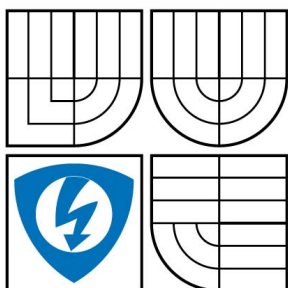


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EFEKTIVITA BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ Z POHLEDU SLUŽEB

EFFECTIVENESS OF WIRELESS NETWORKS FROM THE SERVICES VIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

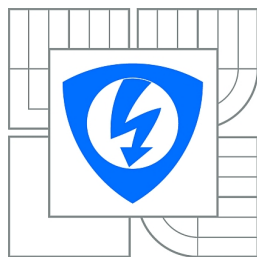
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK BUCHTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV ŠKORPIL, CSc.

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Marek Buchta

ID: 78208

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Efektivita bezdrátových sítí z pohledu služeb

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se standardem WiFi sítí IEEE 802.11 se zaměřením na efektivitu bezdrátových sítí z pohledu služeb. Popište protokoly a principy WiFi sítí a principy služeb, především IP telefonů, VoIP, přenosu videa a multimedií obecně. Zvýšenou pozornost věnujte kvalitě služby QoS. Diskutujte a analyzujte možnosti používaných služeb a samotné Wifi sítě. Na podkladě získaných poznatků navrhnete kompletní řešení WiFi sítě se zajištěnou nabídkou služeb. Navrženou síť modelujte pomocí softwarového vývojového prostředí Opnet Modeler, model využijte k optimalizaci návrhu a k analýze komunikační sítě a služeb, simulujte vlastnosti dat citlivých na zpoždění. Výsledky připravte k využití v laboratorní výuce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PUŽMANOVÁ, R. Moderní komunikační sítě A-Z. Computer Press, Brno 2007
- [2] BLUNÁR, K. a DIVIŠ, Z. Telekomunikačné siete. ŽU, Žilina 2000.
- [3] PUŽMANOVÁ, R. Širokopásmový Internet. Computer Press, Brno 2004.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předmětem práce bylo věnovat se problematice efektivity bezdrátových sítí z pohledu služeb. Seznámit se se standardem WiFi sítí IEEE 802.11, s protokoly a principy WiFi sítí a služeb. Pozornost měla být věnována kvalitě služeb QoS.

V teoretické části této diplomové práce je podrobně popsána problematika zabývající se bezdrátovými sítěmi, jejich vrstevným modelem a typy sítí používaných ve WiFi. Je zde podrobně rozebrán standard IEEE 802.11 včetně jeho dodatků a jeho používaných paketů. Zvýšená pozornost je věnována kvalitě služby QoS. Dále jsou zde diskutovány principy a použití služeb, jako je VoIP, Videokonference, Streamované video a další, ve WiFi síti.

Na podkladě získaných poznatků je navržena rozsáhlá WiFi síť se zajištěnou nabídkou služeb. Pro modelování a simulaci bezdrátové sítě je použit softwarové vývojové prostředí Opnet Modeler. Model bezdrátové sítě je využit k optimalizaci návrhu a k analýze této bezdrátové komunikační sítě. V práci jsou také simulovány vlastnosti dat citlivých na zpoždění.

V poslední části práce je vytvořena laboratorní úloha, která obsahuje zadání úlohy, podrobnou teorii, schéma zapojení, pokyny pro vypracování, pokyny pro simulaci a vzorové vypracování úlohy. V úloze se jedná o srovnání sítě s použitým standardem 802.11b a 802.11e s podporou kvality služeb QoS.

Klíčová slova: WiFi, IEEE 802.11, kvalita služeb QoS, VoIP, Videokonference, Streamované video, Opnet Modeler

ABSTRACT

Subject of this thesis was the issue of effectiveness of wireless networks from the perspective of services. Become acquainted with WiFi network standard IEEE 802.11 with protocols and principles of WiFi networks and services. It should be focused on the quality of service QoS.

In teoretical part of this thesis are described problems considering wireless networks, layer model and types of nets used in WiFi. Standard IEEE 802.11 is analysed in details including supplements and used packets. Special attention is paid to the quality of service QoS. Next are discussed the principles and application services as VoIP, videoconferencing, video streaming and others in WiFi network.

On the basis of obtained knowledge is designed extensive WiFi network with assured supply of services. For modelling and simulation of wireless network is used software development environment Opnet Modeler. Model of wireless network is used to optimize and analyse this wireless communication network. In thesis are also simulated properties of data which are sensitive to delay.

In last part of thesis is created a laboratory work, which contains a submission of task, detailed theory, wiring diagram, instructions for elaboration, guidelines for simulation and example of elaboration of task. Work is about comparison of network with used 802.11b and 802.11e standard, and support of quality of service QoS.

Keywords: WiFi, IEEE 802.11, quality of service QoS, VoIP, Videoconferencing, Video streaming, Opnet Modeler

BUCHTA, M. *Efektivita bezdrátových sítí z pohledu služeb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Efektivita bezdrátových sítí z pohledu služeb“ 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Vladislavovi Škorpilovi, CSc. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

OBSAH

1	Úvod	9
2	Standard bezdrátových WiFi sítí IEEE 802.11	10
2.1	Jednotlivé standardy IEEE 802.11 a jeho dodatky	11
2.2	Vrstvový model bezdrátových sítí	14
2.2.1	Fyzická vrstva	14
2.2.2	Spojová vrstva	18
2.3	Pakety standardu IEEE 802.11	21
2.3.1	Řídicí pakety standardu 802.11	21
2.3.2	Pakety managementu standardu 802.11	22
2.3.3	Datové pakety standardu 802.11	22
2.4	Typy sítí používaných ve WiFi	22
2.4.1	Ad-Hoc	23
2.4.2	BSS	23
2.4.3	ESS	24
3	Kvalita služeb QoS	24
3.1	Parametry QoS	25
3.1.1	Ztrátovost paketů	25
3.1.2	Koncové zpoždění	26
3.1.3	Kolísání zpoždění	26
3.1.4	Šířka pásma	26
3.2	Standard IEEE 802.11e	27
3.3	Režimy komunikace	28
3.3.1	DCF (Distributed Coordination Function)	28
3.3.2	PCF (Port Coordination Function)	29
3.3.3	EDCF (Enhanced DCF)	30
3.3.4	HCF (Hybrid Coordination Function)	31
4	Služby	31
4.1	VoIP	32
4.2	VoWLAN	33
4.3	Videokonference	33
4.4	Streamované video	34
5	Návrh řešení WiFi sítě	35
5.1	Opnet Modeler	36
5.1.1	Základní prvky prostředí Opnet Modeler	36
5.1.2	Editory prostředí Opnet Modeler	36
5.2	Návrh sítě	37
5.2.1	Schéma zapojení	38
5.2.2	Popis jednotlivých prvků sítě a jejich konfigurace	39

5.3	Simulace.....	40
5.3.1	Nastavení simulace	41
5.4	Výsledky simulace a optimalizace	43
5.4.1	Provoz v síti (traffic).....	43
5.4.2	Statistiky parametrů QoS.....	45
6	Laboratorní úloha	52
6.1	Podrobná teorie	52
6.2	Zadání	53
6.3	Schéma zapojení	53
6.4	Pokyny pro vypracování a konfigurace prvků sítě	54
6.5	Pokyny pro simulaci.....	56
6.6	Výsledky simulace.....	57
7	Závěr	60
8	Seznam literatury	61
9	Seznam obrázků.....	63
10	Seznam tabulek.....	65
11	Seznam použitých zkratk a symbolů	66

1 Úvod

V dnešní době se bezdrátové služby staly nejvíce rozšiřujícími se informačními technologiemi. S vysokým rozvojem využívání těchto služeb roste i nárok na spolehlivost, bezpečnost a vzájemnou kompatibilitu mezi informačními systémy. Bezdrátová technologie je téměř všudypřítomná a díky její ceně je i poměrně lehce dostupná a nejvíce používaná. Bezdrátový přenos umožňuje uživatelům mobilitu, pohodlí a dle použité technologie i velkou kvalitu přenosu dat, zvuku či videa. Hlavním představitelem sítě, která umožňuje přenos dat sdíleným bezdrátovým médiem je bezdrátová lokální síť WLAN. Lokální bezdrátové sítě podléhají standardu WiFi, jenž vychází ze specifikace IEEE 802.11.

Úkolem této práce je seznámit se se standardem bezdrátových WiFi sítí IEEE 802.11 se zaměřením na efektivitu bezdrátových sítí z pohledu služeb. Budou zde popsány protokoly a principy WiFi sítí a principy služeb, především IP telefonů, VoiP, přenosu videa a multimedií obecně. Zvýšená pozornost bude věnována kvalitě služeb QoS. Bude se zde diskutovat a analyzovat možnosti používaných služeb a samotné Wifi sítě.

Na podkladě získaných poznatků bude navrženo rozsáhlé řešení WiFi sítě se zajištěnou nabídkou služeb. Navržená WiFi síť bude modelována pomocí softwarového vývojového prostředí Opnet Modeler. Model zde bude využit k optimalizaci návrhu a k analýze komunikační sítě a služeb. V práci bude také simulace vlastností dat citlivých na zpoždění. Budou zpracovány výsledné statistiky a grafy.

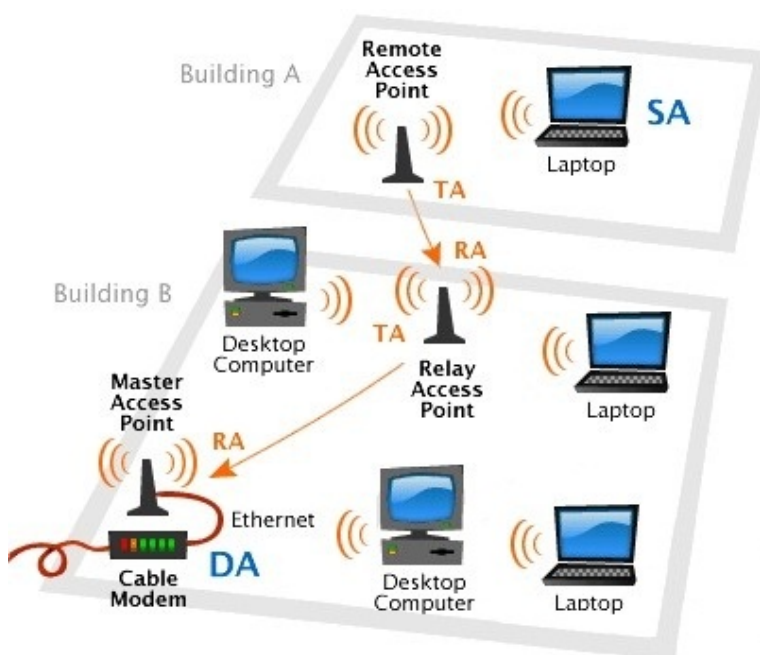
V poslední části práce bude vytvořena laboratorní úloha, která bude obsahovat vše potřebné pro zvládnutí laboratorní úlohy v rámci jednoho laboratorního cvičení. Bude zde vypracována podrobná teorie, zadání, schéma zapojení, pokyny pro vypracování, pokyny pro simulaci a také vzorové vypracování úlohy. Úloha bude realizována tak, aby studenti byli schopni odměřit celou úlohu samostatně.

2 Standard bezdrátových WiFi sítí IEEE 802.11

IEEE 802.11 [1], [3], [6] je Wi-Fi standard s dalšími doplňky pro lokální bezdrátové sítě (WLAN). Tento standard vznikl roku 1997 pod 11. pracovní skupinou IEEE LAN/MAN standardizační komise (*IEEE 802*). Výraz 802.11x je používán pro množinu doplňků k tomuto standardu. Výraz *IEEE 802.11* je také spojován s původním 802.11 standardem (tedy bez dalších doplňků). První zmínka je však datována k roku 1992, kdy bylo americkým FCC a evropským ETSI uvolněno bezlicenční pásmo 2,4GHz pro průmyslové, vědecké a lékařské (ISM - Industrial Scientific and medical).

Vznikl tedy standard s označením IEEE 802.11, který obsahoval základní schéma bezdrátové komunikace, včetně definování 1. a 2. vrstvy v ISO modelu. Disponoval přenosovou rychlostí 1 nebo 2 Mbit/s ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. V této době pracoval konkurenční „drátový“ Ethernet s rychlostmi okolo 10 Mbit/s a tak mu bezdrátové řešení nebylo schopno konkurovat. Postupem času se ale tento standard zdokonaloval jak z hlediska větších přenosových rychlostí, tak i snižující se ceny koncových zařízení, což nakonec vedlo k masovému rozšíření technologie WiFi.

Základem každé WiFi sítě je jeden nebo více přístupových bodů AP (Access Point). Přístupový bod AP umožňuje bezdrátovým stanicím WS (Wireless Station) připojit se a komunikovat se zařízeními v různorodých sítích (LAN, nebo v jiné WiFi). V dnešní době běžné WiFi sítě mají možnost připojení k internetu a proto přístupový bod přebírá úlohu brány, která spojuje dvě různorodé rozhraní (např. WiFi s LAN apod.).



Obr. 2.1: Příklad zapojení WiFi sítě.

Standard 802.11 zahrnuje šest druhů modulací pro posílání radiového signálu, přičemž všechny používají stejný protokol. Nejpoužívanější modulační techniky jsou definované v dodatcích k původnímu standardu s písmeny a, b, g. 802.11n přináší další techniku modulace. Původní zabezpečení bylo vylepšeno dodatkem i. Další dodatky pouze opravují nebo rozšiřují předchozí specifikaci.

2.1 Jednotlivé standardy IEEE 802.11 a jeho dodatky

IEEE 802.11a – tento standard používá stejný protokol a formát rámce PDU síťové vrstvy jako původní standard, ale fyzickou vrstvu má založenou na OFDM. Pracuje v kmitočtovém pásmu s maximální fyzickou přenosovou rychlostí 54Mbps. Standard navíc obsahuje přídatnou korekci chyb ECC (Error Correction Code). Protože s rozšiřujícím se počtem bezdrátových sítí klesá počet volných kanálů v kmitočtovém pásmu 2,4GHz, používání relativně nevyužitého pásma 5GHz dává sítím využívajícím standardu 802.11a značnou výhodu z hlediska přenosu. Na druhou stranu tyto vysoké přenosové kmitočty přináší i řadu nevýhod. Celková využitelná přenosová šířka pásma je menší než u standardu 802.11b/g. Signály standardu 802.11a jsou v jejich dráze více absorbovány pevnými tělesy (zdi, budovy, stromy, apod.) díky jejich menší vlnové délce, proto neproniknou do takové dálky jako v případě standardu 802.11b.

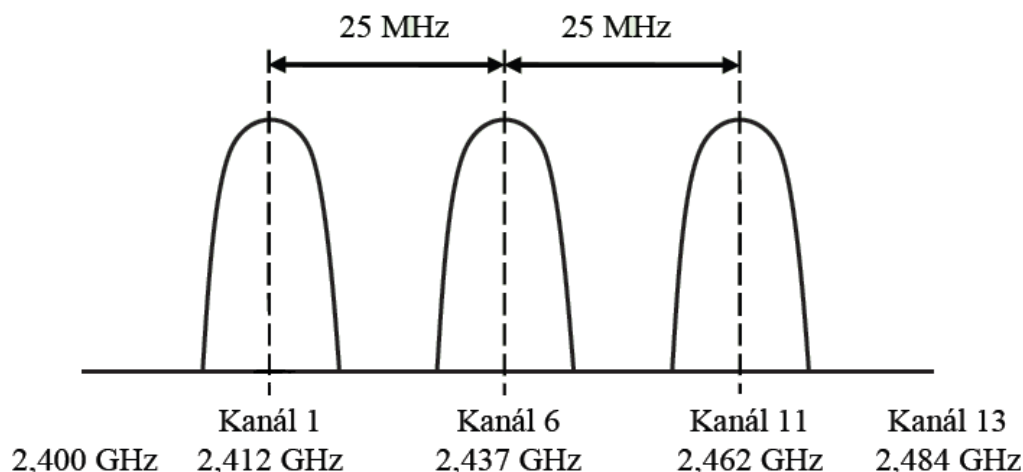
Tab. 2.1: Parametry standardu 802.11a

Datum vydání	Kmitočet	Výkonnost	Max. př. Rychlost	Max. vnitřní dosah	Max. venkovní dosah
říjen 1999	5 GHz	27 Mbps	54 Mbps	~15 metrů	~30 metrů

IEEE 802.11b – tento standard pracuje v pásmu 2,4GHz s přenosovou rychlostí 11Mbps. Zvýšení rychlosti se využilo použitím nového způsobu kódování – doplňkového klíčového kódování CKK (Complementary Code Keying) ve spolupráci s DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) u fyzické vrstvy. Značný nárůst přenosové rychlosti oproti původnímu standardu 802.11 a značný pokles cen komunikační technologie vedl k tomu, že standard 802.11b byl definitivně akceptován jako technologie Wireless LAN. Je definován pro následující rychlosti: 1Mbps, 2Mbps, 5,5Mbps a 11Mbps. Reálně však dosahuje rychlosti max. cca 6Mbps. V Evropě je rozdělen na 13 kanálů a disponuje možností využití až tří kanálů bez vzájemného rušení (znázorněno na obr. 2.1 níže). Zařízení standardu 802.11b jsou náchylná na interferenci jiných zařízení pracujících ve stejném pásmu. Zařízení pracující v pásmu 2,4GHz jsou např.: mikrovlnné trouby, zařízení Bluetooth, atd.

Tab. 2.2: Parametry standardu 802.11b

Datum vydání	Kmitočet	Výkonnost	Max. př. Rychlost	Max. vnitřní dosah	Max. venkovní dosah
říjen 1999	2,4 GHz	~5 Mbps	11 Mbps	~45 metrů	~90 metrů



Obr. 2.2: Využití kmitočtového spektra bez vzájemného rušení sousedních kanálů.

IEEE 802.11g – byl schválený v červnu roku 2003. Tento standard pracuje v kmitočtovém pásmu 2,4GHz (stejně jako 802.11b), ale fyzickou vrstvu má založenou na OFDM stejně jako standard 802.11a s maximální fyzickou přenosovou rychlostí 54Mbps obsahující dopředný korekční kód FEC (Forward Error Correction). Zařízení s 802.11g jsou plně kompatibilní se zařízeními s 802.11b, ne však se zařízeními s 802.11a. V létě roku 2003 většina dual-band zařízení 802.11a/b přešla na podporu standardu 802.11g. Bezdrátové karty a přístupové body AP (access point) podporovaly všechny tři standardy 802.11a/b/g. Při současném působení jak 802.11b, tak i 802.11g docházelo k interferenci, což mělo za důsledek redukci přenosové rychlosti v místě krytí. Stejně jako zařízení standardu 802.11b jsou zařízení standardu 802.11g náchylná na interferenci jiných zařízení pracujících ve stejném kmitočtovém pásmu 2,4GHz.

Tab. 2.3: Parametry standardu 802.11g

Datum vydání	Kmitočet	Výkonnost	Max. př. Rychlost	Max. vnitřní dosah	Max. venkovní dosah
červen 2003	2,4 GHz	~22 Mbps	54 Mbps	~45 metrů	~90 metrů

IEEE 802.11n – je posledním nedávným dodatkem standardů 802.11. Klade si za cíl upravit fyzickou vrstvu a podčást linkové vrstvy, takzvanou MAC (Medium Access Control) podvrstvu tak, aby se docílilo reálných rychlostí přes 100 Mbps . Standard vylepšil bezdrátovou komunikaci zejména o technologii MIMO (Multiple Input Multiple Output) a dalšími novějšími vlastnostmi. Technologie MIMO funguje na principu využívání skupiny antén na obou komunikujících stranách s cílem zlepšení komunikace. Vícekanálové přenosy signálu zvyšují schopnost přijímače zrekonstruovat informaci z přijatého signálu. Další výhodou využití technologie MIMO je SDM (Spatial Division Multiplex). SDM prostorově multiplexuje více nezávislých datových toků a přenáší je současně v jednom přenosovém kanále.

Tato kombinace technologií dokáže výrazně zvýšit přenosovou rychlost. Každý prostorový datový tok vyžaduje diskretní anténu na obou komunikačních stranách. Navíc MIMO vyžaduje oddělené kmitočty pro přenos jednotlivými MIMO anténami a A/D konvertor pro každou anténu. To se také značně projeví i v celkové ceně.

Standard 802.11n tedy hodně zlepšil maximální fyzickou přenosovou rychlost oproti standardům 802.11b/g. Maximální fyzická přenosová rychlost vzrostla z 54Mbps na 600Mbps. V současné době ale fyzická vrstva podporuje OFDM s maximální přenosovou rychlostí 300Mbps s využitím dvou vzájemně nepřekrývajících se kanálů o šířce pásma 40MHz.

Tab. 2.4: Parametry standardu 802.11n

Datum vydání	Kmitočet	Výkonnost	Max. př. Rychlost	Max. vnitřní dosah	Max. venkovní dosah
září 2009	5 GHz a/nebo 2,4 GHz	50-144 Mbps	600 Mbps	~91 metrů	~182 metrů

IEEE 802.11-2007 – tento standard byl vytvořen v roce 2003. REVma nebo 802.11ma, jak byl tento standard nazýván, shromažďoval osm ze standardů 802.11 (802.11a/b/d/e/g/h/i/j). V březnu roku 2007 byl standard 802.11REVma přejmenován na současný standard IEEE 802.11-2007.

IEEE 802.11a+ – dodatek pro zvýšení přenosové rychlosti standardu 802.11a na maximální fyzickou rychlost 108Mbps.

IEEE 802.11c – tento doplněk byl schválen v roce 1998 a má v sobě implementovanou podporu komunikačních mostů (bridge) v podvrstvě MAC (Medium Access Control).

IEEE 802.11d – schválen v roce 2001. Umožňuje použití technologie 802.11 v místech, kde pásmo 2,4Ghz není dostupné. Většina zemí ale tento kmitočet na základě ITU-T (International Telecommunication Union) neuvolňuje.

IEEE 802.11e – připravován od roku 2001. a v roce 2005 byl schválen. Standard definuje podporu pro zajištění kvality služeb QoS (Quality of Service) v podvrstvě MAC a opravu chyb v téže podvrstvě.

IEEE 802.11f – schválen v roce 2003. Standardizuje roaming - komunikace mezi jednotlivými AP pro zajištění mechanismu předávání stanic pomocí protokolu IAPP (Inter Access Point Protocol). Prakticky to znamená přechod stanice z dosahu jednoho AP k jinému sousednímu AP.

IEEE 802.11h – dodatek vylepšuje řízení kmitočtového spektra pomocí dynamické volby kanálu a řízení vyzařovacího výkonu. Týká se to především zařízení se standardem 802.11a pracujících v kmitočtovém pásmu 5GHz.

IEEE 802.11i – doplněk pro zvýšenou bezpečnost standardů 802.11a/b/g. Poskytuje zdokonalení autentizace a šifrování při použití technologie WEP.

IEEE 802.11j – schválen v roce 2004 jako rozšíření pro Japonsko. Rozšíření se týká alokace nových kmitočtových rozsahů pro multimediální služby.

IEEE 802.11k – doplněk definuje měření a správu rádiových zdrojů tak, aby vyhovovali vysokofrekvenčním rádiovým sítím. Tzn. Provádí se měření kanálů, šumu, zahlcení a vzájemného rušení. Dodatek je označován pod názvem Radio Resource Measurement. Jedná se o pokračování 802.11j.

IEEE 802.11p – definuje podporu připojení rádiových stanic v automobilech k pevným přístupovým bodům. Nese označení WAVE (Wireless Access for the Vehicular Environment). Napr. u sanitek, taxi, atd.

IEEE 802.11r – pro tzv. Fast Roaming - rychlejší předávání uživatelů mezi přístupovými body v rámci ESS pro real-time aplikace (telefon, video).

IEEE 802.11p – podpora pro samoorganizující se bezdrátové sítě. Každý klient je zároveň přístupovým bodem. Technologie nese označení multi-hoppin – přenos přes několik mezilehlých zařízení.

IEEE 802.11u – definuje spolupráci s externími sítěmi – sítě mimo 802 standardy (například mobilní sítě).

IEEE 802.11v – definuje správu bezdrátových sítí (konfigurace klientských zařízení během připojení).

IEEE 802.11w – dodatek pro zabezpečení rámců pro management. Rozšiřuje vrstvu MAC o mechanismy pro podporu integrity, autenticity zdrojů dat, utajení a ochrany dat.

IEEE 802.11y – doplněk pro běh bezdrátových sítí ve frekvenčním pásmu 3650–3700MHz (veřejné pásmo v USA).

Zdroje: [6], [7]

2.2 Vrstvový model bezdrátových sítí

Obdobně jako u ostatních síťových zařízení a protokolů [2], [5], vycházejí bezdrátové sítě založené na standardech 802.11 z referenčního modelu ISO/OSI. Standardy 802.11 jsou definovány na prvních dvou vrstvách tohoto modelu. Tyto vrstvy jsou vyobrazeny na obr. 2.3.

Spojová vrstva	LLC					
	IEEE 802.11 MAC					
Fyzická vrstva	IEEE 802.11 IR	IEEE 802.11 DSSS	IEEE 802.11 FHSS	IEEE 802.11a OFDM	IEEE 802.11b HR-DSSS	IEEE 802.11g OFDM

Obr. 2.3: Referenční model ISO/OSI pro WiFi.

2.2.1 Fyzická vrstva

Nejnižše položenou vrstvou referenčního modelu ISO/OSI [1], [4], [5] je fyzická vrstva. Tato vrstva realizuje samotné vysílání a příjem dat bezdrátovým

prostředím. Jednotlivé mechanismy společně s kmitočty a přenosovými rychlostmi jsou uvedeny v tab. 2.5.

Tab. 2.5: Výčet přenosových mechanismů pro jednotlivé standardy

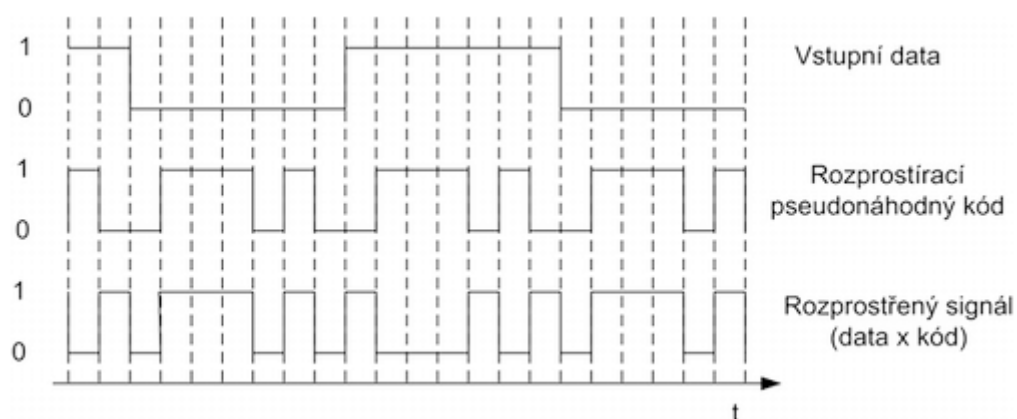
Standard	Přenosový mechanismus	Frekvence	Podporovaná přenosová rychlost [Mbps]
802.11	FHSS, DSSS, IR	2,4 GHz; DFIR	1; 2
802.11b	HR-DSSS	2,4 GHz	1; 2; 5,5; 11
802.11g	OFDM	2,4 GHz	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54
802.11a/h	OFDM	5,2 - 5,5 GHz	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54

Standard 802.11 umožňuje přenos i pomocí IR (Infrared) infračerveného záření. Tento přenos se ale díky malému dosahu, nemožnosti překonávat překážky a nízké přenosové rychlosti zcela neprosadil. Jeho rychlost nepřesahovala hodnoty 2Mbps. Dnes používaná rádiová rozhraní využívají přenosové mechanismy FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Ve všech standardech IEEE 802.11 je fyzická vrstva rozdělena na dvě podvrstvy:

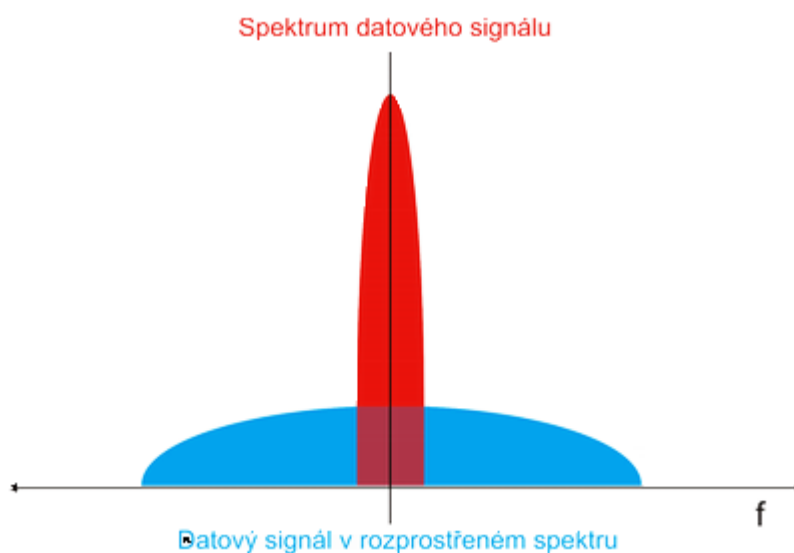
- **PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)** - v této podvrstvě se k datovým rámcům MAC (Medium Access Control) podvrstvy přikládají informace o použitém přenosovém mechanismu a modulaci. Přenášený datový rámec je tak nezávislý na typu fyzické vrstvy. Do této podvrstvy je implementována rovněž funkce CCA (Clear Channel Assessment), která poskytuje odezvu pro MAC vrstvu o připravenosti přenosového média.
- **PMD (Physical Medium Dependent)** - tato podvrstva odpovídá za přenos dat mezi jednotlivými vysílači a přijímači. Na straně přijímače jsou pomocí PMD přijímána data z bezdrátového prostředí, do něhož jsou tyto data vysílána z vysílače z podvrstvy PLCP v závislosti na použitém přenosovém mechanismu. Na straně přijímače jsou tyto data přijata pomocí PMD a předána podvrstvě PLCP.

Systémy založené na FHSS pracují v pásmu 2,4GHz. K přeskokům používají 79 kanálů. Každý z kanálů má šířku 1MHz. Jiné systémy pracující v pásmu 2,4GHz jsou založené na DSSS, HR-DSSS (High Rate - Direct Sequence Spread Spectrum) a ERP-PBCC (Extended Rate PHY - Packet Binary Convolutional Coding). Pro tyto systémy je určena šířka komunikačního kanálu 22MHz. Přenosová rychlost všech standardů 802.11 je měněna dynamicky podle kvality a úrovně přijímaného signálu.

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) - [8] technika přímo rozprostřeného spektra je v současnosti asi nejvíce používanou technikou. V principu se jedná o nahrazování každého bitu sekvencí bitů. Tato sekvence je následně přenášena přes

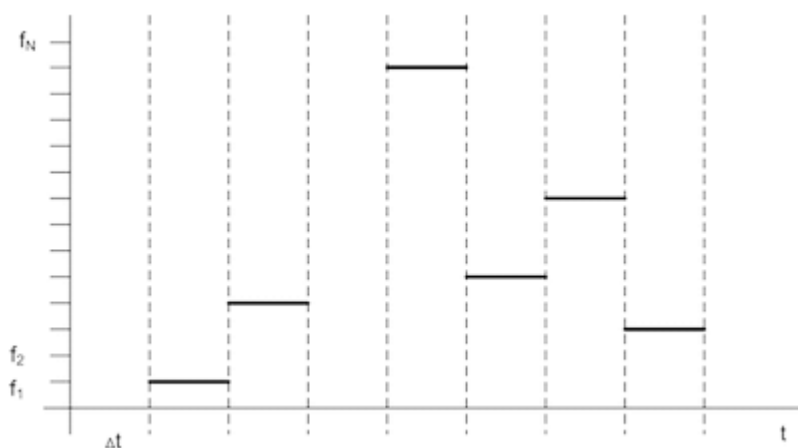


Obr. 2.4: Způsob přímého rozprostírání spektra.



Obr. 2.5: Princip rozprostření spektra.

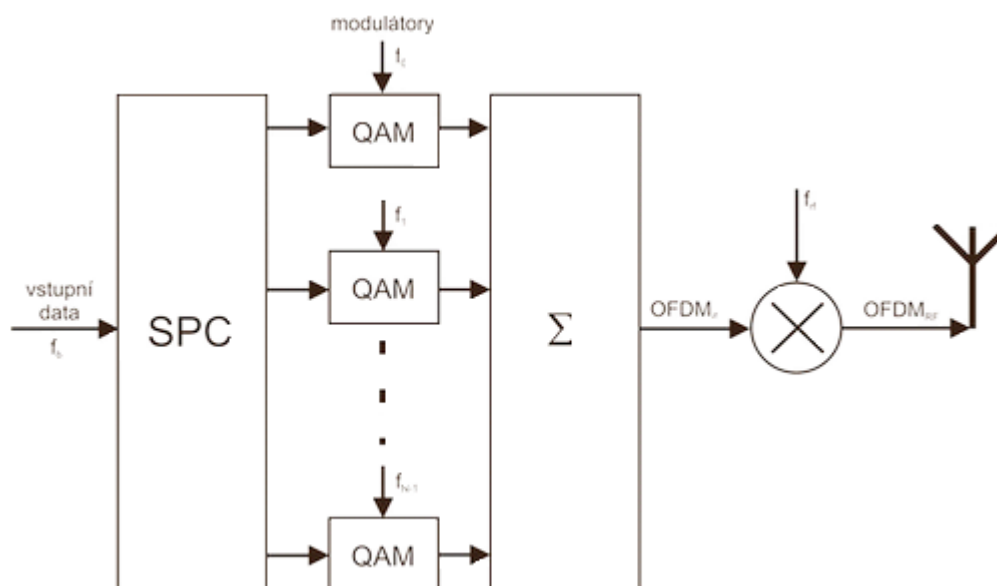
FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – [8] jde o první známou techniku rozprostření spektra. Původně byla vyvinuta pro vojenské a zpravodajské účely za druhé světové války. FHSS je v principu frekvenční skákání. Jedná se o metodu, kdy vstupní datová posloupnost je vysílána na několika frekvencích. Tyto frekvence se mění podle pseudonáhodné posloupnosti, která musí být známa jak vysílací straně, tak i straně přijímací. Nosný signál obsahující namodulovaná data je vysílán na zvolené frekvenci jen krátkou dobu, maximálně 400ms, Pseudonáhodná posloupnost je ve vysílači i v přijímači synchronizována. Frekvenční skákání může být prováděno dvěma způsoby. Prvním z nich je rychlé frekvenční skákání FFHSS (Fast Frequency Hopping Spread Spectrum), druhým z nich je pomalé frekvenční skákání (Slow Frequency Hopping Spread Spectrum). U rychlého frekvenčního skákání je rychlost pseudonáhodné posloupnosti, podle níž ve frekvenci dochází ke skokům, rychlejší než rychlost datové posloupnosti. U pomalého frekvenčního skákání je rychlost posloupnosti pomalejší než rychlost datové posloupnosti, což znamená, že při pomalém frekvenčním skákání je několik bitů datové posloupnosti odesláno na jedné frekvenci, poté se skočí na jinou frekvenci a zde je odesláno zase několik bitů. U rychlého frekvenčního skákání je jeden bit datové posloupnosti vysílán na několika frekvencích. Výhoda této technologie spočívá ve vyšším počtu současně fungujících zařízení v pásmu 2,4GHz (až 15 zařízení). Nevýhodou pak je, že tyto systémy dosahují malých přenosových rychlostí a také, že FHSS je produkce značného rušení pro okolní systémy, které pracují ve stejném pásmu. U standardu IEEE 802.11 dosahuje přenosové rychlosti až 2Mbps.



Obr. 2.6: Princip FHSS.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) – [4] původně byl tento ortogonální frekvenční multiplex využíván standardem IEEE 802.11a v pásmu 5GHz. Později OFDM začal využívat standard IEEE 802.11g v pásmu 2,4GHz. Systém OFDM je založen na převodu vstupního vysokorychlostního sériového datového toku na řadu pomalejších paralelních datových toků. Ty jsou poté modulovány na řadu sub-nosných vln a přenášeny k přijímači. Tam se opačným

postupem demodulují a převádí na vysokorychlostní sériový signál. Základní blokové schéma a princip je vyobrazen na obr. 2.7 níže. Na vstup je přiveden sériový binární datový tok. Ten se v sériově paralelním převodníku SPC cyklicky dělí do většího počtu N paralelních složek. Soustava všech paralelních modulačních symbolů vytváří OFDM symbol. Jeho jednotlivé složky se modulují na soustavu N sub-nosných vln a ty jsou vyslány k přijímači.



Obr. 2.7: Princip OFDM.

Výhodou OFDM je jeho spektrální účinnost. OFDM systém má tuto účinnost velmi vysokou díky částečnému překryvu sousedních sub-kanálů. Použité sub-nosné vlny vytvářejí ortogonální soustavu, a proto se tyto vlny vzájemně neovlivňují. Další výhodou díky rozkládání přenášené informace do subkanálů je výrazné potlačení vlivu interferencí způsobených vícecestným šířením signálu. Nevýhoda OFDM spočívá v přílišné citlivosti na frekvenční offset subnosných vln nacházejících se velmi blízko sebe. U standardu IEEE 802.11a a IEEE 802.11g dosahuje přenosové rychlosti až 54Mbps.

IR (Infrared) – [4] infračervené záření se k přenosu dat u standardu 802.11 nepoužívá. Tento přenos se neprosadil hlavně díky malému dosahu, nemožnosti překonávat překážky a nízké přenosové rychlosti. Jeho rychlost nepřesahovala hodnoty 2Mbps.

2.2.2 Spojová vrstva

Spojová vrstva referenčního modelu ISO/OSI [2], [3], [10] realizuje kódování a přenos informací. Její spodní podvrstvu tvoří tzv. Ovládání přístupu k médiu MAC (Media Access Control). MAC definuje pravidla určující jak

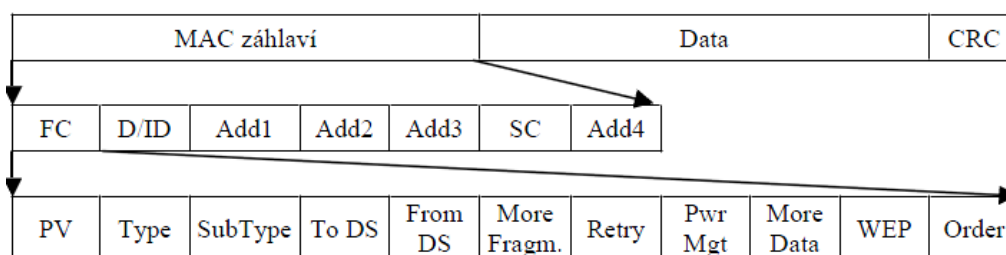
přístupovat k prostředkům pro přenos dat. Podvrstva MAC prakticky odděluje fyzickou vrstvu od horní spojové podvrstvy LLC. Samotné detaily o přenosu dat jsou ovšem ponechány na fyzické vrstvě. Základní účel je přenášení MSDU (MAC Service Data Unit) mezi objekty MAC podvrstvy. MAC podvrstva vytváří podporu pro síť Ad-hoc (bez přístupového bodu) a infrastrukturní síť (s přístupovým bodem). Podvrstva využívá fyzickou vrstvu k provádění úkolů jako je vysílání, přenos a příjem 802.11 rámců. Základní vlastnosti podvrstvy MAC:

- **Kladné potvrzování (Positive Acknowledgment)** – v sítích 802.11 je skoro každý paket odeslaný bezdrátovým médiem potvrzení o jeho správnosti doručení. Toto kladné potvrzování je spojeno s linkovou vrstvou v kombinaci s fragmentací paketů.
- **Fragmentace paketů (Packet Fragmentation)** – jednoduše předchází zničení velkého množství dat přenášeného bezdrátovým médiem v případě kolize. Fragmenty spojové vrstvy musí být potvrzovány sousedním komunikujícím zařízením (přístupovým bodem). Využitím fragmentace je možné výrazně zvýšit přenos v případě chybového přenosového kanálu. Přenášená zpráva je rozdělena na fragmenty. Pak namísto opakování přenosu celého objemu dat se přenesou jen ty fragmenty, u kterých došlo k poškození. Velikost fragmentů určuje parametr MTU (Maximal Transmission Unit). V případě velmi malých fragmentů může dojít ke snížení přenosové rychlosti v důsledku neustálého potvrzování.
- **Metoda RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send)** – používá se v situaci, kdy chce jedna stanice přístupovat k médiu, které se tváří jako neobsazené, ale je obsazeno jinou stanicí. V takovém případě dochází ke kolizi. Za použití řídicích paketů RST a CTS je zajištěna komunikace přístupových bodů se stanicemi a předchází se tak kolizím zaviněných obsazeností přístupového bodu stanicemi, které se navzájem nevidí.
- **Mód šetření energie (Power Saving)** – tento režim umožňuje šetřit energii. Princip spočívá v tom, že když je stanice delší dobu neaktivní, tak vyšle oznámení přístupovému bodu AP a přejde do režimu spánku. AP v tomto bodě odchyťává a ukládá informace určené pro konkrétní stanici. Stanice se periodicky probouzí a přijímá Beacon rámeček. Tento rámeček stanici sdělí, zda na AP pro tuto stanici čekají data. Nakonec dochází k přijetí dat stanicí.
- **CRC** – cyklický kontrolní součet je využíván k detekování chyb během přenosu a k ukládání dat. Každý přenášený paket je opatřen připojeným kontrolním součtem CRC. Díky tomu je možné zjistit, zda paket nebyl během přenosu poškozen nebo změněn. CRC je odeslán v rámci spolu s daty. Vypočítává se ještě před odesláním dat.
- **Skenování** – může být aktivní a pasivní. U aktivního skenování stanice zahajuje proces vyslání rámce probe request a všechny AP v dosahu odpovídají vyslání rámce probe response. Aktivní skenování podporuje okamžitou odezvu z AP bez čekání na vyslání rámce beacon. Při pasivním skenování stanice skenuje kanály a hledá AP s nejlepším signálem. AP vysílá

beacon rámce s informacemi o AP. Tyto rámce stanice přijímá a porovnává informace o dostupných AP a rozhodne, který využije.

- **Autentizace** – je průběh zjišťování totožnosti a systémy 802.11 využívají 2 formy – Open system authentication a Shared key authentication.
- **Asociace** – je důležitá pro synchronizaci. Stanice se musí s AP synchronizovat před samotným přenosem dat. Stanice vyšle rámec association request jenž obsahuje identifikátor SSID a podporovanou přenosovou rychlost. AP odpoví odesláním rámce association response. Až se stanice a AP sesynchronizují, může se začít se samotným přenosem.
- **WEP (Wired Equivalent Privacy)** – je původní zabezpečení WiFi sítí a je součástí standardu IEEE 802.11. Stanice zakóduje tělo bez hlavičky každého rámce a přijímací stanice tento rámec pomocí svého klíče dekoduje. Kódování dat metodou WEP lze v současné době snadno prolomit. Bezpečnější je použití WPA nebo WPA2 šifrování.

Struktura MAC rámce je zobrazena na obr. 2.8 převzatém z [9]. Rámec bezdrátových sítí je složitější, než je tomu u klasických kabelových sítí.



Obr. 2.8: Struktura MAC rámce pro standard IEEE 802.11.

- **FC (Frame Control)** – dvouoktetové pole obsahující:
 - **PV (Protocol Version)** – 2 bity, verze protokolu, standardně 00
 - **Type** - typ rámce – 2 bity, datový, řídicí, rámec managementu
 - **SubType** – 4 bity, blíže specifikuje typ rámce
 - **To DS** - 1 bit, specifikuje, zda je rámec určen pro distribuční systém
 - **From DS** - 1 bit, specifikuje, zda je rámec přichází z distribučního systému (ano = 1),
 - **More Fragm** – 1 bit indikující, že další fragmenty původní MSDU budou následovat
 - **Retry** – 1 bit, log. 1 označuje, že rámec je opakováním dříve vyslaného rámce
 - **Power Mgt** – 1 bit indikující zda stanice bude vstupovat do úsporného režimu (log. 1),
 - **More Data** – 1 bit indikující čekající rámce v uzlu AP pro danou stanici
 - **WEP** – 1 bit označující, zda je implementován šifrovací algoritmus
 - **Order** – 1 bit definující (log.1), že se jedná o datový rámec nesoucí MSDU (MAC Service Data Unit)

- **D/ID** (Duration/Association Identifier) – v případě řídicího rámce s podtypem „power save poll“ nese informaci AID (Association Identifier), číslo v rozmezí 1 - 2007, jinak nese informaci o trvání rámce.
- **Add 1-4** (Address) – čtyři adresy indikující BSSID – identifikátor BSS = MAC adresa přístupového bodu AP, SA (Source Address), DA (Destination Address) a TA (Transmitting station Address) nebo RA (Receiving station Address) stanice.
- **SC** (Sequence Control) – 2 oktety nesoucí informaci o pořadí fragmentu (4 bity) a pořadí datové jednotky MSDU (MAC Service DU) nebo MMPDU (MAC Management PDU)
- **CRC** – 32 bitů, zabezpečení cyklickým kódem

MAC rámec standardu IEEE 802.11e se od MAC rámce standardu IEEE 802.11 liší tím, že je doplněn o podporu QoS a opravu chyb na podporu všech fyzických vrstev používaných v sítích 802.11 kromě Ad-hoc sítí.

2.3 Pakety standardu IEEE 802.11

Ve standardu IEEE 802.11 se rozdělují pakety přenášené v síti WiFi na tři různé kategorie:

- Řídicí (control)
- Management
- Datové (data)

Pro jednotlivé kategorie paketů existuje více podtypů.

2.3.1 Řídicí pakety standardu 802.11

Řídicí pakety standardu 802.11 [1], [6], [10] jsou spojené s pravidly přístupu k médiu MAC (Media Access Control). V současné době je definováno šest druhů řídicích paketů. Tyto řídicí pakety jsou uvedeny v tab. 2.6 níže.

Tab. 2.6: Druhy řídicích paketů ve standardu 802.11

Řídicí pakety 802.11	
podtyp	Popis
10	Power Save (PS-Poll)
11	Request To Send (RTS)
12	Clear To Send (CTS)
13	Acknowledgement (ACK)
14	Connection Free (CF-End)
15	CF-End + CF-ACK

Pakety RTS a CTS pomáhají řešit problém skrytého uzlu. Dále jsou využívány jako ochrana před vznikem možné kolize na sdíleném médiu a i v případě, že se v síti nachází skrytý uzel. Když stanice chce vysílat relativně velké množství dat, pravděpodobnost výskytu kolize je vyšší i v případě, že se v síti nenachází skrytý uzel. Místo přenosu velkého paketu stanice odešle paket RTS s potřebným časem pro přenos. V případě poškození paketu RTS v důsledku kolize, čas potřebný pro znovu vyslání tohoto paketu je relativně krátký v porovnání se znovu vysláním celého velkého datového paketu. Po přijetí paketu CTS okolními stanicemi může stanice inicializující přenos bezpečně přenášet data po dobu určené v CTS bez vzniku kolize.

Dalšími řídicími pakety jsou PS-Poll a ACK. PS-Poll je využíváný klientskými stanicemi v režimu šetření energie. Řídicím paketem stanice signalizuje, že je připravena na příjem uložených paketů v AP v čase, kdy byla v režimu spánku. Paket ACK je určen ke kladnému potvrzování přijatých dat a některých paketů managementu. Paket ACK je relativně malý s jednoznačným účelem.

2.3.2 Pakety managementu standardu 802.11

Pakety managementu standardu 802.11 – mají různé funkce, které závisí na konkrétním typu paketu. Příkladem paketů managementu je paket typu Beacon nebo pakety sloužící pro odhlášení uživatele ze sítě.

2.3.3 Datové pakety standardu 802.11

Jejich hlavní funkcí je přenos samotných dat po sdíleném komunikačním médiu. Ještě před uvedením techniky QoS (Quality of Service) do sítí 802.11 existovalo osm různých podtypů datových paketů. V dnešní době jsou v sítích 802.11 bez podpory QoS podporované dva podtypy datových paketů. Podtyp 4 indikuje NULL funkci, která je ve většině případů využívána klientskou stanicí. V případě, že klientská stanice nemá k vysílání žádná data, využívá stanice NULL funkci k informování přístupového bodu AP, že přechází do režimu spánku.

2.4 Typy sítí používaných ve WiFi

Ve WiFi sítích existují následující typy základních architektur:

- Ad-Hoc
- BSS (Basic Service Set)
- ESS (Extended Service Set)

2.4.1 Ad-Hoc

U architektury Ad-Hoc [1], [2], [11] jde o propojení počítačů peer-to-peer, tedy všechny počítače v síti jsou si rovny a není zde použito přístupového bodu. Pro vzájemnou komunikaci jednotlivých stanic je nutné, aby tyto stanice byly ve vzájemném dosahu. Výhoda Ad-Hoc je, že sestavení takovéto sítě je velmi rychlé a jednoduché. Použití nachází zejména při náhlé potřebě přenosu dat mezi notebooky. Pro dlouhodobé připojení sítě se nevyužívá. Nevýhoda spočívá v tom, že všechny počítače, které spolu mají komunikovat, musí být ve vzájemném dosahu signálu a také rychlost Ad-Hoc sítě, která činí jen 11Mbps.



Obr. 2.9: Příklad zapojení sítě Ad-Hoc.

2.4.2 BSS

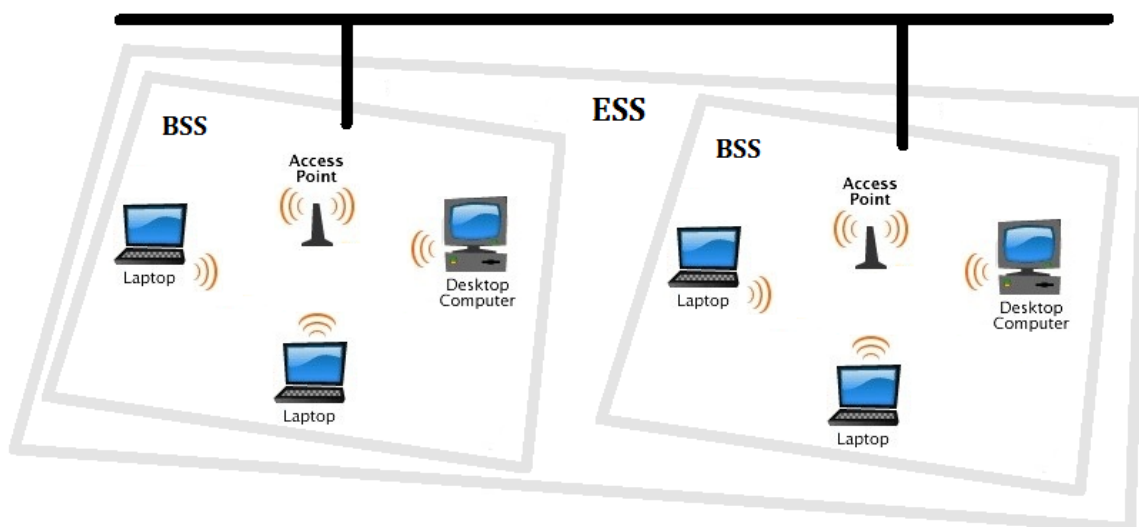
Označení BSS (Basic Service Set) [1], [2], [11] se používá u sítí, kde se připojení stanic realizuje za použití přístupového bodu. Oblast, ve které mezi sebou stanice komunikují je označována jako BSA (Basic Service Area). Všechny parametry, které jsou nastaveny na přístupovém bodě se projeví i v celé síti. Každá stanice, která je v dosahu pokrytí signálem přístupovým bodem se může do sítě připojit. Tyto stanice musí být samozřejmě schopné komunikace s přístupovým bodem. Stanice provede asociaci a poté se může k přístupovému bodu AP připojit. Se stoupajícím počtem připojených stanic roste zátěž na celou síť. V případě, že přístupový bod AP nemá podporu kvality služeb QoS, snaží se AP o rozdělení prostředků pro komunikaci se stanicemi dle vlastního algoritmu. Jestliže tedy bude jedna stanice přenášet obrovské množství dat, bude docházet ke zmenšení propustnosti a k velkému zpoždění přenosu pro jiné stanice.



Obr. 2.10: Příklad zapojení sítě BSS.

2.4.3 ESS

ESS (Extended service set) [1], [2], [11] je WiFi síť vytvořená pomocí vhodného spojení dvou a více BSS, což je vyobrazeno na obr. 2.11 níže. K tomu, aby došlo k vytvoření sítě ESS z vícero BSS, musí být dodrženo podmínky, že všechny BSS musí být vhodně propojeny a to na úrovni linkové vrstvy. Dalším důležitým aspektem je nastavení u všech BSS stejného jména sítě.



Obr. 2.11: Příklad zapojení sítě ESS.

3 Kvalita služeb QoS

Bezdrátové spoje [12], [19] mají jinou charakteristiku, než spoje pevné. Bezdrátové spoje ovlivňuje útlum signálu, rušení a šum. Tyto ovlivňující aspekty závisejí na místě a době vysílání. Vedou k následným chybám a ovlivňují kapacitu kanálu, která se mění v čase. Prostředí může hodně ovlivňovat kvalitu a sílu signálu, stejně jako vzdálenost nebo vzájemné rušení. Pro přenos dat citlivých na

ztrátu paketů, zpoždění, kolísání zpoždění nebo kapacitu sítě je zapotřebí jednotlivým typům paketů umožnit vhodné zacházení v síti při přenosu od zdroje k cíli, tedy zajistit jim kvalitu služeb - QoS (Quality of Service). Tudiž QoS je schopnost sítě podporovat aplikaci bez omezení funkce nebo výkonu aplikace. Mezi tyto aplikace patří mimo jiné IP telefonie, videokonference, distribuované výpočty nebo přenosy velkých objemů dat. Jako příklad kvality služby na úrovni aplikace může být videosignál určitého rozlišení o určitém počtu obrázků za sekundu, výměna zpráv mezi komunikujícími aplikacemi s určitým maximálním zpožděním a určitou maximální ztrátovostí nebo přenos určitého velkého objemu dat v určitém čase.

3.1 Parametry QoS

Výše uvedené požadavky aplikací pro bezproblémový přenos sítí lze shrnout do těchto základních parametrů:

- Ztrátovost paketů
- Koncové zpoždění
- Kolísání zpoždění
- Šířka pásma

3.1.1 Ztrátovost paketů

Tento parametr udává podíl přijatých paketů a vyslaných paketů za jednotku času, tedy kolik procent paketů nedorazí od odesílatele k příjemci. Ke ztrátě může dojít v důsledku dočasného přetížení některého komponentu komunikační trasy, například po vyčerpání kapacity vyrovnávacích pamětí nebo přetížení procesoru směrovače a podobně. Pro chování aplikací je rovněž důležitá i dynamika ztrátovosti. Dynamikou ztrátovosti se rozumí, zda se ztráty vyskytují ve shlucích. Citlivost na ztrátu paketů je u hlasových aplikací rozdílná než u video aplikací. Pokud při přenosu hlasu dojde ke ztrátě paketů, může dojít k výpadku části sdělení. Pokud dojde k výpadku, tedy ztrátě paketů u videa, může docházet k rozostření obrazu nebo krátkodobému výpadku. Citlivost na ztrátu paketů je u hlasu menší než u dat, udává se hodnota okolo 1%. Nejcitlivější na ztrátu paketů jsou tedy data, poté následuje hlas a nakonec videokonference. Streamované video je o něco méně citlivé než videokonference. Datové pakety pro přenos mohou používat algoritmus pro opětovné zaslání paketu. Při hlasovém přenosu by takovéto algoritmy pro opětovné zaslání paketu již neměly žádný význam.

3.1.2 Koncové zpoždění

Koncové zpoždění je parametr určující dobu potřebnou k přenosu paketu od odesílatele k příjemci. Na tento parametr má vliv hodně faktorů. Mezi ty hlavní patří použité kódování, příprava paketů na přenos kanálem, čekání paketů ve frontách přenosových zařízení a dekódování signálu. Kupříkladu můžeme uvést jednosměrné zpoždění u hlasových aplikací. Maximální zpoždění u hlasu by se mělo pohybovat do 180ms, při překročení této hranice může docházet ke ztrátě plynulosti hovoru. Toto porušení plynulosti hovoru má za následek hluchá místa v hovoru, kdy jeden účastník hovoru poslouchá druhého účastníka a ten už nějakou dobu nehovoří. U videa nedochází k výraznému zhoršení kvality, ale dochází ke snížení počtu snímků za sekundu, tudíž dochází k „trhání“ obrazu. Na přenos dat tento parametr nemá výrazný vliv.

3.1.3 Kolísání zpoždění

Parametr kolísání zpoždění je pro aplikace často důležitější než absolutní koncová hodnota zpoždění. Kolísání zpoždění udává jak se mění zpoždění jednotlivých paketů během přenosu. Má původ zejména v agregačních místech sítě, kde se spolu mísí různé toky/vstupy od jediného výstupu. Nejvíce na kolísání zpoždění doplácí hlasové služby, protože ty vyžadují, aby pakety v rámci dané konverze přicházely se stejným zpožděním, ve stejných intervalech. Tento problém se musí řešit speciálními vyrovnávacími pamětmi. Maximální kolísání zpoždění u hlasu by tedy nemělo přesahovat hodnoty 30ms. Tato hodnota je ale závislá na momentálním využití sítě. V síti bez podpory QoS je velmi obtížné těchto hodnot dosahovat. Aplikováním podpory QoS dojde u prioritních dat k výraznému snížení kolísání zpoždění. Dá se toho dosáhnout i za pomoci použití přijímacího bufferu ve VoIP koncovém zařízení, to ale má za následek zvětšení celkového zpoždění přenosu.

3.1.4 Šířka pásma

Šířka pásma je v podstatě přenosová kapacita kanálu. Přenosová kapacita souvisí s propustností (objem dat úspěšně přenesený za jednotku času). Hlasový provoz se od datového provozu značně liší svým charakterem i požadavky. Na rozdíl od dat, která jsou shluková, potřebuje hlas menší, ale zato konstantní šířku pásma. Tato konstantní šířka pásma samozřejmě závisí na rychlosti vzorkování, použitém kodeku a režii na 2. vrstvě.

V tab. 2.7 převzaté z [13] níže jsou uvedeny parametry sítě zařazené do tří skupin podle toho, jak je síť s těmito parametry vhodná pro nasazení VoIP.

Tab. 2.7: Rozlišení kvality sítě podle parametrů

Kvalita sítě	Dobrá	Vyhovující	Nevyhovující
Zpoždění [ms]	0-150	150-300	nad 300
Jitter [ms]	0-20	20-50	nad 50
Ztrátovost [%]	0-0,5	0,5-1,5	nad 1,5

Z parametrů uvedených v tabulce můžeme vyčíst, že přenosový systém nelze zcela jednoznačně kategorizovat podle jednoho parametru. Můžeme říci, že ztrátovost je podstatným problémem, proti kterému se bránit nijak nedá, ovšem větší míru parametru jitter, tedy větší kolísání zpoždění, lze vykompenzovat větší velikostí vyrovnávací paměti v přijímači. Použití vyrovnávací paměti v přijímači je řešením ale jen tehdy, pokud celková hodnota zpoždění při jejím využití nepřesáhne 300 ms.

3.2 Standard IEEE 802.11e

Standard IEEE 802.11e [3], [13] byl připravován od roku 2001. a v roce 2005 byl schválen. Doplnuje standardy typu 802.11 o zásadní mechanismus, a to mechanismus zaručení určité kvality poskytované služby QoS. Standard tedy definuje podporu pro zajištění kvality služeb QoS (Quality of Service) v podvrstvě MAC a opravu chyb v téže podvrstvě. Standard 802.11e je navržen velice komplexně. Představuje otevřenou podporu do budoucna a schopnost obsluhy nejnáročnějších klientů ve firemním prostředí. V praxi taková robustnost a rozšiřitelnost nebude potřeba, protože největší váhu požadavků tvoří klienti z oblasti domácností. Potřeby domácích uživatelů jsou pouhou částí toho, co standard 802.11e řeší. Z tohoto důvodu vznikla už v roce 2004 určitá podmnožina QoS funkcionality nazvaná WMM (WiFi MultiMedia). WMM obsahuje funkce potřebné pro nejčastěji žádané aplikace bezdrátových sítí. Mezi tyto aplikace patří video, hlasový hovor, hudba, atd. WMM je kompatibilní se standardem 802.11e. Rostoucí popularita bezdrátových sítí využívajících standard 802.11 a rychlý rozvoj internetové telefonie a streamovaného videa byly hlavní důvody pro vznik tohoto protokolu.

Původní specifikace 802.11 protokolu pro přístup k médiu umožňuje dva režimy komunikace: DCF a PCF. Ani jeden však nerozlišuje typy provozu, takže nemohou bez rozšíření podporovat QoS. Standard IEEE 802.11e rozšiřuje pro podporu QoS oba stávající režimy přístupu k rádiovému kanálu, povinný DCF (rozšíření EDCF) i volitelný PCF (rozšíření HCF). Navíc zajišťuje zpětnou slučitelnost se zařízeními pracujícími se standardy 802.11a/b/g.

3.3 Režimy komunikace

Všechny popisované metody [1], [2], [3] definují chování při sdílení přenosového média (u bezdrátového přenosu je tím míněno frekvenční pásmo – kanál) mezi více koncovými uzly a přístupovým bodem AP. Původní specifikace 802.11 protokolu pro přístup k médiu (rádiovému kanálu) umožňuje dva režimy komunikace DCF a PCF. Ani jeden nerozlišuje mezi typy provozu, takže nemohou bez rozšíření podporovat QoS. Standard IEEE 802.11e přináší podporu QoS a rozšiřuje tím oba stávající režimy přístupu k rádiovému kanálu, povinný DCF (rozšíření EDCF) i volitelný PCF (rozšíření HCF). Navíc zajišťuje zpětnou slučitelnost se zařízeními pracujícími se standardy 802.11a/b/g. Rozšíření režimu DCF představuje funkce pod označením EDCF. EDCF tedy představuje pravděpodobnostní prioritní mechanismus pro alokaci šířky pásma na základě kategorií provozu. Každá stanice může mít až čtyři kategorie provozu na podporu osmi úrovní priority. HCF definuje dotazovací mechanismus podobně jako u PCF.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že v standardu IEEE 802.11 se používají tyto režimy přístupu k médiu:

- DCF (Distributed Coordination Function)
- PCF (Port Coordination Function)
- EDCF (Enhanced DCF)
- HCF (Hybrid Coordination Function)

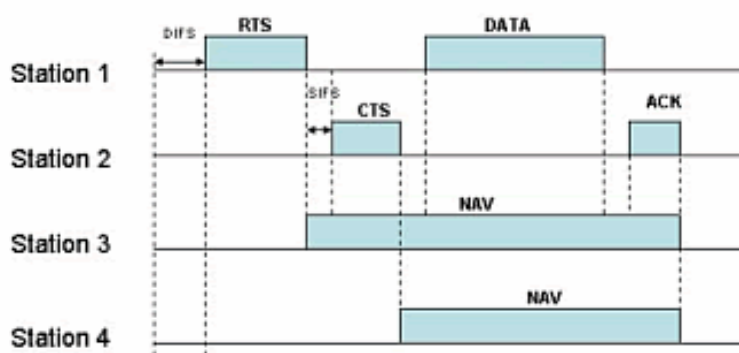
3.3.1 DCF Distributed Coordination Function)

Jedná se o základní přístupovou metodu [1], [12], kterou implementují všechny stanice. Tato metoda umožňuje sdílení média přístupovým mechanismem CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance – mnohonásobný přístup s nasloucháním nosné a vyvarováním se kolizím), což je systém podobný metodě přístupu k médiu u Ethernetu (stanice naslouchají, zda je přenosové médium volné a v okamžiku kdy se tak stane, stanice začnou vysílat).

V režimu DCF stanice naslouchá na přenosovém médiu. V případě, že po uplynutí definovaného časového úseku (tzv. DIFS – Distributed Interframe Space) je médium volné, vyšle stanice paket. Jestliže médium není volné, odloží přenos a nadále monitoruje médium. V momentě kdy dojde k uvolnění média, stanice vyčká po dobu definovanou jako $DIFS + T_{\text{random}}$, kde T_{random} je náhodný časový interval. Po uplynutí této doby se opět snaží vyslat paket.

Detekování volného média se provádí pomocí měření signálu na anténě (je definována mezní hodnota, za kterou je médium považováno za volné). V případech, kdy dvě stanice začnou vysílat současně, se kolize řeší potvrzováním přijetí dat. Příslušná stanice se tím pádem hned dozví o chybě v přenosu. Pokud totiž odesílatel po odeslání paketu neobdrží po definovaném intervalu (tzv. SIFS – Short Interframe Space) potvrzení o přijetí, vyhodnotí tento stav jako kolizi.

Nastane-li případ, kdy se vysílající stanice navzájem nevidí, musí přístupový bod řešit více kolizí, protože všechny okolní stanice si mohou myslet, že jsou momentálně v prostoru samy. Z tohoto důvodu umožňuje většina stanic zapnout mód RTS/CTS, ve kterém stanice zahajuje vysílání požadavkem (paket RTS) a v případě, že je médium volné, dostává stanice potvrzení od AP (paket CTS). Jedná se o potvrzení, že stanice může po stanovenou dobu vysílat. Ostatní stanice v okolí si na základě intervalu uvedeného v paketu CTS upraví tzv. alokační vektor (NAV – Network Allocation Vector), což je časový interval, ve kterém se stanice nesnaží o přístup k médium. Využití RTS/CTS má ale velmi negativní dopad na celkovou propustnost systému (propustnost může klesnout až na 20 % deklarované kapacity). Na obr. 3.1 převzatém z [12] je zobrazen princip metody DCF.



Obr. 3.1: Princip metody DCF.

Z pohledu poskytování služeb QoS je metoda DCF nevýhodná zejména z následujících důvodů:

- U většího počtu stanic prudce stoupá pravděpodobnost kolizí a jejich řešením klesá celková přenosová šířka pásma
- Neexistuje žádný systém nastavení priorit přenosů

3.3.2 PCF (Port Coordination Function)

Jedná se o metodu [1], [12], kterou norma 802.11 definuje jako dodatečnou. Tato metoda nemá mezi stávajícími zařízeními velkou podporu. Využívá se v případech, kdy jsou stanice připojovány do sítě prostřednictvím přístupového bodu AP. AP v tomto režimu funguje jako arbitr a centrálně přiděluje přenosové médium registrovaným žadatelům. Přidělování média funguje buď na principu cyklické obsluhy (round robin) nebo na základě priorit.

V režimu PCF se přenos dat synchronizuje pomocí super-rámců (Super Frame). Tento rámec je rozdělen na dva menší intervaly:

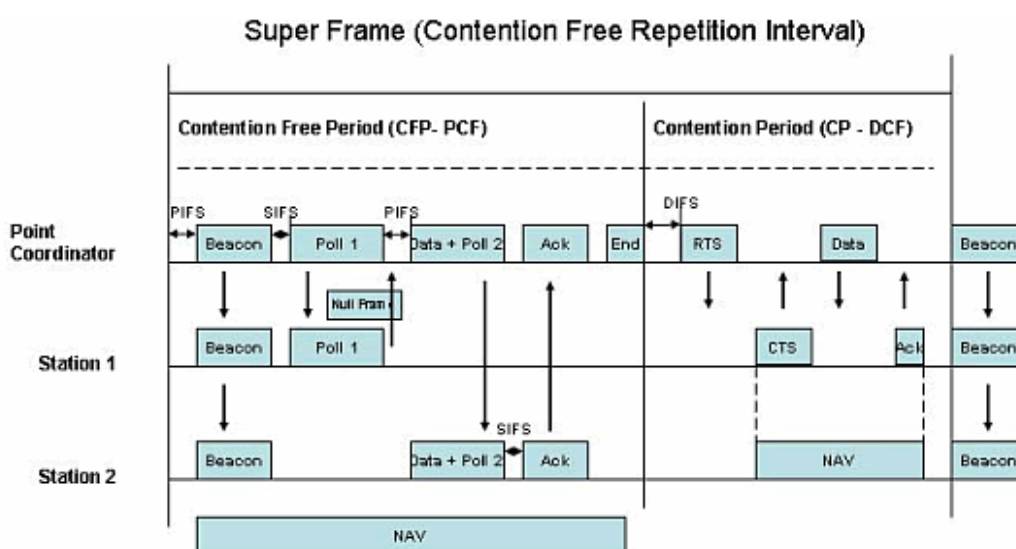
- CFP (Contention Free Period) – v tomto intervalu stanice nesoupeření o přístup k médium. Přístup určuje arbitr (AP).

- CP (Contention Period) – v tomto intervalu je pro přístup k přenosovému médium využita klasická DCF metoda.

Na začátku intervalu CFP čeká přístupový bod AP po definovanou dobu a v případě, že je médium volné, rozešle speciální signalizační rámec (beacon frame) všem registrovaným žadatelům. Signalizační rámec obsahuje i další informace, jako:

- Identifikátor arbitra (AP)
- Délku trvání CFP intervalu
- Dobu do příchodu dalšího signálního rámce

Všechny stanice, které obdrží tento signální rámec, nastaví svůj NAV a po dobu trvání CFP se nesnaží o přístup k médium. Na obr. 3.2 převzatém z [12] je zobrazen princip metody PCF.



Obr. 3.2: Princip metody PCF.

Metoda PCF sice umožňuje lepší využití QoS, nicméně je málo podporována bezdrátovými zařízeními a má i svá omezení, například nedefinuje třídy provozu – Traffic classes.

3.3.3 EDCF (Enhanced DCF)

Rozlišuje provoz do osmi kategorií [1], [12], které odpovídají požadavkům každého typu zátěže. Kategorie jsou navrženy v rozsahu od nejnížší priority, jenž deklaruje pouze 'Best effort' QoS, až po nejvyšší prioritu, která se využívá u aplikací extrémně závislých na jakémkoliv zpoždění.

Každá z těchto osmi kategorií definuje určitou dobu AIFS (Arbitration Inter-Frame Space). Po tuto dobu žadatel o přenos dat musí čekat než konkrétní přenos zahájí. Zátěž s vyšší prioritou má menší AIFS, která tak umožňuje volnější přístup k médium než je tomu u kategorií s nižší prioritou.

Definovaná doba AIFS se přičítá k náhodnému intervalu, který je stanicí generován při detekci kolize během pokusu o přístup k médium. Omezení se tím počet kolizí s jinými stanicemi, které provozují EDCF ve stejné kategorii.

Režim EDCF tedy poskytuje velmi vysokou pravděpodobnost přidělení vyšších hodnot šířky pásma pro kategorie s vyšší prioritou při „boji“ o sdílené médium. Další výhodou je její jednoduchá implementovatelnost. Tato metoda je často používaná.

3.3.4 HCF (Hybrid Coordination Function)

Definuje dotazovací mechanismus [1], [12], podobně jako u PCF. Opět jsou definovány intervaly ohraničené „beacon“ rámci, které se rozdělují na dvě periody CFP a CP. Během CFP, tzv. hybridní koordinátor (Hybrid Coordinator - typicky je to AP) ovládá přístup k médium. Během doby CP pracují všechny stanice v režimu EDCF. Hlavní rozdíl mezi HCF a PCF jsou následující:

- Jsou definované již zmiňované třídy provozu (Traffic Classes).
- Koordinátor může řídit provoz na základě jiné metody než cyklické obsluhy stanic používané u původní PCF.
- Stanice poskytují informace o délkách jejich front požadavků pro každou třídu provozu. Koordinátor tyto informace využívá pro upřednostňování určitých stanic před ostatními.
- Stanice mají možnost využít TXOP (Transmit Opportunity), čímž se rozumí možnost zasílat několik paketů najednou, v časovém intervalu určeném koordinátorem.
- Během průběhu intervalu CP může koordinátor kdykoliv převzít kontrolu nad přenosovým médiem (zasláním CF-Poll paketu všem stanicím).

HCF je nejpokročilejší a také komplexní koordinační metoda. Při použití HCF lze požadovanou kvalitu přenosu nakonfigurovat s velkou precizností.

4 Služby

V bezdrátových sítích platí [1], [3], [13], [14], že různé služby mají rozdílné požadavky na síť. Například u hlasových služeb je citlivost na ztrátovost paketů jiná než u video služeb. Pokud při přenosu hlasu dojde ke ztrátě paketů, může dojít k výpadku části sdělení. Pokud dojde k výpadku, tedy ztrátě paketů u videa, může docházet k rozostření obrazu nebo krátkodobému výpadku. Citlivost na ztrátu paketů je u hlasu menší než u dat, udává se hodnota okolo 1%. Nejcitlivější na ztrátu paketů jsou tedy data, poté následuje hlas a nakonec videokonference. Streamované video je o něco méně citlivé než videokonference.

Naopak hlasové služby jsou náročné na zpoždění a kolísání zpoždění více než video aplikace. Porušení plynulosti díky koncovému zpoždění nebo kolísání zpoždění hovoru má za následek hluchá místa v hovoru, kdy jeden účastník hovoru

poslouchá druhého účastníka a ten už nějakou dobu nehovoří. U videa nedochází k výraznému zhoršení kvality, ale dochází ke snížení počtu snímků za sekundu, tudíž dochází k „trhání“ obrazu. Na přenos dat nemá zpoždění a kolísání zpoždění výrazný vliv.

Co se týče šířky pásma pro přenos ve WiFi sítích, hlasové služby potřebují menší, ale konstantní šířku pásma. Přenos velkých dat naopak potřebuje velkou šířku pásma, ale požadavek na konstantní šířku už zde není tak zásadní jako u hlasových služeb.

Mezi jedny z nejrozsáhlejších služeb v bezdrátových sítích patří mimo jiné tyto vybrané služby:

- VoIP (Voice over Internet Protocol)
- VoWLAN (Voice over Wireless LAN)
- Videokonference
- Streamované video

4.1 VoIP

Voice over Internet Protocol [13], [14] je technologie, která podporuje přenos hlasu prostřednictvím bezdrátové počítačové sítě nebo jiného média, prostupného pro protokol IP. Tento protokol nachází využití u telefonování prostřednictvím internetu, intranetu nebo jakéhokoliv jiného datového spojení. Zásadní podmínkou pro spolehlivé VoIP telefonní spojení je zajištění kvality služby QoS. VoIP je velice oblíbená díky své nízké ceně. V kombinaci s některými aplikacemi lze využívat zcela zdarma.

VoIP efektivně využívá kapacitu kanálu. Jeden kanál je využit pro více služeb a více přenosů. Dále je schopno využít současnou infrastrukturu datových sítí se snadným navýšením kapacity (u paketově orientovaných sítí). Další výhoda VoIP spoívá v nízkých nákladech, které se pohybují cenově často v nižších sférách než u klasických služeb ADSL, kabelové televize atd. Musí být však zajištěna podpora kvality služby QoS.

Pro přenos digitalizovaného hlasu je využíván protokol IP a protokol UDP. V těle konkrétních UDP datagramů se kromě klasických údajů přenáší malý úsek telefonního hovoru. Je zakódovaný podle algoritmu tak, aby bylo dosaženo úspory objemu přenášených dat. Kódovací a dekódovací algoritmy – kodeky, mají různá označení (G.711, G.723, G.729, atd.), jsou standardizovány a ze značné části i patentovány. Kromě UDP datagramů, nesoucích o vrstvu výš v RTP zapouzdřené úseky vlastního hovoru, zahrnuje VoIP přenos ještě další pakety. Jsou to např. ICMP pakety a také datagramy TCP a UDP. Ty řídí přenos, nesou telefonní signalizaci, ověřují dostupnost komunikujících zařízení. Celá rodina VoIP protokolu není jediná, ale má řadu variant, lišících se podle standardu, použitého pro VoIP spojení.

Nejsložitější a nejvíce pokročilý je protokol H.323, nejvíce perspektivní a v současné době nejvíce používaný je protokol SIP (Session Initiation Protocol). SIP je protokol pro inicializaci relací. Velkou výhodou má SIP např. v tom, že prochází

bez větších potíží přes místo, kde v síti probíhá překlad adres NAT. Existuje několik způsobů, jak dosáhnout průchodu komunikace typu SIP přes problémová místa v síti.

4.2 VoWLAN

Služba Voice over Wireless LAN [1], [3] byla vytvořena již dávno. K nasazení se však schýlilo až na podzim roku 2005 a otevřela se této službě tak cesta k masovému nasazení díky dlouho očekávanému schválení normy IEEE 802.16e. Dříve se používala pouze firemní řešení pro úsporu nákladů na telefonování v podnikových sítích s VoIP a také pro větší komfort jak zaměstnanců, tak klientů, protože uživatelé získali díky VoWLAN svobodu pohybu (určitou míru mobility) v dosahu podnikových WLAN.

VoWLAN je využití Internet protokolu IP pro bezdrátový přenos hlasu. End-to-end přenos hlasu vyžaduje poskytnutí QoS v bezdrátové síti, což znamená MAC podporující QoS a obsahující admission control a radio resource management (RRM), signalizační protokoly (například H.323 a SIP) a směrovací protokoly (např. RIP (Routing Information Protocol), OSPF (Open Shortest Path First) a BG (Border Gateway protocol)).

Požadavkem na VoWLAN je zejména přesunout vlastnosti telefonních hovorů (přenos hlasu i signalizaci) do bezdrátové sítě WLAN s páteřní sítí na bázi IP a vzájemně připojit do veřejné telefonní sítě a do privátní telefonní sítě tak, aby byla zajištěna současná kvalita hlasu a uchovány vlastnosti pro uskutečnění hovoru. Hlasová kvalita by měla být srovnatelná jako u veřejné telefonní sítě. Výchozí síť také musí zajišťovat přesné kritéria obsahující minimální zamítnutí hovoru, síťové zpoždění, ztrátu paketů a rozpojení hovoru. Tyto požadavky musí být zajištěny i v případě, že je síť na hranici neprůchodnosti a zahlcení a v případě, že více uživatelů musí sdílet síťové zdroje. Kontrola hovoru musí zajistit, aby byl hovor průchodný a aby volaná strana věděla jakou technologii služba nyní využívá. V neposlední řadě zde musí být zajištěn systém zabezpečení, managementu, adresování a účtování hovoru.

4.3 Videokonference

Videokonference [1], [3], [16] představuje moderní způsob multimediální komunikace. Umožňuje současný přenos zvuku, obrazu a dat mezi dvěma i více účastníky. Je to také komunikace na libovolnou vzdálenost probíhající v reálném čase. Její způsob závisí na programovém vybavení.

Základní princip videokonference spočívá v přepínání paketů. Přenášená data se rozdělí na stejně velké bloky - pakety, doplní se k nim některé další údaje (adresa odesílatelem, adresa příjemce, atd.) a každý paket pak cestuje přenosovým médiem samostatně. Může tedy dojít ke ztrátě paketu po cestě nebo k situaci, kdy pakety nejsou doručeny v pořadí odeslání.

Jedno fyzické nebo virtuální přenosové médium je obvykle sdíleno více uživateli. Přes stejné medium, které je použito pro účely videokonference si ostatní uživatelé mohou prohlížet internetové stránky, stahovat poštu, apod. Pokud tedy probíhá videokonference na infrastruktuře Internetu, nelze ručit za QoS.

Internetový protokol používá mechanismus, jakým vytvoří z málo spolehlivého média zdánlivě spolehlivé medium. Tím je protokol TCP. Velkým problémem ovšem je, že při ztrátě jednoho paketu nemohou být přijaté následující pakety do té doby, dokud není ztracený paket znovu poslán a úspěšně přijat. Pro videokonference je důležitější neustálý tok aktuálních dat. Důležitější je tedy dostávat data včas, než ve správném pořadí. Z tohoto důvodu videokonference pro IP síť záměrně využívají protokol UDP, který není tak citlivý na ztrátu paketů.

Při realizaci videokonference mezi 2 stanicemi musí být každá strana vybavena koncovou stanicí s kodeky.

Koncová stanice pro IP konferenci je vybavena jednou nebo více kamerami, mikrofonom a reproduktorem. Obraz a zvuk zachycený vstupními zařízeními na koncové stanici (kamera, mikrofon) je zakódován podle příslušných standardů a odeslán. Koncová stanice na druhé straně signál dekoduje podle daných standardů.

Videokonference umožňují současnou komunikaci více stran. Pro tento typ komunikace je nutné mezi koncové stanice vřadit speciální server, který umožňuje současnou komunikaci více stran. Stává se jakýmsi prostředníkem mezi všemi koncovými stanicemi.

Videokonferenční vybavení můžeme rozdělit do 5 kategorií:

- PC s Web kamerou
- Videokonferenční PC
- Videokonferenční stanice (Kompaktní systém)
- Skupinový systém (mobilní)
- Videokonferenční centrum (Videokonferenční sál)

V případě, že videokonference je používána pro simulaci jednání, mluvíme o komunikaci mezi dvěma uživateli, mezi jedním uživatelem a skupinou uživatelů nebo mezi skupinami uživatelů navzájem. V každé z těchto variant kvalita videosignálu a audiosignálu je kritická pro úspěch vzdálené účasti. V případě videokonference je kritickým faktorem kvalita audiosignálu. Občasné zrnění nebo jiné výpadky v kvalitě přenášeného obrazu jsou uživateli snáze tolerovány, než nekvalitní přenos zvuku.

Významným faktorem, který ovlivňuje kvalitu videokonference jsou přenosové rychlosti. V současné době je postačující rychlost pro většinu videokonferencí okolo 384Kbps.

4.4 Streamované video

Streaming [1], [16] je technologie založená na kontinuálním přenosu audiovizuálního signálu mezi zdrojem a koncovým uživatelem. V současné době se streamingu využívá především pro přenášení audiovizuálního materiálu po

internetu. Streamované video může probíhat v reálném čase - internetová televize nebo rádio, nebo systémem Video on demand – streamovací servery (např. YouTube). Pro streamování videa více uživatelům zároveň musí mít provozovatel k dispozici kromě obsahu ještě streamovací server, který zajišťuje komunikaci s cílovými počítači a plynulé vysílání dat.

Na přenos streamovaného videa je potřeba kodeků na zmenšení objemu dat. Ke streamingu se nejvíce využívá flashových kodeků, MPEG-4, Windows Media, Quick Time a další. I tak je přenos záznamu v televizním rozlišení 720×576 velmi náročný. Proto bylo nejvíce rozšířené streamované video v rozlišení 320×240 bodů při datovém toku 256–512Kbps. Přenos v televizním rozlišení dnes poskytuje pouze iVysílání České Televize a to díky síti doručování obsahu NACEVI (CDN – Content Delivery Network). Tato síť disponuje schopností obsloužit datový tok 50Gbps, což je nejvíce v České republice. Díky NACEVI je Visual Connection schopen doručit video největšímu počtu internetových diváků současně [15].

Ke streamingu audia se využívá především kodeků Windows Media Audio, MP3 a další. Tento streaming se pohybuje v datových tocích obvykle od 16-256kbps. Audio může být streamováno jako single bitrate, což je jeden konstantní datový tok nebo multibitrate, což je více konstantních datových toků přenášených dohromady v jednom datovém toku mezi kódérem streamu a serverem. Přehrávač, přehrávající multibitrate stream ze serveru, dokáže potom automaticky měnit kvalitu zvuku v případě zhoršení/zlepšení kvality internetového připojení posluchače.

V dnešní době již existuje velké množství streamovacích serverů. Ve světě mezi nejznámější servery využívající streaming patří server YouTube, MySpace, atd. V České republice mezi nejznámější servery patří idnes.cz, Stream.cz, tn.cz a další.

5 Návrh řešení WiFi sítě

Na podkladě získaných poznatků o WiFi sítích, standardu IEEE 802.11 a jeho dodatkách, typech sítí, kvalitě služeb QoS a o principech jednotlivých služeb je navržena bezdrátová síť. Tato síť pracuje na podstatě standardu IEEE 802.11e. Je zde tedy zavedena podpora kvality služeb QoS. V bezdrátové síti je použito několik typů služeb pro následnou analýzu různých parametrů sítě, parametrů QoS a parametrů dat citlivých na zpoždění. Pro návrh modelu bezdrátové sítě, optimalizaci, simulaci této sítě a analýzu je využito softwarového vývojového prostředí Opnet Modeler. Mezi služby použité v síti patří přenos hlasu, videokonference, streamované video a další. U každé služby je použito různého typu obsluhy provozu.

5.1 Opnet Modeler

Program Opnet Modeler [17], [18] je simulační prostředí, které bylo vyvinuto firmou OPNET Technologies Inc. Tento simulační program slouží pro návrh, simulaci a analýzu různých síťových technologií a mechanismů. Opnet dokáže velice efektivně a podrobně modelovat chování rozsáhlých sítí včetně komunikačních protokolů pracujících na různých úrovních modelu sítě.

Základním kamenem Opnet Modeleru je jeho grafické prostředí, díky kterému je práce v něm efektivnější a rychlejší. Velmi důležitou vlastností Opnetu je široká možnost tvorby různých statistik z dané simulace. Tato vlastnost umožňuje použití Opnetu všude tam, kde je třeba ověřit chování reálného objektu v různých extrémních podmínkách (např. chování serveru při vysoké zátěži apod.). S touto vlastností také souvisí fakt, že někdy nemůžeme na reálném objektu ověřit chování, které ani nemusí nastat, ale díky Opnetu si jej můžeme nasimulovat tak, abychom znali výsledek chování reálného objektu v určité situaci a mohli díky této znalosti předcházet nežádoucím stavům.

Výsledné statistiky můžeme generovat do zprávy ve formátech XML (Extensible Markup Language) nebo HTML (Hyper Text Markup Language), nebo uložit data do tabulek. Opačně aplikace umí z těchto formátů načíst vstupní data. Dále Opnet Modeler obsahuje prohlížeč animací, díky kterému můžeme názorně vidět průběh simulace.

Simulace probíhá s určitým zrychlením, takže je možné nasimulovat například měsíční chování sítě v řádu hodin. Značná výhoda Opnetu tkví v jeho objemných knihovnách, které mají dostupný zdrojový kód, z čehož plyne, že kód můžeme dále upravovat.

Další vlastností tohoto simulačního programu je jeho mutliplatformnost (Windows, Linux).

5.1.1 Základní prvky prostředí Opnet Modeler

K dispozici je hned několik základních prvků [17], [18] a to:

- subnet – podsít' (složená ze stanic, aktivních síťových prvků, komunikačních linek atd.)
- node model – model uzlu (složený ze základních funkčních bloků jako zdroj, procesor atd.)
- process model – model procesu, zde jsou definovány jednotlivé procesy modelu uzlu (např. stavy procesu, události, přechody atd.)

5.1.2 Editory prostředí Opnet Modeler

Opnet [17], [18] představuje hierarchii editorů, které společně popisují spojení struktur modelové sítě a protokolů. Opnet Modeler je tvořen ze tří základních editorů (znázorněno na obr. 5.1 níže):

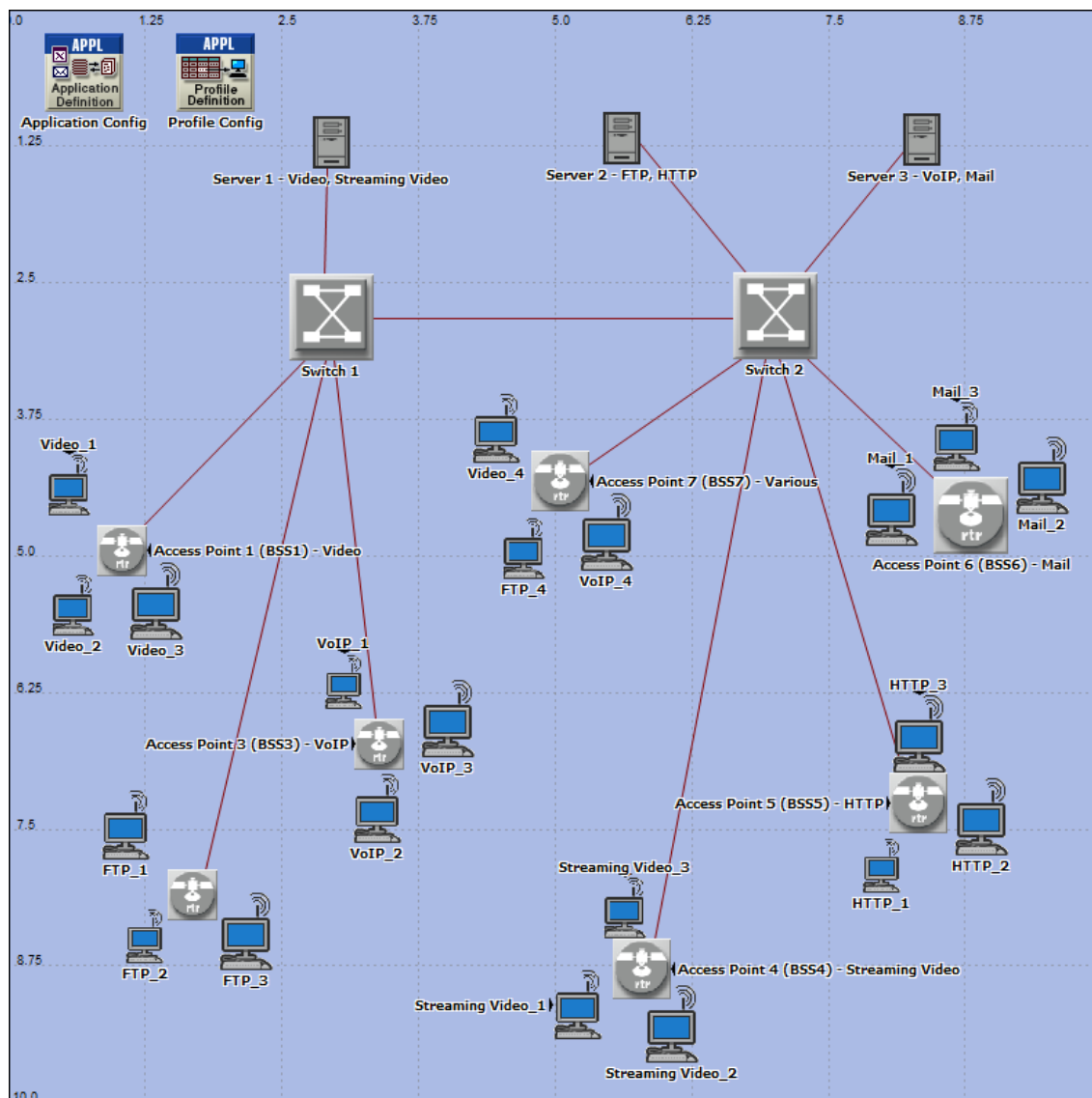
-
- Project editor**
- Access Point
- Station 2 - Streaming Video
- Station 3 - FTP
- Station 1 - Video
- Station 4 - HTTP
- Station 5 - HTTP
- Node editor**
- dhcp
- manet_rtr_mgr
- mobile_ip
- application
- cpu
- tpal
- tcp
- ip_encap
- ip
- arp
- wireless_lan_mac
- wlan port rx 0.0
- wlan port tx 0.0
- Process editor**
- netif
- open
- send
- receive
- status
- data
- abort
- close

5.2 Návrh sítě

Bezdrátová síť se skládá z 7 BSS. Obsahuje 3 servery, 2 přepínače, 7 přístupových bodů a 21 bezdrátových stanic. Každý ze tří serverů poskytuje jiné druhy služeb. Všechny 3 servery jsou propojeny s přepínači, které jsou dále navzájem spojeny. Jednotlivé přístupové body jsou napojeny na přepínače. Každá z BSS pro přehlednost podporuje jiný typ služby. Sedmá BSS podporuje více služeb, aby bylo možné vidět, jak se navzájem mohou služby ovlivňovat. Všechny stanice jsou připojeny bezdrátově na přístupové body.

37

5.2.1 Schéma zapojení



Obr. 5.2: Schéma zapojení WiFi sítě v prostředí Opnet Modeler.

Nový projekt v programu Opnet Modeler je vytvořen ve scénáři Campus, kde je velikost plochy nastavena na 10km×10km. Z palety objektů byl vložen objekt *Application Config*, *Profile Config*, 3×server *ethernet_server*, 2×přepínač *ethernet16_switch*, 7×přístupový bod *wlan_ethernet_router_adv* a 21 klientských stanic *wlan_wkstn_adv*. Všechny 3 servery jsou propojeny s přepínači linkou 1000BaseX. Oba přepínače jsou propojeny mezi sebou stejnou linkou. A jinak tomu není ani u propojení přepínačů s přístupovými body. K přepínači Switch 1 jsou připojeny 3 přístupové body a k druhému přepínači Switch 2 jsou připojeny 4 přístupové body. Ke každému z přístupových bodů jsou následně bezdrátově připojeny 3 stanice. Pro bezdrátový přenos je použito standardu IEEE 802.11e s podporou kvality služeb QoS.

5.2.2 Popis jednotlivých prvků sítě a jejich konfigurace

Všem prvkům v projektu bylo nutné nastavit jednotlivé parametry tak, aby celá síť fungovala správně bez jakéhokoli omezování. U všech zařízení v síti jsou nastaveny HCF parametry pro podporu kvality služeb QoS a vysílací výkon *Transmit Power* na *0.005W*.

Application Configuration – zde se nastavují všechny aplikace, které budou ve scénáři fungovat. To se provede tak, že pravým tlačítkem myši klikneme na tento objekt a zvolíme položku *Edit Attributes*. Zobrazí se nabídka, kde v záložce *Application Definitions* vybereme položku *Number of Rows*, kterou nastavíme na hodnotu 6. Dále postupně každou z těchto položek editujeme následovně:

- **Video** – první položku pojmenujeme jako *Video*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Video Conferencing*. V této službě opět *Edit* a nastavíme velikost videa na *128×120 pixels*. Snímkování nastavíme na *10 frames/sec*. Typ služby nastavíme na *Interactive Multimedia (5)*. Zbytek nastavení necháme výchozí.
- **Streaming Video** – druhou položku pojmenujeme jako *Streaming Video*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Video Conferencing*. V této službě opět *Edit* a nastavíme velikost videa na *128×120 pixels*. Snímkování nastavíme na *10 frames/sec*. Typ služby nastavíme na *Streaming Multimedia (4)*. Zbytek nastavení necháme výchozí.
- **FTP** – třetí položku pojmenujeme jako *FTP*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Ftp*. V této službě opět *Edit* a nastavíme *Command Mix* na *50%*, *File Size (bytes)* na *constant (3750)*. Položku *Symbolic Server Name* na *FTP Server*. Typ služby nastavíme na *Best Effort (0)*. Zbytek nastavení necháme výchozí.
- **HTTP** – čtvrtou položku pojmenujeme jako *HTTP*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Http*. V této službě opět *Edit* a nastavíme *HTTP Specification* na *Microsoft Internet Explorer 5.0*. Položku *Page Interval Time* na *exponential (25)*. Typ služby nastavíme na *Best Effort (0)*. Zbytek nastavení necháme výchozí.
- **VoIP** – pátou položku pojmenujeme jako *VoIP*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Voice*. V této službě opět *Edit* a pro kódování, které se bude pro hlas používat zvolíme kodek *G.729 A*. Typ služby nastavíme na nejvyšší prioritu a to *Interactive Voice (6)*. Zbytek nastavení necháme výchozí.
- **Mail** – šestou a zároveň poslední položku pojmenujeme jako *Mail*. V záložce *Description* vybereme položku *Edit* a zvolíme službu *Mail*. V této službě vybereme z přednastavených položek položku *Medium Load*, která nám vhodně nastaví vše potřebné.

Profile Configuration – zde se nastavují parametry aplikací, které jsme vytvořili v objektu Application Config. Jedná se o parametry jako např. v jakém čase se budou jednotlivé služby spouštět a v jakém čase budou naopak končit, jak velké objemy dat se budou přenášet, jaké zátěžové charakteristiky budou použity, apod. Je zde možno nastavit si vlastní profil, ve kterém může být jedna nebo více služeb. Při změně parametrů tohoto profilu se pak změny provedou pro všechny obsažené služby. Do nastavení objektu Profile Configuration se dostaneme opět přes pravé tlačítko myši vybráním položky *Edit Attributes*. Zobrazí se nabídka, kde v záložce *Profile Configuration* vybereme položku *Number of Rows*, kterou nastavíme na hodnotu 6. Dále v záložkách *Enter Application Name* vybereme aplikace již vytvořené v objektu Application Configuration. Po rozkliknutí jednotlivých záložek (Video profile, Streaming Video profile, FTP profile, HTTP profile, VoIP profile a Mail profile) jim nastavíme parametry.

- **Video profile** – Záložka *Operation Mode* udává jak bude aplikace spuštěna. Jestliže zvolíme *Serial (Ordered)*, zajistíme tím spouštění aplikací jedna po druhé. Volba *Serial (Random)* zajistí také spouštění aplikací jedna po druhé, ale v náhodném pořadí. Volba *Simultaneous* spustí všechny aplikace současně. Vybereme tedy volbu *Serial (Ordered)*. Položku *Start Time Offset (seconds)* nastavíme na *uniform (5, 10)*. Záložku *Duration* nastavíme na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavíme *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (10)* a *Number of Repetitions* *uniform (5, 10)*. Položku *Start Time (seconds)* nastavíme na *constant (180)* a *Duration (seconds)* na *End of Simulation*.
- **Streaming Video profile** – Záložku *Operation Mode* nastavíme opět na *Serial (Ordered)*. V položce *Start Time Offset (seconds)* nastavíme *uniform (5, 10)*. Záložku *Duration* nastavíme na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavíme *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (10)* a *Number of Repetitions* *uniform (5, 10)*. Položku *Start Time (seconds)* nastavíme na *constant (370)* a *Duration (seconds)* na *constant (1000)*.
- **FTP Profile** – *Start Time Offset (seconds)* nastavíme na *uniform (5, 10)*. Záložku *Duration* nastavíme na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavíme *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (10)* a *Number of Repetitions* na *uniform (5, 10)*. Položku *Start Time (seconds)* nastavíme na *constant (60)* a *Duration (seconds)* na *End of Simulation*.
- **HTTP Profile** – Vše nastavíme stejně jako u FTP Profile, s výjimkou položky *Start Time (seconds)*, kterou nastavíme na *constant (120)*.
- **VoIP Profile** – *Start Time Offset (seconds)* nastavíme na *No Offset*. Záložku *Duration* nastavíme na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavíme *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (300)* a *Number of Repetitions* na *constant (0)*. Položku *Start Time (seconds)* nastavíme na *uniform (240, 250)* a *Duration (seconds)* na *constant (1060)*.

- **Mail Profile** – Zde nastavíme opět vše jako u FTP Profile, s výjimkou položky *Start Time (seconds)*, kterou nastavíme na *constant (310)*.

Servery – služby a profily těchto služeb, které jsme vytvořili v objektu Application Config a Profile Config musí být nějakým zařízením poskytovány. K tomu slouží použité servery. Pro přehlednost mezi poskytovanými službami jsou zde použity 3 servery.

- **Server 1** – tento server slouží k poskytování Video a Streaming Video aplikací. Server je propojen s prvním přepínačem linkou *1000BaseX*.
- **Server 2** – tento server slouží k poskytování FTP a HTTP služeb. Tento server je propojen s druhým přepínačem linkou *1000BaseX*.
- **Server 3** – tento server slouží k poskytování Voice služby pro VoIP aplikace a pro službu Mail. Také tento server je propojen s druhým přepínačem linkou *1000BaseX*.

Přepínače – prakticky propojují všechny servery s přístupovými body. Je na nich zapnuta podpora parametrů kvality služeb QoS.

Přístupové body – poskytují bezdrátové rozhraní pro spojení a přenos mezi klientskými stanicemi a servery. Jsou zde potřeba nastavit některé atributy. Do nastavení se dostaneme pomocí kliknutí pravého tlačítka myši na tento objekt a vybráním položky *Edit Attributes*. Dole v záložce *Wireless LAN Parameters* nastavíme *HCF Parameters* na *Enabled*. Položku *BSS Identifier* nastavíme pro každý přístupový bod jinou v rozmezí 1-7, *Physical Characteristics* na *Direct Sequence* a *Access Point Functionality* na *Enabled*. Zbýlé nastavení ponecháme výchozí.

Klientské stanice – u těchto stanic se nastavuje druh služeb nebo aplikací, které se na nich budou provozovat. Pro názornost je každé trojici stanic přiřazena jen jedna služba. U všech klientských stanic nastavíme v menu *Edit Attributes* v záložce *Wireless LAN Parameters* u parametru *BSS Identifier* hodnotu odpovídající hodnotě příslušných přístupových bodů. Položku *Access Point Functionality* na *Disabled* a *Physical Characteristics* na *Direct Sequence*. Vysílací výkon nastavím u klientských stanic *Transmit Power (W)* - *0.005*. Nesmíme zapomenout na položku *HCF Parameters* a nastavíme ji na *Enabled*. Zbýlé nastavení ponecháme výchozí. Dále vybereme pro každou trojici stanic zvlášť služby, které na jednotlivých stanicích poběží (Video, Streaming Video, FTP, http, VoIP, Mail). U trojice stanic s BSS 7 přiřadíme každé stanici jinou službu (Video, FTP, VoIP).

5.3 Simulace

Program Opnet modeler [17], [18] poskytuje širokou škálu možností simulace. Z každé simulace je možné vytvořit velké množství různých statistik.

Tato vlastnost umožňuje použití Opnetu všude tam, kde je třeba ověřit chování reálného objektu v různých extrémních podmínkách (např. chování serveru při vysoké zátěži apod.). S touto vlastností také souvisí fakt, že někdy nemůžeme na reálném objektu ověřit chování, které ani nemusí nastat, ale díky Opnetu si jej můžeme nasimulovat tak, abychom znali výsledek chování reálného objektu v určité situaci a mohli díky této znalosti předcházet nežádoucím stavům.

Výsledné statistiky můžeme generovat do zprávy ve formátech XML (Extensible Markup Language) nebo HTML (Hyper Text Markup Language) nebo uložit data do tabulek. V Opnetu je také obsažen prohlížeč animací, díky kterému můžeme názorně vidět průběh simulace.

Simulace probíhá s určitým zrychlením, takže je možné nasimulovat například měsíční chování sítě v řádu hodin.

5.3.1 Nastavení simulace

V tomto projektu jsou sledovány statistiky pro analýzu bezdrátové sítě a služeb. Jsou zde simulovány vlastnosti dat citlivých na zpoždění.

Hlavními sledovanými statistikami jsou ku příkladu statistiky pro vyvážení provozu v síti, statistiky provozu jednotlivých služeb, statistiky základních parametru QoS a další.

Nastavení simulace se provádí v menu pod záložkou *Scenarios -> Manage Scenarios*. Zde vybereme, ve kterých scénářích chceme provádět simulaci a nastavíme parametry simulace:

- **Duration** – je doba, jak dlouho chceme sledovat chování sítě. V našem případě nastavíme dvacet minut, tj. hodnotu *20 minutes*.
- **Values per statistic** – udává počet naměřených hodnot, které budou sloužit k vykreslení statistiky, tj. grafu. Čím větší je zadaná hodnota, tím budou naše charakteristiky přesnější, ale simulace bude trvat déle a také výstupní soubor po simulaci bude větší. Proto vždy volíme kompromis mezi přesností a rychlostí simulace. Pro náš model postačí hodnota *100*.
- **Update interval** - při simulaci udává, jak často se bude měnit křivka počtu událostí probíhající simulace. Pro náš případ počet událostí na hodnotu *50 000 events*.
- **Simulation Kernel** – specifikuje způsob překladu modelu do spustitelného kódu. Necháme výchozí nastavení *Optimized*.

Před simulací nesmíme zapomenout na nastavení parametrů, kterými určíme, co všechno bude možné ve výsledných statistikách zobrazovat a také, na kterých místech sítě tyto statistiky chceme měřit. Toto nastavení se provede pomocí kliknutí pravého tlačítka myši na plochu campusu a vybráním položky *Choose Individual DES Statistics*. Pro určení statistik na určitém místě sítě klikneme pravým na konkrétní prvek, na kterém chceme tyto statistiky měřit, a zaškrtneme příslušné parametry.

Po nastavení parametrů simulace přejdeme k samotné simulaci stiskem tlačítka *Run*. Po proběhnutí simulace klikneme na tlačítko *Close*. Pro zobrazení zvolených charakteristik klikneme pravým tlačítkem na plochu campusu a zvolíme z nabídky položku *View Results*.

5.4 Výsledky simulace a optimalizace

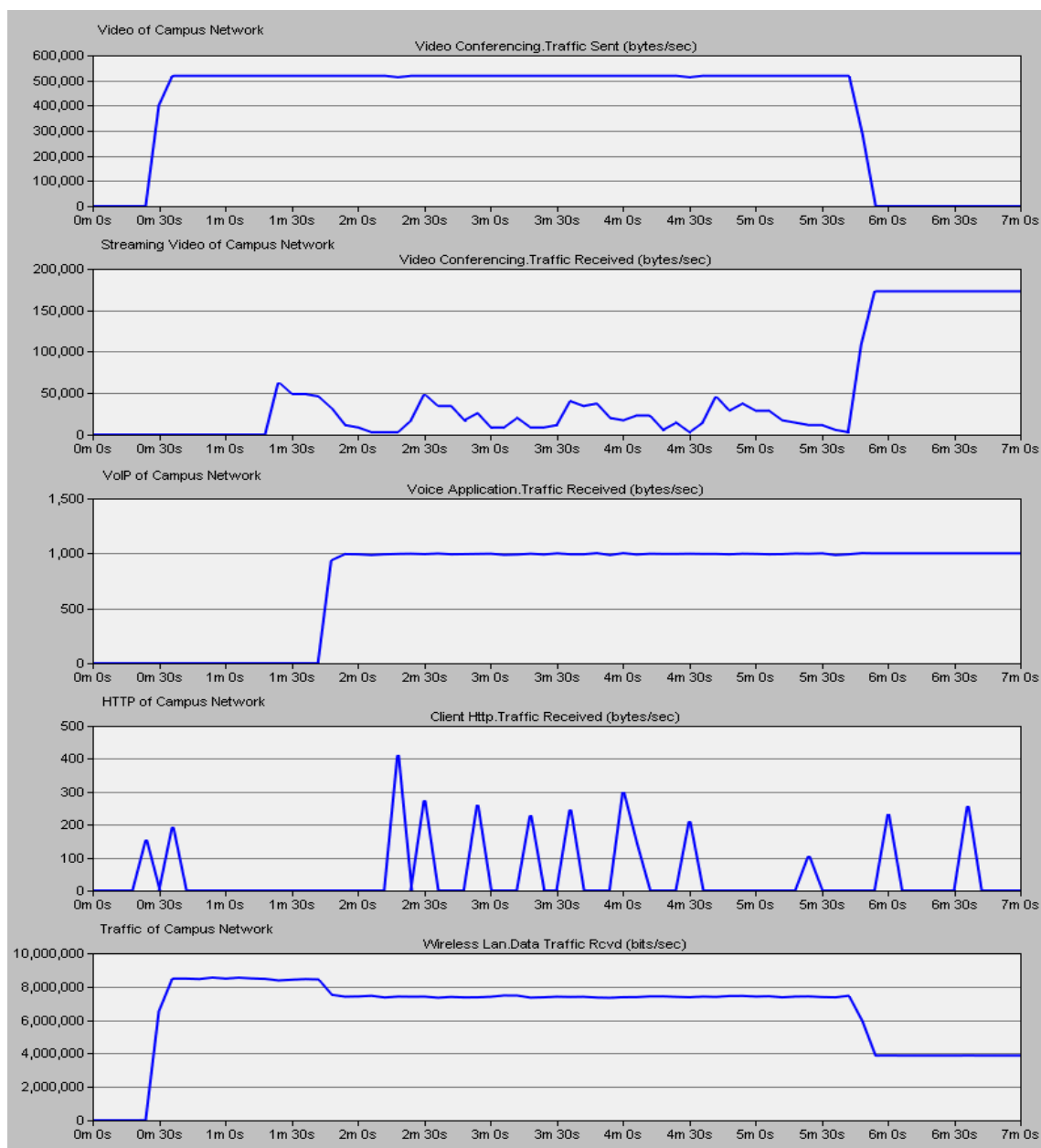
Bezdrátové stanice zatěžují síť přenosem interaktivního videa, streamovaného videa, FTP, prohlížením webových stránek – HTTP, přenosem hlasu VoIP a elektronickou poštou – Mail. U každé z těchto aplikací je použit jiný typ služby (Best Effort, Background, Interactive Video, Streaming Video, Voice). Ve WiFi síti je použit standard IEEE 802.11e s podporou kvality služeb QoS. Na grafech níže jsou znázorněny různé statistiky jako například graf pro nevyvážený provoz sítě, vyvážený provoz sítě, celkový provoz, grafy základních parametrů QoS a velikost fronty.

5.4.1 Provoz v síti (traffic)

Tento parametr nám ukazuje vytíženost sítě. Na následujících grafech je možno vidět provoz sítě na jednotlivých stanicích a celkový provoz sítě.

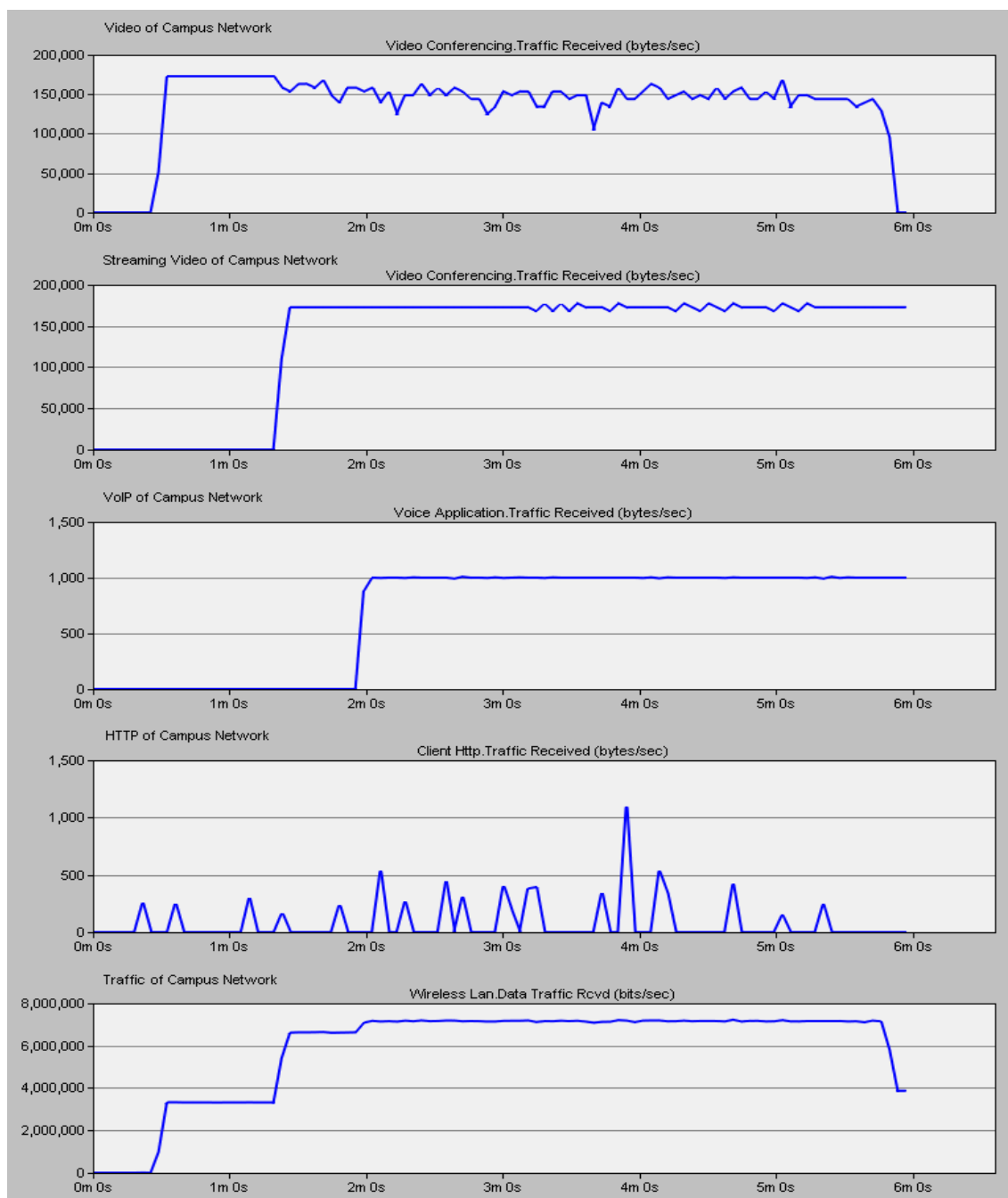
Na obr. 5.3 je znázorněn nevyvážený provoz sítě, kdy dochází k zabránění kapacity přenosového kanálu jednou službou – videokonferencí. Tím dojde k výraznému omezení zbylých služeb. Jak je vidět z druhého grafu, streamované video je omezeno rapidně, k jeho plnému provozu dochází až po ukončení videokonference. Přenos hlasu VoIP není nijak omezen, což je dáno podporou QoS. Vyžaduje jen malou přenosovou kapacitu, zato je velmi náročný na konstantní chod bez kolísání zpoždění. Na třetím grafu je znázorněn přenos služby HTTP, který nemá žádný výrazný vliv na chod jiných aplikací. Na spodním grafu obrázku je vyobrazen celkový provoz, na kterém je vidět, že přenosová kapacita bezdrátové sítě je plně využita už od spuštění videokonference až do jejího konce.

Takto nevyvážený provoz je potřeba upravit pomocí nastavení parametrů jednotlivých služeb a také upravením nastavení priorit těchto služeb.



Obr. 5.3: Nevývážený provoz v síti.

Na obr. 5.4 je znázorněn vyvážený provoz sítě. Všechny služby a jejich priority jsou již tedy nastaveny tak, aby nijak výrazně neovlivňovaly jiné služby běžící v této síti. Dostává se tedy přenosové kapacity bezdrátové sítě všem zúčastněným stanicím – službám. Videokonference už neovlivňuje streamované video a obě aplikace běží takřka konstantní rychlostí 180kBps od jejich spuštění až do konce. Přenos hlasu VoIP není nijak omezen, běží konstantní rychlostí 1000Bps. Na spodním grafu je opět vidět celkový provoz na síti. Tentokrát není přenosová kapacita kanálu plně vytížena jako u nevyvážené sítě. Pro názornost je spuštění jednotlivých služeb nastaveno postupně.

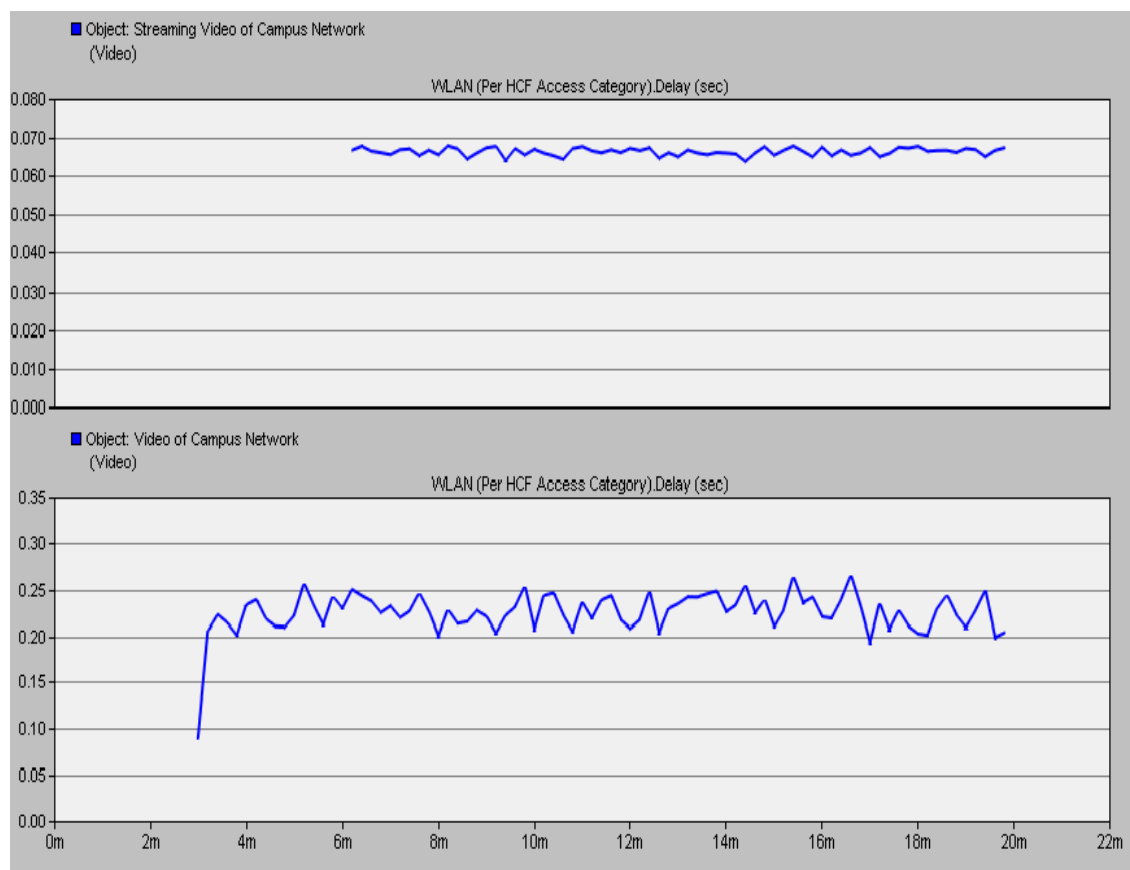


Obr. 5.4: Vyvážený provoz v síti.

5.4.2 Statistiky parametrů QoS

Pro přenos dat citlivých na ztrátu paketů, zpoždění, kolísání zpoždění nebo kapacitu sítě je zapotřebí jednotlivým typům paketů umožnit vhodné zacházení v síti při přenosu od zdroje k cíli, tedy zajistit jim kvalitu služeb - QoS. Vytvořená bezdrátová síť díky použité standardu IEEE 802.11e podporuje kvalitu služeb QoS. Tyto parametry jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

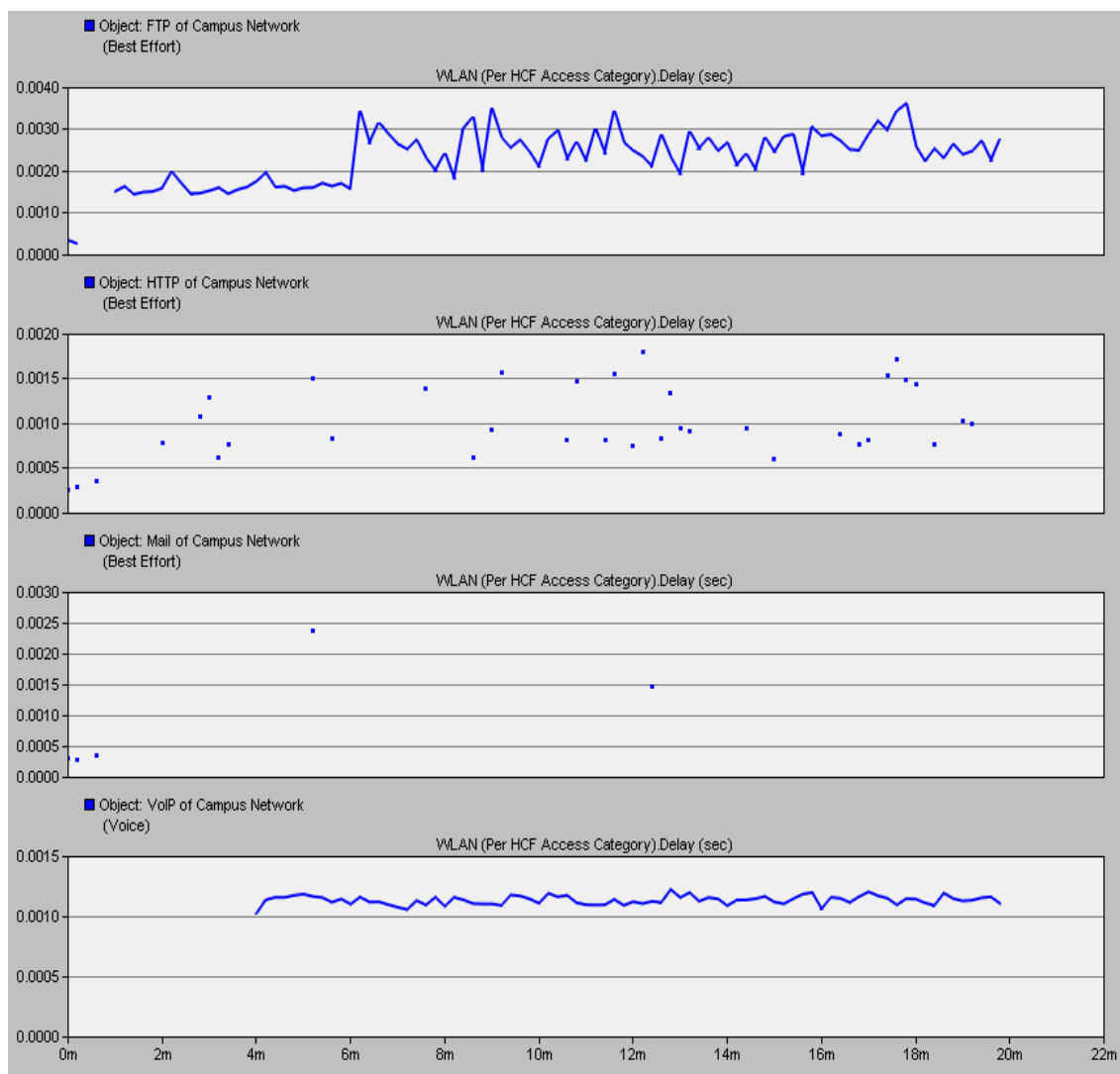
Koncové zpoždění – je jeden z nejdůležitějších parametrů kvality služeb QoS. Prakticky rozhoduje, jestli je v síti možné provozovat video a hlasové služby. Udává celkovou dobu úspěšně doručených dat. Nejvyšší jednosměrné zpoždění u hlasu by se mělo pohybovat pod 180ms. Při zpoždění přes 250ms již není zajištěna plynulost a hovor obsahuje hluchá místa.



Obr. 5.5: Koncové zpoždění videokonference a streamovaného videa.

Na obr. 5.5 je znázorněno koncové zpoždění videokonference a streamovaného videa. Tyto zpoždění vykazují průměrné koncové zpoždění jednotlivých příslušných stanic v síti. Pro videokonferenci jsou to stanice v BSS 1 a pro streamované video jsou to stanice v BSS 4.

Hodnota zpoždění u videokonference se pohybuje kolem 200-250ms a u streamovaného videa kolem 65-70ms, což je podle rozlišení kvality sítě podle parametrů (tab. 2.7) klasifikováno jako hodnota „dobrá“.

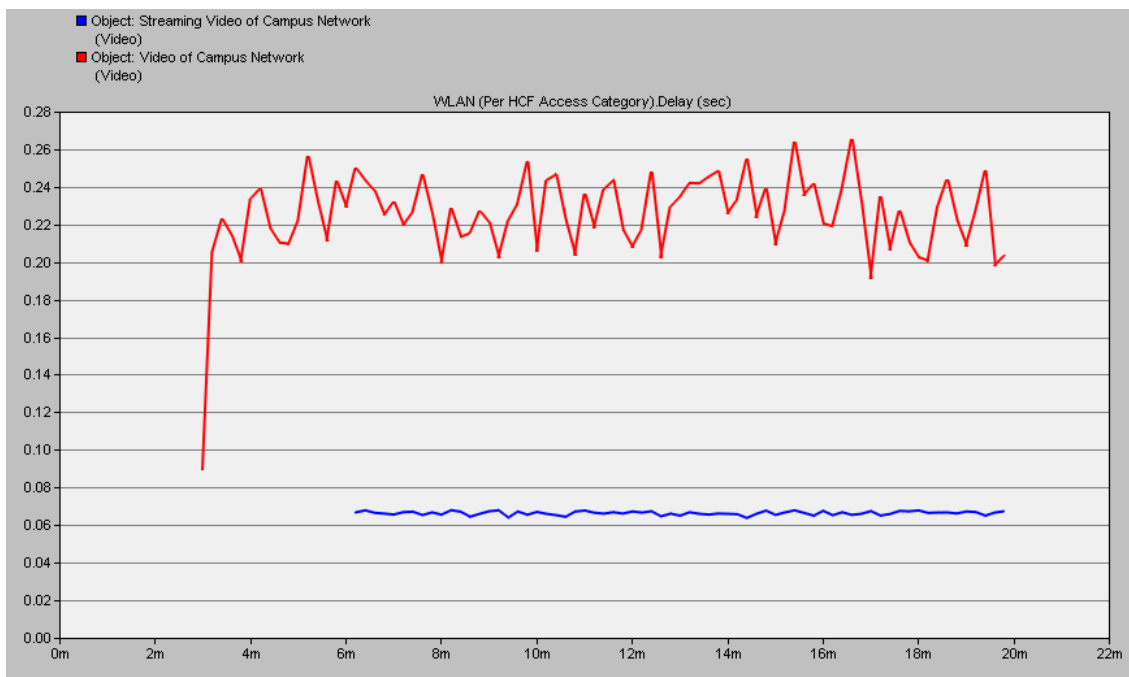


Obr. 5.6: Koncové zpoždění FTP, HTTP, Mail a VoIP.

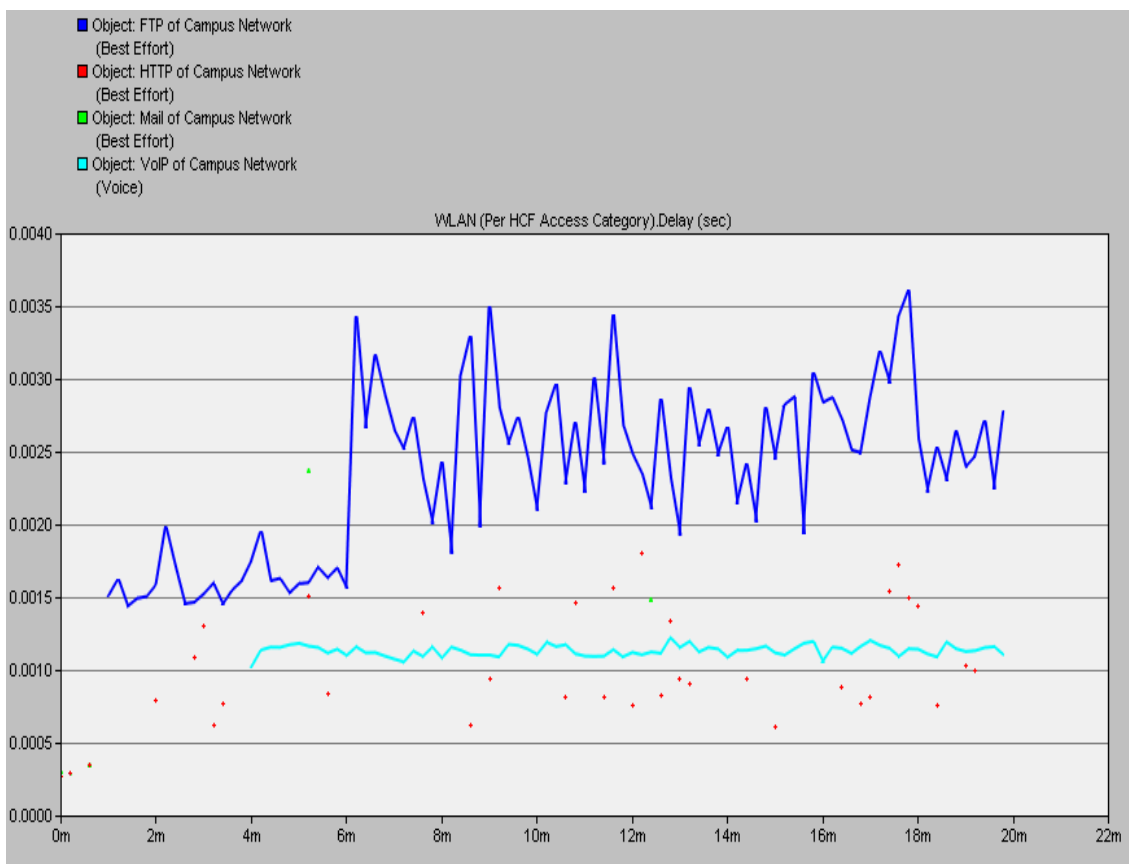
Hodnota zpoždění u přenosu hlasu VoIP je 1-1,5ms, což je podle rozlišení kvality sítě podle parametrů (tab. 2.7) klasifikováno jako hodnota „dobrá“. U FTP je maximální hodnota zpoždění 4ms, což je také v normě hodnoty „dobrá“. U HTTP je maximální zpoždění 2ms a Mail – 2,5ms. Takto nízké zpoždění bylo zajištěno i při velkém zatížení sítě. Bylo tedy zjištěno, že při použití QoS nejsou hlasové ani video aplikace ohroženy a zpoždění paketů dosahuje výborných výsledků.

Kolísání zpoždění – použití standardu IEEE 802.11e s podporou kvality služeb QoS do bezdrátové sítě nám zaručí, že přenášená prioritní data hlasu a videa získají konstantní zpoždění v řádu milisekund po celou dobu komunikace a neovlivní je ani narůstající vytížení sítě. V simulaci bylo dosaženo kolísání zpoždění u přenosu hlasu VoIP 1,3ms, u videokonference 200-250ms, u streamovaného videa 65ms a u FTP 1,5-3,5ms. Pro všechny prioritní služby je zde tedy zajištěno konstantní kolísání zpoždění. U hlasu je hodnota podle předpokladů nejlepší. U HTTP a Mail vyšly očekávané hodnoty podle nastavené priority *Best Effort*. Všechny hodnoty

tedy splňují podmínky pro bezproblémové provozování multimediálních i hlasových aplikací.

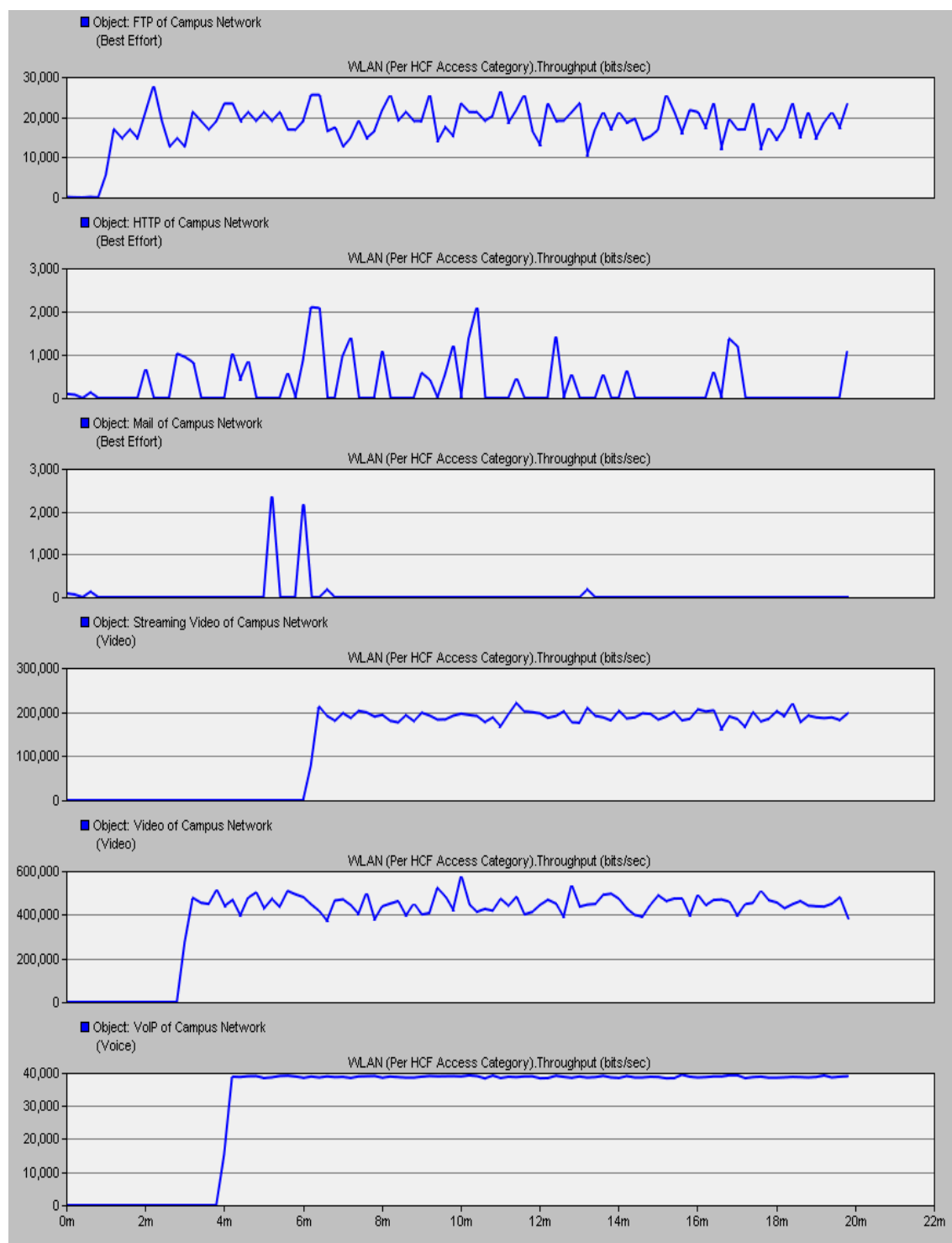


Obr. 5.7: Kolísání zpoždění videokonference a streamovaného videa.



Obr. 5.8: Kolísání zpoždění FTP, HTTP, Mail a VoIP.

Propustnost – je úzce spojená s kapacitou přenosového kanálu. Vyjadřuje celkový přenos úspěšně přijatých dat, které byly dále směrovány do vyšší vrstvy u každé kategorie přístupu. Pro možnost změřit tento parametr i v síti s podporou QoS je paket přijat ve stejné kategorii přístupu AC, která je použita k vysílání paketu na stanici, jenž data vyslala. Předpoklad je důležitý, protože kategorie přístupu nezasahují do příjmu, zpracování a směrování paketů přijatých na fyzické vrstvě.

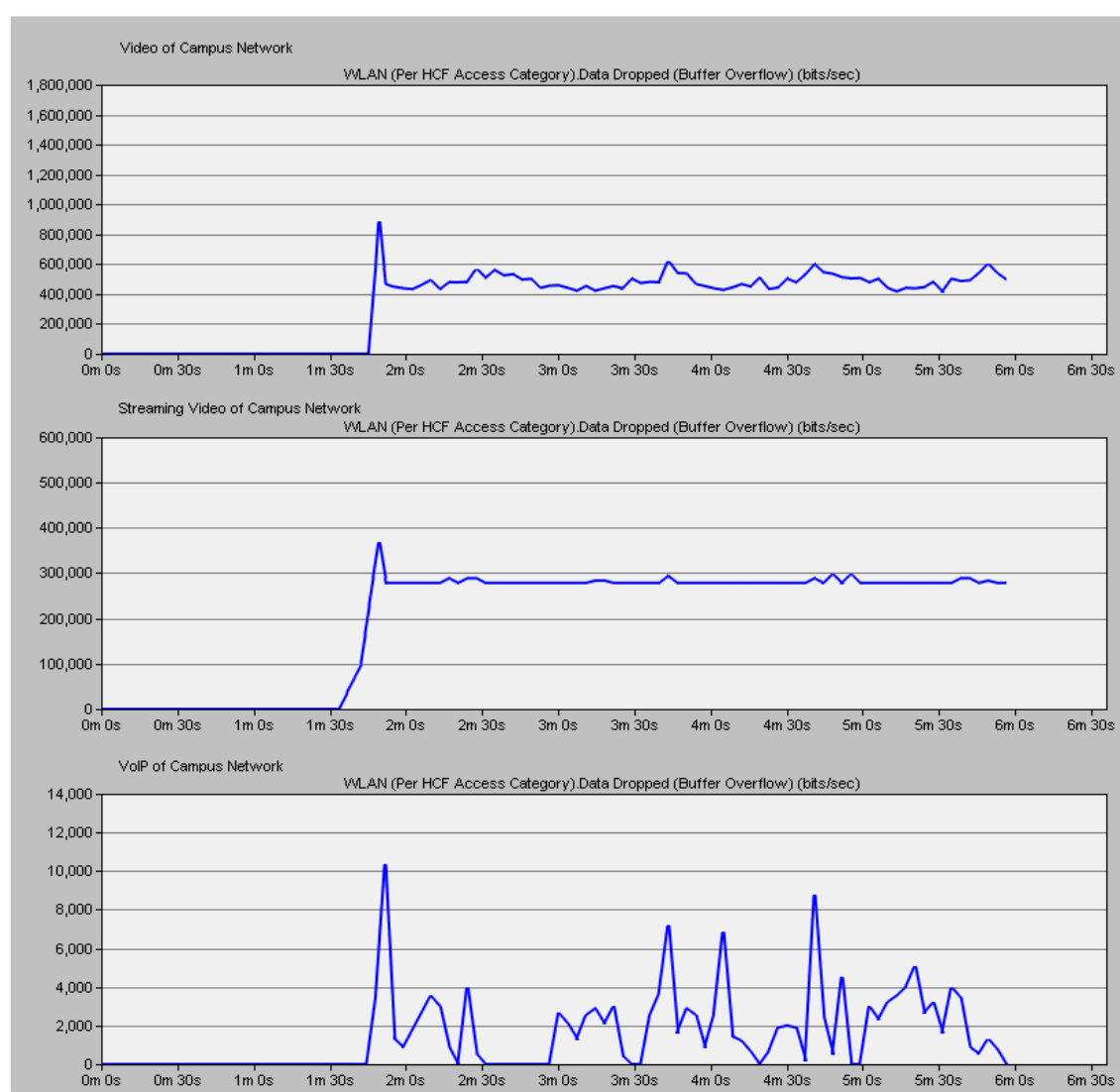


Obr. 5.9: Propustnost v síti s podporou QoS.

V simulaci byla propustnost pro bezdrátovou síť naměřena 100%. Při vysokém zatížení sítě dojde k omezení propustnosti všech dat, nejvíce dat s nejnižší nastavenou prioritou, které síť zatěžují nejvíce. Podpora kvality služeb QoS dosahuje výrazně vyšších hodnot propustnosti u prioritních i neprioritních dat oproti sítím, které QoS nepodporují.

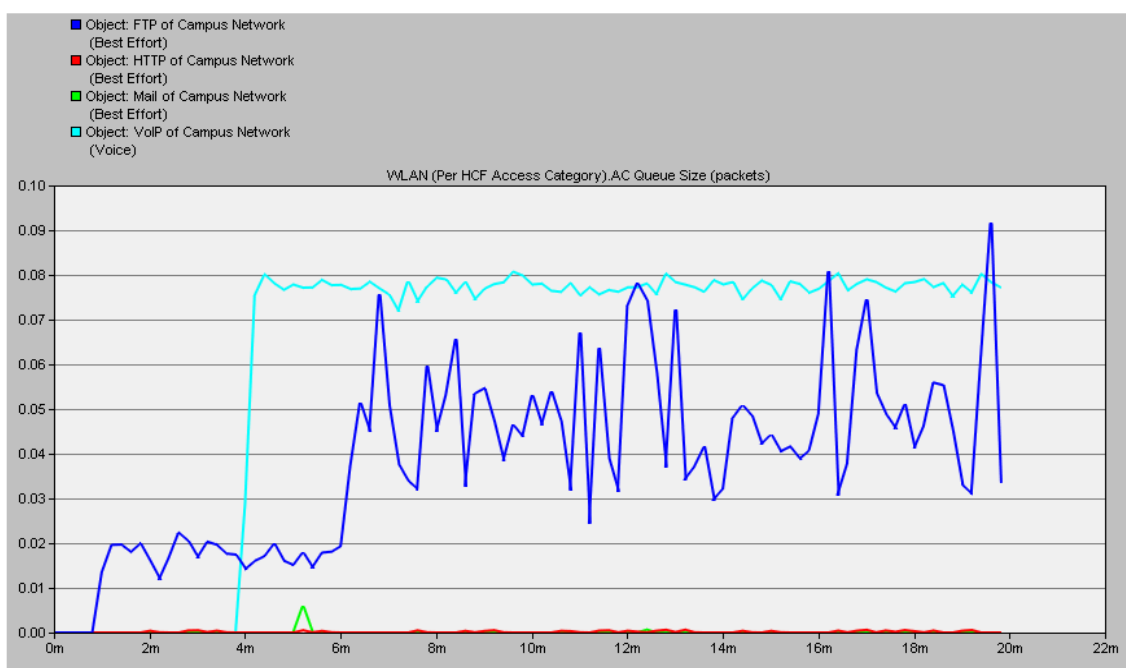
Zahazování dat – udává zahazování dat u vyšších vrstev bezdrátových stanic z důvodu přeplnění zásobníku nebo z důvodu velikosti paketu, která překročí nejvyšší dovolenou velikost paketu definovanou ve standardu 802.11.

K zahazování dat v simulované vyvážené síti takřka nedocházelo. Při velkém zvýšení provozu k zahazování dat začalo docházet. Tento stav je zobrazen na obr. 5.9 níže. V síti 802.11e se zajištěnou kvalitou služeb QoS dochází k výrazně nižšímu zahazování prioritních dat i při vysokém provozu než v síti bez podpory kvality služeb.

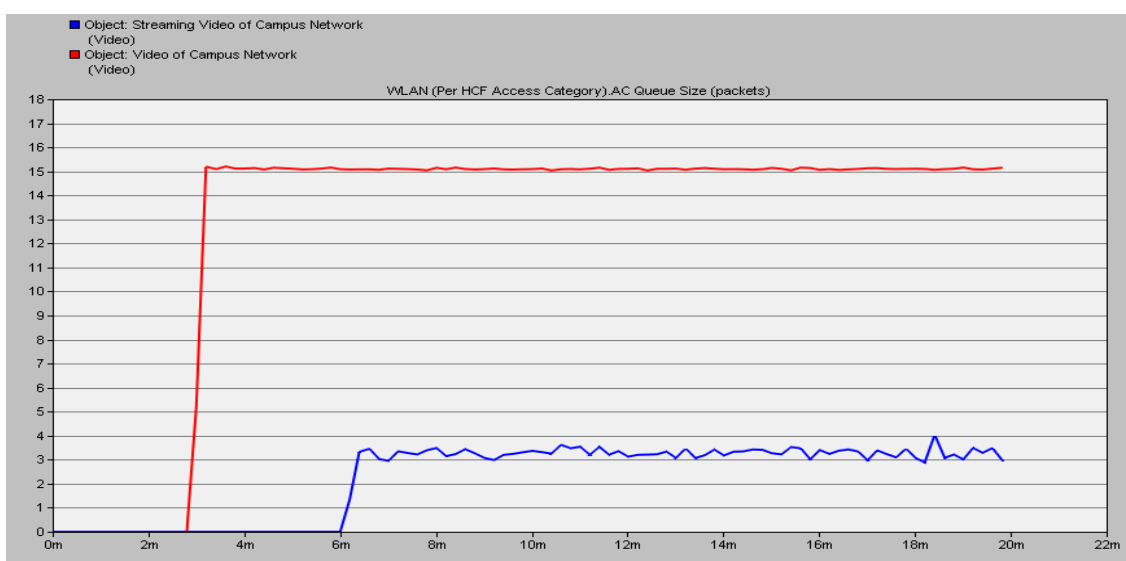


Obr. 5.10: Zahazování dat v síti s podporou QoS.

Velikost fronty – udává počet čekajících paketů ve vysílací frontě. Nejdůležitějšími parametry pro QoS v 802.11 při přenosu prioritních dat jsou nízké zpoždění a malé kolísání zpoždění. Neméně důležitým parametrem je však i velikost fronty. Ve sledované charakteristice jsou zahrnuty datové pakety, management pakety a pakety vyšších vrstev. Z grafu na obr. 5.10 níže je zřejmé, že rychleji jsou v síti s podporou kvality služeb QoS odbavována data s větší prioritou. VoIP s nejvyšší prioritou je tedy vzhledem k množství přenášených dat odbavováno nejrychleji. Obecně lze říci, že v síti 802.11e budou menší hodnoty paketů ve frontách než v sítích bez podpory kvality služeb QoS, což je samozřejmě lepší pro konečný přenos.



Obr. 5.11: Velikost fronty FTP, HTTP, Mail a VoIP.



Obr. 5.12: Velikost fronty videokonference a streamovaného videa.

6 Laboratorní úloha

Cílem úlohy je porovnat standard 802.11e s podporou kvality služeb QoS se standardem 802.11b bez podpory QoS. Seznamte se s jednotlivými standardy a jejich parametry (koncové zpoždění, kolísání zpoždění, propustnost a zahazování dat). Ve vývojovém prostředí Opnet Modeler realizujte zadanou síť. Simulujte parametry QoS a porovnejte jejich rozdíly za použití standardu 802.11e a 802.11b.

6.1 Podrobná teorie

IEEE 802.11 [1], [3], [6] je Wi-Fi standard s dalšími doplňky pro lokální bezdrátové sítě (WLAN). Tento standard vznikl roku 1997 pod 11. pracovní skupinou IEEE LAN/MAN standardizační komise (*IEEE 802*). Výraz 802.11x je používán pro množinu doplňků k tomuto standardu. Výraz *IEEE 802.11* je také spojován s původním 802.11 standardem (tedy bez dalších doplňků). První zmínka je však datována k roku 1992, kdy bylo americkým FCC a evropským ETSI uvolněno bezlicenční pásmo 2,4GHz pro průmyslové, vědecké a lékařské (ISM - Industrial Scientific and medical).

Vznikl tedy standard s označením IEEE 802.11, který obsahoval základní schéma bezdrátové komunikace, včetně definování 1. a 2. vrstvy v ISO modelu. Disponoval přenosovou rychlostí 1 nebo 2 Mbit/s ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz.

IEEE 802.11b – tento standard pracuje v pásmu 2,4GHz s přenosovou rychlostí 11Mbps. Zvýšení rychlosti se využilo použitím nového způsobu kódování – doplňkového klíčového kódování CKK (Complementary Code Keying) ve spolupráci s DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) u fyzické vrstvy. Je definován pro následující rychlosti: 1Mbps, 2Mbps, 5,5Mbps a 11Mbps. Reálně však dosahuje rychlosti max. cca 6Mbps. V Evropě je rozdělen na 13 kanálů a disponuje možností využití až tří kanálů bez vzájemného rušení.

IEEE 802.11e – tento standard [3], [13] byl připravován od roku 2001. a v roce 2005 byl schválen. Doplňuje standardy typu 802.11 o zásadní mechanismus, a to mechanismus zaručení určité kvality poskytované služby QoS. Standard tedy definuje podporu pro zajištění kvality služeb QoS (Quality of Service) v podvrstvě MAC a opravu chyb v téže podvrstvě. Standard 802.11e je navržen velice komplexně. Představuje otevřenou podporu do budoucna a schopnost obsluhy nejnáročnějších klientů ve firemním prostředí.

Kvalita služeb QoS – bezdrátové spoje [12], [19] mají jinou charakteristiku, než spoje pevné. Bezdrátové spoje ovlivňuje útlum signálu, rušení a šum. Tyto ovlivňující aspekty závisejí na místě a době vysílání. Vedou k následným chybám a ovlivňují kapacitu kanálu, která se mění v čase. Prostředí může hodně ovlivňovat kvalitu a sílu signálu, stejně jako vzdálenost nebo vzájemné rušení. Pro přenos dat citlivých na ztrátu paketů, zpoždění, kolísání zpoždění nebo kapacitu sítě je zapotřebí jednotlivým typům paketů umožnit vhodné zacházení v síti při přenosu

od zdroje k cíli, tedy zajistit jim kvalitu služeb - QoS (Quality of Service). Tudíž QoS je schopnost sítě podporovat aplikaci bez omezení funkce nebo výkonu aplikace. Mezi tyto aplikace patří mimo jiné IP telefonie, videokonference, distribuované výpočty nebo přenosy velkých objemů dat. Jako příklad kvality služby na úrovni aplikace může být videosignál určitého rozlišení o určitém počtu obrázků za sekundu, výměna zpráv mezi komunikujícími aplikacemi s určitým maximálním zpožděním a určitou maximální ztrátovostí, nebo přenos určitého velkého objemu dat v určitém čase.

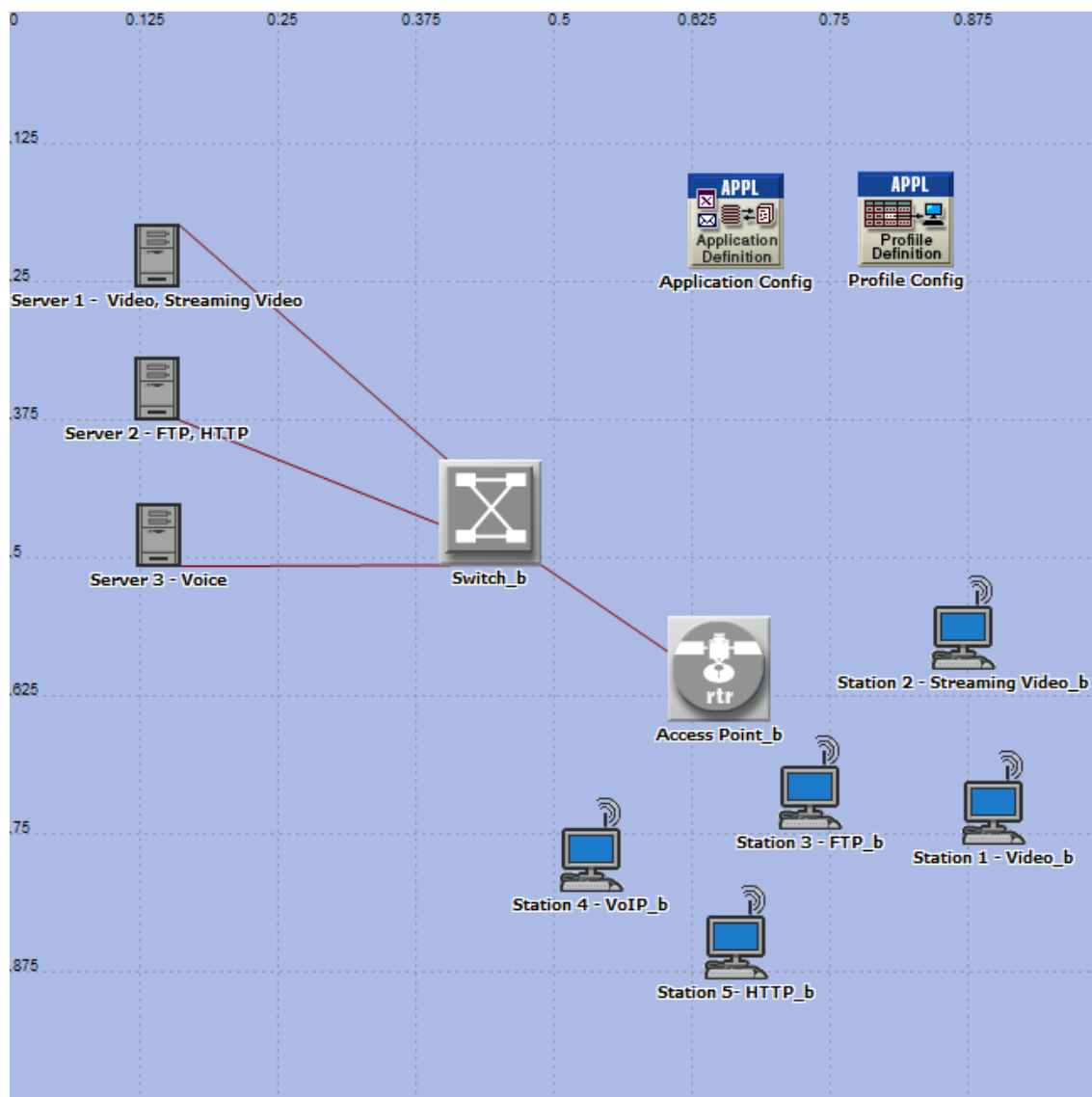
Výše uvedené požadavky aplikací pro bezproblémový přenos sítí lze shrnout do těchto základních parametrů:

- Ztrátovost paketů – tento parametr udává podíl přijatých paketů a vyslaných paketů za jednotku času, tedy kolik procent paketů nedorazí od odesílatele k příjemci. Ke ztrátě může dojít v důsledku dočasného přetížení některého komponentu komunikační trasy, například po vyčerpání kapacity vyrovnávacích pamětí, nebo přetížení procesoru směrovače a podobně.
- Koncové zpoždění – je parametr určující dobu potřebnou k přenosu paketu od odesílatele k příjemci. Na tento parametr má vliv hodně faktorů. Mezi ty hlavní patří použité kódování, příprava paketů na přenos kanálem, čekání paketů ve frontách přenosových zařízení a dekodování signálu. Ku příkladu můžeme uvést jednosměrné zpoždění u hlasových aplikací.
- Kolísání zpoždění – je pro aplikace často důležitější než absolutní koncová hodnota zpoždění. Kolísání zpoždění udává jak se mění zpoždění jednotlivých paketů během přenosu. Má původ zejména v agregačních místech sítě, kde se spolu mísí různé toky/vstupy od jediného výstupu. Nejvíce na kolísání zpoždění doplácí hlasové služby, protože ty vyžadují, aby pakety v rámci dané konverze přicházely se stejným zpožděním, ve stejných intervalech.
- Šířka pásma – je v podstatě přenosová kapacita kanálu. Přenosová kapacita souvisí s propustností (objem dat úspěšně přenesený za jednotku času).

6.2 Zadání

- 1) Seznamte se se softwarovým vývojovým prostředím Opnet Modeler.
- 2) Vytvořte projekt obsahující dva scénáře, ve kterých navrhnete WiFi síť. V jednom scénáři použijte standard 802.11e a ve druhém 802.11b.
- 3) Simulujte provoz bezdrátové sítě. Poté zobrazte výsledné statistiky, na základě kterých optimalizujte bezdrátovou síť tak, aby jste zajistili bezproblémový chod všech služeb.
- 4) Zobrazte a prodiskutujte výsledné statistiky parametrů QoS. Porovnejte rozdíly mezi použitými standardy 802.11e a 802.11b.

6.3 Schéma zapojení



Obr. 6.1: Schéma zapojení WiFi sítě.

WiFi síť je scénáři Campus o velikost plochy $1\text{km} \times 1\text{km}$. Jsou zde 3 servery, jeden přepínač, jeden přístupový bod a 5 klientských stanic. Všechny 3 servery jsou propojeny s přepínačem linkou *1000BaseX*. Všechny stanice jsou na přístupový bod připojeny bezdrátově.

6.4 Pokyny pro vypracování a konfigurace prvků sítě

Vytvořte nový projekt v programu Opnet Modeler. V tomto projektu dva scénáře s názvy *wifi_802.11e* a *wifi_802.11b*. *Network scale* u těchto scénářů nastavte jako *Campus* s velikostí plochy $1\text{km} \times 1\text{km}$. Pro zjednodušení nejprve

vytvořte jeden scénář se všemi objekty a jejich nastaveními a poté v hlavním okně programu Opnet Modeler z nabídky *Scenarios* vyberte *Duplicate Scenario*. Pak už jen editujte rozdíly v nastavení.

Z palety objektů vložte objekt *Application Config, Profile Config*, 3×server *ethernet_server*, 1×přepínač *ethernet16_switch*, 1×přístupový bod *wlan_ethernet_router_adv* a 5 klientských stanic *wlan_wkstn_adv*. Všechny 3 servery propojte s přepínačem linkou *1000BaseX*. Také přepínač s přístupovým bodem propojte touto linkou. K přístupovému bodu je následně bezdrátově připojeno 5 stanic.

Application Configuration – zvolte položku *Edit Attributes*. Zde vybereme položku *Number of Rows*, kterou nastavíme na hodnotu 5. Dále postupně každou z těchto položek editujte následovně:

- **Video** – první položku pojmenujte jako *Video*. V záložce *Description* vyberte položku *Edit* a zvolte službu *Video Conferencing*. V této službě opět *Edit* a nastavte velikost videa na *128×120 pixels*. Snímkování nastavte na *10 frames/sec*. Typ služby nastavte na *Interactive Multimedia (5)*. Zbytek nastavení nechte výchozí.
- **Streaming Video** – druhou položku pojmenujte jako *Streaming Video*. V záložce *Description* vyberte položku *Edit* a zvolte službu *Video Conferencing*. V této službě opět *Edit* a nastavte velikost videa na *128×120 pixels*, snímkování na *10 frames/sec*. Typ služby na *Streaming Multimedia (4)*.
- **FTP** – třetí položku pojmenujte jako *FTP*. V záložce *Description* zvolte službu *Ftp*. V této službě nastavte *Command Mix* na *50%*, *File Size (bytes)* na *constant (3750)*. Položku *Symbolic Server Name* na *FTP Server*. Typ služby nastavte na *Best Effort (0)*.
- **HTTP** – čtvrtou položku pojmenujte jako *HTTP*. V záložce *Description* zvolte službu *Http*. V této službě nastavte *HTTP Specification* na *Microsoft Internet Explorer 5.0*. Položku *Page Interval Time* na *exponential (25)*. Typ služby nastavíme na *Best Effort (0)*.
- **VoIP** – pátou položku pojmenujte jako *VoIP*. V záložce *Description* zvolte službu *Voice*. V této službě zvolte pro kódování kodek *G.729 A*. Typ služby nastavte na nejvyšší prioritu a to *Interactive Voice (6)*.

Profile Configuration – zvolte položku *Edit Attributes*. Zobrazí se nabídka, kde v záložce *Profile Configuration* vyberte položku *Number of Rows*, kterou nastavte na hodnotu 5. Dále v záložkách *Enter Application Name* vyberte aplikace již vytvořené v objektu *Application Configuration*. Po rozkliknutí jednotlivých záložek jim nastavte parametry.

- **Video profile** – v záložce *Operation Mode* zvolte *Simultaneous*, položku *Start Time Offset (seconds)* nastavte na *No Offset*. Záložku *Duration* nastavte na *Constant (320)*. U *Repeatability* nastavte *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (300)* a *Number of Repetitions*

constant (0). Položku Start Time (seconds) nastavte na uniform (100, 110) a Duration (seconds) na End of Simulation.

- **Streaming Video profile** – *Operation Mode* nastavte na *Simultaneous*, *Start Time Offset (seconds)* nastavte *No Offset*. Záložku *Duration* nastavte na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavte *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (330)* a *Number of Repetitions constant (0)*. Položku *Start Time (seconds)* na *uniform (100, 110)* a *Duration (seconds)* na *End of Simulation*.
- **FTP Profile** – *Operation Mode* nastavte na *Simultaneous*, *Start Time Offset (seconds)* nastavte *No Offset*. Záložku *Duration* nastavte na *End of Profile*. U *Repeatability* nastavte *Inter-repetition Time (seconds)* na *constant (300)* a *Number of Repetitions constant (0)*. Položku *Start Time (seconds)* na *uniform (100, 110)* a *Duration (seconds)* na *End of Simulation*.
- **HTTP Profile** – vše nastavte stejně jako u FTP Profile.
- **VoIP Profile** – i zde vše nastavte stejně jako u FTP Profile

Servery – zde nastavte poskytování služeb pro síť. Služby a profily těchto služeb jsou již vytvořené v objektu Application Config a Profile Config.

- **Server 1** – pro Video a Streaming Video aplikací. V záložce *Application: Supported Services* vyberte položku *Edit*, ve které nastavte *Rows* na 2 a vyberte *Video* a *Streaming Video*.
- **Server 2** – pro FTP a HTTP. V záložce *Application: Supported Services* vyberte položku *Edit*, ve které nastavte *Rows* na 2 a vyberte *FTP* a *HTTP*.
- **Server 3** – pro Voice. V záložce *Application: Supported Services* vyberte položku *Edit*, ve které nastavte *Rows* na 1 a vyberte *VoIP*.

Přepínač – prakticky propojuje všechny servery s přístupovým bodem. Zde podle použitého scénáře nastavte podporu parametrů kvality služeb QoS.

Přístupový bod – v záložce *Wireless LAN Parameters* nastavte *BSS Identifier* na 1, *Physical Characteristics* na *Direct Sequence* a *Access Point Functionality* na *Enabled*. Položku *HCF Parameters* nastavte podle použitého scénáře, tzn. u 802.11b nastavte *Disabled* a u 802.11e nastavte *Enabled*. Zbýlé nastavení ponecháme výchozí.

Klientské stanice – v záložce *Wireless LAN Parameters* u parametru *BSS Identifier* nastavte hodnotu 1. Položku *Access Point Functionality* na *Disabled* a *Physical Characteristics* na *Direct Sequence*. Vysílací výkon nastavte u klientských stanic *Transmit Power (W)* - 0.005. Také zde nastavte položku *HCF Parameters* podle použitého scénáře, tzn. u 802.11b nastavte *Disabled* a u 802.11e *Enabled*. Dále vyberte pro každou stanici zvlášť služby, které na jednotlivých stanicích poběží (Video, Streaming Video, FTP, http, VoIP).

6.5 Pokyny pro simulaci

Nastavení simulace proved'te v menu pod záložkou *Scenarios* -> *Manage Scenarios*. Zde u obou scénářů vyberte volbu *collect/recollect*, dále nastavte:

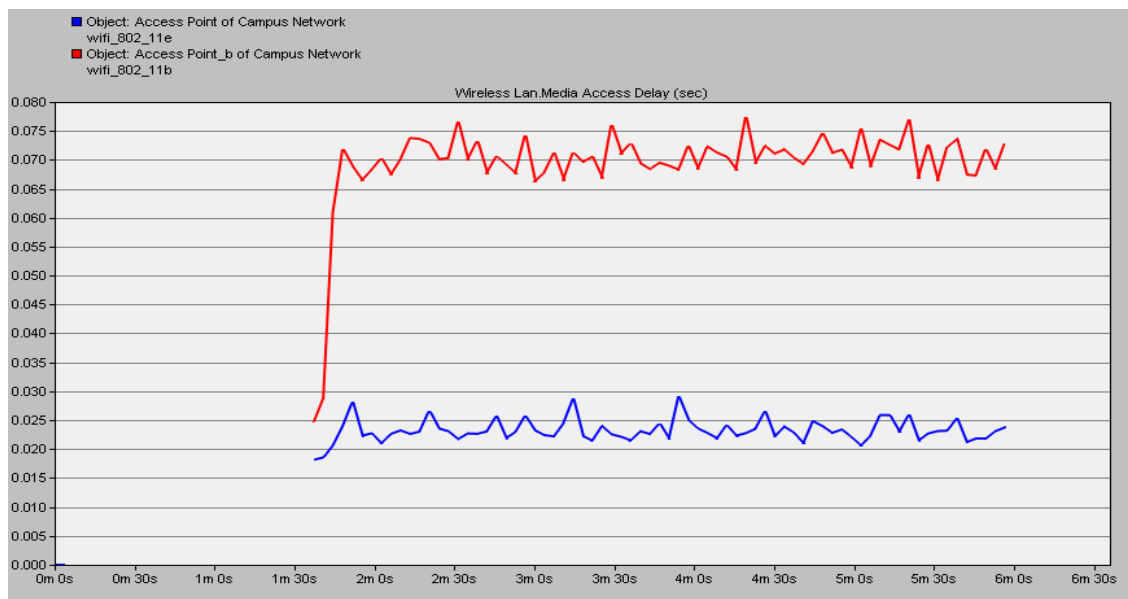
- **Duration** – 6 minutes.
- **Values per statistic** –100.
- **Update interval** – 50 000 events.
- **Simulation Kernel** – ponechte výchozí nastavení Optimized.

Před simulací ještě nastavte parametry, kterými určíte, co všechno bude možné ve výsledných statistikách zobrazovat a také, na kterých místech sítě tyto statistiky chcete měřit. Klikněte tedy pravým tlačítkem myši na plochu campusu a vyberte položku *Choose Individual DES Statistics*. Zde v *Node Statistics* zaškrtněte položky *Wireless Lan* a *WLAN (Per HCF Access Category)*.

Po nastavení parametrů simulace přejděte k samotné simulaci stiskem tlačítka *Run*. Po proběhnutí simulace zavřete okno simulace a pro zobrazení zvolených charakteristik klikněte pravým tlačítkem na plochu campusu a zvolte z nabídky položku *View Results*. Zde vyberte *Current Project* a poté už požadované scénáře.

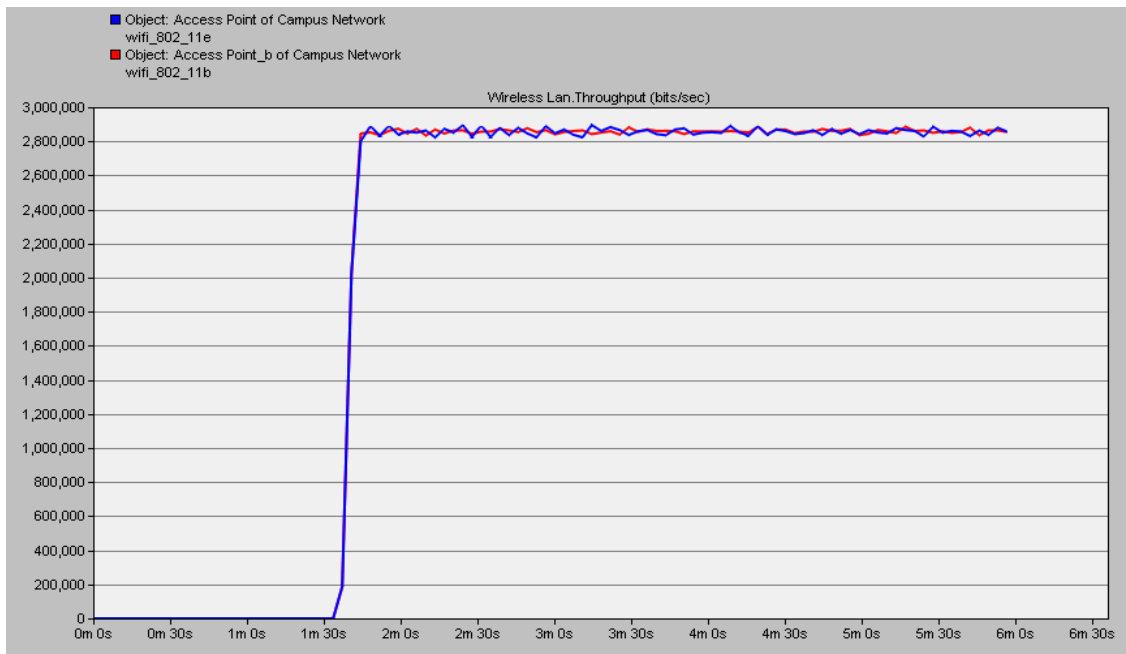
6.6 Výsledky simulace

Zpoždění přístupu k médiu – u scénáře s podporou 802.11e je toto zpoždění menší. Rozdíl je v desítkách milisekund, což ještě není tak špatné. Při větším vytížení sítě by byl rozdíl menší, ale u sítě s podporou 802.11e by byla zajištěna kvalita služeb aplikacím, které toto zpoždění vyžadují velmi malé (např. VoIP).



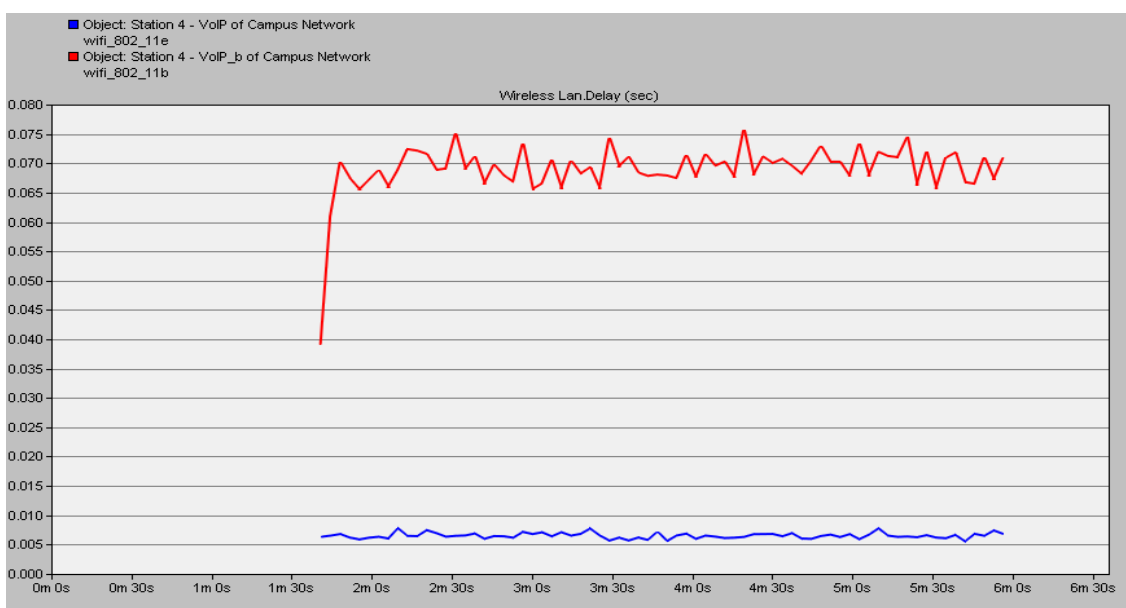
Obr. 6.2: Zpoždění přístupu k médiu 802.11e a 802.11b.

Propustnost sítě – zde je dosaženo stejných výsledků jak pro síť s podporou 802.11e, tak i s 802.11b. Při větším vytížení sítě by lepších výsledků dosahovala síť s 802.11b, ale kvalita poskytovaných služeb u aplikací pracujících v reálném čase by byla na vyšší úrovni u sítě s 802.11e.



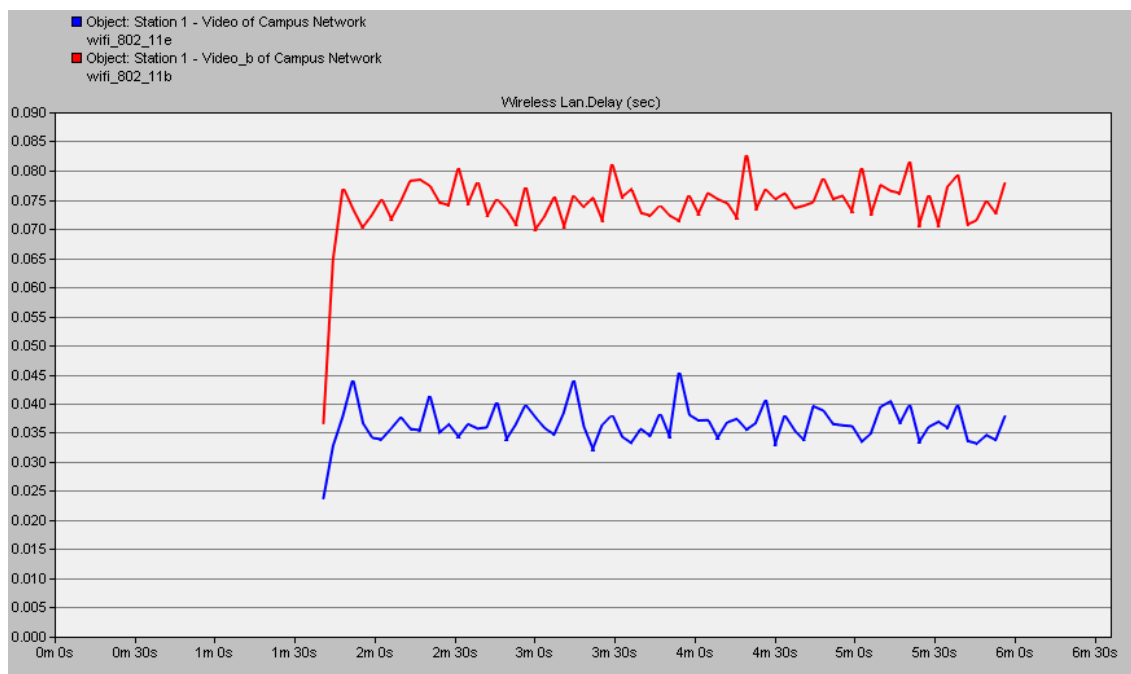
Obr. 6.3: Propustnost sítě s 802.11e a 802.11b.

Koncové zpoždění přenosu hlasu – u 802.11b mají všechny služby stejné zpoždění. U 802.11e dle předpokladů mají prioritní data nejmenší zpoždění, zpoždění hlasu dosahuje tedy nejvyšších hodnot. Z grafu je vidět, že hlasová data mají mnohem nižší zpoždění než u sítě bez podpory QoS. Také kolísání zpoždění je zde menší.



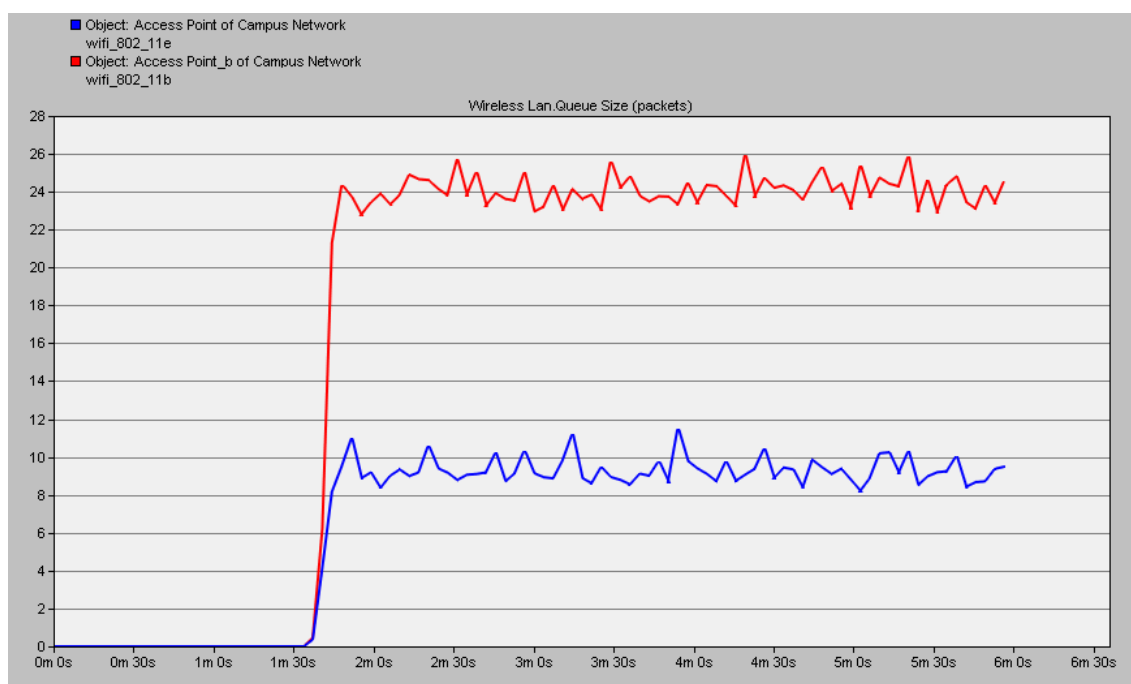
Obr. 6.4: Koncové zpoždění VoIP u 802.11e a 802.11b.

Koncové zpoždění přenosu videa – zde dochází k podobné situaci jako u koncového zpoždění přenosu hlasu, jen rozdíl mezi 802.11b a 802.11e není tak mnohonásobný. Kolísání zpoždění je zde téměř stejné.



Obr. 6.5: Koncové zpoždění videa u 802.11e a 802.11b.

Velikost fronty – rychleji jsou odbavována data v síti s podporou kvality služeb QoS. V síti 802.11e jsou tedy menší hodnoty paketů ve frontách než v sítích bez podpory kvality služeb QoS, což je samozřejmě lepší pro konečný přenos.



Obr. 6.6: Velikost fronty u 802.11e a 802.11b.

Z výsledných statistik a grafů vyplývá, že pro naší síť je vhodné použít standard 802.11e s podporou kvality služeb QoS. V síti jsou všechny parametry znatelně lepší, čehož jsou důkazem právě zmiňované výsledné grafy. Avšak nemusí to tak platit v každé síti. Mohou nastat případy, kdy je použití 802.11e zbytečné nebo i horší než 802.11b.

7 Závěr

Úkolem diplomové práce bylo věnovat se problematice efektivity bezdrátových sítí z pohledu služeb. Seznámit se se standardem WiFi sítí IEEE 802.11, s protokoly a principy WiFi sítí a služeb. Pozornost měla být věnována kvalitě služeb QoS.

V teoretické části této diplomové práce je podrobně popsána problematika zabývající se bezdrátovými sítěmi, jejich vrstevným modelem a typy sítí používaných ve WiFi. Je zde podrobně rozebrán standard IEEE 802.11 včetně jeho dodatků a jeho používaných paketů. Zvýšená pozornost je věnována kvalitě služby QoS, která je pro bezdrátové síť velice důležitá. V souvislosti s QoS jsou zde probrány její základní parametry a režimy komunikace. Více podrobně je v této souvislosti popsán standard IEEE 802.11e. Dále jsou zde diskutovány principy a použití služeb, jako je VoIP, Videokonference, Streamované video a další, ve WiFi síti.

Na podkladě získaných poznatků je navržena rozsáhlá WiFi síť se zajištěnou nabídkou služeb. Pro modelování a simulaci bezdrátové sítě je použit softwarové vývojové prostředí Opnet Modeler. Model bezdrátové sítě je využit k optimalizaci návrhu a k analýze této bezdrátové komunikační sítě. V práci jsou také simulovány vlastnosti dat citlivých na zpoždění. Bezdrátová síť se skládá ze 7 BSS. Model obsahuje 3 servery, 2 přepínače, 7 přístupových bodů a 21 bezdrátových stanic. Každý ze tří serverů poskytuje jiné druhy služeb. Všechny 3 servery jsou propojeny s přepínači, které jsou dále navzájem spojeny. Jednotlivé přístupové body jsou napojeny na přepínače. Každá z BSS pro přehlednost podporuje jiný typ služby. Sedmá BSS podporuje více služeb, aby bylo možné vidět, jak se navzájem mohou služby ovlivňovat. Všechny stanice jsou připojeny bezdrátově na přístupové body.

Bezdrátové stanice zatěžují síť přenosem hlasu VoIP, interaktivního videa, streamovaného videa, FTP, prohlížením webových stránek – HTTP a elektronickou poštou – E-mail. Výstupem z tohoto modelu sítě jsou statistiky, z nichž jsou vytvořeny grafy jako například graf pro nevyvážený provoz sítě, vyvážený provoz sítě, celkový provoz, grafy základních parametrů QoS a velikost fronty. Výsledky simulací a jejich popisy jsou uvedeny v předposlední části diplomové práce.

V poslední části práce je vytvořena laboratorní úloha, která obsahuje zadání úlohy, podrobnou teorii, schéma zapojení, pokyny pro vypracování, pokyny pro simulaci a vzorové vypracování úlohy. V úloze se jedná o srovnání sítě s použitým standardem 802.11b a 802.11e s podporou kvality služeb QoS. Úloha je realizována tak, aby studenti byli schopni odměřit celou úlohu samostatně.

8 Seznam literatury

- [1] PUŽMANOVÁ, R. Moderní komunikační sítě A-Z. Computer Press, Brno 2007
- [2] BLUNÁR, K. a DIVIŠ, Z. Telekomunikačné siete. ŽU, Žilina 2000.
- [3] PUŽMANOVÁ, R. Širokopásmový Internet. Computer Press, Brno 2004.
- [4] KOCUR, Z. a ŠAFRÁNEK, M. Bezdrátové systémy v přístupové síti. Access server [online] 2008.
- [5] DOBEŠ, J. a ŽALUD, V. Moderní radiotechnika. BEN - technická literatura, Praha 2006.
- [6] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Standard IEEE 802.11, [online] 2008. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11>
- [7] PRAVDA, I. Přehled doplňků standardu IEEE 802.11, [online] 2005. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz>>
- [8] PETERKA, J. Jak probíhají bezdrátové přenosy v sítích WLAN, [online] 2002. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/b02/b0900016.php3>>
- [9] NOVOTNÝ, V. Architektura sítí – skripta, Brno 2002.
- [10] Geier, J. 802.11 MAC Layer Defined, [online] 2002. Dostupný z WWW: <<http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1216351>>
- [11] PETERKA, J. Architektura Wi-Fi sítí, [online] 2002. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/b07/b0500001.php3>>
- [12] PUŽMANOVÁ, R. Kvalita služby ve WLAN: 802.11e, [online] 2004. Dostupný z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/kvalita-sluzby-ve-wlan-802-11e/>>
- [13] KOVÁŘ, P., MOLNÁR, K., NOVOTNÝ, V. Současnost a budoucnost VoIP sítí, Brno, 2004. Elektrorevue [online] Dostupný z <<http://elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacnitechologie/0/soucasnost-a-budoucnost-voip-siti/>>
- [14] PR článek, IP telefonie pod lupou, [online] 2005. Dostupný z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/ip-telefonie-pod-lupou/>>
- [15] Národní centrum videa. Visual Connection disponuje nejvyšším připojením, [online] 2008. Dostupný z WWW: <<http://www.nacevi.cz/aktuality.htm>>

- [16] Wikipedie: Streaming media, [online] 2009. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Streaming_media>
- [17] ZEMAN, O. Opnet Modeler Articles, [online] 2005. Dostupný z WWW: <<http://www.zotto.cz/articles.php>>
- [18] MOLNÁR, K., ZEMAN, O., SKOŘEPA, M. Moderní síťové technologie – Laboratorní cvičení, Brno 2008.
- [19] CESNET: Kvalitativní charakteristiky síťové komunikace, [online] 2005. Dostupný z WWW: <<http://www.cesnet.cz/qos/>>

9 Seznam obrázků

Obr. 2.1: Příklad zapojení WiFi sítě	9
Obr. 2.2: Využití kmit. spektra bez vzájemného rušení sousedních kanálů	11
Obr. 2.3: Referenční model ISO/OSI pro WiFi	13
Obr. 2.4: Způsob přímého rozprostírání spektra	15
Obr. 2.5: Princip rozprostření spektra	15
Obr. 2.6: Princip FHSS	16
Obr. 2.7: Princip OFDM	17
Obr. 2.8: Struktura MAC rámce pro standard IEEE 802.11	19
Obr. 2.9: Příklad zapojení sítě Ad-Hoc	22
Obr. 2.10: Příklad zapojení sítě BSS	22
Obr. 2.11: Příklad zapojení sítě ESS	23
Obr. 3.1: Princip metody DCF	27
Obr. 3.2: Princip metody PCF	28
Obr. 5.1: Struktura editorů v prostředí Opnet Modeler	35
Obr. 5.2: Schéma zapojení WiFi sítě v prostředí Opnet Modeler	36
Obr. 5.3: Nevyvážený provoz v síti	42
Obr. 5.4: Vyvážený provoz v síti	43
Obr. 5.5: Koncové zpoždění videokonference a streamovaného videa	44
Obr. 5.6: Koncové zpoždění FTP, HTTP, Mail a VoIP	45
Obr. 5.7: Kolísání zpoždění videokonference a streamovaného videa	46
Obr. 5.8: Kolísání zpoždění FTP, HTTP, Mail a VoIP	46
Obr. 5.9: Propustnost v síti s podporou QoS	47
Obr. 5.10: Zahazování dat v síti s podporou QoS	48
Obr. 5.11: Velikost fronty FTP, HTTP, Mail a VoIP	49
Obr. 5.12: Velikost fronty videokonference a streamovaného videa	49
Obr. 6.1: Schéma zapojení WiFi sítě	52
Obr. 6.2: Zpoždění přístupu k médiu 802.11e a 802.11b	55
Obr. 6.3: Propustnost sítě s 802.11e a 802.11b	56
Obr. 6.4: Koncové zpoždění VoIP u 802.11e a 802.11b	56
Obr. 6.5: Koncové zpoždění videa u 802.11e a 802.11b	57

Obr. 6.6: Velikost fronty u 802.11e a 802.11b	57
---	----

10 Seznam tabulek

Tab. 2.1: Parametry standardu 802.11a	10
Tab. 2.2: Parametry standardu 802.11b	10
Tab. 2.3: Parametry standardu 802.11g	11
Tab. 2.4: Parametry standardu 802.11n	12
Tab. 2.5: Výčet přenosových mechanismů pro jednotlivé standardy	14
Tab. 2.6: Druhy řídicích paketů ve standardu 802.11	20
Tab. 2.7: Rozlišení kvality sítě podle parametrů	25

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

ACK	Acknowledgement
AID	Association Identifier
AIFS	Arbitration Inter-Frame Space
AP	Access Point
BG	Border Gateway protocol
BSA	Basic Service Area
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identifier
CCA	Clear Channel Assessment
CF	Connection Free
CFP	Contention Free Period
CKK	Complementary Code Keying
CP	Contention Period
CRC	Cycling Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sence Multiple Access/Collision Avoidance
CTS	Clar To Send
D/ID	Duration/Association Identifier
DA	Destination Address
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed Interframe Space
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECC	Error Correction Code
EDCF	Enhanced DCF
ERP-PBCC	Extended Rate PHY - Packet Binary Convolutional cosiny
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FC	Frame Control
FCC	Federal Communication Commission
FEC	Forward Error Correction
FFHSS	Fast Frequency Hopping Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTP	File Transfer Protocol
HCF	Hybrid Coordination Function
HR-DSSS	High Rate - Direct Sequence Spread Spectrum
HTML	Hyper Text Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
IR	Infrared
ISM	Industrial Scientific and Medical
ITU-T	International Telecommunication Union

LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan area network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMPDU	MAC Management PDU
MSDU	MAC Service Data Unit
MTU	Maximal Transmission Unit
NACEVI	CDN – Content Delivery Network
NAV	Network Allocation Vector
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
ISPF	Open Shortest Path First
PCF	Port Coordination Function
PDU	Protocol Data Unit
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PV	Protocol Version
QoS	Kvalita služby
RA	Receiving station Address
RIP	Routing Information Protocol
RTP	Real-time Transport Protocol
RTS	Request To Send
SC	Sequence Control
SDM	Spatial Division Multiplex
SIFS	Short Interframe Space
SIP	Session Initiation Protocol
SSID	Service Set Identifier
TA	Transmitting station Address
TCP	Transmission Control Protocol
TXOP	Transmit Opportunity
UDP	User Datagram protokol
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoWLAN	Voice over Wireless LAN
WAVE	Wireless Access for the Vehicular Environment
WEP	Wireless Equivalent Privacy
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMM	WiFi MultiMedia
WPA	Wifi Protected Access
WPA2	Wifi Protected Access version 2
WS	Wireless Station
XML	Extensible Markup Language