, ale zvyšuje se rychlost vyčíslení výsledků, ve směru od odhadových k subjektivním roste přesnost, ale prodlužuje se doba získávání výsledků.

QoE hlasových služeb

Ohodnocení kvality hlasové služby má své zástupce ve všech výše zmíněných skupinách. Reprezentantem odhadové NR metody je E-Model (ITU-T G.107). Intrusivní přístup v oblasti hodnocení zvuku zahrnuje například metodu *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (PESQ). Tato metoda hodnotí kvalitu nízkofrekvenčního přenosu (přenos řeči) v paketové síti. Srovnává originál s přijatým signálem a vyhodnocuje rozdíly obou nahrávek⁶. Pracovní skupina ITU-T SG12 vytvořila nástupce PESQ, a to POLQA (*Perceptual Objective Listening Quality Assessment*) pro wideband kódeky. Na rozdíl od PESQ, je POLQA zpoplatněno. Jako nestandardizovanou alternativu k ITU-T produktům lze zmínit algoritmus AQUA (*Audio Quality Assessment*) vyvíjený společností Sevana svými vlastnostmi pokrývající jak metodu PESQ, tak wideband POLQA. Blíže se vybraným metodám věnuje sekce 2.4.

QoE videa

Podle očekávání ovlivňuje QoE videa více faktorů než při přenosu zvuku. Jedná se zejména o faktory jako: vzdálenost, na kterou se video streamuje, velikost displeje, rozlišení, jas, kontrast, ostrost a dokonce i čas potřebný k přepnutí mezi sledovanými kanály (tzv. *Zapping Time*). Výrazně ovlivňuje QoE videa i použitý kodek a forma komprese. Tyto výchozí parametry jsou zpravidla stejné během celého přenosu. Nejdůležitější faktory, které mají vliv na kvalitu videa při přenosu jsou: zpoždění paketů, jitter a počet ztracených paketů.

Během přenosu videa je nutné hodnotit jak kvalitu videa, tak i kvalitu zvuku. Kritická je současně synchronizace obou složek. ITU-R BT.1359-1 doporučuje, aby zvuk předcházel obraz maximálně o 90 ms, naopak zpoždění zvuku oproti videu může být max. 185 ms.

Hodnocení kvality zvuku je popsáno výše, metriky pro hodnocení videa jsou vedle MOS například:

- PSNR (Peak-Signal-to-Noise-Ratio),
- VQG (Video Quality Metric). Jedná se o SW nástroj pro měření vnímané kvality videa. VQM dosahuje vysoké korelace se subjektivním hodnocení kvality. Byl přijat ITU-T (doporučení J.144 a ITU-R BT.1683),
- SSIM (Structural Similarity Index Measurement).

⁶Obě nahrávky musí být správně časově zarovnané.

Výše zmíněné metriky pokrývají modely Full-Reference a Reduced-Reference, avšak zatím není dostupný standard, který by pokrýval No-Reference model (Kuipers a kol., 2010).

QoE webového provozu

Kromě multimediálních dat (VoIP, VoD, a další) je brán ohled i na kvalitu „původních“ datových toků. Používají se například metriky *Goodput* (5) a *Transfer Time Performance* (TTP, vztah 6) (Beruan, a kol., 2003):

$$Goodput = \frac{B_{min}}{B} \quad (5)$$

B_{min} značí minimální počet bytů nutný k přenesení požadovaného souboru (i se záhlavím na všech vrstvách), B je skutečně přenesený počet paketů. Goodput nabývá hodnot od 0 do 1, kde 1 znamená maximální efektivnost. Zhoršení této hodnoty je ovlivněno přeposíláním paketů. Vztah pro výpočet TTP má tuto podobu:

$$TTP = \frac{B^{min}}{L * T} \quad [bps] \quad (6)$$

L značí rychlost spoje (např. 100 Mbps), T je rozdíl mezi časem příchodu posledního a prvního paketu požadovaného souboru. TTP nabývá opět hodnot 0 až 1, kde 1 je optimální hodnota.

Dále existuje několik publikací, které se zabývají vlivem rychlosti odezvy na QoE. Například Hošek a kol. (2013) nebo Khirman a Henriksen (2002), kteří vyhodnocují vliv řady parametrů (rychlosti odezvy, rychlosti stahování, zbývající čas do konce stahování) na počet zrušených požadavků na HTTP server. Z výsledků vyplývá, že optimální rychlost odezvy webového serveru je pod 50 ms.

Willingness to Pay

QoE pohlíží na služby z pohledu zákazníka. Většinou ale neřeší ekonomické aspekty vnímání uživatelů, např. ochota platit za konkrétní úroveň služby (Sackl, Zwickl, Reichl, 2012). *Willingness to pay* (WTP) popisuje Reichel (2010) jako množství finančních prostředků, které je uživatel ochoten zaplatit za nabízenou kvalitu. Z druhého pohledu lze WTP popsat jako množství peněz, které je uživatel ochoten připlatit za lepší kvalitu (Sackl, Zwickl, Reichl, 2012). Nabízí se proto prostor odvodit WTP uživatelů v závislosti na naměřených QoS parametrech. Tímto způsobem postupuje například Sackl, Zwickl a Reichel (2012) nebo Yamori a Tanaka (2004). Druhá možnost je odvozovat závislost mezi WTP a QoE. Touto cestou postupovali např. Reichel (2010), který definoval lineární funkci pro vztah mezi WTP a QoE, kde g (0 až 1) značí zájem uživatele:

$$WTP(QoE, t) = f(QoE) \times g(t) \quad (7)$$

Dále se touto problematikou zabývá i Staelens a kol. (2012). Dospěli k závěru, že vztah mezi WTP a QoE (MOS) u přenášeného videa byl na základě jejich experimentu lineární:

$$WTP = 0.2831 \times MOS - 0,3773 \quad (8)$$

Dobrá znalost WTP zákazníků je důležitá zejména z pohledu poskytovatele služeb. Ten se prostřednictvím managementu snaží minimalizovat prostor pro vznik produktu nebo služby s kvalitou pod garantovanou (nabízenou) hranicí. Slack, Chambers a Johnson (2004) detailně popisují situace, kdy může v podniku docházet k rozdílům mezi plánovanou a realizovanou kvalitou služeb.

2.3 Závislost mezi QoS a QoE

Tradiční strategie řízení QoS v síti se zpravidla zaměřuje na alokování síťových prostředků dle potřeb provozovaných služeb (Intrinsic QoS), ovšem s minimálním ohledem na úroveň vnímání služby koncovým uživatelem. To v lepším případě vede k předimenzování síťových zdrojů, což vede k neefektivnímu využívání prostředků a vyšším nákladům. V opačném případě je alokace síťových zdrojů nedostatečná, uživatel je nespokojený a finanční důsledky mohou být ještě horší.

Cílem poskytovatelů multimediálních služeb je tedy poskytovat dostatečnou kvalitu služeb za minimální náklady na zdroje. Je důležité zjistit (Agboma, Liotta, 2008):

- úroveň, kdy uživatel považuje službu za nepoužitelnou,
- jaký vliv mají jednotlivé metriky QoS na výslednou úroveň QoE, tedy odhalení tzv. *Key Performance Indicators* (KPI).

Ve vědeckých publikacích, se objevují dva základní směry zjišťování závislosti mezi QoS a QoE. První skupina publikací se zabývá statistickou závislostí mezi jednotlivými (popř. kombinacemi metrik). Na základě zjištěné závislosti je možné odhadovat, jaké MOS by získala služba přenášená za naměřených podmínek. Druhý směr se pokouší vytvořit neuronovou síť pro predikci hodnoty MOS na základě cvičných dat složených z naměřených parametrů QoS a výsledné QoE.

Existují přístupy, které tvrdí, že vztah mezi QoE je lineární kombinací QoS parametrů. Například Hamam a kol. (2008) popisují univerzální model, kde je QoE vypočítáno jako vážená lineární kombinace QoS a UE (User Experience):

$$QoE = \zeta \times QoS + (1 - \zeta) \times UE \quad (9)$$

kde ζ vyjadřuje relativní váhu zkoumaného parametru QoS ve vztahu k UE parametru. QoS je zde vážený průměr ze QoS parametrů, které byly zahrnuty.

Další model navrhuje pro měření QoE (pro VoIP) funkci pěti vstupních faktorů: integrity (celistvost, a), retainability (udržitelnost, b), availability (dostupnost, c), usability (použitelnost, d), instantaneousness (připravenost, e), která má podobu (Gong a kol., 2009):

$$QoE = \frac{1}{2} \sin(72)(ab + bc + cd + de + ea) \quad (10)$$

přičemž jednotlivým parametrům lze přiřadit hodnotu z předem stanovených intervalů, parametr a je vážený součet zpoždění, jitteru a ztrátovosti paketů.

Jiný přístup navrhuje QoE-QoS korelační model (Aroussi, Bouabana-Tebibel, Mellouk, 2012), kde QoS je suma vážených parametrů: zpoždění (D), jitter (J), ztrátovost (L), chybovost (E), bandwidth (B) a množství ustanovených spojení (S). Způsob výpočtu QoS popisuje vzorec (11) a samotnou funkci pro výpočet QoE přibližuje vzorec (12).

$$QoS = W(D) + W(J) + W(L) + W(E) + W(B) + W(S) \quad (11)$$

$$QoE(QoS) = k \left(\frac{(e^{QoS-\alpha} + e^{-QoS+\alpha})}{(e^{QoS-\alpha} + e^{QoS+\alpha} + \beta)} + 1 \right) \quad (12)$$

Model je uplatnitelný jak pro VoIP ($W(D) = 10$), tak i pro VoD ($W(D) = 5$). W označuje váhu jednotlivých parametrů, K je stupeň uspokojení. Autoři však podotýkají, že je problematické odhadnout K , váhy i konstanty α a β .

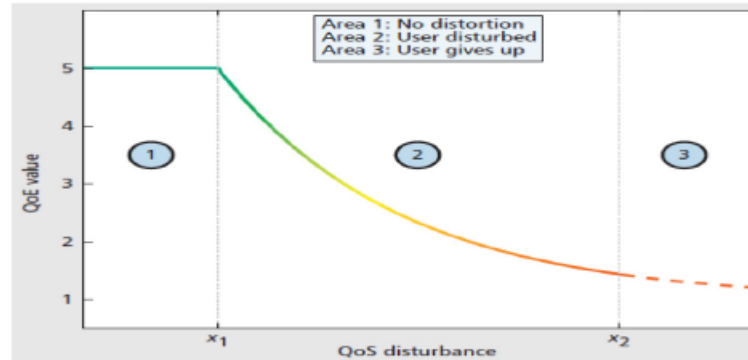
Fiedler, Hossfeld a Tran-Gia (2010) navrhli exponenciální funkci nazvanou IQX (Interdependency between QoE and QoS in eXponential) Hypothesis popisující vztah mezi QoE a QoS. Vztah je tvořen exponenciální funkcí (13), která je znázorněna na obr. 3, kde je na ose X vliv QoS a na ose Y je QoE hodnota reprezentovaná MOS.

$$QoE = \alpha e^{-\beta QoS} + \gamma \quad (13)$$

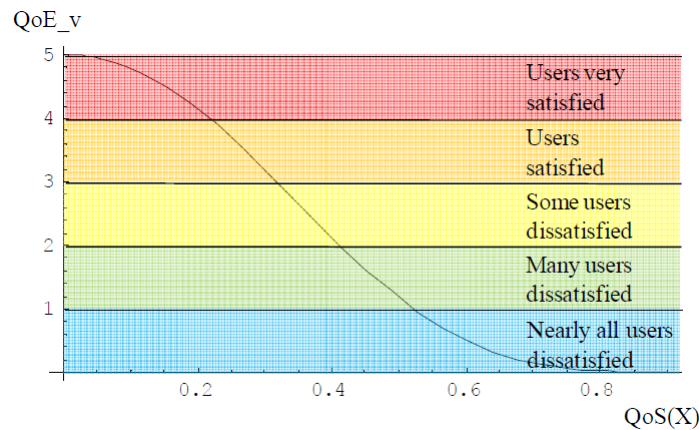
Autoři rozlišují tři oblasti oddělené dvěma prahovými hodnotami x_1 a x_2 . V oblasti 1 nemá mírné zhoršení QoS parametrů vliv na uspokojení uživatele (QoE je konstantní). Jakmile se QoS parametr dostane do oblasti 2, QoE hodnota klesá exponenciálně. V oblasti 3 je kvalita služby nesnesitelná a uživatel zpravidla přestává službu používat.

IQX model očekává jako vstupní hodnotu pouze jeden QoS parametr, a to ztrátovost nebo poměr paketů doručených mimo pořadí. IQX tedy nehodnotí komplexní vliv všech QoS parametrů, ale pouze jednoho z nich. Model ale dosahuje vysoké kvality. Model byl původně určen jen pro VoIP přenos, jeho rozšířením pro VoD se zabývá Arrousi, Bouabana-Tebibel, Mellouk (2012).

Kim a Choi (2010) se zabývají korelací mezi QoS a QoE pro IPTV, kde nejprve klasifikuje všechny IPTV služby do šesti tříd podle různých požadavků na zajištění QoS. Tvrdí, že vliv hodnotu QoS lze vyjádřit jednou hodnotou, na které se váženým způsobem (vzorec 14) podílejí: ztrátovost paketů (L), burst level (U), jitter (J), zpoždění (D) a dostupná šířka pásma (B), přičemž autoři navrhují i doporučené váhy jednotlivým parametrům. Koeficient K reprezentuje typ spoje (drát, wireless, optika).



Obr. 3: Vztah mezi QoE a QoS podle IQX.
Zdroj: Fiedler, Hossfeld, Tran-Gia (2010).



Obr. 4: Korelační model QoS/QoE.
Zdroj: Kim a kol. (2010).

$$QoS(X) = K\{L \times W_l + U \times W_u + J \times W_j + D \times W_d + B \times W_b\} \quad (14)$$

Vzorec, který vyjadřuje vztah mezi QoS a QoE videa podle Kima a Choie (2010) je vzorec č. 15. Parametr Qr reprezentuje poměr mezi rozlišením videa a rozlišením zobrazovacího zařízení, konstanta A značí jednu ze šesti tříd popsanych výše. R reprezentuje počet snímků videa.

$$QoEv = Qr \times (1 - QoS(X))^{\frac{QoS(X) \times A}{R}} \quad (15)$$

Druhá skupina autorů se snaží o vytvoření neuronových sítí, které by predikovaly výsledné MOS multimediálních služeb. Pro VoIP se používá metoda Pseudo Subjective Quality Assessment (PSQA). Například Silva a kol. (2008) se zabývají metodou PSQA. Ta je složena z následujících kroků:

1. Vyběr QoS parametrů, které budou použity jako vstup pro predikci QoE.
2. Provedení kolekce testů se subjektivním hodnocením.

3. Natrénování neuronové sítě.

Autoři prezentují výsledky dvou a třívrstvé neuronové sítě, přičemž hodnotí zvláště vstupní parametry QoS, a to zpoždění, jitter a ztrátovost paketů, která měla největší vliv na výslednou hodnotu MOS. Např. Lozano-Garzon a kol. (2012) publikují nástroj implementovaný v Javě využívajících nástrojů třetích stran jako implementaci metody PSQA. Jako klasifikátor je použit nástroj Weka.

Vztah mezi QoS a QoE – Třívrstvý model

Lozano-Garzon a kol. (2012) a Hardy, Greene, Boyes (2001) dělí celou problematiku QoS do tří vrstev na *Intrinsic QoS* (skutečné QoS), *Perceived QoS* (vnímané QoS) a *Evaluated (Assessed) QoS* (hodnocené QoS). Původně byl však tento koncept (obr. 5) popsán v ITU-T (doporučení E.800).

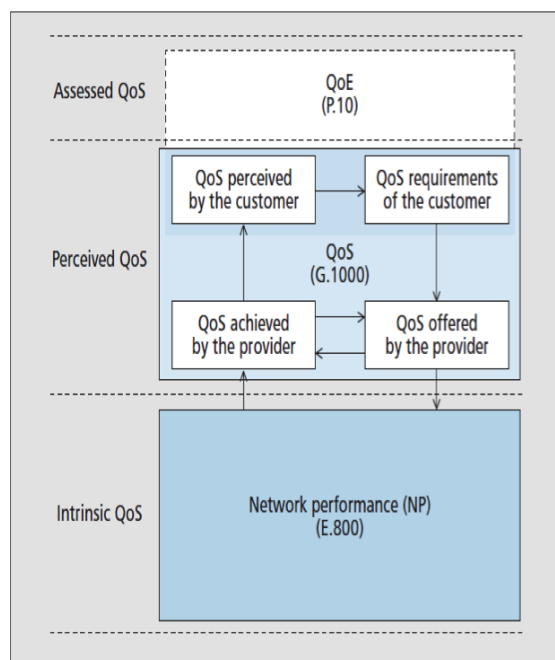
Podle Steinkiewiczze a kol. (2011) a doporučení E.800 (ITU-T, 2009) se *Intrinsic QoS* označuje jako výkonnost sítě (*Network Performance*). Tato vrstva pokrývá všechny parametry ovlivňující kvalitu služby z pohledu počítačové sítě. *Intrinsic QoS* je klíčová pro *Perceived* a *Evaluated QoS*. Podobně jako v modelu TCP/IP, i zde jsou vyšší vrstvy závislé na nižších. Jinými slovy, kvalita první vrstvy ovlivňuje ostatní.

Perceived QoS vyjadřuje zákaznickou zkušenost/zážitek z používané služby. Doporučení G.1000 (ITU-T, 2011b) dělí tuto vrstvu na:

- QoS požadované zákazníkem (QoE),
- QoS nabízené poskytovatelem,
- QoS zajištěné poskytovatelem (skutečné),
- QoS vnímané zákazníkem (QoE).

Jak je zřejmé z obr. 5, zákazník poptává QoS požadavky prostřednictvím poptávaných služeb. Poskytovatel se zaručuje, že zajistí určitou úroveň QoS parametrů prostřednictvím nabízených služeb. Úroveň opravdu dosaženého poskytovaného QoS se však může výrazně lišit od původně nabízeného QoS. Rozdíl mezi nabízeným a poskytovaným QoS ovlivňuje nastavení *Intrinsic QoS*. Zákazník konzumací služeb vnímá určitou úroveň QoS. Pro poskytovatele je kritické, aby úroveň vnímaného QoS během konzumace služby byl větší (nebo minimálně roven) úrovni očekávaného QoS během poptávání služby. Problematikou měření a odhadem vnímané kvality se zabývá poslední vrstva popisovaného modelu – QoE. Základní terminologii QoE shrnuje doporučení ITU-T P.10. Úroveň QoE rozhoduje zejména o tom, zda bude službu využívat (kupovat) i nadále nebo ne. QoE ovlivňují i další faktory, jako cena nebo komunikace s poskytovatelem (helpdesk, reklamace).

Problematika *Perceived QoS* a otázka uspokojení zákaznických potřeb je úzce spojena s oblastí operačního managementu, konkrétně zajištění požadované úrovně kvality produktů a služeb. Toto téma podrobně rozebral Slack, Chambers a Johnson (2004).



Obr. 5: Tři vrstvy Quality of Service.
Zdroj: Steinkiewicz a kol. (2011).

2.4 QoE hlasových služeb

Organizace ITU-T dává prostřednictvím svých doporučení základní rámec pro termíny, metody a postupy v oblasti QoE, ne jinak je to v části zabývající se hodnocením kvality zvukových služeb. Proto je i většina používaných metod definována v rámci některého z doporučení ITU-T. Výčet níže a obr. 6 popisuje nejpoužívanější metody napříč kategoriemi metod pro hodnocení QoE zvuku, přičemž vybrané metody jsou jednotlivě popsány níže:

1. Subjektivní:

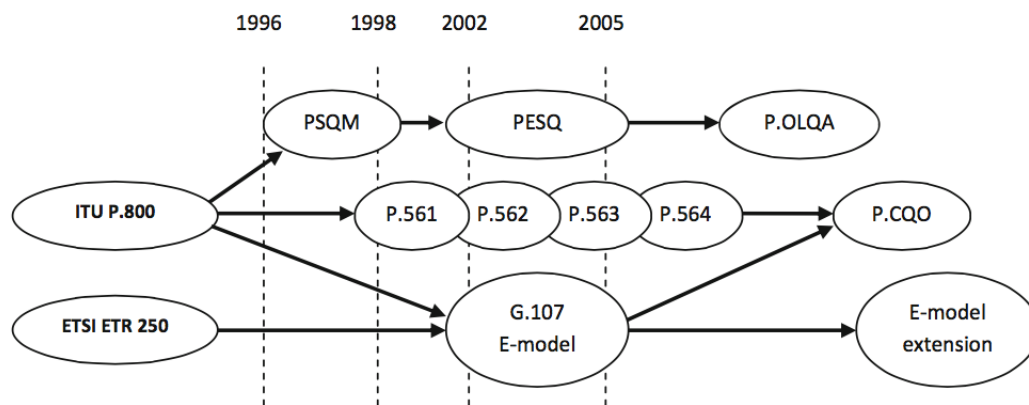
- Absolute Category Rating (ACR) – definována v rámci doporučení P.800 (ITU-T, 1996), zřejmě nejpoužívanější subjektivní metoda, hodnotitelé přiřazují jednotlivým testovaným vzorkům hodnotu MOS, přičemž musí být splněny podmínky na vlastnosti a vybavení místnosti, kde testování probíhá, apod.
- Degradation Category Rating (DCR) – vychází z metody ACR. Hodnocení je založeno na srovnávání rozdílů mezi originálními a degradovanými daty.
- Treshold Method (TM) – také je součástí P.800 (ITU-T, 1996). Respondenti hodnotí vzorky pouze stylem „první je lepší“ nebo „druhý je lepší“.

2. Objektivní:

a. Intrusivní:

- Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)
- Perceptual Objective Listening Quality Analysis (POLQA)

- Audio Quality Analyzer (AQuA) – nstandardizovaná alternativa k PESQ a POLQA (Sevana Oy, 2015a).
- b. Neintrusivní:
- Single Side Speech Quality Measure (3SQM) – vychází z doporučení P.563 (ITU–T, 2004), v současnosti (stejně jako POLQA) spravovaný firmou Opticom, GmbH.
 - Passive Voice Quality Analysis (PVQA) – nstandardizovaný alternativa k P.563 od firmy Sevana. MOS vyhodnocuje na základě SNR (Signal-to-Noise Ratio) přijatých dat, chyb amplitudy, ozvěny, apod. (Sevana Oy, 2015b).
- c. Odhadové:
- E-model – odhaduje konverzační kvalitu (MOS-CQE) na základě přenosových podmínek v počítačové síti.



Obr. 6: Vztahy mezi ITU-T a ETSI standardy pro hodnocení QoE hlasových služeb. Zdroj: Schatz a kol. (2013).

Mean Opinion Score

QoE lze v praxi vyjádřit řadou kvalitativních metrik (viz předchozí text). Obecně je však nejrozšířenější jediná kvalitativní metrika QoE *Mean Opinion Score* (MOS). MOS je definováno v rámci doporučení ITU-T P.800 (ITU–T, 1996) a vyjadřuje míru uspokojení uživatele z konzumované služby (Kuipers a kol., 2010). Do výsledné hodnoty se tedy mj. promítají všechny vlivy během přenosu služby. MOS je nejčastěji pětistupňová škála, kde hodnota 5 = *excellent*, 4 = *good*, 3 = *fair*, 2 = *poor*, 1 = *bad*. Za minimální akceptovatelné MOS se považuje hodnota od 3 (Kim a kol., 2010) do 3,5 (Kuipers a kol., 2010). Tato práce se drží limitní hodnoty MOS 3,1, kterou doporučuje Sanchez-Iborra a kol. (2013a), kteří hodnotu přejímají z R-faktoru metody E-model (viz níže). Přestože se v rámci používaných metod vyskytují i další metriky (např. R-faktor), lze je zpravidla převést do škály MOS.

V souvislosti s kvalitou hlasových služeb dle doporučení P.800.1 (ITU–T, 2006a)⁷ se MOS dělí na několik typů podle dvou základních hledisek – podle místa sběru dat a podle způsobu vyhodnocení MOS.

Podle místa sběru lze rozlišit tři základní typy MOS: poslechové (*Listening-only Quality*, LQ), mluvení (*Talking Quality*, TQ) a konverzační (*Conversational Quality*, CQ). Poslechová MOS hodnotí službu (nejčastěji telefonní) ze strany posluchače, MOS mluvení hodnotí službu z pohledu hovořící strany (ozvěna, praskání ve sluchátku, apod.), konverzační MOS zohledňuje komunikaci oběma směry a jejich vzájemnou synchronizaci. Jak je tedy zřejmé, nejstriktnější požadavky na síť má konverzační kvalita.

Podle metody vyhodnocení MOS lze rozeznávat MOS subjektivní (*Subjective – S*), objektivní (*Objective – O*), nebo odhadnuté pomocí odhadových metod (*Estimated – E*). Typy MOS shrnuje tab. 1. Celkem tak vzniká devět různých druhů MOS, které někteří autoři dělí i podle kategorie zvukového kodeku (viz. tab. 4). Proces získávání MOS-LQS a MOS-LQO je naznačen na obr. 7.

Tab. 1: Typy MOS pro měření kvality hlasu.
Zdroj: ITU-T P.800.1 (2006a).

	Listening-only	Conversational	Talking
Subjective	MOS-LQS	MOS-CQS	MOS-TQS
Objective	MOS-LQO	MOS-CQO	MOS-TQO
Estimated	MOS-LQE	MOS-CQE	MOS-TQE

E-model

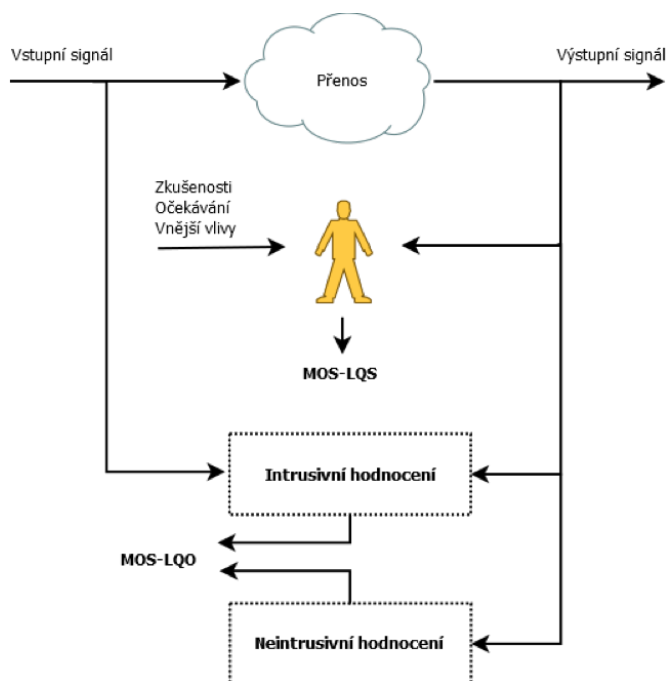
Pro hodnocení kvality řeči neintrusivním přístupem je v literatuře nejčastěji využíván E-Model popsáný v doporučení G.107 (ITU–T, 2011a). Jeho velkou předností je schopnost odhadovat MOS-CQE (Conversational Quality Estimated), tzn. kvalitu celé konverzace. Odhaduje vnímanou kvalitu uživatelem na základě přenosových parametrů pomocí pomocného ukazatele *R-rating*:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_d - I_e + A \quad (16)$$

kde:

- R_0 je SNR (Signal-to-noise Ratio),
- I_s a I_d vyjadřují zhoršení během přenosu způsobené zpožděním a ztrátou paketů,
- I_e je faktor reprezentující vliv použitého kodeku,
- A vyjadřuje tzv. *Advantage Factor* – zhoršení, které je uživatel ochoten akceptovat, protože získává jinou výhodu (např. být mobilní).

⁷Rozšiřuje původní doporučení P.800.



Obr. 7: Rozdíl mezi subjektivním a objektivním hodnocením QoE.
Zdroj: ITU-T (2004).

R-rating lze převést na MOS hodnotu tímto vztahem:

$$MOS = 1 + 0,035R + M(100 - R) \frac{7R}{10^6} \quad (17)$$

kde:

- $M = 1$; pro $R < 0$,
- $M = R - 60$; pro $0 \leq R \leq 100$,
- $M = 4,5$; pro $R > 100$.

Některé parametry mají doporučené výchozí hodnoty a při výpočtu MOS prostřednictvím E-modelu tak není nutné přesně zjišťovat všechny vstupní hodnoty, za předpokladu, že se lze spokojit s možnou nepřesností výsledků zapříčiněnou výchozími hodnotami některých parametrů. ITU-T navíc nabízí E-model jako webovou aplikaci⁸.

Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)

Intrusivní metoda PESQ byla standardizována v roce 2001 v dokumentu ITU-T P.862. Vznikla jako nástupce metody P.861 Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM). PSQM byla určena pro výpočet MOS-LQO (poslechová objektivní kvalita), i jeho nástupce PESQ umožňoval pouze poslechovou kvalitu, tudíž se využívá zejména pro hodnocení kvality zvukových kodeků. Algoritmus vyjadřuje MOS skóre

⁸<http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/calcul.php>

na základě rozdílů zjištěných mezi referenčním a degradovaným signálem. Obecně řečeno, čím větší rozdíl v signálech, tím nižší hodnota MOS. Přestože korelace mezi objektivními hodnotami získanými PESQ a subjektivními hodnotami byla 0,935, jak popisuje Leite (2013), nevýhodou této metody může být, že je schopna hodnotit pouze narrowband kodeky (300 až 3400 Hz), viz část 2.5.

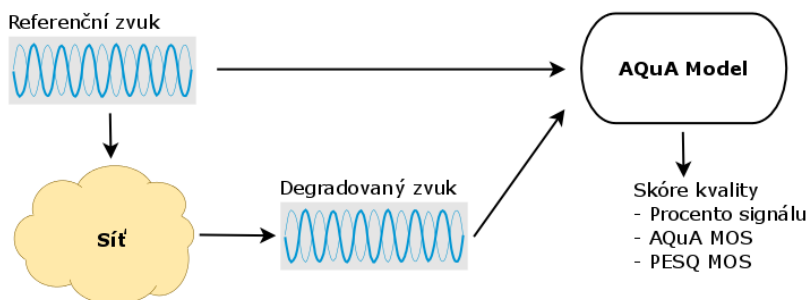
Perceptual Objective Listening Quality Analysis (POLQA)

Metoda POLQA byla vydána v roce 2011 v rámci doporučení ITU-T P.863 jako nástupce metody PESQ. Odstraňuje nedostatky předchůdce, ale zejména přináší možnost testovat i wideband a superwideband kodeky, tudíž najde uplatnění zejména v budoucnu při implementaci Voice over LTE (VoLTE). Princip odhadu MOS je stejný – porovnáním referenčního a degradovaného zvukového signálu. Detailně tuto metodu popisuje Leite (2013). Na rozdíl od PESQ je POLQA metoda licencovaná, jejím správcem je německá firma OPTICOM GmbH. Pro účely praktické části práce byl odeslán dotaz na licenční ceník. Nabízená aplikace PEXQ⁹ implementující mj. POLQA stála v srpnu 2013 8900 Eur, možná akademická sleva je 30 %.

Audio Quality Analyser (AQuA)

Předchozí metody lze považovat dle Domicziho (2015) za standardizované metody spravované ITU-T, resp. její výzkumnou skupinou Study Group 12. Vedle nich je na trhu dostupný nástroj AQuA vyvíjený společností Sevana Oy. Tato metoda je schopna intrusivně vyhodnotit MOS-LQO nejen narrowband, ale i wideband a superwideband kodeků. Lze ji uplatnit v celé řadě oblastí, např. VoIP, VoIP over IMS, GSM, LTE a další (Leite, 2013). Stejně jako PESQ a POLQA srovnává AQuA referenční vzorek s degradovaným, jak naznačuje diagram na obr. 8. Výstupem není pouze zjištěné MOS, ale také zbylá procenta signálu v degradovaném vzorku a MOS hodnota vyhodnocená pomocí algoritmu PESQ. Přesný postup vyhodnocení není znám, existuje však tabulka srovnání měření (tab. 2) mezi subjektivním MOS (P.800), PESQ (P.862) a AQuA. Na svém blogu uvolnila Sevana (2013) tabulku srovnání vlastností metod PESQ, POLQA a AQuA, část z ní je uvedena v tabulce 3. O postupném rozšiřování této metody svědčí i to, že je využívána například společností Vodafone, organizací CESNET a VSB-TUO. Cena jedné licence se pohybuje v řádu stovek eur, což je ve srovnání s POLQA mnohem příznivější cena. Pro účely této práce byla laskavě uvolněna roční licence tohoto mocného nástroje zdarma.

⁹<http://www.opticom.de/products/pexq.html>



Obr. 8: Princip hodnocení prostřednictvím nástroje AQUA

Zdroj: Domiczi (2015).

Tab. 2: Srovnání metod PESQ a AQUA.

Zdroj: Domiczi (2015).

Kodek	P.800 MOS	AQUA MOS	PESQ MOS
G.711	4,1	4,18	3,0
G.723.6.3	3,9	3,9	2,93
G.729	3,9	3,85	4,08
GSM.6.10	3,16	3,7	2,87

Tab. 3: Vlastnosti metod PESQ, POLQA a AQUA.

Zdroj: Sevana (2013).

Vlastnost	PESQ	POLQA	AQUA
Narrowband kodeky	ANO	ANO	ANO
Wideband kodeky	NE	ANO	ANO
Superwideband kodeky	NE	ANO	ANO
Podpora VAD	NE	ANO	ANO
Podpora kodeků nstandardizovaných ITU-T	NE	ANO	ANO
Podpora VoIP, VoIP IMS, GSM, LTE	NE	ANO	ANO
Práce s více jazyky	ANO	NE	ANO

2.5 Voice over IP

Voice over Internet Protocol (VoIP) je technologie, která se využívá pro telefonování prostřednictvím lokální sítě nebo Internetu. Technologie VoIP umožňuje přenos digitalizovaného hlasu prostřednictvím počítačové sítě pomocí IP datagramů. Lze tak provozovat hlasové služby bez použití klasické telefonní sítě (PSTN, Public Switched Telephone Network). Pomocí hlasové brány (*Voice gateway*) je možno propojit technologii VoIP s PSTN a pomocí IP telefonu komunikovat s volajícím v PSTN síti.

Cioara a Valentine (2012) mezi základní přednosti VoIP ve srovnání s klasickou telefonní řadí:

- úspora nákladů na provoz telefonních hovorů – mezi pobočkami lze komunikovat po WAN síti,

- úspora nákladů na instalaci – využívá se stávající síťová infrastruktura,
- mobilita – klapku uživatele lze přiřadit pevnému IP telefonu nebo mobilnímu Wi-Fi zařízení,
- softwarové telefony – ekvivalent služby Skype,
- ekosystém služeb – na původní smysl telefonie navazují služby jako voicemail, email, instant-messaging, apod.,
- otevřené, kompatibilní standardy.

Proces konverze analogového signálu na digitální

Základní konverze analogového signálu na digitální je zpracovávána pulsně kódovou modulací (PCM – Pulse Code Modulation) a lze ji rozdělit do následujících čtyř kroků (Ramo, 2010):

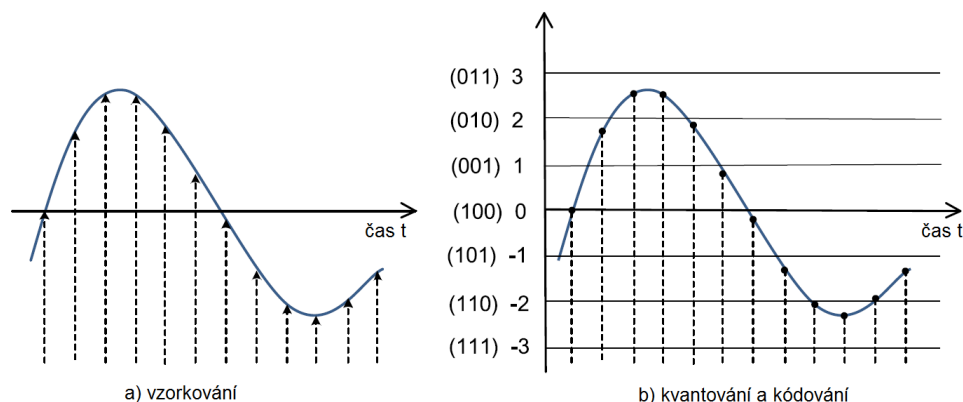
1. Vzorkování (Sampling)
2. Kvantování (Quantization)
3. Kódování (Coding)
4. Komprese (volitelná)

Vzorkování (obr. 9) je proces čtení analogového signálu v diskretních intervalech, tím dochází k vytváření diskretních vzorků ze spojitého analogového signálu (VoIPThink, 2014). Původní telefonie pracuje s narrowband kodeky (viz tab. 4), které pracují v pásmu 300–3 400 Hz. Průměrné lidské ucho je schopno registrovat zvuk ve frekvenčním intervalu 20–20 000 Hz. Otázkou bylo, jakou vzorkovací frekvenci zvolit, aby bylo po dekodování digitálního signálu na straně příjemce možné rozpoznat tón hlasu a náladu řečníka. Problém řeší tzv. *Nyquistův teorém*, který říká, že vzorkovací frekvence musí být minimálně dvojnásobek maximální přenášené frekvence ($2 \times 3400 \doteq 8000$ Hz) (Cioara a Valentine, 2012).

Kvantizace (kvantování) je proces, kdy je původní analogový signál v daném vzorku aproximován na konkrétní numerickou hodnotu z dostupného rozsahu (VoIPThink, 2014). Počet hodnot, kterými může být daný vzorek aproximován se odvíjí od počtu bitů, kam bude tato hodnota kódována. Třetí fáze – kódování – tedy zajišťuje reprezentaci hodnot jednotlivých vzorků do binární podoby. Detaily kvantizace, kódování a případné komprese se liší v závislosti na vybraném zvukovém kodeku. PCM standardně kóduje na 16 bitů.

Kodeky používané ve VoIP

Základní rozdělení skupin zvukových kodeků naznačuje tabulka 4. Tato práce se dále zaměřuje na narrowband kodeky, které jsou nejčastěji používány pro službu VoIP. PCM je chápána jako výchozí metoda pro kódování zvukového signálu, ze kterého zvukové kodeky vycházejí (Sun, Jammeh, Ifeachor, 2013). Základním kodekem ve VoIP je G.711 standardizovaný ITU-T. Využívá PCM s nelineárním kvantováním, čímž jsou lépe aproximovány nižší hodnoty signálu, ty se v lidské řeči vyskytují častěji než vysoké. Existují dvě varianty kodeku – *μ-law* rozšířený v Severní Americe a



Obr. 9: Ukázka digitalizace zvukového signálu.

Zdroj: Sun, Jammeh, Ifeachor (2013).

Japonsku, *A-law* rozšířený v Evropě a zbytku světa (Sun, Jammeh, Ifeachor, 2013). V obou variantách se používá 8 bitové kódování na jeden vzorek. Při vzorkovací frekvenci 8 kHz tak vzniká datový tok 64 kbps. Další hojně rozšířený kodek, avšak licencovaný, je G.729 vydaný rovněž ITU-T. Kóduje pomocí CS-ACELP (Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction) algoritmu, který i při vzorkovací frekvenci 8 kHz díky algoritmu CS-ACELP spotřebuje pouze 8 kbps šířky pásma (viz tab. 5). Podrobný seznam hlasových kodeků včetně jejich parametrů publikoval Sun, Jammeh, Ifeachor (2013).

Tab. 4: Rozdělení zvukových kodeků dle šířky frekvenčního pásma.

Zdroj: Ramo (2010).

Zkratka	Označení	Frekvenční pásmo	Určení	Datový tok	Příklady
NB	Narrowband	300–3 400 Hz	Telefonie	2,4–64 kbps	G.711, G.729
WB	Wideband	50–7 000 Hz	AM rádio	6,6–64 kbps	G.711.1, G.722
SWB	Superwideband	50–14 000 Hz	FM rádio	24–48 kbps	G.722.1
FB	Fullband	20–20 000 Hz	CD kvalita	32–128 kbps	G.719

Hodnota MOS-LQO kodeku G.711 je 4,1, zatímco G.729 dosahuje MOS 3,9. Tato hodnota vyjadřuje subjektivní hodnotu MOS. Měřeno dle standardu ITU-T P.800. Mírným snížením vnímané kvality zvuku lze použitím kodeku G.729 výrazně ušetřit dostupnou šířku datového pásma, kodek G.729 je ale výrazně výpočetně náročnější na zakódování/dekódování (Sun, Jammeh, Ifeachor, 2013).

Tab. 5: Parametry vybraných narrowband hlasových kodeků.

Zdroj: Cioara a Valentine (2012).

Kodek	Velikost paketu	Pakety/s	Datový tok	Tok včetně záhlaví	MOS
G.711	160 B (20 ms)	50	64,0 kbps	87,2 kbps	4,1
G.729	20 B (20 ms)	50	8,0 kbps	31,2 kbps	3,92
iLBC	38 B (20 ms)	50	15,2 kbps	38,4 kbps	4,14

Transportní protokol

Zakódovaný signál se umísťuje do paketů a přenáší po síti. Pro přenos zvuku se používá aplikační protokol RTP (Real-time Transport Protocol), který je vkládán do transportního protokolu UDP a ten následně do IP. Velikost RTP záhlaví je 12 B, UDP 8 B a IP záhlaví má ve výchozí formě 20 B. Z toho vyplývá, že režijní data každého VoIP paketu tvořená záhlavím IP/UDP/RTP dosahuje celkem 40 B (Cisco Systems, 2006c). Vedle protokolu RTP existuje protokol RTCP, který neslouží k samotnému přenosu dat, ale má pouze kontrolní funkci – reportuje zařízením statistiky o kvalitě probíhajícího hovoru.

Signalizační protokoly

Signalizační protokoly zajišťují řízení vzájemné telefonní komunikace. Mezi základní funkce signalizačních protokolů patří: lokalizace účastníka (nalezení spojení s koncovým zařízením), zjištění stavu účastníka (tón „obsazeno“, vyzvánění), zjištění možností účastníka (typ kodeku, přenosová rychlost), navázání spojení mezi účastníky hovoru, řízení a ukončení hovoru.

Mezi nejrozšířenější signalizační protokoly patří zejména:

- SIP (Session Initiation Protocol) – standardizovaný (RFC 3261), nelicencovaný,
- H.323 – standardizovaný ITU-T, nelicencovaný,
- SCCP – Skinny Client Control Protocol – proprietární, licencovaný.

Úspora přenosu hlasových dat

Přestože není přenos hlasových dat výrazně datově náročný, přetrvává z řady důvodů snaha o co největší úsporu přenášených dat. Lze využít například funkce VAD (Voice Activity Detection). Tato funkce detekuje během přenosu hlasu tichá místa a v těchto intervalech žádné pakety nevytváří. Dle Cisco Systems (2006c) lze použití funkce VAD ušetřit až 35 % šířky pásma. Tato funkce ale zpravidla na většině zařízeních aktivována není.

Další možností je využít kompresi záhlaví hlasových paketů označované cRTP, tím lze záhlaví dle Cisco Systems (2006c) snížit až na 2–4 B, vyváženo je to ovšem vyšší výpočetní náročností a zanášením zpoždění.

2.6 Bezdrátové sítě standardu IEEE 802.11

Standard 802.11 (Wi-Fi) je rozsáhlý bezdrátový standard, široce rozšířený a ve světě nejrozšířenější technologií pro bezdrátovou komunikaci v lokálních sítích. Tato sekce stručně popisuje dostupné standardy a aspekty, které je nutné zohlednit při provozování Wi-Fi sítě. Následující výčet a tab. 6 shrnuje již vydané a v budoucnu nasazované standardy 802.11 podle Hucabyho (2014):

- Původní IEEE 802.11** – byl ratifikován v roce 1997. Dnes už se již dnes nepoužívá. Nabízel přenosové rychlosti 1 a 2 Mbps v pásmu 2,4 GHz. Jeho nástupcem je 802.11b.
- IEEE 802.11a** – umožňuje teoretický datový přenos až 54 Mbps. Jeho hlavní předností je to, že využívá pásma 5 GHz, což je s ohledem na přeplněné pásmo 2,4 GHz stále více oceňováno. Využívá technologii OFDM s modulačními schématem až 64-QAM.
- IEEE 802.11b** – navazuje na původní standard a komunikuje v pásmu 2,4 GHz. Dnes už je zastaralý a většinou zastoupen 802.11g, protože maximální přenosová rychlost je pouze 11 Mbps. Pro šíření spektra používá DSSS.
- IEEE 802.11g** – stejně jako 802.11b používá pásmo 2,4 GHz a stejnou šířku kanálu, navíc je s tímto standardem zpětně kompatibilní. Zpravidla ale používá metodu OFDM a maximální přenosová rychlost je 54 Mbps.
- IEEE 802.11n** – dnes patrně nejpodporovanější Wi-Fi standard. Výhodou standardu je, že ho lze provozovat v pásmu 2,4 i 5 GHz, je tak zajištěna kompatibilita se standardy a/b/g. Kanál lze z 20 Mbps rozšířit až na 40 Mbps a maximální přenosová rychlost dosahuje teoreticky až 600 Mbps. Takové přenosové rychlosti je mj. dosaženo využitím technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), která umožňuje pro přenos využívat více paralelních antén a přenášet tak více datových toků, tzv. *spatial streamů*.
- IEEE 802.11ac** – tento standard nepoužívá pásmo 2,4 GHz, ale pouze 5 GHz. Minimální šířka kanálu je 80 MHz, volitelně až 160 MHz. Používá OFDM a modulační schéma max. 256-QAM. Pro komunikaci na pásmu 2,4 GHz se používá standard 802.11n. Celková přenosová kapacita je pak dána součtem kapacit obou frekvenčních pásem.
- IEEE 802.11ad** – je nejbližším očekávaným standardem. Využívat bude přenosového pásma 60 GHz. Díky tomuto nezarušenému pásmu a šířce kanálu až 2,16 GHz slibuje přenosovou rychlost v řádu jednotek gigabitů.

K výše zmíněným standardům je třeba podotknout, že reálná přenosová rychlost je v důsledku okolních negativních vlivů na bezdrátový signál výrazně nižší než maximální teoretická, protože je přenosová rychlost ovlivňována silou přijatého signálu a odstupem signálu od šumu. Současně jsou dnes rozšířená zařízení schopna komunikovat maximálně standardem 802.11n. Běžně rozšířené domácí Wi-Fi routery a starší koncové uzly navíc pásmo 5 GHz zpravidla nepodporují. Reálnou propustností bezdrátové sítě se věnuje Florwick a kol. (2013), z jejich měření vyplývají reálné přenosové rychlosti popsané v tab. 7.

Bezdrátové sítě využívají ke komunikaci elektromagnetický signál o stanovené frekvenci vysílaný určitou intenzitou (pod určitým výkonem) udávaným ve watech (W) nebo dB. Zatímco W (mW) je absolutní jednotka, dB je relativní jednotka využívající logaritmy ke srovnávání dvou absolutních hodnot (Hucaby, 2014). Pokud P_1 a P_2 jsou vysílací výkony dvou zdrojů, lze hodnotu v dB vyjádřit vztahem (18). Zpravidla je jako referenční hodnota výkonu (P_1) používána hodnota 1 mW. Poté lze uvádět jako jednotku výkonu dBm.

Tab. 6: Přehled bezdrátových standardů IEEE 802.11.
Zdroj: Hucaby (2014).

	Rok	Pásmo	Kanál	Modulace	MIMO	Rychlost/stream
802.11a	1999	5 GHz	20 MHz	OFDM	–	54 Mbps
802.11b	1999	2,4 GHz	22 MHz	OFDM	–	11 Mbps
802.11g	2003	2,4 GHz	22 MHz	OFDM	–	54 Mbps
802.11n	2009	2,4, 5 GHz	20, 40 MHz	OFDM	až 4	72 Mbps
802.11ac	2014	5 GHz	až 160 MHz	OFDM	až 8	443 Mbps
802.11ad	2015	2,4, 5, 60 GHz	až 2,16 GHz	OFDM, SC	–	6,7 Gbps

Tab. 7: Datová propustnost buňky s ohledem na bezdrátový protokol a počet klientů za ideálních přenosových podmínek.
Zdroj: Florwick a kol. (2013).

Protokol	Propustnost	Reálná propustnost	Počet hostů	Propustnost/uživatel
802.11b	11 Mbps	7,2 Mbps	20	360 kbps
802.11b/g	54 Mbps	13 Mbps	20	650 kbps
802.11g	54 Mbps	25 Mbps	20	1,25 Mbps
802.11a	54 Mbps	25 Mbps	20	1,25 Mbps
802.11n	72 Mbps	35 Mbps	20	1,75 Mbps

$$dB = 10 \times \log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (18)$$

Vysílací výkon opouštějící anténu vysílače se označuje jako EIRP (Effective Isotropic Radiated Power). Tento parametr kromě samotného vysílacího výkonu (TX_P) síťové karty zohledňuje zisk antény v dBi (TX_A) a ztrátu kabelu mezi kartou a anténou (TX_C), jak popisuje vztah (19). Vysílací výkony Wi-Fi sítí jsou v České republice regulovány Českým telekomunikačním úřadem. Pro interiéry je povolen maximální vysílací výkon v pásmu 2,4 GHz 100 mW (20 dBm) (ČTÚ, 2010).

$$EIRP = TX_P - TX_C + TX_A \quad (19)$$

Příjemce bezdrátového signálu již detekuje signál (RSSI – Received Signal Strength Indicator) s výrazně menší intenzitou než s jakou signál vyslal odesílatel. Za předpokladu, že signál není degradován okolními negativními vlivy (viz níže), lze slábnutí signálu popsat vztahem (21). Vzhledem k tomu, že RSSI je zpravidla menší než 1 mW, je relativní jednotka v dBm v záporných hodnotách. Za kvalitní je považován signál při RSSI do -60 dBm. Hodnoty signálu menší než -85 dBm jsou již často detekovány jako šum.

Důležitým ukazatelem kvality je dle Hucabyho (2014) SNR (Signal-to-noise Ratio) udávající poměr mezi užitečným signálem (S) a okolním šumem (N). Vedle SNR se lze setkat také s charakteristikou SNIR (Signal-to-noise-plus-interference Ratio), která kromě šumu zohledňuje i interferenci (I) vzniklou okolními bezdrátovými prvky (20).

$$SNIR = \frac{S}{N + I} \quad (20)$$

Vlivy fyzických objektů na šíření signálu

Rádiový signál propagovaný volným prostorem je v reálném světě zkreslován různými vlivy způsobenými přítomností fyzických objektů. Zdi budovy, jejich materiál, přítomnost osob, elektrické spotřebiče, atd., degradují přenášený rádiový signál. Následující text přibližuje nejčastější negativní vlivy, které uvádí Hucaby (2014).

Odraz signálu – při dopadu vlny na povrch předmětu může být signál odražen a pod určitým úhlem pokračovat dál prostorem. Odraz vzniká zejména na kovových a skleněných površích.

Vícenásobné přenosy – (*multipathing*) vlivem odrazu signálu vzniká v prostoru několik kopií originálního signálu. Pokud příjemce všechny přijaté signály zkombinuje, může být výsledkem chybná reprezentace původního signálu, který může způsobit špatnou interpretaci přenášených dat. Vícenásobný přenos nemusí být ale nutně špatný efekt. Technologie MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) využívá právě tohoto efektu ke zvýšení přenosové rychlosti pomocí několika antén (využívá např. standard IEEE 802.11n).

Absorpce signálu – průchodem signálu přes materiál dochází k absorpci signálu, která se liší v závislosti na druhu a hustotě materiálu. Hucaby (2014) uvádí, že sádkartonová zeď tlumí signál o 4 dBm, zděná příčka až o 12 dBm. Lidské tělo tlumí signál na frekvenci 2,4 GHz přibližně o 5 dBm.

Rozptyl signálu – vlivem dopadu signálu na materiály s nerovným povrchem, se signál zpravidla poruší a rozptýlí do různých směrů.

Lom signálu – když signál prochází z jednoho prostředí do druhého, které má rozdílnou hustotu, může dojít k lomu signálu, který pak pokračuje dále pod jiným úhlem jiným směrem.

Difrakce signálu – při průchodu signálu kolem fyzické překážky, může docházet k ohybu signálu. Přestože může být signál procházející překážkou kompletně pohlcen, signál, který míjí překážku, se ohýbá. Díky tomu za překážkou nevznikne signálový stín, ale ohnutý signál prostor pokryje, je ale zkreslený vlivem difrakce.

Propagace signálu

Přesně odhadovat útlum (*fading*) přenášeného signálu je velmi obtížné, neboť se jedná o stochastický jev. Vždy totiž záleží na aktuálních podmínkách na konkrétním místě, včetně počasí a teploty (více v části 2.6, Efekt fyzických objektů na šíření signálu). Na základě empirických dat z dlouhodobých pozorování ale byly vytvořeny modely, které charakterizují propagaci rádiového signálu za různých podmínek. Andrusenko, Burbank, Ward (2009) tyto modely dělí následovně:

- LS modely (Large Scale)
 - Free Space Path Loss Model

- Two Ray Ground Reflection Model
- Log Distance Path Loss Model
- SS modely (Small Scale)
 - Rician Model
 - Rayleigh
 - ITU indoor propagation model

LS modely popisují průměrnou sílu signálu na straně příjemce v případech s delší vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem, typicky ve venkovním prostředí. SS modely se snaží charakterizovat chování rádiového signálu na krátkou vzdálenost s ohledem na výše zmíněné negativní vlivy přítomné zejména v interiérech.

Během přenosu rádiového signálu médiem dochází k přirozenému zmenšování amplitudy signálu i za předpokladu volného prostoru, tedy bez přímého příspěvu negativních vlivů z přítomnosti fyzických objektů. Se vzdáleností od odesílatele signál slábne, až se úplně vytratí. Hucaby (2014) tento efekt přirovnává k vlnám, které vzniknou na hladině, když hodíme do vody kámen, vlny se postupně zmenšují až do ztracena. Tento jev se v bezdrátových sítích označuje jako *free space path loss* (FSPL). Jedná se o exponenciální funkci, kdy výslednou sílu signálu determinuje použitá frekvence a vzdálenost. Naznačuje ji vztah (21), kde d reprezentuje vzdálenost mezi odesílatelem a příjemcem signálu, c reprezentuje rychlost světla ve vakuu a f použitou frekvenci. Parametr α má ve volném prostoru hodnotu 2. S ohledem na charakter konkrétní budovy a její zaplnění roste hodnota α i přes hodnotu 3. Hucaby (2014) uvádí upravenou formuli (22) pro vyjádření FSPL. Síla signálu na příjemci (P_r) je potom vyjádřena vztahem 23, kde P_t značí vysílací výkon vysílače, G_r zisk antény na příjemci, G_t zisk antény na vysílači.

$$FSPL = \alpha \cdot 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} df \right) \quad [dB] \quad (21)$$

$$FSPL = 32,44 + \alpha \cdot 10 \cdot (\log_{10} f + \log_{10} d) \quad [dB] \quad (22)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSPL \quad [dB] \quad (23)$$

Dle Hucabyho (2014) je možné zvýšit oblast pokrytí signálem zvýšením vysílacího výkonu (EIRP). Tento přístup je ale funkční pouze v případě, kdy je daná buňka izolovaná a nehrozí rušení např. od dalších přístupových bodů. Další možností je použití správné modulační techniky. Platí totiž, že komplexnější modulační techniky (např. OFDM 64-QAM) sice umožňují vyšší teoretickou přenosovou rychlost, ale jejich dosah je menší, na rozdíl od technik jednodušších (např. DSSS DBPSK).

Dle Andrusenka, Burbanka, Warda (2009) se pro odhad propagace signálu na delší vzdálenosti hodí *Two Ray Ground Reflection Model* (TR). Počítá navíc i se signálem odraženým od země (zemského povrchu). Současně platí předpoklad, že mezi vysílačem a přijímačem je přímá viditelnost (*Line of Sight*, LOS). Na rozdíl od FSPL modelu počítá navíc s výškou antény vysílače (h_t) a přijímače (h_r).

Kategorie SS modelů je nejčastěji v síťových simulátorech zastoupená modely *Rician* a *Rayleigh*. V obou případech se jedná o modely založené na předpokladu *multipathingu*, tedy příjmu rádiových vln z více směrů. K tomuto jevu dochází v interiérech velmi často. Model *Rician* je mezi vědci všeobecně akceptován jako model prostředí s komponentou LOS. Naopak model *Rayleigh* je zpravidla využíván jako model, kde složka LOS chybí, tzn. mezi komunikujícími uzly neexistuje přímá viditelnost.

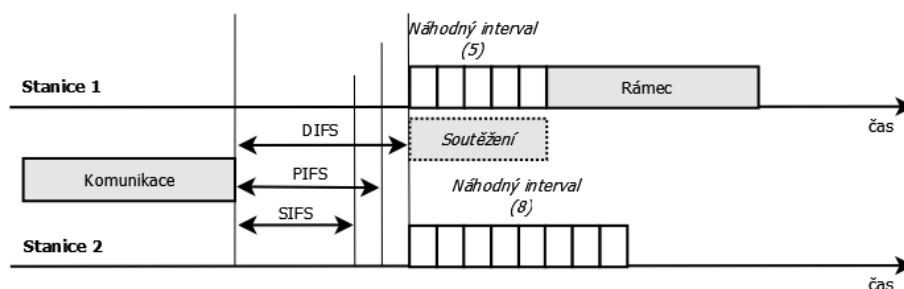
Standard IEEE 802.11e

Wi-Fi sítě jsou v principu sítě s vícenásobným přístupem, z tohoto důvodu je komunikace řízena metodou vícenásobného přístupu CSMA (Carrier Sense Multiple Access). V sítích 802.11 lze zvolit distribuovanou (DCF – Distributed Coordination Function) nebo centralizovanou (PCF – Point Coordination Function) variantu řízení přístupu (koordinální funkci). Koordinální funkce PCF se ale dnes již prakticky nepoužívá (Koton, 2014).

Koordinální funkce dle Molnára (2008) využívají tři typy mezer:

- **SIFS** (Short Interframe Space) – je nejkratší a zajišťuje nejpravděpodobnější přístup k médiu,
- **PIFS** (Point Coordination Function Interframe Space) – je středně dlouhá, používá se pro PCF.
- **DIFS** (Distributed Coordination Function Interframe Space) – je nejdelší, používá se pro DCF.

Každá stanice komunikující v DCF síti musí čekat minimálně DIFS interval před pokusem o přistoupení na médium a odeslání datového rámce. Po uplynutí DIFS intervalu musí čekat ještě náhodnou dobu, aby se předešlo vzniku kolizí (obr. 10). Náhodná hodnota vznikne násobením čekacího intervalu *slot time* a náhodného čísla z intervalu od 0 do CW , přičemž proměnná CW (Contention Window) je na počátku dána hodnotou CW_{min} . V případě kolize se hodnota proměnné CW zpravidla zvojnásobí. V nejhorším případě může narůst z původní hodnoty 15 až na 1023 (viz tab. 8).



Obr. 10: Mezirámcové mezery Wi-Fi sítí.
Zdroj: Koton (2014).

Tab. 8: Velikosti mezirámcových mezer Wi-Fi sítí.
Zdroj: Koton (2014).

Technologie	SIFS [μs]	PIFS [μs]	DIFS [μs]	slot time [μs]	CW_{min} [μs]	CW_{max} [μs]
802.11a	16	25	34	9	15	1023
802.11b	10	30	50	20	31	1023
802.11g	10	30	50	20	15	1023
802.11n (2,4 GHz)	10	19/30	28/50	9/20	–	–
802.11n (5 GHz)	16	25	34	9	–	–
802.11ac	16	25	34	9	–	–

Nad klasickými přístupovými metodami byl definován rozšiřující standard IEEE 802.11e, jehož úkolem je zavést do Wi-Fi sítí podporu mechanismů QoS. Tento standard definuje další rozšířené koordinační funkce EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) a HCCA (HCF Controlled Channel Access), přičemž k používanějšímu DCF se váže pouze EDCA.

EDCA podle Kotona (2014) definuje čtyři kategorie přístupu (CA – Category Access) pojmenovaných AC_BK (přenos na pozadí), AC_BE (přenos best-effort), AC_VI (video), AC_VO (hlas) a až osm prioritních úrovní, které jsou kompatibilní se standardem 802.11D používaným v pevných lokálních sítích (viz tab. 9). Výchozí kategorie je AC_BK s prioritní úrovní 0. Každá kategorie má vlastní frontu, kam se pakety odkládají, pokud daná kategorie právě nemá přístup k médium.

Tab. 9: Mapování priorit dle 802.11D na kategorii přístupu (AC).
Zdroj: Molnár (2008).

Priorita dle 802.1D	Využití dle 802.1D	Kategorie	Využití dle 802.11e
1	přenos na pozadí	AC_BK (0)	přenos na pozadí
2	nedefinované	AC_BK (0)	přenos na pozadí
0	best-effort (výchozí)	AC_BK (0)	best-effort
3	excellent-effort	AC_BE (1)	best-effort
4	řízená zátěž	AC_VI (2)	video
5	video	AC_VI (2)	video
6	hlas	AC_VO (3)	hlas
7	správa sítě	AC_VO (3)	hlas

Soutěž o příležitost přenosu je v souvislosti s EDCA označovaná jako TXOP (Transmission Opportunity), tj. časový interval, kdy je možno přenést rámeček. Ve standardu 802.11e má každá kategorie přístupu vlastní mezirámcovou mezeru AIFS (Arbitration Interframe Space) nastavitelnou administrátorem (obr. 11). Vždy musí platit, že $AIFS[AC] \geq DIFS$. Délku AIFS lze nastavit parametrem AIFSN, který udává délku v čekacích intervalech slot time vůči SIFS¹⁰. Dále je možné nastavit pro každou kategorii hodnoty proměnných $CW_{min}[AC]$ a $CW_{max}[AC]$, přičemž

¹⁰Při $AIFSN = 2$ lze říci, že $SIFS + 2 \times slottime$.

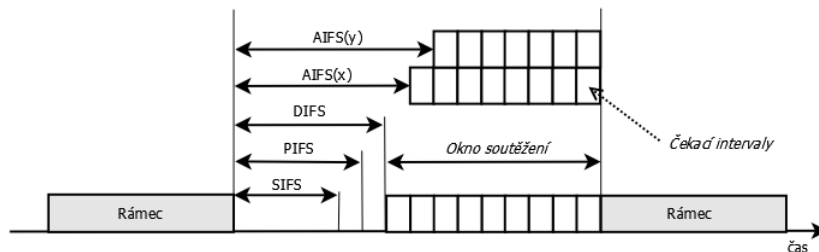
platí podmínka, že pro kategorii s vyšší prioritou je třeba zvolit kratší okno soutěžení. Doporučené hodnoty popisuje tabulka 10. Koton (2014) dále popisuje průběh komunikace při aktivním mechanismu EDCA. V případě, že je médium volné, stanice může bez čekání odeslat rámeček. Pokud ne, rámeček je vložen do fronty. Jakmile se uvolní médium, čeká stanice interval AIFS podle kategorie a následně lze začít soutěžení vygenerováním náhodného čísla z rozsahu 1 až $CW[AC]$ a odpočítáváním. V případě, kdy nastane situace, kdy jedno zařízení komunikuje pouze pomocí DCF a druhé pomocí EDCA, bylo by zařízení podporující EDCA znevýhodněno s ohledem na velikost parametru AIFS. Aby se tomuto stavu předešlo, smí zařízení podporující EDCA odpočítávat z náhodně zvolené hodnoty okamžitě po uplynutí AIFS, zařízení nepodporující EDCA musí nejprve čekat jeden slot time a až poté začít odpočítávat z náhodně zvolené hodnoty.

Dále je nutné popsat blíže parametr TXOP, který značí dobu, po kterou může daná kategorie využívat médium. Hodnota 0 znamená, že lze odeslat pouze jeden rámeček. Kategorie AC_VI a AC_VO mají hodnoty TXOP vyšší, viz tabulka 10.

Tab. 10: Mapování priorit dle 802.11D na kategorii přístupu (AC).

Zdroj: Molnár (2008).

Kategorie	CW_{min}	CW_{max}	AIFSN	TXOP pro 802.11g
AC_BK	CW_{min}	CW_{max}	7	0
AC_BE	CW_{min}	CW_{max}	3	0
AC_VI	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$	CW_{max}	6,026 ms	3,008 ms
AC_VO	$(CW_{min} + 1)/4 - 1$	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$	3,264 ms	1,504 ms



Obr. 11: Mezirámčové mezery mechanismu EDCA.

Zdroj: Koton (2014).

Problém skrytého uzlu

Vzhledem k vysoké nestabilitě rádiového prostředí byl do Wi-Fi sítí dle Molnára (2008) dodán další mechanismus, který by umožňoval nerušený přístup k médium. Rezervace média mezi STA a AP je na omezenou dobu vyjednávána dvojicí rámců RTS/CTS (Request-To-Send/Clear-To-Send), kdy ostatní STA rámce slyší a respektují. Dále je pomocí této dvojice rámců možné vyřešit např. „problém skrytého uzlu“. S ohledem na vysokou režii je funkce mechanismu RTS/CTS omežována a

používá se dnes např. pro přenos nadměrně dlouhého rámce. Jak popisuje Skipala (2011), tato metoda není standardně aktivována a je nutné ji explicitně aktivovat na všech prvcích v buňce. Se zapnutím této volby je také nutné uvést hodnotu *RTS Threshold*, která určuje limit velikosti rámce, nad který je nutno použít metodu RTS/CTS. Rámce menší velikosti než *RTS Threshold* je možno odeslat bez výše zmíněného mechanismu. Pro datové rámce větší než *RTS Threshold* musí STA s AP nejprve provést RTS/CTS proces a teprve poté vysílat daný rámeček.

Přeposílání nedoručených rámců

Každý odeslaný rámeček musí být potvrzen příjemcem rámcem ACK. Jakmile uplyne doba (*ack-timeout*), kterou odesílatel čeká na přijetí potvrzení, a ACK rámeček není obdrženo, je přenos považován za neúspěšný. Potvrzující ACK rámeček je odeslán pouze při kompletním a správném doručení původního rámce. Po neúspěšném vyslání paketu odesílatel opakuje vysílání stejnou modulační rychlostí, a to až do počtu opakování určeného parametrem *hw-retries*. Poté vysílací strana sníží modulační rychlost na další podporovanou a zkusí vysílání znovu (opět s případným opakováním), dokud nedojde k úspěšnému odeslání. Pokud již nelze snižovat modulační rychlost a datový rámeček se nepodařilo odeslat, proběhnou zpravidla ještě 3 opakování na nejnižší podporované modulační rychlosti, poté je spojení rozpojeno (Skipala, 2011). Je patrné, že tato případná opakování předcházejí ztrátám, ale naopak navyšují zpoždění při přenosu a snižují reálnou propustnost linky. Doporučená hodnota *hw-retries* je 7. Výpočet maximálního zpoždění (D) přenosu vlivem *hw-retries* (HR) naznačuje vztah (24), kde t_{frame} značí čas potřebný k přenesení rámce a t_{ACK} je hodnota, po kterou odesílatel čeká na doručení potvrzujícího rámce ACK. Tabulka 11 dále přibližuje maximální hodnoty zpoždění vlivem přenosu rámců o velikost 1500 B při *hw-retries* = 7 a *ack-timeout* = 50 μ s.

$$D = HR * (t_{frame} + t_{ACK}) \quad (24)$$

Tab. 11: Maximální zpoždění rámců během přenosu při *hw-retries* = 7 a *ack-timeout* = 50 μ s (IEEE 802.11a). Zdroj: Skipala (2011).

Modulační rychlost	Přenos 1 paketu	Vliv hw-retries	Kumulovaně
54 Mbps	0,458 ms	3,206 ms	3,206 ms
48 Mbps	0,495 ms	3,465 ms	6,671 ms
36 Mbps	0,567 ms	3,969 ms	10,640 ms
24 Mbps	0,729 ms	5,103 ms	15,743 ms
18 Mbps	0,908 ms	6,356 ms	22,009 ms
12 Mbps	1,230 ms	8,610 ms	30,709 ms
9 Mbps	1,590 ms	11,130 ms	41,839 ms
6 Mbps	2,244 ms	15,708 ms	57,547 ms

2.7 Statistické metody

Ekonometrické modelování

Nástroje použité při vyhodnocení výsledků práce částečně vycházejí z matematiky a statistiky, resp. ekonometrie. Matematika a statistika je využívána v oblasti ekonometrie, která se zabývá aplikací vybraných postupů na problémy ekonomie a ekonomické praxe (Adamec, Střelec, Hampel, 2013). Metody ekonometrie, zejména regresní analýzu, lze ale s výhodou využít i při neryze ekonomických problémech.

Modelování je postup vycházející ze zkoumaného systému, jehož cílem je specifikace modelu nad daným systémem, neboli formulace základní hypotézy. Vzniklý model umožňuje formulaci slovně popsanych teoretických poznatků. Jestliže daný model specifikujeme matematicky, dostaneme deterministický matematický model, který vyjadřuje základní hypotézy nad původním systémem s určitým únosným zjednodušením. Ekonometrický model popisuje základní ekonomickou hypotézu jednou nebo několika rovnicemi, které jsou zpravidla vzájemně závislé. (Adamec, Střelec, Hampel, 2013). Závislosti umožňují v další fázi kvantifikovat model na základě empirických dat. Kvantifikace (estimace) modelu je statistickým odhadem parametrů, které vyjadřují intenzitu a směr vzájemného působení do modelu zahrnutých veličin. U odhadnutého modelu následuje ověření statistické významnosti a interpretovatelnosti. Konečnou fází je aplikace modelu, tj. praktické využití odhadnutého modelu nebo například prognózování budoucího vývoje. (Hampel, Blašková, Střelec, 2012)

Jednotlivé kroky statistického modelování lze vymezit následujícími kroky:

1. specifikace modelu (upřesnění závislostí, které chceme studovat),
2. sběr relevantních dat pro daný model,
3. kvantifikace modelu (odhad koeficientů pro model),
4. verifikace modelu, testy průkaznosti v praxi,
5. interpretace odhadů,
6. formulace závěrů a použití modelu v praxi.

Regresní analýza

Regresní analýza je statistická metoda, která popisuje výkyvy jedné veličiny (závisle proměnné) jako funkci výkyvů jedné nebo několika nezávisle proměnných (regresorů) prostřednictvím jediné regresní rovnice. Regresní úloha se provádí zejména za účelem popisu (vysvětlení) a kvantitativního vyjádření závislostí mezi zkoumanými veličinami modelu a rovněž k predikci budoucích nebo empiricky nepozorovaných hodnot závisle proměnné původního systému. (Adamec, Střelec, Hampel, 2013)

Regresní závislost můžeme vyjádřit obecným zápisem regresního modelu základního souboru pomocí vztahu (25), pro i -té pozorování výběrového vícerozměrného souboru jako vztah (26).

$$Y = f(X) + \epsilon \quad (25)$$

$$Y_i = f(X_i) + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

Veličina Y reprezentuje závislou (vysvětlovanou) proměnnou, veličina X se nazývá nezávislá (vysvětlovaná) proměnná. Předpis $f(X)$ pak označuje funkci lineární v parametrech¹¹ zahrnující vysvětlující veličiny (regresory) a regresní koeficienty β . $f(X)$ představuje deterministickou složku modelu. Obecně můžeme lineární regresní model zapsat jako vztah (27), pro i -té pozorování poté dostáváme vztah (28).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (27)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \epsilon \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

Regresní koeficienty β jsou parametry regresní funkce, které definují souřadnice všech bodů této funkce. Jejich konkrétní numerické odhady získáme z vícerozměrných výběrových souborů například metodou nejmenších (minimálních) čtverců (OLS – Ordinary Least Squares). Lze říci, že regresní koeficienty jsou numerickou reflexí vztahů mezi veličinami v regresním modelu (Adamec, Střelec, Hampel, 2013).

Náhodná složka (chybový člen) ϵ reprezentuje stochastické vlivy působící na veličinu Y , které však nebyly popsány vysvětlující proměnnou (proměnnými) X . Jestliže pro náhodnou složku platí, že $E(\epsilon) = 0$, pak očekávanou hodnotu Y můžeme vyjádřit (odhadnout) pomocí deterministického vztahu (bez vlivu náhodné složky) vztahem (29), resp. (30) pro jednotlivá pozorování, kde $\hat{\beta}_i$ je bodový odhad neznámého regresního koeficientu β_i a veličina \hat{Y} je odhadnutá (predikovaná, vyrovnaná) hodnota proměnné Y . (Hampel, Blašková, Střelec, 2012)

$$estE(Y|X) = \hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_k X_k \quad (29)$$

$$estE(Y|X) = \hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_k X_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

Rozdíl mezi skutečnými hodnotami Y_i a \hat{Y}_i v jednom výběru nazýváme reziduum a značíme $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ pro $i = 1, 2, \dots, n$. Rezidua lze chápat jako odhady neznámých náhodných složek e_i . Závisejí na vyrovnaných hodnotách Y a tím i na použité regresní funkci, tudíž platí, že velikost rezidua klesá s kvalitou použité regresní funkce.

Metoda nejmenších čtverců

Metoda obyčejných nejmenších čtverců (OLS, Ordinary Least Squares) je jednou z nejpoužívanějších metod sloužících k odhadování numerických hodnot koeficientů

¹¹Pro práci s výsledným modelem (verifikace, práce s hypotézami) je vhodnější používat model lineární v parametrech.

modelu lineární, popř. linearizované regrese (27), která je lineární v parametrech β ¹². (Adamec, Střelec, Hampel, 2013)

OLS je optimalizační metoda, která získává numerické odhady regresních koeficientů a přitom minimalizuje součet čtverců reziduí (ESS – Explained Sum of Squares), pro které platí vztah (31).

$$ESS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (31)$$

Metoda OLS volí numerické hodnoty koeficientů lineárního regresního modelu, které minimalizují sumu čtverců reziduí ESS. ESS je u metody OLS tzv. optimalizačním kritériem (Q), které je minimalizováno, tj. můžeme zapsat vztahem (32).

$$ESS = Q = \sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \min \quad (32)$$

Vícenásobná regrese

Tento model byl již pomocí obecného modelu (27), resp. (29), popsán výše. Vícenásobná regrese je založena na tom, že se v modelu pracuje s více než jednou vysvětlující proměnnou. Jednotlivé odhadnuté parametry β_k udávají, jak moc se v průměru změni odhadovaná veličina Y , kdybychom o jednotku zvýšili příslušnou vysvětlující proměnnou x_k o jednotku, za předpokladu, že ostatní vysvětlující proměnné se nezmění (*ceteris paribus*) (Bil, Němec, Pospíš, 2009).

Tento model je oproti modelu s jedním regresorem nutné obohatit o jeden předpoklad, že libovolnou z vysvětlujících proměnných nejsme schopni vyjádřit jako nějakou lineární kombinaci ostatních vysvětlujících proměnných. O tomto problému se obecně mluví jako o problému multikolinearity (v důsledku existence korelací mezi vysvětlujícími proměnnými), prakticky je jím do určité míry zatížen každý model. Jak se zmiňuje Bil, Němec, Pospíš (2009), závažná hodnota korelace (multikolinearity) nastává v případě, kdy je korelace v absolutní hodnotě větší než 0,9.

Verifikace modelu

Před aplikací modelu je nutné provést verifikaci modelu, tedy odhad jeho kvality. Pomocí statistických ukazatelů je nutné ověřit, do jaké míry regresní rovnice popisuje empirická data, zda byly zahrnuty všechny důležité regresory nebo zda byla použita nejvhodnější funkční norma. Pro tyto účely se nejčastěji používají následující statistiky (Adamec, Střelec, Hampel, 2013)(Bil, Němec, Pospíš, 2009):

- Pearsonův korelační koeficient (PC) – měří závislost mezi proměnnými X a Y , nabývá hodnot $PC \in \langle 0; 1 \rangle$. Kladná hodnota vyjadřuje přímou závislost (zvý-

¹²Proměnná X může být v jakémkoli tvaru (např. umocněna, převrácena), ale parametr (β) musí zůstat lineární.

šení X vyvolá zvýšení Y), záporná hodnota závislost nepřímou (zvýšení X vyvolá snížení Y).

- Rozklad proměnlivosti (rozptylu) – popsán vztahy (33) a (34), kde \bar{Y} reprezentuje průměr Y :
 - Celkový součet čtverců (SST – Total Sum of Squares) – představuje součet čtverců odchylek závisle proměnné Y od vlastního aritmetického průměru.
 - Součet čtverců regrese (SSR – Sum of Squares of Regression) – je součet čtverců odchylek vyrovnaných (fitovaných) hodnot od vlastního průměru. Představuje proměnlivost vysvětlenou modelem.
 - Součet čtverců reziduí (SSE – Sum of Squares of Error) – je množství variability (náhodné složky) nevysvětlené regresním modelem.
- Koeficient determinace (R^2) – vyjadřuje relativní zastoupení regresní složky na celkové proměnlivosti vysvětlované veličiny Y . Jinými slovy koeficient determinace uvádí, kolik procent proměnlivosti závislé proměnné regresní model vysvětlil. Je normován na intervalu $R^2 \in \langle 0; 1 \rangle$.
- Adjustovaný koeficient determinace (R_{adj}^2) – jeho hodnota se zvýší tehdy, přidáme-li statisticky významnou vysvětlující proměnnou do modelu. Naopak R^2 se může zvýšit i v případě přidání nesmyslné proměnné do modelu.
- Střední chyba reziduí (MSE – Mean Square Error) – ukazuje průměrnou odchylku navrženého regresního modelu.

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (33)$$

$$SST = RSS + SSE \quad (34)$$

3 Literární rešerše

Vědecké publikace uvedené níže navazují na předchozí kapitulu 2, která tvoří přehled aktuálního stavu. Tato sekce shrnuje kromě publikací výše zmíněných i další relevantní příspěvky. Zahrnuty jsou sekce RFC dokumentů, popis relevantních doporučení ITU-T, vědecké publikace a tuzemské i zahraniční závěrečné práce. Vědecké publikace byly vyhledány z licencovaných databází dostupných ze sítě MENDELU¹³, tj. Scopus, Science Direct, Web of Knowledge, Springer, a dále ACM Digital Library a IEEE Explore. K vyhledávání byla použita klíčová slova: qos, quality of service, quality of service evaluation, qos evaluation, qos performance, measuring qos, qoe, qos qoe correlation, wtp qoe, wifi performance, qoe wifi, qoe voip, voip wifi, voip wlan, wvoip, vowlan.

3.1 RFC dokumenty

Následující výčet shrnuje rešerši vybraných RFC dokumentů vztahujících se k problematice QoS:

- RFC 2330 (IETF, 1998a) přináší základní rámec doporučení, pravidel a postupů pro vytváření metrik výkonnosti IP sítí (resp. jejich poskytovaných služeb). Mj. se zabývá například problémy spojenými se synchronizací času během testování.
- RFC 3393 (IETF, 2002) Definuje variaci jednosměrného zpoždění (PDV).
- RFC 3550 (IETF, 2003) se zabývá transportním (RTP) a kontrolním (RTCP) protokolem pro přenos VoIP. Kromě záhlaví paketů obou protokolů popisuje atributy, které jsou vstupy pro výpočet zpoždění nebo jitteru.
- RFC 4594 (IETF, 2006b) shrnuje doporučení pro implementaci QoS na principu DiffServ.
- RFC 4689 (IETF, 2006a) definuje terminologii pro hodnocení výkonnosti sítě na síťové vrstvě. Popisuje rozdíly mezi jitterem a PDV, dále definuje pakety doručované mimo pořadí nebo vícenásobné doručení paketu.

3.2 Přehled doporučení ITU-T

ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) je jeden ze tří (ITU-D, ITU-R) divizí International Telecommunication Union (ITU). Tato divize koordinuje telekomunikační standardy. ITU-T sdružuje pracovní skupiny, kde se každá skupina zabývá vybranou oblastí¹⁴. Pro téma této disertační práce je zajímavá zejména pracovní skupina SG12 – Performance, QoS and QoE.

ITU-T doporučení jsou vydávána v rámci sérií označovaných A – Z, tzn. příbuzná doporučení jsou zařazována do stejné série¹⁵. Následující text přináší základní

¹³http://mendelu.cz/cz/sluzby_sz/icuk/database#abeceda

¹⁴<http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2009-2012/Pages/default.aspx>

¹⁵<http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx>

přehled ITU-T doporučení vztahujících se k tématu disertační práce. Podrobný přehled doporučení přináší například Cholda a kol. (2009).

- E.800 (ITU–T, 2009) shrnuje základní definice a pojmy z oblasti QoS.
- G.107 (ITU–T, 2011a) definuje princip a implementaci E-modelu.
- G.114 (ITU–T, 2003) popisuje vliv jednosměrného zpoždění na E-model.
- G.1000 (ITU–T, 2011b) popisuje doporučení pro identifikace QoS parametrů a základní čtyři pohledy na QoS – vnímané zákazníkem, požadované zákazníkem, nabízené providerem, dosažené providerem. Další doporučení ve větvi G.1000 se zabývají oblastí QoE. Za zmínku dále stojí doporučení G.1011 (ITU–T, 2013), což je základní referenční příručka pro odhadování QoE, dále např. doporučení G.1020 (ITU–T, 2006c) definuje základní IP metriky (delay, jitter, aj.) využívané pro hodnocení kvality řeči.
- P.10 (ITU–T, 2006b) je úvodní doporučení v rámci série P, které shrnuje základní definice a pojmy z oblasti QoE. Série P se pak orientuje popisem metod pro subjektivní a objektivní hodnocení QoE.
- P.563 (ITU–T, 2004) se zabývá neintrusivním objektivním odhadem MOS na základě degradované zvukové nahrávky na straně příjemce.
- P.800 (ITU–T, 1996) definuje Mean Opinion Score a základní rámec subjektivního testování, P.800.1 (ITU–T, 2006a) původní doporučení rozšiřuje o nové definice MOS.
- P.861 (ITU–T, 1998) popisuje princip metody PSQM (předchůdce PESQ) včetně implementace.
- P.862 (ITU–T, 2001) se zabývá principem metody PESQ včetně implementace.
- P.863 (ITU–T, 2014) je průvodní doporučení popisující metodu POLQA, následovníka PESQ.
- Y.1540 (ITU-T, 2011c) se zabývá výkonnostními parametry sítě na vrstvě L3, mj. popisuje zpoždění a PDV.

3.3 Vědecké publikace

Rešerše publikací z oblasti Quality of Service

Aplikace QoS nástrojů je nutná pouze v okamžiku, dojde-li k vyčerpání dostupné šířky pásma, která v důsledku znamená přetečení zásobníku s pakety čekající na vložení na médium. Pokud je šířka pásma dostatečná, není QoS třeba. Zkušenosti s vysokorychlostními sítěmi přináší ve své studii Kluge (2013).

Ivanovich a kol. (2003) představují framework nazvaný „*Wireless QoS framework*“ poskytující doporučení, jak postupovat při implementaci QoS politik k zajištění maximálního naplnění uživatelských požadavků. Framework vychází ze zjednodušeného vrstveného modelu ISO OSI. Zavádí vrstvy aplikační, síťovou, datalinkovou a fyzickou. Každá vrstva má měkké nebo tvrdé metriky. Nejprve jsou definovány měkké metriky uživatele na nejvyšší vrstvě, které jsou postupně promítány do nižších vrstev. Následně demonstrují aplikaci tohoto frameworku na konkrétním

příkladu topologie, kde dvojice koncových uzlů připojená bezdrátově k serverové farmě konzumuje servery poskytované služby.

Baghaei a Hunt (2004) se podobně jako Invanovich a kol. (2003) zaměřují na kvalitu služeb v bezdrátových sítích. Přináší komparativní studii služeb poskytovaných v bezdrátových a drátových sítích včetně požadavků na alokaci zdrojů pro jednotlivé služby. Dále diskutují možnosti zajištění kvality služeb v bezdrátové síti s pomocí datalinkové vrstvy bez použití značkování na síťové vrstvě (DSCP).

Han, Ahn, Sung (2002) publikují případovou studii vlivu QoS politiky a přítomnost VPN spojení na kvalitu VoIP hovoru při současném vytěžování linky dalšími toky. Studie současně odkazuje na další komparativní publikace zabývající se FIFO a WFQ. Autoři porovnávají základní frontový mechanismus FIFO s WFQ (Weighted Fair Queuing). Prezentované hodnoty měření podle očekávání poukazují na lepší výsledky při aplikaci WFQ bez přítomnosti VPN. Rozdíly však nejsou markantní.

Nisar a kol. (2012) přináší komparativní studii schedulerů. Zaměřují se na schedulerly vhodné pro VoIP provoz. Kromě jejich funkcionality popisují i výhody a nevýhody jednotlivých algoritmů.

Podobně Amin (2005) testuje chování (výkonnost) VoIP. Porovnává dva signalizační protokoly (SIP a H.323) testovaných na LAN a WLAN ve variantách bez VPN, PPTP a IPsec.

Balogh a Medvecký (2011) publikovali simulaci zaměřenou na výkonnost dvou implementací frontového mechanismu WFQ, a to již méně používaný Fair Weighted Fair Queuing+ (WF2Q+) a novější Weighted Round Robin (WRR). Srovnání probíhá na čtyřech UDP tocích.

Rashed a Kabir (2010) se zabývají komparativní analýzou frontových mechanismů, a to FIFO, PQ a WFQ. Simulace byla provedena v prostředí OPNET. Na závěr studie jsou shrnuta doporučení pro aplikaci dílčích mechanismů.

Dekeris, Adomkus, Budnikas (2006) představují studii aplikace mechanismů WFQ a LLQ pro podporu kvality přenosu zvuku a dat videokonference. Podobné studie publikovali i Agrawal a kol. (2008) nebo Cristofaro (2009).

Torres a kol. (2011) hodnotí vliv *Congestion Avoidance* nástroje adaptive RED na hodnoty základních metrik kvality poskytovaných služeb. Na závěr uvádí případy, kdy je vhodnější RED neaplikovat a nechat vzniknout *drop-tail*.

Qiu (2008) se zaměřil na zajištění kvality poskytování IPTV v domácnostech. Navrhuje model frontového mechanismu pro IPTV systémy. Následně pomocí simulátoru NS2 analyzuje, jaký vliv má přítomnost tohoto multimediálního toku na provoz dalších aplikací v síti.

Buzila a kol. (2007) prezentují případovou studii vlivu mechanismu QoS na kvalitu přenášeného IPTV v síti s nedostatečnou šířkou pásma. Přibližují také další důležité metriky pro hodnocení kvality přenosu IPTV jako *Start Delay* nebo *Pause/Resume Delay*.

Rešerše publikací z oblasti Quality of Experience

Kuipers a kol. (2010) ve své publikaci shrnují techniky pro měření QoE, poskytují základní přehled o měření QoE pro VoIP, video i gaming. Současně popisují experiment, kdy testují vliv tzv. „Zapping-time“ (čas přepnutí mezi dvěma kanály) na hodnotu MOS. Autoři diskutují umístování reklamy během času, kdy se přepíná nový program. Detailně se této problematice věnuje například Godana, Kooij, Ahmed (2009).

Reichel (2010) shrnuje přístupy k vnímání kvality služeb. Představuje kromě QoS a QoE i další pojmy (QUE – Quality of User Experience, QCE – Quality of Customer Experience, QGE – Quality of Group-member Experience) a vysvětluje vzájemné vztahy.

Schatz a kol. (2013) publikovali detailní review současného stavu v oblasti QoE. Zabývají se subjektivními i objektivními technikami pro hodnocení zvuku, videa i webových dat a diskutují využití výsledků výzkumu v oblasti QoS/QoE korelace.

Podobně i Stankiewicz a Jajszyk (2011) se zabývají QoE z teoretického pohledu, diskutují vlivy na výslednou hodnotu QoE a mj. prezentují přehled mapování CoS mezi jednotlivými standardy pro klasifikaci a značkování paketů, např. DiffServ, Y.1541, WiMAX, LTE, 802.11e.

Singh a kol. (2014) ve své publikaci přináší detailní review v oblasti technologie VoIP. Popisují základní principy, srovnávají vlastnosti většiny existujících kodeků a VoIP aplikací. Shromazďují dostupné techniky pro hodnocení kvality VoIP hovorů a v závěru detailně popisují celý vývoj této komunikační technologie.

Moor a kol. (2008) publikují konceptuální model QoE, který popisuje kvalitativní a kvantitativní faktory ovlivňující výslednou kvalitu služby. Následně prezentují metodiku pro hodnocení QoE skládající se ze tří fází: pre-usage, usage, post-usage, čímž zdůrazňují, že je třeba do celkové vnímané kvality služby zahrnout i úkoly spojené s přípravou služby i procesy po konzumaci samotné služby.

Kritikos a kol. (2013) se detailně zabývají metrikami QoS a náležitostmi dokumentu SLA (Service Level Agreement), který slouží jako základní specifikace dodávaných služeb mezi poskytovatelem a příjemcem služby. Autoři dále popisují životní cyklus služeb a přináší výčet QoS metrik používaných v SLA.

Martinez-Yelmo, Seoane, Guerrero (2010) popisují techniky pro měření Quality of Experience a dále shrnují teoretické vlivy vrstvy MAC, IP a aplikační, které výslednou hodnotu QoE ovlivňují. Na závěr stručně popisují framework pro „spravedlivé“ hodnocení kvality poskytovaných služeb.

Zhang a Ansari (2011) ve své publikaci popisují současný stav zajištění QoS a QoE managementu. Poukazují na odlišné způsoby kontroly provozu během cesty paketu a navrhují framework pro QoE management napříč všemi providery během cesty paketů v síti.

Agboma a Liotta (2008) publikují framework pro QoE management. Definují sedm kroků, ve kterých navrhují postup pro správné odvození QoE z QoS parametrů. Kroky jsou následující: identifikace potřeb aplikace, identifikace základních QoS

parametrů ovlivňujících QoE, příprava testování, subjektivní ohodnocení, analýza výsledků, tvorba statistického modelu, vytvoření strategie managementu QoE. Statistickým zpracováním včetně statistické významnosti se zabývá Holzmann (1991).

Seppänen, Varela, Sgora (2013) navrhuji obecně aplikovatelný framework pro QoE management. Ten je schopen na základě reálných měření kvality služby (publikace demonstruje na videu) pozměnit QoS mechanismy tak, aby zajistil zvýšení hodnoty MOS pro danou službu. Podle autorů je navržený framework funkční pro jakoukoli přenosovou technologii.

Silva a kol. (2008) se zabývají predikcí QoE na základě QoS parametrů pomocí neuronové sítě. Využívají metodu PSQA. Porovnávají výsledky dvou a třívrstvé sítě. Dále hodnotí diskutují závislosti QoE na QoS parametrech – zpoždění, jitter, ztrátovost.

Implementací PSQA se zabývají Lozano-Garzon a kol. (2012). Představují nástroj implementovaný v jazyce Java, který předává vstupní data klasifikátoru Weka. Predikcí QoE pomocí neuronových sítí se zabývá řada dalších publikací, za zmínku stojí například Rubino, Tirilli, Varela (2006) nebo Du, Guo, Liu (2009). Li-yuan (2006) publikuje model pro kalkulaci pseudo-QoE. Na rozdíl od uživateli hodnoceného QoE prezentuje na příkladu streamovaného videa algoritmus pro programové vyjádření pseudo-QoE.

Robalo a Velez (2011) nejprve popisují doporučené hodnoty QoS metrik pro rozdílné typy služeb v počítačové síti. Dále navazují na MUSE G-model organizace IETF a pomocí simulací a následné regresní analýzy navrhuji vlastní model pro měření QoE online her. Nezávislými proměnnými regresního modelu jsou ping, jitter a zpoždění.

Arrousi, Bouabana-Tebibel, Mellouk (2012) nejprve shrnují různé přístupy k odvozování korelace mezi QoS a QoE. Následně představují vlastní nelineární regresní model pro odhad QoE pro přenos videa. V další části představují svůj experiment a diskutují výsledky vlivu jednotlivých parametrů na QoE.

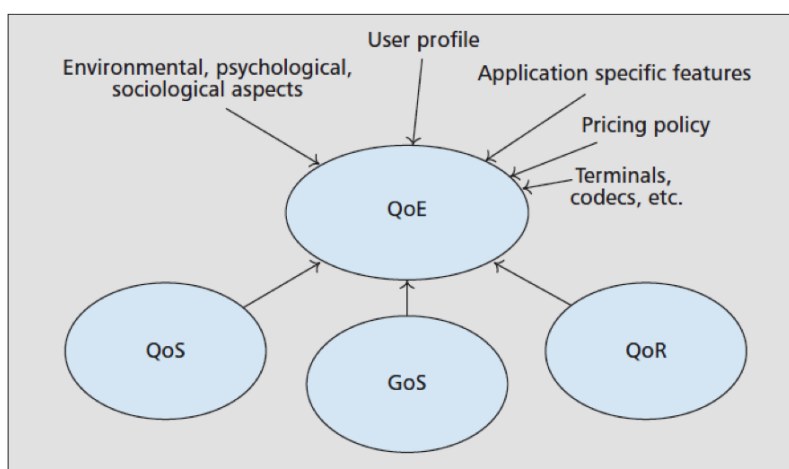
QoE se nehodnotí pouze u multimediálních služeb, ale například i pro webový provoz. Khirman a Henriksen (2002) přinášejí studii korelace QoS a QoE. Definují parametry QoS a jejich váhy, které ovlivňují QoE. Na HTTP provozu testují, jak uživatelé vnímají kvalitu služby v závislosti na chování služby WWW (doba odezvy, rychlost stahování). Podobným tématem se zabývá i Beruan a kol. (2003). Definují dvě metriky pro měření QoE webového provozu, a to Goodput a TTP (popsáno v kapitole 2). Dále představují experiment, který ukazuje, jak tyto dvě metriky závisí na ztrátovosti paketů.

Kim a Choi (2010) představují korelační model QoS a QoE orientovanou na službu IPTV. Služby dělí do šesti tříd. Na základě těchto tříd je pomocí nelineárního vzorce vypočítána hodnota QoE. Navržený model vypočítává výslednou hodnotu QoE na základě ztrátovosti, jitteru, zpoždění, šířky pásma a úrovně zahlcení linku. Každém z těchto vstupních parametrů je přiřazena váha v závislosti na třídě služby. Autoři představují doporučené váhy parametrů QoS, které mají vliv na výsledné QoE.

Song a kol. (2011) podobně jako Agboma Liotta (2008) shrnuje přístupy k hodnocení kvality služeb, ale zaměřuje se na IPTV. Zabývá se identifikací KPI a představuje tzv. Q-score – nástroj pro hodnocení kvality IPTV.

Dalším frameworkem v oblasti QoE je projekt EvalVid. Klaue, Rathke a Wolisz (2003) představují tento framework, který se dočkal implementační podoby. Slouží pro odhad QoE pro IPTV, podporuje řadu kodeků. QoE vyjadřuje pomocí PSNR a MOS.

Stankiewicz, Cholda a Jajszczyk (2011) tvrdí, že QoE není zdaleka ovlivňováno pouze QoS, ale řadou dalších parametrů, jak naznačuje obr. 12. Mj. se zabývá také pojmem QoE (*Quality of Resilience*), tedy dostupností a nezdolností poskytované služby.



Obr. 12: Diagram vlivů na výsledné QoE.

Zdroj: Steinkiewicz a kol. (2011).

Blíže se QoR věnuje několik dalších autorů. Například Cholda (2009) poskytuje podrobný úvod do problematiky Quality of Resilience, diskutuje vztah mezi QoS a QoR. Současně představuje dopad QoR na konečnou hodnotu QoE. Cholda (2009) navazuje na Tapolcaie a kol. (2005) a Tapolcaie a kol. (2006).

Kromě pohledu zákazníka (QoE) je důležité sledovat kvalitu služeb z pohledu poskytovatele, a to prostřednictvím Willingness to pay (WTP). WTP říká, kolik je za danou úroveň služby zákazník ochoten zaplatit a jak se tato ochota mění v závislosti na změně kvality. Problematikou WTP se zabývá např. Reichel (2010), Sackl, Zwickl, Reichl (2012), Yamori a Takana (2004) nebo Staelens a kol. (2012.)

Hošek a kol. (2013) publikovali výsledky subjektivního hodnocení QoE pro webový provoz. Autoři testovali na skupině respondentů, jak rychlost načtení stránky ovlivňuje vnímanou kvalitu webové služby. Náhodně se měnil interval před načtením nové webové stránky a současně byla náhodně přidělována dostupná šířka pásma určená pro data webové stránky. Na základě výsledků se autoři snaží odvodit matematický model.

Reichel a kol. (2011) prezentuje model pro odhad MOS pro webovou službu v závislosti na dostupné šířce pásma a času potřebného k načtení stránky. Dále teoreticky popisuje vztah mezi QoE a mikroekonomií a úroveň vnímané kvality rozebírá z pohledu teorie užitku.

Mahdi a Picovici (2007) poskytují přehled dostupných technik a nástrojů pro subjektivní i objektivní hodnocení kvality zvuku. Dále se detailně zabývají principy pro neintrusivní objektivní hodnocení zvuku, konkrétně standardem P.563.

Jelassi a Rubino (2011) ve své studii srovnávají kvalitu objektivních nástrojů pro měření kvality hlasu (E-model, Genome, VQmon, Qmodel) v situacích s různou ztrátovostí paketů. Podle výsledků dosahuje z testovaných nástrojů největší přesnosti nástroj E-model. Vožňák (2011), stejně jako Salmerón a Merino (2013), prezentují modifikace E-modelu. Na základě jimi provedených měření, upravují výpočet E-modelu o nové parametry. Salmerón a Merino (2013) navíc model implementovali jako modul do simulátoru ns-2. Partila a kol. (2013a) popisují vylepšení E-modelu zpřesněním vlivu jitteru. Na množině testovacích hovorů srovnali hodnoty původního E-modelu a přesnější metody PESQ. Následně upravili E-model tak, aby se odhadované hodnoty více přibližovali PESQ.

Rešerše publikací z oblasti QoE a výkonnosti bezdrátových sítí IEEE 802.11

Sanchez-Iborra a kol. (2013a) prostřednictvím simulací v nástroji OMNeT++ analyzují efekt fyzické a datalinkové vrstvy standardu IEEE 802.11g na QoE VoIP hovorů. Testovány byly rychlosti 11 a 54 Mbps a dále hlasové kodeky G.711 a G.726, přičemž u druhého kodeku byly střídány šířky pásma 24, 32, 40 kbps. Propagační modely bezdrátového signálu byly Free Model, Rice Model a Rayleigh Model. Autoři se zaměřili na kapacitu bezdrátové sítě, a to tak, že zkoumali, jaký maximální počet VoIP hovorů (s minimální akceptovatelnou kvalitou, tzn. $MOS = 3,1$) lze přenést v daných podmínkách v bezdrátové síti. Na základě simulací bylo mj. zjištěno, že k výraznému úbytku výkonnosti sítě dochází při vzdálenosti od přístupového bodu větší než 100 m. Stejný kolektiv autorů potom navazuje na svoji práci v další publikaci s názvem Performance Evaluation of QoE in VoIP Traffic under Fading Channels (2013b), kde se zaměřují na pokles kvality VoIP se vzdáleností od AP.

Aksu, Güngör, Kurt (2011) prezentují výsledky simulací v simulátoru ns-3, kde se snažili analyzovat vliv SNR na kvalitu VoIP hovorů při různém útlumu signálu pomocí Nakagamiho distribučního modelu pravděpodobnosti. Z výsledků je patrné, že útlum má významný vliv na minimální přijatelnou hodnotu SNR a tím i vnímanou kvalitu služby.

Siddique, Kamruzzaman, Hossain (2014) prezentují výsledky výzkumu v oblasti hodnocení kvality VoIP hovorů pomocí nástroje E-model ve WiFi sítích standardu a a b . Simulací testovali vliv jednoho parametru modelu E-model (Aggregation Level), který vyjadřuje, kolik zvukových vzorků bude odesláno v jednom paketu. Autoři zjistili, že do určité hodnoty tato agregace zvyšuje efektivitu využívání pásma (nižší režie), ale při určité hodnotě (s ohledem na zvukový kodek a použitý WiFi stan-

dard) dochází k výraznému snížení hovorů, které lze s únosnou kvalitou MOS po síti přenést.

Kazemitabar a Said (2011) se rovněž zaměřují na vliv agregace rámců do paketů. Testují výkon sítě 802.11b v případě VoIP hovorů s kodeky G.711 a G.729. Z výsledků dle očekávání vyplývá, že kapacitně efektivnější je G.729.

Jung, Kang, Lee (2013) na základě simulací analyzují vliv úrovně agregace vzorků do paketů a energie nutné k přenesení dat. Nejprve analyzovali vliv agregace vzorků na vnímanou kvalitu (R-faktor) a dle výsledků doporučují optimální hodnotu agregace, která zajišťuje rovnováhu mezi potřebnou el. energií při dostatečné kvalitě VoIP hovoru.

Shetty, Choudhury, Gibson (2006) publikují výsledky simulace v bezdrátové síti IEEE 802.11a, kde testovali kapacitu VoIP hovorů se zvukovými kodeky G.711 a G.729. Kapacitu vztahovali k SNR v dB pro různé rychlosti (6–54 Mbps).

Fitzpatrick (2012) simulacemi testuje vhodnost použití WiFi sítí pro VoIP komunikaci v dlouhých páteřních spojích. Pomocí upraveného E-modelu hodnotí kodek AMR. Orientuje se na kapacitu VoIP hovorů WiFi spoje s propustností 6 až 54 Mbps a vzdálenosti 1 až 10 km.

Cano a Cerdan (2010) se zabývali subjektivním hodnocením QoE VoIP aplikací v bezdrátové síti s ideálními podmínkami. Stovka respondentů hodnotila čtveřici VoIP aplikací – Skype, Gizmo5, Damaka, ooVoo. Pro subjektivní hodnocení byla použita metoda ACR (Absolute Category Rating) dle doporučení ITU-T P.800.

Doering a kol. (2013) se zabývají překryvem kanálů v bezdrátovém pásmu ISM, konkrétně IEEE 802.11b/g. Problém je známý jako POC (Partially Overlapping Channels). Autoři testují, jaký vliv má různý odstup sousedních kanálů na kvalitu přenosu dat. Současně autoři testují, zda má vzdálenost koncového hosta od přístupového bodu (AP) vliv na maximální propustnost kanálu. Jak se prokázalo, ve vzdálenosti do 18 metrů na vzdálenosti od AP nezáleží.

Kolahi a kol. (2009) prezentují výsledky experimentu, kde byl srovnáván přenos dat v bezdrátové síti IEEE 802.11n s využitím protokolu IPv4 a IPv6. Současně byl testován vliv šifrování přenosu WPA2. Výsledky dle očekávání prokázaly nižší výkonnost v případě použití WPA2. Ve srovnání protokolů IPv4 a IPv6 dosahuje lepšího výkonu IPv4 zejména kvůli menší režii (záhlaví).

Seneviratne a kol. (2013) přináší výsledky měření, kde bylo testováno, jak rychle jsou mobilní zařízení schopna úspěšně se asociovat k přístupovému bodu. Publikace se zaměřuje zejména na rychlost IP konfigurace pomocí DHCP. Testovány jsou tablety značek LG, HTC a Nexus, přístupové body Linksys, Cisco a NetGear.

Araújo a kol. (2013) testují rozdíl ve výkonu WiFi sítě IEEE 802.11g uvnitř budovy a na otevřeném prostranství. Uvnitř budov testují útlum přes zeď a v exteriéru probíhá měření v parku a na parkovišti. Testovanými metrikami bylo zpoždění, ztrátovost, jitter a MOS VoIP hovoru.

Partila a kol. (2013b) ve své publikaci přináší výsledky experimentu měření signálu GSM sítě implementované pomocí modulu openBTS uvnitř budovy. Pro měření vybrali síť míst v celém patře, pro vyhodnocení používají metodu PESQ.

Tsompanidis, Fortetsanakis, Papadopouli (2010) v komparativní analýze měří v reálném prostředí vnímanou kvalitu VoIP hovoru ve WiFi síti pomocí E-modelu. Testy probíhají podle různých scénářů, které se zaměřují např. na mobilitu koncového hosta (handover), zatížení linky jiným provozem nebo přítomnost zařízení produkujících rušení.

Khan, Lu, Mehmood (2011) navrhli model založený na funkci užitku pro odhad QoE multimediálních služeb v bezdrátových sítích (WiFi a HSDPA). Odhadované výsledky dosahují úspěšnosti přes 93 %. Model však nerozlišuje mezi jednotlivými typy WiFi sítí a je navržen pouze pro kodeky G.711 a G.722.

Mkwawa, Jammeh, Sun (2012) ve své publikaci dokazují korelaci mezi silou přijatého signálu (RSSI) a hodnotou MOS VoIP hovoru. Na základě výsledků reálných měření navrhuje metodu pro úsporu energie mobilního zařízení, které používá pouze minimální nutný výkon pro zajištění optimální kvality VoIP hovoru. Mkwawa a Sun (2012) na tuto práci navazují. Na základě jejich výzkumu navrhuje matematický model pro výpočet minimálního nutného výkonu na základě využití šířky pásma (v intervalu 50 až 500 kbps), kterou je nutné přijmout/odeslat.

Moor a kol. (2010) publikují výsledky rozsáhlého experimentu, kdy subjektivním měřením testovali kvalitu WiFi sítě 802.11b/b v závislosti na síle signálu a SNR. Na podlaží budovy byla vytvořena síť měřených bodů, na kterých respondenti plnili předepsané úkoly, např. měli za úkol vyhledat určité obrázky pomocí Googlu nebo naplánovat cestu do určitého místa. Respondenti hodnotili vnímanou kvalitu pomocí MOS, a to v rámci různých kritérií, např. rychlost, znovupoužitelnost, obecnou míru splnění očekávání, apod.

Duran a Alonso (2009) prezentují přístup pro odhad kvality přenosu zvuku a propustnosti v bezdrátových sítích. Popisují výpočet propustnosti a zejména analyzují vliv počtu paralelních uživatelů v bezdrátové síti 802.11a/b/g na zpoždění, ztrátovost a MOS. Výsledky ověřují v reálném prostředí.

Kim a Choi (2011) analyzují kvalitu hlasových kodeků G.711, G.729, iLBC, Speex a Skype v bezdrátové síti IEEE 802.11a. Pomocí algoritmu PESQ měří MOS kodeků v závislosti na ztrátovosti nebo počtu paralelních hovorů. Test neprobíhá v reálném prostředí, ale v síťovém emulátoru.

Villacís, Acosta, Cueva (2013) přináší analýzu výkonnostních požadavků na použitý hardware. Autoři testují kodeky G.711, Speex a G.726 a signalizační protokoly SIP a IAX na reálných zařízeních, přičemž měří využití CPU a paměti RAM použitých zařízení.

Flizikowski, Majewski, Przybyszewski (2010), stejně jako Delannoy a kol. (2010), se zaměřují na hodnocení kvality VoIP v sítích standardu IEEE 802.16 (WiMAX). Pomocí objektivního přístupu (E-model) testují výkonnost sítě s ohledem na minimální kvalitu VoIP hovorů.

Chen a kol. (2012) se zabývají kvalitou webového provozu v bezdrátových sítích. Pomocí reálných experimentů testují vliv L2 vrstvy bezdrátové sítě na Window Size TCP provozu.

Vedle VoIP a webových služeb existuje třetí stěžejní oblast pro odhad/měření QoE, a to je video, tím se zabývá Omwando a kol. (2013), kteří ve své publikaci prezentují výsledky měření kvality videa v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu v síti IEEE 802.11n a rychlostí, jakou se uživatel se zařízením pohyboval.

Jean, Neto, Riker (2012) prezentují výsledky měření, kde analyzovali vliv přenosu v bezdrátové síti na kvalitu 3D streamovaného videa. Laghari, Khan, Crespi (2012) prezentují model hodnocení QoE a zejména se zaměřují na subjektivní hodnocení videa ve WiFi sítích. Aguiar a kol. (2012) na základě reálných měření vytvořili neuronovou síť pro predikci QoE videa v bezdrátové síti.

Mullins a kol. (2009) publikují výsledky reálných měření, kde analyzují vliv kvality zvuku a videa multimediálních služeb v bezdrátové síti 802.11g. Z jejich experimentu plyne, že např. šifrování nemá významný vliv na vnímanou kvalitu, naopak v případě vypnutí video kanálu výrazně vzroste kapacita a kvalita hlasových kanálů. Autoři dále prezentují dostupné analytické modely pro výpočet teoretické kapacity kanálu 802.11g (35).

$$T_{tx} = 2 \times R_{media}(T_{media} + SIFS + T_{ack} + DIFS) \quad (35)$$

kde T_{media} reprezentuje čas přenosu RTP paketu, který vychází z tabulky 12, SIFS (Shor Inter-frame Space) a DIFS (DCF Inter Frame Space) vychází z nastavení 802.11 a T_{ack} je čas potřebný pro potvrzení přijetí paketu příjemcem. Tabulka 12 shrnuje doporučené hodnoty pro standard IEEE 802.11g.

Tab. 12: Doporučené hodnoty T_{tx} .
Zdroj: Mullins a kol. (2009).

Proměnná	Zvuk	Video	Popis
R_{media}	50 pkts/s	50 pkts/s	Počet paketů
T_{media}	72,8 μs	207,1 μs	Čas přenosu
SIFS	10 μs	310 μs	
T_{ack}	41,2 μs	41,2 μs	Čas pro potvrzení
DIFS	50 μs	50 μs	

Mangold a kol. (2003) ve své publikaci detailně popisují princip standardu IEEE 802.11e, který představuje implementaci QoS do bezdrátových sítí. Závěrem testují relativní dostupnou šířku pásma pro jednotlivé třídy (AC_VO, AC_VI, AC_BE, AC_BK).

Flaithearta, Melvin, Schukat (2013) se zabývají vylepšením standardu IEEE 802.11e. Poukazují na to, že tento standard, řadí všechny VoIP hovory do jedné třídy a tím přiřazuje jednotné předpoklady pro delay pro všechny služby a hovory. Na základě simulací v simulátoru ns-2 navrhují rozšíření zvané 802.11e EDCA, které vylepšuje stávající řešení tím, že zavádí další priority uvnitř třídy AC_VO. Rozšíření IEEE 802.11e navrhují i Chen, Lee, Tsenq (2011).

Gierłowski a kol. (2010) přináší komparativní studii srovnávající výkon IEEE 802.11 b/g/n síti při přenosu videa a VoIP. Výsledky ukazují, že QoS rozšíření

802.11e, někdy označované jako WMM (Wireless Multimedia Extension), má zásadní vliv na kvalitu multimediálního přenosu při vysoké utilizaci pásma dalším provozem.

Hu, Williamson, Fapojuwo (2011) publikovali alternativu ke standardu IEEE 802.11e nazvanou Asymmetric QoS v sítích 802.11g. Navržené řešení otestovali na reálné topologii se zařízeními Cisco. Navrhované řešení je uplatnitelné na zařízeních, které nepodporují 802.11e.

Serral-Garcia a kol. (2010) navrhuji Wireless Network Management System (WNMS) pro management QoS na základě výsledků měření QoE. Navržený systém hodnotí kvalitu přehrávaného videa a v okamžiku, kdy kvalita (MOS) klesne pod předem specifikovanou hodnotu, je pro daný tok na aktivním prvku vytvořena nová prioritní fronta. Podobnému tématu se věnují například i Lambrinos a Djouvas (2009).

Hassan a kol. (2012) pomocí teorie her navrhuji management QoS ve WiFi sítích. Nejprve pomocí subjektivního testování a regresní analýzy vytvořili funkci mezi MOS a mírou úsilí (počtem problémů) během hovoru. Následně pomocí teorie her definují dva hráče (uživatele a poskytovatele služby) a jejich strategie (zákazník může pokračovat v hovoru nebo ho ukončit, provider může opravit QoS problém nebo nedělat nic). Cílem je najít rovnovážný bod (množství úsilí) při určitém počtu uživatelů, kdy se ztráta providera z předčasně ukončených hovorů rovná nákladům na opravu problému.

Yuan a Muntean (2013) na základě simulací i reálných testů vytvořili QoS management systém v bezdrátové síti IEEE 802.11b, který je současně i tzv. *Call Admission Control* funkci, která v případě vyčerpaného pásma nedovolí inicializovat další VoIP hovor, aby nebyla dotčena kvalita již probíhajících hovorů. Rozhodování se odvíjí podle aktuální kvality VoIP hovoru dle vzdálenosti

Distribuce zpoždění v počítačové síti

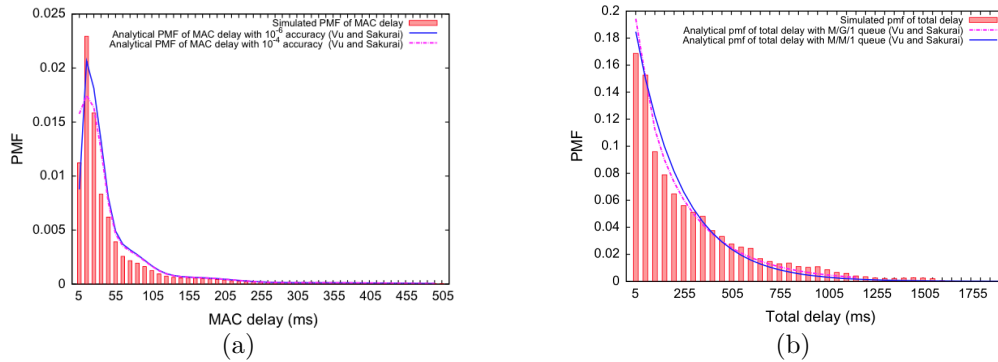
Závěrečná práce pracuje s variací point-to-point zpoždění jako s kritickou metrikou pro měření MOS hodnoty VoIP hovoru. Hodnotí se maximální variace ve zpoždění, tzn. rozdíl mezi maximálním a minimálním zpožděním. Z tohoto důvodu je důležité pracovat i se správným rozložením zpoždění v daném rozpětí. Jak naznačují následující publikace, lze rozložení pravděpodobnosti zpoždění v počítačové síti považovat za log-normální. Některá měření mají podobu i Paretova rozdělení.

Pravděpodobnostním rozdělením zpoždění v bezdrátové síti IEEE 802.11 využívající metodu DCF (Distributed Coordination Function) se detailně zabývá Wang a kol. (2015). Prostřednictvím simulací testují vývoj zpoždění v CSMA/CA síti. Testují zvláště zpoždění zapříčiněné vrstvou MAC a zpoždění vzniklé odkládáním paketů do front při 95% utilizaci linků. Obr. 13a naznačuje rozdělení zpoždění vzniklé vlivem MAC vrstvy, 13b poté reprezentuje rozdělení zpoždění při plném vytížení linku.

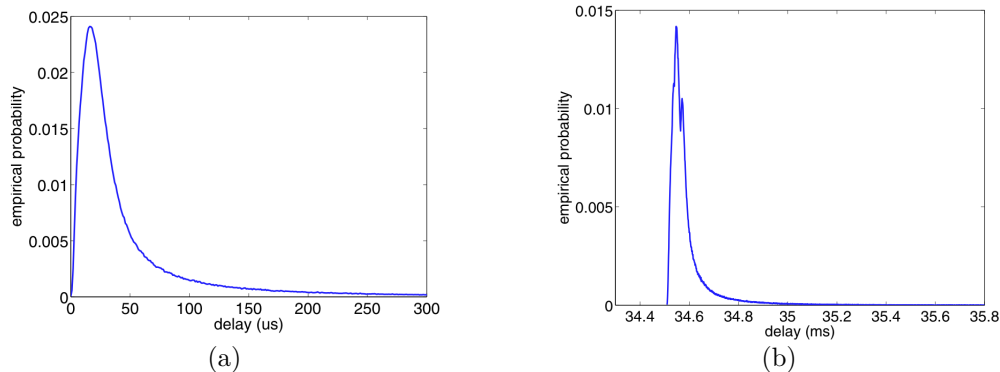
Rozložením zpoždění v počítačové síti se dále věnují Choi a kol. (2004). Výsledky vychází z reálných měření v Tier1 síti. Stejně jako Wang a kol. (2015) prezentuje

výsledky, které mají povahu log-normálního a Paretova rozdělení. Grafy na obr. 14 naznačují analyzované rozložení zpoždění. Graf na obr. 13a reprezentuje zpoždění po oddělení fixního delay, obr. 13b naznačuje rozdělení včetně fixního a variabilního delay.

K podobným výsledkům dochází i další autoři jako Bovy a kol. (2002) nebo Peng a kol. (2009). S výše uvedenými závěry koresponduje i histogram zpoždění (obr. 15) ve vybrané simulaci VoIP komunikace v bezdrátové síti 802.11g. K simulaci byl použit simulátor OMNeT++ (viz kapitola 5.3).



Obr. 13: Histogram zpoždění MAC vrstvy (a) a celkového delay (b).
Zdroj: Wang a kol. (2014).



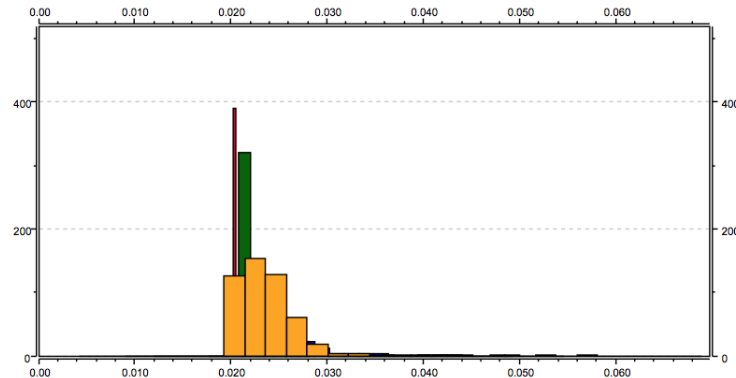
Obr. 14: Histogram zpoždění bez fixní složky (a) a včetně fixní složky (b).
Zdroj: Choi a kol. (2004).

3.4 Závěrečné práce

Tuzemské závěrečné práce

Klaška (2006) část své práce s názvem Metropolitní síť Wi-Fi věnuje seznámení čtenářů s problematikou QoS ve Wi-Fi sítích. Popisuje standard IEEE 802.11e a certifikaci WMM (Wi-Fi Multimedia), které umožňují implementaci QoS ve Wi-Fi sítích. Druhou část kapitoly věnuje frontovým mechanismům na OS Linux.

Kotůč (2010) se zaměřuje na metriky kvality služeb pro webové služby. Tyto metriky nejsou zaměřeny na kvalitu přenosu multimediálních dat, ale na maximální



Obr. 15: Histogram zpoždění vybrané simulace.
Zdroj: Vlastní práce.

dostupnost webové služby. Podobně se o této problematice zmiňují i Sýkora (2011) a Vavřík (2010).

Jansa (2011) detailně zpracoval závěrečnou práci Objektivní metody pro měření kvality přenosu řeči v telekomunikačních systémech. Studie se zabývá hodnocením kvality přenosu řeči, resp. kodeků, které jsou pro přenos použity. K hodnocení používá intruzivní metody PESQ a POLQA. Hodnocení kvality přenosu je určeno na základě porovnání získaného řečového vzorku s referenčním řečovým vzorkem. Lepší kvalitu těchto metod demonstruje srovnáním s neintruzivní metodou 3SQM – hodnocení kvality pouze na základě chyb v přijatém vzorku.

Rýzner (2011) se ve své diplomové práci zabývá využitím teorie hromadné obsluhy při návrhu a optimalizaci paketových sítí. Dále v prostředí MATLAB vytvořil program pro simulaci zpoždění paketů v síti na model M/M/1 a M/G/1. Nástroj umožňuje simulovat jednotlivé prvky, přičemž lze sledovat, jak změna ovlivní zpoždění a ztrátovost paketů v síti.

Zahraniční závěrečné práce

Baratella (2013) se zabývá otázkou bezpečnosti služby VoIP. Navrhuje bezpečnostní opatření a v závěru práce testuje, jak šifrování VoIP komunikace ovlivňuje využití šířky pásma šifrovaných VoIP hovorů, což může mít v důsledku při nedostatečné šířce pásma vliv na kvalitu hovoru.

Leite (2013) se ve své disertační práci orientuje na objektivní hodnocení kvality hlasových služeb v mobilních datových sítích (2G, 3G). Testuje úroveň QoS v těchto sítích a zkoumá odolnost hlasových kodeků pro mobilní síť (AMR-NB, AMR-WB) vůči rušivým vlivům.

Inácio (2011) testuje QoE vidie v IP sítích. Na základě výsledků experimentů navrhuje matematické modely, pomocí kterých lze z QoS parametrů určit výslednou kvalitu streamovaného videa. Pro testování kvality videa používá jak objektivní přístup, tak subjektivní měření.

Varela (2005) se detailně zabývá kvalitou hlasových služeb v IP sítích. Navrhuje pseudo-subjektivní algoritmus (vícevrstvou neuronovou síť), pomocí které predikuje kvalitu zvuku na základě parametrů z vrstvy L2 a L3. Krátce testuje neuronovou síť i v bezdrátové síti. Závěrem na základě vlastních měření navrhuje doporučení pro zlepšení QoS v IP sítích.

3.5 Rešerše nástrojů pro testování QoS

Nástroje pro měření QoS jsou zpravidla rozšířením nástrojů pro generování a analýzu síťového provozu. Kromě samotného sběru dat o provozu v síti lze pomocí těchto nástrojů získávat hodnoty základních metrik pro měření kvality QoS – jednosměrné zpoždění, variaci ve zpoždění a ztrátovost paketů. Přehled projektů zaměřených na tyto nástroje přibližuje například Beruan a kol. (2003). Další aktuálně rozšířené nástroje přibližuje následující text.

Další skupinou nástrojů zaměřenou na zajištění kvality služeb, jsou nástroje pro testování QoS, kdy zpravidla vstupují do komunikace v síti jako prostředník (princip „*man-in-the-middle*“), kde pozdržuje přenášená data, či náhodně zahazuje pakety. Lze tak uměle vnést do sítě překážky vznikající v reálném provozu.

QoSmet – je vyvíjen v Converging Networks Laboratory organizace VTT Technical Research Centre v Oulu. Pracuje na principu pasivního monitoringu kvality QoS. Dále implementuje pro vybrané datové toky i pseudo-QoE založené na metodice MOS. Statistiky lze zobrazovat v reálném čase (Prokolla, 2011). Kromě základních veličin pro evaluaci QoS indikuje problémová místa v síti, kde vzniká zahlcení. Je založen na modulární architektuře podobně jako D-ITG (Avallone, Pescape, 2011). Navíc implementuje vlastní protokol QMCP (QoS Measurements Control Protocol) umožňující vzdálenou správu jednotlivých komponent (Prokolla, 2012). Organizace VTT dále vyvíjí nástroje MobileWiMAX (měření QoS ve WiMAX sítích) a Moset (měření kvality připojení mobilních telefonů).

IP Traffic Test and Measure – generuje a následně měří charakteristiky datových toků protokolů TCP, UDP a ICMP (Omnivor, 2010a). Na datalinkové vrstvě pracuje kromě Ethernetu i s bezdrátovými technologiemi, či WAN protokoly. Primárně je ale tento nástroj zaměřen spíše na generování síťového provozu. Volitelně lze dodat hardware pro synchronizaci času pomocí GPS.

IP SLA monitor – dostupný na zařízeních s operačním systémem Cisco IOS periodicky testuje část sítě a reportuje zjištěné statistiky. Zařízení Juniper obsahují ekvivalentní nástroj (**monitor interface traffic**). Operační systém Junos na zařízeních Juniper, založený na platformě Linux, dále nabízí funkci **monitor traffic** (Juniper Networks, 2013), pod kterou se skrývá nástroj **tcpdump** používaný pro snímání síťového provozu. Nasbíraná data lze ukládat (i vzdáleně) do souboru PCAP.

Low-Cost Precise QoS Measurement Tool – je nástroj určený pro měření základních parametrů QoS: zpoždění, jitter, ztrátovost paketů (Cesnet, 2001). Je založen na generátoru síťového provozu RUDE/CRUDE a naměřené statistiky vykresluje pomocí nástroje gnuplot. Výhodou tohoto nástroje je jeho GNU licence,

přičemž dobře zastoupí i komerční nástroje. Jako nevýhoda může být chápáno, že pracuje pouze v OS Linux.

NetDisturb – kromě zpoždění, variace ve zpoždění a ztrátovosti, kterými přímo ovlivňuje přenášené toky v síti, současně generuje další datové toky, které konzumují dostupnou šířku pásma původním tokům (Omnikor, 2010b). NetDisturb je umístěn na počítač, který funguje jako most mezi dvěma Ethernetovými segmenty.

RUDE – Rugged Deviation Generator – na rozdíl od předchozího nástroje se jedná o hardwarové řešení. Kromě vytváření zpoždění a ztrátovosti paketů vnáší do sítě další problémy vznikající při dlouhém přenosu dat (přenos mezi WAN). Je schopný omezovat dostupnou šířku pásma, změnit pořadí přenášených paketů nebo záměrně poškodit hodnoty jejich záhlaví.

3.6 Rešerše nástrojů pro testování QoE

VoIP Tester – distribuovaný nástroj ovládaný z CLI i pomocí GUI pro hodnocení kvality zvukových služeb přenášených v paketových sítích (Voiptester, 2011). Je implementován v programovacím jazyce Java a je součástí projektu Google Project. Umožňuje streamovat zvuková data mezi serverem a klientem. Originální a degradovanou nahrávku lze využít k objektivnímu vyhodnocení MOS.

Peaqb – nástroj volně dostupný pod licencí GNU, který implementuje objektivní metodu Perceptual Evaluation of Audio Quality definovanou ITU-R v doporučení BS.1387. Další variantou je nástroj PQevalAudio, který je ovšem určený pouze pro výukové účely (Kuipers a kol., 2010).

ip-label – je příklad komerčního řešení monitoringu QoS a QoE. V oblasti VoIP je mj. tento nástroj schopen měřit MOS-LQO pomocí PESQ. Kromě měření multimediálních dat (VoIP, IPTV) se zaměřuje i na výkonnost webových serverů a kritických aplikací v rámci podniku.

Opticom – nabízí dvě řešení komplexního komerčního hodnocení QoS a QoE ve firemní síti. Prvním je hardwarové řešení Opera. Druhá varianta je softwarový produkt s odlehčenými funkcemi PEXQ. Společnost Opticom spolupracuje na vývoji s organizací ITU-T, proto ve svých produktech implementuje zpravidla objektivní metody PESQ a POLQA. Opticom (2007) také nabízí i hardwarová řešení pro hodnocení QoS a QoE.

VoIP & Network Quality Manager – slouží primárně k monitorování VoIP infrastruktury. Jedná se o komerční nástroj společnosti Solarwinds. Mezi dílčí nástroje tohoto produktu patří i měření kvality VoIP pomocí E-modelu. Výsledky ukládá do databáze, nad kterou lze dělat nejrůznější analýzy výkonnosti v čase.

VQM Asterisk – softwarový nástroj vyvíjený společností Sevana Oy. Produkt je založen na telefonní ústředně Asterisk. Během testu je v testované topologii generována množina VoIP hovorů, která je analyzována objektivním intrusivním způsobem. Během hovoru je přenášena originální nahrávka, která je poté srovnávána s výstupy dílčích VoIP hovorů (Sevana Oy, 2014).

3.7 Závěry z rešerší

Tato sekce shrnuje základní poznatky z rešerše literární i z rešerše dostupných nástrojů, tvoří výchozí bod pro praktickou část závěrečné práce.

- Autoři publikují celou řadu metrik pro hodnocení úrovně zajištění QoS (Cholda a kol., 2009, Skorin-Kapov a Varela, 2012, aj.), avšak shodují se na základních parametrech QoS – zpoždění, jitter, ztrátovost paketů, bandwidth.
- Řada publikací se věnuje komparativní analýze frontových mechanismů. Frontové mechanismy výrobců aktivních síťových prvků jsou optimalizované. Výkonnostní mezery vznikají spíše v jejich nesprávné konfiguraci a použití.
- Na rozdíl od pevných sítí nejsou frontové mechanismy schopny zajistit dostatečné QoS v bezdrátových sítích, kde je nutné vypořádat se s větší množinou rušivých vlivů na vrstvě L1 a L2 modelu ISO OSI. Částečným řešením je standard IEEE 802.11e.
- Kromě QoS se v poslední době prosazuje vědní oblast QoE (hodnocení kvality z pohledu koncového uživatele). Nejčastěji se vyjadřuje pomocí škály MOS. Existuje subjektivní nebo objektivní přístup (zahrnuje i odhadové metody) hodnocení (popř. pseudo-subjektivní). Prosazuje se méně přesný objektivní přístup kvůli úspoře času a nákladů.
- Vzniká potřeba zjišťovat závislost QoE na QoS, tzn. vytvářet nové odhadové metody. Existují dva přístupy: zjištění statistické závislosti nebo predikce neuronovou sítí. Oběma přístupům se věnuje řada autorů, ale nelze jednoznačně vybrat nejpřesnější metodu. V oblasti hlasových služeb je nejčastěji využívat standardizovaný E-model.
- QoE je ovlivňována vedle kvalitativních QoS metrik i řadou dalších faktorů, zejména sociálních a psychologických. Kromě pohledu uživatele na kvalitu služby (QoE) se začíná prosazovat pohled poskytovatele služby, který hodnotí službu z ekonomického pohledu (Reichel, Tuffin, Schatz, 2011) a z pohledu WTP (Willingness To Pay), tedy jak se mění ochota zákazníků utrácet za služby v závislosti na úrovni jejich kvality.
- Dostupné metodiky hodnocení QoE (Moor a kol., 2008, Kritikos a kol., 2013, Kuipers a kol. 2010, Reichel, 2010) poskytují obecný teoretický rámec k hodnocení kvality služeb tak, aby byl aplikovatelný na vybranou službu.
- Pro účely hodnocení QoE hlasových služeb bylo publikováno a implementováno několik volně dostupných objektivních intrusivních nástrojů, za zmínku stojí například PESQ, POLQA, AQuA, aj.
- Existuje několik komerčních nástrojů pro automatizované měření QoE VoIP, jejich roční licence se ale pohybují v řádech tisíců dolarů.
- Autoři se snaží odhadovat vnímanou úroveň QoE bez subjektivních měření pomocí výše zmíněných nástrojů nebo pomocí odhadových metod, které výslednou kvalitu odhadují to pouze na základě parametrů sítě během přenosu. Převládají zpoždění, ztrátovost, jitter, v bezdrátových sítích se autoři orientují i na L2 a částečně i na L1 faktory (Sanchez-Ibbora, 2013b, Aksu, Güngör, Kurt, 2011,

Siddique, Kamruzzaman, Hossain, 2014). Nebyla ale nalezena odhadová metoda, která by vycházela z měření získaných nestandardizovaným intrusivním algoritmem AQuA.

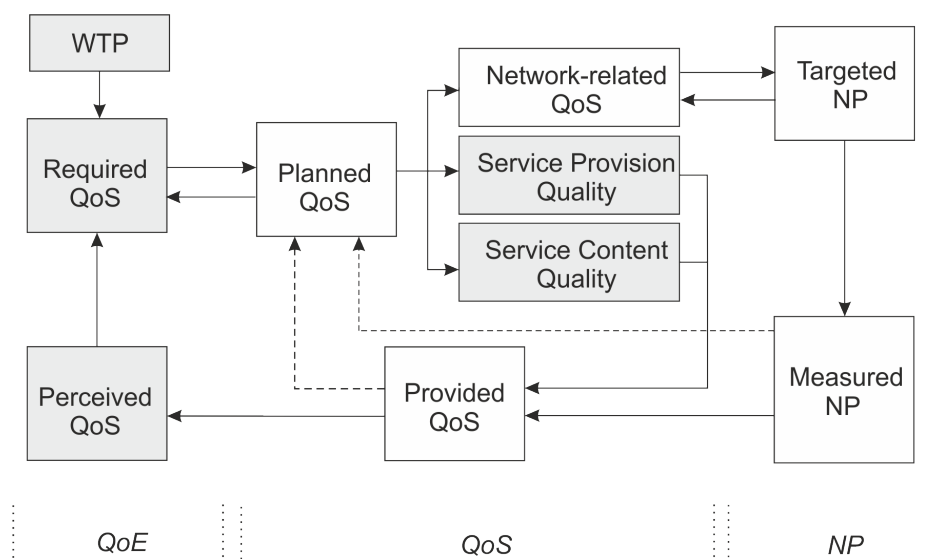
- Analýza závislostí mezi QoS atributy a výslednou úrovní QoE najde uplatnění v QoE management systémech, které dynamicky přizpůsobují podmínky v síti multimediálním tokům na základě aktuální úrovně QoE (Yuan a Muntean, 2013) nebo v site survey nástrojích.

Dle literární rešerše tvořené z publikací dostupných ke květnu 2014 doposud nebyl navržen model pro odhad QoE VoIP služeb ve WiFi sítích, který by vycházel z měření získaných nestandardizovaným intrusivním algoritmem AQuA. Většina dostupných analýz navíc nezohledňuje současně vlivy vrstvy fyzické a MAC. Ve spojení s konkrétní metodikou pro hodnocení kvality služeb v bezdrátové síti lze navržený model (modely) považovat za originální přístup k hodnocení kvality VoIP služeb v bezdrátové síti, částečně najde využití i v pevných sítích.

4 Zařazení QoE v procesu hodnocení kvality služeb

Hodnocení služby pomocí metod QoE nabízí dodavateli služby cenný pohled budoucího konzumenta produktu. Neocenitelné je proto například při hodnocení kvality nových zvukových a video kodeků, pro hodnocení uživatelské přívětivosti webu nebo aplikace. Nepostradatelné je ale také v oblasti monitoringu konvergované počítačové sítě, kdy je třeba průběžně kvalitu dodávané služby sledovat a zajišťovat tak její požadovanou úroveň průběžně. Úlohu QoE v procesu dodávky služeb koncovému uživateli částečně popisují i následující autoři. Za zmínku stojí například Ivanovich (2003), který popisuje proces hodnocení QoS v bezdrátových sítích, Kim a kol. (2008) nebo Agboma a Liotta (2008) popisující metodiku pro komplexní QoS management, přičemž základní definice pojmů z oblasti QoS a QoE jsou sdruženy do ITU-T doporučení E.800 (ITU-T, 2009).

Cílem následujícího textu je popsat proces dodání služby koncovému uživateli a do tohoto procesu zasadit úlohu QoE. Následující text vychází z dostupných publikací a doporučení ITU-T popsanych výše. Model popisovaného procesu je naznačen na obr. 16.



Obr. 16: Model zařazení QoE v procesu hodnocení kvality služeb.

Model lze rozdělit celkem do tří logických částí – network performance (NP), Quality of Service (QoS), Quality of Experience (QoE). Každá část reprezentuje odlišný pohled na problematiku. Oddíl NP je důležitý pro poskytovatele síťového připojení odpovědného za zajištění dostupnosti infrastruktury. Část QoS je pohled poskytovatele služby, jehož cílem je maximalizovat kvalitu doručované služby. Jak je patrné z obr. 16, výsledná kvalita je ovlivňována parametry NP. Poslední část, QoE, reprezentuje pohled koncového uživatele. Každá z těchto tří částí modelu obsahuje navzájem provázané komponenty, jimiž lze procházet v cyklu. Problematika zajištění

kvality služeb tedy představuje nekončící proces. Komponenty modelu stěžejní pro dodavatele služby jsou podbarveny bílou barvou.

Při interpretaci modelu je vhodné začít z levého horního rohu. Komponenta *Required QoS* reprezentuje poptávku uživatele (zákazníka) po vybrané službě, přičemž předpokládá určitou minimální kvalitu služby. V případě webu předpokládá rychlé načtení webové stránky, u telefonních hovorů počítá s tím, že budou všechna slova dobře srozumitelná a v případě přenosu videa nebude docházet k rasterizaci obrazu a rozestupu mezi zvukem a obrazem. Poptávka uživatele je ovlivňována ochotou uživatele (zákazníka) zaplatit za úroveň kvality požadované služby – tzv. *Willingness to Pay* (WTP).

Na základě požadavků zakazníka plánuje poskytovatel služeb úroveň QoS. Pro úspěch dané služby je zásadní, aby byl minimalizován rozdíl mezi požadovaným QoS (*Required QoS*) a plánovaným QoS (*Planned QoS*). Nesrovnalosti v tomto místě způsobí, že očekávání zákazníka nebude naplněno, i když budou všechny další postupy dodrženy správně. Při plánování QoS je nutné zohlednit tři elementy – QoS síťové vrstvy (*Network-related QoS*), kvalita spojená s poskytováním služby (*Service Provision Quality*, SPQ), a kvalita samotného zdroje (obsahu) služby (*Service Content Quality*, SCQ). QoS síťové vrstvy zahrnuje řadu parametrů popsanych v následující sekci, patří sem např. ztrátovost, zpoždění nebo minimální nutná šířka pásma. SPQ pokrývá všechny aktivity a funkce spojené s prezentováním a managementem telekomunikační služby (grafické rozhraní, doplňkové služby, apod.). SCQ se zabývá kvalitou zdrojového souboru (formát, kodek, rozlišení obrazu a další).

QoS sítě musí být zajištěno poskytovatelem síťové infrastruktury v podobě dostatečného výkonu sítě (NP, Network Performance). Existuje řada mechanismů, zmíněných dříve (sekce 2.1), používaných k zajištění základních QoS parametrů (ztrátovost paketů, zpoždění, jitter). Tyto algoritmy používají fronty a frontové mechanismy na aktivních síťových prvcích. V případě zahlcení výstupního rozhraní je paket odložen do fronty, aby se předešlo jeho zahození. Současně se však zvyšuje zpoždění odloženého paketu. Pro různé služby je proto vhodné aplikovat odlišnou politiku pro správu front.

Poskytovanou úroveň QoS (*Provided QoS*) tak, stejně jako plánované QoS, ovlivňuje několik faktorů – SCQ, SPQ a skutečný výkon sítě (*Measured NP*). Poskytovaná úroveň QoS je vnímána koncovým uživatelem prostřednictvím prezentačního zařízení, celý proces zajištění QoS je pro uživatele „*black-box*“. Navíc není schopný porozumět všem QoS parametrům a vnímanou kvalitu (QoE) může zpravidla vyjádřit pouze na bodové stupnici nebo procenty. Vědci i poskytovatelé služeb se snaží co nejlépe poznat, jak koncový uživatel službu vnímá (*Perceived QoS*). Vnímaná kvalita přímo ovlivňuje budoucí požadavky na službu a zejména opakovanou poptávku.

Aby poskytovatelé služeb dokázali odhadovat QoE bez participace koncových uživatelů, vznikla řada metod pro odhad (a plánování) kvality na základě poskytovaného QoS (viz výše). Tyto metody jsou v modelu na obr. 16 reprezentovány čerchovanou šipkou mezi *Provided QoS* a *Planned QoS*. Druhá čerchovaná čára (vycházející z *Measured NP*) reprezentuje metody odhadující kvalitu už ze síťové vrstvy.

Sledované metriky

Každá část konceptuálního modelu (NP, QoS a QoE) nabízí metriky používané na dané úrovni. Metriky níže uvedené jsou proto orientované spíše na oblast WVoIP a naopak nezahrnují oblast QoE videa a webových služeb, kterými se detailně zabývá např. Varela (2005, str. 65). Dále je také nutné zmínit, že výčet níže uvedených metrik není konečný, ale poskytuje základní vhled do problematiky.

Tab. 13: Metriky části NP.

Kategorie	Parametry	Jednotky
Bezdrátové sítě	Síla signálu	dBm
	SNR	dB
	BER (Bit Error Rate)	%
	Receiver Quality (RxQual)	0..7
	FER (Frame Ensure Rate)	%

Základní metriky výkonnosti bezdrátové síťové infrastruktury (část NP) shrnuje tab. 13. V bezdrátových sítích patří mezi základní NP metriky vedle síly signálu a SNR ukazatel BER (Bit Error Rate), který lze definovat jako poměr chybných přijatých bitů a celkového počtu odeslaných bitů (Leite, 2013). Receiver Quality (RxQual) je metrika používaná zejména v mobilních sítích. Nabývá hodnot od 0 do 7, které reprezentují odhadovanou hodnotu BER, přičemž platí, že čím vyšší hodnota RxQual, tím vyšší BER. Vztahovou tabulku RxQual a BER popisuje znovu Leite (2013, str. 32). FER (Frame Ensure Rate) je procentní vyjádření přijatých poškozených rámců vůči všem přijatým rámcům.

Tab. 14: Metriky části QoS.

Kategorie	Parametry	Jednotky
Časové	Zpoždění (jednosměrně, obousměrné)	ms
	Variace ve zpoždění (PDV)	ms
	Jitter	ms
Šířka pásma	Data rate (včetně záhlaví)	bps
	Data rate (pouze aplikační data)	bps
Spolehlivost	Mean time to failure (MTTF)	ms
	Mean time to repair (MTTR), Fileover-time	ms
	Mean time between failures (MTTR)	ms
	Dostupnost	%/rok
	Počet ztracených paketů	ks
	Počet poškozených paketů	ks
	Ztrátovost paketů	%

QoS metriky přibližuje tab. 14. Pro hlasové hovory jsou primárními metrikami zejména jednosměrné zpoždění, jitter, resp. PDV a ztrátovost paketů. S ohledem na plánování kapacity je nutné znát velikost datového toku dílčího hlasového přenosu.

Tab. 15: Metriky části QoE.

Kategorie	Parametry	Jednotky
Kvalitativní	MOS	–
	Clipping	–
	Použitý kodek	–
Kvantitativní	R-faktor	%
	SNR	dB
	Počet poškozených vzorků	ks
	Loudness	dB

Hodnocení kvality služby (část QoE) lze nejčastěji vyjádřit pomocí metrik shrnutých v tab. 15. Základní kvalitativní metrika MOS se zpravidla získává subjektivními metodami jako například ACR (Absolute Category Rating) nebo objektivními metodami popsány v rámci kapitoly 2.4. Další alternativní metody popisuje například Varela (2005, str. 64). Jedná se například o metody BSD (Bark Spectral Distortion) nebo PAMS (Perceptual Analysis Measurement System) založené na psychoakustickém modelu. Mezi kvantitativní ukazatele kvality VoIP lze zmínit SNR, počet poškozených vzorků zvukového signálu nebo hodnotu R-faktor, která je součástí E-modelu popsaného v rámci doporučení ITU-T G.107 (2011). Do kvantitativních metrik lze také zařadit *loudness*, tj. ztrátu hlasitosti zvukového signálu. Této metrice se detailně věnuje Raake (2006). Dále výslednou kvalitu hlasové služby determinuje použitý kodek či přítomnost *clipping*, což je efekt, kdy jsou zahazovány začátky a konce slov kvůli nesprávně nastavenému VAD.

5 Metodika hodnocení počítačové sítě z pohledu QoE

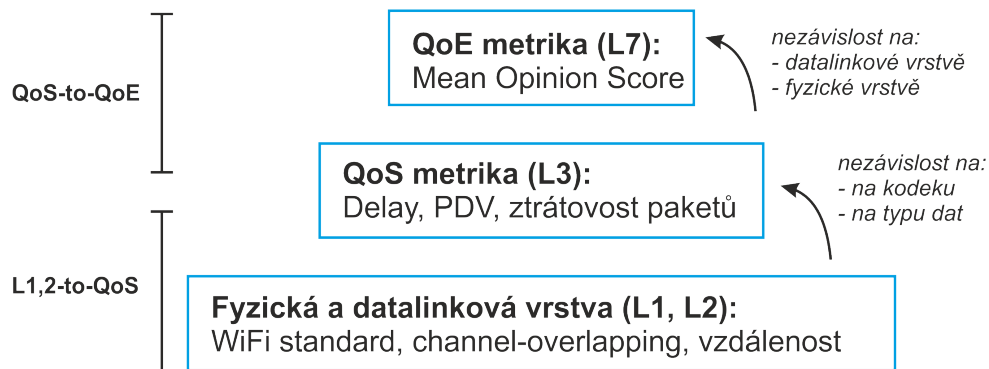
Závěrečná práce se zabývá vlivy pevné i bezdrátové počítačové sítě na úroveň QoE hlasových služeb. Lze předpokládat, že odolnost pevných sítí s ohledem na možné snížení kvality poskytovaných služeb během přenosu je výrazně větší než v sítích bezdrátových. Z tohoto důvodu se metodika práce orientuje zejména na aplikaci výsledků v sítích bezdrátových, konkrétně Wi-Fi. Vlivy pevné sítě na QoE hlasových služeb jsou testovány prostřednictvím komplexního reálného experimentu. Vlivy bezdrátové sítě jsou testovány s využitím simulací, a to z několika důvodů – proměnlivost podmínek v reálném prostředí; možnost paralelního běhu simulací; snadná škálovatelnost testované topologie. Výsledný model hodnocení kvality služby včetně vybraných částí naměřených výsledků lze však aplikovat v jakékoli síti bez ohledu na zvolenou přenosovou technologii.

5.1 Metodika hodnocení QoE

Závěrečná práce si mj. klade za cíl návrh metodiky pro hodnocení QoE na základě změny parametrů počítačové sítě. Výsledky literární rešerše dokládají, že se autoři shodují na základních QoS metrikách (delay, jitter, packet loss, bandwidth), které mají zásadní vliv na výslednou kvalitu poskytované služby, např. Skorin-Kapov a Varela (2012) nebo Cholda a kol. (2009). Autoři, kteří se zabývají vyhodnocováním QoE, své výsledky zpravidla vztahují právě k těmto QoS metrikám, např. Kim a kol. (2008), Aroussi, Bouabana-Tebibel, Mellouk (2012). V případech, kdy se autoři orientují na chování přenášených hlasových a video služeb v bezdrátové síti, zkoumají, jak vybrané atributy fyzické, či datalinkové vrstvy ovlivňují výslednou hodnotu QoE. Například Omwando a kol. (2013) vztahují své výsledky ke vzdálenosti mezi přístupovým bodem a hostem, Araújo a kol. (2013) testuje rozdíl mezi přenosem dat v bezdrátové síti ve venkovních a vnitřních podmínkách. Dále například Jung, Kang, Lee (2013) vztahují kvalitu vzorků k počtu zvukových vzorků v jednom paketu. Bylo by tedy vhodné navrhnout určitý model a metodiku hodnocení kvality služeb, která by přinesla jednotnost v tom, jaké atributy počítačové sítě zkoumat a jak získané výsledky vzájemně zkombinovat. Tato metodika si klade za cíl navrhnout rámec, do kterého je možné dále vkládat dílčí výsledky a přispět tak k lepšímu poznání závislostí mezi kvalitou přenosu služby a parametry počítačové sítě.

Model navržené metodiky je nastíněn na obr. 17. Model vychází z vrstev síťového modelu ISO OSI, resp. TCP/IP, přičemž lze proces získávání výsledků na základě navrženého postupu rozdělit do dvou různých fází – *L1,2-to-QoS* a *QoS-to-QoE*. Tímto přístupem je zajištěna dostatečná modularita a volnost při získávání výsledků.

V případě reálného měření nebo simulace, kdy je sledován výkon vybrané služby v podmínkách počítačové sítě může být problémem jednoduše to, že celý proces měření je nutné opakovat s každou dílčí změnou použité konfigurace. V případě, kdy je například testována kapacita zvukových kodeků v síti konkrétního Wi-Fi standardu,



Obr. 17: Model navržené metodiky.
Zdroj: Vlastní práce.

je třeba všechna měření opakovat pro každý kodek zvlášť. Výhodou samozřejmě je vysoká přesnost získaných dat.

V případě postupu dle navržené metodiky lze daná měření rozdělit do dvou skupin (fází) a výsledky vhodně kombinovat. Ve fázi QoS-to-QoE probíhá analýza vlivu QoS metrik na výslednou hodnotu MOS. V této práci byly použity jako QoS metriky již zmiňované delay, PDV, a ztrátovost paketů. Lze však zohlednit i další QoS atributy jako například pravděpodobnostní rozdělení ztrátovosti, počet výskytů ztráty alespoň dvou paketů po sobě, apod. Technické řešení této fáze je popsáno v části 5.2. Ve fázi L1,2-to-QoS probíhá analýza vlivu fyzické a datalinkové konfigurace sítě na sledované QoS metriky. Závěrečná práce se orientuje na síť Wi-Fi, proto jsou zde použité L1 a L2 metriky například Wi-Fi standard, bitrate, vzdálenost STA od AP, apod. V případě použití metodiky v mobilních sítích lze zohlednit parametry jako BER (Bit Error Rate) nebo BLER (Block Error Rate). Více se mobilním sítím věnuje například Leite (2013). Metodika měření této fáze je popsána v části 5.3. Výsledky obou fází lze do sebe navzájem dosadit (přes společné QoS metriky), čímž lze dosáhnout původně požadovaných výsledků vlivu L1,2 atributů na QoE (MOS). Výsledky jedné fáze lze opakovaně aplikovat na výsledky fáze druhé, čímž je mj. dosažena vysoká časová úspora, která i přes nižší přesnost může být pro řadu případů použití rozhodující.

Hlavní výhody řešení jsou tedy následující:

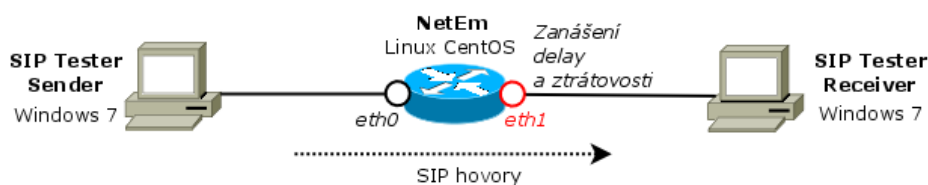
- modularita (výsledky jedné z částí lze dosadit k výsledkům části druhé),
- aplikovatelnost na nové technologie v budoucnu (pokud zjistíme chování určitého kodeku na QoS metriky, lze výsledky aplikovat na novou přenosovou technologii, a opačně),
- výrazná časová úspora při získávání výsledků,
- uplatnitelnost v real-time monitorovacích nástrojích.

5.2 Testování vlivu QoS na kvalitu zvuku (QoS-to-QoE)

Účelem této fáze je analyzovat vliv zpoždění, PDV (popř. jitteru) a ztrátovosti na kvalitu VoIP hovoru vnímanou koncovým uživatelem. Pro VoIP hovory byly vybrány dva kodeky G.711 a G.729. Kodek G.711 byl vybrán jako základní VoIP kodek široce rozšířený mezi dodavateli VoIP řešení. G.729 byl zvolen pro jeho velký kompresní poměr ocenitelný v bezdrátových sítích, přičemž bude zajímavé sledovat, jakou úroveň kvality je schopný poskytnout. Tato fáze je v práci tvořena sadou měření prostřednictvím síťového emulátoru *NetEm* (Network Emulator, 2009). Jednotlivé VoIP hovory jsou vyhodnocovány z pohledu MOS-LQO pomocí metody AQuA, která vedle obecně známých přístupů a metod pro objektivní hodnocení kvality hlasových služeb nabízí zajímavou alternativu, která se v dostupných publikacích vyskytuje zatím jen minimálně. Z MOS hodnot získaných nástrojem AQuA bude vytvořen regresní model pro neintrusivní realtime odhad MOS-LQE z QoS metrik.

Topologie

Topologie použitá pro přenos VoIP hovorů (na obr. 18) se skládá ze dvou gigabitových lokálních sítí oddělených směrovačem. Každá z těchto sítí obsahuje jeden počítač (2 GB RAM, 1 CPU), na kterých je nainstalován operační systém Windows 7 64 bit. Počítač v levé síti funguje v roli odesílatele VoIP hovoru (strana, která mluví), počítač v pravé síti funguje jako příjemce VoIP hovoru (naslouchající strana). Směrovač je počítač s OS CentOS 6.3 64 bit (2 GB RAM, 1 CPU). Jak je patrné na obr. 18, směrovač směřuje pakety mezi svými dvěma síťovými rozhraními *eth0* a *eth1*. Zatímco ve směru zprava doleva nejsou data nijak limitována, ve směru zleva doprava jsou do sítě záměrně vkládány negativní vlivy, které působí na VoIP pakety opouštějící rozhraní *eth0* (směr zleva doprava). Tímto způsobem jsou simulovány např. typické problémy WAN sítě nebo bezdrátové sítě. Všechna zařízení z topologie na obr. 18 jsou virtualizována pomocí softwaru VirtualBox 4.3.6 v počítači (CPU Intel i5-3437U, 8 GB RAM) s OS Windows 8 64 bit.



Obr. 18: Topologický diagram emulace sítě.

Zdroj: Vlastní práce.

Použitý software

Pro emulaci počítačové sítě byl použit nástroj *NetEm*, který je součástí linuxového jádra. V RHEL (Red Hat Enterprise Linux) distribucích je součástí nástroje *tc*

pro řízení síťového provozu. Pomocí nástroje NetEm, resp. tc, je možné do sítě vkládat např. zpoždění, jitter, ztrátovost paketů, měnit pořadí paketů nebo záměrně porušovat některé pakety. Konkrétní příklad použití je uveden níže.

Pro generování VoIP hovorů byl použit softwarový nástroj StarTrinity SIP Tester (Star Trinity, Inc., 2014). Odesílatel je iniciátorem VoIP hovoru, přičemž přehrává příjemci předdefinovaný (originální) zvukový záznam. Příjemce nahrává přijímaný signál. Nakonec je pomocí nástroje AQuA porovnána kvalita originální a přijaté nahrávky.

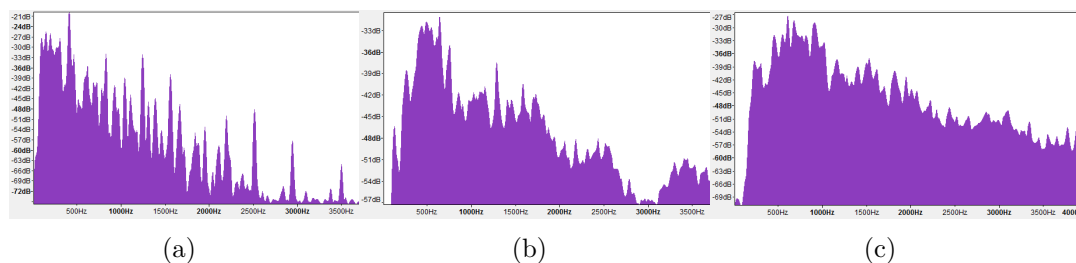
VoIP hovory

Model je třeba vytvořit zvlášť pro oba zvukové kodeky – G.711 (a-law) a G.729. Detaily těchto kodeků jsou již detailně popsány v kap. 2.5. Jako signalizační protokol byl použit protokol SIP. Zvuková data jsou zapouzdřena v aplikačním protokolu RTP a následně do transportního protokolu UDP.

Přenášeny jsou tři základní typy zvuku zpravidla přítomných ve VoIP:

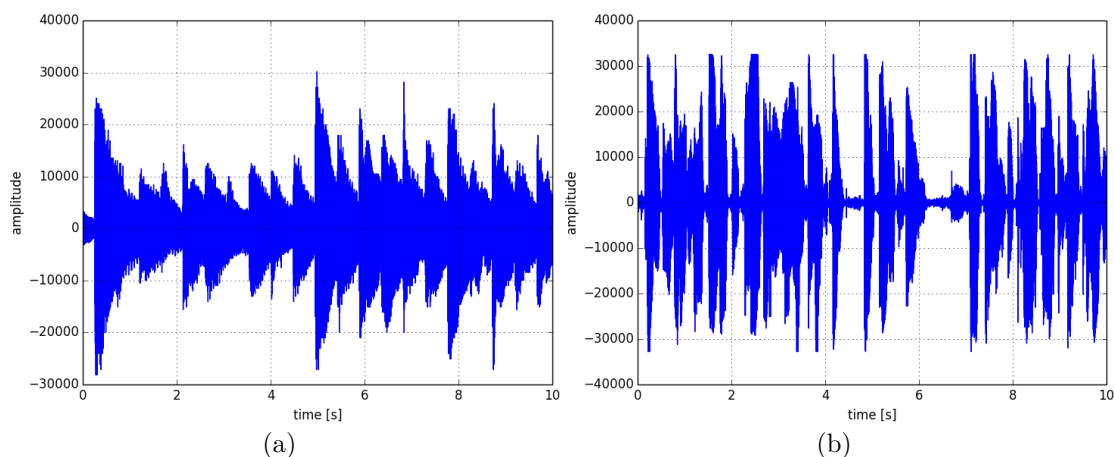
- instrumentální hudební nahrávka,
- nahrávka s mužskými hlasy,
- nahrávka s ženskými hlasy.

Délka každé nahrávky je 10 sekund, uloženy jsou ve formátu WAV (PCM 16 bit). Hudební nahrávka je reprezentována instrumentální hudbou. Ve srovnání s nahrávkou obsahující lidský hlas neobsahuje testovaná nahrávka prázdná místa v signálu, čímž lze bezpečně zaznamenat zhoršení zvukového signálu v každém okamžiku přenosu. Nahrávka byla vytvořena z výchozího zvukového signálu, která pro testování používá nástroj Trinity SIPTester. Hudební nahrávka s mužskými a ženskými hlasy¹⁶ je složena z hlasů několika lidí a byla převzata z doporučení P.862 (ITU-T, 2001). Obr. 19 znázorňuje frekvenční analýzu jednotlivých nahrávek, obr. 20 naznačuje rozdíl mezi waveform hudby a mužského hlasu, z ukávek jsou patrná častější prázdná místa v případě lidského hlasu.



Obr. 19: Frekvenční analýza referenční nahrávky hudby (a), mužského (b) a ženského hlasu (c). Zdroj: Vlastní práce.

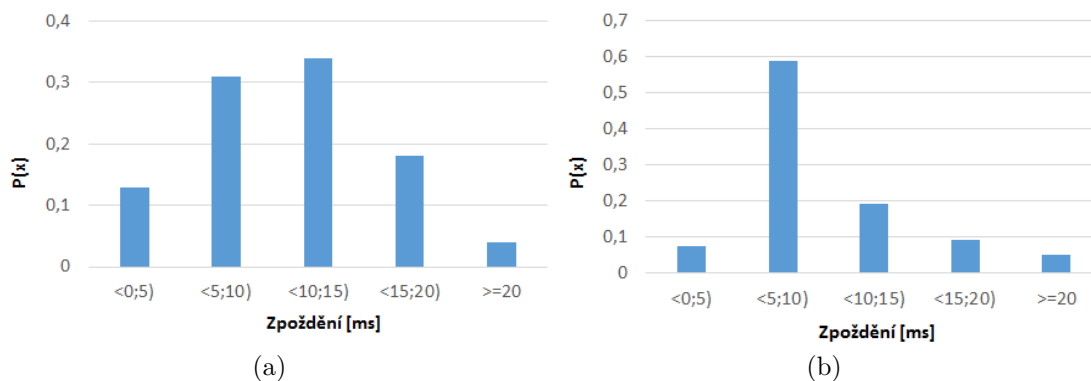
¹⁶Všechny zvukové nahrávky jsou přiloženy na CD.



Obr. 20: Wavform referenční hudební nahrávky (a) a referenčního mužského hlasu (b).
Zdroj: Vlastní práce.

Proces měření

Následující proces byl aplikován na kodek G.711, poté zopakován pro kodek G.729. Proces se skládá z množiny VoIP hovorů přenášných v emulované síti. Před každým hovorem byla systematicky pozměněna hodnota jednoho z rušivých vlivů, tj. zpoždění (delay), PDV a ztrátovosti paketů. Zpoždění nabývalo hodnot v intervalu 0 až 500 ms (navýšení o 10 ms v každé změně), maximální PDV bylo nastavováno v intervalu od 0 až 200 ms (při každé změně zvýšení o 10 ms), ztrátovost paketů nabývala hodnot od 0 do 10 % a v každé změně byla zvýšena o 0,5 procentního bodu. Celkem tedy bylo provedeno 22491 (51 změn delay \times 21 změn PDV \times 21 změn ztrátovosti) přenosů VoIP hovoru (pro každý kodek) pokaždé s jiným nastavením delay, PDV a ztrátovosti. Na konci každé fáze byla pomocí nástroje AQuA změřena MOS_M (Measured MOS) hodnota každého jednotlivého hovoru.



Obr. 21: Histogram naměřeného zpoždění při použití normálního (a) a Paretova (b) rozdělení pravděpodobnosti.
Zdroj: Vlastní práce.

Zpoždění je nástrojem NetEm generováno náhodně podle normálního a Paretova pravděpodobnostního rozdělení. Histogramy na obr. 21 naznačují, v jakých hodnotách se pohybovalo zpoždění při použití normálního a Paretova rozdělení v rámci zkušebního měření. Měření proběhlo na 1000 paketech, zpoždění se mělo pohybovat od 0 do 20 ms. Na základě literární rešerše byl jako výchozí použito Paretovo rozložení pravděpodobnosti s charakteristikou $\alpha = 0,1$ a $x_m = 1$, přičemž distribuční fce (PDF) Paretova rozdělení je definována vztahem (36).

$$PDF_{Par} = \frac{\alpha \times x_m^\alpha}{x^{a+1}} \quad (36)$$

Vybrané QoS metriky

Po procesu testování VoIP hovorů v každé fázi experimentu byly shromážděny hodnoty MOS_M a vypočten korelační koeficient (Pearsonův koeficient, PC) mezi MOS_M a dílčími QoS metrikami, aby bylo možno analyzovat, jaký má která metrika dopad na výslednou hodnotu MOS_M . Analýza je provedena na hudební nahrávce. Jak je patrné z tab. 16, byla zjištěna silná negativní korelace mezi PDV a MOS_M , a to v případě obou zvukových kodeků. Na druhou stranu, zpoždění paketů mělo na kvalitu poslechu (MOS-LQO) zanedbatelný vliv ($-0,0345$, resp. $-0,0189$). Z tohoto důvodu nebude vliv zpoždění dále brán v potaz a dále budou v práci zohledňovány QoS metriky PDV a ztrátovost.

Tab. 16: Pearsonův koeficient MOS_M a jednotlivé QoS metriky.

Kodek	Zpoždění	PDV	Ztrátovost paketů
G.711	-0,0345	-0,8148	-0,1647
G.729	-0,0189	-0,7935	-0,1786

5.3 Testování vlivu Wi-Fi sítě na hodnoty QoS (L1,2-to-QoS)

Účelem této fáze je analyzovat vliv fyzické (L1) a datalinkové (L2) vrstvy indoor bezdrátové sítě na QoS metriky používané jako vstupní parametry (regresory, nezávislé proměnné) analýzy v rámci fáze QoS-to-QoE. V této fázi budou vstupními parametry například použitý Wi-Fi standard, počet klientů v jedné buňce, vzdálenost mezi sledovanou stanicí a AP, apod. Kombinací získaných dat a regresních modelů vytvořených v rámci fáze QoS-to-QoE, budou vytvořeny modely vývoje MOS-LQE v závislosti na L1, L2 parametrech. S ohledem na množství možných regresorů byly vytvořeny rozdílné konfigurace zaměřující se vždy na určitou skupinu L1 a L2 atributů. Detaily těchto konfigurací jsou popsány v samostatných sekcích (5.4 a 5.5).

Výběr simulátoru

Pro analýzu kvality VoIP hovorů v bezdrátových sítích je nutné použít některý z dostupných síťových simulátorů, protože vzhledem k potřebnému množství testů

a proměnlivosti Wi-Fi signálu v čase není možné všechna měření provést v reálných podmínkách. Text níže porovnává tři vybrané síťové simulátory¹⁷. Detaily simulátorů poté shrnuje tabulka 17.

ns-3 – velmi rozšířený open-source simulátor naprogramovaný v C++ a Pythonu. Podporuje většinu protokolů v TCP/IP, dále všechny dnes rozšířené Wi-Fi standardy, přičemž v případě standardu *n* zatím není zpracovaná technologie MIMO, takže maximální teoretická rychlost tohoto standardu dosahuje 75 Mbps. S využitím API lze programovat vlastní topologie. Nevýhodou tohoto nástroje je absence nativního grafického rozhraní.

OMNeT++ je modulární simulátor naprogramovaný v C++. Lze v něm simulovat chování drátových i bezdrátových sítí, frontových mechanismů, testovat řadu protokolů TCP/IP (OMNeT++, 2014). Funkcionalitu lze doplňovat moduly, přičemž nejpoužívanější je modul *Inet*. Nástroj je vybaven propracovaným grafickým rozhraním a modulem statistik. Simulovanou topologii lze naprogramovat pomocí jazyka NED Topology Description, konfiguraci prvků a průběh simulace lze popsat v konfiguračním souboru s rozšířením INI. Nabízí VoIP aplikaci, podporuje řadu Wi-Fi standardů kromě *n* a novějších.

Riverbad Modeler (původně OPNET) je velmi robustní proprietární simulátor podporující simulace SOHO, podnikových i interkontinentálních WAN sítí, podporuje například i technologie LTE a WiMAX (Riverbed Technology, Inc., 2014). V rámci speciálního programu pro univerzity lze získat půlroční bezplatnou licenci, nabízená funkcionalita je ale částečně omezená. V podstatě jedinou nevýhodou tohoto nástroje je jeho uzavřenost a složitost, která se projeví zejména v časově náročnějším osvojení simulátoru.

Na základě výše uvedeného textu a praktických testů je jako simulátor v této práci dále využíván nástroj OMNeT++.

Tab. 17: Srovnání vybraných síťových simulátorů.

Nástroj	Licence	Programovatelný	GUI	IEEE 802.11
Optimální varianta	volná	ano	ano	a,b,g,n,e
ns-3	GNU GPLv2	ano	ne	a,b,g,n*,e
Omnet++	volná akademická	ano	ano	a,b,g,e
Riverbad Modeler	akademická**	ne	ano	a,b,g,n,e

*nepodporuje MIMO

**dostupná částečná funkcionalita

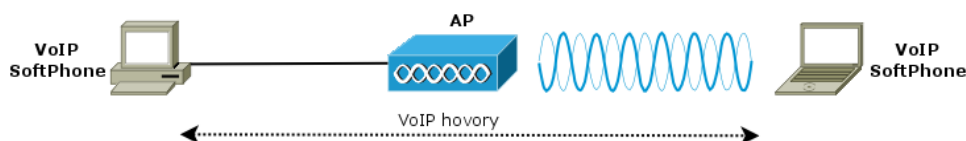
Validační test

Díky simulátorům lze prostřednictvím modelu simulovat podmínky reálného prostředí. Musí však být nalezen vhodný kompromis mezi zjednodušením a zachováním dostatečné přesnosti modelu. Přesností simulátorů s reálným experimentem se

¹⁷Další simulátory jsou dostupné zde: <http://people.idsia.ch/~andrea/sim/simnet.html>.

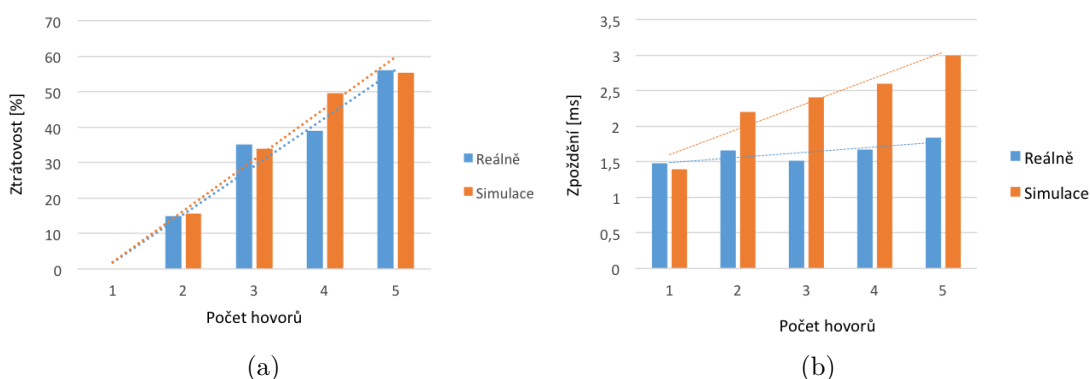
zabývá například Ivanov, Herm, Lukas (2007) nebo Garrido, Malumbres, Calafate (2008). Z prací vyplývá, že drobnou změnou některých parametrů simulace lze získat výsledky, které se od reálného měření výrazně liší. Srovnáním výkonnosti nejpoužívanějších simulátorů se ve svých publikacích zabývá například Mishra a Jangale (2014) a Wengartner, von Lehn, Wehrle (2009). Jejich výsledky potvrzují srovnatelnou výkonnost testovaných simulátorů (ns-2, ns-3, OMNet++, SimPy).

Kromě výše zmíněné rešerše přesnosti a výkonnosti simulátorů byl proveden krátký test přesnosti vybraného simulátoru Omnet++ ve srovnání s reálným měřením. Experiment se v simulaci i reálném prostředí skládal z topologie na obr. 22. Dvě stanice komunikující prostřednictvím AP po Wi-Fi síti přenášely v obou směrech VoIP hovory. Počet paralelních hovorů v obou směrech byl postupně 1–5. Použitý kodek v simulaci byl G.711, přičemž v reálném experimentu byl VoIP hovor nahrazen ICMP pakety s odpovídající frekvencí (50 paketů/s) a délkou payload (172 B)¹⁸. Použitý Wi-Fi standard byl v obou případech IEEE 802.11g, EIRP stanice i AP je nastavena na 15 dBm. Vzdálenost mezi STA a AP byla v obou případech 5 metrů s přímou viditelností. Výstupní FIFO fronta rozhraní byla v obou případech nastavena na velikost 50 paketů. V reálném experimentu byl jako AP použito zařízení MikroTik RB951-2HnD.



Obr. 22: Topologie validačního testu.

Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 23: Srovnání ztrátovosti (a) a zpoždění (b) mezi reálným měřením a simulací.

Zdroj: Vlastní práce.

Přesnost byla testována na naměřené ztrátovosti a zpoždění. Výsledky jsou shrnuty do dvou grafů na obr. 23. Levý graf ukazuje ztrátovost, pravý zpoždění,

¹⁸Vypočteno jako 160 B zvukových dat v jednom paketu + 12 B pro záhlaví RTP + 8 B pro UDP - 8 B již přítomného záhlaví ICMP.

hodnoty jsou navíc proloženy přímkou. V případě ztrátovosti jsou odchylky minimální (v simulaci byl použit propagační model Rayleigh). V případě zpoždění je rozdíl výraznější, zde pravděpodobně hrají roli specifické podmínky reálného prostředí. I přesto je možné konstatovat, že simulátor je schopen věrně simulovat reálné prostředí.

5.4 Metodika měření konfigurace 1 (L1,2-to-QoS)

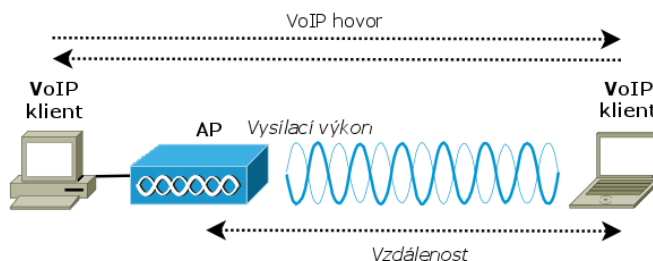
Cílem simulace je ověřit, zda je možné na základě vybraných parametrů odhadovat MOS provozovaných VoIP hovorů. Simulace v rámci konfigurace 1 pracuje s následujícími proměnnými – bezdrátový standard (b, g), vysílací výkon AP a vzdálenost pozorovaného klienta od přístupového bodu. Následující tabulka (tab. 18) shrnuje vstupní proměnné včetně jejich množiny hodnot. Přesná nastavení NED a INI souborů jsou součástí příloh D a E. Je vhodné poznamenat, že simulátor pracuje deterministicky, takže simulace není třeba vícekrát opakovat.

Tab. 18: Testované veličiny konfigurace 1.

Vstupní proměnná	Vyjádřeno v	Testované hodnoty
WiFi standard	–	{b;g}
Vzdálenost STA od AP	m	{1;10;25;50;75;100;150;200;300;400;500}
EIRP přístupového bodu	mW	{1;3;5;10;50;100}

Topologie

Testovaná topologie (obr. 24) se skládá z jednoho AP a dvou koncových stanic. Jedna je spojena s AP pomocí 100Mbps ethernetového kabelu, druhá stanice vystupuje v roli STA, její vzdálenost od AP se mění v intervalu 1 až 500 m. Sada simulací probíhala ve volném prostoru, kdy mezi AP a STA nebyla žádná fyzická překážka. Jak je dále diskutováno v kapitole 9, lze na tuto simulaci v budoucnu navázat umístěním fyzických překážek do simulovaného prostředí a testovat i podmínky konkrétních prostor.



Obr. 24: Topologie simulace s konfigurací 1.
Zdroj: Vlastní práce.

Datové toky

Datový tok simulace byl tvořen VoIP provozem. Další datová komunikace mezi uzly v testu neprobíhá. VoIP hovor byl oboustranný, tzn. jeden datový tok vede od pevného klienta k bezdrátovému a druhý opačně. Simulace probíhá zvláště pro kodeky G.711 a G.729. VoIP hovor byl simulován prostřednictvím modulů *SimpleVoIPSender* a *SimpleVoIPReceiver*. S ohledem na parametry zvukových kodeků (tab. 5) byl v případě obou kodeků nastaven počet paketů na 50 za sekundu. Voice payload jednoho paketu s kodekem G.711 je s ohledem na datový tok kodeku (64 kbps) 160 B. Voice payload jednoho paketu s kodekem G.729 je naopak 20 B (datový tok je celkem 8 kbps). V obou případech je nutné přičíst 12 B pro záhlaví protokolu RTP a 8 B pro záhlaví transportního protokolu UDP. V každé iteraci simulace jsou oba VoIP proudy přenášeny paralelně po dobu 10 s, přičemž je sledována statistika ztrátovosti a PDV. Detaily konfigurace jsou uvedeny v příloze E.

Konfigurace bezdrátové sítě a fyzického prostředí

Simulace probíhá v otevřeném prostoru s nastavenou teplotou 25 °C. V rámci této konfigurace je testován dosah bezdrátového standardu IEEE 802.11b a IEEE 802.11g. Vysílací pásmo je tedy 2,4 GHz. Útlum signálu byl počítán na základě modelu Rayleigh, který nepředpokládá LOS. Parametr α (popsaný v rámci FSPL) byl nastaven na výchozí hodnotu 2. Okolní šum nebyl brán v potaz a proto je nastaven na hodnotu -90 dBm.

Minimální síla signálu, kterou jsou zařízení schopna rozpoznat jako signál (a ne šum) je -85 dBm. Minimální rozdíl mezi signálem a šumem (SNIR Threshold) byl nastaven na 4 dB. Vysílací výkon koncového uzlu byl nastaven na fixní hodnotu 32 mW, která odpovídá přibližně 15 dBm, což Hucaby (2014, str. 54) považuje za nejčastější vysílací výkon koncových zařízení. Zisk antény není žádný. Parametr *hw-retries* (přeposílání nedoručených rámců, kap. 2.6) byl nastaven na hodnotu 7. Výstupní fronta byla nastavena na 50 paketů. Kompletní konfigurace je součástí přílohy E. Zde neuvedené atributy byly ponechány na výchozích hodnotách simulátoru.

5.5 Metodika měření konfigurace 2 (L1,2-to-QoS)

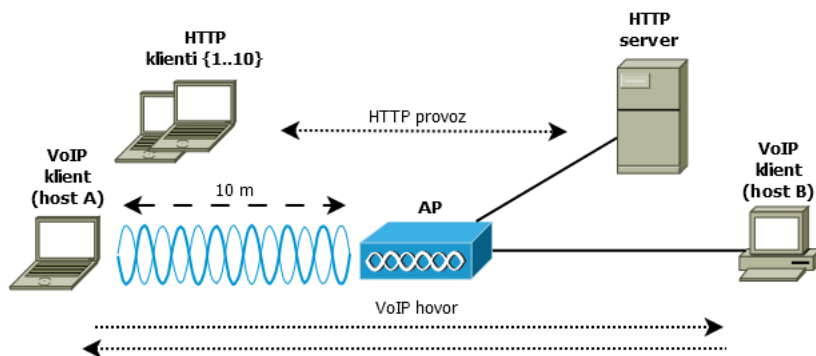
Cílem konfigurace 2 je otestovat, zda je možné odhadovat kvalitu VoIP hovoru prostřednictvím MOS-LQE hodnoty na základě počtu klientů v buňce a množství dalšího provozu na pozadí. Současně je testován vliv standardu 802.11e na kvalitu přenosu hlasové služby. Simulace v rámci konfigurace 2 testuje proměnné – počet klientů, počet HTTP komunikací na pozadí a aktivita standardu IEEE 802.11e. Následující tabulka (tab. 18) shrnuje vstupní proměnné včetně jejich množiny hodnot. Přesná nastavení NED a INI souborů jsou součástí příloh F a G.

Tab. 19: Testované veličiny konfigurace 2.

Vstupní proměnná	Vyjádřeno v	Testované hodnoty
Počet HTTP klientů v buňce	ks	{1..10}
Počet HTTP aplikací na klientovi	ks	{1..10}
Přítomnost WMM	–	{ano; ne}

Topologie

Simulovaná topologie (obr. 25) se skládá z jednoho AP, dvou koncových hostů připojených k AP prostřednictvím 100Mbps Ethernetového kabelu a dále množiny bezdrátových koncových hostů (STA). Jeden bezdrátový host (host A) je určený pouze k VoIP komunikaci spolu s hostem připojeným přes Ethernetový kabel (host B). Množina zbylých STA se v průběhu simulací mění, pohybuje se v intervalu 1 – 10. Tito hosti jsou určeni k HTTP komunikaci s HTTP serverem (provoz na pozadí). Vzdálenost mezi všemi STA a AP je 10 m. Celá topologie je opět jedna L3 síť.



Obr. 25: Topologie simulace s konfigurací 2.
Zdroj: Vlastní práce.

Datové toky

Síťová infrastruktura přenáší dva druhy datové komunikace – jeden VoIP hovor (obousměrný tok) mezi VoIP klienty a HTTP provoz mezi proměnlivým počtem HTTP klientů a HTTP serverem. Simulace opět testuje zvláště kodeky G.711 a G.729, přičemž jejich nastavení je stejné jako v případě konfigurace 1 (5.5). Jako zdroj pro sledování statistik VoIP hovorů je použit datový tok ve směru od hosta A k hostu B.

HTTP provoz generují HTTP klienti, jejichž počet se pohybuje od 1 do 10. Každý klient může mít 1 až 10 HTTP aplikací (oken webového prohlížeče). Každá taková aplikace začíná komunikovat náhodně podle normálního rozdělení průměrně 0,5 sekundy po začátku VoIP komunikace se směrodatnou odchylkou 0,5. HTTP provoz aplikace je složen z řady *session*. Pro každou *session* je ustanoveno regulérní

TCP spojení. Session se opakují po celou dobu simulace s prodlevou 1s. Tento interval má reprezentovat dobu mezi jednotlivými kliknutími uživatele na webové stránce. Každá session se skládá ze zpráv *HTTP Request* o velikosti 500 B. Server odpovídá zprávou *HTTP Response*, která má délku 1500 B (nastaveno jako *echoFactor = 3*). Mezi jednotlivými požadavky (HTTP Request) je prodleva 200 ms. Každá session se skládá z 5 požadavků. Jedna HTTP aplikace takto generuje datový tok včetně záhlaví přibližně 80 kbps.

Konfigurace bezdrátové sítě

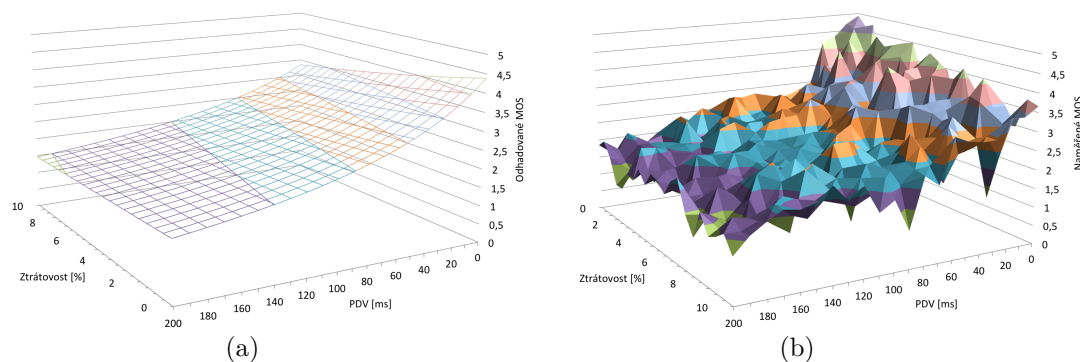
Prostředí, ve kterém simulace probíhá, nemá žádné fyzické překážky, které by bránily v komunikaci. Útlum signálu je ale opět odvozován od modelu Rayleigh. Parametr α je nastaven na hodnotu 2. Vysílací výkon všech prvků byl nastaven na 5 mW. Testovaný bezdrátový standard je IEEE 802.11g. V části simulace, kde je aktivní QoS mechanismus (standard IEEE 802.11e) je STA VoIP klient řazen do kategorie AC_VO, naopak všechny ostatní STA (klienti) jsou ponechány ve výchozí kategorii AC_BK (best-effort). Atributy kategorií přístupu (CW_{min} , CW_{max} , $AIFS_N$) byly nastaveny pro standard 802.11g podle výchozích hodnot v tab. 8, resp. 10 (v případě aktivního WMM). Všechny další parametry se shodují s nastavením bezdrátové sítě a fyzického prostředí v rámci konfigurace 1 (5.4), popř. byly ponechány na výchozích hodnotách.

6 Výsledky měření fáze QoS-to-QoE

Následující kapitola popisuje modely vytvořené vícenásobnou lineární regresní analýzou na základě naměřených hodnot MOS_M (MOS-LQO) pomocí nástroje AQuA, jak bylo popsáno v rámci metodiky v části 5.2. Výsledné modely odhadují (predikují) MOS hodnoty označované jako MOS_E (estimated, MOS-LQE) a jsou rozděleny podle testované nahrávky. Následující sekce tak analyzují vliv ztrátovosti a PDV na nahrávku s hudbou (sekce 6.1), na nahrávku obsahující množinu ženských hlasů (sekce 6.2) a na nahrávku obsahující množinu mužských hlasů (sekce 6.3).

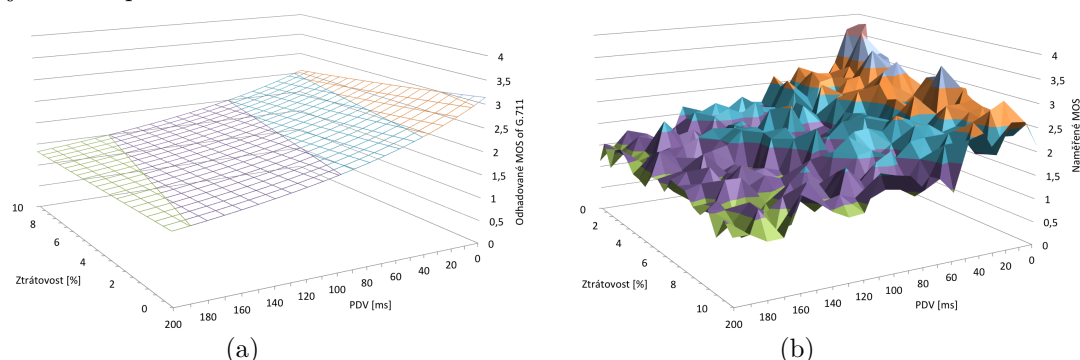
6.1 Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející hudbu

Výsledné hodnoty MOS_M VoIP hovorů přenášející zvukovou nahrávku instrumentální hudby byly naměřeny nástrojem AQuA a jsou znázorněny v grafech na obr. 26b (kodek G.711), resp. 27b (kodek G.729).



Obr. 26: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené hudební nahrávkou přenášené v kodeku G.711 (b).

Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 27: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené hudební nahrávkou přenášené v kodeku G.729 (b).

Zdroj: Vlastní práce.

Jednotlivá měření sestavená do těchto grafů prokázala, že v případě zvukového kodeku G.711 (obr. 26b) dosahovalo MOS_M hodnot téměř v celé své škále, tzn.

při nulové ztrátovosti a PDV lze získat téměř plnou kvalitu, naopak při opačných hodnotách QoS atributů se MOS_M blíží k hodnotě 1. Trend poklesu MOS_M navíc není lineární, ale s vyššími hodnotami QoS metrik klesá MOS_M pomaleji.

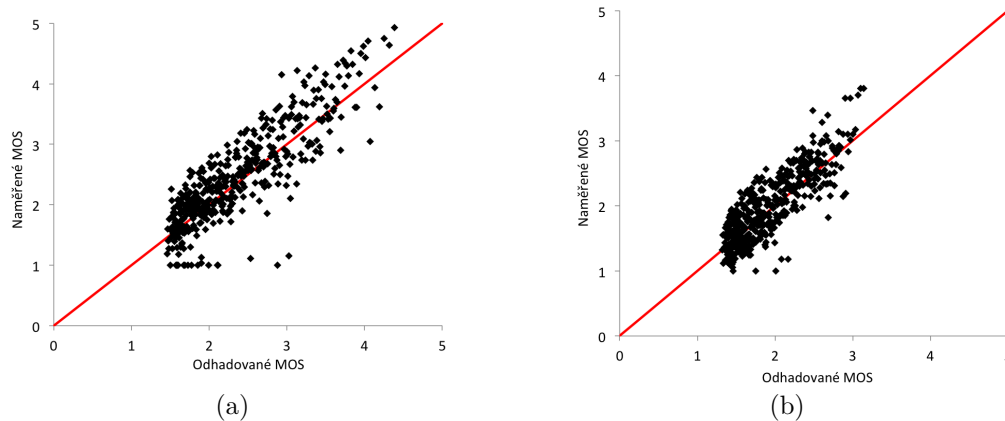
Na základě těchto měření byly pomocí regresní analýzy vytvořeny modely pro kodek G.711 (obr. 26a) a G.729 (obr. 27a). Hlavním kritériem pro výběr funkční normy byl koeficient determinace (R^2). Pro oba testované kodeky dosahoval R^2 nejvyšší hodnoty v případě reciproké (inverzní) funkční normy, kdy je jedna nebo více veličin modelu uvedených v převrácené formě ($1/X$). Přestože se jedná o vícenásobnou regresi, kdy je brán v potaz vliv více než jedné nezávislé proměnné, lze vliv jednotlivé proměnné zohlednit tak, že hodnota ostatních nezávislých proměnných bude neměnná. Výsledný model pro hlasový kodek G.711 při přenosu hudby, jehož graf je na obr. 26a, je vyjádřen pomocí vztahu (37). Naopak model pro hlasový kodek G.729 při přenosu hudby, jehož graf je na obr. 27a, je vyjádřen pomocí vztahu (38).

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,227948 + 0,00193305 \times PDV + 0,00713309 \times L} \quad (37)$$

$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,318551 + 0,00183747 \times PDV + 0,00716693 \times L} \quad (38)$$

Verifikace modelu

Přesnost vytvořených modelů je nutno ověřit, tzn. ověřit schopnost modelu odhadovat MOS_E hodnoty. Tab. 20 shrnuje PC, směrodatné odchylky regrese a závisle proměnné, R^2 a rozklad proměnlivosti. PC mezi hodnotami veličiny MOS_M a MOS_E dosahuje výrazné lineární závislosti, což naznačuje dobrou přesnost obou testovaných VoIP kodeků (0,8625 a 0,8348). Koeficient determinace dosahuje poměrně nízkých hodnot (0,5243, resp. 0,5965), což je způsobeno výraznými výkyvy hodnot MOS_M ve srovnání například s ženským hlasem (obr. 29b, resp. 30b).



Obr. 28: Přesnost modelu při použití kodeku G.711 (a) a G.729 (b) na hudební nahrávce. Zdroj: Vlastní práce.

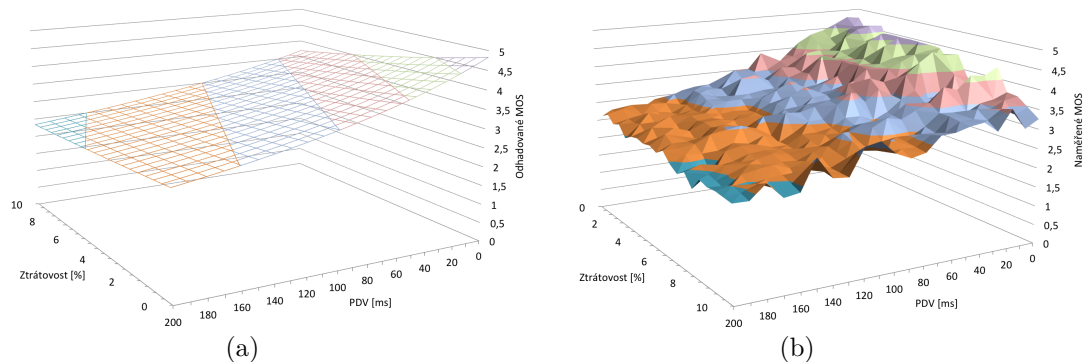
Tab. 20: Podrobnosti lineární regrese hudební nahrávky.

Kodek	PC	MOS_M/MOS_E	σ regrese	σMOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711		0,8625	0,1132	0,1642	0,5243	6,24	5,62	11,86
G.729		0,8348	0,0935	0,1469	0,5965	5,66	3,83	9,49

Přesnost vytvořených modelů je navíc detailně znázorněna v grafech na obr. 28a (G.711) a 28b (G.729). Ideální model je reprezentován červenou čarou, kdy odhadované hodnoty MOS (MOS_E) přesně odpovídají hodnotám měřeným (MOS_M). Černé body reprezentují aktuální odhady regresního modelu. Přítomnost bodu nad červenou čarou značí podhodnocení, přítomnost bodu pod čarou značí nadhodnocení odhadované kvality VoIP hovoru.

6.2 Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející ženský hlas

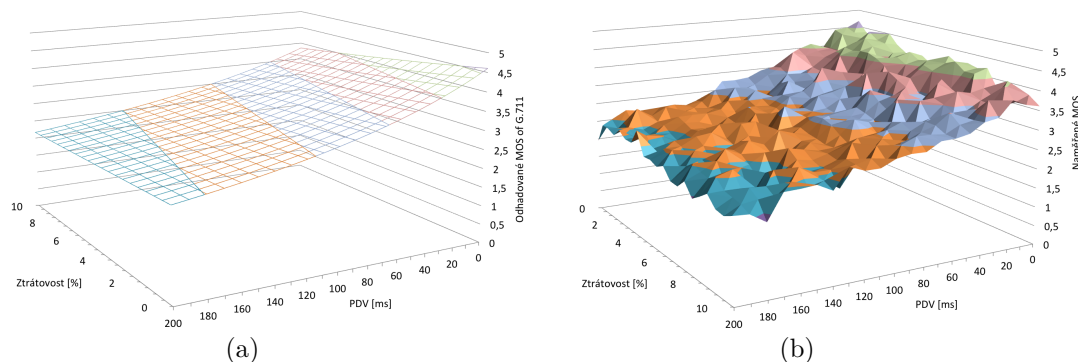
Nahrávka použitá v této části měření obsahovala přibližně čtyři různé ženské hlasy, které v anglickém jazyce vyslovily krátkou větu. Výsledné hodnoty MOS_M naměřené nástrojem AQuA jednotlivých VoIP hovorů přenesené v emulované síti popsané v kapitole 5.2 jsou reprezentovány grafy na obr. 29b a 30b.



Obr. 29: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené nahrávkou ženského hlasu přenášené v kodeku G.711 (b).

Zdroj: Vlastní práce.

Ve srovnání se zvukem v podobě hudební nahrávky (obr. 26b a 27b) jsou hodnoty měření VoIP hovorů s ženskými hlasy více vyrovnané, což dokládá i validační tabulka 21. Pokles kvality není tak výrazný jako u přenosu hudby, navíc nejnižší dosažená hodnota MOS_M v testovaných intervalech QoS metrik zpravidla neklesla pod hodnotu 2. Funkční norma byla na základě R^2 opět zvolena reciproká. Výsledný model pro hlasový kodek G.711 ve VoIP hovoru přenášející ženský hlas, jehož graf je na obr. 29a, je vyjádřen pomocí vztahu (39). Naopak model pro hlasový kodek G.729 ve VoIP hovoru přenášející ženský hlas, jehož graf je na obr. 30a, je vyjádřen pomocí vztahu (40).



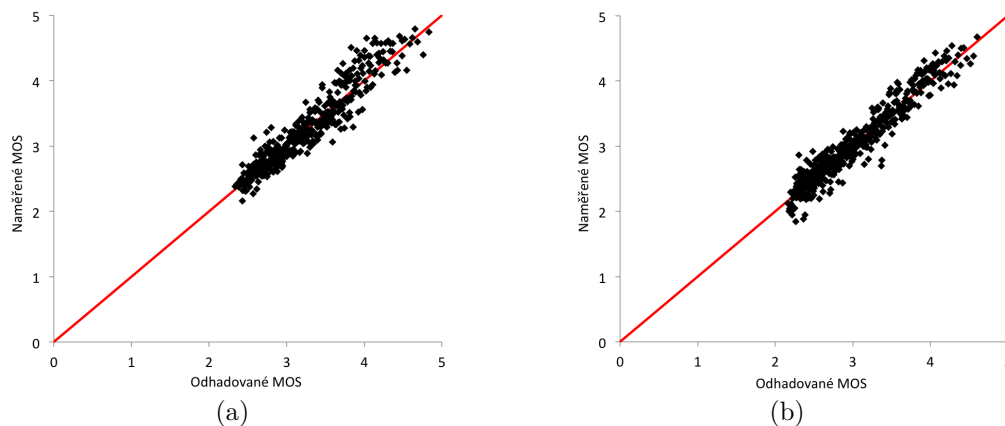
Obr. 30: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené nahrávkou ženského hlasu přenášené v kodeku G.729 (b).

Zdroj: Vlastní práce.

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,207067 + 0,000784443 \times PDV + 0,00636587 \times L} \quad (39)$$

$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,2172229 + 0,00100826 \times PDV + 0,00427811 \times L} \quad (40)$$

Verifikace modelu



Obr. 31: Přesnost modelu při použití kodeku G.711 (a) a G.729 (b) na nahrávce ženského hlasu. Zdroj: Vlastní práce.

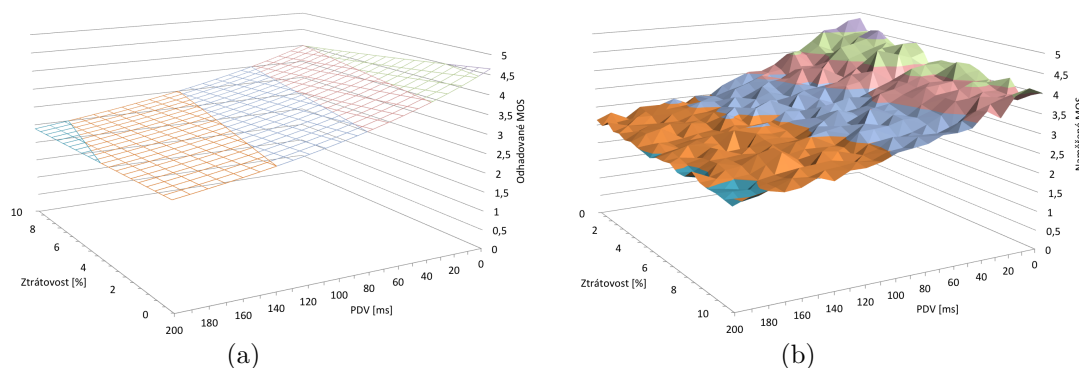
Jak už bylo patrné z naměřených hodnot, hodnoty MOS_M jsou v tomto případě více vyrovnané, což zajistí i kvalitnější regresní model. Tab. 21 uvádí velmi vysokou pozitivní korelaci mezi měřeními a odhadovanými hodnotami (0,9479, resp. 0,9605). Tento fakt se promítl také do nižší směrodatné odchylky a do koeficientu determinace, který je při použití tohoto typu zvuku 0,8991 pro kodek G.711 a 0,8885 pro kodek G.729. Grafy na obr. 31 naznačují, že výsledný model se velmi dobře přibližuje ideální variantě v obou zmiňovaných variantách VoIP kodeků.

Tab. 21: Podrobnosti lineární regrese nahrávky ženského hlasu.

Kodek	PC MOS_M/MOS_E	σ regrese	σMOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711	0,9479	0,0172	0,3173	0,8991	1,15	0,12	1,28
G.729	0,9605	0,0221	0,0662	0,8885	1,71	0,25	1,93

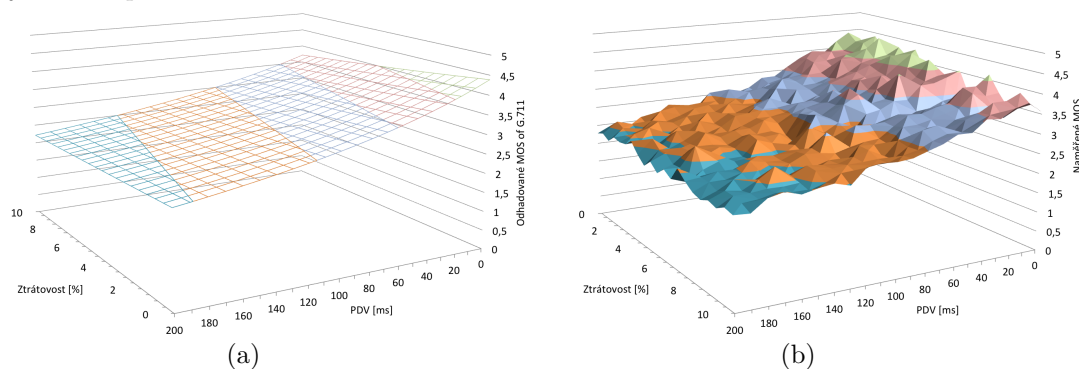
6.3 Vliv QoS na kvalitu VoIP hovoru přenášející mužský hlas

Podobně jako u nahrávky obsahující ženské hlasy se i zde nahrávka skládá přibližně ze čtyř anglických vět od čtyř různých mužů s různými hlasy. Naměřené hodnoty MOS_M pro oba použité kodeky jsou zaneseny do grafů na obr. 32b a 33b.



Obr. 32: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené nahrávkou mužského hlasu přenášené v kodeku G.711 (b).

Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 33: Regresní model (a) vytvořený na základě naměřených dat tvořené nahrávkou mužského hlasu přenášené v kodeku G.729 (b).

Zdroj: Vlastní práce.

Stejně jako u nahrávky obsahující ženské hlasy jsou naměřené hodnoty velmi vyrovnané. Dosahované hodnoty MOS_M jsou opět mírně nižší u G.729. Nejvhodnější funkční norma je opět reciproká. Výsledný model pro hlasový kodek G.711 ve VoIP hovoru přenášející mužský hlas, jehož graf je na obr. 32a, je vyjádřen jako vztah (41). Regresní model pro hlasový kodek G.729 ve VoIP hovoru přenášející mužský hlas, jehož graf znázorňuje obr. 33a, je reprezentován vztahem (42).

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,215186 + 0,000843472 \times PDV + 0,00351563 \times L} \quad (41)$$

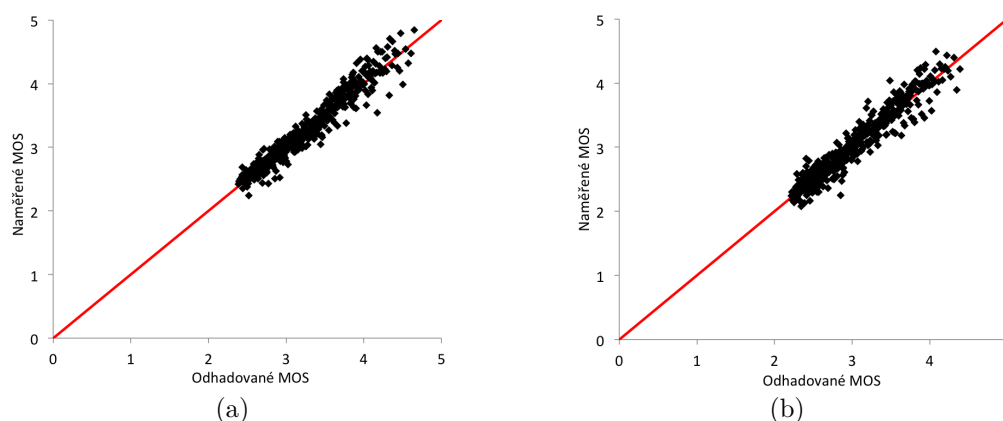
$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,227827 + 0,000913821 \times PDV + 0,00411212 \times L} \quad (42)$$

Verifikace modelu

Hodnoty výsledných modelů korespondují s výsledky ženského hlasu, viz tab. 22. Korelační koeficient dosahuje velmi vysokých hodnot (0,9692, resp. 0,9586). Koeficient determinace zde má nejvyšší hodnoty ze všech modelů (0,9391 a 0,9089). Lze tak konstatovat, že navržené modely jsou schopny výborně predikovat změnu MOS na základě změny QoS metrik, jak ostatně dokládají i grafy na obr. 34.

Tab. 22: Podrobnosti lineární regrese nahrávky mužského hlasu.

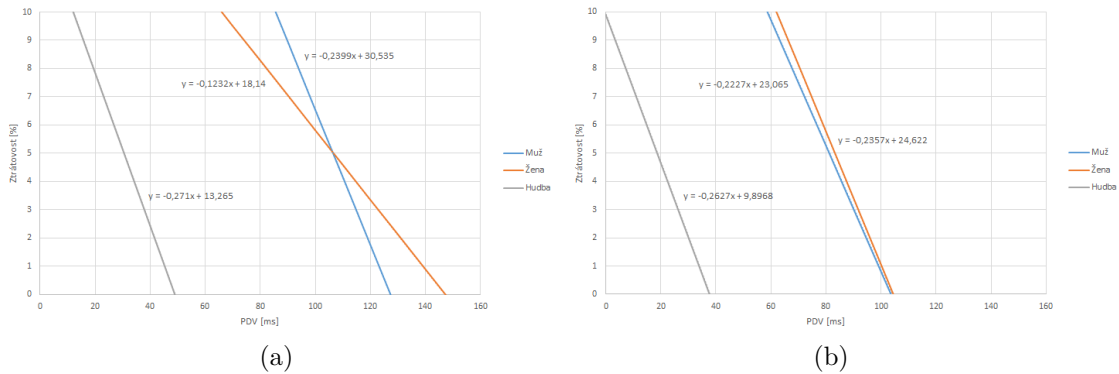
Kodek	PC MOS_M/MOS_E	σ regrese	σ MOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711	0,9692	0,1333	0,3171	0,9391	1,2	0,07	1,27
G.729	0,9586	0,0180	0,3397	0,9089	1,41	0,14	1,56



Obr. 34: Přesnost modelu při použití kodeku G.711 (a) a G.729 (b) na nahrávce mužského hlasu. Zdroj: Vlastní práce.

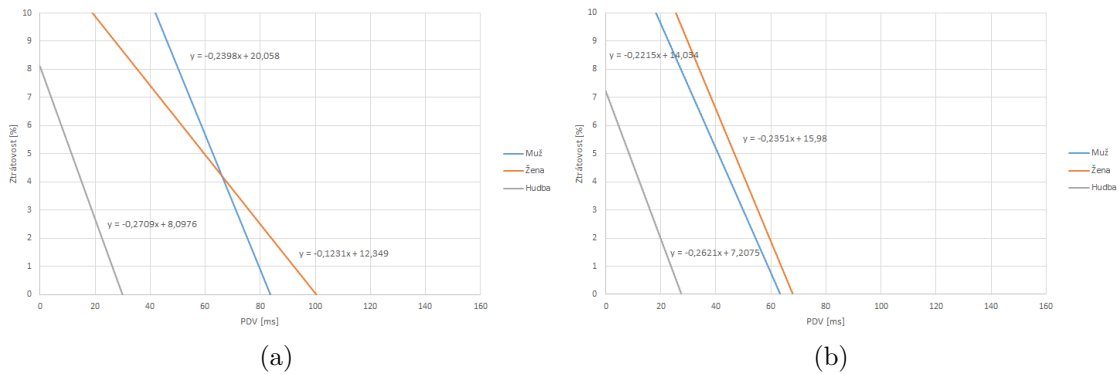
6.4 Shrnutí dosažených výsledků

Na základě výše popsaných modelů byly vytvořeny grafy na obr. 35 a 36 naznačující citlivost typu zvukových dat na ztrátovost a PDV. Grafy na obr. 35, resp. 36, reprezentují limitní hodnotu MOS, kdy pro uživatele přestává být služba akceptovatelná, tj. hodnota 3,1, resp. 3,5. Jak je z výsledků patrné, nejnáchylnější na zvýšené hodnoty ztrátovosti a PDV je obecně hudba. Oba zvukové kodeky jsou lépe navrženy



Obr. 35: Hodnoty ztrátovosti a PDV při zachování limitní hodnoty MOS (3,1) v případě kodeku G.711 (a) a G.729 (b).

Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 36: Hodnoty ztrátovosti a PDV při zachování limitní hodnoty MOS (3,5) v případě kodeku G.711 (a) a G.729 (b).

Zdroj: Vlastní práce.

pro přenos hlasu, přičemž rozdíly mezi ženským a mužským hlasem jsou minimální, zejména v případě kodeku G.729 (obr. 35b a 36b). Kodek G.729 tak dosahuje velmi vysoké účinnosti s ohledem na potřebnou šířku pásma (8 kbps).

S ohledem na citlovost jednotlivých typů zvuku bude práce dále vycházet z výsledků hudební nahrávky. Tím lze předpokládat, že MOS lidské řeči nebude horší než predikovaná hodnota.

Jak potvrdila literární rešerše, distribuce zpoždění v počítačové síti dosahuje zpravidla charakteru s dlouhým chvostem (*long-tailed*). Tato kapitola (5.2) tudíž analyzovala vliv PDV na základě Paretova rozdělení zpoždění. Pro případy, kdy by rozdělení zpoždění vykazovalo charakter spíše rozdělení normálního, byly regresní modely v rámci QoS-to-QoS fáze vytvořeny i na základě normálního rozdělení. Tyto modely jsou součástí příloh A, B a C. Zpoždění může dosáhnout normálního rozdělení například v okamžiku, kdy je MOS VoIP hovoru analyzováno po velmi krátkých intervalech (např. 1 s). V takovém případě by se nemusely extrémní hodnoty zpoždění projevit a PDV by tak dosáhlo spíše normálního rozdělení.

7 Výsledky měření fáze L1,2-to-QoS

7.1 Vliv Wi-Fi sítě na QoS (konfigurace 1)

Simulace s konfigurací 1 sledovala ztrátovost a PDV VoIP toků (G.711 a G.729) s ohledem na vzdálenost hosta (STA) od přístupového bodu (AP) a vysílací výkon přístupového bodu v síti, kde byl použit bezdrátový standard 802.11g a 802.11b. Cílem simulace je primárně získat QoS metriky (fáze Q1,2-to-QoS), které budou následně aplikovány do regresních funkcí (fáze QoS-to-QoE), čímž budou vytvořeny modely znázorňující hodnoty MOS na základě vzdálenosti STA od AP a vysílacího výkonu AP.

Tab. 23: Ztrátovost (v procentech) VoIP hovoru s kodekem G.711 v síti se standardy *g* a *b*.

Vzdálenost	Vysílací výkon AP [mW]											
	Standard 802.11g						Standard 802.11b					
	1	3	5	10	50	100	1	3	5	10	50	100
1 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 m	100	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150 m	100	3,2	4	3	3,4	4	0	0	0	0	0	0
200 m	100	24,8	29,4	26,8	28,4	25,2	0	0	0	0	0	0
300 m	100	88,2	89,2	88,2	85,2	87,2	100	0	0	0	0	0
400 m	100	100	99,4	99,2	99	99,6	100	100	0	0	0	0
500 m	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0

Hodnoty ztrátovosti VoIP hovoru s kodekem G.711 pro oba použité bezdrátové standardy jsou shrnuty v tabulce 23. Standard 802.11g používá modulaci OFDM, která je ve srovnání s DSSS (802.11b) komplexnější a poskytuje vyšší teoretickou propustnost. Ta ale se vzdáleností od AP klesá a v případě OFDM více než v případě DSSS. Jak naznačuje výše zmíněná tabulka ztrátovostí, ztrátovost standardu 802.11g roste výrazně dříve. Bez ohledu na nastavený vysílací výkon AP je nulová ztrátovost standardu *g* dosahována do vzdálenosti cca 75 m. U standardu *b* je nulová ztrátovost dosahována až do řádu stovek metrů, lze ale předpokládat, že v reálných podmínkách by byly výsledky méně příznivé.

Hodnoty PDV (popsané v tab. 24) jsou bez ohledu na vysílací výkon AP velmi příznivé. Ve vzdálenosti do 50 m nepřesahují 5 ms, mírně rostou se vzdáleností, ale obecně nepřesahují 30 ms. V případě obou bezdrátových standardů se v některých případech objevila 100% ztrátovost, v těchto situacích tedy nebylo možné hodnotu PDV změřit, protože ani jeden paket k příjemci (hostu B) nedorazil. Hodnoty PDV už nebyly snímány pro případy se ztrátovostí větší nebo rovno 80 %.

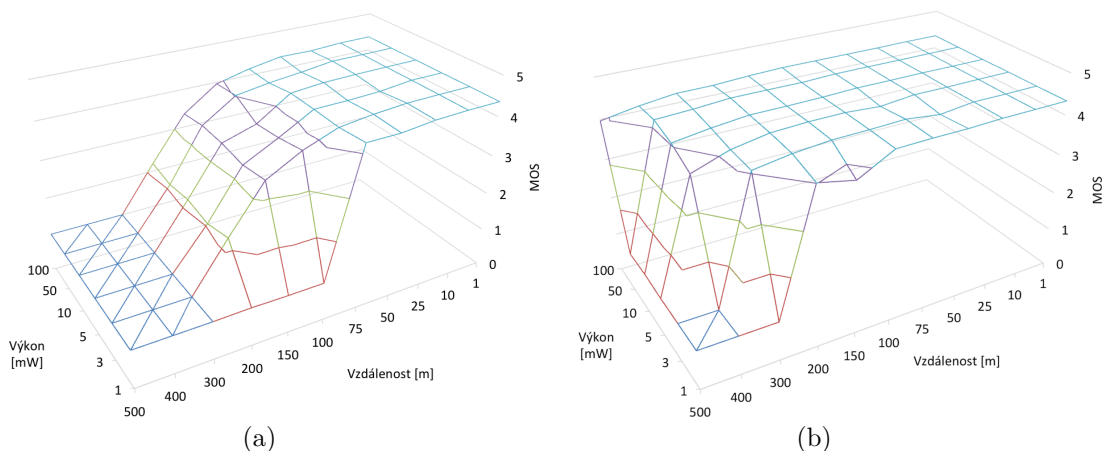
Tab. 26: PDV (v ms) VoIP hovoru s kodekem G.729 v síti se standardy *g* a *b*.

Vzdálenost	Vysílací výkon AP [mW]											
	Standard 802.11g						Standard 802.11b					
	1	3	5	10	50	100	1	3	5	10	50	100
1 m	1,2	1,3	1,2	1,4	1,3	1,2	1,4	1,5	1,4	1,6	1,5	1,4
10 m	1,3	1,4	1,2	1,4	1,4	1,2	1,5	1,6	1,4	1,6	1,6	1,4
25 m	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,4	1,6	1,6
50 m	3,9	2,9	2,6	2,3	2,8	2,0	1,4	4,1	1,5	1,6	1,5	1,5
75 m	3,8	5,7	3,9	4,1	2,8	2,1	1,6	1,5	3,8	1,6	1,5	1,5
100 m	10,6	5,7	6,2	5,2	3,5	9,0	2,2	2,1	2,0	2,2	2,2	1,6
150 m	–	13,2	14,1	13,0	11,5	8,4	16,8	2,2	2,3	2,1	2,1	1,6
200 m	–	–	–	12,9	11,9	10,0	15,9	3,4	3,4	2,7	2,2	3,9
300 m	–	–	–	–	–	–	–	7,9	4,4	5,0	7,1	3,2
400 m	–	–	–	–	–	–	–	16,4	9,3	7,2	7,4	4,4
500 m	–	–	–	–	–	–	–	–	16,1	10,4	8,7	9,4

Výsledné modely

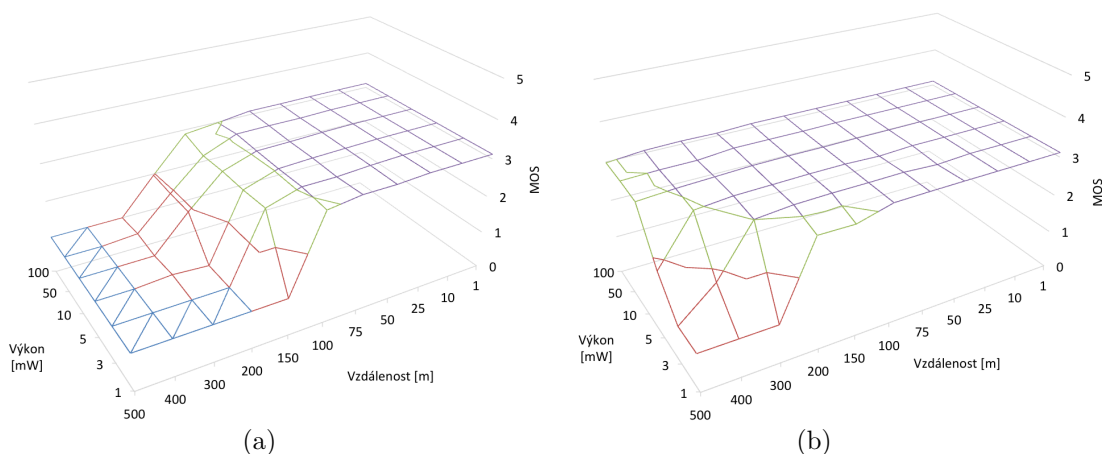
Dosažením hodnot ztrátovosti a PDV získaných simulací v konfiguraci 1 (fáze L1,2-to-QoS) do regresních funkcí hudební nahrávky popsaných v sekci 6.1 (fáze QoS-to-QoE) lze získat výsledné modely.

Odhadovaná hodnota MOS (MOS-LQE) s použitým kodekem G.711 v simulované síti 802.11g je zpracována v grafu na obr. 37a. Podle výsledků lze konstatovat, že v simulovaných podmínkách (bez interference dalších AP, výrazného okolního šumu a s minimálním provozem na pozadí) nemá vysílací výkon AP zásadní vliv na vnímanou kvalitu VoIP hovoru, naopak vzdálenost vlivem propagace signálu ano. Dle očekávání má ale nejmenší dosah AP s minimálním EIRP (1 mW). Simulace dále prokázala, že vysoké úrovně MOS (> 4) je teoreticky dosahováno až do vzdálenosti 75 m, poté dochází k prudkému snižování vnímané kvality VoIP hovoru. Hraniční hodnota MOS (3,1) se nachází ve vzdálenosti 75 – 100 m STA od AP. Ve větších vzdálenostech je i za ideálních podmínek provozování VoIP služby nemožné, vlivem vysoké (až 100%) ztrátovosti paketů pak hodnota MOS nabývá nejnižších hodnot blízkých se 1. V případě, kdy je kodek G.711 přenášen v síti 802.11b, jsou výsledky na první pohled lepší (obr. 37b) – MOS až na jednu výjimku nekleslo pod hodnotu 4 až do vzdálenosti 200 m bez ohledu na vysílací výkon AP, což je dáno jednodušším modulačním schématem DSSS. Dále je třeba zmínit, že má standard 802.11b maximální teoretickou propustnost pouze 11 Mbps, ta však s menším RSSI klesá také. Navíc lze přepokládat, že v reálném prostředí budou výsledky výrazně horší. Je tedy vhodné podotknout, že výsledný model tedy prezentuje optimální a pouze teoretický případ.



Obr. 37: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.711 na základě vysílacího výkonu AP a vzdálenosti mezi AP a STA v síti IEEE 802.11g (a), resp. v síti IEEE 802.11b (b).

Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 38: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.729 na základě vysílacího výkonu AP a vzdálenosti mezi AP a STA v síti IEEE 802.11g (a), resp. v síti IEEE 802.11b (b).

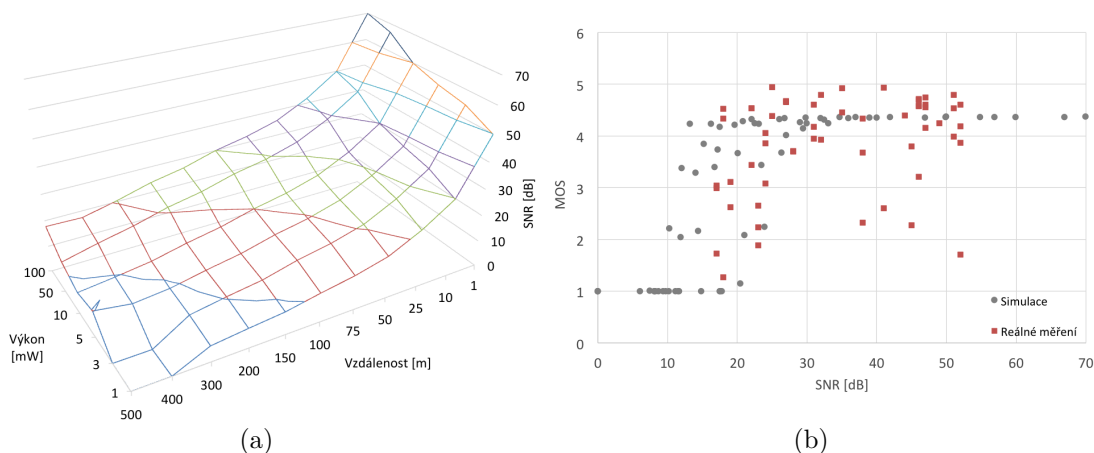
Zdroj: Vlastní práce.

Přenosem kodeku G.729 je v případě obou Wi-Fi standardů dosaženo maximálního MOS cca 3,2 (obr. 38). Jak je zmiňováno i v následující sekci 7.2, je tato skutečnost dána regresní funkcí hudební nahrávky pro kodek G.729, která je posána v sekci 6.1, obr. 27a. Grafy ve srovnání s kodekem G.711 (obr. 37) mají kromě maximálního MOS i mírně jiný charakter poklesu této hodnoty, a to ze dvou důvodů: (i) hodnoty ztrátovosti a PDV získané simulací jsou pro oba kodeky mírně rozdílné, (ii) kodek G.729 reaguje na změnu ztrátovosti a PDV jinak (viz. grafy 26a a 27a). Bez ztráty kvality se poté lze v síti 802.11g vzdálit od přístupového bodu až na hranici 100 m. Poté kvalita prudce klesá. Dle výsledků standardu 802.11b se lze opět (jako u kodeku G.711) vzdálit až na vzdálenost 200 m bez výrazné ztráty kvality. I zde je ale nutné zdůraznit, že v reálných podmínkách by bylo dosaženo výsledků horších.

Vztah mezi SNR a MOS

Často užívaným parametrem fyzické vrstvy je SNR, resp. SNIR, zejména v *site survey* nástrojích. Výhodou této metriky je to, že ji lze na koncovém hostu bez větších problémů vypočítat. Přestože původní definice konfigurace 1 nezohledňuje SNR, získané výsledky jsou tak zajímavé, že si zaslouží své místo v práci. Nasbírané hodnoty SNIR během simulací jsou zaneseny do grafu na obr. 39a.

Nabízí se srovnání hodnot SN(I)R a odhadovaného MOS (MOS-LQE) získaného v simulaci, což naznačují šedé značky v grafu na obr. 39b. Do grafu byla dále zanesena i řada hodnot MOS-LQO (značená červeně) získaná při reálných měřeních Konečným (2015) v přízemí budovy Q Mendelovy univerzity v Brně. Ačkoliv byl simulovaný standard 802.11g a hodnoty reálného měření pocházejí ze sítě provozované na standardu 802.11n, výsledky obou situací se velmi dobře shodují. Je patrné, že při hodnotách SNR okolo 10 dB je komunikace službou VoIP nerealizovatelná. Výrazný nárůst kvality přichází v oblasti okolo 20 dB SNR. Pro $\text{SNR} > 30$ dB až na extrémní případy převyšuje odhadované MOS hodnotu 4. Potvrzuje se tedy doporučení Cisco Systems (2013), že minimální SNR pro provoz VoIP ve Wi-Fi síti by mělo být alespoň 25 dB. Výsledky mj. potvrzují dobrou kvalitu regresních modelů popsanych v kapitole 6, protože hodnoty reálných měření byly vyhodnocovány přímo objektivním intrusivním nástrojem AQUA.



Obr. 39: SNIR naměřené v rámci simulace sítě IEEE 802.11g (a). Vztah mezi MOS a SNR (b). Zdroj: Vlastní práce, část dat převzata od Konečného (2015).

7.2 Vliv Wi-Fi sítě na QoS (konfigurace 2)

Simulace s konfigurací 2 sledovala ztrátovost a PDV VoIP toků (G.711 a G.729) s ohledem na počet hostů v buňce a množství provozu na pozadí v situaci s aktivním a neaktivním WMM. Cílem simulace je na základě naměřených QoS metrik (fáze Q1,2-to-QoS) a regresních funkcí (fáze QoS-to-QoE) vytvořit modely znázorňující změnu hodnoty MOS na základě počtu hostů v buňce a množství provozu na pozadí.

Simulace bez využití standardu IEEE 802.11e (WMM)

Tab. 27: Ztrátovost (v procentech) G.711 a G.729 VoIP dat přijatých hostem B bez aktivního WMM.

G.711 Klientů	Aplikací									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0,2	0,6	0,6	1	1,6	0,2	0,6
2	0,2	1	0,4	0,2	1	1,8	0,6	0,8	1,6	1,6
3	0,6	1,2	0,4	1,4	0,8	0,4	1,8	100	1	1
4	0	1	0,8	1,2	1	1	0,8	0,2	0,8	1,2
5	0,8	0,4	1,2	2	0,8	100	1,4	0,8	100	1,2
6	0,4	0,8	0,8	1	1	1	1	1,2	0,8	1,4
7	0,6	0,8	1	0,8	0,6	1,2	0,4	1,2	1,2	0,2
8	1,6	0,8	1	1	1,2	1,4	0,8	2	1,2	1,4
9	1	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,4	1	1,2	100
10	1	1	1	1,4	0,4	1,4	1,6	0,6	0,6	0,2
G.729 Klientů	Aplikací									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	1	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2
2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	1,2	1	1,6	0,6	0,8
3	0,4	0,6	0,2	0,4	1	0	0,6	100	0,8	0,6
4	0,8	0	0,2	1,2	0,4	0,8	0,8	0,2	0,4	0,2
5	0,4	1	0,4	0,6	1,2	100	0,8	0,6	100	0,8
6	0,6	0,6	0,8	0,6	1,2	0,8	1	0,4	1	0,8
7	0,6	1,2	1	0	0,6	0	0,6	0	0,4	0,4
8	0,6	1,2	1,2	0,8	0,6	1,2	0,6	0,4	0,8	0,2
9	1	0,4	0,6	0,4	1,2	0,8	0,8	0,4	0,6	100
10	0,2	1,4	0,4	1	0,6	0,2	0,4	0,6	0,6	1,4

Hodnoty ztrátovosti (v procentech) v situaci bez aktivního WMM jsou shrnuty v tabulce 27. Uvedeny jsou zvláště hodnoty naměřené pro VoIP hovory s kodekem G.711 a G.729. Až na výjimky (např. levé horní rohy tabulky) lze konstatovat, že k určité míře ztrátovosti docházelo téměř vždy, a to v případech obou kodeků. Celkem čtyřikrát u obou kodeků došlo ke 100% ztrátovosti, jinak ale její výše nepřesáhla 2%. U kodeku G.729 jsou však hodnoty ztrátovosti mírně nižší. To je způsobeno menším

datovým tokem kodeku. Limitní propustnosti bezdrátové sítě dosaženo není, protože ztrátovost se s množstvím provozu výrazně nezvyšuje. Průměrná ztrátovost¹⁹ VoIP dat s kodekem G.711 byla 0,89 % ($\sigma = 0,45$) a 0,61 % ($\sigma = 0,36$) v případě kodeku G.729.

Variace ve zpoždění (PDV) zpravidla nepřesáhla v případě obou kodeků hodnotu 150 ms. Hodnoty PDV v ojedinělých případech, kde byla naměřena 100% ztrátovost, byly nahrazeny hodnotou 100 ms. Přehledně všechny naměřené hodnoty PDV popisuje tab. 28. Ve srovnání se ztrátovostí PDV narůstá úměrně s množstvím provozu, a to jak ve směru navyšování počtu klientů (hostů), tak v případě navyšování počtu aplikací (oken prohlížeče). Ačkoliv může letmé srovnání hodnot PDV kodeků G.711 a G.729 naznačovat, že PDV kodeku G.729 je znatelně nižší, průměrné hodnoty všech naměřených hodnot dokazují, že rozdíl je minimální. Průměrná hodnota PDV kodeku G.711 je 37,3 ms ($\sigma = 35,14$) a 37,03 ms ($\sigma = 35,37$) v případě kodeku G.729.

Tab. 28: PDV (v ms) G.711 a G.729 VoIP dat přijatých hostem B bez aktivního WMM.

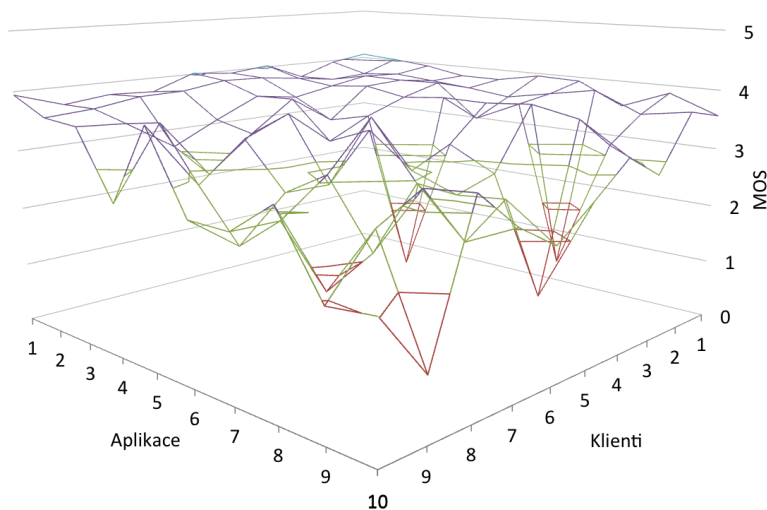
G.711	Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9,1	10,8	13,1	17,0	15,6	10,8	10,1	21,6	15,1	25,0
2	11,8	14,9	14,9	17,8	17,1	17,6	16,7	11,1	20,1	15,1
3	18,5	15,7	13,6	10,3	11,7	35,6	15,9	100,0	41,1	62,6
4	10,7	12,9	16,3	12,2	17,3	14,6	15,5	15,4	18,5	38,6
5	10,2	12,3	19,7	30,7	27,8	100,0	38,4	61,3	100,0	70,7
6	9,4	10,0	17,2	15,3	42,7	28,7	57,0	73,6	69,3	114,2
7	17,8	13,8	29,6	36,8	19,2	71,4	14,9	52,1	108,4	78,8
8	12,9	14,3	47,2	68,9	29,2	69,4	46,1	123,0	40,6	35,9
9	18,5	18,6	25,2	20,0	62,6	136,3	82,1	180,0	63,6	100,0
10	9,6	19,9	21,6	81,9	15,2	77,0	76,9	46,1	146,4	136,9
G.729	Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,2	9,5	12,1	10,5	13,1	12,2	14,7	21,6	15,5	25,0
2	8,5	15,6	10,4	8,7	20,6	11,1	16,7	13,5	20,1	14,3
3	9,3	13,3	17,1	14,8	17,3	35,6	19,5	100,0	41,1	62,1
4	10,3	16,8	10,3	14,7	17,2	16,6	15,5	13,3	13,7	38,6
5	16,0	15,4	19,6	30,7	27,7	100,0	40,0	61,3	100,0	70,7
6	13,3	15,5	13,3	15,3	40,8	28,7	56,2	73,5	69,3	114,2
7	12,7	13,8	29,6	33,4	19,2	71,4	11,6	52,1	103,7	80,2
8	17,2	12,1	43,3	68,9	29,2	69,4	46,1	123,0	64,7	33,3
9	13,7	13,2	25,1	19,9	63,4	136,3	82,1	180,0	63,5	100,0
10	16,4	9,7	21,6	81,9	13,6	76,9	76,9	46,1	146,4	136,0

¹⁹Do výpočtu nebyly zahrnuty hodnoty se 100% ztrátovostí.

Výsledné modely

Aktuální oddíl popisuje výsledné modely, které vznikly dosazením hodnot ztrátovosti a PDV získaných simulací v konfiguraci 2 bez aktivního WMM (fáze L1,2-to-QoS) do regresních modelů hudební nahrávky popsanych v sekci 6.1 (fáze QoS-to-QoE).

Graf na obr. 40 znázorňuje výsledky kodeku G.711. V situacích, kdy rostl pouze jeden vstupní parametr a druhý dosahoval minimálních hodnot (počet hostů nebo počet aplikací), odhadované MOS se pohybuje kolem hodnoty 4, což je velmi dobrá kvalita. Přesáhnou-li oba vstupní parametry hodnotu 4, je patrný výrazný pokles vnímané kvality VoIP hovoru. Hraniční hodnota MOS (3,1) je překročena v místech, kdy hodnota obou vstupních parametrů (počet klientů a současně počet aplikací) je minimálně 4–5. Na základě tohoto modelu lze tedy konstatovat, že pokud je počet komunikujících hostů a objemem provozu (počet aplikací) vyšší než 4, VoIP hovor přenášený v této síti nebude mít pro uživatele akceptovatelnou úroveň kvality. Naopak v situacích, kdy se v buňce kromě hosta komunikujícího přes VoIP (host A) nachází max. 4 další klienti generující libovolné²⁰ množství provozu na pozadí, bude stále dosahováno MOS blízke hodnotě 4.

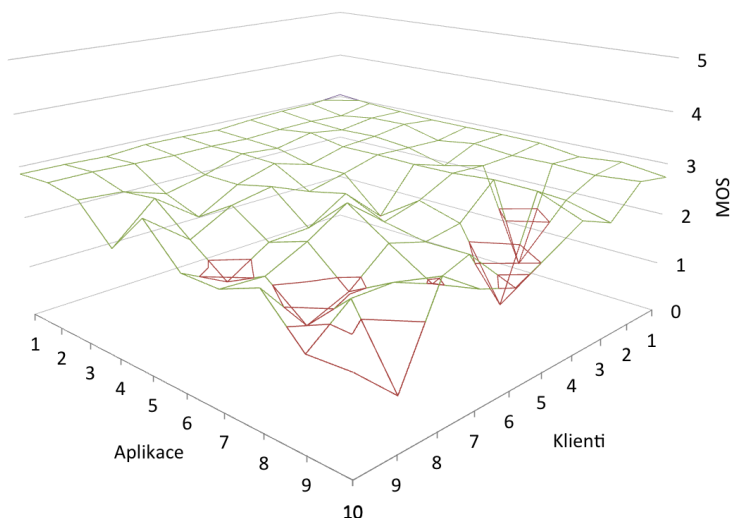


Obr. 40: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.711 na základě počtu klientů a aplikací (HTTP session) podle QoS metrik naměřených na hostu hostu B v síti bez aktivního WMM.
Zdroj: Vlastní práce.

Na stejné výsledky simulace je následně aplikována regresní funkce hudební nahrávky pro hlasový kodek G.729, výsledek popisuje graf na obr. 41. Ačkoliv je maximální dosahovaná hodnota MOS mírně menší než 3, což je významně nižší dosahovaná kvalita ve srovnání s kodekem G.711, se zvyšujícími se hodnotami vstupních parametrů klesá hodnota MOS pomaleji. Pouze v některých případech MOS klesá pod hodnotu 2. Bez významné ztráty kvality tak lze v buňce provozovat např.

²⁰Max. 10 aplikací generujících pakety podle konfigurace v sekci 5.5.

až 10 klientů s až 5 aplikacemi. Z toho lze usuzovat lepší odolnost kodeku G.729 vůči zhoršeným přenosovým podmínkám, jak už může být částečně patrné z grafů na obr. 26 a 27 v sekci 6.1.



Obr. 41: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.729 na základě počtu klientů a aplikací (HTTP session) podle QoS metrik naměřených na hostu B v síti bez aktivního WMM.
Zdroj: Vlastní práce.

Simulace s využitím standardu IEEE 802.11e (WMM)

Výše popsaná simulace byla v této části zopakována, ale byla navíc doplněna o konfiguraci WMM. Bezdrátový Host A byl zařazen do kategorie přístupu AC_VO (hlas), ostatní bezdrátoví klienti generující HTTP provoz byli ponecháni ve výchozí kategorii AC_BK (best-effort).

Simulace prokázala, že za zkoumaných podmínek nemá aktivní WMM zásadní vliv na objem ztracených paketů. Lze se tak přesvědčit porovnáním hodnot v tabulkách 27 a 29. Již ale zcela vymizely výskyty se 100% ztrátovostí. Maximální dosažená ztrátovost je 2 % u kodeku G.711, resp. 1,6 % u kodeku G.729. Průměrná ztrátovost v případě kodeku G.711 byla 1,01 ms ($\sigma = 0,47$), resp. 0,8 ms ($\sigma = 0,42$) u kodeku G.729. Stejně jako v simulaci bez aktivního WMM je patrné, že hodnoty ztrátovosti jsou nezávislé na objemu provozu.

Hodnoty PDV dosáhly výrazných změn (viz tab. 30). Ve srovnání se situací bez aktivního WMM (tab. 28) jsou naměřené hodnoty zcela odlišné a pozitivní efekt aplikovaného QoS mechanismu je znatelný. Zatímco v předchozím případě bylo dosahováno hodnot PDV běžně vyšších než 100 ms, po aplikaci WMM nejvyšší zaznamenaná hodnota PDV byla 9,1 ms (G.711), resp. 9,0 ms (G.729). Navíc jsou hodnoty velmi vyrovnané bez ohledu na množství přenášeného HTTP provozu na pozadí. O tom svědčí naměřené průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky, které jsou u G.711 4,8 ms ($\sigma = 0,79$) a u G.729 4,7 ms ($\sigma = 0,92$).

Tab. 29: Ztrátovost (v procentech) G.711 VoIP dat přijatých hostem B při aktivním WMM.

G.711		Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1,2	1	1	1	1,4	0,4	1	0,8	0,6	1,6	
2	0,4	1,2	0,6	1,6	0,8	0,8	1	1,4	0,2	0,4	
3	0,6	1,6	0,6	0,4	0,4	0,4	1,2	0	1,4	0,8	
4	1	0,2	0,8	1,8	1	1,6	1,8	1	1,6	1	
5	0,8	1,6	1,2	0,4	1	0	1	1	0	1	
6	1,6	0,4	0,8	2	0,8	0,8	1,2	0,6	1,2	1,2	
7	1,2	0,8	1	1	2	1,4	1,6	0,8	1,2	1,8	
8	1,2	0,8	0,6	0,8	1,2	1,4	2,2	1,2	1	2	
9	1	0,6	1,2	0,8	1	1	0,6	1,2	1,4	0	
10	0,6	1,2	1,4	1,2	0,8	1,8	1,2	1	1,2	0,8	
G.729		Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,8	1,4	0,4	1,4	0,4	0,8	1,2	1	0,6	0,4	
2	0,6	0,6	1	0,8	0,8	1,4	1,6	1	1	1	
3	0,4	1	1,2	1,2	1	0,8	0,4	0	0,8	0,2	
4	1	1,2	0,8	1	1,2	1,2	0,8	0,4	1,2	0,6	
5	0,6	0,8	0,4	0,2	0,4	0	0,4	0,8	0	0,6	
6	1,4	1,6	0,6	1,6	0,2	0,6	0,8	0,6	1,4	1	
7	0,6	1,6	0,6	0	1,4	1,2	1	0,8	0,2	0,8	
8	1,2	1,2	1,4	0,2	0,4	1,2	0,2	0,4	0,2	1,2	
9	1,2	1,2	0,8	0,2	0,8	1	0,4	1	1,2	0	
10	1,4	0,4	0,8	1	0,4	0,6	1	0,6	1,6	0,6	

Výsledné modely

Aktuální oddíl popisuje výsledné modely, které vznikly dosazením hodnot ztrátovosti a PDV získaných simulací v konfiguraci 2 s aktivním WMM (fáze L1,2-to-QoS) do regresních modelů hudební nahrávky popsanych v sekci 6.1 (fáze QoS-to-QoE).

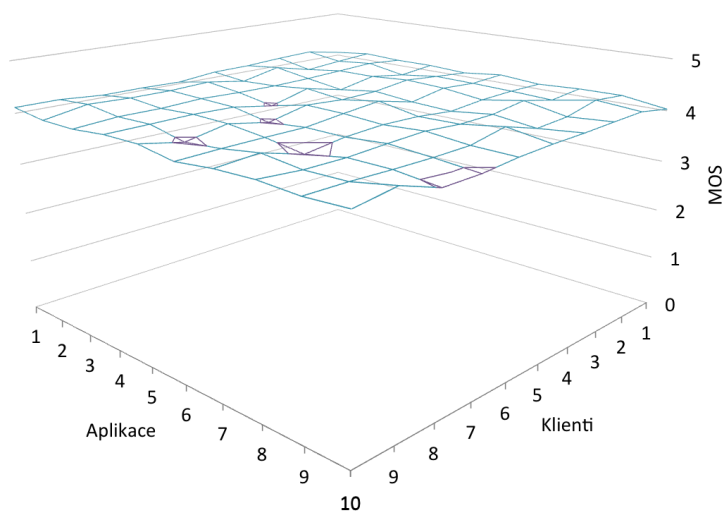
Odhadovaná hodnota MOS VoIP hovoru s použitým kodekem G.711 v simulované síti s aktivním WMM je téměř ve všech iteracích simulace vyšší než 4, jak přibližuje graf na obr. 42. To značí ještě mírně vyšší vnímanou kvalitu VoIP hovoru než v situaci bez aktivního WMM a minimálním provozem v síti (viz obr. 40).

Vezmeme-li do úvahy přenos VoIP hovoru s kodekem G.729 v simulované síti, získáme odhadované MOS tak, jak ho naznačuje graf na obr. 43. Přestože model regresní funkce z grafu na obr. 27a vytvořený v rámci fáze QoS-to-QoE předpokládá maximální možné MOS cca 3,1, simulace ve všech případech prokázala nenulovou ztrátovost a PDV, proto se odhadované MOS na výsledném modelu (obr. 43) pohybuje těsně kolem hodnoty 3. Přesto je však i při použití tohoto kodeku dosahována téměř maximální možná kvalita bez ohledu na měřenou provozní zátěž na pozadí.

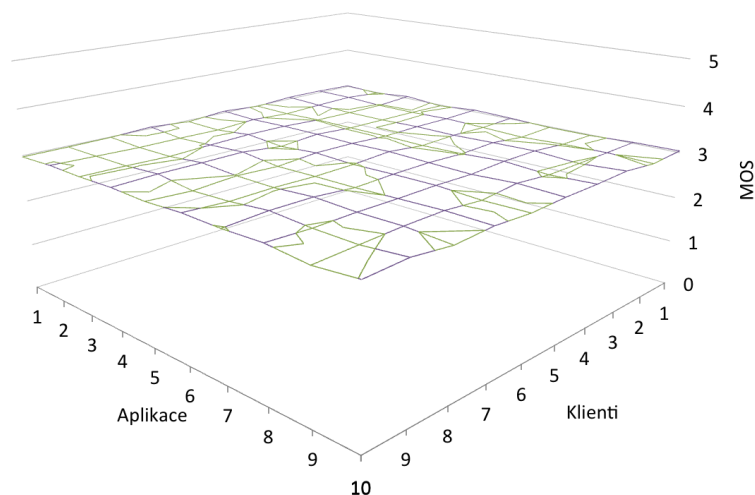
Tab. 30: PDV (v ms) G.729 VoIP dat přijatých hostem B s aktivním WMM.

G.711		Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	4,9	3,1	4,1	4,0	3,7	4,8	4,5	4,0	4,4	4,5	
2	3,8	3,9	3,9	4,2	4,2	4,5	4,5	4,1	4,2	5,5	
3	3,9	4,4	5,0	5,5	3,8	4,7	4,6	5,0	4,5	4,7	
4	3,7	4,2	5,2	4,7	4,3	4,3	4,5	4,4	5,3	4,9	
5	4,8	3,9	4,2	4,7	4,9	5,0	5,5	4,9	5,0	5,2	
6	4,3	4,6	5,5	4,9	4,1	4,4	4,3	4,9	5,0	5,6	
7	5,3	4,2	3,9	4,4	5,0	4,9	4,3	5,3	5,6	5,6	
8	5,4	4,1	6,5	4,5	3,4	5,1	5,9	5,3	6,2	5,2	
9	4,2	4,0	4,2	5,0	9,1	6,9	5,0	5,4	4,2	5,0	
10	5,7	6,2	5,4	3,8	4,9	4,8	4,6	4,5	5,1	5,6	

G.729		Aplikací									
Klientů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	3,6	3,8	3,3	4,0	3,9	3,8	4,5	5,1	4,3	4,3	
2	3,1	3,5	4,4	5,4	4,1	3,4	4,8	4,8	3,9	5,4	
3	3,8	3,7	4,0	3,9	3,4	4,7	4,6	5,0	5,4	4,0	
4	5,0	5,1	5,1	4,7	3,9	5,0	5,2	3,7	4,4	4,2	
5	3,2	4,2	4,3	4,9	4,9	5,0	4,9	4,7	5,0	4,8	
6	4,6	4,6	3,4	3,7	5,4	6,0	4,2	4,7	4,7	5,7	
7	3,7	4,1	5,3	4,7	5,0	4,8	5,3	4,5	5,4	4,1	
8	4,0	5,9	4,5	4,5	6,7	4,0	4,4	5,8	6,2	6,0	
9	4,8	4,6	5,7	4,7	9,0	6,0	3,6	4,8	4,9	5,0	
10	4,3	6,2	5,4	3,6	7,8	4,6	4,4	4,6	6,1	5,4	



Obr. 42: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.711 na základě počtu klientů a aplikací (HTTP session) podle QoS metrik naměřených na hostu B v síti s aktivním WMM.
Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 43: Odhadované MOS-LQE VoIP kodeku G.729 na základě počtu klientů a aplikací (HTTP session) podle QoS metrik naměřených na hostu B v síti s aktivním WMM.
Zdroj: Vlastní práce.

7.3 Vliv pevné sítě na QoS a QoE VoIP hovoru

Cílem této sekce je zanalyzovat efektivitu nasazení QoS v pevných sítích a ověřit kvalitu navržených odhadových metod v reálném měření. Součástí této analýzy je reálný experiment modelující běžnou situaci v domácnostech. Vliv aplikace QoS mechanismů je zkoumán na kvalitě videa a zejména hlasové služby VoIP.

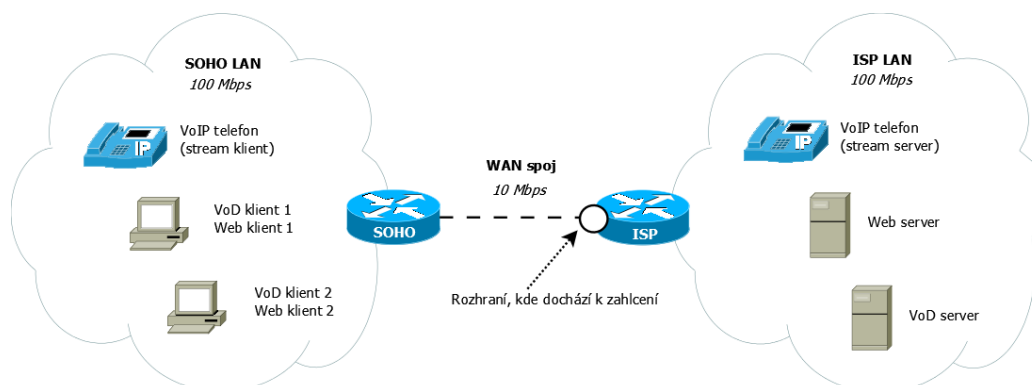
Experiment se zaměřuje na tzv. *Speed-mismatch* (LAN-WAN) problem. Testovaná síť (obr. 44) se dle svého rozsahu označuje jako SOHO²¹, přičemž využívá služeb *triple play* (hlasové služby, video služby, datový přenos) provozované poskytovatelem internetového připojení (ISP – Internet Service Provider). SOHO LAN má přístup do Internetu, kudy současně prochází síťový provoz hlasových a video služeb. Zatímco lokální infrastruktura pracuje na šířce pásma 100 Mbps, WAN spoj mezi lokálním routerem a routerem ISP má zpravidla mnohem menší dostupnou šířku pásma, v tomto případě 10 Mbps. Šířka pásma na WAN spoji je snadno vyčerpána objemnými toky VoD a nárazově agresivními TCP toky.

Síťová topologie

Síťovou topologii řešeného experimentu na obr. 44 lze rozdělit do tří částí. Levý segment topologie tvoří síť zákazníka, na pravé části topologie je vyznačena síť serverů poskytovatele a oba segmenty propojuje point-to-point spoj mezi routery zakončující segmenty zákazníka a ISP.

Všechny koncové stanice a servery jsou standardní PC s dostatečnými hardwarovými prostředky. Na koncových hostech je nainstalován OS Linux Fedora 16, na

²¹Small Office/Home Office. Malá síť LAN do 10 uživatelů.



Obr. 44: Výchozí topologie experimentu.
Zdroj: Vlastní práce.

serverech pracuje OS Linux Centos 6. Směrovače jsou Cisco 2811, Advanced IP Services IOS. V obou LAN jsou uzly propojeny pomocí přepínačů Cisco Catalyst 2960, LAN Base IOS. Bylo použito adresní schéma IPv4, všechna L3 rozhraní jsou nakonfigurované staticky (IP adresa a výchozí brána). Na všech rozhraních přepínačů je použita výchozí VLAN, na všech portech obou přepínačů je aktivována funkce *Spanning Tree PortFast*. Směrovače používají statické směrování pro přístup do vzdálené sítě. Není používán systém DNS, všechny koncové uzly jsou identifikovány pouze pomocí IP adres.

Datové toky

Během experimentu budou v topologii přenášeny tři typy síťové komunikace – datový tok zvuku (VoIP), datový tok VoD a webový provoz. První dva jsou multi-mediální datové toky přenášeny RTP protokolem (Real Time Transport Protocol) zapouzdřeným v UDP datagramu. Webový provoz je reprezentován běžným HTTP protokolem přenášeným v TCP segmentu. Přenos zvuku je realizován prostřednictvím streamování zvukové nahrávky ve formátu WAV, která simuluje VoIP telefonní hovor se striktními požadavky na nízké zpoždění, variaci ve zpoždění a množství ztracených paketů (< 1 %) (ITU-T, 2011c). Naopak přenos zvuku nemá vysoké nároky na šířku pásma, při použití zvukového kodeku G.711 je vyžadována šířka pásma 64 kbps za předpokladu vzorkovací frekvence 50 vzorků za sekundu. Se standardním záhlavím na všech vrstvách je v součtu nutné rezervovat pro jeden takový hovor 88 kbps v jednom směru. VoD tok má požadavek na šířku pásma v závislosti na použitém kodeku větší (min. 2 Mbps). Přenos VoD byl řízen pomocí protokolu RTSP (Real Time Streaming Protocol), který však spotřebuje zanedbatelnou šířku pásma a jeho dopad na výsledky experimentu není brán v potaz.

Přenášený zvuk byl streamován z nástroje VLC simulující VoIP stream server (odesílatel), VoIP stream klient je také simulován pomocí VLC. Velikost bufferu na příjemci byla změněna na hodnotu 150 ms. Celková délka zvukové nahrávky byla 60 sekund, formát originálního souboru WAV, vzorkovací frekvence 44100 Hz. Pře-

nášená nahrávka je dílo J. S. Bacha (Italian Concerto – F Major), dnes dostupná pod volnou licenci. Přenos probíhal pomocí kodeku G.711 ve výchozím nastavení. VoD datový tok byl streamován z RSTP stream serveru na VLC klienta s výchozí velikostí bufferu (1200 ms) a celková délka přenášeného videa byla 100 s. Video poskytl Audiovizuální centrum Mendelovy univerzity v Brně. Webový provoz je tvořen přenášením dvou souborů s textovými daty, které byly umístěny na webový server Apache, první soubor má velikost 501 kB a druhý 37 749 kB. Tyto soubory jsou prostřednictvím nástroje `wget` (obsluhovaný z příkazové řádky) stahovány na klientské stanice. Menší soubor je stahován opakovaně a častěji, aby simuloval klikání na webové stránky běžného uživatele. Větší soubor naopak simuluje delší stahování většího souboru z Internetu.

Komunikační profil

Datové toky popsané v předchozí části byly inicializovány podle následujícího scénáře:

- 0. sekunda – spuštěn VoD datový tok z VoD stream serveru k VoD klientu 1,
- 2. sekunda – spuštěn VoIP provoz ze stream serveru ke klientu,
- 5. sekunda – spuštěn VoD datový tok z VoD stream serveru k VoD klientu 2,
- 10. sekunda – stahování 37MB souboru z web serveru na web klienta 1,
- 15. sekunda – stahování 0,5MB souboru z web serveru na web klienta 1, celkem 8 opakování každých 5 s,
- 17. sekunda – stahování 0,5MB souboru z web serveru na web klienta 2, celkem 8 opakování každých 5 s.

QoS politika

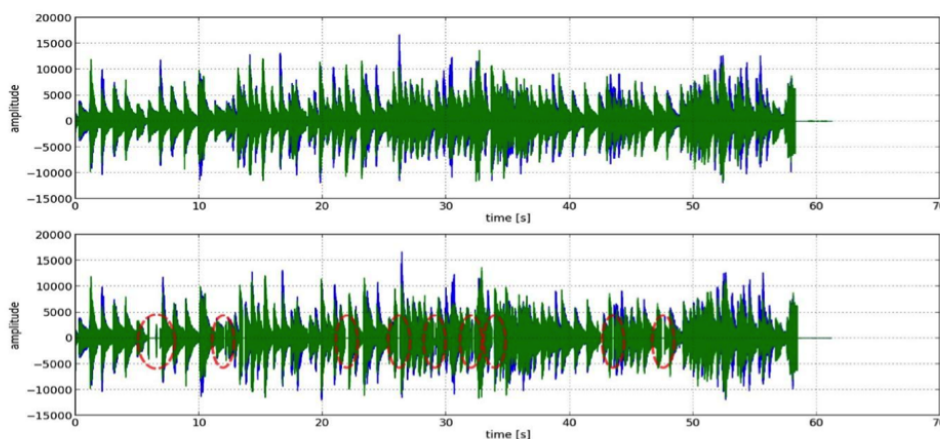
Cílem QoS politiky je nastavit QoS mechanismy tak, aby byl dostatečně prioritizován VoIP provoz. Pro tuto třídu provozu byla vytvořena fronta LLQ s garantovanou šířkou pásma 500 kbps. Dále byla vytvořena třída pro VoD datové toky, které je pomocí CBWFQ garantováno 50 % dostupné šířky pásma, tj. 5 Mbps. Pro signalizaci VoD vznikla další třída s garancí 5 % dostupné šířky pásma, tj. 500 kbps. Třída webového provozu má nejnižší prioritu a její toky jsou obsluhovány algoritmem WFQ s aktivním algoritmem RED. Pakety jsou značkovány a klasifikovány v síti ISP LAN pomocí DSCP hodnot shrnutých v tab. 31, přičemž QoS mechanismy jsou aplikovány ve výstupním směru rozhraní routeru ISP připojující SOHO router.

Tab. 31: Třídy provozu a nastavení frontových mechanismů.

Třída	PHB	DSCP	Obsluha front	Rezervováno	RED
VoIP	EF	46	LLQ	500 kbps	ne
VoD	CS4	32	CBWFQ	5 Mbps	ne
VoD signalizace	CS3	24	CBWFQ	500 kbps	ne
Web – HTTP	BE	0	WFQ	0 kbps	ano

Analýza přenosu zvuku

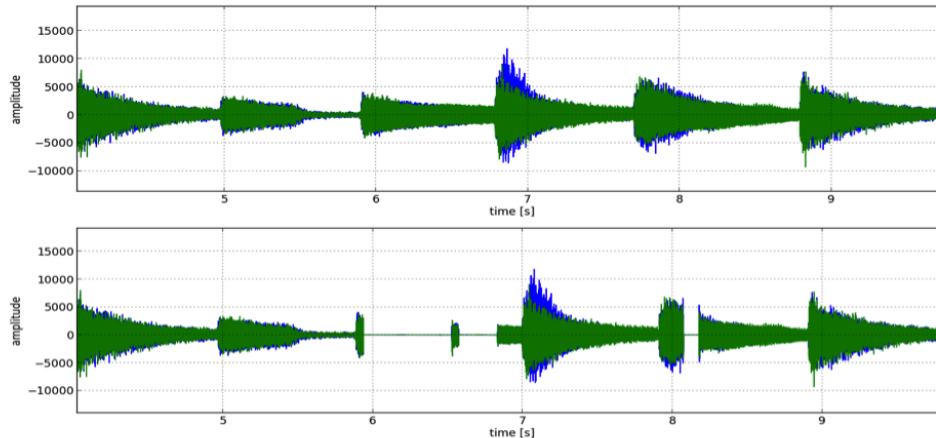
Bez přítomnosti QoS uživatel vnímá časté výpadky zvuku, jak je patrné z obr. 45 a obr. 46. Většina výpadků vznikla v okamžiku, kdy bylo iniciováno webové stahování 0,5 MB souborů přes transportní protokol TCP (přibližně 15.–50. sekunda). Kvůli zahlcení WAN spoje způsobeného objemnými VoD a TCP toky jsou zahazovány VoIP pakety, které nakonec zapříčiňují výpadky zvuku z obr. 45, detailně na obr. 46. Množství ztracených dat v dalších referenčních měřeních je víceméně shodné s prezentovanými výsledky, vždy se vyskytla řada chyb (asi 18) během přenosu bez QoS. Při použití QoS nebylo zjištěno žádné významné snížení kvality přenášeného zvuku. Pro jeho přenos byla vytvořena vlastní nízkolatenční fronta (Low Latency Queue – LLQ), která zvuku garantuje 500 kbps šířky pásma.



Obr. 45: Srovnání nahrávky přenášeného zvuku s QoS (horní část) a bez QoS (dolní část). V části bez QoS jsou výpadky znázorněny červenou elipsou.
Zdroj: Vlastní práce.

Přenos zvuku trvá 60 sekund. Během tohoto intervalu sdílí RTP pakety přenášené VoIP data limitované množství dostupné šířky pásma s dalšími datovými toky, které mohou mít negativní vliv na kvalitu přenosu zvuku. Jak je zřejmé z obr. 47, zpoždění je výrazně větší s výrazně větší variabilitou v případě bez QoS ($118,88 \text{ ms} \pm 55,47$) než v situaci s aktivním QoS ($3,1 \text{ ms} \pm 1,49$). Když objemné VoD a TCP datové toky začnou spotřebovávat omezenou šířku pásma a není v síti žádný QoS mechanismus, který by dával přednost VoIP provozu, jeho zpoždění často přesahovalo doporučený limit 150 ms (ITU-T, 2011c). Když naopak v situaci s aktivním QoS získá přenos potřebné podmínky, zůstane zpoždění velmi nízké a téměř konstantní.

Při absenci QoS přesahuje ztrátovost paketů obecně akceptovatelný limit 1 %, naopak s QoS je ztrátovost paketů nulová. Obr. 47 znázorňuje počty ztracených paketů během přenosu šedou značkou. Jak je patrné z grafu vývoje zpoždění a ztracených paketů (obr. 47), ke ztrátám dochází v místech s vyšším výkyvem zpoždění, tj. v místech s vyšším PDV, resp. jitterem.



Obr. 46: Detail nahrávky přeneseného zvuku (5.–9. s). Horní část s aktivním QoS, dolní část bez QoS (první tři výpadky jsou zřetelné).

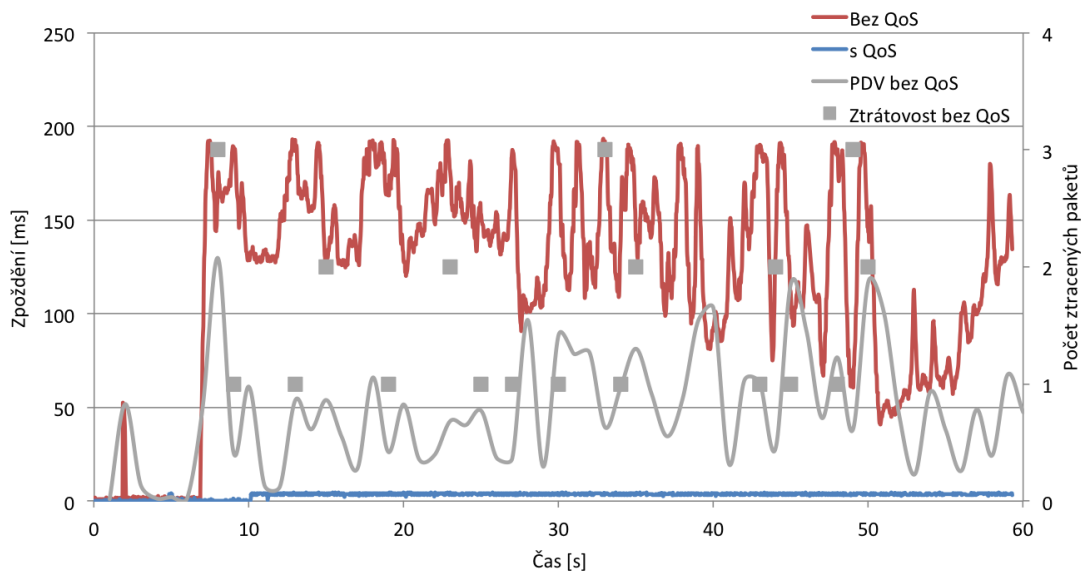
Zdroj: Vlastní práce.

Výsledná kvalita zvukové nahrávky po přenosu (VoIP hovoru) byla zanalyzována i z pohledu QoE pomocí nástroje AQuA (MOS-LQO). Srovnání kvality v podobě množství přeneseného signálu a hodnoty MOS celé nahrávky (celého VoIP hovoru) je naznačeno v grafu na obr. 48. MOS hodnota originální nahrávky má hodnotu 5. Ačkoli díky QoS mechanismům nebyl ztracen ani jeden paket, vlivem kódování došlo k určité degradaci zvuku. Přenesená nahrávka při aktivním QoS má 91,13 % původního signálu a MOS 4,85, což signalizuje zanedbatelné snížení kvality. Naopak bez aktivních QoS mechanismů během přenosu překročila ztrátovost VoIP dat 1 %, to zapříčinilo, že výsledná kvalita přeneseného zvuku dosáhla pouze 77,44 % původní nahrávky, objektivní hodnota MOS dosahuje hodnoty 4,14. Jako hraniční hodnota MOS je považováno hodnocení 3,1 (Doering a kol., 2013).

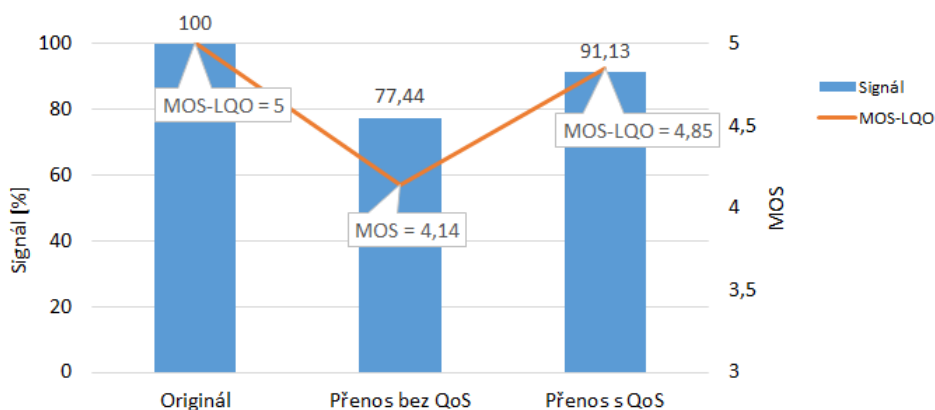
Protože se v průběhu VoIP komunikace se přenosové podmínky měnily, je vhodné tento průběh znázornit. Základním nástrojem je regresní model navržený výše vracející odhadovou hodnotu MOS (MOS-LQE). Tyto hodnoty byly zjišťovány ve vteřinových intervalech. Vstupní data regresního modelu jsou znázorněna v grafu na obr. 47. Šedou barvou je vyznačen vývoj PDV a počty ztracených paketů. Výsledné odhady MOS jsou shrnuty v grafu na obr. 49a, resp. 49b. Grafy naznačují významně větší stabilitu hodnoty MOS-LQE v situaci s aktivním QoS, kdy bylo téměř po celou dobu přenosu dosahováno maximální kvality.

Kromě odhadové metody byl průběh vývoje VoIP komunikace zachycen i pomocí metody AQuA (MOS-LQO). Protože při testování zvukových signálů o délce 1 s metoda nevracela relevantní výsledky, byla celá nahrávka rozdělena na intervaly o délce 10 s, čímž vzniklo 6 dílčích nahrávek. Výsledky jsou zaneseny do grafu na obr. 49. Na první pohled jsou patrné rozdíly v úrovni MOS VoIP komunikace při aktivním a neaktivním QoS mechanismu.

Nasbíranými daty v obr. 49a a 49b lze verifikovat navržený odhadový model, který ve srovnání s objektivními výsledky algoritmu AQuA obecně odhaduje mírně nižší hodnoty, což je pravděpodobně způsobeno regresní křivkou odhadových modelů, která v maximu dosahuje nižších hodnot než 5. Lze říci, že trend vývoje MOS-LQO (vyjadřovaný metodou AQuA) a MOS-LQE (odhadovaný navrženými modely) je srovnatelný, protože obě metody reagují na vývoj kvality VoIP hovoru podobně.



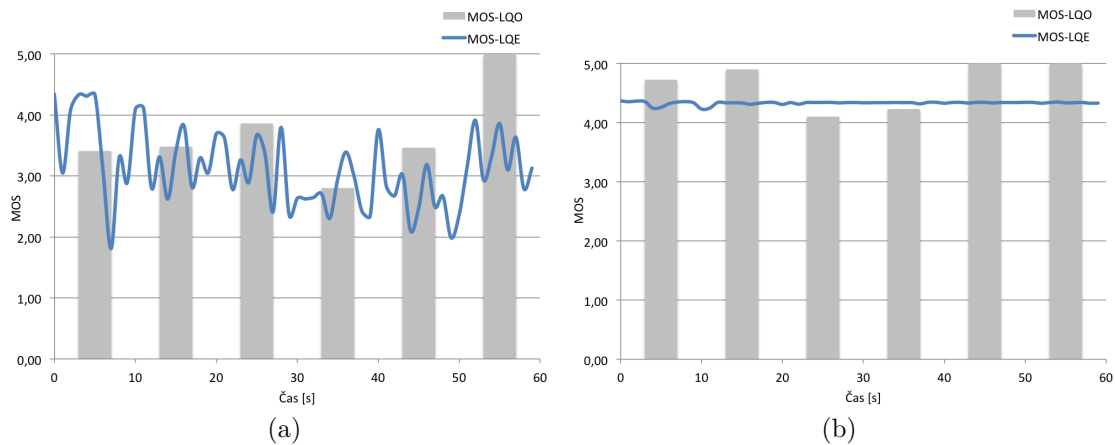
Obr. 47: Zpoždění přenosu zvuku (ztracené pakety byly vypuštěny).
Zdroj: Vlastní práce.



Obr. 48: Kvalita signálu a MOS-LQO zvukové nahrávky.
Zdroj: Vlastní práce.

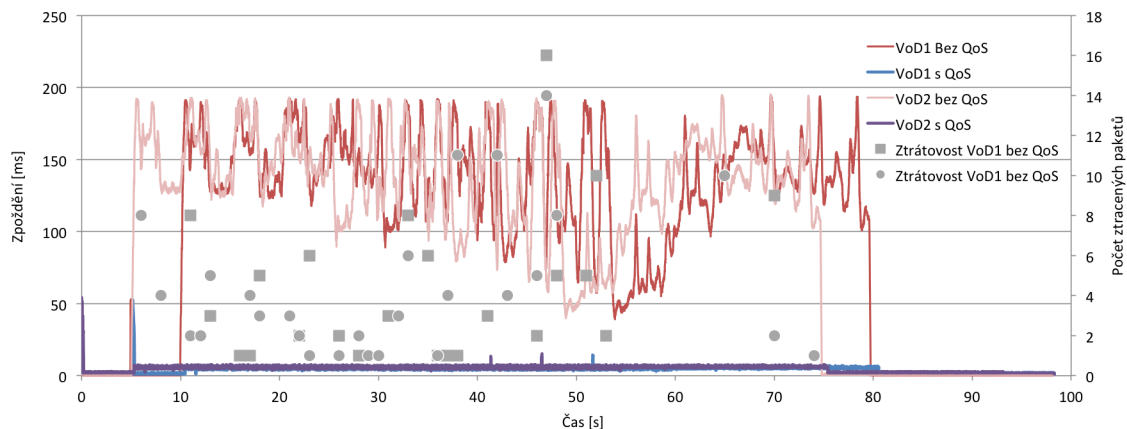
Analýza přenosu VoD

VoD provoz se v popisovaném experimentu skládá ze dvou datových toků se stejným video obsahem o délce 100 s inicializovaných VoD klientem 1 a VoD klientem 2. Je



Obr. 49: Hodnoty MOS-LQE a MOS-LQO v situaci bez aktivního QoS (a) a s aktivním QoS (b). Zdroj: Vlastní práce.

evidentní (obr. 50), že je průměrná hodnota zpoždění bez přítomnosti QoS podstatně vyšší a mírně kolísavá (průměrná směrodatná odchylka $95,25 \text{ ms} \pm 68,74$ v případě VoD klienta 1 and $96,98 \text{ ms} \pm 68,66$ v případě VoD klienta 2). Naopak v situaci s aktivním QoS je pro VoD rezervovaná potřebná šířka pásma 5 Mbps (frontový mechanismus CBWFQ) a dosažené hodnoty zpoždění datových toků VoD jsou výrazně lepší ($4,46 \text{ ms} \pm 3,48$ v případě VoD klienta 1 and $5,11 \text{ ms} \pm 3,7$ v případě VoD klienta 2). V souvislosti s komunikačním profilem inicializuje VoD klient 2 přenos videa 5 sekund po VoD klientu 1. Bez aktivního QoS způsobí TCP toky webového provozu zahlcení WAN spoje a zpoždění VoD toků výrazně vzroste. Jakmile jsou dokončeny všechny TCP toky (přibližně kolem 80. sekundy testu), zpoždění VoD paketů rapidně klesne. Výsledky dosažené při aktivním QoS přináší hodnoty zpoždění VoD paketů výrazně pod hodnotou 150 ms, maximální zpoždění během celého přenosu bylo pouze 54,35 ms (bez QoS 195,04 ms).



Obr. 50: Zpoždění VoD paketů (ztracené pakety vypuštěny). Zdroj: Vlastní práce.

Současně je prostřednictvím aktivního QoS zajištěna nulová ztrátovost paketů, při absenci QoS bylo ztraceno 0,5–0,7 % paketů. Detailní histogram ztracených paketů během přenosu je znázorněn na obr. 50. Opět je patrný vztah mezi TCP toky a zahlcením WAN spoje, které v důsledku zapříčiní častou ztrátu paketů obou VoD toků.

Analýza datových toků

Srovnání výsledků osmi po sobě jdoucích stahování 0,5MB souboru z webového serveru poukazuje na výrazné rozdíly mezi situacemi, kdy byly mechanismy QoS aktivní a kdy ne. Během přítomnosti QoS dosahovala průměrná rychlost stahování téměř dvojnásobných hodnot (306 Kbps) ve srovnání v situaci bez QoS (165,5 Kbps). Variabilita času stahování byla nižší při použití QoS, proto je čas stahování lépe predikovatelný. Je to způsobeno algoritmem WFQ (Weighted Fair Queuing), který přiděluje spravedlivě každému z přenášených datových toků váženou část šířky pásma na úkor agresivního 37MB toku.

Tab. 32: Přijaté a ztracené pakety na vnějším rozhraní směrovače ISP bez QoS (výstupní fronta FIFO).

Test	Přeneseno bez QoS	Zahozeno bez QoS
1	72561	786
2	72509	963
3	72476	990

Tab. 33: Přijaté a ztracené pakety na vnějším rozhraní směrovače ISP s QoS (výstupní frontový mechanismus LLQ + CBWFQ).

Test	Voice	Video	Web (zahozeno RED/Tail drop)
1	2269/0	38054/0	32657/184/23
2	2269/0	38054/0	32628/175/5
3	2269/0	38054/0	32678/209/0

Tab. 32 a tab. 33 shrnují množství ztracených paketů v obou situacích na vnějším rozhraní směrovače ISP ve výstupním směru. Je zřejmé, že celkové množství ztracených paketů je výrazně větší v případě, když není aktivní QoS, tzn. v případě zahlcení jsou pakety odkládány do výchozí FIFO fronty a v případě jejího zaplnění jsou pakety zahazovány (786–990 paketů). Naopak v situaci s QoS (mechanismus CBWFQ + LLQ) bylo zahozeno pouze 180–209 paketů webového provozu.

Zásadní problém není celkový počet ztracených paketů způsobený nedostatečnou velikostí fronty, ale typ paketů, které byly ztraceny. Toky multimediálního provozu (Voice a VoD) jsou citlivé na zvýšené hodnoty zpoždění, jitteru (PDV) a ztrátovosti. Ztrátovost paketů v testech 1–3 (bez QoS) se pohybovala od 1,3 do 1,9 %, což způsobilo časté výpadky zvuku. Bez QoS bylo se všemi pakety zacházeno stejně

(FIFO), tudíž z tohoto pohledu není rozdíl mezi TCP datovým paketem a UDP zvukovým paketem.

Frontový mechanismus CBWFQ a LLQ s rezervací šířky pásma pro každou třídu zajistil, že se během celého přenosu v rámci experimentu neztratil žádný paket ve třídě pro přenos zvuku a VoD (tab. 33). Následně tedy nevznikly žádné výpadky služby na straně koncového uživatele.

Ztráty paketů ve výchozí třídě, tzn. ztrátovost webového provozu, jsou způsobeny buď RED algoritmem nebo funkcí Tail drop (tab. 32). Při použití WFQ a RED algoritmu ve výchozí třídě zabraňuje RED algoritmus vzniku globální synchronizaci TCP paketů. Na ostatních síťových rozhraních všech prvků topologie nebyly zjištěny žádné další ztráty paketů. Lze potvrdit, že fronta LLQ určená pro přenos zvuku zajišťuje přednostní odbavení paketů, tudíž vzniká velmi nízké zpoždění, stejný efekt lze pozorovat i v případě VoD datových toků.

8 Testování statistických hypotéz

Získané výsledky prezentované v předchozích kapitolách je třeba nakonec otestovat pomocí statistických hypotéz, které byly definovány v rámci sekce 1.3. Každé hypotéze je věnovaná vlastní část této kapitoly.

Hypotézy 1–4 vycházejí z datových souborů vytvořených pomocí regresních funkcí popsanych v kapitole 6. Každý takový datový soubor má velikost 441 prvků a jsou reprezentovány grafy na obr. 26a, 27a, 29a, 30a, 32a, 33a. Hypotézy 5 a 6 vyhodnocují datové soubory získané v rámci kapitoly 7 a jsou shrnuty v tab. 27–30. Testování srovnává dva výběrové soubory, musí se tedy jednat o dvouvýběrové testy. Testy normality²² zamítly předpoklad o normálním rozdělení všech datových souborů ve prospěch hypotézy alternativní, tzn. vstupní datové soubory nemají normální rozdělení. Z tohoto důvodu musí být pro testování hypotéz použit neparametrický dvouvýběrový test. Vybrán byl Wilcoxonův dvouvýběrový test, který je neparametrickou analogií parametrického t-testu (Blašková a kol., 2012).

Ověření nulové hypotézy H_0 nad výběry X a Y Wilcoxonovým dvouvýběrovým testem probíhá v těchto krocích:

1. Množiny prvků obou výběrů spojíme a seřadíme do neklesající posloupnosti.
2. Jednotlivým seřazeným hodnotám přiřadíme pořadí.
3. Sečteme hodnoty pořadí všech prvků pro každý výběr zvlášť. Součet pořadí prvků x_1, x_2, \dots, x_m označíme T_1 , součet pořadí prvků y_1, y_2, \dots, y_n T_2 .
4. Vypočteme testovací statistiku U popsanou vztahem (43), přičemž m reprezentuje velikost datového souboru X a n velikost souboru Y , charakteristiku U_1 lze definovat vztahem (44).
5. Na zvolené hladině významnosti α zamítneme testovanou hypotézu H_0 , jestliže hodnota testovacího kritéria $U \in W_\alpha$ ²³. Ve všech případech je zvolena hladina významnosti $\alpha = 0,05$, kritický obor pak lze popsat vztahem (45).

$$U = \frac{U_1 - \frac{1}{2} \times m \times n}{\sqrt{\frac{m \times n}{12} \times (m + n + 1)}} \quad (43)$$

$$U_1 = m \times n + \frac{m \times (m + 1)}{2} - T_1 \quad (44)$$

$$W_\alpha = (-\infty; -1,960) \cup (1,960; \infty) \quad (45)$$

²²Až na výjimku jednoho výběrového souboru hypotézy 4.

²³ W_α označuje kritický obor – oblast zamítnutí hypotézy. Hodnoty W_α uvádí Blašková a kol. (2012, str. 176).

Hypotéza 1

Definice hypotéz pro kodek G.711:

- H_0 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro mužský i ženský hlas.
- H_1 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 se při zhoršení přenosových podmínek nemění stejně pro mužský i ženský hlas.

Výběrový soubor X a Y jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas (obr. 32a), resp. pro ženský hlas (obr. 29a). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-0,0609$. Platí tedy, že $U \notin W_a$. Nulovou hypotézu H_0 nezamítáme na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že mužský i ženský hlas kódovaný pomocí G.711 reaguje na zhoršení přenosových podmínek stejně.*

Definice hypotéz pro kodek G.729:

- H_0 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.729 se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro mužský i ženský hlas.
- H_1 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.729 se při zhoršení přenosových podmínek nemění stejně pro mužský i ženský hlas.

Výběrový soubor X a Y jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas (obr. 33a), resp. pro ženský hlas (obr. 30a). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $0,0744$. Platí tedy, že $U \notin W_a$. Nulovou hypotézu H_0 nezamítáme na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že mužský i ženský hlas kódovaný pomocí G.729 reaguje na zhoršení přenosových podmínek stejně.*

Hypotéza 2

Definice hypotéz pro kodek G.711:

- H_0 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro lidský hlas i hudbu.
- H_1 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.711 se při zhoršení přenosových podmínek nemění stejně pro lidský hlas i hudbu.

Výběrový soubor X a Y jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas (obr. 32a), resp. pro hudební nahrávku (obr. 26a). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-17,2888$. Platí tedy, že $U \in W_a$. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že lidský hlas a hudební nahrávka kódovaná pomocí G.711 nereaguje na zhoršení přenosových podmínek stejně.*

Definice hypotéz pro kodek G.729:

- H_0 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.729 se při zhoršení přenosových podmínek mění stejně pro lidský hlas i hudbu.
- H_1 : Úroveň vnímané kvality VoIP hovoru s kodekem G.729 se při zhoršení přenosových podmínek nemění stejně pro lidský hlas i hudbu.

Výběrový soubor X a Y jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas (obr. 33a), resp. pro hudební nahrávku (obr. 27a). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-22,6553$. Platí tedy, že $U \in W_a$. Nulovou

hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že lidský hlas a hudební nahrávka kódovaná pomocí G.729 nereaguje na zhoršení přenosových podmínek stejně.*

Hypotéza 3

Definice hypotéz:

- H_0 : Kodek G.729 je schopen zajistit stejnou úroveň vnímané kvality jako kodek G.711.
- H_1 : Kodek G.729 není schopen zajistit stejnou úroveň vnímané kvality jako kodek G.711.

Výběrové soubory jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas obou kodeků (obr. 32a a 33a). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-5,7107$. Platí tedy, že $U \in W_a$. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že kodek G.729 nezajistí statisticky stejnou kvalitu VoIP služby (MOS) jako kodek G.711.*

Hypotéza 4

Definice hypotéz pro kodek G.711:

- H_0 : Testovaná pravděpodobnostní rozdělení zpoždění v síti (normální a Pareto) nemají významný vliv na hodnoty MOS VoIP hovorů s kodekem G.711.
- H_1 : Testovaná pravděpodobnostní rozdělení zpoždění v síti (normální a Pareto) mají významný vliv na hodnoty MOS VoIP hovorů s kodekem G.711.

Výběrový soubor X jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas definovaných vztahem (41), tj. graf na obr. 32a, výběrový soubor Y jsou hodnoty získané vztahem (50) popsaným v příloze C. Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-8,6027$. Platí tedy, že $U \in W_a$. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že volba pravděpodobnostního rozdělení má v případě kodeku G.711 významný vliv na výsledné hodnoty MOS.*

Definice hypotéz pro kodek G.729:

- H_0 : Testovaná pravděpodobnostní rozdělení zpoždění v síti (normální a Pareto) nemají významný vliv na hodnoty MOS VoIP hovorů s kodekem G.729.
- H_1 : Testovaná pravděpodobnostní rozdělení zpoždění v síti (normální a Pareto) mají významný vliv na hodnoty MOS VoIP hovorů s kodekem G.729.

Výběrový soubor X jsou odhadované hodnoty MOS pomocí regresního modelu pro mužský hlas definovaných vztahem (42), tj. graf na obr. 33a, výběrový soubor Y jsou hodnoty získané vztahem (51) popsaným v příloze C. Výsledná hodnota testovacího kritéria U je $-4,5891$. Platí tedy, že $U \in W_a$. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že volba pravděpodobnostního rozdělení má v případě kodeku G.729 významný vliv na výsledné hodnoty MOS.*

Hypotéza 5

Definice hypotéz:

- H_0 : Zavádění QoS mechanismů do sítě nemá pozitivní vliv na kvalitu přenášených služeb.
- H_1 : Zavádění QoS mechanismů do sítě má pozitivní vliv na kvalitu přenášených služeb.

Hypotéza je ověřena pro kodek G.711, a to dvojnásobně – jednou pro naměřené hodnoty ztrátovosti (X_1 jsou data z tab. 27, Y_1 jsou data z tab. 29) a podruhé pro hodnoty PDV (X_2 jsou data z tab. 28, Y_2 jsou data z tab. 30). Výsledná hodnota testovacího kritéria U je pro X_1 a Y_1 2,7292, a pro X_2 a Y_2 -12,2169. Platí tedy v obou případech, že $U \in W_a$. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme ve prospěch alternativní hypotézy H_1 na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že QoS má pozitivní vliv na kvalitu přenášených služeb, čímž je prokázána i opodstatnitelnost a účelnost zavádění QoS mechanismů do počítačové sítě.*

Hypotéza 6

Definice hypotéz:

- H_0 : WMM je schopno zajistit stejně kvalitní QoS metriky pro oba kodeky.
- H_1 : WMM není schopno zajistit stejně kvalitní QoS metriky pro oba kodeky.

Také v tomto případě je hypotéza ověřena dvakrát (zvláště pro ztrátovost a PDV). Výběrový soubor X_1 jsou data z horní poloviny tab. 29, Y_1 jsou data z dolní poloviny tabulky, výběrový soubor X_2 jsou data z horní poloviny tab. 30, Y_2 jsou data z dolní poloviny téže tabulky. Výsledná hodnota testovacího kritéria U je pro X_1 a Y_1 -1,51, a pro X_2 a Y_2 -0,7794. Platí tedy v obou případech, že $U \notin W_a$. Nulovou hypotézu H_0 nezamítáme na hladině významnosti α . *Znamená to tedy, že systém WMM je schopen zajistit stejné (srovnatelné) hodnoty QoS metriky pro oba VoIP kodeky.*

9 Diskuse

Verifikace výsledků

Výsledky závěrečné práce bylo nutné verifikovat z pohledu použitelnosti v reálném prostředí. Výstupy měření metodické fáze L1,2-to-QoS jsou verifikovány validačním testem popsáním v sekci 5.3 na straně 75, který naznačuje dobrou shodu mezi výsledky síťového simulátoru a reálným prostředím, což potvrzují i například Ivanov, Herm, Lukas (2007) nebo Garrido, Malumbres, Calafate (2008). Výsledky fáze QoS-to-QoE jsou verifikovány dvěma způsoby. Nejprve se jedná o srovnání přesnosti výsledků hodnot MOS-LQE s hodnotami MOS-LQO získaných algoritmem AQuA na obr. 28, 31 a 34. Dále je fáze QoS-to-QoE verifikována na obr. 49 (str. 105), kde je současně poukázáno na modularitu celého řešení. Verifikaci navíc doplňují i statistické hypotézy, které se shodují s původními předpoklady.

Uplatnitelnost výsledků v praxi

Závěrečná práce se věnuje návrhu metodiky a odvozením metod pro odhad vnímané kvality hlasových služeb. Metodika, blíže popsaná v kapitole 5, je rozdělena do dvou fází, které navzájem pojí pouze QoS metriky (zpoždění, PDV a ztrátovost). Znamená to, že obě fáze metodiky lze používat nezávisle na sobě. Příkladem může být například aplikace výstupů fáze QoS-to-QoE (regresních modelů) v mobilních sítích (např. LTE) místo Wi-Fi sítí.

Jak je již popsáno v kapitole 2.4, odhadové metody (produkující MOS-LQE) dosahují menší přesnosti výsledků ve srovnání s např. objektivními intrusivními metodami (MOS-LQO). Nespornou výhodou odhadových metod je ale rychlost získávání výsledků. Tyto vlastnosti tedy předurčují uplatnitelnost výsledků práce.

Regresní modely, kterými se zabývají části 5.2 a 6, nabízí alternativu ke standardizované odhadové metodě E-model. Ve prospěch E-modelu jistě hovoří hlubší výzkum a tím větší přesnost výsledků. E-model navíc vychází z dat získaných subjektivním měřením. Výstup první fáze metodiky (QoS-to-QoE) ale nabízí alternativu, která vychází z měření získaných objektivní intrusivní metodou AQuA, která dle Sevany (2013) překonává doposud hojně využívanou standardizovanou metodu PESQ.

Simulace bezdrátové sítě (části 5.3 a 7) měly primárně ukázat aplikovatelnost výsledků první fáze metodiky v praxi. Z výsledků simulací sice v současnosti s ohledem na množství dalších vstupních parametrů nejsou vytvořeny regresní modely, ale výsledky simulací mohou být užitečným zdrojem informací pro prvotní úvahy při návrhu bezdrátových sítí.

Výsledky práce by mohly být uplatněny minimálně v následujících oblastech:

- monitorovací nástroje počítačové sítě,
- nástroje pro analýzu a plánování bezdrátových sítí (site survey),
- aplikace v oblasti softwarově definovaných sítí (Software-Defined Networking).

Klady a zápory řešení

Výhodou odhadových metod je ve srovnání s intrusivními nebo se subjektivními přístupy rychlost získávání výsledků. V tomto případě stačí pouze sbírat statistiky ztrátovosti a PDV a ty dosazovat do rovnic popsaných v rámci části 6. Daším přínosem je popis modelů pro různé typy zvukových dat, a to pro hudbu, mužský hlas a ženský hlas. Ačkoliv hypotézy analyzované v kapitole 8 potvrdily, že rozdíly v chování mužského a ženského hlasu v oblasti reakce na snížení kvality přenosových podmínek jsou statisticky nevýznamné (kvalita hovoru obou hlasů klesá podobně, hypotéza 1), mezi přenosem hudby a lidského hlasu už vzniká rozdíl statisticky významný (hypotéza 2), a to v případě obou zvukových kodeků. Přesnost navržených regresních modelů (měřeno po vteřinách) vůči výsledkům získaných metodou AQUA (měřeno za 10 sekundové intervaly) je provedena v rámci části 7.3, obr. 49. Jak je z grafů patrné, navržená odhadová metoda reflektuje trend vývoje MOS spolehlivě.

Dále jsou modely navrženy podle normálního (příloha A, B, C) a Paretova rozdělení pravděpodobnosti zpoždění paketů. Zde lze shledat možnou slabou stránku v tom, že pravděpodobnostní rozdělení zpoždění se může v testované síti lišit od rozdělení použitého v této závěrečné práci, přičemž hypotéza 4 v kapitole 8 potvrdila, že volba pravděpodobnostního rozdělení má na výsledné hodnoty MOS významný vliv. To může mít za následek nižší přesnost odhadované úrovně MOS, což ale u odhadové skupiny metod nemusí být zcela kritické.

Chování bezdrátové sítě bylo testováno prostřednictvím síťového simulátoru OMNeT++. Nespornou výhodou simulátorů je mj. možnost nasimulovat vysoké množství různých podmínek během mnohonásobně menšího času než v případě reálného měření, navíc by s ohledem na okolní vlivy ani nebylo možné otestovat přesné podmínky na jednom reálném místě. Tato výhoda se však z pohledu důvěryhodnosti výsledků stává zásadní slabinou, protože v reálném prostředí ovlivňuje šíření bezdrátového signálů množina okolních vlivů (prostředí, okolní objekty, teplota, apod.), které pravděpodobně nebude možno v simulátoru nikdy přesně napodobit. Bez ohledu na schopnosti dostupných simulátorů může být za nevýhodu prezentovaných výsledků simulací považováno to, že nezohledňují větší počet vstupních proměnných současně. Konfigurace 1 (část 5.4) se orientuje zejména na dosah bezdrátové sítě, konfigurace 2 (část 5.5) naopak na účelnost zavádění mechanismu IEEE 802.11e. Vhodné by bylo v budoucnu testovat výše zmíněné vlivy současně. Navíc současné výstupy práce nezohledňují mezikanálovou interferenci, vyšší úroveň okolního šumu nebo fyzické překážky v přenosové cestě. Pokud je však možné spokojit se určitou mírou nepřesnosti, lze výsledky simulace považovat za důvěryhodný zdroj informací pro rámcové plánování bezdrátové sítě.

Možnosti dalšího vývoje

Možnosti dalšího vývoje plynou z kladů a záporů diskutovaných výše. V rámci fáze QoS-to-QoE by bylo vhodné zaměřit se na další zvukové kodeky, zejména ze skupiny širokopásmových. Dále se nabízí výzkum vlivu QoS metrik na kvalitu řeči v různých

jazycích, v závěrečné práci byla s ohledem na její rozšíření testována angličtina. Navíc by mohl výzkum pokračovat pro různá rozdělení pravděpodobnosti rozložení zpoždění i ztrátovosti paketů.

Ve fázi L1,2-to-QoS se nabízí orientace na další vlivy ovlivňující základní QoS metriky, např. mezikanálová interference, vyšší hodnoty okolního šumu nebo vlivy stavebních materiálů. S ohledem na testované bezdrátové standardy by bylo dobré zaměřit se na (v brzké době) aktuální bezdrátové standardy (n, ac).

Vzhledem k postupnému zavádění IP protokolu verze 6 navíc dalším cílem do budoucna může být otestovat vliv delšího záhlaví na výkonnost bezdrátové sítě.

10 Závěr

Cílem disertační práce bylo přispět k poznání vlivů počítačové sítě, které determinují kvalitu hlasových služeb. Práce zasahuje do oblasti pevných i Wi-Fi sítí, pro hodnocení jejich přenosových podmínek využívá nástrojů z oblasti QoS, přičemž hodnotí vnímanou úroveň kvality hlasové služby (VoIP) pomocí QoE.

Kapitola 2 přináší základní teoretický vhled do výše zmíněných oblastí. Kapitola 3 shrnuje rešerši aktuálních vědeckých publikací zaměřených na problematiku QoS, QoE a Wi-Fi sítí, která posloužila jako výchozí zdroj informací pro kapitoly 4 a 5, jejichž cílem je spolu se sekci 2.4 mj. přispět ke zpřehlednění v současnosti příliš neustálených pojmů používaných v oblasti QoS a QoE.

Navržená metodika popsaná v kapitole 5 definuje rámec pro hodnocení hlasových služeb objektivní odhadovou metodou na základě vybraných QoS metrik (zpoždění, PDV a ztrátovost paketů). V druhé fázi se zabývá tím, jaké fyzické a datalinkové atributy ovlivňují zmíněné QoS metriky. Výhoda této dvoufázové metodiky je snadná aplikace a modularita, díky které lze výsledky obou fází využívat odděleně. Lze tak výsledky prezentovaných simulací bezdrátové sítě ve fázi L1,2-to-QoS aplikovat na vlastní regresní modely popisující vztah mezi QoE a QoS nebo na zvukové kodeky, kterými se tato závěrečná práce nezabývá. Naopak výsledky fáze QoS-to-QoE lze aplikovat na jakoukoli jinou přenosovou technologii.

Kapitola 6 prezentuje výsledky získané dle fáze QoS-to-QoE výše zmíněné metodiky, tj. regresní modely využitelné jako odhadové metody pro vyjádření MOS-LQE VoIP hovoru pro kodeky G.711 a G.729 na základě PDV a ztrátovosti paketů. Modely byly navrženy zvláště pro situace, kdy je v rámci VoIP hovoru přenášena hudební nahrávka, řeč muže a řeč ženy.

V rámci fáze L1,2-to-QoS jsou v kapitole 7 popisovány výsledky dvou různých konfigurací bezdrátové sítě, kde je zkoumán vliv nastavení bezdrátové sítě na QoS metriky. Jejich hodnoty lze dále použít v regresních modelech a odhalit tak vliv nastavení sítě na úroveň MOS. Simulace se zabývají vlivem vzdálenosti hosta od AP a použitého Wi-Fi standardu a dále vlivem standardu 802.11e na úroveň QoE VoIP hovoru.

Sekce 7.3 demonstruje využití regresních modelů pro odhad kvality hlasových služeb v pevné síti, přičemž data této kapitoly pochází z reálných měření. Kapitola 8 se zabývá vyhodnocováním podpůrných statistických hypotéz, které mj. potvrdily opodstatnitelnost zavádění QoS mechanismů. Zejména ale verifikují navrženou metodiku hodnocení počítačové sítě podniku. V závěru práce je pak diskutována uplatnitelnost výsledků, klady a zápory řešení a další možnosti vývoje.

Výsledky disertační práce byly průběžně publikovány v odborných člancích a prezentovány na doktorantských i mezinárodních konferencích. V průběhu studia byla navázána perspektivní spolupráce se společností Sevana. Díky této spolupráci se tak lze podílet na vývoji metod pro hodnocení hlasových služeb, jehož výstupy jsou přímo aplikovány do praxe.

11 Literatura

- ADAMEC, V., STŘELEČEK, L., HAMPEL, D. 2013. *Ekonometrie I: učební text*. 1. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 162 s. ISBN 978-80-7375-703-8.
- AGBOMA, F., LIOTTA, A. 2008. QoE-aware QoS Management. In: *Proceedings of MoMM2008*, s. 111–116. ISBN 978-1-60558-269-6.
- AGRAWAL, D. a kol. 2008. Quantifying the Quality of Service of Streaming Media in Differentiated Services Networks. In: *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, s. 1–5. ISBN 978-953-6114-93-1.
- AGUIAR, E. a kol. 2012. Video quality estimator for wireless mesh networks. In: *20th International Workshop on Quality of Service*, s. 1–9. ISBN 978-1-4673-1296-7.
- AKSU, S., GÜNGÖR, E., E., KURT, G., K. 2011. Effect of Nakagami-m Fading on the QoE Performance of VoIP in Wireless Mesh Networks. In: *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, s. 1–6. ISBN 978-1-4577-0352-2.
- ANDRUSENKO, J., BURBANK, J., WARD, J. *Modeling and Simulation for RF Propagation* [online]. 2009. [cit. 2014-11-21]. Dostupný z: <http://www.en.voipforo.com/codec/codecs-g711-alaw.php>.
- ARAÚJO, J. a kol. 2013. New Strategies for Planning and Performance Evaluation of Wireless Networks: Case Studies Based on the Cross-layer Approach. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 12(1), s. 84–101. ISSN 2179-1074.
- AROSSI, S., BOUABANA-TEBIBEL, T., MELLOUK, A. 2012. Empirical QoE/QoS Correlation Model based on Multiple Parameters for VoD flows. In: *Globecom 2012*, Anaheim: IEEE, s. 1963–1968. ISBN 978-1-4673-0920-2.
- AVALLONE, S., PESCAPE, A. *D-ITG – Distributed Internet Traffic Generator* [online]. 2011 [cit 2013-11-21] z: <http://www.grid.unina.it/software/ITG/codice/flyer2.zip>.
- BAGHAEI, N., HUNT, R. 2004. Review of quality of service performance in wireless LANs and 3G multimedia application services. *Computer communications*, 27(17), s. 1684–1692. ISSN 0140-3664.
- BALOGH, T., MEDVECKY, M. 2011. Performance evaluation of WFQ, WF2Q+ and WRR queue scheduling algorithms. In: *Telecommunications and Signal Processing*, Budapest: IEEE, s. 136–140. ISBN 978-1-4577-1410-8.
- BARATELLA, M. 2013. *Analisi ed Attuazione Della Sicurezza in un Sistema di Telecomunicazione VoIP*. Disertační práce. Janov: Università Degli Studi di Genova.
- BEURAN, R. a kol. 2003. Network Quality of Service Measurement System for Application Requirements Evaluation. In: *International Symposium of Performance Evaluation of Computer and Telecommunication System*, s. 380–387. ISBN 1-56555-269-5.

- BIL, J., NĚMEC, D., POSPIŠ, M. *Gretl – uživatelská příručka* [online]. 2009 [cit 2015-01-14]. Dostupný z: http://www.thunova.cz/wp-content/uploads/CZU/Manual_gretl.pdf.
- BLAŠKOVÁ, V. a kol. 2012. *Statistika I*. 2. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-648-2.
- BOVY, C. J. a kol. 2002. Analysis of End-to-end Delay Measurement in Internet. In: *Proceedings of ACM Conference on Passive and Active Measurement*.
- BUZILA, A. a kol. 2007. Evaluation of QoS parameters for IPTV. *Acta Technica Napocensis, Electronics and Telecommunications*, 48(3), s. 9–14. ISSN 1221-6542.
- CANO, M., CERDAN, F. 2010. Subjective QoE analysis of VoIP applications in a wireless campus environment. *Telecommunication Systems*, 45(1), s. 5–15. ISSN 1018-4864. DOI 10.1007/s11235-010-9348-5.
- CESNET. *Low-Cost Precise QoS Measurement Tool* [online]. 2001 [cit. 2013-11-03]. Dostupné z: <http://archiv.cesnet.cz/doc/techzpravy/2001/07/>.
- CIOARA, J., VALENTINE M. 2012. *CCNA voice 640-461: Official Cert Guide*. London: Pearson Education, 498 s. ISBN 978-158-7204-173.
- CISCO SYSTEMS. *Site Survey Guidelines for WLAN Deployment* [online]. 2013 [cit. 2015-03-13]. Dostupný z: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless/5500-series-wireless-controllers/116057-site-survey-guidelines-wlan-00.html>.
- CISCO SYSTEMS. *Understanding Delay in Packet Voice Networks* [online]. 2006a [cit. 2014-02-13]. Dostupný z: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/5125-delay-details.html>.
- CISCO SYSTEMS. *Understanding Jitter in Packet Voice Networks* [online]. 2006b [cit. 2014-02-13]. Dostupný z: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/18902-jitter-packet-voice.html>.
- CISCO SYSTEMS. *Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption* [online]. 2006c [2013-12-28]. Dostupný z: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html>.
- CISCO SYSTEMS. *Enterprise QoS Solution Reference Network Design Guide* [online]. 2005 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://goo.gl/MNqUbr>.
- CONXX. *How Signal is affected* [online]. 2015 [cit 2015-02-10]. Dostupný z: <http://goo.gl/p6dVev>.
- CRISTOFARO, N. a kol. 2009. QoS evaluation of a voice over IP network with video: A case study. In: *Electrical and Computer Engineering*, s. 288–292. ISSN 0840-7789.
- ČTÚ. 2010. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech*

- 2,4 GHz až 66 GHz [online]. [cit. 2015-03-10] Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf.
- DEKERIS, B., ADOMKUS, T., BUDNIKAS, A. 2006. Analysis of QoS Assurance Using Weighted Fair Queueing (WFQ) Scheduling Discipline with Low Latency Queue (LLQ). In: *Information Technology Interfaces ITI 2006*, s. 507–512. ISBN 953-7138-05-4.
- DELANNOY, P. a kol. 2010. WiMax quality-of-service estimations and measurement. *Computer Communications*, 33, s. 71–77. ISBN 978-1-4244-4066-5.
- DOERING, M. a kol. 2013. About the practicality of using partially overlapping channels in IEEE 802.11 b/g networks. In: *International Conference on Communications*, Budapest: IEEE, s. 5110–5114. ISSN 1550-3607. DOI 10.1109/ICC.2013.6655393.
- DOMICZI, E. 2015 *End-to-end speech and audio quality evaluation of networks using AQUA – competitive alternative for PESQ (P.862)*. Sevana Oy.
- DU H., GUO CH., LIU, Y. 2009. Research on relationship between QoE and QoS based on BP Neural Network. In: *International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, s. 312–315. ISBN 978-1-4244-4900-6.
- DURAN, A., ALONSO, J. 2009. Approach for voice quality and throughput estimation in wireless convergent networks. *Wireless Networks*, 15(2), s. 227–239. ISSN 1022-0038. DOI 10.1007/s11276-007-0037-6.
- EXFO. *VoIP Call Performance Analysis Software* [online]. 2014 [cit. 2014-06-04]. Dostupný z: <http://goo.gl/TuD8DY>.
- FIEDLER, M., HOSSFELD, T., TRAN-GIA, P. 2010. A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service. *Network, IEEE*, 24(2), s. 36–41. ISSN 0890-8044.
- FITZPATRICK, P. 2012. Voice call capacity analysis of long range WiFi as a femto backhaul solution. *Computer Networks*, 56(5), s. 1538–1553. ISSN 1389-1286.
- FLAITHEARTA, P., MELVIN, H., SCHUKAT, M. 2013. Improving VoIP over Synchronized WLANs. In: *International Conference on Digital Technologies*, s. 6–13. ISBN 978-1-4799-0923-0. DOI 10.1109/DT.2013.6566277.
- FLIZIKOWSKI, A., MAJEWSKI, M., PRZYBYSZEWSKI, M. 2010. QoE assessment of VoIP over IEEE 802.16 networks with DaVinci codes using E-model. In: *Future Network and Mobile Summit*, s. 1–8. ISBN 978-1-905824-16-8.
- FLORWICK J. a kol. *Wireless LAN Design Guide for High Density Client Environments in Higher Education* [online]. 2013. [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1250-series/design_guide_c07-693245.pdf.
- GARRIDO, P., MALUMBRES, M., CALAFATE, C. 2008. ns-2 vs. OPNET: a comparative study of the IEEE 802.11e technology on MANET environments. In: *International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*. ISBN: 978-963-9799-20-2.

- GIERŁOWSKI, K. a kol. 2010. Testbed analysis of video and VoIP transmission performance in IEEE 802.11 b/g/n networks. *Telecommunication Systems*, 48(3–4), s. 247–260. ISSN 1018-4864.
- GODANA, B., KOUIJ, R., AHMED, O. 2009. Impact of Advertisements during Channel Zapping on Quality of Experience. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Networking and Services*, s. 249–254. ISBN 978-0-7695-3586-9.
- GONG, Y. a kol. 2009. Model-Based Approach to Measuring Quality of Experience. In: *Proceedings of the First International Conference on Emerging Network Intelligence*, s. 29–32. ISBN 978-0-7695-3835-8.
- HAMAM, A. a kol. 2008. A quality of experience model for haptic user interfaces. In: *Proceedings of the 2008 Ambi-Sys workshop on Haptic user interfaces in ambient media systems*, s. 1–6.
- HAMPEL, D., BLAŠKOVÁ, V., STŘELEČEK, L. 2012. *Ekonometrie II*. 2. přepřac. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 144 s. ISBN 978-80-7375-664-2.
- HAN, J., AHN, S., SUNG, J. 2002. Study of delay patterns of weighted voice traffic of end-to-end users on the VoIP network. In: *International Journal of Network Management*, 12(5), s. 271–280. DOI 10.1002/nem.443.
- HARDY, W., GREENE, D., BOYES, T. 2001. *QoS: measurement and evaluation of telecommunications quality of service*. Chichester: John Wiley, 2001, 230 s. ISBN 04-714-9957-9.
- HASSAN, J. A. a kol. 2012. Managing Quality of Experience for Wireless VOIP Using Noncooperative Games. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(7), s. 1193–1204. ISSN 0733-8716. DOI 10.1109/JSAC.2012.120805.
- HELLBERG, C., GREENE, D., BOYES, T. 2007 *Broadband network architectures: designing and deploying triple-play services*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 557 s. ISBN 978-013-2300-575.
- HENRY, J. 2012 *CCNA Wireless (640-722 IUWNE) quick reference*. Indianapolis, Ind: Cisco Press. ISBN 978-158-7133-152.
- HENS, J., CABALLERO, J. 2008. *Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV*. Chichester, England: Wiley. ISBN 978-047-0753-675.
- HOLZMANN, G. 1991. *Design And Validation Of Computer Protocols* Vyd. 1. New Jersey: Prentice-Hall, 500 s. ISBN 01-353-9925-4.
- HOŠEK, J. a kol. 2013. Mobile Web QoE Study for Smartphones. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2013*. Atlanta, USA: IEEE, s. 1162–1166. ISBN 978-1-4799-2851-4.
- HU, Q. G., WILLIAMSON, C., FAPOJUWO, A. O. 2011. Experimental Evaluation of Asymmetric QoS in IEEE 802.11g Wireless Networks. In: *Proceedings of the 7th ACM symposium on QoS and security for wireless and mobile networks*. New York, 2011, s. 1–8. ISBN 978-1-4503-0899-1.
- HUCABY, D. 2014. *CCNA wireless 640-722 official cert guide*. Indianapolis, Ind: Cisco Press. ISBN 978-158-7205-620.

- CHEN, J., LEE, L., TSENG, Y. 2011. Integrating SIP and IEEE 802.11e to support handoff and multi-grade QoS for VoIP-over-WLAN applications. *Computer Networks*, 55(8), s. 1719–1734. ISSN 1389-1286.
- CHEN, X. a kol. 2012. Network Performance of Smart Mobile Handhelds in a University Campus WiFi Network. In: *Proceedings of the 2012 ACM conference on Internet measurement conference*, s. 315–328. ISBN 978-1-4503-1705-4.
- CHOI, B. Y. a kol. 2004. Analysis of point-to-point packet delay in an operational network. In: *IEEE Computer and Communications Societies*. s. 1797–1807. ISSN 0743-166x.
- CHOLDA, P. a kol. 2009. Quality of resilience as a network reliability characterization tool. *IEEE Network*, 23(2), s. 11–19. ISSN 0890-8044.
- IETF. *RFC 4689: Terminology for Benchmarking Network-layer Traffic Control Mechanisms* [online]. 2006a [cit. 2014-11-03]. Dostupný z: <https://tools.ietf.org/html/rfc4689#section-3.2.5>.
- IETF. *RFC 4594: Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes* [online]. 2006b [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc4594>.
- IETF. *RFC 3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications* [online]. 2003 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: <http://tools.ietf.org/rfcmarkup?rfc=3550>.
- IETF. *RFC 3393: IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)* [online]. 2002 [cit. 2014-11-04]. Dostupný z: <http://tools.ietf.org/html/rfc3393#section-4>.
- IETF. *RFC 2330: Framework for IP Performance Metrics* [online]. 1998a [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc2330>.
- IETF. *RFC2474: Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers* [online]. 1998b [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc2474>.
- IETF. *RFC2475: An Architecture for Differentiated Services* [online]. 1998c [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc2475>.
- IETF. *RFC1812: Requirements for IP Version 4 Routers* [online]. 1995 [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc1812>.
- IETF. *RFC1633: Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview* [online]. 1994 [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc1633>.
- INACIO, A. P. M., CRUZ, R. 2013. Quality user experience in advanced IP video services. *Annals Of Telecommunications-Annales Des Telecommunications*, 68(3–4), s. 119–131. ISSN 0003-4347.
- INÁCIO, A. P. M. 2011. *Quality user experience in advanced IP video services*. Disertační práce. Universidade Técnica de Lisboa, Lisabon.

- IP-LABEL. *Monitor the QoE of all your digital services* [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.ip-label.co.uk/end-user-experience-monitoring-solutions/>.
- ITU-T. *ITU-T P.863: Perceptual objective listening quality assessment* [online]. 2014 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.863-201409-I/en>.
- ITU-T. *G.1011: Reference guide to quality of experience assessment methodologies*. [online]. 2013 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.1011-201305-I/en>.
- ITU-T. *G.107: The E-model: a computational model for use in transmission planning* [online]. 2011a [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107>.
- ITU-T. *G.1000: Communications quality of service: A framework and definitions* [online]. 2011b [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.1000/en>.
- ITU-T. *Y.1540: Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters* [online]. 2011c [cit. 2014-11-21]. Dostupný z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.1540-201103-I!!PDF-E&type=items.
- ITU-T. *E.800: Definitions of terms related to quality of service* [online]. 2009 [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>.
- ITU-T. *P.800.1: Methods for subjective determination of transmission quality* [online]. 2006a [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800.1-200607-I/en>.
- ITU-T. *P.10: Vocabulary for performance and quality of service* [online]. 2006b [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.10-200607-I/en>.
- ITU-T. *ITU-T G.1020. Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks*. [online]. 2006c [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.1020-200607-I/en>.
- ITU-T. *P.563 : Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony applications* [online]. 2004 [cit. 2015-1-12]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.563-200405-I/en>.
- ITU-T. *G.114: One-way transmission time* [online]. 2003 [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-I/en>.
- ITU-T. *ITU-T P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ)* [online]. 2001 [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en>.
- ITU-T. *P.861: Objective quality measurement of telephone- band (300–3400 Hz) speech codecs* [online]. 1998 [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.861-199802-W/en>.

- ITU-T. *P.800 : Methods for subjective determination of transmission quality* [online]. 1996 [cit. 2013-10-19]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I/en>.
- IVANOV, S., HERMS, A., LUKAS, G. 2007. Experimental validation of the ns-2 wireless model using simulation, emulation, and real network. In: *International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, s. 1–12. ISBN 978-3-8007-2980-7.
- IVANOVICH, M. a kol. 2003. Measuring Quality of Service in an Experimental Wireless Data Network. In: *Australian Telecommunications Networks and Applications Conference*, s. 1–5. ISBN 0-646-42229-4.
- JANSA, J. 2011. *Objektivní metody pro měření kvality přenosu řeči v telekomunikačních systémech*. Diplomová práce. ZČU, Plzeň.
- JEAN, C., NETO, A., RIKER, A. 2012. QoE-based Packet Drop Control for 3D-Video Streaming over Wireless Networks. In: *Proceedings of the 7th Latin American Networking Conference*, s. 59–66. ISBN 978-1-4503-1750-4.
- JELASSI, S., RUBINO, G. 2011. A study of artificial speech quality assessors of VoIP calls subject to limited bursty packet losses. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1, s. 1–15. ISSN 1687-5281.
- JHA, S. HASSAN, M. 2012. *Engineering Internet QoS*. Boston: Artech House, 325 s. ISBN 15-805-3341-8.
- JUNG, J., KANG, H., LEE, J. 2013. Performance evaluation of packet aggregation scheme for VoIP service in wireless multi-hop network. *Ad Hoc Networks*, 11(3), s. 1037–1045. ISSN 1570-8705.
- JUNIPER NETWORKS. *Monitor traffic– Technical Documentation*. [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://www.juniper.net/techpubs/en_US/junos11.4/topics/reference/command-summary/monitor-traffic.html.
- JUNIPER NETWORKS. 2012. *JNCIA-Junos– Study Guide–Part 2*. California, USA.
- KAZEMITABAR, H., SAID, A. 2011. Capacity Analysis of G.711 and G.729 Codec for VoIP over 802.11b WLANs. In: *Informatics Engineering and Information Science*, s. 519–529. ISBN 978-3-642-25461-1.
- KHAN, M., A., LU, J., MEHMOOD, M. A. 2011. Utility-Based Analytical Model for Representing User QoE. In: *Proceedings of the 9th IFIP TC 6 international conference on Wired/wireless internet communications*, s. 323–337. ISBN 978-3-642-21559-9.
- KHIRMAN, S HENRIKSEN, P. 2002. Relationship between Quality-of-Service and Quality-of-Experience for Public Internet Service. In: *Passive & Active Measurement Workshop*.
- KHORSANDROO, S., NOOR, R. 2013. A Generic Quantitative Relationship to Assess Interdependency of QoE and QoS. *Transactions On Internet And Information Systems*, 7(2), s. 327–346. ISSN 1976-7277.
- KIM, K., CHOI, Y. 2011. Performance Comparison of Various VoIP Codecs in Wireless Environments. In: *Proceedings of the 5th International Conference on*

- Ubiquitous Information Management and Communication*. ISBN 978-1-4503-0571-6. DOI 10.1145/1968613.1968718.
- KIM, H. J., CHOI, S. G. 2010. A Study on a QoS/QoE Correlation Model for QoE Evaluation on IPTV Service. *ICACT*, 2(1), s. 1377–1382. ISSN 1738-9445.
- KIM, H. J. a kol. 2008. The QoE Evaluation Method through the QoS-QoE Correlation Model. In: *Networked Computing and Advanced Information Management*, s. 719–725. ISBN 978-0-7695-3322-3.
- KLAŠKA, J. 2006. *Metropolitní sítě Wi-Fi – technologie, organizace, správa uživatelů*. Bakalářská práce. VŠE, Praha.
- KLI-YUAN, L. 2006. The Research of Quality of Experience Evaluation Method in Pervasive Computing Environment. In: *Pervasive Computing and Applications*, s. 178–182. ISBN 1-4244-0326-0.
- KLUGE, M. a kol. 2013. Performance and quality of service of data and video movement over a 100 Gbps testbed. *Future Generation Computer Systems*, 29(1), s. 230–240. ISSN 0167-739X.
- KOLAHI, S. a kol. 2009. The Performance of IPv4 and IPv6 using UDP on IEEE 802.11n WLANs with WPA2 Security. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences*, s. 873–876. ISBN 978-1-60558-710-3.
- KONEČNÝ, J. 2015. *Optimalizace univerzitní bezdrátové sítě pro provoz hlasových služeb*. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
- KOTON, J. 2014. *Moderní síťové technologie*. Vysoké učební technické v Brně. 191 s. ISBN 978-80-214-5026-4.
- KOTÚČ, J. 2010. *Zátěžové testy webových aplikací v kontextu průběžné integrace*. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně.
- KRITIKOS, K. a kol. 2013. A Survey on Service Quality Description. *ACM Computing Surveys*, 46(1), s. 1–58. ISSN 0360-0300.
- KUIPERS, F. a kol. 2010. Techniques for Measuring Quality of Experience. In: *Proceedings of the 8th international conference on Wired/Wireless Internet Communications*, s. 216–227. ISBN 978-3-642-13314-5.
- LAGHARI, K., KHAN, I., CRESPI, N. 2012. Quantitative and Qualitative Assessment of QoE for Multimedia Services in Wireless Environment. In: *Proceedings of the 4th Workshop on Mobile Video*, s. 7–12. ISBN 978-1-4503-1166-3.
- LAMBRINOS, L., DJOUVAS, C. 2009. Applying scheduling policies to improve QoE in wireless Voice-over-IP. In: *Performance Computing and Communications Conference*, s. 366–370. ISBN 978-1-4244-5737-3.
- LEE, H. J. a kol. *QoS Parameters to Network Performance Metrics Mapping for SLA Monitoring* [online]. 2002 [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: <http://goo.gl/tkZ2H5>.
- LEITE, B. 2013. *Characterisation of noisy speech channels in 2G and 3G mobile networks*. Diplomová práce. Obuda University, Porto.

- LOZANO-GARZON, C. a kol. 2012. Mobile Network Qoe/QoS Decision Making tool for Performance Optimization in Critical Web Service. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 7(5), s. 892–899. ISSN 1841-9836.
- LUPA.CZ *Kvalita služby ve WLAN: 802.11e*. [online]. 2004 [cit. 2014-09-12]. Dostupný z: <http://www.lupa.cz/clanky/kvalita-sluzby-ve-wlan-802-11e/>.
- MAHDI, A. E., PICOVICI, D. 2007. Advances in voice quality measurement in modern telecommunications. *Digital Signal Processing*, 19(1), s. 79–103. ISSN 1051-2004. DOI 10.1016/j.dsp.2007.11.006.
- MANGOLD, S. a kol. 2003. Analysis of IEEE 802.11e for QoS Support in Wireless LANs. *IEEE Wireless Communications*, 10(6), s. 40–50. ISSN 1536-1284.
- MARTINEZ-YELMO, I., SEOANE, I., GUERRERO, C. 2010. Fair Quality of Experience (QoE) Measurements Related with Networking Technologies. In: *WWIC 2010*, s. 180–191. ISBN 978-3-642-13314-5.
- MIKROTIK. *Manual:HTB* [online]. 2011 [cit. 2014-06-12]. Dostupné z: <http://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:HTB>.
- MKWAWA, I., JAMMEH, E., SUN, L. 2012. Mapping of Received Signal Strength Indicator to QoE in VoIP Applications over WLAN. In: *Quality of Multimedia Experience*, s. 156–157. ISBN 978-1-4673-0724-6.
- MKWAWA, I., SUN, L. 2012. Power-Driven VoIP Quality Adaptation Over WLAN in Mobile Devices. In: *Globecom Workshops*, s. 1276–1281. ISBN 978-1-4673-4942-0.
- MOLNÁR, K. 2008. *Přednášky k předmětu Moderní síťové technologie*. FEKT VUT, Brno.
- MOOR, K. a kol. 2010. Linking Users Subjective QoE Evaluation to Signal Strength in an IEEE 802.11b/g Wireless LAN Environment. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. ISSN 1687-1472.
- MOOR, K. a kol. 2008. Bringing troubled water: quality of experience in a mobile media context. In: *Terena Networking Conference*, s. 79–103.
- MULLINS, B. E. a kol. 2009. Voice and Video Capacity of a Secure IEEE 802.11g Wireless Network. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* s. 26–34.
- NETEM 2009. *Network Emulator* [online]. [cit 2014-11-2]. Dostupný z: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem>.
- NS-3. *ns-3* [online]. 2014 [cit. 2014-09-03]. Dostupný z: <http://www.nsnam.org/>.
- OMNET++. *OMNeT++ Network Simulation Framework* [online]. 2014 [cit. 2014-10-16]. Dostupný z: <http://www.omnetpp.org/>.
- OMNICOR. 2010a. *IP Performance Test Systems. LanTraffic V2 – Enhanced Edition – Software* [online]. [cit. 2013-10-08]. Dostupné z: http://omnicor.com/Xtramus_packet_generators_IP.aspx.

- OMNICOR. *NetDisturb – IP Network Impairment Simulator* 2010b [online]. [cit. 2013-10-08]. Dostupné z: http://omnicor.com/network_impairment_simulator_STD.aspx.
- OMWANDO, V. a kol. 2013. Evaluating Perceptual Video Quality for Mobile Clients in 802.11n WLAN. In: *Proceedings of the 8th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation & characterization*, s. 57–64. ISBN 978-1-4503-2364-2.
- OPTICOM *PEQX Opticom Newsletter* [online]. 2007 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://goo.gl/iQoS40>.
- PARK, K., GREENE, D., BOYES, T. *QoS in packet networks: measurement and evaluation of telecommunications quality of service*. New York: Springer Science Business Media, 2005, 243 s. ISBN 03-872-3389-0.
- PARTILA, P. a kol. 2013. Jitter Buffer Loss Estimate for Effective Equipment Impairment Factor. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION*, 7(3), s. 241–248. ISSN 1998-0159.
- PARTILA, P., KOHUT, M. a kol. 2013. A Methodology for Measuring Voice Quality Using PESQ and Interactive Voice Response in the GSM Channel Designed by OpenBTS. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11(5), s. 380–387. ISSN 1336-1376.
- PENG, Q. a kol. 2009. A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems. *Journal of the Franklin Institute*, 346(4), s. 349–365. ISSN 1570-8705.
- PROKOLLA, J. *Qosmet — A solution for measuring Quality of Service* [online]. 2012 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.cnl.fi/qosmet.pdf>.
- PROKOLLA, J. *Converging Networks Laboratory At VTT. Enabling passive QoS measurements*. [online]. 2011. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.cnl.fi/qosmet.html>.
- QIU, D. 2008. On the QoS of IPTV and its Effects on Home Networks. In: *Consumer Communications and Networking Conference*, s. 834–838. ISBN 978-1-4244-1456-7.
- RAAKE, A. 2006. *Speech quality of VoIP: assessment and prediction*. Hoboken, NJ: Wiley, 309 s. ISBN 978-047-0030-608.
- RAMO A. 2010. Voice Quality Evaluation Of Various Codecs. In: *Acoustics Speech and Signal Processing*, s. 4662–4665. ISSN 1520-6149.
- RAPPAPORT, T. S. 2001. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. vyd. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA. ISBN 978-0130422323.
- RASHED, M., KABIR, M. 2008. A Comparative Study Of Different Queuing techniques in VoIP, Video Conferencing and file Transfer. *Daffodil International University Journal of Science and Technology*, 5(1), s. 37–47, ISSN 1818-5878.
- REICHEL, P., TUFFIN, B., SCHATZ, R. 2011. Logarithmic laws in service quality perception: where microeconomics meets psychophysics and quality of

- experience. *Telecommunication Systems*, 52(2), s. 587–600. ISSN 1018-4864. DOI 10.1007/s11235-011-9503-7.
- REICHEL, P. 2010. From charging for Quality of Service to charging for Quality of Experience. *Annals of Telecommunications*, 65(3–4), s. 189–199. ISSN 0003-4347.
- RIVERBED. *Riverbed Modeler* [online]. 2014 [cit. 2014-09-03]. Dostupný z: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/network-simulation.html>.
- ROBALO, D., VELEZ, F. J. 2011. Model for the Correlation between Quality of Service and Experience in Cognitive Radio Networks. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*. ISBN 978-1-4503-0912-7. DOI 10.1145/2093256.2093319.
- RUBINO, G., TIRILLY, P., VARELA, M. 2006. Evaluating Users' Satisfaction in Packet Networks Using Random Neural Networks. In: *16th International Conference in Artificial Neural Networks*, s. 303-312. ISBN 978-3-540-38625-4.
- RUGGED TOOLING. *RUDE – Rugged Deviation Generator* [online]. 2012 [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://www.ruggedtooling.com/tools.htm#RUDE>.
- RÝZNER, Z. 2011. *Využití teorie hromadné obsluhy při návrhu a optimalizaci paketových sítí*. Diplomová práce. VUT v Brně..
- SACKL, A., ZWICKL, P., REICHL, P. 2012. From Quality of Experience to Willingness to Pay for Interconnection Service Quality. In: *Networking 2012 Workshops*, s. 89–96. ISBN 978-3-642-30038-7.
- SALMERÓN, A., MERINO, P. 2013. On-the-fly VoIP Call Quality Evaluation with Improved E-model. In: *Proceedings of the 8th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks*, s. 145–152. ISBN 978-1-4503-2371-0.
- SANCHEZ-IBORRA, R. A KOL. 2013a. On the effect of the physical layer on VoIP Quality of user Experience in wireless networks. In: *International Conference in Communications*, s. 1036–1040. ISSN 1550-3607.
- SANCHEZ-IBORRA, R. A KOL. 2013b. Performance evaluation of QoE in VoIP traffic under fading channels. In: *Computer and Information Technology*, s. 1–6. ISBN 978-1-4799-0460-0.
- SENEVIRATNE, S. a kol. 2013. Characterizing WiFi Connection and Its Impact on Mobile Users: Practical Insights. In: *Proceedings of the 8th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation & characterization*, s. 81–88. ISBN 978-1-4503-2364-2.
- SEPPÄNEN, J., VARELA, M., SGORA, A. 2013. An autonomous QoE-driven network management framework. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25(3), s. 565–577. ISSN 1047-3203.
- SERRAL-GARCIA, R. a kol. 2010. Quality of Experience Enforcement in Wireless Networks. In: *Proceedings of Wired/Wireless Internet Communications*, s. 180–191. ISBN 978-3-642-13314-5.

- SEVANA OY. *AQuA – Audio Quality Analyzer* [online]. 2015a [cit. 2015-03-14] Dostupný z: <http://sevana.fi/aqua.php>.
- SEVANA OY. *PVQA – Passive Voice Quality Analysis* [online]. 2015b [cit. 2015-03-14] Dostupný z: <http://sevana.fi/passive-voice-quality-analysis.php>.
- SEVANA OY. *VQM Asterisk. Powered Asterisk Voice Quality Monitoring Solution* [online]. 2014 [cit. 2014-09-12]. Dostupný z: <http://sevana.fi/aqua-powered-asterisk-voice-quality-monitoring-solution.php>.
- SEVANA OY. *PESQ, POLQA, AQuA* [online]. 2013 [cit. 2014-09-12] Dostupný z: <http://blog.sevana.fi/pesq-polqa-aqua/>.
- SHETTY, N., CHOUDHURY, S., GIBSON, J. D. 2006. Voice Capacity under Quality Constraints for IEEE 802.11a based WLANs. In: *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, s. 1345–1350. ISBN 1-59593-306-9.
- SCHATZ, R. a kol. 2013. From Packets to People: Quality of Experience as a New Measurement Challenge. *Data Traffic Monitoring and Analysis*, 7754, s. 219–263. ISSN 0302-9743.
- SIDDIQUE, A. R., KAMRUZZAMAN, J., HOSSAIN, J. 2014. An Analytical Approach for Voice Capacity Estimation Over WiFi Network Using ITU-T E-Model. *IEEE Transactions on Multimedia*, 16(2), s. 360–372. ISSN 1520-9210.
- SILVA, A. a kol. 2008. Quality assessment of interactive voice applications. *Computer Networks*, 52(6), s. 1179–1192. ISSN 1389-1286.
- SINGH, H. P. a kol. 2014. VoIP: State of art for global connectivity-A critical review. *Journal of Network and Computer Applications*, 37, s. 365–379. ISSN 1084-8045.
- SKIPALA, O. 2011. *Bezdrátové sítě v zarušených prostředích*. Diplomová práce. Fakulta informatiky. Masarykova univerzita v Brně.
- SKORIN-KAPOV, L., VARELA, M. 2012. A multi-dimensional view of QoE: the ARCU model. In: *Proceedings of the 35th International Convention*, s. 662–666. ISBN 978-1-4673-2577-6.
- SLACK, N., JOHNSTON R., CHAMBERS, S. 2004. *Operations management*. 4. ed. Harlow: Financial Times Prentice Hall, 297 s. ISBN 02-736-7906-6.
- SOLARWINDS *VoIP and Network Quality Manager* [online]. 2014. [cit. 2013-12-14]. Dostupný z: <http://www.solarwinds.com/voip-network-quality-manager.aspx>.
- SOLDANI, D., LI, M., CUNY, R. 2006. *QoS and QoE management in UMTS cellular system*. Wiley, New York. ISBN 978-0-470-01639-8.
- SONG, H., a kol. 2011. Q-score: Proactive Service Quality Assessment in a Large IPTV System. In: *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, s. 195–208. ISBN: 978-1-4503-1013-0.
- STANKIEWICZ, R., CHOLDA, P., JAJSZCZYK, A. 2011. QoX: What is it really?. *IEEE Communications Magazine*, 49(4), s. 148–158. ISSN 0163-6804.

- STANKIEWICZ, R., JAJSZCZYK, A. 2011. A survey of QoE assurance in converged networks. *Computer Networks*, 55(7), s. 1459–1473. ISSN 1389-1286.
- STAELENS N. a kol. 2012. Determining customer's willingness to pay during in-lab and real-life video quality evaluation. In: *Proceedings of the sixth international workshop on video processing and quality metrics for consumer electronics*.
- STARTRINITY *StarTrinity SIP Tester* [online]. 2014 [cit. 2014-02-19]. Dostupný z: <http://startrinity.com/VoIP/SipTester/SipTester.aspx>.
- SUN L. MKWAWA, I.-H., JAMMEH, E., IFEACHOR, E. 2013. *Guide to Voice and Video over IP*. London: Springer-Verlag. ISBN 978-1-4471-4904-0.
- SÝKORA, T. *Zátěžové testy podnikového informačního systému*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně.
- ŠVEC, P. 2011. *Návrh a implementácia IPv6 siete v akademickéj sfére*. Dizertační práce. Ostravská univerzita v Ostravě.
- TAPOLCAI, J. a kol. 2006. Joint Quantification of Resilience and Quality of Service. In: *IEEE International Conference on Communication*, s. 477–482. ISBN 1-4244-0355-3.
- TAPOLCAI, J. a kol. 2005. Quality of Resilience (QoR): NOBEL Approach to the Multi-Service Resilience Characterization. In: *2nd International Conference on Broadband Networks*, s. 1328–1337. ISBN 0-7803-9276-0.
- TORRES, D. a kol. 2011. On the impact of adaptive RED in IP networks transporting H.264/MPEG-4 AVC video streams. *Computers & Electrical Engineering*, 38(1), s. 128–139. ISSN 0045-7906.
- TSOMPANIDIS, I., FORTETSANAKIS, G., PAPADOPOULI, M. 2010. Measuring the perceived quality of VoIP under various wireless network conditions. In: *Wired/Wireless Internet Communications*, s. 339–350. ISBN 978-3-642-13314-5.
- VARELA, M. 2005. *Evaluation Pseudo-subjective de la Qualited'un Flux Multime dia et ses Applications au Controle*. Disertační práce. Universidade Técnica de Lisboa.
- VAVŘÍK, J. 2010. *Zátěžové testy webových aplikací*. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně.
- VILLACÍS, D., ACOSTA, F. R., CUEVA, R. 2013. Performance Analysis of VoIP Services over WiFi-based systems. In: *Communications and Computing*, s. 1–6. ISBN 978-1-4799-0366-5.
- VOIPTESTER. *VoIP Tester* [online]. 2011 [cit. 2013-10-06]. Dostupné z: <https://code.google.com/p/voiptester/>.
- VOIPTHINK. *G.711 codec process* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupný z: <http://www.en.voipforo.com/codec/codecs-g711-alaw.php>.
- VOŽŇÁK, M. 2011. E-model modification for case of cascade codecs arrangement. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*, 5(5), s. 1439–1447. ISSN 1998-0140.

- WALLACE, K. 2011. *Implementing Cisco Unified Communications Voice over IP and QoS: Foundation Learning Guide*. Cisco Systems, Inc. Indianapolis: Cisco Press. ISBN 978-1-58720-419-7.
- WANG, Q. a kol. 2015. A thorough analysis of the performance of delay distribution models for IEEE 802.11 DCF. *Ad Hoc Networks*, 24(B), s. 21–33. ISSN 1570-8705.
- WIJNANTS, M. a kol. 2009. Investigating the Relationship Between QoS and QoE in a Mixed Desktop/Handheld Gaming Setting. In: *Proceedings of CONEXT*, s. 29–30. ISBN 978-1-60558-636-6.
- YAMORI, K., TANAKA, Y. 2004. Relation between Willingness to Pay and Guaranteed Minimum Bandwidth in Multiple-Priority Service. In: *10th Asia-Pacific Conference on Communications and 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications*, s. 113–117. ISBN 0-7803-8601-9.
- YUAN, Z., MUNTEAN, G. 2013. iVoIP: an intelligent bandwidth management scheme for VoIP in WLANs. *Wireless Networks*, 20(3), s. 457–473. ISSN 1022-0038.
- ZHANG, J., ANSARI, N. 2011. On Assuring End-to-End QoE in Next Generation Networks: Challenges and a Possible Solution. *Communications Magazine*, 49(7), s. 185–191. ISSN 0163-6804.

Přílohy

A Regresní model MOS hudební nahrávky (normální rozdělení)

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,186908 + 0,00360137 \times PDV + 0,0137091 \times L} \quad (46)$$

$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,366380 + 0,00564845 \times PDV + 0,00278494 \times L} \quad (47)$$

Tab. 34: Podrobnosti lineární regrese hudební nahrávky.

Kodek	PC	MOS_M/MOS_E	σ regrese	σMOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711		0,8225	0,1296	0,2571	0,7457	21,73	7,36	29,09
G.729		0,7142	0,1088	0,2028	0,7125	12,92	5,18	18,11

B Regresní model MOS ženského hlasu (normální rozdělení)

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,192146 + 0,00163852 \times PDV + 0,00139739 \times L} \quad (48)$$

$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,189976 + 0,00202749 \times PDV + 0,00272875 \times L} \quad (49)$$

Tab. 35: Podrobnosti lineární regrese nahrávky ženského hlasu.

Kodek	PC MOS_M/MOS_E	σ regrese	σMOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711	0,9692	0,0218	0,1017	0,9541	4,3	0,20	4,55
G.729	0,9565	0,0397	0,1294	0,9061	6,67	0,69	7,36

C Regresní model MOS mužského hlasu (normální rozdělení)

$$MOS_E^{G.711} = \frac{1}{0,184972 + 0,00172487 \times PDV + 0,00310377 \times L} \quad (50)$$

$$MOS_E^{G.729} = \frac{1}{0,183262 + 0,00172503 \times PDV + 0,00326734 \times L} \quad (51)$$

Tab. 36: Podrobnosti lineární regrese nahrávky mužského hlasu.

Kodek	PC MOS_M/MOS_E	σ regrese	σMOS_E	R^2	SSR	SSE	SST
G.711	0,9692	0,0293	0,1090	0,9247	4,84	0,37	5,21
G.729	0,9586	0,0291	0,1090	0,9283	4,85	0,37	5,22

D NED soubor konfigurace 1

```
package konfigurace1;

import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.inet.WirelessHost;
import inet.node.wireless.AccessPoint;
import inet.physicallayer.ieee80211.Ieee80211RadioMedium;
import inet.node.inet.StandardHost;
import ned.DatarateChannel;
import inet.environment.PhysicalEnvironment;

network konf1
{
    parameters:
        @display("bgb=1500,400");
        bool useEthernetSwitching = default(true);
        bool useRouting = default(false);
    submodules:
        radioMedium: Ieee80211RadioMedium {
            @display("p=53,32");
        }
        environment: PhysicalEnvironment {
            @display("p=53,100");
        }
        hostA: WirelessHost {
            @display("p=507,100");
        }
        hostB: StandardHost {
            @display("p=275,100");
        }
        accessPoint: AccessPoint {
            @display("p=383,99");
        }
        configurator: IPv4NetworkConfigurator {
            @display("p=53,150");
        }
    connections:
        accessPoint.ethg++ <--> DatarateChannel { datarate = 100Mbps; } <-->
        hostB.ethg++ if useEthernetSwitching;
}
```

E INI soubor konfigurace 1

```
[Config VoIP]

# KONFIGURACE VOIP

*.hostA*.numUdpApps = 2
*.hostB*.numUdpApps = 2

*.host*.udpApp[0].typename = "SimpleVoIPSender"
*.host*.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].destAddress = "hostB"
*.hostB.udpApp[0].destAddress = "hostA"
*.host*.udpApp[1].typename = "SimpleVoIPReceiver"
*.host*.udpApp[1].localPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].startTime = 1s
*.hostA.udpApp[0].stopTime = 11s
*.hostB.udpApp[0].startTime = 1s
*.hostB.udpApp[0].stopTime = 11s
**.udpApp[*].talkPacketSize = 180B
**.udpApp[*].packetizationInterval = 20ms
**.udpApp[*].silenceDuration = 0s
**.udpApp[*].talkspurtDuration = 1s

[General]
network = konf1

sim-time-limit = 12s
tkenv-plugin-path = ../../../../etc/plugins

*.useEthernetSwitching = true
*.useRouting = false
*.configurator.config = xmldoc("network_switched_phy_env.xml")
*.configurator.assignDisjunctSubnetAddresses = false

# FYZICKE PROSTREDI

**.temperature = 298K #25 stupnu Celsia
**.obstacleLossType = "TracingObstacleLoss"
**.config = xmldoc("indoor.xml")
**.spaceMinX = 0m
**.spaceMinY = 0m
**.spaceMinZ = -1000m
**.spaceMaxX = 1000m
**.spaceMaxY = 500m
**.spaceMaxZ = 1000m

**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMaxX = 1500m
**.constraintAreaMaxY = 300m
```

```
# POLOHA UZLU

**.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.mobilityType = "StationaryMobility"

*.accessPoint.mobility.initialX = 100m
*.accessPoint.mobility.initialY = 100m
*.accessPoint.mobility.initialZ = 0m

*.host*.mobility.initialY = 100m
*.host*.mobility.initialZ = 0m

*.hostA.mobility.initialX =
${met=101m,110m,125m,150m,175m,200m,250m,300m,400m,500m,600m}
*.hostB.mobility.initialX = 90m

**host*.mobility.initFromDisplayString = false
**accessPoint.mobility.initFromDisplayString = false

# KONFIGURACE WIFI

*.accessPoint.wlan[0].mac.address = "001111111111"

*.hostA*.wlan[0].mgmt.accessPointAddress = "001111111111"

*.host*.*.mgmtType = "Ieee80211MgmtSTASimplified"
*.accessPoint*.*.mgmtType = "Ieee80211MgmtAPSimplified"

*.radioMedium.pathLossType = "RayleighFading"
**.carrierFrequency = 2.4GHz
**.opMode = "g"
*.radioMedium.propagationType = "ConstantSpeedPropagation"
*.radioMedium.analogModelType = "ScalarAnalogModel"
*.radioMedium.backgroundNoiseType = "IsotropicScalarBackgroundNoise"
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -90dBm
*.radioMedium.minInterferencePower = -90dBm
*.radioMedium.minReceptionPower = -85dBm
*.radioMedium.pathLoss.alpha = 2
**.wlan[*].mac.address = "auto"
**.wlan[*].mac.retryLimit = 7
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.power = 32mW
*.accessPoint.wlan[*].radio.transmitter.power =
${pw=1mW,3mW,5mW,10mW,50mW,100mW}
**.wlan[*].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
**.wlan[*].radio.receiver.snirThreshold = 4dB
**.wlan*.bitrate = ${dr=11Mbps,54Mbps}
```


F NED soubor konfigurace 2

```
package konfigurace2;

import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.inet.WirelessHost;
import inet.node.wireless.AccessPoint;
import inet.physicallayer.ieee80211.Ieee80211RadioMedium;
import inet.node.inet.StandardHost;
import ned.DatarateChannel;

network konf2
{
    parameters:
        @display("bgb=300,200");
        bool useEthernetSwitching = default(true);
        bool useRouting = default(false);
        int numApp;
        int numKli;
    submodules:
        radioMedium: Ieee80211RadioMedium {
            @display("p=256,119");
        }
        hostA: WirelessHost {
            @display("p=90,50");
        }
        hostB: StandardHost {
            @display("p=150,50");
        }
        klient[numKli]: WirelessHost {
            @display("p=95,41");
        }
        server: StandardHost {
            @display("p=150,100");
        }
        accessPoint: AccessPoint {
            @display("p=100,50");
        }
        configurator: IPv4NetworkConfigurator {
            parameters:
                @display("p=256,173");
        }
    connections:
        accessPoint.ethg++ <--> DatarateChannel { datarate = 100Mbps; } <-->
        hostB.ethg++ if useEthernetSwitching;
        accessPoint.ethg++ <--> DatarateChannel { datarate = 100Mbps; } <-->
        server.ethg++ if useEthernetSwitching;
}
```

G INI soubor konfigurace 2

```
[Config VoIP]
# KONFIGURACE VOIP

*.hostA.numUdpApps = 2
*.hostB.numUdpApps = 2
*.host*.udpApp[0].typename = "SimpleVoIPSender"
*.host*.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].destAddress = "hostB"
*.hostB.udpApp[0].destAddress = "hostA"
*.host*.udpApp[1].typename = "SimpleVoIPReceiver"
*.host*.udpApp[1].localPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].startTime = 1s
*.hostA.udpApp[0].stopTime = 11s
*.hostB.udpApp[0].startTime = 1s
*.hostB.udpApp[0].stopTime = 11s
**.udpApp[*].talkPacketSize = 180B
**.udpApp[*].packetizationInterval = 20ms
**.udpApp[*].silenceDuration = 0s
**.udpApp[*].talkspurtDuration = 1s

# RUSIVY PROVOZ

*.server.numTcpApps = 1
*.server.tcpApp[0].typename = "TCPEchoApp"
*.server.tcpApp[0].localPort = 80
*.klient[*].numTcpApps = numApp
*.klient[*].tcpApp[*].typename = "TCPBasicClientApp"
*.klient[*].tcpApp[*].connectAddress = "server"
*.klient[*].tcpApp[*].connectPort = 80
*.klient[*].tcpApp[*].numRequestsPerSession = 5
*.klient[*].tcpApp[*].requestLength = 500B
*.klient[*].tcpApp[*].thinkTime = 0.2s # cas mezi requesty v kazde session
*.klient[*].tcpApp[*].idleInterval = 1s # cas mezi session
*.klient[*].tcpApp[*].startTime = normal(1.5s, 0.5s)

[General]
network = konf2

sim-time-limit = 12s
tkenv-plugin-path = ../../../../etc/plugins

*.useEthernetSwitching = true
*.useRouting = false
*.configurator.config = xmldoc("network_switched.xml")
*.configurator.assignDisjunctSubnetAddresses = false

# POCET APLIKACI

*.numApp = ${nA=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}
*.numKli = ${nK=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}
```

```
# MOBILITA ZARIYENI

**.mobility.typename = "StationaryMobility"
**.mobilityType = "StationaryMobility"

# KONFIGURACE WIFI

*.host**.mgmtType = "Ieee80211MgmtSTASimplified"
*.klient[**].mgmtType = "Ieee80211MgmtSTASimplified"
*.accessPoint**.mgmtType = "Ieee80211MgmtAPSimplified"

*.accessPoint.wlan[0].mac.address = "001111111111"

*.hostA.wlan[0].mgmt.accessPointAddress = "001111111111"
*.klient[**].wlan[0].mgmt.accessPointAddress = "001111111111"

*.radioMedium.pathLossType = "RayleighFading"
*.radioMedium.carrierFrequency = 2.4GHz
*.radioMedium.propagationType = "ConstantSpeedPropagation"
*.radioMedium.analogModelType = "ScalarAnalogModel"
*.radioMedium.backgroundNoiseType = "IsotropicScalarBackgroundNoise"
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -90dBm
*.radioMedium.minInterferencePower = -90dBm
*.radioMedium.minReceptionPower = -85dBm
*.radioMedium.pathLoss.alpha = 2
**.wlan[**].mac.address = "auto"
**.wlan[**].mac.retryLimit = 7
**.radio.transmitter.power = 5mW
**.wlan[**].radio.receiver.sensitivity = -85dBm
**.wlan[**].radio.receiver.snirThreshold = 4dB
**.wlan*.bitrate = 54Mbps

# IEEE 802.11e

**.**.EDCA = ${edca=true}
**.**.classifier = "Ieee80211eClassifier"
*.klient[**].defaultAC = 0
*.hostA.defaultAC = 3
**.cwMinData = 15
**.cwMaxData = 1023
```