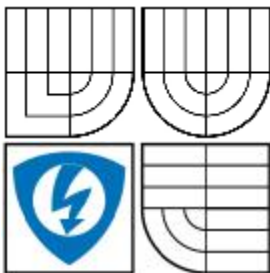


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IMPLEMENTACE KVALITY SLUŽBY V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

IMPLEMENTATION OF QUALITY OF SERVICE INTO WIRELESS NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ŠTĚPÁN KAMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADISLAV ŠKORPIL, CSc.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Štěpán Kaman

ID: 85515

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Implementace kvality služby v bezdrátových sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte způsob komunikace v bezdrátových WiFi sítích dle standardu IEEE 802.11 se zdůrazněním kvality služby QoS. Popište základní vlastnosti dat citlivých na zpoždění. Navrhněte modelovou simulační síť pro zjištění QoS pomocí programu Opnet Modeler (IP telefony, přenos videa a hlasu, switch, Access Point - Access Point - switch - a PC s IP telefonem, FTP přenosem a přenosem videa, atp.). Analyzujte a porovnejte výsledky s podporou i bez podpory kvality služby, změřte zejména ztrátovost paketů, kolísání zpoždění, propustnost i další vhodné parametry. Bezdrátovou síť optimalizujte vzhledem k implementované QoS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE Computer Society. 802.11e IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. IEEE, New York 2005

[2] HUSSAIN, K. and ZIA, M. and KHAN, M.T. Dynamic Contention Window for Quality of Service in IEEE 802.11 Networks. Punjab University College of Information Technology, Lahore 2006.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 26.5.2009

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ABSTRAKT

Bezdrátové sítě představují v současné době častý přístup připojení stanic do místní sítě či k Internetu. Až do roku 2005 neexistovala ve standardu 802.11 podpora prioritních dat a využití multimediálních služeb je v těchto sítích problematické. Diplomová práce se zabývá standardem IEEE 802.11 a standardem obsahujícím podporu kvality služeb IEEE 802.11e. Jsou zmíněny metody přístupu k přenosovému médiu, odlišnosti v MAC podvrstvě, je rozebrána problematika při přenosu prioritních dat a požadavky kladené na tyto data. V programu Opnet Modeler byly vytvořeny bezdrátové sítě s přístupovými body a stanicemi na kterých jsou provedeny simulace při různé zátěži přenášených dat. Je zkoumán rozdíl v použití metody DCF a EDCF, využívané v síti s podporou QoS. Obzvláště je sledováno chování prioritních dat hlasu a videa u obou sítí. Pozornost je zaměřena na klíčové parametry jako jsou propustnost, zahazování dat, ztráta paketů, zpoždění, kolísání zpoždění a velikost vysílacích front. Naměřená data jsou dále analyzována a rozdíly u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb jsou porovnány a vyhodnoceny. Součástí práce je i laboratorní úloha v programu Opnet Modeler.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kvalita služeb, QoS, bezdrátové sítě, 802.11, 802.11e, VoIP, VoWLAN, laboratorní úloha

ABSTRACT

Wireless networks are currently the frequent access connection to the local network or the Internet. Until 2005 there was no support in the 802.11 standard priority data and the use of multimedia services in these networks is problematic. Thesis deals with the standard IEEE 802.11 and quality of service support including IEEE 802.11e. They discussed methods of access to transmission medium, differences in the MAC sublayer, the reader issues in the transmission of priority data and the requirements for these data. In Opnet Modeler was created wireless network with access points and stations on which they are carried out simulations at different strain of transmitted data. It studied the difference in the use of DCF and EDCF method, used in the network with QoS support. In particular, it examined the behavior of priority voice and video data in both networks. The focus is on key parameters such as throughput, dropping data, packet loss, delay, jitter and the size of broadcasting front. The measured data are analyzed, and differences in the network without the support and promoting the quality of services are compared and evaluated. Part of this work is the role of laboratory in the Opnet Modeler.

KEYWORDS

Quality of Service, QoS, WLAN, 802.11, 802.11e, VoIP, VoWLAN

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Implementace kvality služby v bezdrátové síti 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 tohoto projektu 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 diplomové práce Doc. Ing. Vladislavu Škorpilovi, CSc. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Bezdrátové sítě IEEE 802.11	12
2.1 IEEE 802.11 a jeho doplňky.....	12
2.2 Typy sítí.....	15
2.2.1 Ad-hoc	15
2.2.2 BSS a ESS.....	15
2.3 Fyzická vrstva.....	16
2.3.1 DSSS.....	17
2.3.2 FHSS.....	17
2.3.3 Infráčervené světlo	17
2.3.4 OFDM.....	18
2.4 MAC podvrstva.....	18
3 Kvalita služeb	22
3.1 802.11e	22
3.2 Základní parametry QoS	22
3.2.1 Koncové zpoždění	23
3.2.2 Kolísání zpoždění.....	23
3.2.3 Ztráta paketů	23
3.2.4 Šířka pásma	24
3.3 VoIP	24
3.4 VoWLAN	25
3.4.1 Požadavky na VoWLAN	25
3.4.2 Hlasová kvalita a charakteristika	25
3.5 Metody přístupu k médiu	27
3.5.1 DCF	27
3.5.2 PCF.....	28
3.5.3 EDCF.....	29
3.5.4 HCF	31
4 Praktická část.....	32
4.1 Vytvoření bezdrátové sítě s podporou kvality služeb	32
4.2 Nastavení parametrů.....	33
4.2.1 Application Configuration	33
4.2.2 Profile Configuration.....	35
4.2.3 Přístupový bod	37
4.2.4 Stanice	37
4.2.5 VoWLAN	38
4.2.6 HCF	38
4.2.7 Přepínač	38
4.2.8 Server.....	38
4.2.9 Linka.....	39
5 Výsledky simulace.....	40
5.1 Zahazování dat	40

5.2	Koncové zpoždění.....	42
5.3	Kolísání zpoždění.....	44
5.4	Propustnost	46
5.5	Chybovost.....	47
5.6	Velikost fronty	49
5.7	Srovnání sledovaných parametrů.....	52
6	Laboratorní úloha – Význam QoS v bezdrátových sítích 802.11	53
6.1	Úvod.....	53
6.2	Vytvoření projektu	53
6.3	Vytvoření a konfigurace sítě.....	54
6.4	Nastavení parametrů přístupových bodů.....	55
6.5	Nastavení atributů	56
6.6	Konfigurace generování provozu.....	56
6.7	Konfigurace trajektorie	58
6.9	Zobrazení výsledků	59
7	Závěr	62
8	Použitá literatura	63

Seznam obrázků

Obr. 1: Příklad zapojení sítě metodou Ad-hoc	15
Obr. 2: Příklad zapojení sítě s přístupovým bodem BSS.....	16
Obr. 3: Formát MAC rámce [1].....	20
Obr. 4: Formát MAC rámce s podporou QoS [1].....	21
Obr. 5: Schéma integrace VoWLAN do telekomunikačního systému [1].....	26
Obr. 6: Příklad funkce DCF v síti 802.11 [2].....	28
Obr. 7: Ukázka činnosti PCF [2]	29
Obr. 8: EDCF u 802.11e. Upřednostněna jsou vysoce prioritní data [2].....	30
Obr. 9: Vytvořený scénář v programu Opnet Modeler.....	33
Obr. 10: Nastavení application configuration	34
Obr. 11: Nastavení hlasové aplikace v application configuration.....	35
Obr. 12: Nastavení aplikací v profile configuration.....	36
Obr. 13: Nastavení hlasové aplikace v profile configuration.....	37
Obr. 14: Nastavení HCF parametrů.....	39
Obr. 15: Zahazování dat v síti 802.11b.....	41
Obr. 16: Zahazování dat v síti 802.11e.....	41
Obr. 17: Koncové zpoždění v síti 802.11b	43
Obr. 18: Koncové zpoždění v síti 802.11e.....	44
Obr. 19: Koncové zpoždění v síti 802.11e (Background)	44
Obr. 20: Ukázka kolísání zpoždění v síti 802.11e.....	45
Obr. 21: Ukázka kolísání zpoždění v síti 802.11b.....	45
Obr. 22: Propustnost v síti 802.11b	47
Obr. 23: Propustnost v síti 802.11e	47
Obr. 24: Chybovost v síti 802.11b.....	49
Obr. 25: Chybovost v síti 802.11e.....	49
Obr. 26: Velikost fronty.....	51
Obr. 27: Velikost fronty pro background data	51
Obr. 28: Rozmístění stanic v projektu	55
Obr. 29: Nastavení atributů bezdrátové stanice	57
Obr. 30: Trajektorie bezdrátových stanic kolem přístupových bodů	59
Obr. 31: Koncové zpoždění u prioritních dat.....	60
Obr. 32: Porovnání propustnosti	61
Obr. 33: Velikost fronty.....	61

Seznam tabulek

Tab. 1: Způsoby implementace fyzické vrstvy a rok standardizace	17
Tab. 2: Rozlišení kvality sítě podle parametrů při přenosu VoIP [11].	24
Tab. 3: Pravděpodobnost využití VoIP [11].	26
Tab. 4: Mapování priority na kategorii přístupu [1].	29
Tab. 5: Kategorie přístupu a nastavení typických hodnot CW a AIFS [1].	30
Tab. 6: Doba čekání na vysílání (v časových úsecích) u jednotlivých kategorií [5].	30
Tab. 7: Zahazování dat v síti 802.11b	40
Tab. 8: Zahazování dat v síti s 802.11e	40
Tab. 9: Koncové zpoždění v síti 802.11b	42
Tab. 10: Koncové zpoždění v síti s 802.11e	42
Tab. 11: Propustnost dat v síti 802.11b	46
Tab. 12: Propustnost dat v síti 802.11e	46
Tab. 13: Paketová chybovost dat v síti 802.11b	48
Tab. 14: Paketová chybovost dat v síti 802.11e	48
Tab. 15: Počet paketů ve frontě dat v síti 802.11b	50
Tab. 16: Počet paketů ve frontě dat v síti 802.11e	50
Tab. 17: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 0,5 Mbit/s background dat	52
Tab. 18: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 2 Mbit/s background dat	52
Tab. 19: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 4 Mbit/s background dat	52
Tab. 20: Mapování priority na kategorii přístupu	53
Tab. 21: Nastavení parametrů bezdrátových stanic	58

1 Úvod

Bezdrátové sítě standardu 802.11 jsou velmi populární způsob připojení do místní sítě či k Internetu, avšak až do roku 2005 neobsahují žádnou podporu upřednostnění prioritních dat. Tu zavádí až doplněk 802.11e, který je navíc zpětně kompatibilní se všemi staršími doplňky. Cílem této práce je zaměřit se na problematiku bezdrátových sítí standardu 802.11 a implementaci kvality služeb do tohoto standardu.

Kapitola Bezdrátové sítě IEEE 802.11 se zabývá přehledem doplňků, fyzickou vrstvou, modulacemi a způsoby přenosu, MAC podvrstvou a významem polí v MAC rámci.

Obsahem kapitoly Kvalita služeb jsou informace o kvalitě služeb a jejím významu, dále jsou zde uvedeny požadavky kladené na hlasové a video přenosy, základní QoS parametry, problematika přenosu hlasu po IP sítích, VoIP zařízeních a zařízeních připojených přes WLAN. Jsou zde zmíněny metody přístupu k médiu PCF a DCF a jejich nástupci v sítích s podporou QoS EDCF a HCF.

Na teoretický úvod navazuje Praktická část. V této kapitole je čtenář seznámen se simulačním programem Opnet Modeler. Je zde podrobně popsán postup při vytváření projektu a popis využitých zařízení a profilů. Kapitola detailně popisuje nastavení potřebná pro sestavení bezdrátové sítě standardu 802.11 a odlišnosti v nastavení při využití QoS.

Další část práce je kapitola Výsledky simulace, která analyzuje naměřené parametry.

Součástí práce je kapitola nazvaná Laboratorní úloha. Tato kapitola byla psána s ohledem na možné budoucí použití ve výuce v předmětech MMOS nebo MKPM na ústavu telekomunikací VUT v Brně, ve kterých studenti v laboratorních a počítačových cvičeních s programem Opnet pracují. V této kapitole je podrobný návod pro vytvoření bezdrátových sítí 802.11b a 802.11e, simulování přenosu dat různých priorit a následné porovnání naměřených výsledků.

2 Bezdrátové sítě IEEE 802.11

Standard pro bezdrátové sítě využívající pásmo v rozsahu 2,4 až 2,4835 GHz nese název IEEE 802.11. Vznikl v roce 1997 a jeho maximální přenosová rychlost je 2 Mbit/s. První bezdrátová síť však spatřila světlo světa již v roce 1992, kdy bylo americkým FCC a evropským ETSI uvolněno pásmo ISM 2,4GHz, ve kterém bezdrátové technologie pracují. Toto pásmo je bezlicenční – Industrial Scientific and medical, pásmo pro lékařské, vědecké a průmyslové potřeby.

Přenosová rychlost standardu 802.11, stejně jako absence zabezpečení přenosu se ukázaly jako podstatné nedostatky tohoto standardu v jeho základní podobě. Časem se tedy pro tento standard objevila spousta doplňků, které ho vylepšují. Jejich cílem je zvýšení přenosové rychlosti, vylepšení zabezpečení, šifrování přenášených dat, zajištění kvality služeb a další.

2.1 IEEE 802.11 a jeho doplňky

Doplňek *IEEE 802.11a* byl schválen v roce 1999 v nově uvolněném bezlicenčním pásmu 5GHz. Maximální přenosové rychlost 54Mbit/s je dosaženo použitím ortogonálního frekvenčního multiplexu OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Velká výhoda varianty 802.11a je v použitém kmitočtu, neboť pásmo 5GHz je méně zarušené než pásmo 2,4GHz. Dovoluje použít 8 kanálů, které se navzájem nijak nepřekrývají.

Varianta *IEEE 802.11b* patří spolu s 802.11g mezi nejznámější. Vznikla o 2 roky později než standard 802.11, v roce 1999. Pracuje v pásmu 2,4 GHz a jeho výhodou je využití vyšší rychlosti – až 11Mbit/s. Tato rychlost se mění podle momentálního rušení. Může dosahovat 11Mbit/s; 5,5Mbit/s; 2 a 1 Mbit/s. 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. Možnost využití až tří kanálů bez vzájemného rušení. Tento doplněk zvýšil přenosovou rychlost, otázku zabezpečení a zajištění kvality služeb stále neřeší. Některá zařízení nesou označení 802.11b+. Jedná se o označení, které používají někteří výrobci a značí použití kódování PBCC (Packet Binary Convolutional Coding).

IEEE 802.11c. Tento doplněk byl schválen v roce 1998 a má v sobě implementovanou podporu komunikačních mostů v podvrstvě MAC.

V roce 2001 byla schválena alternativa *802.11d*. Umožňuje použít technologii 802.11 v oblastech, kde pásmo 2,4 GHz není dostupné.

Norma *IEEE 802.11e* obsahuje podporu pro zajištění kvality služeb QoS (Quality of Service) a opravu chyb v podvrstvě. Standard byl připravován od roku 2001 a v roce 2005 byl publikován a následně schválen.

Varianta *IEEE 802.11f* s názvem IAPP (Inter Access Point Protocol) vylepšuje mechanismus předávání stanic – roaming pro komunikaci mezi jednotlivými přístupovými body při připojení do jiné sítě nebo při přechodu mezi rádiovými kanály. Doplněk byl schválen v polovině roku 2003.

Doplněk nesoucí označení *IEEE 802.11g* je obdobou *IEEE 802.11a* s jedním rozdílem – je navržen stejně jako 802.11b pro použití v pásmu 2,4GHz. Na rozdíl od 802.11b však dosahuje vyšší rychlosti, až do 54Mbitps. Používá se multiplex OFDM, pro zajištění zpětné kompatibility s *IEEE 802.11b* se používá DSSS. Hodnoty odstupů signálu od šumu pro modulaci se používají QPSK, BPSK, 16-QAM a 64-QAM. V závislosti na použité modulaci se tedy mění i přenosové rychlosti. Jsou následující: 64-QAM: 54Mbitps, 16-QAM: 48, 36 a 24 Mbitps, QPSK: 18 a 12 Mbitps, BPSK: 9 a 6 Mbitps, Další rychlosti se shodují se standardem 802.11b: CCK: 11 a 5,5Mbitps, DQPSK: 2Mbitps, DBPSK: 1Mbitps. Varianta 802.11g byla schválena v roce 2003.

IEEE 802.11h. Tento doplněk vylepšuje řízení kmitočtového spektra – řízení vysílacího výkonu a výběr kanálů. Doplněk byl schválen v roce 2003 a upravuje tyto parametry u 802.11a. Evropští normalizátoři totiž požadují pro schválení produktů 802.11a využití dynamického výběru kanálu a řízení vysílacího výkonu u zařízení pracujících v pásmu 5GHz. Systémy 802.11a totiž mohou mít špatný vliv na průzkumné satelitní systémy a radarové systémy. K problémům se schválením v Evropě přispívala ještě technologie HIPERLAN/2, která pracuje také v pásmu 5GHz a původní záměr byl, aby toto pásmo zůstalo pouze jí.

IEEE 802.11i. Norma obsahující doplňkové bezpečnostní mechanismy bezdrátových sítí 802.11a/b/g. Velkým přínosem je zdokonalení autentizace i šifrování při použití technologie WEP. Protokol WEP totiž nemá téměř žádnou autentizaci a používá velmi slabé šifrování za

použití statického klíče. Pro šifrování je místo WEP využit protokol pro šifrování dynamickým klíčem TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) a je zaveden také management klíčů. Největším přínosem této normy je použití šifrovacího mechanismu AES, který je používán pro jeho sílu i pro vládní účely. Útočníkovi dříve stačilo, aby odposlechl několik desítek paketů a mohl prolomit klíč WEP. V IEEE802.11 se však šifrovací klíče mění automaticky. Nevýhoda protokolu je jeho velká náročnost na výkon zařízení. Nová technologie šifrování nese označení WPA2 a je nutnou výbavou pro zajištění dostatečné bezpečnosti v bezdrátové síti. Musíme ale brát na vědomí, že žádná šifra není neprolomitelná a ani WPA2 nezaručuje odolnost všem útokům, zejména v budoucnosti.

IEEE 802.11j. V roce 2004 bylo schváleno použití pásma 4,9-5GHz pro použití WLAN v Japonsku.

IEEE 802.11k. Doplněk umožňující optimalizaci WLAN v závislosti na jejich okamžitých parametrech - nastavení klientů a konfiguraci celé sítě pro zajištění vysoké kvality spoje. Pro zajištění efektivity přenosového média se provádí měření kvality kanálů, šumu, zahlcení a vzájemného rušení. Doplněk nese název Radio Resource Measurement.

IEEE 802.11n. Tento doplněk přináší průlomové navýšení rychlosti ve WLAN. Cílem je nabídnout uživatelům reálnou rychlost 100Mbit/s. Stávajících 54Mbit/s, tedy cca 30Mbit/s reálných standardu 802.11f nevyhovuje vysokým nárokům uživatelů.

IEEE 802.11p. Podpora připojení rádiových stanic v automobilech k pevným přístupovým bodům.

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

IEEE 802.11s. Podpora nové topologie. Každý klient je zároveň přístupovým bodem a naopak. Tato technologie je označována jako multi-hopping (přenos přes několik mezilehlých zařízení).

IEEE 802.11.2. Doplněk pro měření podmínek pro testování zařízení WLAN.

IEEE 802.11u definuje spolupráci s externími sítěmi.

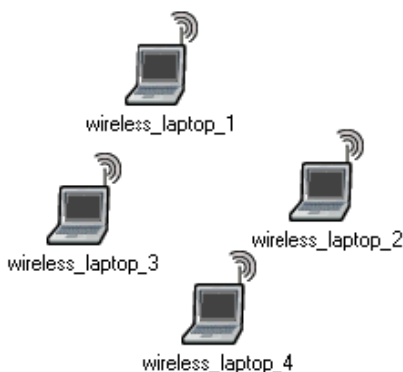
IEEE 802.11w. Rozšiřuje stávající MAC vrstvu o mechanismy pro podporu integrity, autenticity zdroje dat, utajení a ochrany dat před útoky. Podstatou je zabezpečení rámců pro management.

Zdroj: [1],[3],[4]

2.2 Typy sítí

2.2.1 Ad-hoc

Ad-hoc síť [8] je propojení skupiny počítačů (2 a více) s bezdrátovým adaptérem bez přístupového bodu. Stanice spolu komunikují nezávisle na nějakém prostředníkovi metodou peer-to-peer, tzn. všechny počítače jsou si rovny. Tento přenos dat se pro svou jednoduchost využívá např. při přenosu dat mezi notebooky. Všechny stanice, které chtějí komunikovat, musí být ve vzájemném dosahu.



Obr. 1: Příklad zapojení sítě metodou Ad-hoc

2.2.2 BSS a ESS

BSS (Basic service set). Takovéto označení nese bezdrátová síť, ve které se stanice připojují k přístupovému bodu [8]. Veškerá nastavení, omezení a parametry na přístupovém bodu se projeví i v komunikaci v síti. Území, kde spolu stanice komunikují nazýváme BSA (Basic Service Area). Každá stanice, která je v oblasti pokrytí signálem přístupovým bodem a která je schopná s přístupovým bodem komunikovat, se může do sítě připojit. Stanice musí provést asociaci, po které se může připojit k AP. Čím více stanic se připojí k jednomu přístupovému bodu, tím větší zatížení bude síť mít. Přístupový bod, pokud nemá zajištěnou

kvalitu služeb, se bude snažit rozdělit prostředky pro komunikaci se stanicemi podle vlastního algoritmu. Pokud některá stanice bude přenášet velké množství dat, může nastat problém pro ostatní uživatele v podobě vysokého zpoždění a malé propustnosti. Sít ESS (Extended service set) vznikne propojením dvou a více BSS pomocí síťového prvku [8].



Obr. 2: Příklad zapojení sítě s přístupovým bodem BSS

2.3 Fyzická vrstva

Nejnižše položená vrstva se nazývá fyzická [7],[8] a definuje přenosové mechanismy, realizuje samotné spojení a zajišťuje modulaci a přenos dat bezdrátovým prostředím. Ve všech standardech IEEE802.11 je fyzická vrstva rozdělena na 2 podvrstvy:

- Ø **PLCP** (Physical Layer Convergence Procedure) – u této podvrstvy se k datovým rámcům MAC (Medium Access Control) podvrstvy přidávají informace o použité modulaci a o použitém přenosovém mechanismu. Přenášený rámeček je nezávislý na typu fyzické vrstvy. Součástí této podvrstvy je i funkce CCA (Clear Channel Assessment) poskytující odezvu pro MAC vrstvu o připravenosti přenosového média.
- Ø **PMD** (Physical Medium Dependent) – Tato podvrstva zajišťuje přenos dat mezi vysílačem a přijímačem. PMD přijímá data, která vyslala PLCP do bezdrátového prostředí a předává je opět podvrstvě PLC. Standard IEEE 802.11 specifikuje 5 různých implementací fyzické vrstvy.

Tab. 1: Způsoby implementace fyzické vrstvy a rok standardizace

Typ	Plný název	Standardizace
DSS	Direct Sequence Spread Spectrum	1997
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex	1999
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	1997
IR	Infra-Red	1997
HR-DSSS	High Rate Direct Sequence Spred Spectrum	1999

2.3.1 DSSS

Technika přímo rozprostřeného spektra DSSS funguje na principu, že každý bit, který má být přenášen, je nejdříve nahrazen sekvencí bitů a přenášen (modulována na nosný signál) je až samotná sekvence bitů. DSSS rozděluje pásmo 2,412GHz – 2,484GHz na 14 kanálů, kde šířka každého kanálu je 22MHz. Avšak odstup mezi frekvencemi je jen 5MHz, takže sousední kanály se překrývají. Pouze 3 kanály se nebudou překrývat vůbec. Přenos probíhá tak, že vysílač s přijímačem komunikuje na 1 kanále. Například u standardu 802.11 je pro přenosové rychlosti 1 a 2 Mb/s každý bit nahrazen 11ti bitovou sekvencí bitů, tzv. Baterovým kódem, neboli chipem. Používá se to kvůli větší spolehlivosti přenosu – signál se rozprostře do větší části spektra a je méně citlivý na rušení. Použití: IEEE 802.11 (až 2Mb/s) a IEEE 802.11b (až 11Mb/s)

2.3.2 FHSS

FHSS, neboli přeskokování kmitočtů má odlišný princip: Nosný signál obsahující namodulovaná data je vysílán na zvolené frekvenci jen krátkou dobu, maximálně 400ms, poté přeskočí na dostatečně vzdálenou frekvenci a tento cyklus se stále opakuje. Pásmo je rozděleno na 75 nebo 79 kanálů, každý o šířce 1MHz, zbylé pásmo funguje jako ochranné vůči interferencím ze sousedních pásem. Vysílací i přijímací strana zná dopředu přesnou sekvenci přeskoků. Výhodou této technologie je vyšší počet současně fungujících zařízení pásmu 2,4GHz, uvádí se kolem 15ti zařízení. Použití: IEEE802.11 (až 2Mb/s).

2.3.3 Infračervené světlo

Infračervené světlo, IR, se k přenosu dat podle standardu 802.11 nevyužívá. V počátcích bezdrátových přenosů byla výhodou nižší cena, tato výhoda je však dnes již smazána.

Nevýhodou je nutnost přímé viditelnosti zařízení, malý dosah a malá rychlost přenosu, která nepřesáhne 2Mb/s.

2.3.4 OFDM

Ortogonalní frekvenční multiplex, OFDM, původně využíval v pásmu 5GHz standard 802.11a. Do pásma 2,4GHz tuto technologii zavedl standard 802.11g. Tato technika rozprostírá přenos do velké části spektra a tím pádem může dosáhnout vyšších přenosových rychlostí. Technologie funguje tak, že spektrum, které má technologie k dispozici, rozdělí na malé části, tzv. subkanály, na kterých se přenáší samostatné nosné signály, tzv. subnosné. Data pak mohou být namodulována na každý takovýto subnosný signál. Tedy celková data určená k přenosu jsou rozložena do dílčích přenosových kanálů. S ohledem na intenzitu zarušení mohou být jednotlivé méně zarušené kanály využívány intenzivněji než kanály vykazující zhoršené přenosové vlastnosti. Použití: IEEE 802.11g a IEEE 802.11a (rychlost až 54Mbit/s).

2.4 MAC podvrstva

Spojová vrstva se zabývá přenosem dat a kódováním. Její spodní podvrstva nese označení MAC (Media Access Control) – ovládání přístupu k médiu [1]. MAC podvrstva odděluje horní spojovou podvrstvu LLC od vrstvy fyzické. Základním účelem je přenášení MSDU mezi objekty MAC podvrstvy

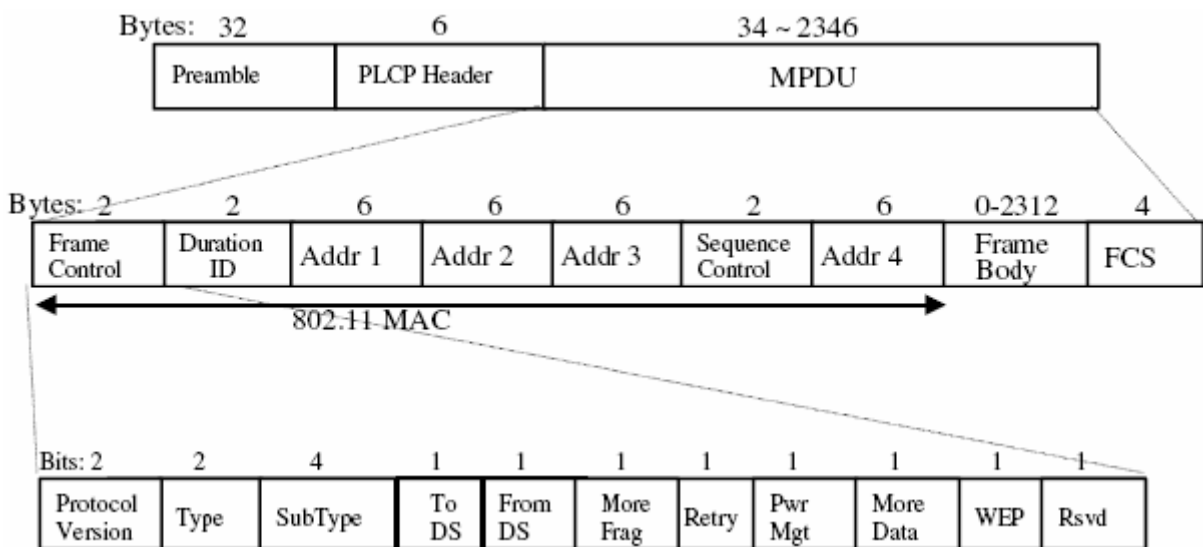
Standard 802.11 specifikuje podvrstvu přístupu k médiu MAC, která poskytuje spoustu funkcí. Hlavní náplň MAC podvrstvy je řízení a provádění komunikace mezi bezdrátovými stanicemi a využívat protokoly které zajistí spojení přes bezdrátové médium [2]. Často je na ní hleděno jako na mozek celé bezdrátové sítě. MAC podvrstva využívá fyzickou vrstvu k provádění úkolů jako je vysílání, přenos a příjem 802.11 rámců.

Základní funkce podvrstvy MAC [1], [2], [9] sumarizuje následující seznam:

- Ø Skenování: Standard 802.11 používá aktivní a pasivní skenování. Při pasivním stanice skenuje kanály a hledá přístupový bod s nejlepším signálem. AP periodicky vysílá beacon rámce, které stanice přijímá a vyhodnocuje sílu signálu. Beacon rámeček obsahuje informace o AP jako identifikátor bezdrátové sítě SSID, podporovanou

přenosovou rychlost atd. Stanice užije tyto informace pro porovnání dostupných AP a rozhodne který využije. Aktivní skenování je podobné, avšak stanice zahajuje proces vysláním probe request rámce a všechny přístupové body v dosahu reagují rámcem probe response. Aktivní skenování umožňuje obdržet okamžitou odezvu z AP bez čekání na vysílání rámce beacon.

- Ø Autentizace. Je to proces zjišťování totožnosti a systémy 802.11 využívají 2 formy – Open system authentication a shared key authentication.
- Ø Asociace. Následuje po autentizaci. Stanice se musí přiřadit k AP než začne přenášet datové rámce. Asociace je nezbytná pro synchronizaci. Stanice vyšle association request rámcem obsahující základní parametry jako identifikátor SSID a podporovanou přenosovou rychlost, na který přístupový bod odpoví odesláním association response frame. Až AP a stanice dokončí proces asociace, může začít přenos dat.
- Ø CRC – cyklický kontrolní součet se využívá k detekování chyb během přenosu a k ukládání dat. CRC se vypočítá před odesláním rámce a je pak odeslán v rámci spolu s daty.
- Ø WEP – nepovinné zabezpečení. Stanice zašifruje tělo (ne hlavičku) každého rámce před přenosem a přijímací stanice rámcem svým klíčem dekoduje. Kódování dat metodou WEP lze v současné době snadno prolomit, bezpečnější je použití WPA nebo WPA2 šifrování.
- Ø RTS/CTS – Pokud je v síti využito RTS/CTS je před každým přenosem zahájen přenos rámce RTS směrem od stanice k přístupovému bodu. AP odpoví CTS rámcem, signalizujícím, že stanice může zahájit datový přenos.
- Ø Mód se sníženou spotřebou Power Save Mode – Stanice nepřijímá data a probouzí se pravidelně až na příjem rámce beacon. Beacon rámcem stanici sdělí zda na AP čekají data pro tuto stanici. Tento režim umožňuje šetřit energii.
- Ø Fragmentace. Nepovinná funkce. Umožňuje stanicím rozdělit datové pakety na menší rámce. Může se tak vyhnout přeposílání velkých rámců. Uživatel může nastavit maximální délku rámce v případě aktivovaného módu fragmentace. Rámce pak nebudou delší než nastavená prahová hodnota.

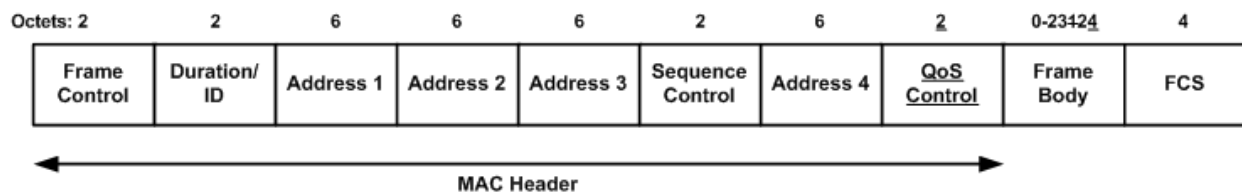


Obr. 3: Formát MAC rámce [1]

Každý MAC rámec obsahuje MAC hlavičku a tělo rámce, které má velikost 0-2312B a FCS. MAC hlavička je tvořena:

- Ø Frame Control (2B)-typ rámce (řídící / kontrolní /datový) + podtyp (např. RTS, CTS)
 - indikace příjmu/vysílání do distribučního systému
 - typ
 - podtyp
 - verze protokolu
 - značení více fragmentů
 - indikace opětovného zaslání dat
 - použití úsporného režimu
 - indikace použití šifrování WEP
- Ø Duration/Station ID (2B)
 - Duration: pro inzerování doby obsazení média
 - Station ID: pro zajištění funkce úspory energie
- Ø Adresní pole 1-4: 4 x 6B (zdroj, cíl a další podle hodnoty ve Frame Control)
- Ø Sequence Control (2B) – podpora fragmentace

MAC rámec standardu IEEE 802.11e se od 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.



Obr. 4: Formát MAC rámce s podporou QoS [1]

3 Kvalita služeb

Kvalita služeb neboli QoS (Quality of Service) [1], [2] je důležitou součástí všech komunikačních systémů. Podpora QoS může být využita v real-time aplikacích (např. video, hlas) i v non-real-time službách. Při přenosu dat citlivých na zpoždění, ztrátu paketů či kolísání zpoždění přes bezdrátovou síť je potřeba jednotlivým typům paketů zajistit individuální zacházení v síti. Rozlišit typ provozu od zdroje k cíli – kvalitu služby. V bezdrátových sítích je průlomový standard 802.11e, který tuto podporu obsahuje. Známé standardy 802.11, 802.11a,b,g a další, které vznikly před 802.11e, nedokáží rozlišit mezi jednotlivými typy provozu a všechna data jsou přenášena jako best effort. Problém může nastat již od 2 a více zařízení připojených na přístupový bod. Je to z důvodu, že u těchto sítí neexistuje žádný prvek rozlišující provoz. Důležité je, že 802.11e je zpětně kompatibilní se všemi staršími standardy a jednoduše místo EDCF použije metodu DCF přístupu k médiu [10].

3.1 802.11e

Standard 802.11e [2]. obsahuje podporu pro zajištění kvality služeb QoS (Quality of Service) a opravu chyb v podvrstvě MAC u všech fyzických vrstev používaných v 802.11 kromě typu sítí Ad-hoc. Doplnuje podporu QoS pro zajištění potřebných parametrů při přenosu hlasu a videa – dat, která jsou citlivá na zpoždění, ztrátu paketů a kolísání zpoždění. Rostoucí popularita bezdrátových sítí využívajících standard 802.11 a rychlý rozvoj internetové telefonie a streamovaného videa byly hlavní důvody pro vznik tohoto protokolu.

802.11e nahrazuje stávající metody k přístupu k médiu DCF a PCF. Nové přístupové metody používané v tomto standardu jsou EDCF a HCF. 802.11e je navíc zpětně kompatibilní se zařízeními, které nejsou podporou pro zajištění kvality služeb vybaveny. Standard byl připravován od roku 2001 a v roce 2005 byl publikován a následně schválen.

3.2 Základní parametry QoS

K základním parametrům QoS patří :

- Ø koncové zpoždění – označuje časový úsek vyslání paketu od zdroje k cíli
- Ø kolísání zpoždění (jitter) – pakety jsou doručovány k cíli s různým zpožděním
- Ø ztráta paketů – udává kolik vyslaných paketů nedorazilo do cíle
- Ø šířka pásma – definuje propustnost spoje

3.2.1 Koncové zpoždění

Doba mezi vysláním paketu od zdroje a jeho doručení k příjemci [5]. Na dobu zpoždění paketů má vliv mnoho faktorů, např. kódování, příprava paketů na přenos přes médium, přenos paketů, čekání paketů ve frontách přenosových zařízení, dekodováním signálu [17]. Nejvyšší jednosměrné zpoždění u hlasu by se mělo pohybovat pod 180ms. Při zpoždění přes 250ms již není zajištěna plynulost a hovor obsahuje hluchá místa [10]. Nedojde přímo k ovlivnění komunikace, ale vznikají úseky, kdy jeden účastník poslouchá druhého a ten již chvíli nehovoří.

3.2.2 Kolísání zpoždění

Pakety jsou v síti doručovány s jistým zpožděním. Toto zpoždění se může měnit v závislosti na aktuálním vytížení sítě. Zpoždění tedy kolísá. Tento jev příliš nevádí datovým přenosům, u přenosu videa a hlasu je to však velký problém. Maximální kolísání zpoždění u hlasu by nemělo přesáhnout 30 ms. Je to ale závislé na aktuálním vytížení sítě a v síti bez podpory QoS je velmi obtížné tak nízký jitter zajistit. Implementováním podpory QoS se podaří kolísání u prioritních dat eliminovat na velmi nízkou úroveň. Tento jev lze také eliminovat přijímacím bufferem ve VoIP koncovém zařízení, což ale vede k celkovému zpoždění přenosu [17].

3.2.3 Ztráta paketů

Udává, kolik paketů nedorazilo od vysílající strany k příjemci. Ztrátu paketů může způsobovat mnoho faktorů, např. zahlcení a přetížení sítě, přeplnění vyrovnávacích pamětí u síťových prvků, příliš vysoké zpoždění a následné zahození paketu. Pokud při přenosu videa dojde ke ztrátě paketů, může dojít k rozostření obrazu či krátkodobému výpadku. U hlasu se ztráta projevuje jako krátkodobý výpadek části sdělení. Citlivost na ztrátu paketů je u hlasu menší než u dat, udává se hodnota okolo 1%. Nejcitlivější na ztrátu paketů jsou tedy data, následuje hlas a videokonference, o něco méně citlivé je streamingové video. Datové pakety

pro přenos mohou používat algoritmus pro opětovné zaslání paketu, což např. při hlasovém přenosu by již nemělo žádný význam.

3.2.4 Šířka pásma

Šířka pásma je přenosová kapacita, která souvisí s propustností – objem dat úspěšně přenesený za jednotku času a má vliv na přenosovou rychlost.

Tab. 2: Rozlišení kvality sítě podle parametrů při přenosu VoIP [11].

Kvalita sítě	Dobrá	Akceptovatelná	Nevyhovující
Zpoždění [ms]	0-150	150-300	nad 300
Kolísání zp. [ms]	0-20	20-50	nad 50
Ztrátovost [%]	0-0,5	0,5-1,5	nad 1,5

3.3 VoIP

Podpora hlasové komunikace využívající Internet Protokol, IP (Internet Protocol) se nazývá Voice Over IP [1] neboli VoIP. VoIP je velmi populární kvůli své nízké ceně a dokonce v kombinaci s některými aplikacemi lze využívat zcela zdarma. VoIP můžeme definovat jako schopnost učinit telefonní hovor přes datovou síť využívající protokol IP a přiměřenou QoS. Pokusme se nyní VoIP charakterizovat:

- Ø Efektivní využití kapacity kanálu – jeden kanál je využit pro více služeb a více přenosů
- Ø Možnost využít současnou infrastrukturu (datových sítí)
- Ø Snadné navýšení kapacity (u paketově orientovaných sítí)
- Ø Nízké náklady (pořizovací i provozní cena bývají často nižší než u klasické služby ADSL, kabelové televize atd.)
- Ø Výběr síťových prvků (nutno zohlednit při navrhování sítě)
- Ø Problém kvality služeb (Na jednom kanálu funguje více služeb, je nutno zajistit snadnou průchodnost hlasu)

3.4 VoWLAN

VoWLAN je využití Internet protokolu IP pro bezdrátový přenos hlasu. Telekomunikační systém pro využití hlasu přes WLAN [1] je na obrázku 5. 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 (Session Initiation Protocol)), směrovací protokoly (např. RIP (Routing Information Protocol), OSPF (Open Shortest Path First) a BG (Border Gateway protocol)),

3.4.1 Požadavky na VoWLAN

Cíl je relativně jednoduchý – přesunout vlastnosti telefonních hovorů (přenos hlasu i signalizaci) do bezdrátové sítě WLAN s páteří 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 [1]. Výzvy na vývojáře produktů se dají rozdělit do pěti specifických oblastí:

- Ø Hlasová kvalita by měla být srovnatelná jako u veřejné telefonní sítě PSTN (Public switch telephone network).
- Ø Výchozí síť 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.
- Ø Signalizace (kontrola hovoru) musí zajistit, aby byl hovor průchodný – transparentní a volaná strana věděla jakou technologii služba nyní využívá.
- Ø PSTN/VoWLAN/VoIP služby spolupracující zajišťující komunikaci propojených systémů musí obsahovat prvky a brány mezi hlasem a linkovým vedením a mezi linkovým vedením a bezdrátovým prostředím.
- Ø Musí být zajištěn systém zabezpečení, managementu, adresování a účtování hovoru.

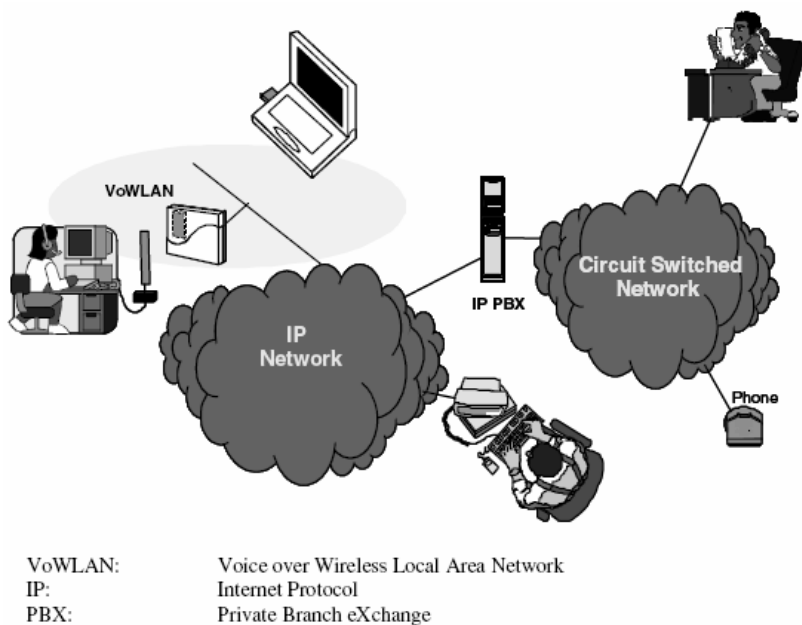
3.4.2 Hlasová kvalita a charakteristika

Zajištění přenosu hlasu v dostatečné kvalitě je chápáno jako základní požadavek . Existují 4 faktory [1], které mají velký vliv na kvalitu hovoru:

- Ø Zpoždění: Problém zpoždění se stává významným, pokud je jednocestné zpoždění větší než 250ms. End-to-end zpoždění je tedy limitováno a musí být co nejnižší při přenosu přes paketovou síť.
- Ø Kolísání zpoždění – jitter. Označuje různé kolísání zpoždění přenášených paketů v síti.
- Ø Ztráty paketů. Bezdrátové a IP sítě nemůžou poskytnout záruku, že dojde k doručení všech paketů vyslaných do sítě. V těchto sítích jakmile dojde dosažení vrchní hranice zatížení jsou pakety zahazovány.
- Ø Echo. K nejvýraznějšímu vzniku ozvěnového signálu dochází v kombinovaných sítích PSTN – VoIP. Příčinou ozvěnového signálu je nevyvážená vidlice analogového telefonu [17].

Tab. 3: Pravděpodobnost využití VoIP [11]

Připojení	Kabelová TV	Wi-Fi	ADSL	ISDN	Dial-up	Rychlé mobilní	Pomalé mobilní
% podíl	19	18	14	7	33	5	4
Pravděpodobnost využití VoIP	Velká	Velká	Vyšší	Střední	Malá	Velmi malá	Velmi malá



Obr. 5: Schéma integrace VoWLAN do telekomunikačního systému [1]

Nedostatky standardu 802.11 jsou zmiňovány již ve 2. kapitole, kde jsou uvedeny i doplňky tohoto standardu. V standardu 802.11, 802.11 a, b, g jsou využívány základní metody přístupu k médiu PCF a DCF, které neumožňují rozlišit různé druhy provozovaných služeb v síti.

Doplňek 802.11e obsahuje mechanismus pro identifikaci třídy služby z hlavičky paketů. Využívá nové metody přístupu k médiu EDCF a HCF.

3.5 Metody přístupu k médiu

3.5.1 DCF

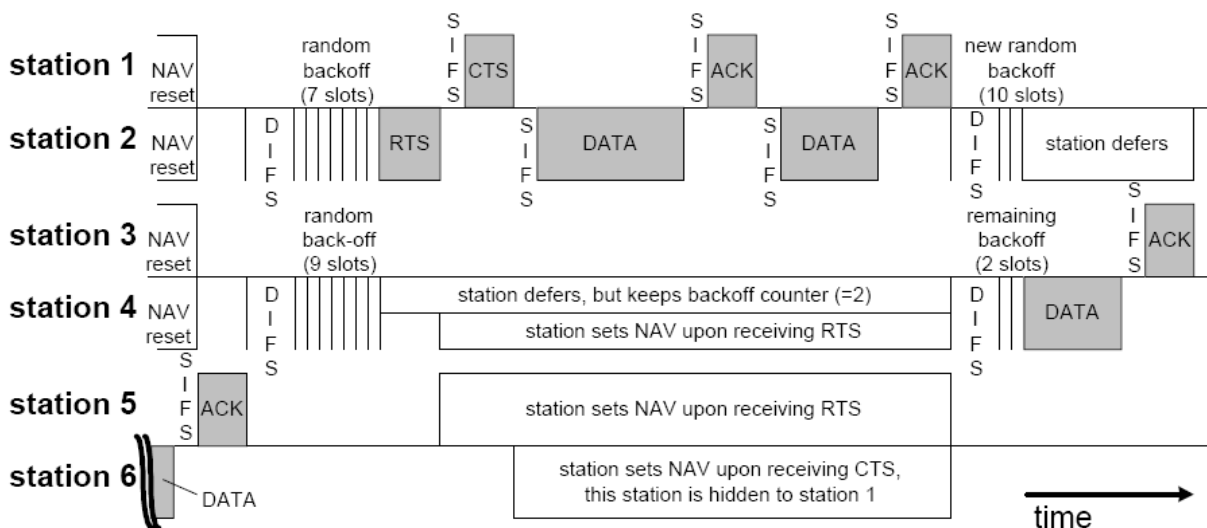
Princip režimu DCF [1], [2] je založen na metodě přístupu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Stanice před vysláním nejprve naslouchá a zjišťuje, zda nevysílá jiná stanice. CSMA/CA využívá 2 techniky:

- Ø Vložení mezery IFS mezi vysílanými rámci (Inter Frame Space)
- Ø Odklad vysílání (backoff).

Interval DIFS (DCF IFS) odpovídá době povinného čekání pro nalezení volného vysílacího kanálu. Až když dojde k nalezení volného kanálu, může stanice zahájit vysílání. Pokud však v této době zahájí vysílání jiná stanice, musí stanice vysílání odložit.

DCF zajišťuje koordinaci přístupu k rádiovému kanálu. Nepodporuje žádné upřednostnění služeb. Jedná se o jednoduchý mechanismus, který je vhodný pro asynchronní přenosy dat. Negarantuje zpoždění ani šířku pásma, nepodporuje požadavky na zajištění kvality služeb.

Princip DCF – Interval odložení vysílání si každá stanice volí náhodně v rozmezí hodnot nula a velikostí okna sváru CW (Contention window). Stále však existuje možnost kolize v případě, že se o vysílací kanál uchází více stanic. Hodnota CW se při každé kolizi zdvojnásobí (exponential backoff). Stanice zahájí vysílání jakmile interval odloženého vysílání vyprší a médium je uvolněno. Příjemce dat po obdržení paketu čeká po dobu intervalu SIFS (Short IFS, je kratší než DIFS) a poté zašle potvrzení o přijetí paketu. Potvrzení příjmu je u bezdrátového přenosu dat důležité, neboť k chybě přenosu může dojít z mnoha důvodů – pro nedostatečnou sílu signálu, kvůli kolizi dat, překročení maximální hodnoty zatížení sítě atd.



Obr. 6: Příklad funkce DCF v síti 802.11 [2]

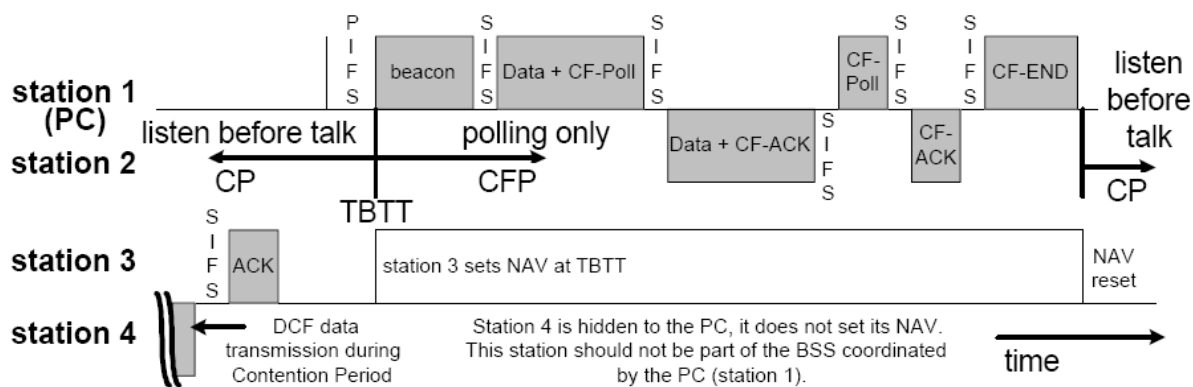
3.5.2 PCF

Režim přístupu k médiu PCF (Point Coordination Function) lze využít jen v bezdrátových sítích s přístupovým bodem, nikoliv v sítích ad-hoc. PCF je určen pro synchronní datové přenosy, ale je využíván jen zřídka. Jedná se o volitelný mechanismus přístupu k médiu.

Princip PCF: z přístupového bodu vysílá tzv. koordinační bod v pravidelných intervalech rámce typu beacon, kterým sděluje stanicím v síti specifické parametry managementu a identifikace. Přístupový bod dělí dobu mezi vysíláním těchto rámců na dvě části:

- Ø Dobu bez boje o médium – contention free
- Ø Dobu, kdy probíhá boj o médium – contention

Stanice může na základě výzvy získat povolení ke garantovanému vysílání. V tuto dobu nemusí bojovat o médium s žádnou jinou stanicí. Režim PCF využívá intervalu PIFS (PCF IFS) pro ohlášení intervalu bez kolize pro stanice s prioritou vysílání. Interval PIFS je delší než SIFS u režimu DCF.



Obr. 7: Ukázka činnosti PCF [2]

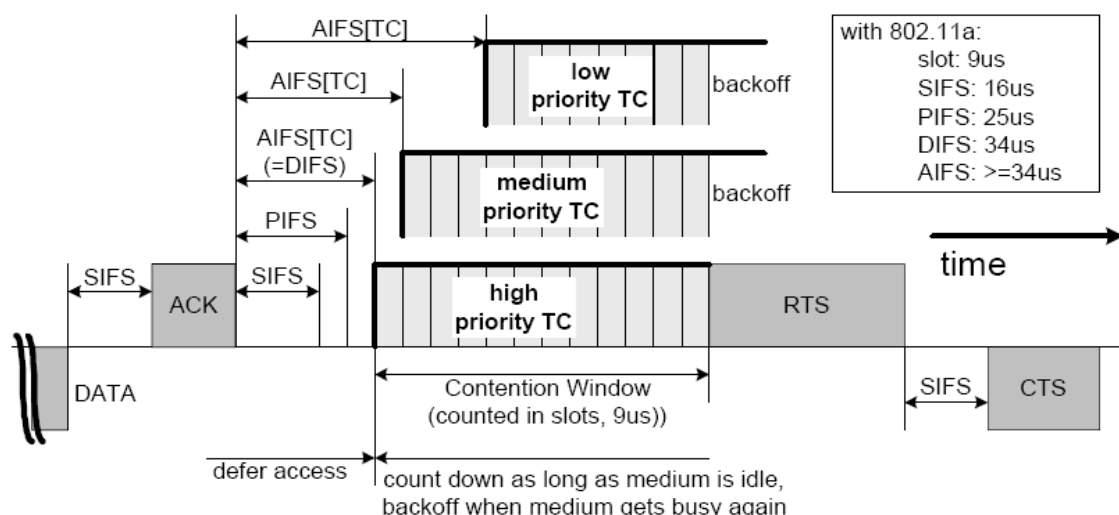
3.5.3 EDCF

Standard 802.11e rozšiřuje původní režimy DCF a PCF. Povinný DCF rozšiřuje na EDCF (Enhanced DCF) [1], [2], [10] a volitelný PCF rozšiřuje na volitelný HCF (Hybrid Coordination Function). Navíc musí zajistit zpětnou kompatibilitu se zařízeními, které nejsou vybaveny podporou QoS.

Enhanced Distribution Coordination Function tedy rozšiřuje DCF o nové funkce. Je to pravděpodobnostní prioritní mechanismus pro alokování šířky pásma na základě kategorií provozu. Existují 4 kategorie provozu pro 8 úrovní priority. Přiřazení priority ke kategorii provozu je znázorněno v Tab. 4. Přenos dat probíhá přesně podle daných kritérií. Dle kategorie provozu má každý typ dat jinou délku mezirámcové mezery AIFS (Arbitration Interframe Space). Nižší priorita provozu má AIFS delší. Stanice s vysokou prioritou provozu bude tedy čekat kratší dobu, než zahájí vysílání, oproti stanici s nízkou prioritou. Cíleně je tak přenos dat a provoz na médiu řízeně neférový. Data, která spadají do vyšší priority provozu, jsou odbavena dříve a upřednostněny na úkor nízko-prioritního provozu (viz Obr.8).

Tab. 4: Mapování priority na kategorii přístupu [1].

Kategorie přístupu	Priorita (0-7)	Určeno pro
0	0	Best effort
1	1,2	Pozadí
2	3,4,5	Video
3	6,7	Hlas



Obr. 8: EDCF u 802.11e. Upřednostněna jsou vysoce prioritní data [2]

Využívají se čtyři kategorie přístupu pro zajištění priority u přenášených dat. Při využití přenosu ve WiFi síti s QoS musí být zapnuta podpora QoS na stanici i na přístupovém bodu. Standardně operuje s nejvyšší prioritou hlas. Od přenosu normálních dat (např. souborů ve formátu JPEG) se odlišuje, má odlišné požadavky na přenos. Hlas potřebuje zajistit konstantní šířku pásma, zatímco přenos dat probíhá shlukově. Dalším důležitým faktorem při přenosu hlasu je zpoždění a kolísání zpoždění, které nesmí přesáhnout 30ms. Hlas je méně citlivý na ztrátu paketů při přenosu než u data, udává se tolerantní hodnota okolo 1%.

Tab. 5: Kategorie přístupu a nastavení typických hodnot CW a AIFS [1].

Kategorie přístupu	CWmin	CWmax	AIFS
0	CWmin	CWmax	2
1	CWmin	CWmax	1
2	$(CWmin+1)/2-1$	CWmin	1
3	$(CWmin+1)/2-1$	$(CWmin+1)/2-1$	1

Tab. 6: Doba čekání na vysílání (v časových úsecích) u jednotlivých kategorií [5].

Kategorie	Charakteristika přenosu	AIFSN	CW	Celková doba čekání
Hlas (7,6)	VoIP s nejvyšší prioritou – minimální zpoždění	2	0-3	2-5
Video (5,4)	Video toky (běžné i vysoké rozlišení)	2	0-7	2-9
Best effort (0,3)	Interaktivní aplikace necitlivé na zpoždění	3	0-15	3-18
Pozadí (2,1)	Datové soubory	7	0-15	7-22

3.5.4 HCF

HCF [2], [10] je vylepšené rozšíření PCF, může být použito v sítích s podporou kvality služby a stejně jako PCF se využívá jen zřídka, je volitelné. Obsahuje specifický mechanismus QoS pro zajištění správného přenosu rámců během periody boje o médium CP a periody bez boje o médium CFP. Přístupový bod v době CFP zasílá dotaz na stanici, pokud stanice má data k vysílání, obdrží od přístupového bodu přesný časový úsek, kdy zahájí vysílání a jak dlouho vysílání potrvá. Je použita metoda přístupu ke kanálu EDCA (Enhanced Distributed Channel Access). Stejně jako u EDCF se využívají 4 kategorie přístupu [5].

4 Praktická část

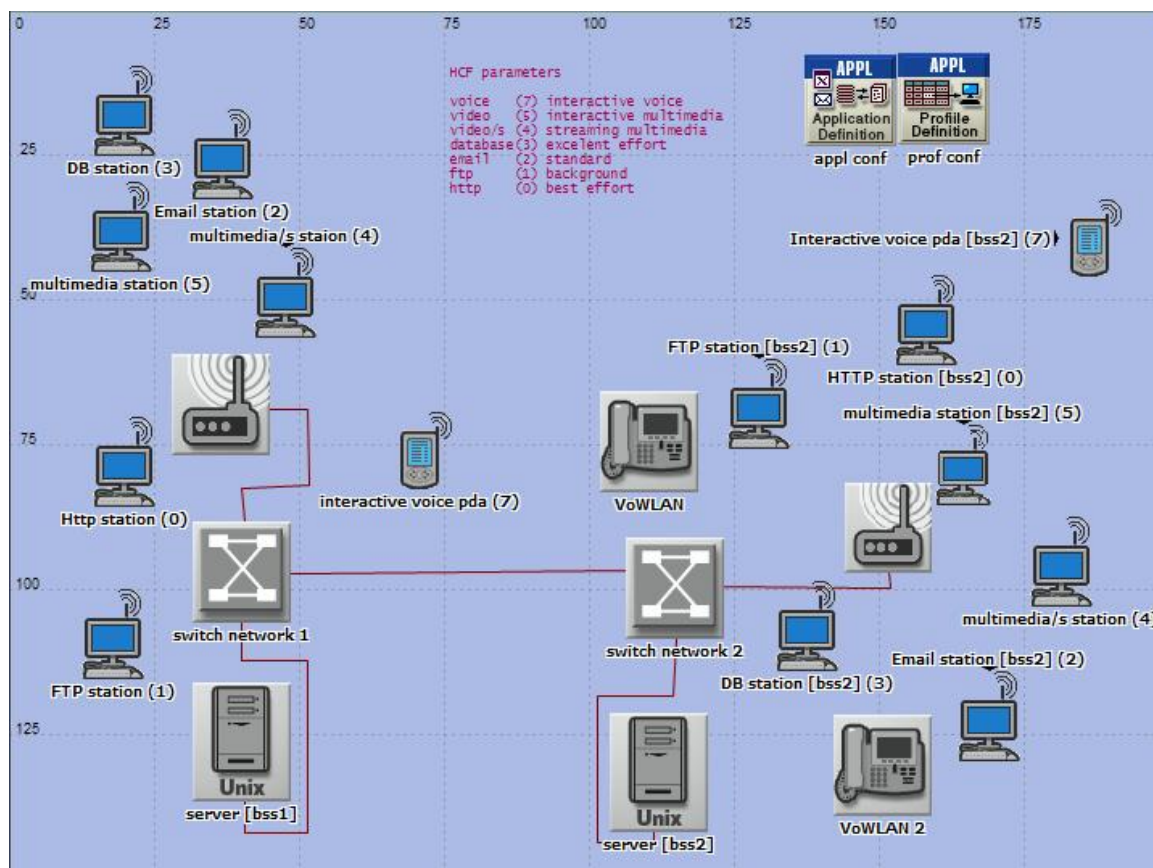
4.1 Vytvoření bezdrátové sítě s podporou kvality služeb

V programu Opnet Modeler je vytvořen projekt obsahující několik scénářů, na kterých probíhaly simulace provozu bezdrátových sítí a různými změnami nastavení sledovány charakteristiky. Nakonec dle získaných poznatků vznikl finální projekt, obsahující 2 scénáře. Je zde sestavena síť standardu 802.11e, která podporuje kvalitu služeb. Druhý scénář je ve variantě bez podpory QoS pro porovnání výsledků simulace na bázi varianty 802.11b.

První i druhý scénář se skládá ze 2 BSS. BSS1 obsahuje 6 bezdrátových stanic a 1 PDA. Všechny stanice jsou připojeny na bezdrátový směrovač. Ten je napojen do přepínače. Přepínač spojuje síť BSS1 se sítí BSS2 a zároveň je napojen na server.

Druhou bezdrátovou síť BSS2 tvoří opět 6 stanic, 1 PDA a 2 VoWLAN telefony. 6 bezdrátových stanic zatěžuje síť přenosem FTP, prohlížením webových stránek, přenosem dat z databázového serveru, prací s emailem, přenosem streamovaného a interaktivního videa. PDA je připojeno na bezdrátový bod a naváže telefonní spojení s PDA v druhé síti. V BSS2 jsou 2 VoWLAN telefony, na kterých probíhá hovor v rámci bezdrátové sítě BSS2.

Nový projekt v OPNET Modeleru, je vytvořen v scénáři *Office*, kde velikost je nastavena na *150x200m*. Z palety prvků byl do projektu vybrán 2x přístupový bod, 16x mobile station, 2x router – switch, linku 1000Base-T a 2x server, application configuration a profile configuration.



Obr. 9: Vytvořený scénář v programu Opnet Modeler

4.2 Nastavení parametrů

4.2.1 Application Configuration

Pro volbu aplikací, které budou v projektu fungovat, je nutné jejich nastavení na prvku application configuration [12]. Přes *Edit Attributes* v záložce *Application Definitions* záložka *Number of Rows* nastavíme na hodnotu 7. Postupně přidáme podporované aplikace.

- i. *Voice (IP telefonie)*. Službu si pojmenujeme jako *Voice*, Dále v *Description* vybereme *Edit*, zvolíme *Voice* a opět *Edit*. Zde si zvolíme jaké kódování bude hlas používat. *Encoder Scheme* nastavíme na kodek *G.711*, Počet hlasových rámců v 1 paketu: *1*, Typ služby – nejvyšší priorita – *Interactive Voice (7)*.
- ii. *Video*. *Name: video-high*, rozklikneme *Description > Video Conferencing* a nastavíme interval zobrazení obrázků v sekundách: *15 obrazů za sekundu*, velikost videa *128x120 pixelů* a *Type of Service > Interactive Multimedia (5)*, *RSVP Parameters: None*, *Traffic Mix (%) all discrete*.

- iii. *Video/s*. Tato aplikace bude přenášet streamované video. *Name: video/s*, V nastavení zvolíme *Description*, vybereme Video Conferencing > Edit. Zde nastavíme *10frames/sec*, velikost videa *128x120 pixelů* a typ služby *Streaming multimedia (4)*.
- iv. *Email* – Aplikace pro přenos emailových zpráv, Velikost zpráv *128bajtů*, typ služby *Best Effort (0)*.
- v. *Database* – Přenos souborů o velikosti 4000 bajtů v typu služby Best effort (0).
- vi. *HTTP* – Konfigurace aplikace prohlížení stránek http. Nastavení je následující: http Specification: Microsoft Internet Explorer, Page Interval exponential (25), Type of Service: Best effort (0).
- vii. *FTP* – Aplikace pro přenos souborů přes FTP. Nastavení: *Inter-Request Time (seconds) exponencial (3600)*, *File Size (bytes) constant (1000000)*. Symbolic Server Name: FTP Server, Type of Service: Background (1).

Attribute	Value
name	appl conf
Application Definitions	(...)
Number of Rows	7
voice	...
video	...
Ftp	...
Http	...
Database	...
email	...
video/s	...
MOS	
Voice Encoder Schemes	(...)

Obr. 10: Nastavení application configuration

Attribute	Value
Silence Length (seconds)	default
Talk Spurt Length (seconds)	default
Symbolic Destination Name	Voice Destination
Encoder Scheme	G.711
Voice Frames per Packet	1
Type of Service	Reserved (7)
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	All Discrete
Signaling	None
Compression Delay (seconds)	0.02
Decompression Delay (seconds)	0.02
Conversation Environment	(...)

Obr. 11: Nastavení hlasové aplikace v application configuration

4.2.2 Profile Configuration

Profile configuration slouží pro nastavení parametrů, dle kterých budou aplikace spouštěny a ukončeny [12]. V Opnetu je možno nastavit různé činnosti uživatelů v různých časových intervalech. Nabízí se použití vlastních profilů, kde každý bude obsahovat 1 nebo více aplikací. Například profil „Sekretářka“ [15] může provozovat aplikace jako Email, Web a databázi. Je možnost nastavení různých zátěžových charakteristik pro různé aplikace. Každý profil vytvořený v tomto objektu může být přiřazen k individuálním stanicím či serverům pro generování dat a vytvoření provozu v síti.

První položka *Name* udává jméno prvku, v našem případě *profile_config*. Po otevření položky *Profile Configuration* se otevře nové okno *Number of Rows*. V tomto poli zadáme, kolik profilů budeme definovat. *Name* v záložce *Enter Application Name* nabízí možnost výběru aplikací konfigurovaných na tomto profilu. Aplikace jsme si již dříve nadefinovali v objektu *Application Configuration*. Máme nadefinovaných sedm aplikací – Voice, Video, Video-stream, FTP, best effort, http a email. Pro jeden profil vybereme 1 aplikaci. Další položka se nazývá *Start Time Offset (seconds)*. Zde můžeme definovat, jak dlouho bude aplikace čekat, než dojde k jejímu spuštění. V případě volby uniform (60,120) zajistíme, že aplikace se spustí v časovém intervalu od 1 do 2 minut od začátku simulace.

Dobu trvání nastavíme na položce *Duration*. Pokud chceme, aby byl běh aplikace ukončen dříve, nastavíme dobu (v sekundách). V případě volby *End of Profile* zajistíme životnost aplikace až do skončení celého profilu. *Repeatability* udává parametr pro opakování aplikací. Při nastavení na *Once at Start Time* je opakování vypnuto, *Unlimited* nastaveno nekonečné opakování nebo lze definovat vlastní počet opakování služby přes *Edit*. Důležitá je položka *Operation Mode*. Definuje jak bude aplikace spuštěna. Volbou *Serial (Ordered)* zajistíme, že aplikace budou spouštěny jedna po druhé. Jedna se ukončí a druhá bude spuštěna. Budou spouštěny od prvního řádku po poslední. Volba *Serial (Random)* zajistí, že aplikace budou spouštěny jedna po druhé, ale v náhodném pořadí. *Simultaneous* spustí všechny současně.

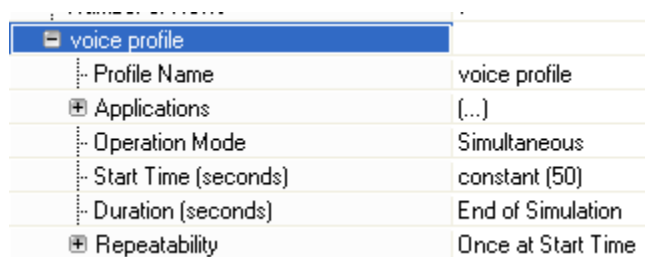
Nastavení *profile configuration* pro profil *voice* je znázorněno na obrázku 12. Vytvoření dalších profilů je obdobné. Vždy pro jeden profil je přiřazena jediná aplikace, již dříve nadefinovaná v *application configuration*.

Attribute	Value
name	prof conf
Profile Configuration	[...]
Number of Rows	7
voice profile	...
video profile	...
Ftp profile	...
Http profile	...
video/s profile	...
database profile	...
email profile	...

Obr. 12: Nastavení aplikací v profile configuration

- i. *Voice profile* – telefonní hovory začnou 50s od počátku simulace. *Operation Mode: Simultaneous, Start time (seconds): constant (50) Duration: end of simulation.*
- ii. *Video profile* – interaktivní video se začne přenášet 30s od začátku simulace. *Operation Mode: Simultaneous, Start time (seconds): constant (30) Duration: end of simulation.*
- iii. *FTP profile* – přenos souborů přes FTP začne 1s od zahájení simulace. *Operation Mode: Ordered-serial, Start time (seconds): constant (1) Duration: end of simulation*

- iv. *HTTP profile* – zatížení sítě přenosem webových stránek je nastaveno na 5s od zahájení simulace. *Operation Mode: Ordered-serial, Start time (seconds): constant (5) Duration: end of simulation.*
- v. *Video/s profile* – vytvořený profil pro přenos streamovaného videa. *Operation Mode: Ordered-serial, Start time (seconds): constant (5) Duration: end of simulation*
- vi. *Database profile* - zatížení sítě přenosem databázových souborů spadá stejně jako *http* a *email* do nejnižší priority QoS, čili *best effort (0)*. *Operation Mode: Simultaneous, Start time (seconds): constant (10) Duration: end of simulation*
- vii. *Email profile* – profil pro přenos emailů. *Operation Mode: Simultaneous, Start time (seconds): uniform (60,70) Duration: end of simulation.*



voice profile	
Profile Name	voice profile
Applications	[...]
Operation Mode	Simultaneous
Start Time (seconds)	constant [50]
Duration (seconds)	End of Simulation
Repeatability	Once at Start Time

Obr. 13: Nastavení hlasové aplikace v profile configuration

4.2.3 Přístupový bod

Z palety object palette vybereme *wlan_ethernet_router* a vložíme ho 2x do projektu. *Name: access point [bss1] a access point [bss2]* V záložce *Wireless LAN Parameters* nastavíme: *BSS Identifier 1*, respektive *2*, *Access Point Functionality: Enabled*, *Physical Characteristics: Direct Sequence 802.11b*. Nastavení přenosové rychlosti najdeme v záložce *Data Rate (bps)* a zvolíme *11 Mbps*. Nastavení *HCF Parameters* bude následující: v síti bez podpory QoS: *Disabled*, v síti s podporou QoS: *Enabled*

4.2.4 Stanice

Nastavení stanic se bude lišit v aplikacích, které na nich budeme provozovat. *BSS Identifier: 1* nebo *2* (podle příslušné BSS). *Access Point Functionality: Disabled*. *Physical Characters: DSSS*. Přenosová rychlost *Data Rate (bps): 11Mbps*. Vysílací výkon: *Transmit Power (W): 0.005*. Volba kanálu *Channel Settings: 2 (bss1) a Channel 8 (bss2)*. *Packet Reception-Power*

Threshold: -95. Rts Threshold: none. Fragmentace nebude povolena: Fragmentation Threshold (bytes): none. CTS-to-self Option: Enabled. Short Retry Limit: 7. Long Retry Limit: 4. AP Beacon Interval (secs): 0.02. Max Receive Lifetime (secs): 0.5. Velikost zásobníku Buffer Size (bits): 256000. Změnu přístupového bodu stanicím zakážeme Roaming Capability: Disabled. Large Packet Processing: Drop. Využití volitelné PCF bude zakázáno, HCF ve scénáři s QoS povoleno. PCF Parameters: Disabled. HCF Parameters: scénář bez QoS: Disabled, scénář s QoS – Default.

4.2.5 VoWLAN

VoWLAN telefony mají mírně odlišné nastavení od pracovních stanic. Není zde nastavena podpora pro vytvořené profily, nýbrž telefony generují vlastní pakety. MAC adresu telefonů nastavíme na 26 a 27. *Traffic generation parameters: constant (0.02). ON state Time: constant (360), OFF state Time: constant (0).* Generování paketů nastavíme v záložce *Packet Generation Arguments*. Volba bude následující: *Interval Time: exponential (1.0), Packet Size (bytes): exponential (1024), Segmentation Size: No Segmentation, Traffic Type of Service: Interactive Voice (6.)*

4.2.6 HCF

Nastavení HCF parametrů je nutné u všech zařízení v síti s podporou kvality služeb. 802.11e operuje s různou délkou hodnoty Contention Window 0-255 a mezirámcové mezery AIFSN 1-7. Rozděluje provoz do 4 kategorií best effort, background, video a voice o 8 třídách. Prioritní data jsou tak odbavována dříve dle QoS mechanismů pracujících s contention Window. Pokud by stanice nepodporovaly QoS nebo by podporu QoS postrádal přístupový bod, provoz by probíhal v režimu DCF.

4.2.7 Přepínač

Přepínače propojují obě WLAN sítě. Jsou nadefinovány porty, na kterých je zapojen přístupový bod, server a port propojující jinou BSS. Dále je zapnuta podpora QoS parametrů.

4.2.8 Server

V případě využití aplikací a profilů z *application config* a *profile config* je třeba mít v síti server. Ten je nastaven pro poskytování všech vytvořených profilů a připojen přes switch ke každé BSS.

4.2.9 Linka

Spojení BSS1 a BSS2 je realizováno pomocí UTP linky *1000Base-T*.

Attribute	Value
[-] HCF Parameters	(...)
[-] Status	Supported
[-] EDCA Parameters	(...)
[-] Access Category Parameters	(...)
[-] Voice	(...)
CWmin	$(PHY\ CWmin + 1) / 4 - 1$
CWmax	$(PHY\ CWmin + 1) / 2 - 1$
AIFSN	1
[+] TXOP Limits	Default
[-] Video	(...)
CWmin	$(PHY\ CWmin + 1) / 2 - 1$
CWmax	PHY CWmin
AIFSN	1
[+] TXOP Limits	Default
[-] Best Effort	(...)
CWmin	PHY CWmin
CWmax	$4 * (PHY\ CWmin + 1) - 1$
AIFSN	3
[+] TXOP Limits	(...)
[-] Background	(...)
CWmin	PHY CWmin
CWmax	PHY CWmax
AIFSN	7
[+] TXOP Limits	Default

Obr. 14: Nastavení HCF parametrů

5 Výsledky simulace

5.1 Zahazování dat

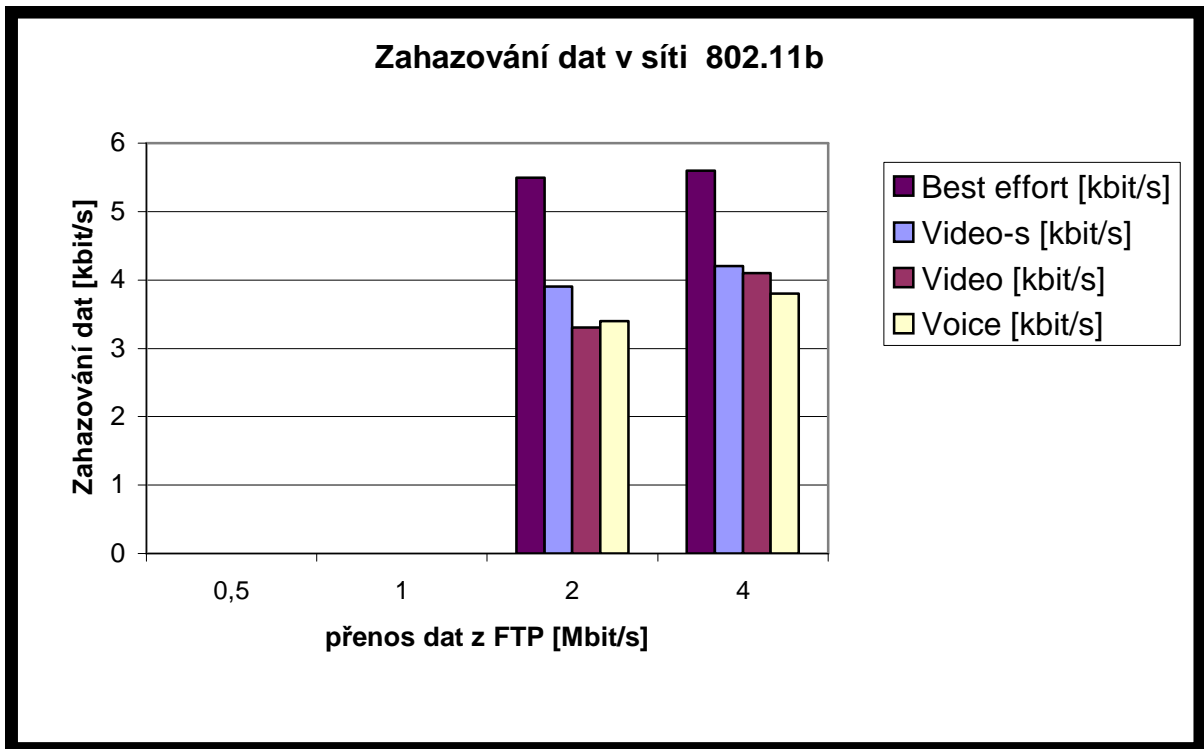
Tento parametr označuje zahazování dat u vyšších vrstev bezdrátových stanic z důvodu přeplnění zásobníku nebo z důvodu velikosti paketu, která překročí nejvyšší dovolenou velikost paketu definovanou ve standardu 802.11.

Tab. 7: Zahazování dat v síti 802.11b

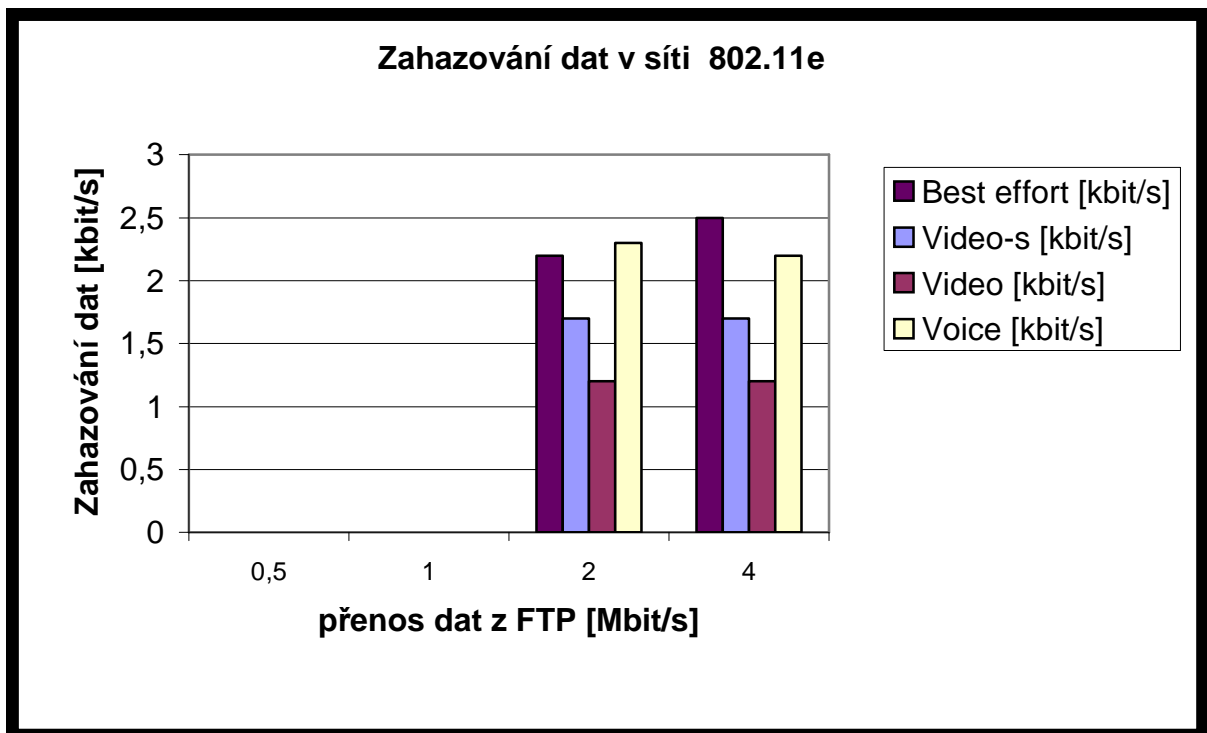
Přenos dat v síti [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	5,5	700	3,9	3,3	3,4
4	5,6	1440	4,2	4,1	3,8

Tab. 8: Zahazování dat v síti s 802.11e

Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0	0	0	0	0
1	0	350	0	0	0
2	2,2	970	1,7	1,2	2,3
4	2,5	1870	1,7	1,2	2,2



Obr. 15: Zahazování dat v síti 802.11b



Obr. 16: Zahazování dat v síti 802.11e

K zahazování dat docházelo při přenosu dat v síti vyšším než 2 Mbit/s. Opnet nezaznamenal zahazování dat u přenosů pod 2Mbit u žádného typu provozu, dokonce ani v síti bez podpory QoS. V síti 802.11b je parametr data dropped u všech kategorií provozu vyšší. V síti 802.11e nám naměřené hodnoty jednoznačně ukazují, že dochází k výrazně nižšímu zahazování prioritních dat i při vysokém provozu v síti.

5.2 Koncové zpoždění

Základní pilíř kvality služeb. Rozhoduje, zda je v síti možno provozovat hlasové a video služby. Parametr koncového zpoždění obsahuje celkovou dobu úspěšně doručených paketů.

Tab. 9: Koncové zpoždění v síti 802.11b

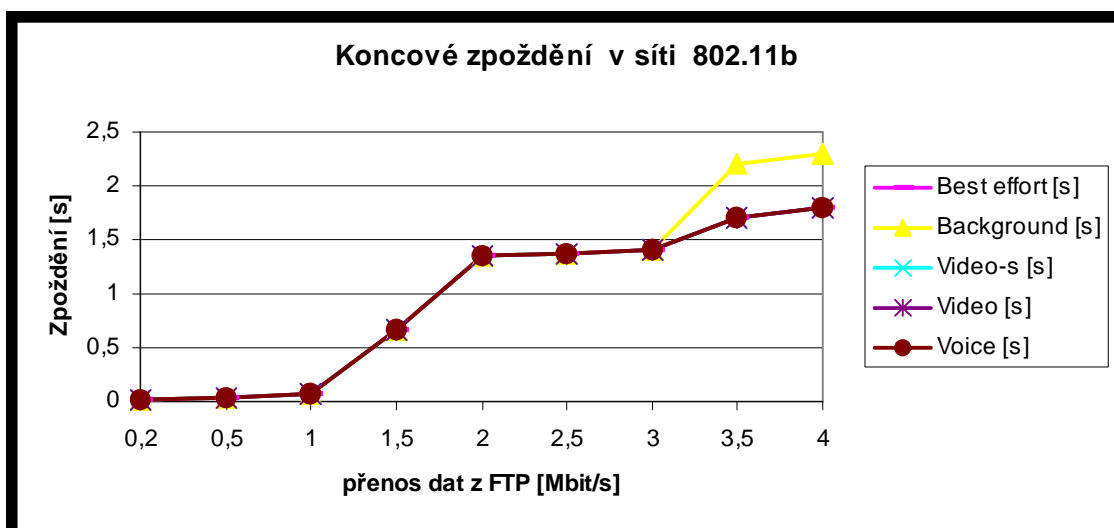
Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [s]	Background [s]	Video-s [s]	Video [s]	Voice [s]
0,2	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
0,5	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
1	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
1,5	0,670	0,670	0,670	0,670	0,670
2	1,360	1,360	1,360	1,360	1,360
2,5	1,375	1,375	1,375	1,375	1,375
3	1,410	1,410	1,410	1,410	1,410
3,5	1,700	2,200	1,700	1,700	1,700
4	1,800	2,300	1,800	1,800	1,800

Tab. 10: Koncové zpoždění v síti s 802.11e

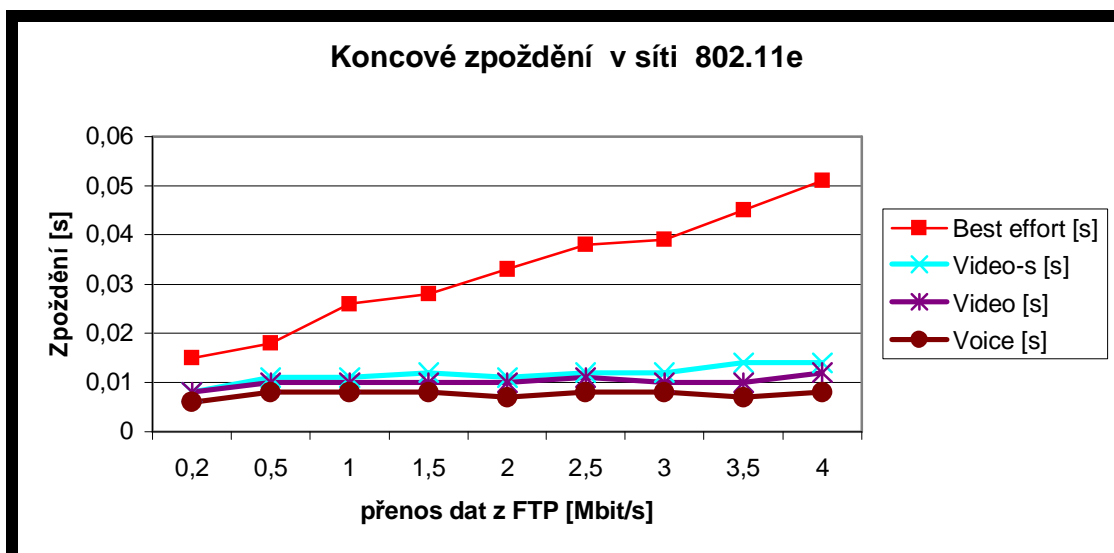
Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [s]	Background [s]	Video-s [s]	Video [s]	Voice [s]
0,2	0,015	0,015	0,008	0,008	0,006
0,5	0,018	0,018	0,011	0,010	0,008
1	0,026	0,210	0,011	0,010	0,008
1,5	0,028	1,200	0,012	0,010	0,008
2	0,033	1,700	0,011	0,010	0,007
2,5	0,038	1,900	0,012	0,011	0,008
3	0,039	2,200	0,012	0,010	0,008
3,5	0,045	2,700	0,014	0,010	0,007
4	0,051	2,950	0,014	0,012	0,008

Parametr koncové zpoždění se u obou sítí velmi výrazně liší. Situace v síti bez podpory QoS byla následující: pakliže je provoz v síti malý (do 1Mbps přenosu dat na pozadí), lze hovořit o zajištění kvality služeb. Zpoždění dosahuje u hlasu 80ms, což je dle metodiky QoS pro hlas (viz Tab. 2) hodnota „dobrá“. Zvýšením provozu v síti se již hodnota zpoždění hlasu dostává nad 670ms, což lze klasifikovat jako zpoždění „nevyhovující“ a hlasové služby v této síti nelze provozovat.

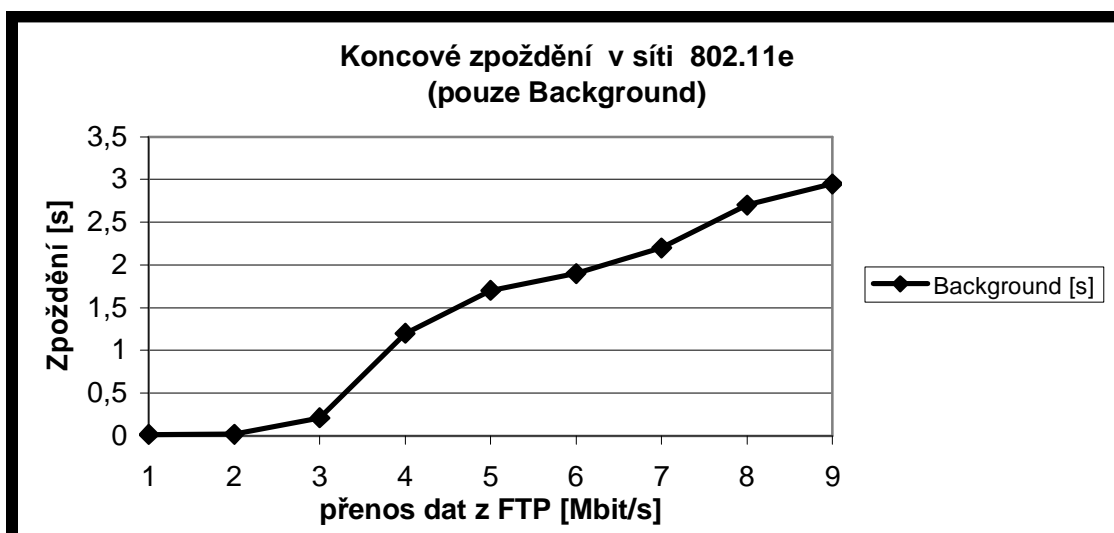
Pokud v síti zajistíme podporu QoS, dostaneme zcela odlišné výsledky. Hodnota zpoždění u hlasu se pohybuje v rozmezí 6-8ms, což je dle hodnocení QoS požadavků hodnota „dobrá“. Takto nízké zpoždění bylo zajištěno i při velkém zatížení sítě. Bylo tedy zjištěno, že při použití QoS nejsou hlasové ani video aplikace ohroženy a zpoždění paketů dosahuje výborných výsledků .



Obr. 17: Koncové zpoždění v síti 802.11b



Obr. 18: Koncové zpoždění v síti 802.11e



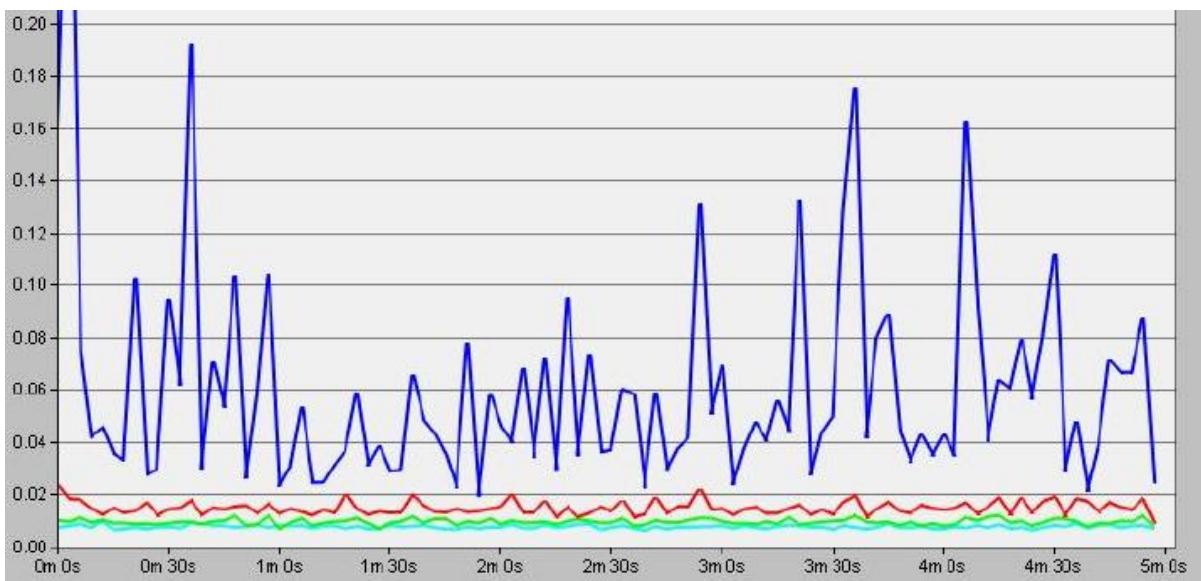
Obr. 19: Koncové zpoždění v síti 802.11e (Background)

5.3 Kolísání zpoždění

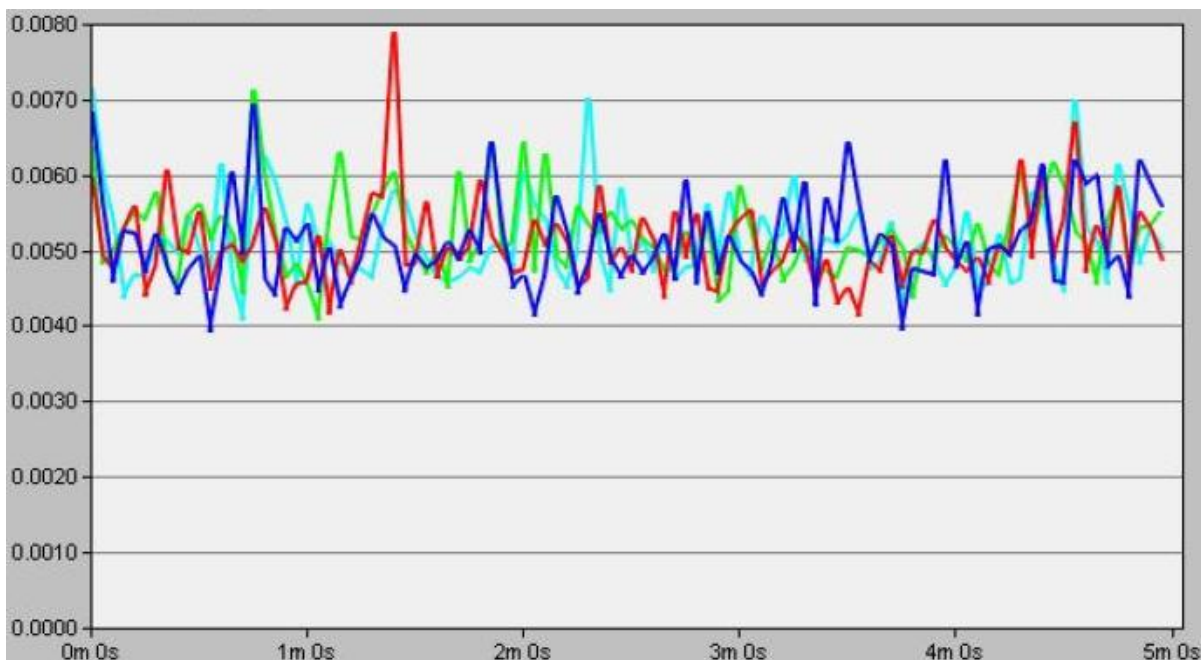
Implementace podpory kvality služeb do bezdrátové sítě zaručí, že přenášená prioritní data hlasu a videa získají konstantní zpoždění v řádu milisekund po celou dobu komunikace a neovlivní je ani narůstající vytížení sítě.

V síti 802.11e bylo dosaženo pro prioritní data i při vysokém zatížení sítě kolísání v řádu jednotek ms, což dle hodnocení QoS požadavků (viz Tab. 2) je stav, kdy lze v síti provozovat multimediální i hlasové aplikace bez jakýchkoliv problémů.

V síti 802.11b jsme svědky jevu, kdy všechna data kolísají v závislosti na zatížení sítě shodně, bez rozlišení prioritních dat. Při malém zatížení sítě přenosem 0,5Mbps background dat je dle metriky QoS v oblasti „dobrá“ (viz Tab. 2) naměřeno hodnot okolo 20ms. Přenosem 1Mbps background dat se kolísání pohybuje okolo 40ms, což je hodnoceno jako oblast „akceptovalelná“. Při zatížení sítě větším jak 1Mbps dat na pozadí se kolísání dostává do oblasti „nevyhovující“, překračuje 50ms a při vyšším zatížení dále narůstá



Obr. 20: Ukázka kolísání zpoždění v síti 802.11e



Obr. 21: Ukázka kolísání zpoždění v síti 802.11b

5.4 Propustnost

Parametr propustnost 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, která data vyslala. Předpoklad je důležitý, protože kategorie přístupu nezasahují do příjmu, zpracování a směrování paketů přijatých na fyzické vrstvě. Statistika propustnost neobsahuje datové rámce, které jsou:

- Ø Typu unicast a adresované jiné stanici
- Ø Kopii naposledy vyslaného rámce
- Ø Nekompletní. Fragmenty rámce, které nebyly přijaty během určité doby a došlo k jejich zahození v periodě skládání paketů

Tab. 11: Propustnost dat v síti 802.11b

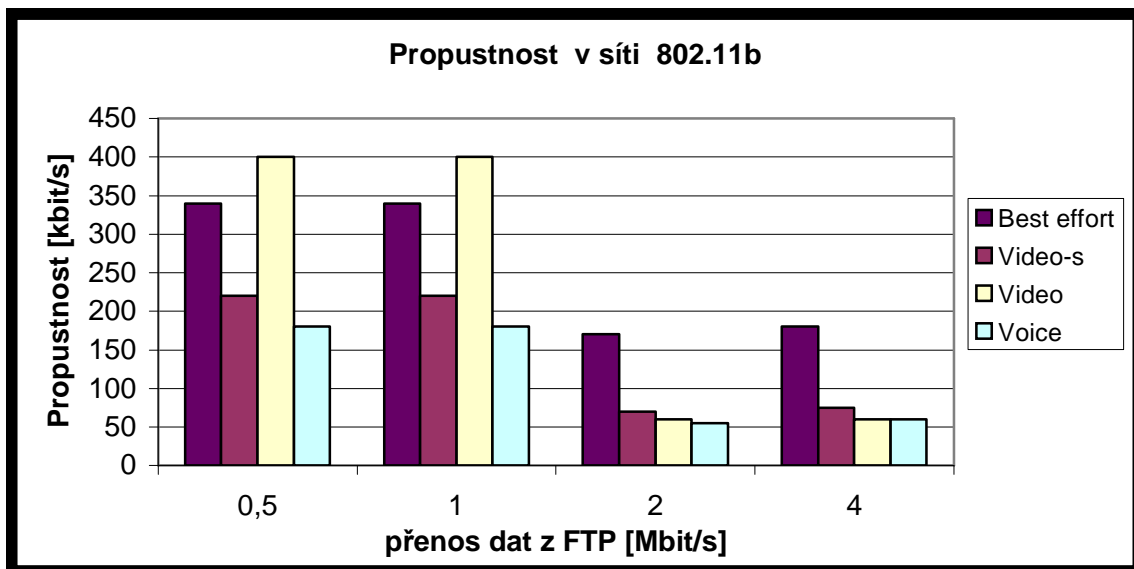
Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	340	500	220	400	180
1	340	2050	220	400	180
2	170	980	70	60	55
4	180	1200	75	60	60

Tab. 12: Propustnost dat v síti 802.11e

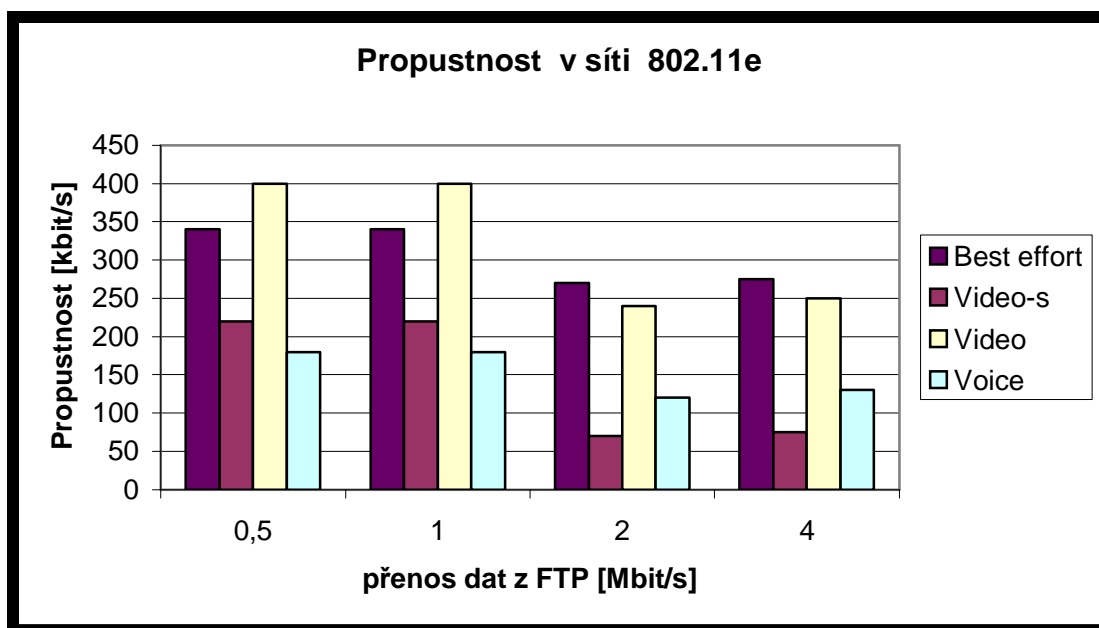
Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	340	500	220	400	180
1	340	2050	220	400	180
2	270	1320	70	240	120
4	275	1385	75	250	130

Propustnost byla naměřena u obou sítí 100% při malém zatížení daty background do 2 Mbit/s. Při vyšším zatížení sítě dojde k omezení propustnosti všech dat, nejvíce však dat background, která síť zatěžují nejvíce.

V síti 802.11e bylo naměřeno vyšších hodnot propustnosti u všech typů dat. Síť dokáže při vysoké zátěži lépe propouštět prioritní, ale i neprioritní data. Byl změřeny velké rozdíly, zejména u prioritních dat jsou výsledky několikanásobně lepší.



Obr. 22: Propustnost v síti 802.11b



Obr. 23: Propustnost v síti 802.11e

5.5 Chybavost

Parametr chybovosti BER může být měřen pro chybovost paketů nebo chybovost bitů. Udává celkový počet chybně přijatých bitů/paketů ku celkovému počtu přijatých bitů/paketů v síti.

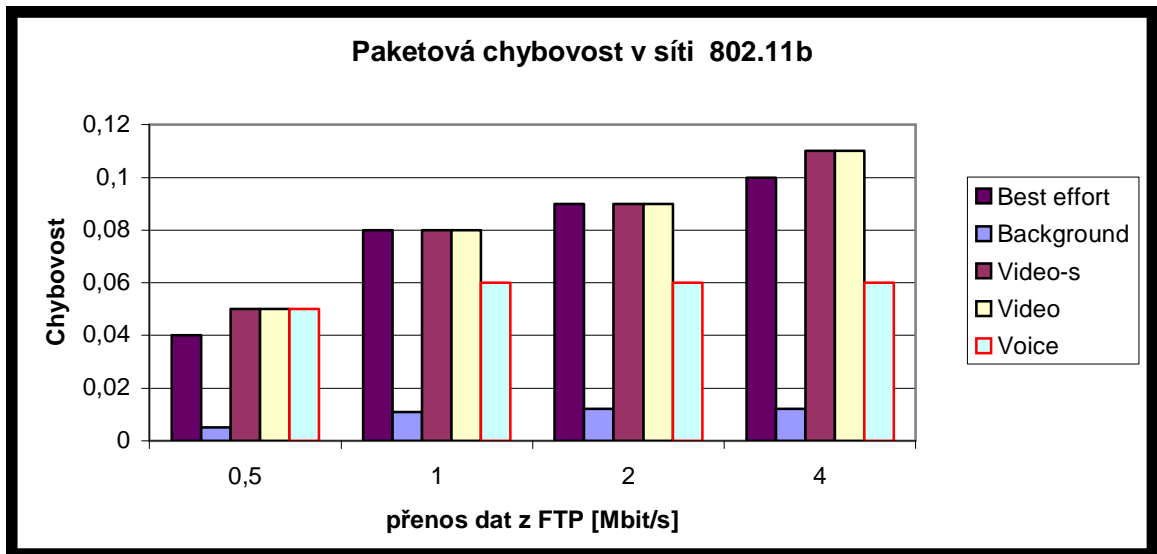
Tab. 13: Paketová chybovost dat v síti 802.11b

Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0,04	0,005	0,05	0,05	0,05
1	0,08	0,011	0,08	0,08	0,06
2	0,09	0,012	0,09	0,09	0,06
4	0,10	0,012	0,11	0,11	0,06

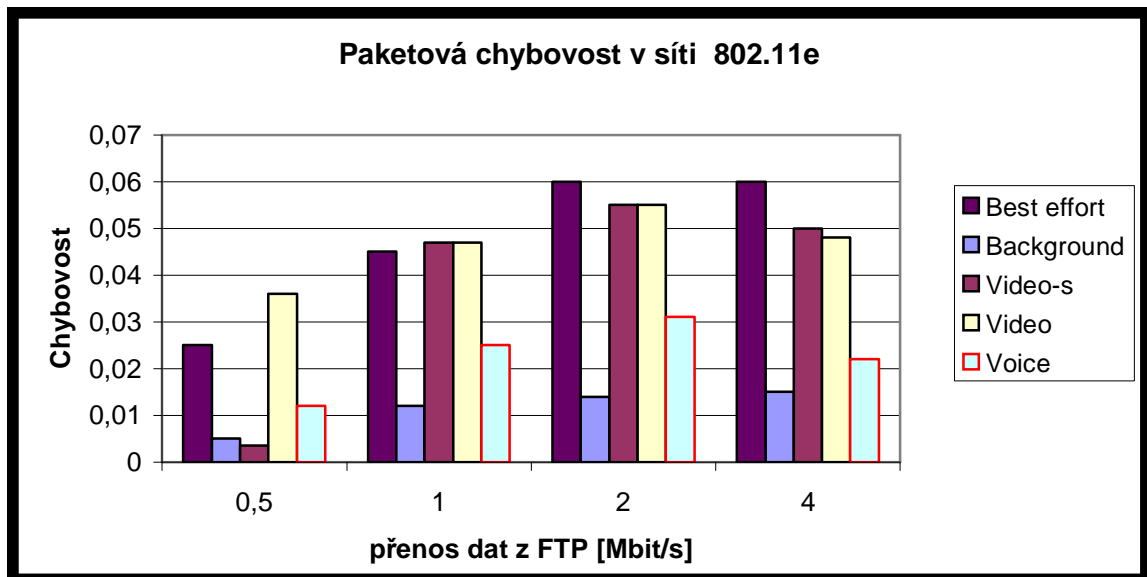
Tab. 14: Paketová chybovost dat v síti 802.11e

Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0,025	0,005	0,0035	0,036	0,012
1	0,045	0,012	0,047	0,047	0,025
2	0,06	0,014	0,055	0,055	0,031
4	0,06	0,015	0,050	0,048	0,022

Nejnižších hodnot paketové chybovosti dosáhl přenos dat v kategorii background, což je přenos datových souborů, např. Z FTP serveru. Hodnota nepřekročila 0,012 v síti bez podpory QoS. V síti s podporou QoS bylo naměřeno mírně vyšších hodnot. Bylo zjištěno, že s narůstajícím přenosem dat v síti chybovost stoupá. U hlasu se BER pohybovala okolo hodnoty 0,05 v síti 802.11b. V síti 802.11e byla chybovost hlasu výrazně nižší, pohybovala se v rozmezí 0,012-0,031.



Obr. 24: Chybovost v síti 802.11b



Obr. 25: Chybovost v síti 802.11e

5.6 Velikost fronty

Parametr Que Size udává počet čekajících paketů vysílací frontě.

Ve sledované charakteristice jsou zahrnuty datové pakety, management pakety a pakety vyšších vrstev. Z management dat jsou zde zahrnuty rámce čekající na vysílání MMPDU a blokové požadavky na vysílání ACK Request.

V síti s podporou QoS jsou datové pakety, u kterých se očekává vysílání, vkládány do vysílacích front odlišených pro každou kategorii přístupu. Dochází zde k rozlišování priority dat dle kategorie přístupu (viz Tab. 4). Pokud pakety nevyžadují potvrzení ACK, jsou z fronty odstraněny ihned po vyslání. V případě využití potvrzení ACK jsou pakety z fronty odstraněny až po odeslání všech fragmentů a doručení potvrzujícího ACK.

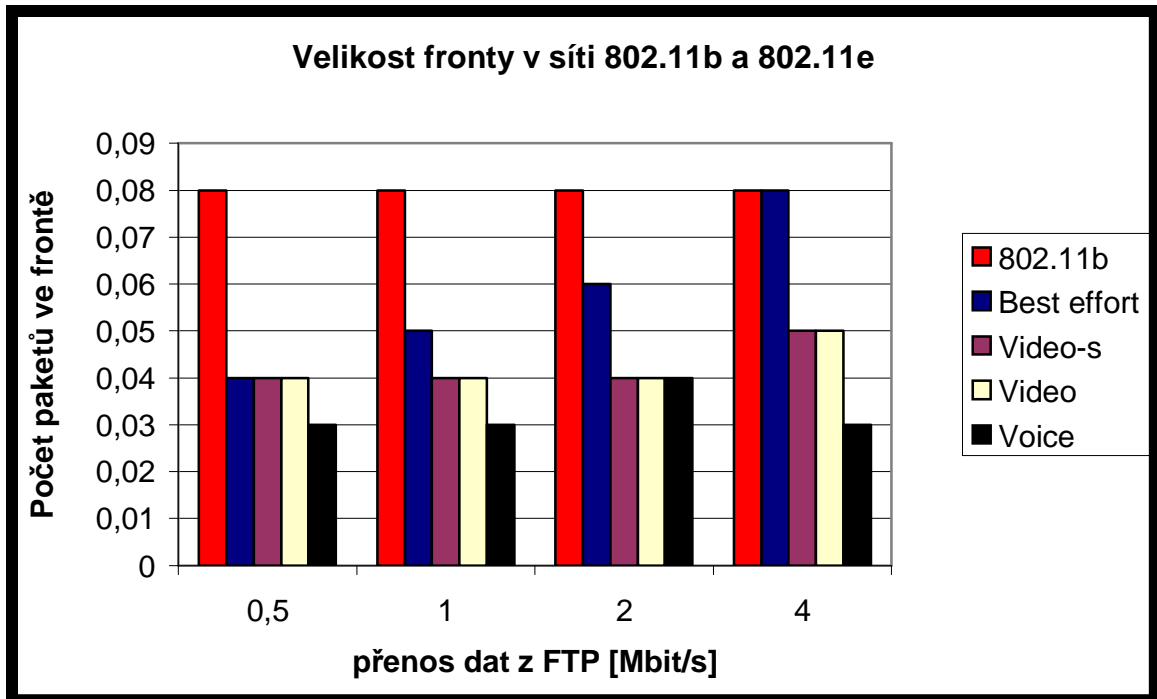
V síti s podporou QoS byly naměřeny nižší hodnoty paketů ve frontách, což lze hodnotit jako kladný jev. Lze sledovat např. u hlasu 3x nižší počet čekajících paketů ve vysílací frontě než v síti 802.11b, u video dat je rozdíl dvojnásobný ve prospěch sítě s podporou QoS.

Tab. 15: Počet paketů ve frontě dat v síti 802.11b

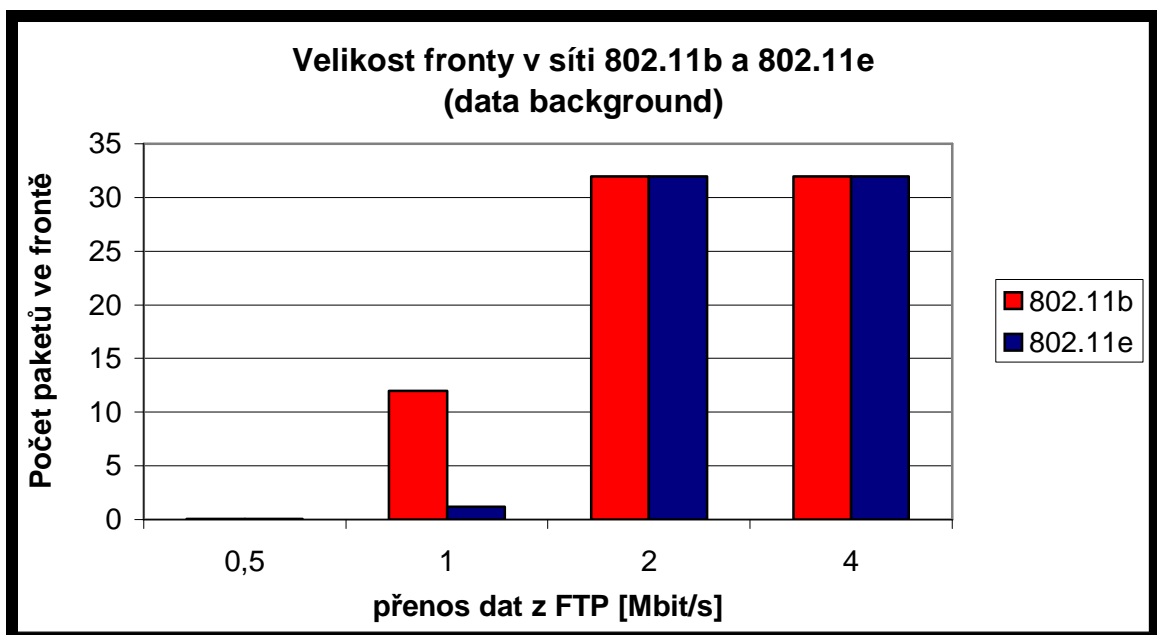
Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0,08	0,025	0,08	0,08	0,08
1	0,08	1,2	0,08	0,08	0,08
2	0,08	32	0,08	0,08	0,08
4	0,08	32	0,08	0,08	0,08

Tab. 16: Počet paketů ve frontě dat v síti 802.11e

Přenos dat z FTP [Mbit/s]	Best effort [kbit/s]	Background [kbit/s]	Video-s [kbit/s]	Video [kbit/s]	Voice [kbit/s]
0,5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
1	0,05	12	0,04	0,04	0,03
2	0,06	32	0,04	0,04	0,04
4	0,08	32	0,05	0,05	0,03



Obr. 26: Velikost fronty



Obr. 27: Velikost fronty pro background data

5.7 Srovnání sledovaných parametrů

Tab. 17: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 0,5 Mbit/s background dat.

Sledovaný parametr u přenosu hlasu	802.11b	802.11e	Parametr vykazuje lepší hodnotu v síti s podporou kvality služeb
Koncové zpoždění [s]	0,034	0,008	4,3x
Kolísání zpoždění [ms]	20	3	6,7x
Zahazování dat [kbit/s]	0	0	shodné
Chybovost	0,05	0,012	2,4x
Propustnost [kbit/s]	180	180	shodné
Velikost fronty [pakety]	0,08	0,03	2,7x

Tab. 18: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 2 Mbit/s background dat.

Sledovaný parametr u přenosu hlasu	802.11b	802.11e	Parametr vykazuje lepší hodnotu v síti s podporou kvality služeb
Koncové zpoždění [s]	1,360	0,007	194x
Kolísání zpoždění [ms]	60	4	15x
Zahazování dat [kbit/s]	3,4	2,3	1,5x
Chybovost	0,06	0,031	1,9x
Propustnost [kbit/s]	55	120	2,2x
Velikost fronty [pakety]	0,08	0,04	2x

Tab. 19: Srovnání sledovaných parametrů při přenosu hlasu u sítě bez podpory a s podporou kvality služeb simulovaných v prostředí programu OM při přenosu 4 Mbit/s background dat.

Sledovaný parametr u přenosu hlasu	802.11b	802.11e	Parametr vykazuje lepší hodnotu v síti s podporou kvality služeb
Koncové zpoždění [s]	1,8	0,008	225x
Kolísání zpoždění [ms]	90	4	22,5x
Zahazování dat [kbit/s]	3,8	2,2	1,7x
Chybovost	0,06	0,022	2,7x
Propustnost [kbit/s]	60	130	2,2x
Velikost fronty [pakety]	0,08	0,03	2,7x

6 Laboratorní úloha – Význam QoS v bezdrátových sítích 802.11

Tato laboratorní úloha se bude zabývat bezdrátovými sítěmi standardu 802.11 a výhodami využití kvality služeb v tomto standardu.

6.1 Úvod

Od roku 1999 narostl počet uživatelů připojených standardem IEEE 802.11 mnohonásobně. Nejznámějšími doplňky jsou 802.11b, jenž pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz a nabízí maximální přenosovou rychlost 11 Mbit/s. Další 2 nejvíce využívané standardy jsou 802.11g a 802.11a, jenž pracují v pásmu 5 GHz a využívají ke svému přenosu technologii OFDM, což jim dovoluje maximální přenosovou rychlost až 54 Mbit/s.

Žádný z těchto doplňků však neřeší podporu pro prioritní data, využívanou při přenosech streamovaného videa či hlasových službách. Při těchto přenosech je velký požadavek na nízké zpoždění a kolísání zpoždění.

V roce 2005 po letech příprav byl zveřejněn doplněk 802.11e, který již obsahuje podporu QoS a navíc je kompatibilní se všemi stávajícími doplňky. Tento standard rozděluje data do 4 kategorií s 8 třídami provozu. Stávající přístup k médiu PCF a DCF nahrazuje novými metodami s lepším využitím priority dat EDCF a HCF. Provoz v síti se tak stává záměrně neférový a jsou upřednostňována prioritní data.

Tab. 20: Mapování priority na kategorii přístupu

Kategorie přístupu	Priorita (0-7)	Určeno pro
0	0	best effort
1	1,2	Pozadí
2	3,4,5	Video
3	6,7	hlas

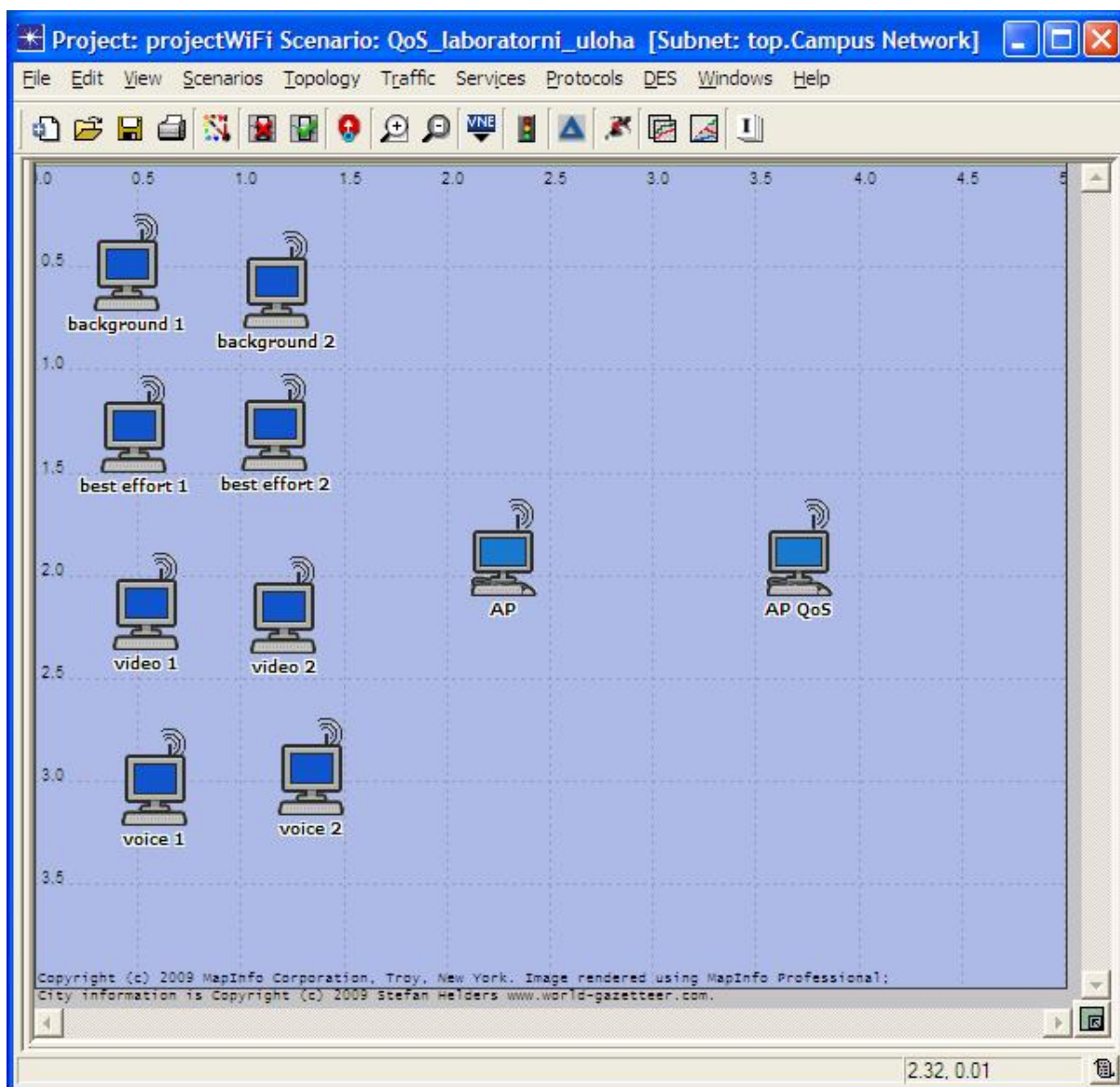
6.2 Vytvoření projektu

1. Spustíme simulační program Opnet Modeler.
2. Zvolíme položku *File > New* z nabídky možnost, že chceme vybrat nový projekt.

3. V tabulce *Enter Name* zadáme jméno projektu a jméno scénáře, např. jméno projektu *project_WiFi* a jméno scénáře *QoS* a označíme políčko použít průvodce (*Use Startup Wizard...*)
4. V dalším okně vybereme *Create empty scenario*, čímž dojde k vytvoření nového prázdného scénáře a klikneme na *Next*.
5. V dalším okně zvolíme rozlohu sítě *Campus* a opět klikneme na *Next*.
6. Hodnoty nastavíme na *5 km x 4 km* a klikneme na *Next*.
7. Nyní vybereme, jaké modely komponentů budou v síti využity. V našem projektu budeme využívat modely *wireless_lan* a *wireless_lan_adv*.
8. Úvodní nastavení dokončíme kliknutím na tlačítko *Finish*.

6.3 Vytvoření a konfigurace sítě

9. Otevřeme paletu objektů *Object Palette* a z ní přetáhneme na plochu osm stanic *wlan_station_adv* (*Mobile Node*) a dvakrát *wlan_wkst* (*Fixed Node*).
10. Stanice i přístupové body pojmenujeme dle následujícího obrázku pomocí pravého tlačítka myši a volby *Set Name*.



Obr. 28: Rozmístění stanic v projektu

11. Paletu objektů zavřeme, projekt uložíme.

6.4 Nastavení parametrů přístupových bodů

12. Klikneme pravým tlačítkem na AP a otevřeme nastavení *Edit Attributes*. Otevřeme záložku *Wireless LAN > Wireless LAN Parameters > Access Point Functionality* zvolíme *Enabled*, a hodnotu *BSS Identifier* nastavíme na 1.
13. Přiřazení *Access Point Functionality* provedeme i pro přístupový bod AP_QoS, hodnotu *BSS Identifier* nastavíme na 2.

14. U AP QoS dojde ještě k jedné změně, zapneme podporu QoS. To se provede v záložce *Wireless LAN > Wireless LAN Parameters > HCF Parameters > Default (QAP)*.
15. Projekt uložíme.

6.5 Nastavení atributů

Bezdrátové stanice budou vysílat mezi sebou data. Stanice Voice 1 bude komunikovat s Voice 2, Video 1 s Video 2, Background 1 s Background 2 a Best Effort 1 s Best Effort 2.

16. Všechny stanice kromě přístupových bodů označíme, otevřeme *Edit Attributes* pomocí pravého tlačítka myš klepnutí na jednu stanic. V záložce *Wireless LAN Parameters* provedeme tyto změny:
 - i. *HCF Parameters* nastavíme hodnotu na *Default*. Tím zapneme podporu kvality služeb u všech WLAN stanic
 - ii. *BSS Identifier* nastavíme na *1*
 - iii. *Roaming Capability* změníme na *Enabled*

Nastavení bude pokračovat, okno ještě nezavíráme.

6.6 Konfigurace generování provozu

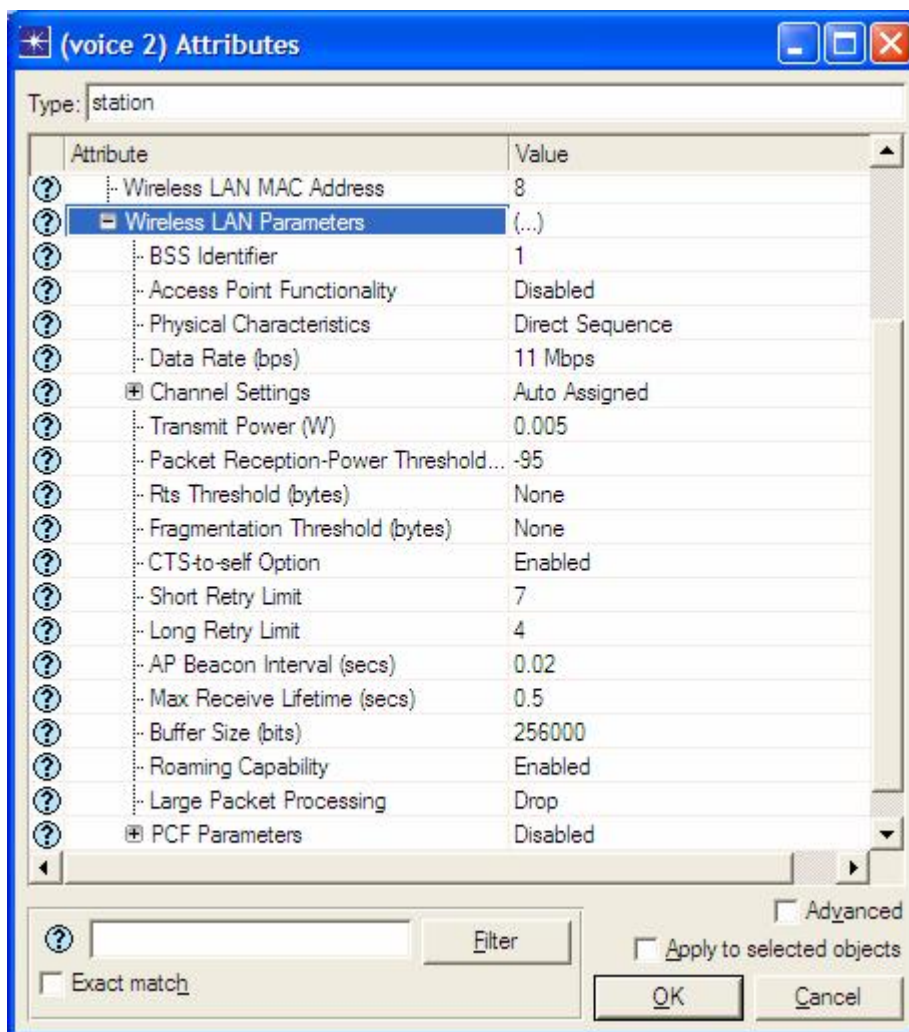
18. Nastavíme stanice aby generovaly provoz v síti. To provedeme v záložce *Traffic Generation Parameters*, kde se přes (...) dostaneme do nabídky, kde následně vybereme *Edit* a další nastavení se budou provádět již v nově otevřeném dialogovém okně.
19. Nakonfigurujeme provoz.
 - i. *Start Time (seconds): constant (2)* (vysílání začne v čase 2 sekundy)
 - ii. *ON State Time (seconds): constant (6000)* (budeme vysílat stejný provoz po dobu 10ti minut)
 - iii. *OFF State Time (seconds): constant (0.0)* (vysílání nebude přerušeno)

V záložce *Packet Generation Arguments* nastavíme tyto hodnoty:

- i. *Interval Time (seconds): Exponential (0.125)*
- ii. *Packet Size (bytes): uniform (1000,2000)*
- iii. *Segmentation Size (bytes): No Segmentation*
- iv. *Stop Time (seconds): Never*

Zatrhneme volbu *Apply to selected objects*, čímž zajistíme, že se námi zvolené nastavení objeví u všech osmi bezdrátových stanic.

Nyní klikneme na stanici background 2 a zde změníme *Interval Time (seconds): Constant (0.001)*. Tím zajistíme, že tato stanice bude generovat větší přenos dat a dojde ke zvýšení provozu v síti.



Obr. 29: Nastavení atributů bezdrátové stanice

20. Již jsme si nadeřinovali provoz, nyní bude potřeba určit, která stanice bude kam vysílat. To provedeme pomocí MAC adresy jednotlivých stanic. Pro jednoduchost jsou MAC adresy z rozsahu 1-8. Stanice si tedy spárujeme.
21. Nadeřinujeme kategorie provozu QoS na jednotlivých stanicích. V kontextovém menu stanice vybereme *Edit Attributes > Traffic Type of Service* a přiřadíme stanicím typ služby. Konfiguraci MAC adres, cílových adres a typu služby nastavte dle následující tabulky.

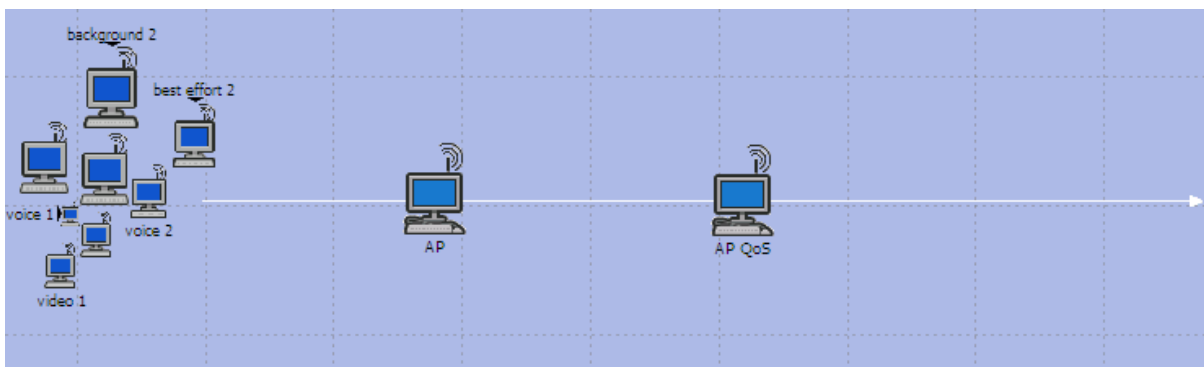
Tab. 21: Nastavení parametrů bezdrátových stanic

Sledovaný parametr u přenosu hlasu	Wireless LAN MAC Address	Destination Address	Traffic Type of Service
Best Effort 1	1	2	Best Effort (0)
Best Effort 2	2	1	Best Effort (0)
Background 1	3	4	Background (1)
Background 2	4	3	Background (1)
Video 1	5	6	Interactive Multimedia (5)
Video 2	6	5	Interactive Multimedia (5)
Voice 1	7	8	Interactive Voice (6)
Voice 2	8	7	Interactive Voice (6)

6.7 Konfigurace trajektorie

22. V naší síti se stanice budou pohybovat zleva doprava. Nejprve se připojí na přístupový bod AP podporující technologii 802.11b a poté se připojí na AP QoS, jenž umožňuje využití protokolu 802.11e. Nastavení trajektorie se provede takto: v menu *Topology* vybereme položku *Define Trajectory*. Trajektorii si pojmenujeme, např. *Stanice v pohybu* a pomocí tlačítka *Define Path* se otevře nastavení trajektorie. V novém okně v poli *Duration* zadáme hodnotu *360*, čímž definujeme, že stanice navolený úsek urazí za 6 minut. Stanovení začátku trajektorie se provede kliknutím myši na místo, kde bude start a kde cíl, viz obrázek. Další nastavení v okně trajektorie neměníme a kliknutím na tlačítko *Complete* dokončíme určení trajektorie.
23. Trajektorii máme již vytvořenou, nyní je potřeba ji přiřadit bezdrátovým stanicím. Pravým tlačítkem myši se dostaneme do nastavení stanice, vybereme *Edit Attributes >*

trajectory, z nabídky trajektorií zvolíme naši vytvořenou *stanice_v_pohybu* a potvrdíme *OK*.



Obr. 30: Trajektorie bezdrátových stanic kolem přístupových bodů

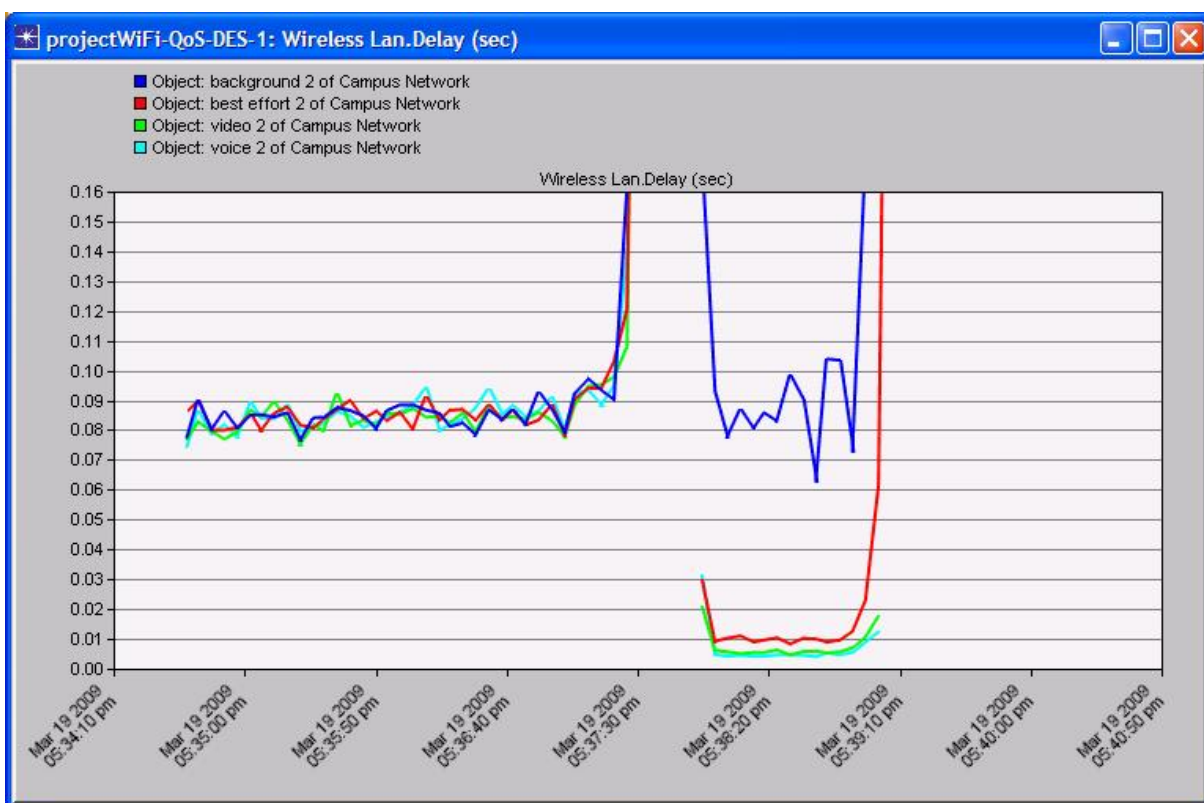
6.8 Spuštění simulace

24. Před spuštěním samotné simulace si nastavíme, které statistiky budeme sledovat. Pravým tlačítkem klikneme na plochu a zvolíme *Choose Individual DES Statistics*. Zde v záložce *Global Statistics* a *Node Statistics* zatrhneme políčka u položek *Wireless LAN* a *WLAN (Per HCF Access Category)*.
25. Spustíme konfiguraci simulace kliknutím na ikonu běžce, nebo z horního menu *DES - Configure / Run discrete even simulation...* Nastavíme dobu trvání simulace 7 minut a další hodnoty neměníme.
26. Tlačítkem *Run* spustíme simulaci.

6.9 Zobrazení výsledků

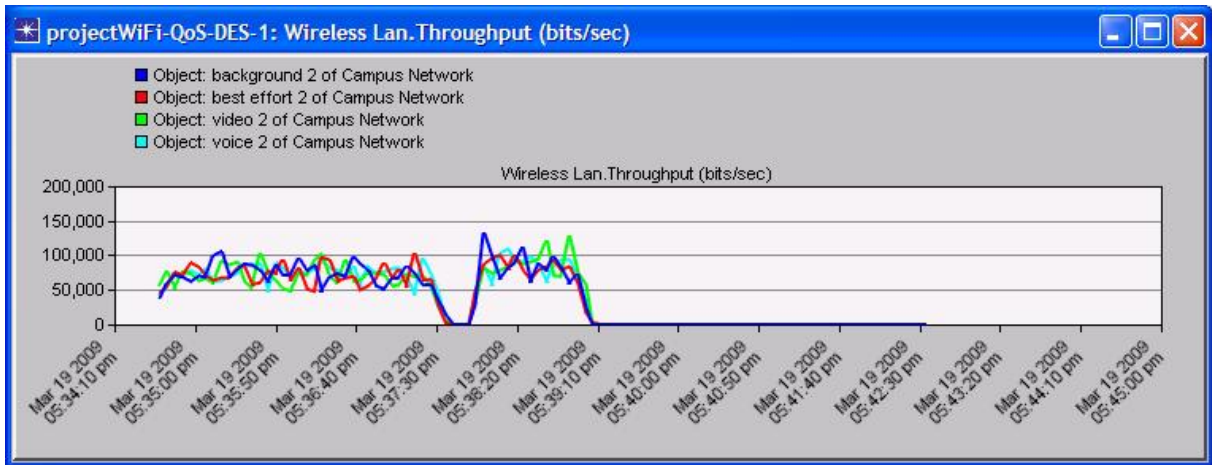
27. Po skončení simulace okno zavřeme kliknutím na *Close* a podíváme se na výsledky simulace provozu v síti kliknutím na tlačítko s grafy nebo na plochu pravým tlačítkem myši a vybráním položky *View Results*.
28. V nově otevřeném okně *Result Browser* zobrazíme pro stanice *background 2*, *video 2*, *voice 2* a *best effort 2* zpoždění (*Delay*), přepneme graf do *Overlaid Statistics*, čímž získáme všechny charakteristiky v jednom grafu a kliknutím na tlačítko *Show*.
29. Po přiblížení hodnot zpoždění v novém okně můžeme pozorovat účinek QoS. V první polovině grafu byly stanice připojeny k AP bez podpory QoS a zpoždění kolísá pro

všechny kategorie provozu shodně a data jsou odbavovány jako best effort. Druhá polovina grafu znázorňuje stav, kdy byly stanice připojeny k přístupovému bodu s podporou kvality služeb. Dle předpokladů je zpoždění hlasu nejnižší a je upřednostněno před přenosem neprioritních dat. V zobrazeném grafu mají hlasová i video data 10x nižší hodnotu zpoždění než v síti bez QoS, navíc je minimalizováno kolísání zpoždění.



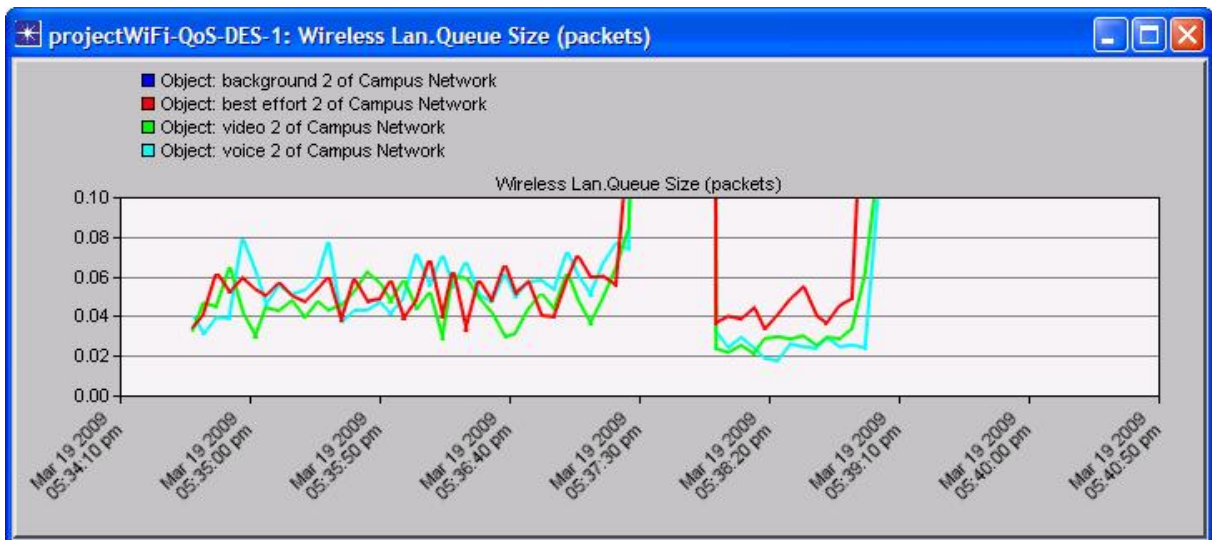
Obr. 31: Koncové zpoždění u prioritních dat

30. Graf propustnosti (Throughput) si zobrazíme opět pro stanice background 2, video 2, voice 2 a best effort 2. Můžeme pozorovat že po připojení na přístupový bod s podporou QoS došlo k mírnému zvýšení propustnosti.



Obr. 32: Porovnání propustnosti

31. Nejdůležitějšími parametry pro QoS v 802.11 při přenosu prioritních dat je nízké zpoždění a malé kolísání zpoždění, můžeme si ale ukázat, že i ostatní sledované parametry vykazují lepší hodnoty než v síti s 802.11b. Zobrazíme pro stanice background 2, video 2, voice 2 a best effort 2 velikost paketů čekajících ve frontě (Queue Size). Z grafu je patrné rychlejší odbavování prioritních dat v síti s podporou QoS.



Obr. 33: Velikost fronty

7 Závěr

Diplomová práce se skládá ze tří částí. V první části nalezneme informace o bezdrátových sítích standardu 802.11, používaných technikách přenosu a způsobech zajištění kvality služeb (QoS).

Druhá část se zabývá praktickým ověřením poznatků z teoretické části. K tomu byl použit simulační nástroj Opnet Modeler. V programu byl vytvořen projekt obsahující bezdrátové sítě standardů 802.11b a 802.11e. V síti byl generován provoz různých aplikací. Bylo zjištěno, že síť bez podpory QoS přenášená data nijak nerozlišuje a s veškerým provozem zachází stejně. Hodnoty zpoždění a kolísání zpoždění v této síti značně překračují povolené limity dané pro provoz hlasových a video aplikací.

Pokud je v síti využit standard 802.11e, je situace odlišná. U všech sledovaných parametrů (zpoždění, kolísání zpoždění, propustnost, chybovost, počet paketů ve frontě a zahazování dat) byly naměřeny shodné nebo lepší hodnoty ve prospěch této sítě. Nový mechanismus EDCF třídí přenášená data do 4 kategorií – best effort, background, video a hlas. Prioritní data jsou v síti odbavována přednostně. Mechanismus pracuje velmi efektivně a pro služby, které jsou citlivé na zpoždění a kolísání zpoždění, zajistí hladký průchod sítí. Data neprioritní, necitlivá na zpoždění, jsou cíleně znevýhodněna. Provoz multimediálních služeb, zejména přenos videa a provoz IP telefonie je v této síti bezproblémový, a to i při velmi vysokém zatížení sítě. Byla také ověřena zpětná kooperace se staršími zařízeními. Pokud je v síti zařízení, které nemá implementovanou podporu QoS, využije se pro přenos dat s tímto zařízením mechanismus DCF a všechna data jsou přenášena jako „best effort“.

Třetí část práce obsahuje laboratorní úlohu pro OM s podrobným návodem na sestavení bezdrátových sítí 802.11b a 802.11e. Časová náročnost splnění této laboratorní úlohy je cca 1,5 hod.

8 Použitá literatura

- [1] PRASAD, A. PRASAD, N. 2005, *Wlans And Ip Networking, Security Qos And Mobility*
- [2] HUSSAIN, K. and ZIA, M. and KHAN, M.T. *Dynamic Contention Window for Quality of Service in IEEE 802.11 Networks*. Punjab University College of Information Technology, Lahore 2006.
- [3] PRAVDA, I. *Přehled doplňků standardu IEEE 802.11*, [online] 2005, Dostupný z: <<http://access.feld.cvut.cz>>
- [4] VÁVRA, S. *Trendy ve standardizaci a používání sítí WLAN*, [online] 2006, Dostupný z: <<http://access.feld.cvut.cz>>
- [5] PUŽMANOVÁ, R. *Schválena specifikace pro hlas do WiFi* [online] Dostupný z: <<http://www.lupa.cz/clanky/schvalena-specifikace-pro-hlas-do-wifi>>
- [6] IEEE COMPUTER SOCIETY, *802.11e IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*. IEEE, New York 2005
- [7] KOCOUR, Z., Šafránek, M. , *Fyzická vrstva WiFi*, 2008, [online] Dostupný z: <<http://access.feld.cvut.cz>>
- [8] STEJSKAL, P., M. *Bezdrátové sítě WiFi*, 2003
- [9] GEIER, J. *802.11 MAC Layer Defined*, 2001, [online] Dostupný z: <<http://www.wifiplanet.com/tutorials/article.php/1216351>>
- [10] PUŽMANOVÁ, R. *Kvalita služby ve WLAN: 802.11e* [online] ISSN 1213-1539 Dostupný z: <<http://www.lupa.cz/clanky/kvalita-sluzby-ve-wlan-802-11e/>>
- [11] KOVÁŘ P., MOLNÁR K., NOVOTNÝ V. *Současnost a budoucnost VoIP sítí*, Brno, Elektorevue [online] Dostupný z < <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/soucasnost-a-budoucnost-voip-siti/>>
- [12] MOLNÁR K., ZEMAN O., SKOŘEPA M. *Moderní síťové technologie – laboratorní cvičení* , VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky, Ústav telekomunikací, 2008
- [13] KAMAN Š. *Analýza parametrů sítě standardu 802.11 s podporou a bez podpory kvality služeb v prostředí OPNET*, VUT v Brně, Ústav telekomunikací, 2007
- [14] BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace dokumentu podle CSN ISO 690 a CSN ISO 690-2: Verze 3.3.c 1999–2004*, poslední aktualizace 11.11.2004. Dostupný z: <<http://www.boldis.cz/citace/citace1.pdf>>.
- [15] OPNET TECHNOLOGIES, *OPNET Modeler Product Documetation Release 14.5*, součást instalace simulačního prostředí OPNET Modeler

- [16] OPNET TECHNOLOGIES, *OPNET Modeler 14.5 General Tutorials*, součást instalace simulačního prostředí OPNET Modeler
- [17] ŠILHAVÝ P., KAPOUN V., FIALA V. *Telekomunikační a informační systémy*, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky, Ústav telekomunikací, 2009

Seznam použitých zkratk a symbolů

ACK	Potvrzení (Acknowledgement)
AIFS	Mezirámcová mezera
AP	Přístupový bod (Access Point)
Backoff	Odložené vysílání
BER	Chybovost (Bit Error Rate)
BSS	Síť s přístupovým bodem (Basic Service Set)
CA	Předcházení kolizím (Collision Avoidance)
CDF	Distribuční funkce (Complementary Cumulative Distribution Function)
CFP	Doba bez soutěžení (Contention Free Period)
CF-Poll	Soutěžení o médium
CF-End	Konec soutěžení o médium
CP	Doba soutěžení o médium (Contention Period)
CSMA	Metoda náhodného přístupu (Carrier Sense Multiple Access)
CW	Okno sváru (Contention Window)
CW _{max}	Maximální okénko sváru (Contention Window Maximum)
CW _{min}	Minimální okénko sváru (Contention Window Minimum)
DCF	Distribuční koordinační funkce (Distributed Coordination Function)
EDCF	Rozšířená DCF (Enhanced DCF)
ESS	Síť obsahující 2 a více BSS (Extended Service Set)
HC	Hybridní koordinátor (Hybrid Coordinator)
HCF	Hybridní koordinační funkce (HC Function)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Bezlicenční pásmo (Industrial, Science, Medical)
LAN	Lokální síť (Local Area Network)
MAC	Řízení přístupu k médium (Medium Access Control)
MSDU	Servisní datová MAC jednotka (MAC Service Data Unit)
OM	Opnet Modeler
PC	Koordinátor funkce PCF (Point Coordinator)

PCF	Koordinační funkce (Point Coordination function)
PHY	Fyzická vrstva (Physical Layer)
PIFS	Mezirámcová mezera PIFS (PCF Inter Frame Space)
PSTN	Veřejná telefonní síť (Public Switched Telephone Network)
QoS	Kvalita služeb (Quality of Service)
RTS/CTS	Metoda žádání o vysílání (Request to Send/Clear to Send)
SIFS	Mezirámcová mezera (Short Inter Frame Space)
Station	Stanice, počítač
TC	Kategorie přístupu (Traffic Category)
TXOP	Možnost vysílání (Transmission Opportunity)
VoIP	Přenos hlasu přes IP protokol (Voice Over IP)
VoWLAN	Přenos hlasu přes bezdrátovou síť
WLAN	Síť složená z bezdrátových stanic (Wireless LAN)

Seznam příloh

- [1] Navržená bezdrátová síť, na které probíhaly simulace. Vytvořeno ve verzi Opnet Modeler 14.5. Pro spuštění slouží soubor *ProjectWifiQoS1.pri*. Projekt obsahuje 2 scénáře. První scénář *scenarQoS1* podporuje kvalitu služeb, druhý scénář *scenarNO_QoS* nikoliv. Projekt je umístěn na CD ve složce OPNET MODELER.