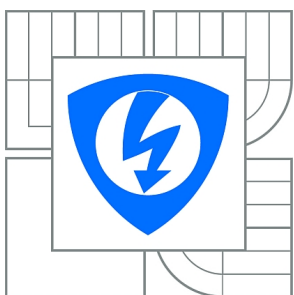


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA ZÁVISLOSTÍ KOMUNIKAČNÍCH SLUŽEB NA ZPOŽDĚNÍ A OPTIMALIZACE QOS

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF COMMUNICATIONS SERVICES TO THE DELAY AND
QOS OPTIMIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN SCHÖN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ HOŠEK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Martin Schön

ID: 119601

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Analýza závislostí komunikačních služeb na zpoždění a optimalizace QoS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně popište parametry a využitelnost zajištění kvality služeb (QoS) v bezdrátových sítích pro standardy IEEE 802.11 a/b/g/n. Analyzujte provoz na počítačové síti v závislosti na přenosu hlasu a videa. Zaměřte se na protokoly zajišťující přenos dat v reálném čase. Seznamte se simulačním prostředím Opnet Modeler. V tomto prostředí vytvořte bezdrátovou lokální síť, ve které nakonfigurujete mechanismy pro zajištění kvality služeb daných standardů. Vytvořte simulaci porovnávající technologie 802.11a/b/g/n z hlediska přenosu dat citlivých na zpoždění. Navrhněte opatření pro zajištění QoS na dané síti a porovnejte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Bigelow, S., J.: Mistrovství v počítačových sítích. Nakladatelství CPRESS 2004. ISBN 80-251-0178-9.

[2] Matas, J.: Linux jako brána do sítě Internet. [Bakalářská práce]. Ústav Telekomunikací FEKT VUT v Brně. 2007.

[3] BARKEN, Lee. Wi-Fi : jak zabezpečit bezdrátovou síť. 1. vyd. Brno : Computer Press, 2004. 174 s. ISBN 80-251-0346-3.

[4] ZANDL, Patrick. Bezdrátové sítě WiFi. 2003. 204 s. ISBN 80-722-6632.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá bezdrátovými Wi-Fi sítěmi 802.11a/b/g/n. V první části se práce zabývá vysvětlením principů sítí a přístupu k médiu. Dále jsou rozebrány standardy IEEE 802.11 a obecné parametry QoS a její aplikace v bezdrátových sítích dle standardu 802.11e. V druhé části práce se použité znalosti ověřují prvně v simulačním programu Opnet, poté vliv zpoždění, jitteru a ztrátovosti na VoIP hovor. V poslední části práce byla navržena síť, kde bylo streamováno video v různých kvalitách a vliv ostatního toku na plynulost tohoto videa bez podpory QoS a s podporou.

KLÍČOVÁ SLOVA

IEEE 802.11, QoS, VoIP, Opnet modeler, WMM, MOS, R-Faktor, zpoždění, jitter, propustnost

ABSTRACT

This thesis discusses wireless network standards 802.11a/b/g/n. First part explains basic principles of networks and media access. Next the standard IEEE 802.11, general QoS parameters and their application in wireless networks, according to standard 802.11e are analyzed. Second part of the thesis verifies the acquired knowledge in simulating program Opnet - effects of the delay, jitter and packet loss on VoIP call are tested. In the last part of the thesis a network for video streaming has been designed. The video was streamed in different qualities and the influence of other network traffic (with and without the support of QoS) on the video streaming was tested.

KEYWORDS

IEEE 802.11, QoS, VoIP, Opnet modeler, WMM, MOS, R-Factor, delay, jitter, throughput

SCHÖN, Martin *Analýza závislostí komunikačních služeb na zpoždění a optimalizace QoS*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 55 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza závislostí komunikačních služeb na zpoždění a optimalizace QoS“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)



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

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	11
1 Principy v sítích 802.11	12
1.1 Typy sítí	12
1.1.1 Root	12
1.1.2 Bridge	12
1.1.3 Repeater	12
1.2 Přístup k médiu	13
1.3 Šíření signálu po fyzické vrstvě	14
1.3.1 FHSS (frequency hopping spread spectrum)	14
1.3.2 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	14
2 Standardy IEEE 802.11	15
2.1 IEEE 802.11b	15
2.2 IEEE 802.11a	15
2.3 IEEE 802.11g	15
2.4 IEEE 802.11n	16
3 OSI Referenční model	17
3.1 Transportní vrstva	17
3.1.1 TCP	18
3.1.2 UDP	18
3.2 Aplikační vrstva	18
3.2.1 RTP	18
3.2.2 SIP	19
4 Parametry QoS	20
4.1 Zpoždění	20
4.2 Jitter	20
4.3 Šířka pásma	20
4.4 Ztrátovost	20
4.5 MOS	21
4.6 R-faktor	22
5 QoS ve WiFi sítích IEEE 802.11e	23
5.1 DCF	23
5.2 PCF	23
5.3 EDCF	23

5.4	HCF	24
5.5	APSD a NoACK	24
5.6	WMM	24
6	Měření	26
6.1	OPNET	26
6.2	OPNET simulace	27
6.2.1	Vytvořené Scénáře	27
6.2.2	Použité modely	28
6.2.3	Nastavení přístupového bodu	28
6.2.4	Nastavení aplikací	30
6.2.5	Naměřené veličiny v OPNETu	34
6.2.6	Porovnání výsledků simulací v OPNETu	36
6.3	Emulovaná síť - Vliv zpoždění, jitteru a ztrátovosti na kvalitu hovoru	40
6.3.1	Popis	40
6.3.2	Schéma zapojení sítě	40
6.3.3	Výsledky měření	41
6.4	Měření - Přenos audio/video provozu v reálné síti	42
6.4.1	Schéma zapojení sítě	42
6.4.2	Nastavení notebooku R61	43
6.4.3	Nastavení notebooku T430	43
6.4.4	Nastavení serveru Windows 2012 R2	43
6.4.5	Nastavení routeru Tenda N60	44
6.4.6	Popis měření	44
6.4.7	Grafy z měření	45
7	Závěr	48
	Literatura	49
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	53
A	Přílohy	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Typ sítě režim: a) Root b) Bridge c) Repeater	13
1.2	Rozložení kanálů v DSSS	14
3.1	Analýza protokolu SIP při sestavování hovoru	19
6.1	Navržená síť v OPNET modeleru	28
6.2	Příklad nastavení AP u 802.11g	29
6.3	Nastavení hovorová aplikace v programu OPNET	30
6.4	Hovorový provoz v simulaci OPNET	30
6.5	Video provoz v simulaci OPNET	31
6.6	HTTP provoz v simulaci OPNET	32
6.7	FTP provoz v simulaci OPNET	33
6.8	Propustnost sítí dle standardů 802.11	34
6.9	Zpoždění na AP dle standardů 802.11	35
6.10	Zpoždění end-to-end u aplikace VoIP - 802.11b	36
6.11	Nastavení parametru PCF	36
6.12	Vliv zátěže na parametr MOS v 802.11b/g/a	37
6.13	Vliv zátěže na parametr jitter v 802.11b/g/a	38
6.14	Vliv zátěže na parametr MOS v 802.11b/g/a/n s QoS	39
6.15	Vliv zátěže na parametr jitter v 802.11b/g/a s QoS	39
6.16	Schéma zapojení sítě	40
6.17	Vliv změny zpoždění na MOS/R-Factor	41
6.18	Vliv změny jitteru na MOS/R-Factor	41
6.19	Vliv změny ztrátovosti na MOS/R-Factor	42
6.20	Schéma zapojení sítě	43
6.21	Informace o přehraném obsahu v programu VLC	44
6.22	Vlastnosti ovladače bezdrátového zařízení u Lenovo R61	45
6.23	Počet přenesených snímků dle typu sítě a kvality videa	46
6.24	Rychlost stahování z FTP	46
6.25	Odezva od IIS HTTP serveru	47

SEZNAM TABULEK

3.1	Refereční model OSI	17
4.1	Stupnice MOS dle [15]	21
4.2	Stupnice R-faktoru v porovnání s MOS dle [16]	22
5.1	Kategorie front u WMM	25

ÚVOD

V dnešní době, kdy je připojeno mnoho uživatelů do Internetu pomocí notebooků připojených pomocí bezdrátových sítí rodiny IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 se začala řešit otázka, zda-li je přenos hlasových a video dat přes tyto sítě možný a do jaké míry nám parametry bezdrátových sítí ovlivňují kvalitu hovoru.

Je známé, že pokud připojíme na WiFi (Wireless Fidelity) síť více zařízení, klesne rapidně její přenosová rychlost. Proto s přibývajícím počtem uživatelů připojených na jeden AP (Access Point – česky přístupový bod) musíme řešit prioritizaci paketů. Tento problém nám řeší nasazení techniky QoS (Quality of Service).

Diplomová práce se zabývá v první části teoretickým popisem základních principů bezdrátových sítí. Vysvětluje princip připojení bezdrátové stanice k access pointu, možné typy sítí a přístup k médiu pomocí protokolu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). Dále popisuje standardy IEEE 802.11. Následně se zabývá nasazením QoS v bezdrátových sítích a parametry QoS, kterými můžeme měřit kvalitu hovoru.

Navazuje praktická část složená ze 3 simulací. První je simulace v počítačovém programu OPNET, pomocí kterého je vytvořena síť a při probíhajících datových tocích různých aplikací jsou měřeny kvalitativní prvky VoIP (Voice over Internet Protocol) hovoru. Další část ukazuje praktickou ukázkou měření v reálné síti při změnách parametrů sítě jako je zpoždění, jitter, ztrátovost a jejich vliv na kvalitu probíhajícího hovoru. Poslední část je streamování audio/video obsahu s postupným zvyšováním jeho kvality 480p, 720p, 1080p, 1440p, 2160p v reálné síti, jeho průběh při souběžném HTTP (Hypertext Transfer Protocol) a FTP (File Transfer Protocol) provozu.

1 PRINCIPY V SÍTÍCH 802.11

V bezdrátových sítích, kde přenosové médium je rádiové prostředí, se musí AP (Access Point – česky přístupový bod) identifikovat, aby se na něho mohly bezdrátové stanice připojovat. Přístupový bod vysílá informace o síti pomocí rámce beacon v určitém intervalu a pomocí tohoto rámce získávají bezdrátové stanice informace o síti SSID (Service Set Identifier), časovou synchronizaci, informace o FHSS (Frequency hopping spread spectrum) či o DSSS (Direct sequence spread spectrum). Vysílání rámce beacon může být aktivní nebo pasivní. Pasivní vysílání beacon rámce znamená pro stanici, že vyhledává na všech kanálech a vypisuje SSID, které nalezne. Při aktivním (skrytý SSID) musí vznést klient požadavek o vyslání beacon rámce (probe request), což je cílený nebo broadcast na SSID. V rámci beacon je informace TIM informace pro stanici, která je v režimu spánku o nových datech pro ní, využívá se pro snížení energetické zátěže na bezdrátové zařízení. [3], [5], [6]

1.1 Typy sítí

Základní dělení bezdrátové sítě je na adhoc neboli peer-to-peer závisí na síle signálu (přímé viditelnosti) nebo síť s přístupovým bodem (s centrálním bodem). Úkolem přístupových bodů je rozšířit LAN (Local Area Network) o bezdrátově připojené uživatele připojené do takzvané WLAN (Wireless Local Area Network). Přístupový bod může zaujímat několik funkcí a to root mod, bridge nebo repeater mod. Každý z těchto režimů bude vysvětlen v následujících řádcích. [5], [7]

1.1.1 Root

Nejčastější využití AP, který rozšiřuje síť LAN o bezdrátovou síť. Jednotlivé AP jsou připojeny pomocí metalického vedení, roaming alespoň 20-30% překrytí. Viz obr. 1.1. [5]

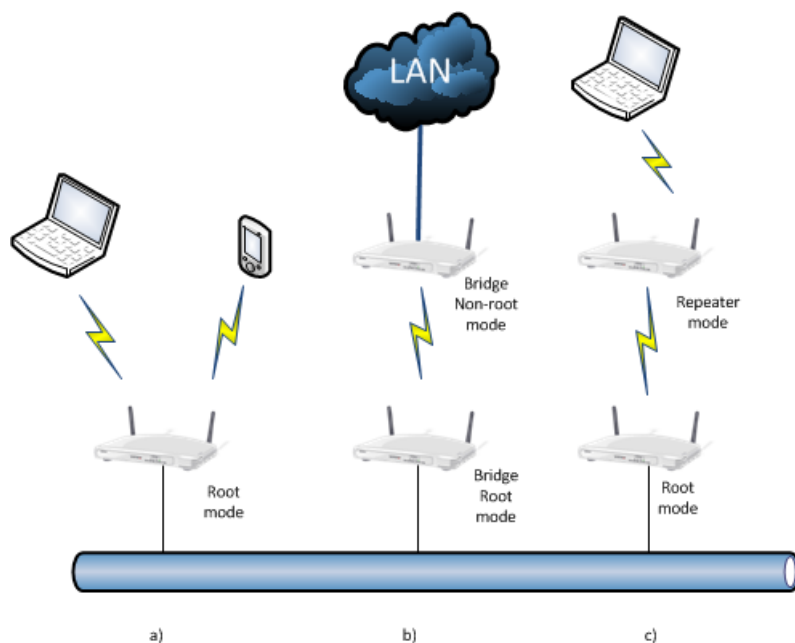
1.1.2 Bridge

Jednotlivé AP nejsou propojeny pomocí metalického vedení, ale komunikují spolu pomocí bezdrátového spojení. Jeden z AP je nastaven do režimu nadřazeném (root) módu a ostatní jsou v podřízeném (non-root) módu. Viz obr. 1.1. [5]

1.1.3 Repeater

Slouží k rozšíření dosahu bezdrátové sítě, nutnost minimálního překrytí alespoň 50%. Rychlost přenosu klesá, protože repeater musí data přijmout od root přístupového

bodů a následně tyto data přeposlat k připojené stanici. AP mají shodné SSID. Viz obr. 1.1. [5]



Obr. 1.1: Typ sítě režim: a) Root b) Bridge c) Repeater

1.2 Přístup k médiu

U počítačových sítí, kdy každý chce vysílat se musí řešit přístup k médiu, protože není možné, abych více stanic vysílalo ve stejnou dobu po jednom fyzickém médiu, protože pak by tok dat byl nečitelný. U 802.3 ethernetu je použitý protokol CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), nebo-li systém detekce kolize na síti. Tento protokol však nebyl použit i pro bezdrátové sítě a byl doplněn na systém prevence kolize CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). Popis vysílání dat funguje na principu, že stanice, která chce data posílat po síti, čeká až bude volné přenosové médium. V okamžiku, kdy zjistí, že žádná stanice nevysílá vyčká ještě stanovenou dobu DFIS a pokud i poté je volné začne přenášet. Cílová stanice zkontroluje kontrolní součet CRC (Cyclic redundancy check) a pokud kontrola proběhne v pořádku, může přenos i nadále pokračovat. Pro zvýšení bezpečnosti, že nedojde ke kolizi ve vysílání, se používá řídicí paket RTS (Request to Send), kterým se rezervuje pásmo pro určitou stanici, která si o to požádala. Používá se při začátku spojení k definování zdroje, cíle a délce trvání přenosu. AP na tento paket odpoví paketem CTS (Clear to Send), jenž obsahuje taktéž informaci o době trvání vysílání. Ostatní stanice, které zaznamenají

paket RTS či CTS si nastaví dobu čekání na volné přenosové médium podle tohoto paketu a dále vyčkávají. Tato procedura snižuje riziko vzniku kolize způsobené tím, že stanice na sebe nevidí a tudíž neví o vysílání druhé stanice. Využití RTS/RTC citelně ovlivňuje propustnost sítě a ta může klesnout až na 20 % celkové kapacity linky. [1], [7], [8], [12]

1.3 Šíření signálu po fyzické vrstvě

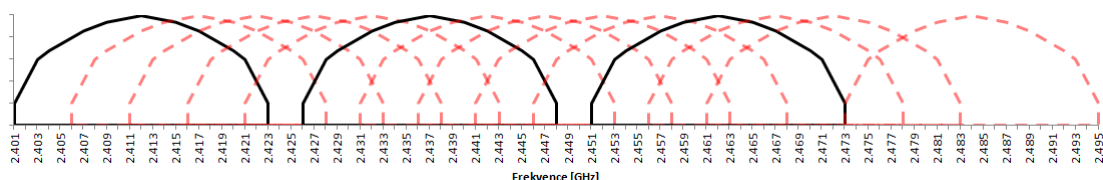
Fyzickou vrstvu rozdělujeme na úzkopásmovou a širokopásmovou. Úzkopásmová se vyznačuje jak již název říká úzkým pásmem s vysokým vysílacím výkonem. Širokopásmové mají nízký vysílací výkon, ale větší šířku pásma. Bezdrátové technologie využívají širokopásmové vysílání a více je popisují následující podkapitoly. [5], [7]

1.3.1 FHSS (frequency hopping spread spectrum)

U technologie FHSS je frekvenční šířka 83,5 MHz rozdělená do 79 (nebo 75) kanálů o šířce 1 MHz, zbytek slouží jako rezerva mezi kanály cca 4,5 MHz jako ochrana proti interferencím. Signál se šíří pseudonáhodnou změnou nosného kmitočtu během přenosu. Střídání kmitočtu je periodické, za 30s vystřídá 75 kanálů, proto je nutná synchronizace (stejná pseudonáhodná změna) i doba přenosu na stejném nosném kmitočtu (dwell time) musí být stejná, doba změny kmitočtu na jiný se označuje hop time. I u této technologie je možné vysílání více stanic, bez vzájemného rušení stejně jako u technologie DSSS. [5], [7]

1.3.2 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Kmitočtové pásmo rozděleno na menší oblasti o šířce 22MHz, které se částečně překrývají. DSSS využívá 11 kanálů schválených v USA, v Evropě je jich 13, ve Francii pouze 10-13 a Japonsko má 14 kanálů. U této technologie je správný výběr kanálu důležitý, protože u DSSS jsou pouze 3 vzájemně nepřekrývající kanály 1,6,11, což naznačeno na obr. 1.2. [5]



Obr. 1.2: Rozložení kanálů v DSSS

2 STANDARDY IEEE 802.11

Tyto vyvíjí americká organizace IEEE od roku 1997. Standardy se zabývají přístupem k médiu MAC (Medium access control) a fyzickou vrstvou PHY (Physical layer). První obsahuje popis všech přenosových technologií (DSSS, FHSS, infra přenos), dosahuje maximální rychlosti 2 Mbps, využívá kmitočtové pásmo 2,4000-2,4835 GHz (technologie DSSS nebo FHSS), který je ale v dnešní době velmi zarušené například ostatními zařízeními (směrovače, opakováče) vysílající na stejném kmitočtu, mikrovlnnými troubami, bezdrátovými telefony, technologií bluetooth, apod. [5], [9]

2.1 IEEE 802.11b

Standard vznikl v roce 1999 a dosahuje maximální rychlosti 11 Mbps. Zvýšení rychlosti způsobeno změnou kódování - CCK (Complementary Code Keying), signál se šíří pouze pomocí technologie DSSS. Kmitočtové pásmo bylo zachováno stejné jako u předchůdce, tím bylo dosaženo zachování zpětné kompatibility. Dosah až 12 km ve volném prostoru. [5], [6], [9]

2.2 IEEE 802.11a

Standard byl stanoven téhož roku jako 802.11b, a to roku 1999. Přenos se uskutečňuje v kmitočtovém pásmu 5 GHz (není zpětně kompatibilní), ale dovoluje využít více vzájemně nerušících se kanálů. Dosahuje maximální rychlosti až 54 Mbps, při použité modulaci OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Dokáže vysílat na delší vzdálenost díky většímu povolenému vyzařovacímu výkonu a méně zarušenému pásmu. [5], [9], [10]

2.3 IEEE 802.11g

Návrh byl vydán roku 2003 a byl vytvořený z důvodu, že dříve vydaný standard 802.11a využívá 5 GHz pásmo, které je licencované v některých zemích. Proto 802.11g nabízí rychlost 54 Mbps v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz. Vyšší rychlosti se dosahuje pomocí kódování OFDM, přičemž zpětná kompatibility byla zachována. [5], [6], [9]

2.4 IEEE 802.11n

Nejnovější standard schválený v roce 2009. Upravuje nejnižší 2 vrstvy standardu ISO, fyzickou a linkovou, tím zvyšuje propustnost sítě rychlostem přes 100 Mbps. K tomu využívá se technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), čili AP má více antén pro vysílání a příjem signálu. Může využívat pásma 2,4 GHz tak i pokročilejší AP mohou vysílat v pásmu 5 GHz. [9]

3 OSI REFERENČNÍ MODEL

Byl vytvořen pro popis komunikačního procesu mezi zařízeními. Skládá se ze sedmi vrstev viz tabulka. Tyto vrstvy vždy spolupracují se sousedními vrstvami, vyšším vrstvám nabízí svoje data a od nižších přebírají data ke zpracování. Fyzická vrstva se zabývá vlastním propojením, popisuje logické signály 1 a 0. Linková vrstva popisuje kódování přenosu informací, zde operuje zařízení switch neboli přepínač. Síťová vrstva určuje nejkratší cestu k cíli, zabývá se směrováním na základě IP adres. Zařízení pracující na této vrstvě se jmenuje směrovač. Transportní vrstva se skládá ze dvou odlišných typů přenosu dat. Více informací viz kapitola 3.1. Relační vrstva se stará o navázání, udržování a přerušování komunikace mezi dvěma uzly v síti. Prezentací vrstva upravuje data do čitelné podoby pro aplikační vrstvu, která přenáší data mezi aplikačními programy. V dnešní době se používá zjednodušený model TCP/IP, který obsahuje všechny vrstvy ISO/OSI, ale část vrstev sdružuje do jedné. [7]

Tab. 3.1: Referenční model OSI

Vrstva	Popis	Příklad
7	Aplikační	Prohlížeč www
6	Prezentační	HTTP
5	Relační	80
4	Transportní	TCP
3	Síťová	IPv6
2	Linková	PPP
1	Fyzická	DSSS

QoS se nejvíce zabývá úpravou parametrů transportní a aplikační vrstvy. Proto si tyto vrstvy blíže popíšeme v následující podkapitole.

3.1 Transportní vrstva

Transportní vrstva je definována dvěma protokoly TCP a UDP. Každý je určený pro jiný typ komunikace. Transportní vrstvou se dále definují porty, kterými se odlišuje, které aplikaci daný paket patří. Port nabývá hodnoty v intervalu 0 až 65535.

3.1.1 TCP

TCP (Transmission Control Protocol) je spojovanou službou (connection oriented), to znamená, že se mezi dvěma aplikacemi naváže spojení metodou three-way handshake. Tato metoda ověří, zda-li je spojení dostupné a obě zařízení jsou schopná spolu komunikovat, vytvoří se tím takzvaný virtuální okruh, který je plně duplexní (data putují obousměrně). Každý TCP segment má svoji značku a je zpětně potvrzován ACK (acknowledge). U přijatých dat se chyba detekuje pomocí kontrolního součtu. TCP se využívá pro aplikace, kde nechceme, aby docházelo ke ztrátě dat a je nutné tyto data přenést znovu v případě chyby. Je ale velmi nevhodný pro real-time aplikace, kde je kritická doba zpoždění, protože na tu se výrazně podepisuje opakované posílání paketů. [17]

3.1.2 UDP

UDP (User Datagram Protocol) je nespojovaná služba, nenaváže prvotní spojení. Stanice pouze odešle UDP datagram k cíli a neřeší, jestli dorazil k cíli a jestli je bez chyb, kontrolní součet není povinný u UDP protokolu. Je vhodný pro real-time data, jelikož má méně řídicích dat a nemusí se každý datagram potvrzovat a výpadek v určitých mezích například ve VoIP ani nepoznáme. [17]

3.2 Aplikační vrstva

V práci se zabýváme přenosem real time přenosů a pro přenos videa je používán RTP (Real Time Transport Protocol). U VoIP hovorů je sestavován pomocí protokolu SIP (Session Initiation Protocol). Oba jsou více popsány v následujících podkapitolách.

3.2.1 RTP

AVT (Audio/Video Transport) pracovní skupina pod organizací IETF vyvinula RTP v roce 1996 jako standard v RFC 1889. Vývoj dále postupoval a bylo nutné vydat další RFC 3550, které dále rozšířilo původní. Multimediální data se v reálném čase přenáší v paketové síti, nejčastěji internet, pomocí RTP. K RTP se váže RTCP (Real Time Control Protocol), který přenáší informace o RTP, a to statistiky paketů, kvalita přenosu, zpoždění paketů a synchronizace. RTP se přenáší pomocí UDP datagramů. [20]

3.2.2 SIP

SIP je signální protokol vyvinutý pracovní skupinou IETF MMUSIC a je navržen pro navázání, upravování a ukončení spojení v IP sítích.

Operation	Request/Response	CSeq	Content
INVITE	➕ ➡ INVITE sip:adam@10.10.10.12	1 INVITE	SDP
	➕ ⬅ 100 Trying	1 INVITE	(none)
	➕ ⬅ 180 Ringing	1 INVITE	(none)
	➕ ⬅ 200 OK	1 INVITE	SDP
BYE	➕ ➡ ACK sip:adam@10.10.10.12	1 ACK	(none)
	➕ ➡ BYE sip:adam@10.10.10.12	2 BYE	(none)
	➕ ⬅ 200 OK	2 BYE	(none)

Obr. 3.1: Analýza protokolu SIP při sestavování hovoru

Zahrnuje multimediální prvky jako jsou audio, video či IM. Původně byl vydán v roce 1996 jako RFC 2543 (zastaralý), nyní platí RFC 3261 [18]. Proti staršímu H.323 je výrazně jednodušší, jelikož SIP je textově orientovaný (viz obr. 3.1), vychází z protokolu HTTP a využívá i několik položek ze SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). [18], [19]

4 PARAMETRY QOS

QoS (Quality of Service) zajišťuje, že data budou tříděna do kategorií podle priority přenosu. Data s vyšší prioritou budou upřednostňovány před daty, u kterých není prioritní velikost zpoždění či nízký jitter. QoS politika se uplatňuje hlavně v době, kdy je síť přetížená a je nutné zajistit dostupnost pro kritické aplikace. [12], [21]

4.1 Zpoždění

Doba mezi vysláním paketu od zdroje a jeho doručení k cílovému zařízení. [22]

- do 150ms – vysoká kvalita hovoru
- 150 až 400ms – přijatelná až dobrá kvalita hovoru
- nad 400ms – zhoršená kvalita, dochází ke ztrátě synchronizace

4.2 Jitter

Jitter, rozdíl v intervalech mezi přijímanými pakety. Bývá způsobený odlišným intervalem příchodu paketů způsobený zátěží sítě. Roztyl paketů je potlačen na straně příjemce použitým bufferem, avšak příliš velký buffer zvyšuje zpoždění, proto se používá adaptivní vyrovnávací paměť, která se dynamicky přizpůsobí, ale je vhodné mít nejmenší velikost bufferu. [22]

4.3 Šířka pásma

Šířka pásma (přenosová kapacita) související s propustností (objem dat úspěšně přenesený za jednotku času). [11], [22]

4.4 Ztrátovost

Podíl přijatých a vyslaných paketů za jednotku času. Chyba může nastat nedoručením paketu skrze přenosovou cestu nebo při kontrolním součtu paketu (pokud je prováděn). Následující rozdělení je obecně platné pro VoIP hovor. [22]

- do 2% – s minimální či nepostřehnutelný vliv na kvalitu
- 2-5% – může mít vliv na srozumitelnost, závisí na kodeku
- 5-10% – snížení srozumitelnosti, závislost na rozložení výpadků paketů
- nad 10% – nepoužitelné

4.5 MOS

MOS (Mean Opinion Score) je definován normou ITU-T P.10. Jedná se o hodnocení výkonnosti telefonního přenosového řetězce a kvality hovoru. Nezávisí pouze na parametrech sítě, ale i na použitém kodeku, kde každý kodek má maximální hodnotu MOS, které může dosáhnout. Existuje mnoho variant stupnic dle doporučení ITU-T P.800, nejčastěji používaná je stupnice poslechové kvality. Skládá se z pětibodové stupnice s rozsahem 1 až 5, kde pět znamená nejvyšší kvalita a u čísla jedna je kvalita hovoru až nesrozumitelná, šum v hovoru buď znesnadňuje hovor či plně ruší. Číslovka je doplněna ještě slovním vyjádřením kvality, viz tabulka 4.1. Určení kvality hovoru probíhá 3 možnými způsoby. Jedním z nich je subjektivní vyjádření kvality člověkem, který u zařízení sedí a poslouchá daný hovor. Druhým způsobem je pomocí výpočetní techniky na základě jednoduchých až složitých metod, možno i s použitím speciálního hardwaru. Třetí poslední způsob je využití parametrického popisu daného systému a empirických hodnot kvality. Tento systém měření je ale méně přesný z důvodu zanedbání dynamických jevů a většinou se používá pouze k odhadu kvality při návrhu systému. [15]

Tab. 4.1: Stupnice MOS dle [15]

MOS	Kvalita	Popis
1	Špatná	Rušení velmi obtěžuje, způsobuje nesrozumitelnost.
2	Nízká	Rušení obtěžuje, nutno vyvinout úsilí k porozumění.
3	Průměrná	Rušení lze rozpoznat a mírně obtěžuje.
4	Dobrá	Rušení lze rozeznat, ale neobtěžuje.
5	Vynikající	Neznamenatelné rušení.

4.6 R-faktor

R-faktor je definován v doporučení G.107 znám jako E-model. Využívá se k měření kvality hovoru v závislosti na parametrech přenosové linky (zpoždění, ztrátovost, jitter) označovaný jako Network R-factor a vnímání kvality hovoru uživatelem (hlasitost, kvantizační zkreslení, kódování) tzv. User R-factor. Stupnice R-faktoru je od 0 do 100, porovnání s MOS hodnotou je v tabulce 4.2. [16]

Tab. 4.2: Stupnice R-faktoru v porovnání s MOS dle [16]

R-Faktor	MOS	Stupnice vhodnosti
94-80	4.4-4.0	Žádané.
80-70	4.0-3.6	Akceptovatelné.
70-50	3.6-2.6	Postačující spojení.
50-0	2.6-1.0	Nedoporučované.

5 QOS VE WIFI SÍTÍCH IEEE 802.11E

Bezdrátové sítě jsou náchylnější na chyby způsobené rušením, útlumem signálu či šumem v přenosu než v klasických drátových sítích a nemají srovnatelnou přenosovou rychlost, proto je často aplikována technologie QoS na síťových zařízeních k zajištění kvalitního například VoIP (Voice over Internet Protocol) hovoru, který je citlivý na velikost zpoždění, jitter a ztrátovost paketů. Standard 802.11e tedy vylepšuje vrstvu MAC a přidává tak podporu QoS. [8] [9], [11]

5.1 DCF

DCF (Distributed Coordination Function) doplňuje metodu přístupu k médiu CSMA/CA a zajišťuje správu přístupu k přenosovému médiu určený pro asynchronní datové přenosy. Existují 2 možnosti obrany proti kolizím, a to vkládání mezery mezi vysílanými rámci IFS (InterFrame Space) nebo odklad vysílání (backoff). Stanice, která chce vysílat data, musí po zjištění volného media čekat povinný interval DIFS (DCF InterFrame Space) a pokud i poté je kanál volný může vysílat. V případě, že bude kanál obsazený, stanice si náhodně vybere hodnotu od nuly do velikosti CW (Contention Window) jako interval odkladu. V případě kolize, se CW zvyšuje exponenciálně (exponential backoff). Po vypršení intervalu odkladu vysílání zjistí, jestli je přenosové medium volné, detekuje míru signálu na anténě, pakliže ano, začne přenášet data. Cílová stanice nebo AP vyčká dobu SIFS (Short InterFrame Space) a poté pošle potvrzení o přijetí paketu. [11], [12], [13]

5.2 PCF

PCF (Point Coordination Function) má funkci, že access point periodicky vysílá beacon rámeček, který obsahuje informace o síti (identifikace a management) a mezi přenášením těchto rámečků má dvě možnosti pro vysílání dat. První z nich je vysílání bez ohledu na ostatní stanice, pokud mám prioritní data a zažádám si právo vysílat, mohu vysílat (contention-free). Druhá možnost je standardní vysílání s tím, že vysílá ten, komu nejdříve vyprší čas pro čekání na volné medium (contention). [11], [12]

5.3 EDCF

EDCF (Enhanced Distribution Coordination Function) jde o rozšíření DCF, zabezpečuje mechanismus pro rezervování šířky pásma na základě kategorie provozu. Existují 4 kategorie na podporu osmi úrovní priority neboli provoz se řadí do 4 typů

front. Data se třídí do front podle priority a fronta s nejvyšší prioritou má nejnižší čas AIFS (Arbitration Interframe Space). Tímto je docíleno, že data s nejvyšší prioritou jsou přednostně vysílána před ostatním provozem. Jelikož může nastat kolize při vysílání dvou stanic se stejně prioritními daty, je ještě před zahájením vysílání zařazen náhodný interval mezi nulou a EDCF. [11]

5.4 HCF

HCF (Hybrid Coordination Function) je rozšířením PCF. AP se zeptá v době contention-free stanice, zda-li má nějaké prioritní data k vysílání, pokud stanice má, AP jí přiřadí určitou dobu vysílání a dobu trvání přenosu. [11], [12]

5.5 APSD a NoACK

APSD (Automatic Power Save Delivery) vylepšuje správu napájení oproti původnímu návrhu 802.11 Power Save Polling. NoACK (Not Acknowledged) příznak způsobuje, že rámce nebudou potvrzovány. To má za následek, že chyba v rámci či výpadek se toleruje a nebude nutné rámec odeslat znovu. Vhodné pro aplikace závislé na zpoždění dat, příkladem je například VoIP hovor. [12]

5.6 WMM

WMM (Wi-Fi Multimedia) funkci definuje WiFi Multimedia, která se zabývá QoS v sítích WiFi a nahrazuje DCF v sítích CSMA/CA. WMM nedefinuje šířku pásma pro následný provoz na síti, ale prioritizuje multimediální tok dat jako je VoIP, streamovaný video přenos či hudbu nad ostatní provoz méně náročný na zpoždění, ztrátovost či jitter. Pro plnou funkci WMM je nutné, aby ji podporovaly zařízení v síti, ale i koncové zařízení u klienta. V následující tabulce 5.1 je znázorněno, jak je rozdělen tok dat do kategorií. [30], [31], [32] [33]

U funkce WMM je možnost vypnutí ACK, takzvaně acknowledgement, což je potvrzování správně přijatých paketů. Tato funkce se ale nedoporučuje, vypnutí potvrzování paketů může mít následek nestabilní sítě a vysokého počtu nepřijatých paketů.

Tab. 5.1: Kategorie front u WMM

Kategorie přístupu	Kategorie přenosu	Popis	802.1P
AC_BK	Data v pozadí	Provoz nezávislý na zpoždění nebo šířce přenosového pásma	1, 2
AC_BE	Bez rozlišení	Aplikace méně náročná na zpoždění či jitter	0, 3
AC_VI	Video	Upřednostňuje video přenos nad ostatním provozem (3-5)	4, 5
AC_VO	Hlas	VoIP přenos s nejvyšší prioritou přenosu (6-7)	6, 7

6 MĚŘENÍ

Tato kapitola je složena ze 3 měření. První je simulace v programu OPNET Modeler. Výstupem tohoto měření je porovnání kvality VoIP hovoru v sítích 802.11a/b/g/n při zatížení sítě ostatním provozem FTP,HTTP a video při využití QoS a bez. Další měření je emulovaná síť a ovlivňování parametrů zpoždění, jitteru a ztrátovosti a dopad na kvalitu přenášeného hovoru. Poslední měření je zacíleno na streamování audio-video provozu s různou kvalitou v reálné síti při souběžném FTP a HTTP provozu.

6.1 OPNET

Program OM (OPNET Modeler) je graficky orientovaný simulační program, jehož pomocí navrhujeme analýzu sítě a provádíme simulaci. Program obsahuje rozsáhlou knihovnu a lze pomocí něj nasimulovat síť ethernet, bezdrátové sítě, veškeré telekomunikační sítě. Vše je jednoduše konfigurovatelné, celé rozsáhlé sítě se stovky klientů lze sdružit do jedné oblasti a nekonfigurovat je každý zvlášť, ale přímo celou skupinu zařízení. To velice usnadňuje práci, ale i zvyšuje přehlednost navržené simulace. Výsledky vytvořené simulace, které mohou mít dobu trvání od několika minut až do několika měsíců, lze vykreslit do grafů, generovat do formátů XML nebo HTML či uložit data do tabulek. OPNET se skládá z více vrstev a základní jsou: Project Editor, Node Editor a Process Editor. Project editor názorně ukazuje strukturu sítě a vykresluje jí na mapových podkladech pro lepší názornost. Uzly a modely je možné použít vlastní nebo si vybrat z knihovny Model Library. Node editor je vnořen do projekt editoru a zobrazuje vnitřní architekturu síťového zařízení nebo systému a vzájemné propojení těchto modulů. Modul je například aplikace, protokolová vrstva, algoritmus či fyzické prostředky (buffer, input, output). Process editor se vnořuje do node editoru a je zobrazen jako vývojový diagram (konečný stavový automat). Process nebo stav modulu se programuje pomocí C/C++ a má vstupní exekutivu a výstupní exekutivu. [14]

6.2 OPNET simulace

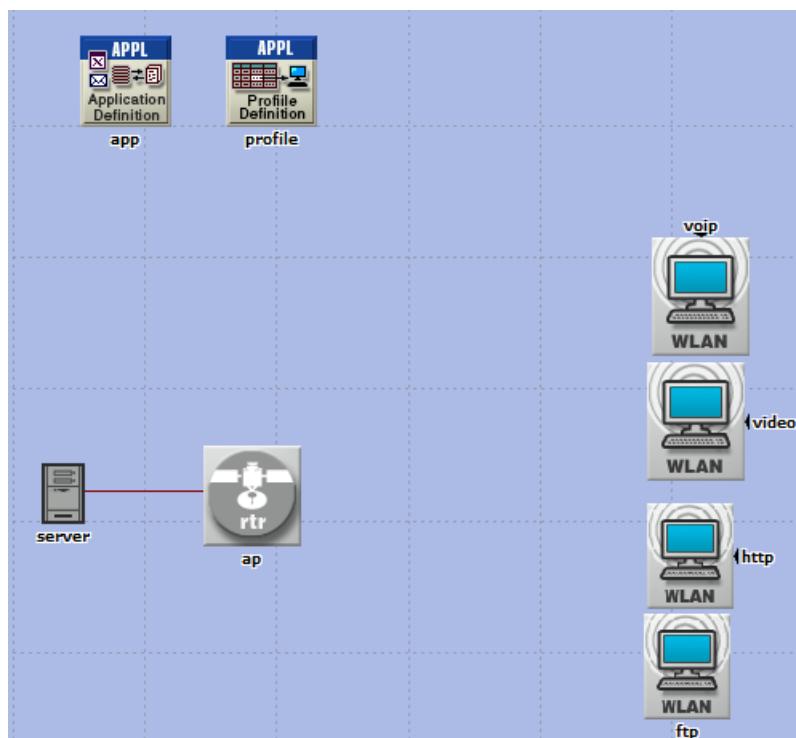
Pro vytvoření simulace byl použit Riverbed Modeler Academic Edition 17.5, která je omezena počtem akcí (50 miliónů) v simulaci, což pro naše potřeby plně dostačuje. Byla vytvořena síť skládající se ze 4 počítačů připojených k AP pomocí 802.11a/b/g/n a aplikace navazovaly připojení se serverem, jež byl připojen k AP pomocí 100BaseT spoje, viz obr. 6.1, který zobrazuje navrženou síť.

6.2.1 Vytvořené Scénáře

Pro každý standard 802.11 byl vytvořen samostatný scénář v simulačním prostředí OPNET velikostí kanceláře. Vždy se jedná o jeden scénář pro simulaci bez použití QoS a k němu duplicitní scénář s prvky zajišťující přenos dat využitím QoS. Kromě scénářů se standardem 802.11n, jelikož tento standard nelze simulovat v OPNET modeleru bez použití QoS, jelikož tento standard již zahrnuje funkci HCF nativně.

Vytvořené scénáře:

- DP_WLAN_802.11b
- DP_WLAN_802.11g
- DP_WLAN_802.11a
- DP_WLAN_802.11n
- DP_WLAN_802.11n5
- DP_WLAN_802.11b_QoS
- DP_WLAN_802.11g_QoS
- DP_WLAN_802.11a_QoS



Obr. 6.1: Navržená síť v OPNET modeleru

6.2.2 Použité modely

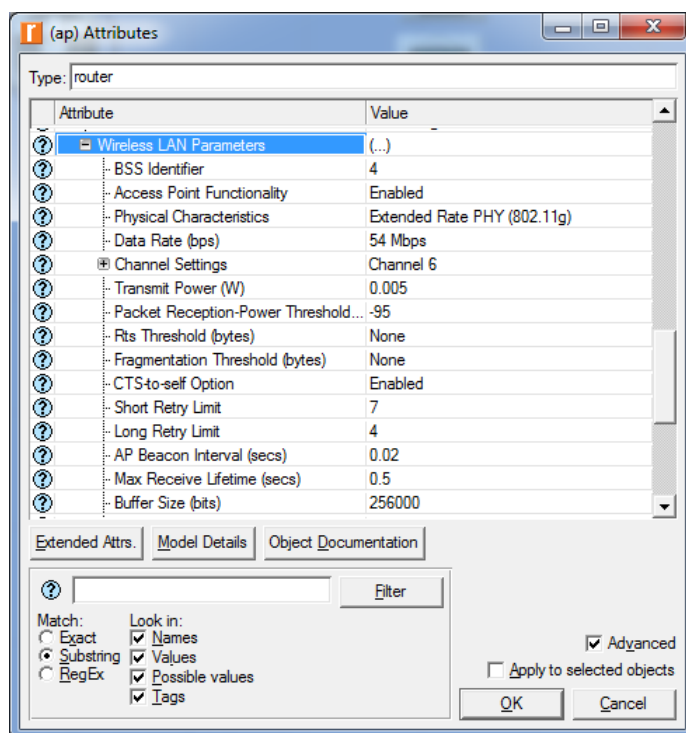
Do vytvořených scénářů byly vloženy prvky, které zastupovaly přístupový bod, workstationy připojené pomocí bezdrátové technologie, server a konfigurační soubory.

- Application config
- Profile config
- ethernet_server_adv
- wlan_ethernet_router_adv
- 4x wlan_wkstn_adv
- 100BaseT

6.2.3 Nastavení přístupového bodu

V každém jednotlivém scénáři byl nastaven přístupový bod dle následujících parametrů viz níže. Síť 802.11b byla vytvořena nastavením access pointu a klientů fyzickými charakteristikami Direct Sequence s šířkou pásma 11 Mbps. Ostatní byly vybrány z předem nastavených defaultních profilů programu OPNET. Přenosový kanál byl zvolen č. 6 a BSS identifikátor 4. U scénářů bez podpory QoS je nastavení PCF a HCF vypnuto, až na výjimku 802.11n (2.4 Ghz i 5 Ghz), kde nebylo možno

v simulačním programu OPNET zcela vypnout HCF parametr. Příklad nastavení přístupový bodu viz obr. 6.2.



Obr. 6.2: Příklad nastavení AP u 802.11g

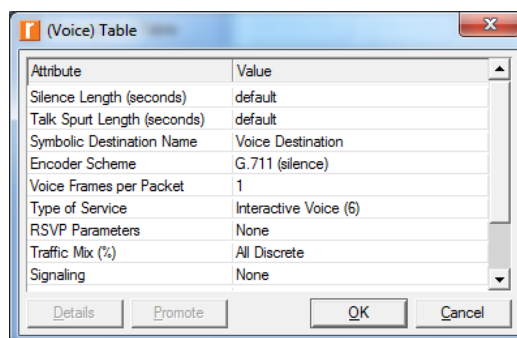
- Physical Characteristics – Direct Sequence
- Data Rate (bps) – 11 Mbps
- Physical Characteristics – Extended Rate PHY (802.11g)
- Data Rate (bps) – 54 Mbps
- Physical Characteristics – OFDM (802.11a)
- Data Rate (bps) – 54 Mbps
- Physical Characteristics – HT PHY 2.4GHz (802.11n)
- Data Rate (bps) – 65 Mbps (base) / 600 Mbps (max)
- Physical Characteristics – HT PHY 5GHz (802.11n)
- Data Rate (bps) – 65 Mbps (base) / 600 Mbps (max)
- BSS Identifier – 4
- Channel Settings – Channel 6
- PCF Parameters – Disabled
- HCF Parameters – Not supported
- HCF Parameters – Default (QAP) v případě 802.11n

6.2.4 Nastavení aplikací

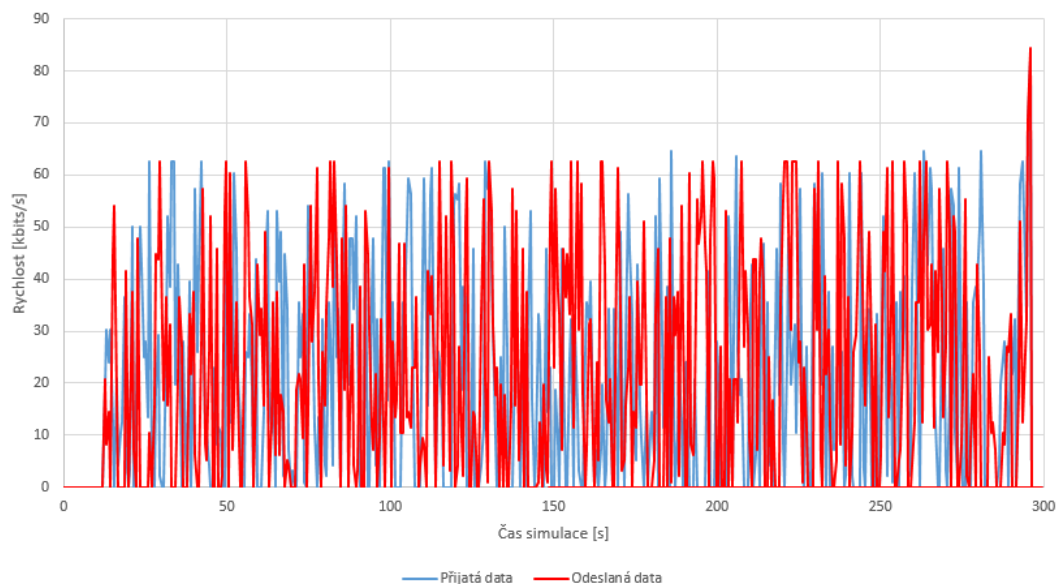
Simulace obsahuje 4 různé typy aplikací. Aplikace byly zvoleny VoIP, HTTP, FTP, video. Jedná se nejčastější typ provozu v síti a každý z těchto provozů má jiné nároky na síť, co se týče velikosti paketu, transportní protokol a závislost na zpoždění, jitteru či ztrátovosti.

Hovorový provoz

Hlavní aplikace je VoIP hovor, který využívá kodeku G.711 s přenosovou rychlostí 64 kbits s podporou potlačení ticha, jeho provoz je znázorněn na obrázku 6.3. Hovor byl započat po 5s od začátku spuštění simulace v programu OPNET.



Obr. 6.3: Nastavení hovorová aplikace v programu OPNET

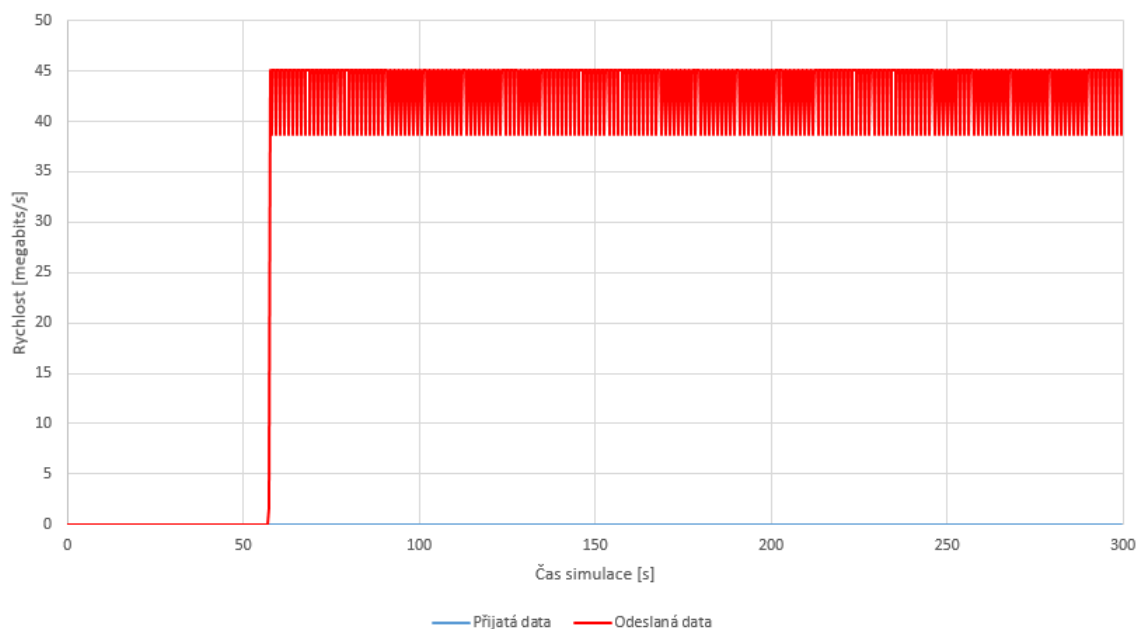


Obr. 6.4: Hovorový provoz v simulaci OPNET

Video provoz

Video provoz, který odesílá data na server (viz obr. 6.5) dosahuje toku až 45 Mbps a to v odchozím směru a žádná data v příchozím. Je to dáno tím, že nebyla vytvořena žádná protistrana, která by klientovi posílala data. Jelikož klient generoval již vysoký tok dat, nebylo nutné vytvářet tuto protistranu. Rozlišení přenášeného videa je 352x240 se 30 snímky za sekundu. Video se začalo přenášet po 1min od začátku simulace.

- Frame Interarrival Time – 30 frames/sec
- Frame Size Information (bytes) – 352X240 pixels
- Traffic Mix (%) – 25%
- Type of Service – Best Effort(0)
- Start Time (sec.) – constant(60)

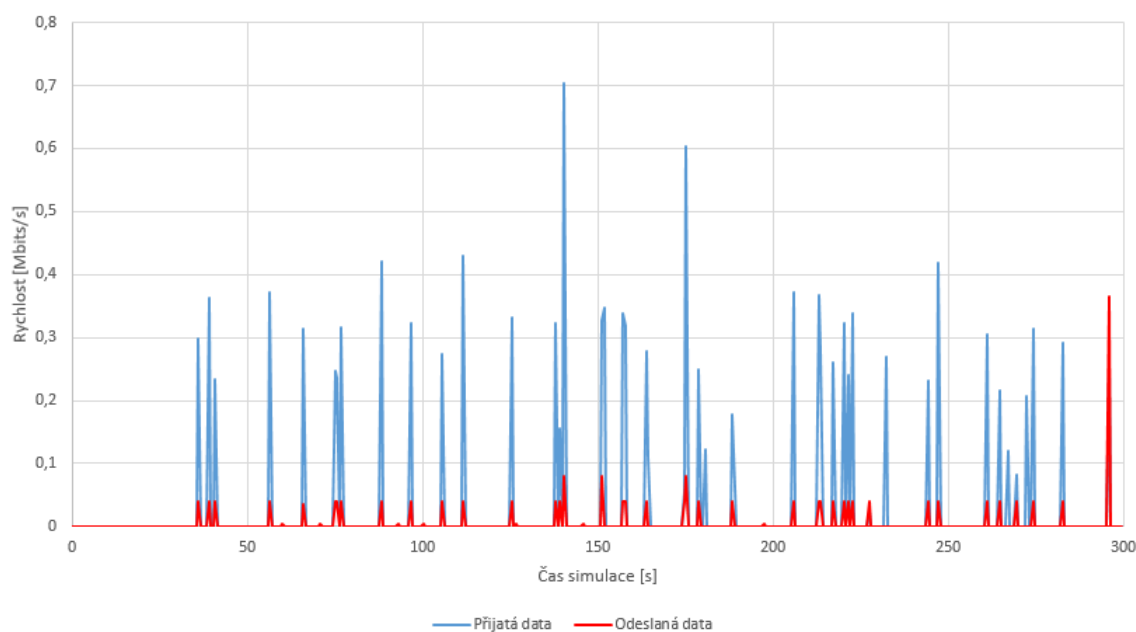


Obr. 6.5: Video provoz v simulaci OPNET

HTTP provoz

HTTP provoz byl nastaven s konstatní zátěží, středně velkým obrázkem a velkým obrázkem stažený z HTTP serveru. Doba mezi dotazy byla zvolena na 5s. HTTP provoz započal 30 sekund po začátku simulace. Průběh HTTP provozu viz obrázek 6.6.

- Page Interarrival Time (sec.) – exponential(5)
- Page Properties – constant(1000B), Medium Image(5), Large Image(3)
- Server Selection – Pages Per Server - exponential(20)
- Type of Service – Best Effort(0)
- Start Time (sec.) – constant(30)

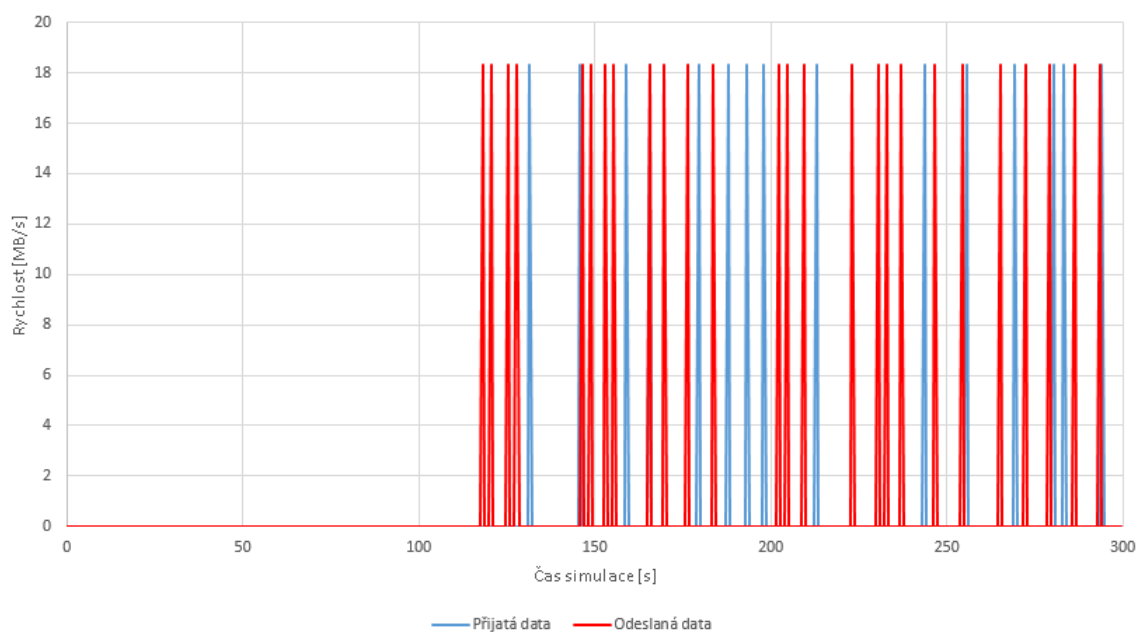


Obr. 6.6: HTTP provoz v simulaci OPNET

FTP provoz

FTP provoz, kdy poměr odeslaných a přijatých dat je 50/50 viz obrázek 6.7. Přenáší se vždy 11 MB soubor a doba mezi stahováním/odesíláním dat byla stanovena na 7s. Start FTP provozu byl nastaven na 120s po startu simulace.

- Command Mix (Get/Total) – 50%
- Inter-Request Time (sec.) – constant (7)
- File size (bytes) – constant(11534336)
- Type of Service – Best Effort(0)
- Start Time (sec.) – constant(120)



Obr. 6.7: FTP provoz v simulaci OPNET

6.2.5 Naměřené veličiny v OPNETu

Z výsledků měření byly zkoumány následující veličiny: propustnost sítě, zpoždění na přístupový bod, zpoždění end-to-end komunikace u aplikace VoIP, MOS, jitter a to bez a s zajištěním podpory QoS, pomocí parametru PCF a HCF.

Propustnost sítě

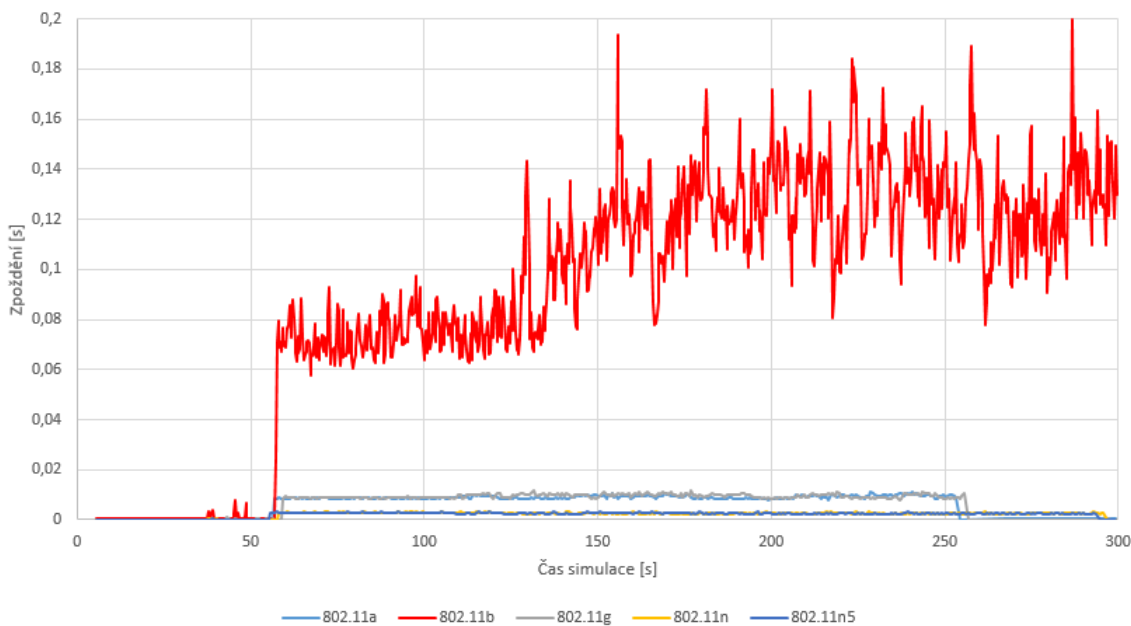
Propustnost sítě je dána standardem, který simulovaná síť využívá. Síť 802.11b dosahovala maxima 5Mbps, i když bylo definováno 11 Mbps. Nižší přenosová rychlost než je teoretická rychlost 11 Mbps je dána bez management paketů. Tato rychlost je v reálném prostředí ještě nižší z důvodu rušení ostatními WiFi sítěmi a šumem. Síť 802.11a/g dosahovaly maximální propustnosti 25 Mbps. U sítě 802.11n byla naměřena maximální hodnota rychlosti přenosu užitečných dat 45 Mbps, což není maximální rychlost sítě, ale maximální hodnota přenášeného datového toku, aby mohla být zajištěna nejvyšší kvalita VoIP hovoru.



Obr. 6.8: Propustnost sítí dle standardů 802.11

Zpoždění sítě na AP

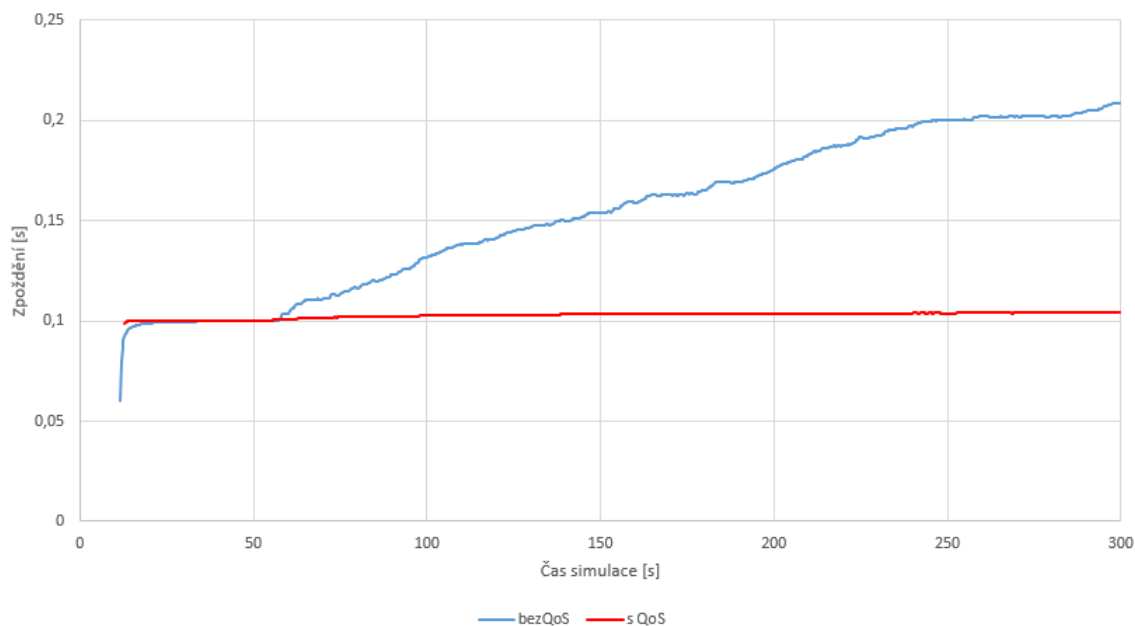
Z následujícího grafu 6.9 je velmi výrazný rozdíl mezi sítí 802.11b a ostatními (obsahuje pouze scénáře, kde byly vypnuty parametry PCF a HCF zajišťující QoS). Tento rozdíl dosahuje až 6 násobku. Z grafu je dále patrné, že dokud bylo přes síť přenášeno pouze VoIP provoz (do 60. sekundy) bylo zpoždění zanedbatelné, ale po 60. sekundě, kdy se na síť začal přidávat video provoz, zpoždění výrazně vzrostlo. Je to zapříčiněno velmi nízkou propustností sítě 802.11b.



Obr. 6.9: Zpoždění na AP dle standardů 802.11

Zpoždění end-to-end u aplikace VoIP - 802.11b

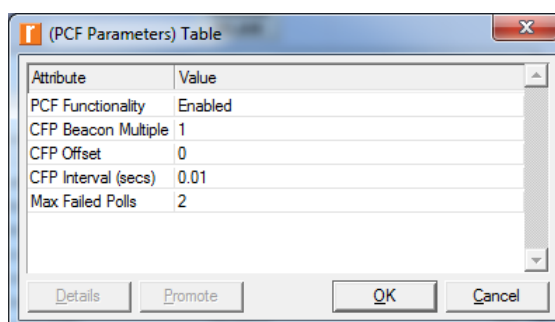
Pro graf 6.10 zpoždění end-to-end u aplikace VoIP byla vybrána síť 802.11b, jelikož na této síti lze pozorovat největší rozdíl zpoždění v síti s podporou QoS a bez podpory QoS. Provoz VoIP je citlivý na zpoždění více než ostatní současně běžící provoz, byl klienty i následně přístupovým bodem prioritizován a tudíž pakety hlasového záznamu dostaly přednost před ostatními.



Obr. 6.10: Zpoždění end-to-end u aplikace VoIP - 802.11b

6.2.6 Porovnání výsledků simulací v OPNETu

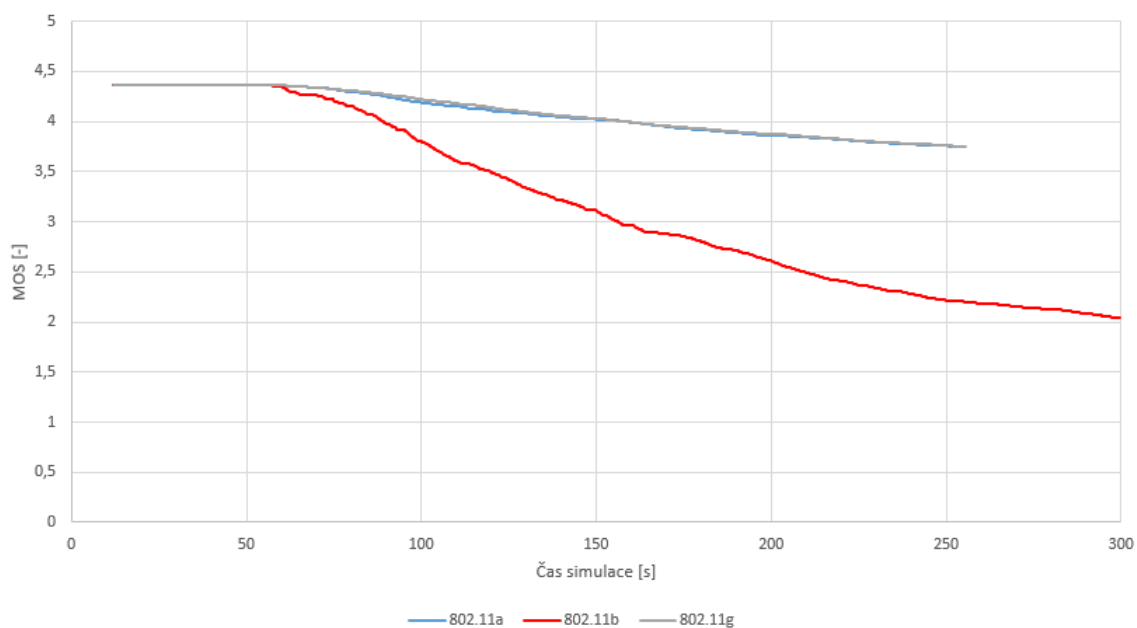
Výsledné scénáře bez/s QoS a jejich porovnání v parametrech QoS a jitteru. Dosažení opatření QoS v simulačním programu OPNET bylo docíleno využitím parametrů PCF viz obr. 6.11 a HCF z režimu „Not Supported“ na „Default“ nastavených na přístupový bodu tak i na každém jednotlivém klientovi. Jelikož cílem bylo vytvoření prostředí pro VoIP hovor, byl jeho provoz prioritizován pomocí funkce Type of Service – Interactive Voice (6). Ostatní typy provozů byly ponechány v režimu Best Effort(0), čili bez prioritizace paketů.



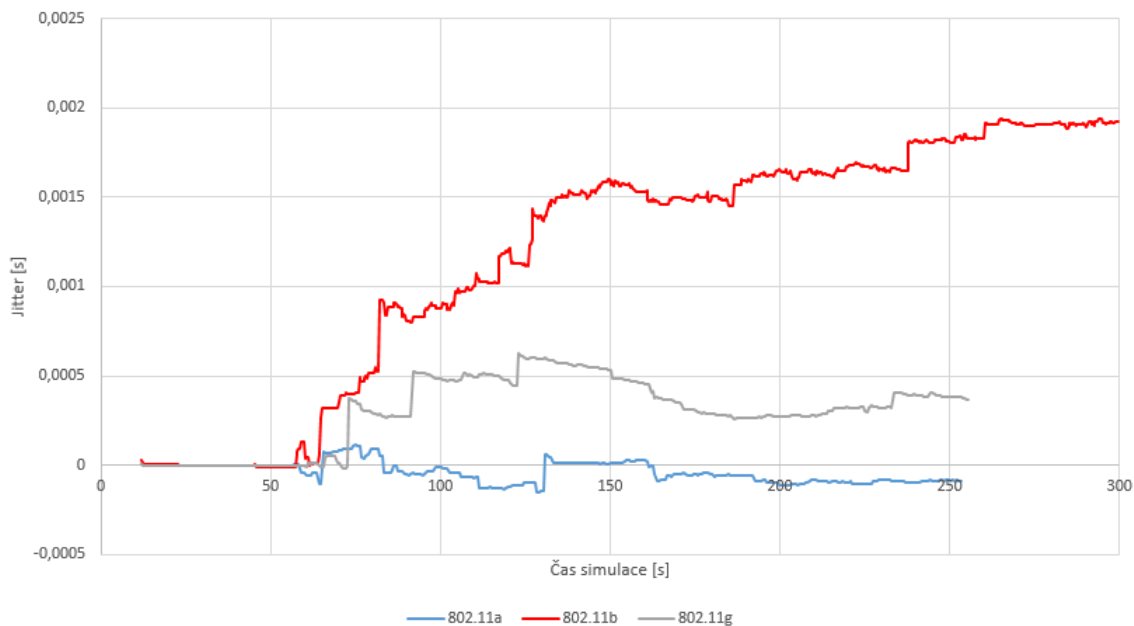
Obr. 6.11: Nastavení parametru PCF

MOS a jitter u sítí bez QoS

Z níže uvedeného grafu 6.12 je patrné, že nejhůře dopadla síť dle standardu 802.11b, u které se postupně snižovala hodnota MOS, z důvodu, že ze začátku vyrovnával zpoždění hovorových dat buffer, ale ke konci simulace dosahovala MOS hodnoty 2, čili hovor s velmi velkým rušením. Hlavním důvodem je příliš malá přenosová rychlost této sítě. Provoz z velké části zabírá video přenos, FTP provoz a VoIP hovor bez jakékoliv prioritizace je degradován. Bez QoS dosahuje jitter maximální hodnoty 2 ms viz obrázek 6.13.



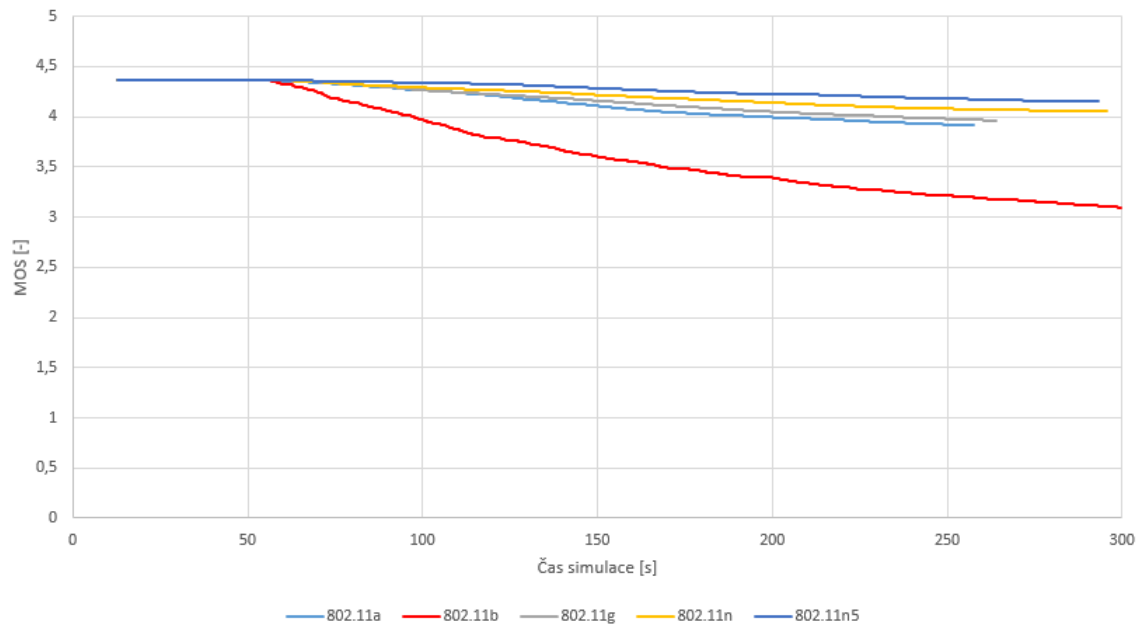
Obr. 6.12: Vliv zátěže na parametr MOS v 802.11b/g/a



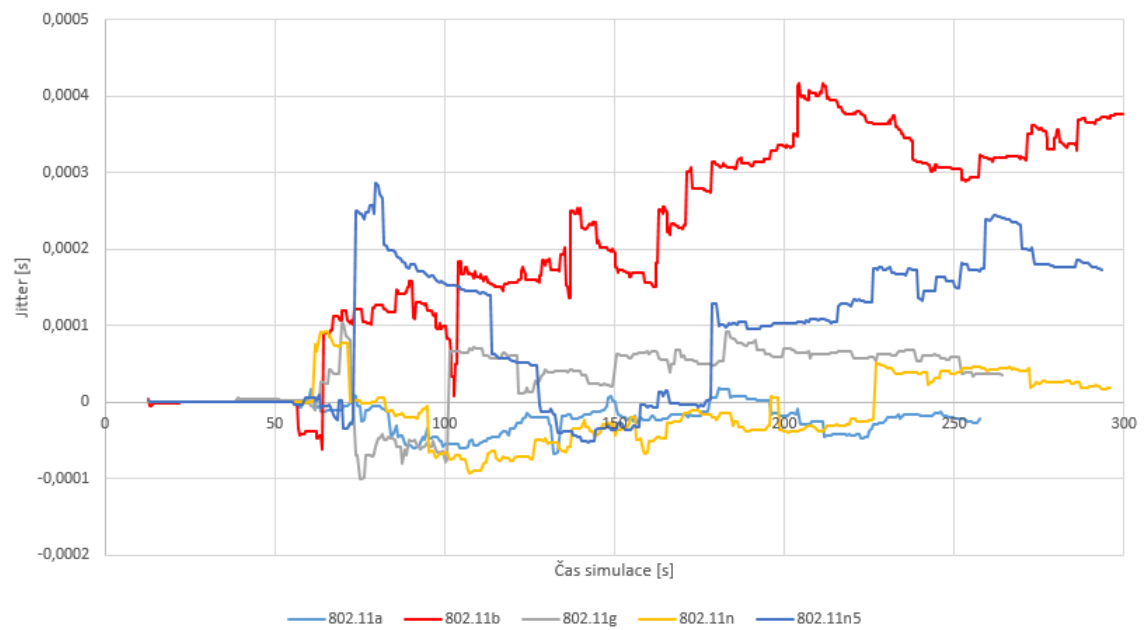
Obr. 6.13: Vliv zátěže na parametr jitter v 802.11b/g/a

MOS a jitter u sítí s QoS

Vytvořené scénáře se standardem 802.11n, již defaultně podporují QoS pomocí funkce HCF. U ostatních bylo nutno tuto funkcionalitu zapnout a tím vytvořit prostředí pro proozy závislé na kvalitě linky. Tímto bylo docíleno zajištění QoS v simulačním programu OPNET. Když porovnáme s předchozím grafem 6.12, tak hodnota MOS u standardu 802.11b klesne na hodnotu 3. Tímto jsme docílili, že z původního hovoru se silným rušením, je hovor pouze s mírným rušením. U sítí 802.11a/g není rozdíl takto značný, což je dáno tím, že přenosová rychlost je několika násobně vyšší než v případě 802.11b a tak i síť bez prioritizace dat byla schopna hovorová data přenášet tak, že hovor byl vyhodnocen s minimálním MOS hodnotou 3.7. U sítí 802.11n je MOS parametr stále nad hodnotou 4, což zaručuje téměř čistý hovor bez známek rušení či šumu. U sítí s QoS dosahuje jitter maximální hodnoty 0,4 ms, znázorněno na obrázku 6.15. Při porovnání se sítí bez zajištění QoS je hodnota jitteru desetkrát nižší.



Obr. 6.14: Vliv zátěže na parametr MOS v 802.11b/g/a/n s QoS



Obr. 6.15: Vliv zátěže na parametr jitter v 802.11b/g/a s QoS

6.3 Emulovaná síť - Vliv zpoždění, jitteru a ztrátovosti na kvalitu hovoru

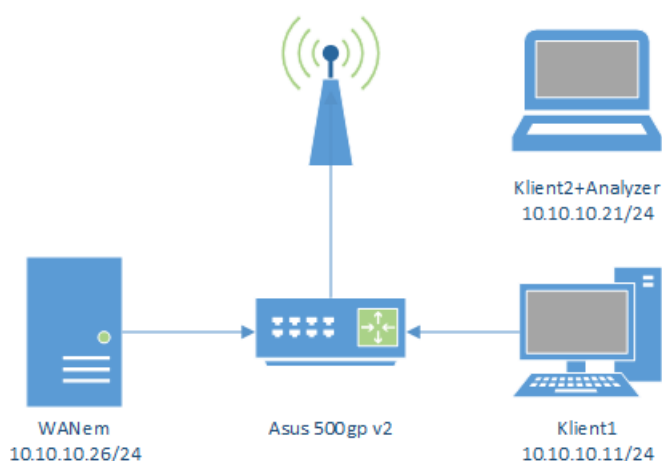
6.3.1 Popis

Druhá část praktické části se zabývá sestavenou fyzickou sítí se dvěma počítači, kdy jeden je připojený pomocí Linksys Compact Wireless-G USB Adapteru a druhý připojen pomocí 100 Mbps Ethernetu. Do sítě je dále připojený WANem server [26], na který se posílaly pakety probíhající komunikace mezi oběma počítači (konfigurace přesměrování paketů je napsaný kód níže). WANem upravuje parametry prvky sítě. Při měření bylo měněno zpoždění, jitter a ztrátovost paketů. Jako síťový prvek byl použit WiFi router Asus 500gP v2, jenž vytvářel bezdrátovou síť 802.11g o rychlosti 54 Mbps. Schéma sítě je na obr. 6.16.

```
route add 10.10.10.24 mask 255.255.255.255 10.10.10.26
route add 10.10.10.12 mask 255.255.255.255 10.10.10.26
```

VoIP aplikace nainstalovaná na Klientovi1 byla Phonetite [24], na druhém bylo používáno Jitsi [23] spolu se síťovým analyzátozem CommView 6.1 [25]. Při hovoru byl použit kodek μ -law. Délka jednoho hovoru byla zvolena na jednu minutu. Výsledky měření jsou vyznačeny na další stránce v podobě parametrů MOS a R-Factor určujících kvalitu hovoru.

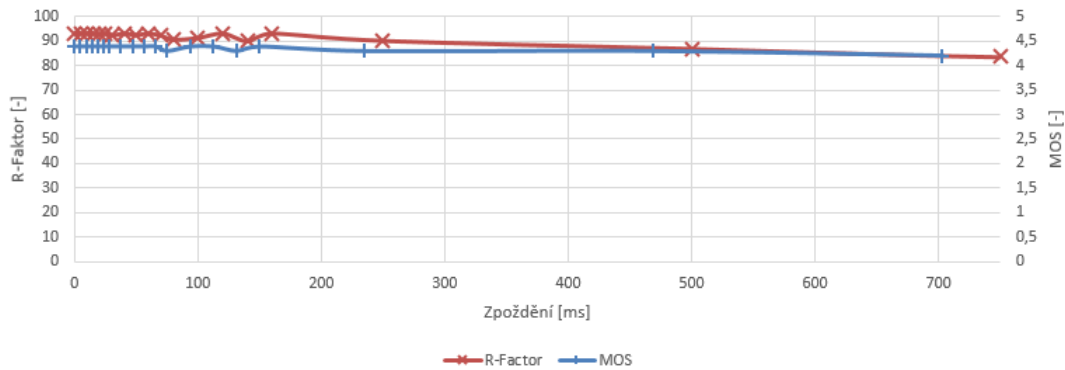
6.3.2 Schéma zapojení sítě



Obr. 6.16: Schéma zapojení sítě

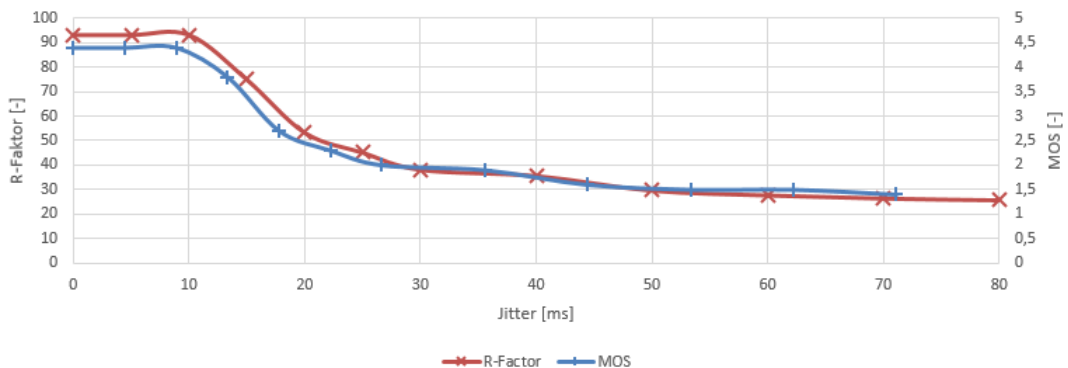
6.3.3 Výsledky měření

Na prvním grafu 6.17 lze vyčíst, že vliv zpoždění nemá významný vliv na parametry MOS či R-Faktor. Je to zejména dáno tím, že hovor je i nadále čistý bez šumu, pouze je přenášen hovor sítí déle. Pokud obě strany jsou seznámy s výší zpoždění, jsou schopny se domluvit, ale jako maximální zpoždění bych stanovil na 3s pro plynulou komunikaci.



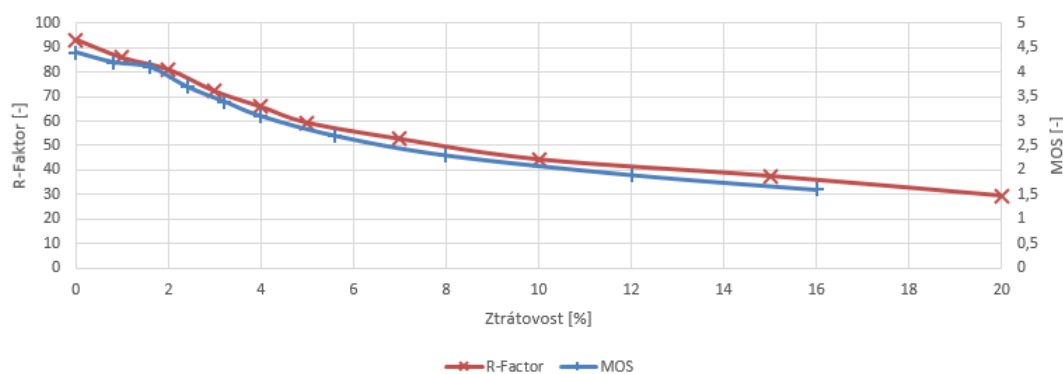
Obr. 6.17: Vliv změny zpoždění na MOS/R-Faktor

Další upravovaný parametr jitter pomocí WANem již významně ovlivňuje přenášený hovor. Jitter je přesněji zpoždění mezi za sebou jdoucími pakety a jelikož hovor potřebuje mít přijaté rámce přesně dle toho, jak byly vyslány, aby je mohl poskládat znovu a přehrát v reproduktoru přijímací strany. Proto se kvalita hovoru dle parametru MOS a R-Faktoru začala zhoršovat od hranice 10ms, kdy již okolo hodnoty 20ms byl hovor označen dle MOS (tab. 4.1) hodnoty jako hovor s nízkou kvalitou, tedy rušení už dosahuje takové hodnoty, které už samotný hovor obtěžuje. Dle R-Faktor hodnoty (tab. 4.2) je hovor již nevyhovující.



Obr. 6.18: Vliv změny jitteru na MOS/R-Faktor

V posledním měření ve vytvořené emulované síti byla měněna ztrátovost paketů. Dle grafu 6.19 při dosažení hodnoty ztrátovosti 2% byl hovor stále kvalitní. Při hodnotě okolo 4% je hovor vyhodnocen jako hovor s rušením, které mírně obtěžuje, ale hovor je stále možné označit jako hovor s dostatečnou kvalitou. Od hodnoty 6% a více je hovor již nedostatečný. Vliv ztrátovosti na kvalitu hovoru má ještě úzkou spojitost s použitým kodekem hovoru.



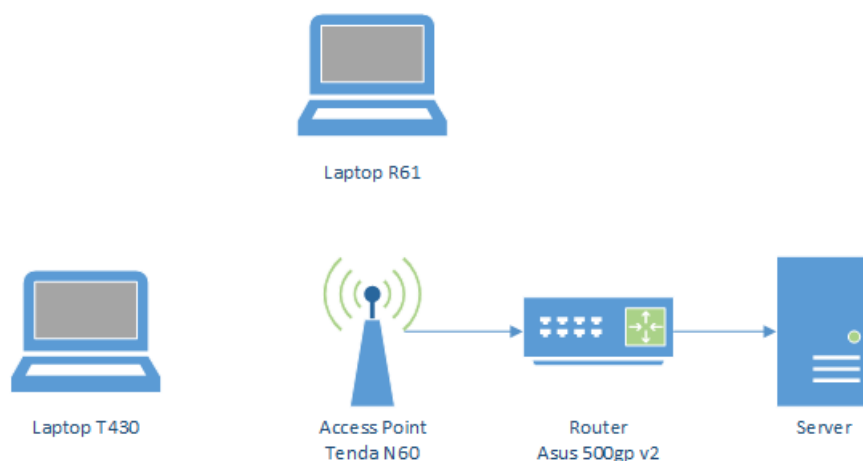
Obr. 6.19: Vliv změny ztrátovosti na MOS/R-Factor

6.4 Měření - Přenos audio/video provozu v reálné síti

Ve třetí části praktické části se práce zabývá přenosem audio/video obsahu skze simulovanou sít (obr. 6.20). Síť je složena notebooku Lenovo T430, procesor i5-3320M s 8GB pro zajištění plynulosti přehrávání testovaného audio/video obsahu. Notebook je vybaven síťovým adaptérem Intel® Centrino® Advanced-N 6205, jenž dokáže obsluhovat standardy 802.11a/b/g/n. Druhý notebook Lenovo R61 se síťovým adaptérem Intel® Wireless WiFi Link 4965AGN vytvářel zátěž sítě pomocí FTP a HTTP requestů. Streamovací server VLC [28], Caesar FTP [35] a IIS HTTP server běžel na operačním systému Windows Server 2012 R2 virtualizovaný pomocí programu Oracle VM Virtualbox [27]. Pomocí programu VLC se streamovalo video stažené z youtube.com [29], ve formátech 480p, 720p, 1080p, 1440p, 2160p.

6.4.1 Schéma zapojení sítě

Síťové prvky byly použity Tenda N60 s neoficiálním firmwarem Tomato [34] verze 128, jehož rozhraní dovoluje nastavení pokročilých nastavení a vypnutí/zapnutí



Obr. 6.20: Schéma zapojení sítě

funkce WMM. Další síťový prvek byl použit Asus 500gp v2, k němuž byl připojen počítač, na kterém běžel virtuální server s operačním systémem Windows 2012 R2.

6.4.2 Nastavení notebooku R61

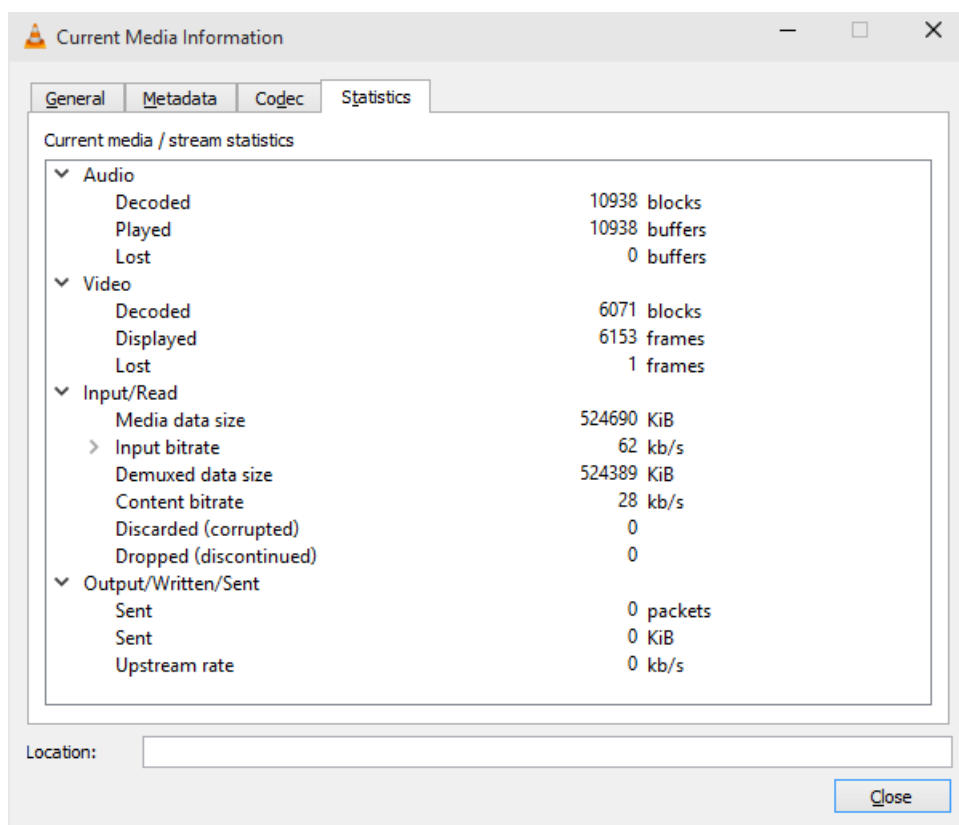
Na notebooku byl spuštěna aplikace Total Commander [35], jako klient pro stahování z FTP serveru. Stahován byl jeden soubor o velikosti 237MB, jenž bylo video použité i ke streamování a to konkrétně „Sample 4k UHD (Ultra HD) video download (1440p)“. Druhá aplikace testující spojení s HTTP serverem byla Webserver Stress Tool 8. [36] Aplikace simulovala 20 uživatelů dotazujících se HTTP serveru. Zpoždění mezi každými dotazy uživatele bylo nastaveno na 2 sekundy. Délka testu byla omezena dobou trvání 5 minut.

6.4.3 Nastavení notebooku T430

Na notebooku Lenovo T430 byla spuštěna pouze aplikace VLC, jako klient streamovaného audio/video obsahu. Připojovala se na URL: „HTTP://10.0.35.39:1234“. Streamování přes RTP protokol vždy rebootoval síťový prvek Tenda N60, proto byl zvolen jako distribuční protokol HTTP na portu 1234. Pomocí programu VLC byl analyzován průběh streamovaného audio/video obsahu viz obr. 6.21.

6.4.4 Nastavení serveru Windows 2012 R2

Na virtualizovaném serveru Windows 2012 R2 pomocí Virtualboxu byl nainstalován HTTP server IIS. Dále byl spuštěn FTP server pomocí aplikace Caesar FTP s přístupem jednoho uživatele do fyzické složky na serveru „C:“, kde byl uložen soubor



Obr. 6.21: Informace o přehraném obsahu v programu VLC

o velikosti 237MB, jak již bylo zmíněno výše. Streamovací server byl vytvořen pomocí programu VLC, kdy bylo postupně streamováno video o kvalitě 480p, 720p, 1080p, 1440p a 2160p.

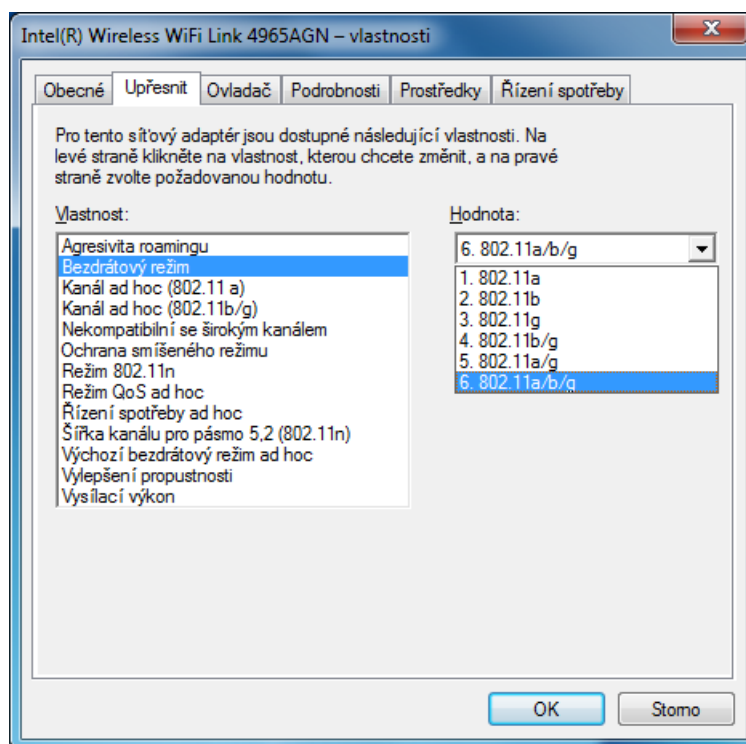
6.4.5 Nastavení routeru Tenda N60

Na routeru Tenda N60 s firmwarem Tomato verze 128 byly nastaveny 2 bezdrátové sítě a to první využívající 802.11b/g/n rozprostřena v pásmu 2.4 GHz na kanále 6 se zabezpečením přenosu WPA2 (Wi-Fi Protected Access) využívající šifrování pomocí AES (Advanced Encryption Standard). Druhá bezdrátová síť využívající 802.11a/n běžící na 5 GHz (kanál 36)

6.4.6 Popis měření

1. Spuštění FTP přenos.
2. Po 5 sekundách spuštěny dotazy na HTTP server pomocí Webstress toolu.
3. Po 5 sekundách vytvořen stream audio/videoa provozu.
4. Po 10 sekundách navázání spojení klienta se streamovacím serverem.

V době měření se nacházela pouze jedna bezdrátová síť v dosahu a to síť s názvem SSID „Internet“, která vysílala na kanále číslo 6 šířkou 20 MHz. Testovací síť vysílala taky na kanále 6 (v případě 802.11b/g/n), pro větší přiblížení podmínkám v reálném prostředí, kdy v panelových domech je značné rušení. Nastavení bezdrátového režimů klientů bylo nastaveno přímo na ovladači bezdrátového zařízení viz obr. 6.22, stejně tak i povolení/zakázání funkce WMM či režimu 802.11n.

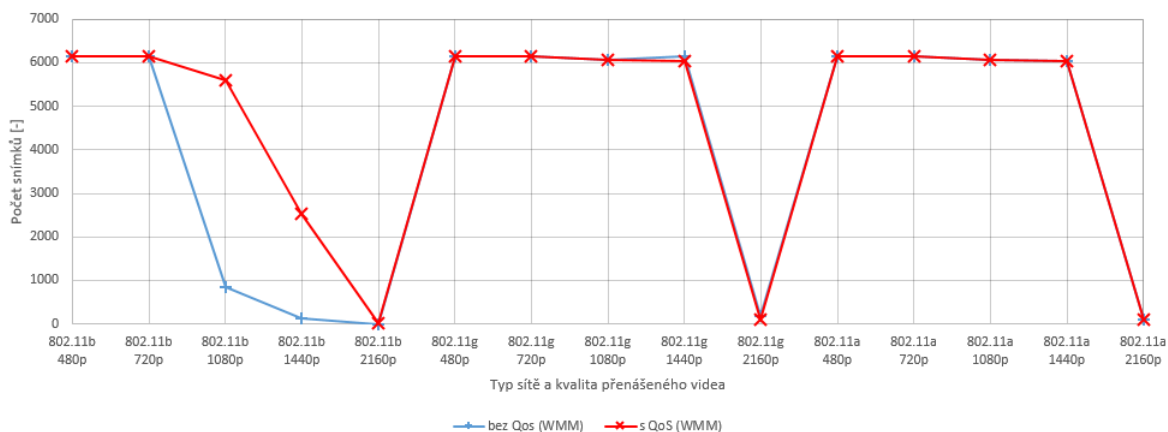


Obr. 6.22: Vlastnosti ovladače bezdrátového zařízení u Lenovo R61

6.4.7 Grafy z měření

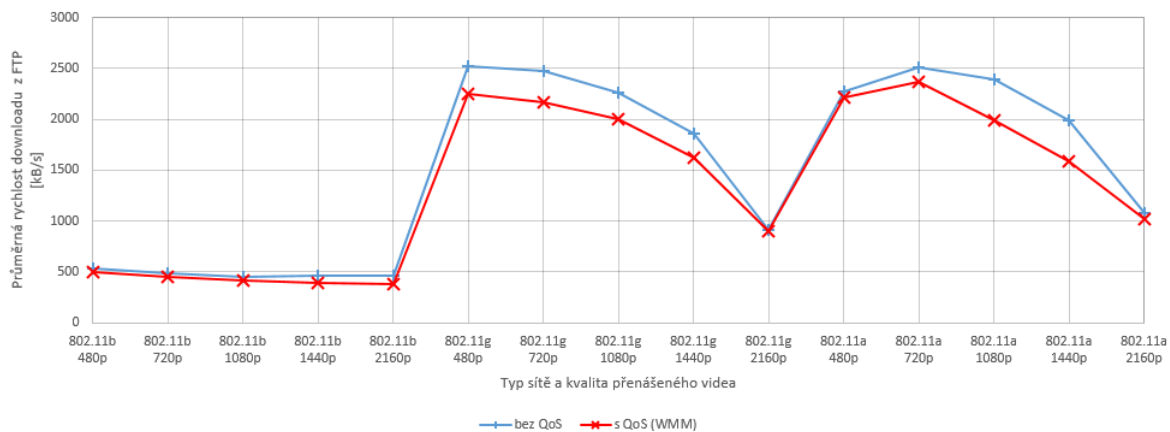
Z níže uvedeného grafu 6.23 lze vyčíst, že streamované video o kvalitách 480p a 720p bylo přehráno bez výpadků na všech typech sítí 802.11a/b/g a to bez i s funkcí WMM zajišťující v našem případě QoS. Streamování kvality 1080p na síti 802.11b bez prioritizace pomocí WMM měl za následek zobrazení pouze 857 snímků. Maximální reálná přenosová rychlost je 5 Mbps u sítě 802.11b, streamované video dosahuje průměrného toku dat taktéž přibližně 4 Mbps. V sítích funkce zajištění QoS je přenosové pásmo děleno mezi provoz rovnoměrně, takže proto nemohlo být zajištěn plynulý přenos videa po síti. Při zapnuté funkci WMM už je z grafu patrné, že síť prioritizovala streamovaný video obraz a potlačila ostatní provoz na síti. U videa kvality 1440p se totéž opakuje, ale jelikož tok videa je vyšší (průměr 8 Mbps) než

dovoluje standard 802.11b přenést, zde již funkce WMM nepomohla. U sítě 802.11a/g bylo problém přenést video 2160p, jehož průměrná přenosová rychlost dosahovala rychlosti 25 Mbps, což je opět vyšší než reálná přenosová rychlost těchto standardů. U standardů 802.11n (2.4 Ghz a 5 Ghz) nebyl zaznamenán výpadek a streamovaná data byla přehrána bez ztráty snímku ve všech kvalitách.



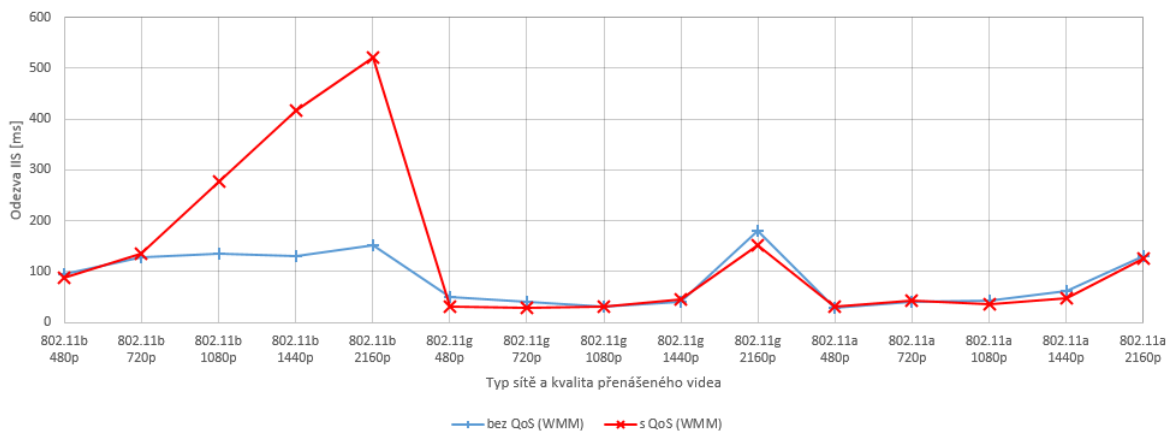
Obr. 6.23: Počet přenesených snímků dle typu sítě a kvality videa

U grafu 6.24 je zřejmé, že při zapnutí funkce WMM se snížila průměrná rychlost FTP přenosu, což mělo za následek hlavně u sítě 802.11b plynulé přehrávání videa až do kvality 1080p.



Obr. 6.24: Rychlost stahování z FTP

Odezva se mění v závislosti na funkci WMM a streamovaný provoz má přednost. Proto v síti 802.11b se výrazně navýšila odezva od ISS HTTP serveru. HTTP provoz není tolik citlivý na zpoždění a proto byl vyhodnocen klientem, posléze i routerem, jako méně prioritní.



Obr. 6.25: Odezva od IIS HTTP serveru

7 ZÁVĚR

V diplomové práci jsou popsána základní pravidla připojení bezdrátové stanice do sítě WiFi a jejich možné typy. Dále popisuje přístup k médiu pomocí metody CDMA/CA a její možné vylepšení v podobě standardu 802.11e, který přidává podporu QoS v bezdrátových sítích.

V praktické části je v simulačním programu OPNET navržená síť využívající standardy 802.11a/b/g/n podrobena testům, při kterých se zkoumá, jaký vliv mají aplikace ftp, http, video konference na probíhající VoIP hovor bez/s použití techniky QoS. U sítě s technologií 802.11b byly naměřeny nejhorší výsledky, jistý vliv na to měla max. přenosová rychlost, která je pouze 11 Mbps. Samotný tok video konference dosahoval rychlosti 45 Mbps, avšak síť zvládala přenášet pouze rychlostí 5 Mbps, proto se musela vyrovnat s nadměrným tokem na vstupu a tak došlo k zahazování paketů. MOS hodnota klesla až na hodnotu 2, což je již pro hovor nedostatečné. Další síť 802.11a/g dosahovaly propustnosti 26 Mbps a tak jejich kapacita byla taktéž plně zatížena. Ale i v tomto případě byl patrný pokles kvality určujícího parametru MOS, který dosahoval hodnoty okolo 3.7, což je považováno za dobré, jen s mírným šumem. Síť standardu 802.11n dosahovala nejlepších výsledků a to díky defaultně zapnuté funkci HCF a PCF, tak i vysoké přenosové rychlosti.

Druhá část se zabývá měřením na reálné síti složené ze dvou počítačů uskutečňujících VoIP hovor a serveru WANem, jež simuluje zhoršující se podmínky bezdrátového spojení. V této části bylo zjištěno, že velikost zpoždění nemá vliv na kvalitu určující ukazatele MOS a R-Factor. Při změně jitteru však došlo z výraznému poklesu už při nastaveném 15 ms jitteru. Při hodnotě nad 20 ms byl už hovor označen za neakceptovatelný. Dále se testoval vliv ztrátovosti. Při hodnotě 3% byl hovor už pouze postačující a hodnoty nad 6% byly vyhodnoceny jako hovor se značným rušením omezujícím hovor natolik, že nebyl použitelný.

V třetí praktické části je přenos streamovaného videa v reálné síti a vliv ftp spolu s http provozem na jeho kvalitu. U sítě 802.11b bylo zjištěno, že při zapnutí funkce WMM na routeru a klienta pro dosažení QoS v bezdrátové síti bylo možné streamovat video až do kvality 1080p. U sítě 802.11a/g bylo možné přehrát video až do kvality 1440p, streamování video kvality 2160p již naráželo na rychlostní hranice bezdrátové sítě. Plnou kvalitu 2160p bylo možné přehrát pouze pomocí sítě se standardem 802.11n (2.4Ghz i 5Ghz) zcela bez problémů.

LITERATURA

- [1] BIGELOW, S., J. *Mistrovství v počítačových sítích*. Nakladatelství CPRESS 2004. ISBN 80-251-0178-9.
- [2] MATAS, J. *Linux jako brána do sítě Internet*. [Bakalářská práce]. Ústav Telekomunikací FEKT VUT v Brně. 2007.
- [3] BARKEN, Lee. *Wi-Fi : jak zabezpečit bezdrátovou síť. 1. vyd.* Brno Computer Press, 2004. 174 s. ISBN 80-251-0346-3.
- [4] ZANDL, Patrick *Bezdrátové sítě WiFi*. 2003. 204 s. ISBN 80-722-6632
- [5] KRAJSA, Ondřej a Václav ZEMAN. *MVDP_L5* [online]. 2012 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/file.php/124619/MVDP_L5.pdf>
- [6] PRASAD, Anand R. a Neeli R. PRASAD. *802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility* United States of America: British Library, 2005. ISBN 1-58053-789-8.
- [7] ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě WiFi: Praktický průvodce* Brno: Computer Press, a.s., 2003. ISBN 80-7226-632-2.
- [8] ROSHAN, Pejman a Jonathan LEARY. *802.11 Wireless LAN Fundamentals* USA: Cisco Press, 2003. ISBN 1-58705-077-3.
- [9] IEEE 802.11. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012, 17. 10. 2012 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/802.11>>
- [10] PUŽMANOVÁ, Rita. Lupa.cz. *Bezdrátové lokální sítě WLAN podle IEEE II.* [online] 2002 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <<http://www.lupa.cz/clanky/bezdratove-lokalni-site-wlan-podle-ieee-ii/>>
- [11] PUŽMANOVÁ, Rita. Lupa.cz. *Kvalita služby ve WLAN: 802.11e* [online] 2004 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <<http://www.lupa.cz/clanky/kvalita-sluzby-ve-wlan-802-11e/>>
- [12] SLIŽ, Vítězslav. VŠB: Katedra Informatiky. *Technologie počítačových sítí: Projekt - konfiguraci mechanismu QoS podle standardu IEEE 802.11e na přístupových bodech Cisco Airone* [online] 2008 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <<http://www.cs.vsb.cz/grygarek/TPS/projekty/0708Z/80211e.pdf>>

- [13] DAŘÍLEK, Martin. VŠB: Katedra Informatiky. *Standardy 802.11e a 802.11i [online]* 2009 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.cs.vsb.cz/grygarek/TPS/projekty/0506Z/tps_dar022.pdf>
- [14] MOLNAR, Karol. *Seznámení se simulačním nástrojem OP-NET Modeler [online]*. 2012 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~molnar/bhws/Lab_uloha-07-Seznameni_OM_ver03.pdf>
- [15] BRADA, Miloslav a Jan ZELENKA. *POSUZOVÁNÍ KVALITY HLASU [online]* 2008 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.ip-telefon.cz/archiv/dok_osta/ipt-2008_Posuzovani_kvality_hlasu.pdf>
- [16] VOZNAK, Miroslav a David ZUKAL. *Vyhodnocení kvality hovoru pomocí R-faktoru v sítích VoIP [online]* 2005 [cit. 2012-12-10]. Technická zpráva 11/2005. Dostupné z WWW: <http://homel.vsb.cz/~voz29/files/voz_71.pdf>
- [17] DOSTÁLEK, Libor a Alena KABELOVÁ. *Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS* Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-7226-323-4.
- [18] Network Working Group. *IETF [online]*. 2002 [cit. 2012-12-10]. *SIP: Session Initiation Protocol*. Dostupné z URL: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>>.
- [19] Session Initiation Protocol. *In Wikipedia : the free encyclopedia [online]*. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8.5.2006, last modified on 13.11.2010 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Session_Initiation_Protocol>.
- [20] FIRESTONE, Scott; RAMALINGAM, Thiya; FRY, Steve. *Voice and Video Conferencing Fundamentals*. USA : Cisco Press, 2007. 376 s. ISBN 978-1-58705-268-2.
- [21] Samuraj-cz.com. *Cisco QoS 1: úvod do Quality of Service a DiffServ [online]* 2009 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <<http://www.samuraj-cz.com/clanek/cisco-qos-1-uvod-do-quality-of-service-a-diffserv/>>
- [22] PUŽMANOVÁ, Rita a Miroslav VOZŇÁK. Cesnet. *Kvalita VoIP souvisí se zabezpečením hovorů [online]* 2009 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z: <http://www.cesnet.cz/sdruzeni/napsali-onas/2009/04/20090415_Professional_Computing.html>
- [23] *Jitsi (SIP Communicator)* [online]. 2012 [cit. 2012-12-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.jitsi.org/index.php/Main/HomePage>>.

- [24] *PhonerLite* [online]. 2012 [cit. 2012-12-11]. Dostupný z WWW: <http://www.phonerlite.de/index_en.htm>.
- [25] *CommView 6.1* [online]. 2012 [cit. 2012-12-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tamos.com>>.
- [26] *The Wide Area Network emulator* [online]. 2009 [cit. 2012-12-11]. Dostupný z WWW: <<http://wanem.sourceforge.net/>>.
- [27] *Oracle VM Virtualbox*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-07]. Dostupný z WWW: <<https://www.virtualbox.org/>>.
- [28] *VideoLAN - Official website* [online]. 2015 [cit. 2015-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.videolan.org/vlc/>>.
- [29] *Youtube* [online]. 2015 [cit. 2015-05-07]. Dostupný z WWW: <<https://www.youtube.com/>>.
- [30] *Wireless Multimedia Extensions*. [online]. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation 2010 [cit. 2015-05-10]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_Multimedia_Extensions>.
- [31] *WMM and U-APSD Power save mode*. [online]. 2012 [cit. 2015-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://ilovewifi.blogspot.cz/2012/08/wmm-and-u-apsd-power-save-mode.html>>.
- [32] *WMM* [online]. Marigold 2012 [cit. 2015-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.marigold.cz/wifi/doku.php/wmm>>.
- [33] *WLAN Quality of Service*. [online]. Cisco.com 2010 [cit. 2015-05-10]. Dostupný z WWW: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/vowlan/41dg/vowlan41dg-book/vowlan_ch2.html#wp1045641>.
- [34] *Tomato by Shibby - Alternatywne oprogramowanie na routery* [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://tomato.groov.pl/>>.
- [35] *ACLogic - CesarFTP* [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.aclogic.com/>>.
- [36] *Total Commander - home* [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.ghisler.com/>>.

- [37] *Websvrer Stress Tool - website performance , stress and load testing* [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupný z WWW: <<https://www.paessler.com/tools/webstress/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACK acknowledge

AES Advanced Encryption Standard

AIFS Arbitration Interframe Space

AP Access Point – česky přístupový bod

APSD Automatic Power Save Delivery

CCK Complementary Code Keying

CRC Cyclic redundancy check

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

CTS Clear to Send

CW Contention Window

DCF Distributed Coordination Function

DIFS DCF InterFrame Space

DSSS Direct sequence spread spectrum

EDCF Enhanced Distribution Coordination Function

FHSS Frequency hopping spread spectrum

FTP File Transfer Protocol

HCCA HCF Controlled Channel Access

HCF Hybrid Coordination Function

HTTP Hypertext Transfer Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFS InterFrame Space

LAN Local Area Network

MAC Medium access control

MIMO Multiple Input Multiple Output
MOS Mean Opinion Score
NoACK Not Acknowledged
OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OM OPNET Modeler
PHY Physical layer
RTS Request to Send
RTP Real Time Transport Protocol
RTCP Real Time Control Protocol
SIFS Short InterFrame Space
SIP Session Initiation Protocol
SMTP Simple Mail Transfer Protocol
SSID Service Set Identifier
TCP Transmission Control Protocol
PCF Point Coordination Function
QoS Quality of Service
UDP User Datagram Protocol
VoIP Voice over Internet Protocol
WiFi Wireless Fidelity
WLAN Wireless Local Area Network
WPA Wi-Fi Protected Access
WMM Wi-Fi Multimedia

A PŘÍLOHY

Projekt DP_final, návrh sítě v programu Riverbed Modeler Academic Edition 17.5.
Na přiloženém DVD.