

Vysoká škola ekonomická v Praze

Fakulta informatiky a statistiky

Katedra informačních technologií

Studijní program: Aplikovaná informatika

Obor: Informační systémy a technologie

VoIP v bezdrátové síti VŠE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Student : Bc. Lukáš Švarc

Vedoucí : Ing. Luboš Pavlíček

Oponent : Ing. Miroslav Matuška, Ph.D.

2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu, ze které jsem čerpal.

V Praze dne 22. dubna 2016

.....
Bc. Lukáš Švarc

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Luboši Pavlíčkovi za metodické vedení při zpracování závěrečné práce a za jeho cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu Oddělení síťové infrastruktury Tomáši Skřivanovi za poskytnutí potřebného technického vybavení.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je ověření možnosti provozu VoIP v bezdrátové síti Vysoké školy ekonomické v Praze v dostatečné kvalitě. V práci jsou popsány základní principy VoIP a související technologie bezdrátových sítí nutných pro kvalitní a stabilní provoz. Následně jsou v laboratorním prostředí v nevytíženém i uměle plně vytíženém pásmu otestovány a porovnány jednotlivé konfigurace bezdrátové sítě i koncových klientů a jejich vliv na běžné uživatele. Nakonec je otestován provoz v reálném prostředí ve Staré budově na Žižkově při roamingu a využití několika pokročilých standardů 802.11. V závěru práce je doporučeno ideální nastavení všech telekomunikačních prvků s cílem maximální kvality VoIP provozu a minimalizace negativního dopadu na běžné uživatele.

Klíčová slova

VoIP, VoWLAN, bezdrátová síť, IEEE 802.11, roaming

Abstract

The diploma thesis is focused on exploring the possibility of VoIP service in a wireless network of University of Economics, Prague. This thesis describes the basic principles of VoIP and related wireless technologies necessary for its quality and stable operation. Subsequently, different configurations of wireless network and end clients are tested and compared, including its impact on ordinary users, in a laboratory environment with idle and fully utilized frequency band. Finally, a roaming operation with the use of several advanced 802.11 standards is tested in the real environment of the Old building in Žižkov. In conclusion, the ideal settings for all telecommunication devices are recommended in order to maximize the quality of VoIP operation and to minimize the negative impact on ordinary users.

Keywords

VoIP, VoWLAN, wireless network, IEEE 802.11, roaming

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Vymezení tématu a důvod výběru práce	8
1.2	Výchozí stav	8
1.3	Cíle práce a způsob jejich dosažení	8
1.4	Očekávané přínosy	9
1.5	Komu je práce určena	9
1.6	Předpoklady a omezení práce	9
2	Rešerše prací na zvolené téma	10
2.1	Česky psané texty	10
2.2	Anglicky psané texty	11
3	Voice over Internet Protocol	13
3.1	Session Initiation Protocol	14
3.1.1	Komponenty SIP	15
3.1.2	Metody a odpovědi protokolu SIP	16
3.1.3	Průběh VoIP hovoru protokolem SIP	17
3.2	Přenos hlasu	18
3.2.1	Digitalizace hlasu	18
3.2.2	Kodeky	18
3.2.3	Real-time Transport Protocol	19
3.2.4	Real-time Transport Control Protocol	20
3.3	Měření kvality hovoru	20
4	Bezdrátová síť	22
4.1	Pokrytí	23
4.1.1	Frekvenční pásma	23
4.1.2	Šíření signálu	25
4.2	Zabezpečení	26
4.3	Mobilita	27
4.4	Kvalita služby	28
4.4.1	Přístup k médiu DCF	29
4.4.2	Přístup k médiu HCF	30
4.4.3	WMM	31
5	Zařízení s podporou VoWLAN	32

5.1	Podnikové VoWLAN telefony	32
5.2	Wi-Fi mobilní telefony	33
5.3	Mobilní telefony	33
5.3.1	Mobilní aplikace	33
6	Technické vybavení VŠE	35
6.1	Bezdrátová síť	36
6.2	Telefonní ústředna	37
6.3	Zabezpečení	37
6.4	Modely nasazení VoIP v bezdrátové síti	38
7	Testování	39
7.1	Laboratoř	40
7.2	Konfigurace softwaru	44
7.3	Kvalita hovoru v laboratorním prostředí	49
7.3.1	Výchozí nastavení	50
7.3.2	Detekce hovorů na řadiči	53
7.3.3	Použití technologie WMM	57
7.4	Kvalita hovoru rozdílného hardwarového a softwarového vybavení	60
7.4.1	Kodeky G.711, G.722 a G.729	60
7.4.2	Různá zařízení	65
7.4.3	SIP a Skype	69
7.5	Kvalita hovoru při roamingu	72
7.5.1	Výchozí nastavení	73
7.5.2	Standardy 802.11k a 802.11v	75
7.5.3	Standard 802.11r	76
7.5.4	Standardy 802.11k, 802.11v a 802.11r	77
8	Závěr	80
9	Terminologický slovník	82
10	Zdroje	84
10.1	Seznam literatury	84
10.2	Seznam obrázků	88
10.3	Seznam tabulek	89

1 Úvod

1.1 Vymezení tématu a důvod výběru práce

VoIP¹ v bezdrátové síti kombinuje dvě poměrně komplexní technologie, které při správném nastavení mohou koncovým uživatelům přinést řadu benefitů. Tato služba má potenciál nahradit pevné kancelářské telefony a přenést jejich funkcionalitu, jako je například vnitřní volání, předání hovoru nebo skupinové vyzvánění na Wi-Fi VoIP přístroje nebo dokonce na mobilní telefony uživatelů.

V telekomunikační síti Vysoké školy ekonomické v Praze (dále jen VŠE) není tato služba poskytována a nebyla ještě ani testována. S ohledem na dodání nového bezdrátové řešení s rozšířenou podporou VoIP a nové telefonní ústředny nastal ideální okamžik VoWLAN² otestovat.

1.2 Výchozí stav

V současné době se na VŠE používá kombinace analogových, systémových a VoIP telefonů a ústředen. K VoIP ústředně se lze připojit pouze IP telefony dodavatele, případně pomocí SIP převodníků. Připojení externích zařízení, včetně bezdrátových, není na ústředně nakonfigurováno. Dosud využívané bezdrátové řešení od společnosti H3C služby potřebné k provozu VoIP poskytuje, nicméně nenabízí pokročilé funkcionality pro jeho podporu.

V listopadu a prosince 2015 byl na VŠE dodán nový bezdrátový radič Aruba a telefonní ústředna Siemens.

1.3 Cíle práce a způsob jejich dosažení

Cílem této diplomové práce je navrhnout nejlepší nastavení bezdrátové sítě VŠE a koncových klientů pro spolehlivý a kvalitní provoz VoWLAN. V práci navrhuji různé varianty konfigurací jednotlivých prvků telekomunikační sítě, které následně v laboratorním i reálném prostředí testuji. Dále porovnávám různé typy koncových zařízení, které je možné se službou využívat. Nakonec srovnávám kvalitu hovoru s jednou z nejrozšířenějších aplikací pro internetové volání.

¹ Voice over Internet Protocol

² Voice over Wireless Local Area Network

1.4 Očekávané přínosy

Přínosem praktické části je především odpověď na otázku, jestli provoz VoIP v bezdrátové v síti VŠE může fungovat spolehlivě a v dostatečně vysoké kvalitě, a jestli má vzhledem ke svým nárokům na konfiguraci a funkcionalitu prvků telekomunikační sítě smysl. Pokud ano, bude hlavním přínosem ideální nastavení jednotlivých prvků bezdrátové sítě pro kvalitní poskytování služby v produkčním prostředí a doporučení nejlepších koncových zařízení a kodeků. Výsledky testování pak mohou posloužit jako důležitý podklad pro návrhy různých modelů nasazení služby.

1.5 Komu je práce určena

Práce je určena především správcům rozsáhlých počítačových sítí, případně těm, kteří se podílejí na chodu IT a rozhodují o investicích do nových technologií. Praktická část práce může posloužit jako cenný zdroj informací a doporučení pro nasazení této služby na jiných vysokých školách nebo v korporátním prostředí.

1.6 Předpoklady a omezení práce

V práci se věnuji specifickému prostředí Vysoké školy ekonomické v Praze. U jiných veřejných institucí nebo v soukromém sektoru mohou být odlišné podmínky a předpoklady, na které je třeba při zavádění služby brát zřetel.

2 Rešerše prací na zvolené téma

Při vyhledávání bakalářských, diplomových i jiných prací na podobné téma jsem pracoval s několika různými zdroji. Práce zpracované na VŠE jsem hledal v modulu závěrečných prací v integrovaném studijním informačním systému školy³. Práce zpracované na jiných českých vysokých školách jsem vyhledával v databázi vysokoškolských kvalifikačních prací⁴.

Zahraniční akademické práce jsem hledal v databázích ACM Digital Library⁵, Google Scholar⁶ a ProQuest Central⁷.

2.1 Česky psané texty

Na VŠE se na téma VoWLAN zatím nikdo ve své závěrečné práci nezaměřoval. Problematice VoIP nebo bezdrátových podnikových sítí samostatně se věnovalo několik prací.

Závěrečná práce Lukáše Holásky [1] z roku 2015 se zaměřuje na technické a ekonomické přínosy nasazení VoIP technologie a popisuje přínosy a rizika přechodu na ni. V teoretické části popisuje vývoj telefonních systémů a komponenty VoIP, v praktické části se pak věnuje ekonomické kalkulaci a nasazení VoIP řešení do středně velkého podniku.

Závěrečná práce Jana Černého [2] z roku 2011 je zaměřena více technicky, i když nechybí ani cenová kalkulace. V teoretické části své práce velmi podrobně popisuje jednotlivé součásti VoIP technologie, od digitalizace hlasu, přes signalizační protokoly až po popis jednotlivých typů hlasové komunikace. V praktické části pak navrhuje možná řešení zavedení technologie na úřad městské části Praha – Zbraslav.

Závěrečná práce Lukáše Hanouska [3] z roku 2009 se věnuje nasazení open-source aplikace Asterisk, která implementuje telefonní ústřednu. V teoretické části práce autor popisuje základní komponenty VoIP technologie a podrobně zkoumá možnosti aplikace Asterisk. V praktické části se pak zabývá modelovou instalací a konfigurací této aplikace pro střední podnik s přibližně 200 vnitřními linkami.

Moje vlastní bakalářská práce [4] z roku 2013 se věnuje optimalizaci bezdrátové sítě VŠE a detailně popisuje její funkcionalitu. V teoretické části jsem podrobně popsal jednotlivé komponenty bezdrátových sítí a v praktické části řešil konkrétní problémy. Bezdrátové aspekty mé diplomové práce

³ isis.vse.cz

⁴ theses.cz

⁵ dl.acm.org

⁶ scholar.google.com

⁷ proquest.com

tedy částečně čerpají z mé bakalářské práce a jsou založeny na zkušenostech, které jsem při jejím zpracovávání získal.

Závěrečná práce Tomáše Kaliny [5] z roku 2013 se věnuje problematice QoS⁸. V teoretické části autor detailně popisuje principy fungování. V praktické části se pak věnuje prostředí VŠE, hloubkové analýze a nasazení QoS. Tato práce je tedy cenným zdrojem informací nutných pro bezchybné fungování VoIP v bezdrátové síti, neboť technologie QoS v něm hraje velmi důležitou roli.

Závěrečná práce Jakuba Konečného [6] z Mendelovy univerzity v Brně z roku 2015 je jediná česky psaná práce, kterou jsem našel, věnovaná problematice VoWLAN. Práce se zaměřuje na optimalizaci univerzitní bezdrátové sítě pro provoz hlasových služeb. V teoretické části autor popisuje standardy 802.11 a nástroje pro site survey a testování VoIP. Dále velmi podrobně popisuje metody pro vyhodnocování uživatelské spokojenosti QoE⁹ a MOS¹⁰. V praktické části se pak věnuje měření kvality VoIP pomocí nástroje StarTrinity SIP Tester a vyhodnocování MOS. V závěru autor doporučuje změny, které se však týkají jen umístění a množství přístupových bodů, nikoliv nastavení bezdrátové sítě nebo VoIP technologie. Návrhy byly pouze v teoretické rovině, neboť autor žádnou ze změn neimplementoval ani netestoval.

Při zpracování teoretických poznatků jsem uváděl české termíny z knih Cisco VoIP: Autorizovaný výukový průvodce [7] a Bezdrátové sítě Cisco: Autorizovaný výukový průvodce [8].

2.2 Anglicky psané texty

Odborných textů v anglickém jazyce věnujících se problematice VoWLAN je, na rozdíl od českého jazyka, poměrně hodně. Zajímavým poznatkem je fakt, že mnoho z nich bylo vytvořeno mezi lety 2005 a 2008, tedy těsně po uvedení standardu pro podporu QoS v bezdrátových sítích 802.11e. V následujících letech se technologie dále vyvíjela a došlo k velkému pokroku, především díky uvedení několika důležitých 802.11 standardů. Přestože se teoretický základ příliš nezměnil, zaměřoval jsem se spíše na novější odborné práce.

Práce Chukwudiho a Ikechukwi [9] z Blekinge Institute of Technology ve Švédsku se věnuje zavedení VoWLAN v produkčním prostředí. Autoři detailně popisují VoIP a bezdrátové technologie a protokoly. Dále se pak věnují požadavkům pro stabilní fungování této služby a různým modelům nasazení.

⁸ Quality of Service

⁹ Quality of Experience

¹⁰ Mean Opinion Score

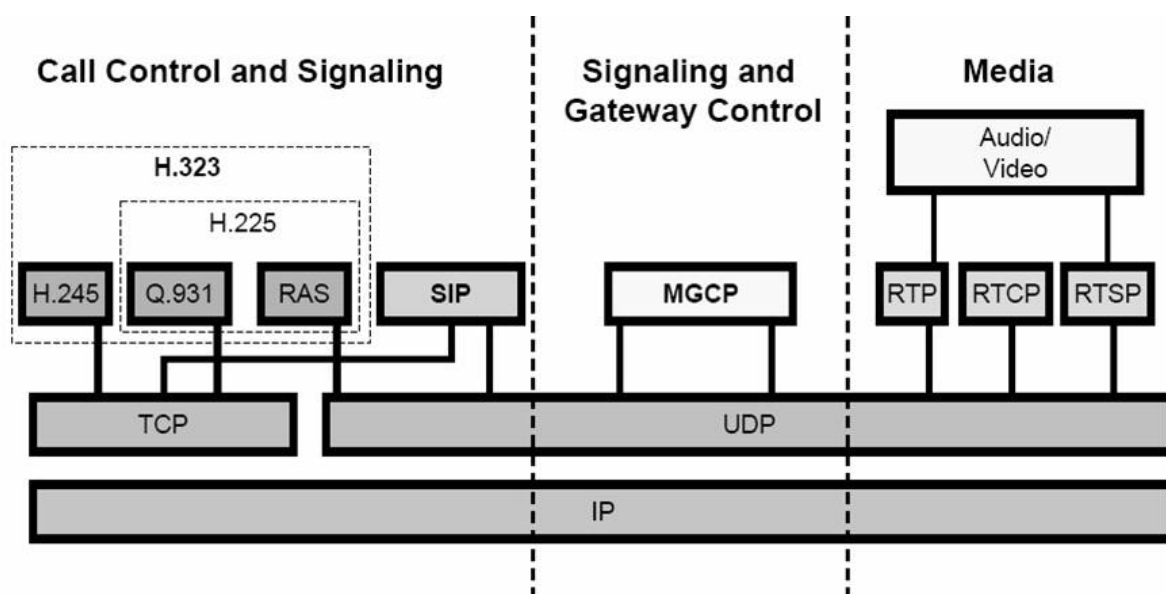
Práce Pallea, Mantoora a Anthama [10] z Halmstad University ve Švédsku se zaměřuje na testování kvality VoWLAN s použitím aplikace na mobilním telefonu a vlivu kodeků na kvalitu zvuku, spotřebu procesoru a bezdrátového čipu mobilního telefonu. V práci také testují funkcionalitu přímého spojení dvou klientů bez využití infrastrukturní bezdrátové sítě.

Profesor Radhika z university v Indickém Koimbaturu se ve svém článku [11] věnuje testování různých VoIP kodeků v 2,4 GHz a 5 GHz frekvenčních pásmech při různém nastavení QoS. Předpokládá, že přestože se jedná o službu náročnou na implementaci, budou se VoWLAN řešení více nasazovat a související technologie nadále rozvíjet.

Při zpracování teoretických poznatků z oblasti bezdrátových sítí jsem čerpal především z knihy 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide [12] od Matthewa Gasta. Věnoval jsem se i materiálům souvisejícím s IEEE 802.11 a VoIP standardy. Dále jsem kladl důraz na návody a doporučení dodavatelů síťových řešení Aruba Networks a Cisco Systems a telefonních ústředen Siemens.

3 Voice over Internet Protocol

Voice over Internet Protocol je technologie, umožňující přenos digitalizovaného hlasu v těle paketů rodiny protokolů UDP/TCP/IP prostřednictvím počítačové sítě nebo jiného média, prostupného pro protokol IP. Využívá se pro telefonování prostřednictvím Internetu, intranetu nebo jakéhokoliv jiného datového spojení [13]. Na rozdíl od například bezdrátové sítě jej nespravuje jedna organizace a není řízena jednou skupinou standardů. Označení VoIP sdružuje celou řadu proprietárních i otevřených protokolů, které jsou vzájemně provázány a společně zajišťují provoz VoIP služby.



Obrázek 1 - Protokoly VoIP (zdroj: [14])

Na obrázku 1 lze vidět, že mezi signalizační protokoly a kontrolu hovoru (Call Control and Signaling) patří skupina protokolů H.323, včetně podskupiny H.225, které zaštiťuje agentura ITU-T¹¹ a protokol SIP¹² spravovaný organizací IETF¹³. Protokol MGCP¹⁴ je popsán v RFC 2805 a představuje další možnost signalizace a kontroly brány (Signaling and Gateway Control). K samotnému přenosu hlasových paketů se používá transportní protokol RTP¹⁵, který byl poprvé publikován organizací IETF v RFC 1889 v roce 1996. V roce 2003 byl protokol RTP doplněn o kontrolní protokol RTCP¹⁶ v RFC 3550. Protokol RTSP¹⁷ slouží především k přenosu živého videa. Nejčastěji využívaný kodek k přenosu hlasu, G.711, byl vydán již v roce 1972 agenturou ITU-T.

¹¹ International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector

¹² Session Initiation Protocol

¹³ Internet Engineering Task Force

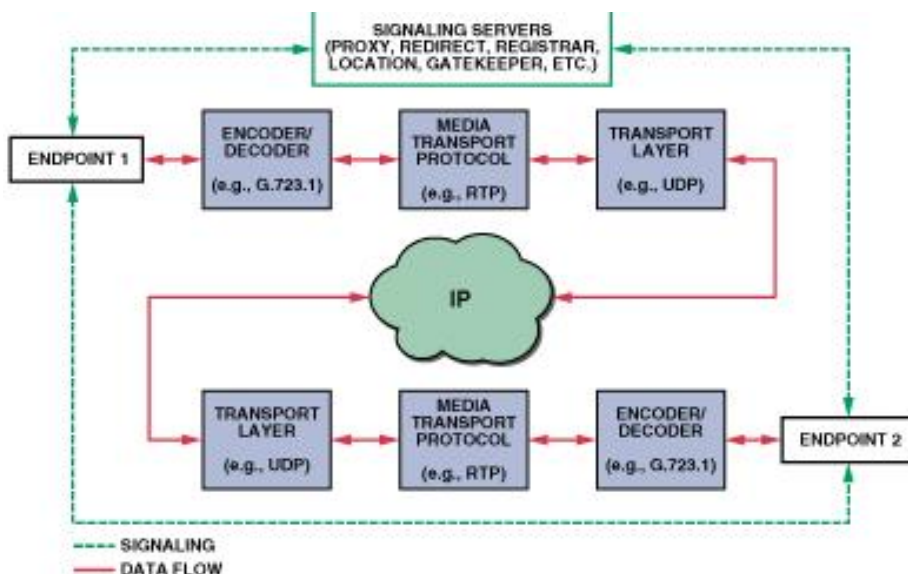
¹⁴ Media Gateway Control Protocol

¹⁵ Real-time Transport Protocol

¹⁶ RTP Control Protocol

¹⁷ Real Time Streaming Protocol

V současné době se pro provoz VoIP nejčastěji využívá kombinace signalizačního protokolu SIP, transportního protokolu RTP s kontrolním protokolem RTCP a kodeku G.711. Všechny tyto komponenty jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.



Obrázek 2 - Průběh zpracování VoIP hovoru (zdroj: [15])

Průběh zpracování VoIP hovoru lze sledovat na obrázku 2. Pomocí signalizačního protokolu SIP se naváže spojení mezi dvěma koncovými body – klienty, případně mezi servery jejich VoIP poskytovatelů. Poté enkodér v klientovi zakučuje hlas a s použitím transportního protokolu RTP vytvoří na transportní vrstvě UDP datový IP paket. Pomocí IP sítě se paket dopraví k cílovému klientovi, kde se rozbalí a dekučuje. Celý tento proces by měl probíhat do zpoždění 130ms, jitteru 30ms a ztrátovosti paketů 1%, což je podrobněji popsáno v kapitole věnované bezdrátovému QoS, respektive WMM¹⁸.

3.1 Session Initiation Protocol

Protokol SIP¹⁹ je signalizačním protokolem pro sestavení, modifikaci a ukončení relací, za jehož vznikem stojí organizace IETF. Vznikl jako náhrada starší a složitější skupiny protokolů H.323. Komunikace probíhá textově a vychází z protokolu HTTP. Díky své otevřenosti a flexibilitě je podporován naprostou většinou současných VoIP zařízení a stal se nejpoužívanějším signalizačním protokolem. Protokol SIP tedy slouží především k navázání spojení, přičemž překládá uživatelská jména na síťové adresy a umožňuje dohodnout podporované mediální schopnosti účastníků. SIP také disponuje mechanismy na správu hovorů, a to například přidání, odebrání nebo přesunutí účastníků.

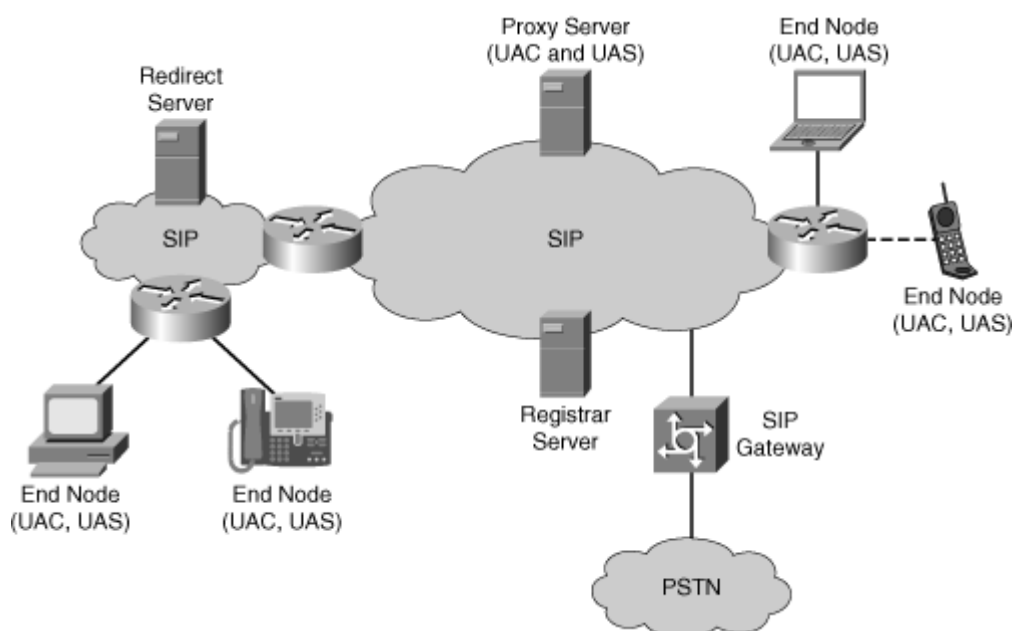
¹⁸ Wi-Fi Multimedia

¹⁹ Session Initiation Protocol

3.1.1 Komponenty SIP

Účastníci SIP relací uskutečňující hovor, se nazývají uživatelští agenti (UA) a mohou pracovat ve dvou rovnocenných režimech. Klientský uživatelský agent (UAC), který vytváří žádosti a zasílá je serveru a serverový uživatelský agent (UAS), který žádosti přijímá, zpracovává a vytváří odpovědi.

UAC i UAS představují koncové klienty, tedy aplikace běžící na systémech uživatelských zařízení, jako jsou VoIP telefony nebo aplikace v počítačích či mobilních telefonech. Pokud chce uživatel zavolat, UAC vytvoří požadavek a zašle ho směrem k UAS. Většinou však jednotliví UA neznají přesnou adresu protistrany, a tak požadavky směřují k proxy serveru. Pokud cílový klient nepoužívá technologii VoIP, ale například analogový či systémový telefon, směřují se SIP požadavky směrem k bráně (SIP Gateway), která v takovém případě může fungovat jak UAC, tak UAS.



Obrázek 3 - Komponenty SIP (zdroj: [16])

Jednotlivé komponenty jsou zobrazeny v obrázku 3.

Server proxy je nejčastěji využívaným typem serveru v SIP prostředí. Klient při vytváření žádosti většinou nezná přesnou adresu příjemce, a tak zašle svůj požadavek známému proxy serveru, který pak takový požadavek přepoše cílovému uživatelskému agentovi, případně jinému proxy serveru.

Server přesměrování (Redirect) přesměrovává žádosti klientů zpět v případě, kdy se cílový příjemce dočasně nebo trvale ze své původní pozice přemístil. Informuje tedy klientského uživatelského agenta o jiném serveru, ke kterému mají svoji žádost směřovat.

Registrační server (Registrar) sleduje umístění jednotlivých uživatelů v síti. Každý uživatelský agent mu pravidelně zasílá informace o své poloze. K registraci se používají URI identifikátory, které si server ve tvaru sip:user@IPaddress:port uloží. Jako položka „user“ obvykle slouží telefonní číslo účastníka.

Lokační server ukládá adresy a telefonní čísla registrované u registračního serveru a poskytuje je proxy serverům a serverům přesměrování. Lokační server je v praxi často součástí registračního serveru.

3.1.2 Metody a odpovědi protokolu SIP

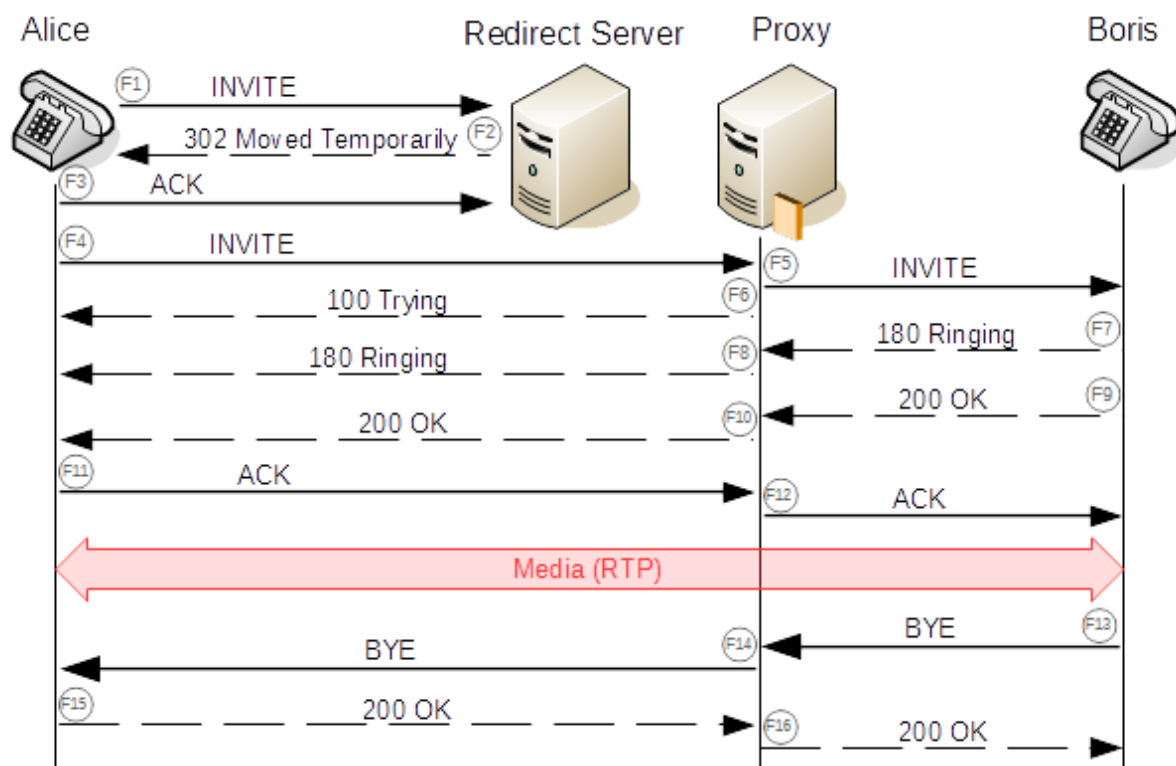
Komunikace pomocí protokolu SIP probíhá textově a obsahuje sedm základních příkazů [17].

- **INVITE** – pozvání uživatele k hovoru
- **ACK** – potvrzení, které zajišťuje spolehlivou výměnu INVITE příkazů
- **BYE** – ukončuje spojení mezi uživateli
- **CANCEL** – ukončuje žádost nebo hledání uživatele ještě před jeho zpracováním
- **OPTIONS** – nabízí informace o mediálních schopnostech
- **REGISTER** – registruje uživatelskou současnou polohu
- **INFO** – využívá se při signalizaci během hovoru

Každá žádost začíná typem zprávy, za kterým následují další údaje: adresa klienta (From), adresa serveru (To), záznam o cestě (Via), identifikátor hovoru (Call-ID), sekvenční číslo (Cseq) a kontakt na odesílatele (Contact). Protokol SIP standardně využívá UDP port 5060, ale umí pracovat i v TCP režimu. Každá žádost, kromě ACK, musí být zodpovězena. Odpovědi vycházejí z protokolu HTTP a začínají číselnými kódy.

- **1xx** – Informační – potvrzení žádosti, po kterém následuje zpracování žádosti
- **2xx** – Úspěch – potvrzení úspěšného zpracování konkrétní žádosti
- **3xx** – Přesměrování – informace o nové poloze uživatele nebo jiné službě k použití
- **4xx** – Chyba požadavku – problém na straně žadatele, chyba v syntaxi žádosti
- **5xx** – Chyba serveru – problém na straně serveru
- **6xx** – Celková chyba – žádost nemůže být zpracována na žádném serveru

3.1.3 Průběh VoIP hovoru protokolem SIP



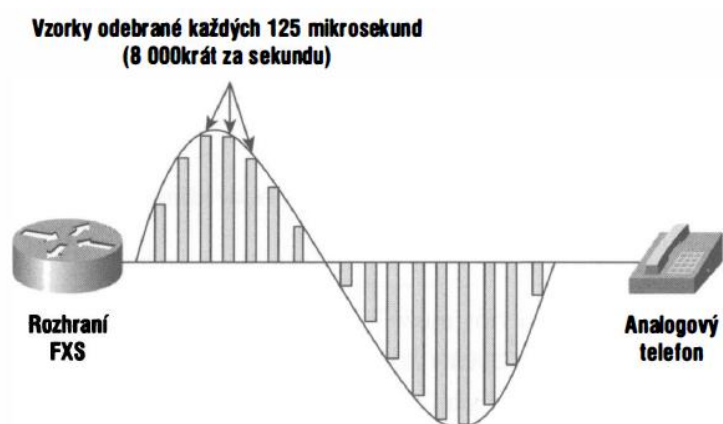
Obrázek 4 - Průběh navázání a ukončení VoIP hovoru (zdroj: [18])

Průběh navázání a ukončení VoIP hovoru v protokolu SIP lze sledovat na příkladu na obrázku 4. Hovor iniciuje klientský uživatelský agent Alice zasláním INVITE žádosti serverovému uživatelskému agentovi Boris. Vzhledem k tomu, že UAC nezná přesnou adresu UAS, zašle svoji žádost známému SIP serveru (F1). Tento server v našem případě plní roli serveru přesměrování, a tak zašle žadateli odpověď 302, kterou ho odkáže na jiný SIP proxy server (F2). UAC potvrdí přijetí informace o přesměrování (F3) a zašle INVITE žádost novému serveru (F4), který již zná přesnou adresu UAS, a tak mu ji přepošle (F5) a zároveň zašle zpět informační zprávu 100 – Trying (F6). UAS přijme INVITE žádost a pošle zpět informační zprávu 180 – Ringing (F7), kterou proxy server přepošle UAC (F8). Pokud uživatel Boris přijme hovor, pošle UAS zprávu 200 – OK proxy serveru (F9), který ji opět přepošle UAC (F10). UAC pošle zprávu potvrzení ACK proxy serveru (F11), který ji přepošle UAS (F12). Tím je zakončeno spolehlivé navázání hovoru trojcestným handshakem (INVITE+OK+ACK) a oba uživatelští agenti začnou zasílat hlasové RTP pakety přímo mezi sebou, bez dalšího použití SIP serverů. Když se jedna ze stran rozhodne hovor ukončit (v tomto případě Boris), opět využije SIP protokol a UAS zašle zprávu BYE proxy serveru (F13), který ji přepošle UAC (F14). UAC nazpět odešle potvrzení 200 – OK (F15), které proxy server přepošle UAS (F16) a dojde k ukončení hovoru.

3.2 Přenos hlasu

Pro přenos hlasu pomocí VoIP je nutné jej nejprve převést z analogové do digitální podoby. Poté je ho potřeba zakódovat vhodným kodekem a pomocí RTP protokolu přenést cílovému uživatelskému agentovi.

3.2.1 Digitalizace hlasu



Obrázek 5 - Digitalizace hlasu (zdroj: [19])

Hlas je ve své přirozené podobě analogový, tedy představuje plynule se měnící vlnovou křivku. Pro přenos ve VoIP síti je nutné jej nejprve převést do binární podoby. Proces převodu začíná vzorkováním, kdy se, dle Nyquistovi věty, odebírá každých 125 mikrosekund (8 000x za sekundu) vzorek analogové vlny. Kvantováním se pak přiřazují ke každému získanému vzorku číselné hodnoty amplitudy. Získaná data se zakódují a případně zkomprimují pomocí jednoho z kodeků popsanych v následující kapitole. Podobný proces, ale v opačném sledu, je použit pro převod zpět do analogové podoby na straně příjemce.

3.2.2 Kodeky

Digitalizované vlnové křivky se kódují a případně komprimují pomocí kodeků, jejichž cílem je dosáhnout co nejmenší šířky pásma při zachování co nejvyšší kvality hlasu. Existuje celá řada kodeků, které se liší v kvalitě komprimace a náročnosti na výpočetní výkon.

G.711 je základní a nejrozšířenější kodek, jehož kvalita je totožná s kvalitou hlasu při běžném analogovém telefonování, neboť nedochází k žádné kompresi. Tento kodek využívá pulsně-kódovou modulaci (PCM). Analogový signál se vzorkuje každých 125 mikrosekund (8 000x za sekundu), přičemž každý vzorek má velikost 8 bitů. Šířka pásma využívaná tímto kodekem je tedy 64 kbit/s.

G.722, přezdívaný HD Audio, používá pásmové kódování s adaptivní diferenční pulsně-kódovou modulací (SB-ADPCM) a při šířce pásma 64 kbit/s vzorkuje oproti kodeku G.711 dvakrát častěji (16 000x za sekundu) a nabízí i dvojnásobné frekvenční pásmo (7 000 Hz oproti 3 400 Hz).

G.726 používá adaptivní diferenční pulsně-kódovou modulaci (ADPCM), kdy se nemusí kódovat celý vzorek ale pouze rozdíly oproti vzorku předchozímu. Šířka pásma závisí na délce zpracovaných bloků a může být 16, 24 nebo 32 kbit/s.

G.728 používá modulaci Low Delay Code Excited Linear Prediction (LD-CELP), kdy se dynamicky vytváří knihovna kódů a zjišťuje se, zda vzorek odpovídá některému ze vzorků v ní. Pokud ano, nezasílá se celý vzorek, ale pouze jeho umístění v knize kódů. Tento kodek vyžaduje šířku pásma 16 kbit/s.

G.729 používá modulaci Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction (CS-ACELP), který rozšiřuje knihovnu kódů předchozího kodeku, což vede k většímu zpoždění, ale k menším nárokům na šířku pásma, která činí pouze 8 kbit/s.

SILK je kodek, který vyvíjí společnost Skype. Kodek používá modulaci Linear Predictive Coding (LPC) a umí vzorkovat ve frekvenci 8, 12, 16 nebo 24 kHz (8 000, 12 000, 16 000, 24 000 vzorků za sekundu) při šířce pásma od 6 do 40 kbit/s.

Srovnání nejpoužívanější kodeků lze vidět v tabulce 1.

Tabulka 1 - Porovnání VoIP kodeků (zdroj: autor)

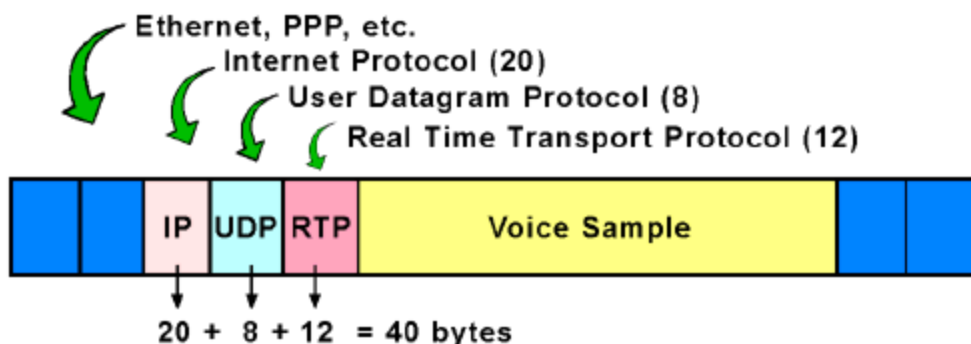
Kodek	Modulace	Šířka pásma
G.711	PCM	64 kbit/s
G.722	SB-ADPCM	64 kbit/s
G.726	ADPCM	16, 24, 32 kbit/s
G.728	LD-CELP	16 kbit/s
G.729	CS-ACELP	8 kbit/s
SILK	LPC	6 – 40 kbit/s

3.2.3 Real-time Transport Protocol

Protokol RTP definuje standardizovaný formát paketů pro doručování zvuku a videa přes Internet. Byl vyvinut pracovní skupinou Audio-Video Transport organizace IETF a poprvé byl publikován v roce 1996 jako specifikace RFC 1889, kterou v roce 2003 nahradila specifikace RFC 3550 [7].

Protokol pracuje jako nadstavba protokolu UDP, a tak nezaručuje doručení dat, ani správné pořadí paketů. Jeho cílem je přenos v reálném čase, ne úplnost. RTP přidává k obsahu sekvenční číslo, kterým

Lze určit ztrátu či změnu pořadí doručení paketů. S přijatými daty pracuje telefonní software, který se snaží uživateli doručovat co možná nejlepší souvislý hlasový tok.



Obrázek 6 - Struktura hlasového paketu (zdroj: [20])

Jak je vidět na obrázku 6, každý hlasový paket obsahuje 20 bajtovou IP hlavičku, 8 bajtovou UDP hlavičku, 12 bajtovou RTP hlavičku a data kodeku - hlas.

3.2.4 Real-time Transport Control Protocol

RTCP je sesterský protokol protokolu RTP. Poprvé byl definován ve specifikaci RFC 1889, která pak byla nahrazena specifikací RFC 3550. Protokol RTCP zajišťuje řídicí informace pro tok RTP. Spolupracuje s protokolem RTP na doručování a balení multimediálních dat, ale žádná data sám nepřenáší [7]. RTCP se používá především pro informace o kvalitě hovoru, protože shromažďuje statistiky, jako jsou odeslané bajty, odeslané pakety, ztracené pakety, jitter či zpoždění.

3.3 Měření kvality hovoru

Úroveň kvality hovoru je určena uživatelskou zkušeností a představuje celkový dojem z kvality hovoru uživatelem. Pro vyhodnocování kvality hlasu se používá stupnice poslechové kvality MOS²⁰ zavedená organizací ITU-T v doporučení P.800 z roku 1996, která definuje stupnici pro vyjádření spokojenosti s hovorem testovanými subjekty. Jak lze vidět v tabulce 2, stupnice nabývá hodnot od 1 – nejhorší po 5 – nejlepší a vypočte se jako průměr hodnocení testovaných subjektů. Z pohledu uživatele je za hraniční hodnotu obecně považovaná hodnota MOS 3,1 [6]. Hodnocení je ovlivněno celkovým dojmem z kvality hovoru, sekáním hlasu, ozvěnou, šumem a dalšími subjektivními faktory.

Při přenosu telekomunikační sítí a převodu hlasu z analogové do digitální podoby a zpět dochází ke snižování kvality, a proto se maximální dosažitelná hodnota MOS pro každý hlasový kodek liší. Například nepoužívanější hlasový kodek G. 711 má maximální dosažitelnou hodnotu MOS 4,4.

²⁰ Mean Opinion Score

Tabulka 2 - Hodnoty stupnice MOS (zdroj: [21])

MOS	Kvalita	Popis
5	Vynikající	Neznatelné rušení
4	Dobrá	Rušení lze rozpoznat, ale není obtěžující
3	Průměrná	Rušení lze rozpoznat a mírně obtěžuje
2	Nízká	Rušení obtěžuje, je nutno vyvinout úsilí při snaze porozumět
1	Špatná	Rušení velmi obtěžuje, řeč je nesrozumitelná

Existují tři způsoby vyhodnocování MOS – subjektivní, objektivní a odhadové.

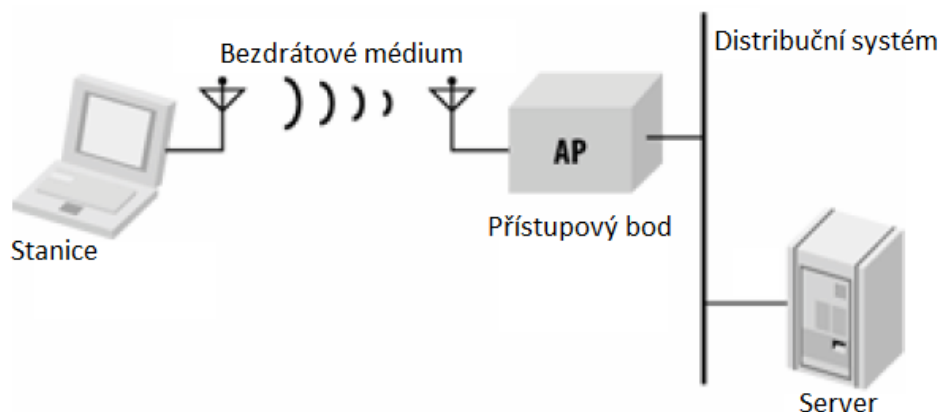
Subjektivní metoda, popsaná výše, je nej přesnější a nejspolehlivější, ale je velmi náročná na finanční, lidské i časové zdroje, neboť je založena na hodnocení zvukových nahrávek lidmi.

Objektivní měřicí metody jsou založeny na matematických algoritmech, takže dosahují při stejných vstupních datech vždy stejných výsledků. Přestože jsou objektivní metody méně spolehlivé a přesné, jsou méně náročné na zdroje a mohou vyhodnocovat výsledky v reálném čase. Intrusivní objektivní metody porovnávají zdrojovou – originální nezkreslenou hlasovou nahrávku vůči doručené – degradované. Neintrusivní objektivní metody pracují pouze s doručenou degradovanou nahrávkou. Intrusivní metody jsou tedy přesnější a spolehlivější, nicméně pro jejich využití je zapotřebí zdrojová i cílová zvuková nahrávka, což je v automatizovaných nástrojích takřka nemožné implementovat.

Odhadové metody nepracují se žádnými zvukovými nahrávkami, ale s parametry telekomunikační soustavy. V úvahu berou například použitý hlasový kodek, propustnost linky, zpoždění, jitter či ztrátovost paketů. Na základě těchto údajů je odhadnuta hodnota MOS. Tato metoda je nejméně přesná, nicméně ji lze nejlépe zautomatizovat a využívat k automatickému vyhodnocování kvality hovorů v celé podnikové síti.

4 Bezdrátová síť

Bezdrátové sítě LAN jsou řízeny standardy IEEE²¹ 802.11, jehož první verze byla vydána v roce 1997. Organizace Wi-Fi Alliance je zodpovědná za certifikování produktů splňující tyto standardy. Infrastrukturní bezdrátové sítě v podnikovém prostředí se skládají ze čtyř základních komponent: distribučního systému, přístupového bodu, bezdrátového média a stanice.



Obrázek 7 - Komponenty sítě 802.11 (zdroj: [12])

Přístupové body komunikují mezi sebou nebo s centrálním prvkem pomocí distribučního systému, nicméně ten není povinný, protože přístupový bod může být k distribučnímu systému připojen bezdrátově pomocí jiného přístupového bodu. Ve většině případů však přístupové body slouží primárně k přemostění mezi bezdrátovou a drátovou sítí. Bezdrátové médium je poloduplexním nosičem dat a v běžném prostředí podnikové sítě pracuje na 2,4 GHz a 5 GHz frekvencích. Stanicí se rozumí uživatelské zařízení, například notebook, tablet, mobilní telefon nebo PDA. Bezdrátový radič je umístěn v distribučním systému a spravuje přístupové body. Mimo jiné provádí jejich upgrade, nahrává konfigurace a zajišťuje další doplňkové funkce související s roamingem nebo optimalizací vytížení. Radič není povinnou součástí bezdrátové sítě, avšak v prostředí podnikových sítí se téměř bezvýhradně používá [4].

V současnosti podnikové bezdrátové sítě pracují na standardech IEEE 802.11g/n v 2,4 GHz frekvenčním pásmu a IEEE 802.11a/n v 5 GHz frekvenčním pásmu. V poslední době se začínají nasazovat přístupové body s podporou nejnovějšího vysokorychlostního standardu IEEE 802.11ac, který pracuje pouze v 5 GHz frekvenčním pásmu. V prostředí VŠE zatím nasazen není, a proto se mu v práci nevěnuji.

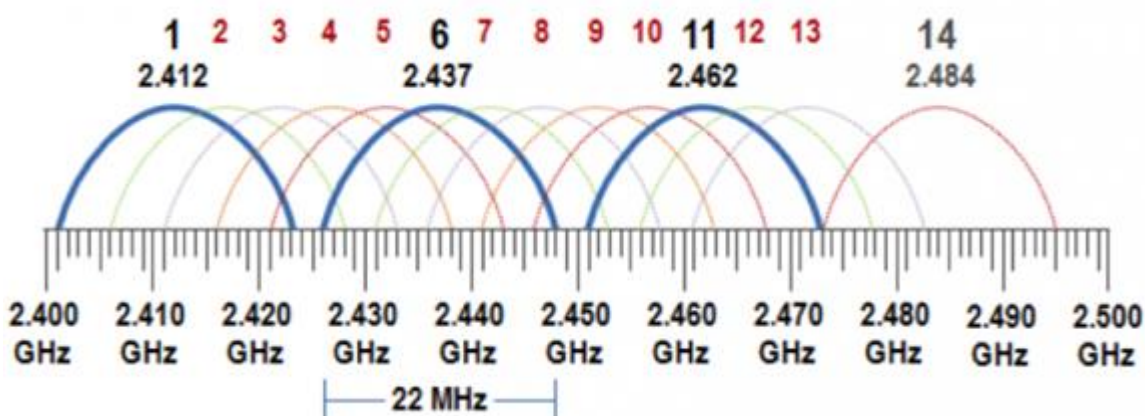
²¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers

4.1 Pokrytí

Správné pokrytí podnikových prostor je klíčovou podmínkou pro úspěšný provoz bezdrátové sítě. Při poskytování služeb náročných na kvalitu sítě, jako je například VoIP, je třeba k problematice pokrytí a úrovně kvality signálu přistupovat ještě důsledněji než u klasických bezdrátových sítí určených k přenosu dat, neboť takové služby vyžadují určité garantované parametry sítě. Uživatelé chtějí volat v různých místech a v pohybu, a proto je velmi důležité souvislé pokrytí všech prostor určitou úrovní signálu. Toto se obvykle řeší především vyšší hustotou přístupových bodů s nižším vysílacím výkonem, čímž se dosáhne dostatečné úrovně pokrytí a zároveň zamezí interferenci. Prostory jako jsou výtahy, schodiště, sklepy nebo podzemní garáže je třeba řešit individuálně a provádět důkladná měření a testování.

4.1.1 Frekvenční pásma

Bezdrátové sítě dokáží pracovat ve frekvenčních pásmech od 900 MHz do 80 GHz. V oblasti Wi-Fi sítí se běžně využívají pouze nelicencovaná pásma 2,4 GHz a 5 GHz. V České republice, stejně jako v celé Evropě, určuje použitelné frekvence organizace ETSI²². V pásmu 2,4 GHz je k dispozici 13 kanálů (v České republice je stejně jako v Evropě 14. kanál zakázán) o šířce 22 MHz, z nichž celkem 3 jsou nepřekrývající (1, 6 a 11), jak lze vidět na obrázku 8. Tento frekvenční rozsah je používán standardy 802.11b, 802.11g a 802.11n. V případě použití 40 MHz kanálů 802.11n lze využít pouze 2 nepřekrývající se kanály (3 a 11).

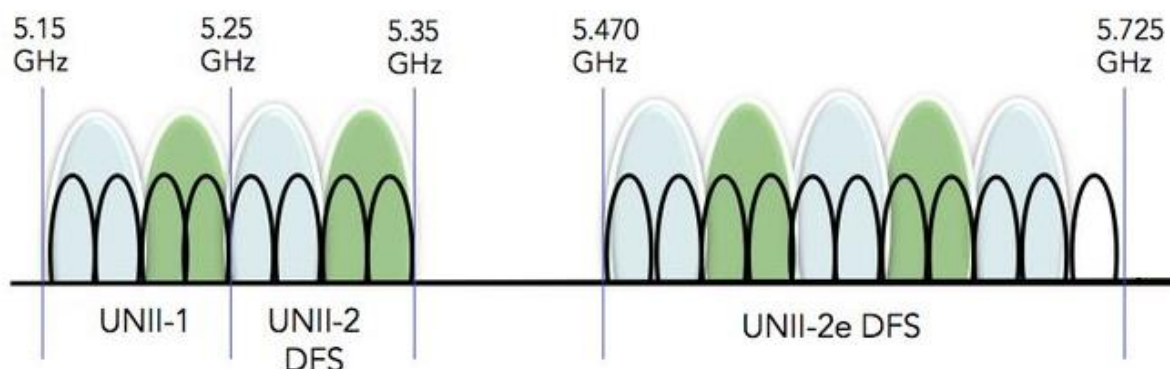


Obrázek 8 - 2,4 GHz spektrum (zdroj: [22])

V pásmu 5 GHz je v České republice povoleno devatenáct 20 MHz (vždy násobky čtyř od 36 do 64 a od 100 do 140) nebo devět 40 MHz nepřekrývajících se kanálů (poslední 140 kanál již nelze rozšířit). Díky tomu nedochází u hustějších sítí k problémům s interferencí. Tento frekvenční rozsah je využíván

²² European Telecommunications Standards Institute - Evropský ústav pro telekomunikační normy

standardsy 802.11a ,802.11n a 802.11ac, přičemž v prostředí VŠE se v 5 GHz pásmu u standardu 802.11n používají právě 40 MHz kanály. Na obrázku 9 elipsoidy symbolizují jednotlivé kanály, přičemž zelené a modré znázorňují 40 MHz kanály.



Obrázek 9 - 5 GHz spektrum (zdroj: [23])

Pro delší vzdálenosti je z fyzikálního hlediska výhodnější pásmo 2,4 GHz. Jak lze vidět v tabulce 3, průměrný dosah je totiž v 5 GHz pásmu podstatně nižší.

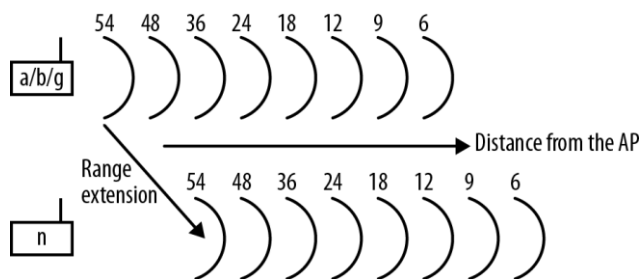
Tabulka 3 - Dosah frekvencí (zdroj: [12])

Prostor	Maximální dosah (m)	
	2,4 GHz	5 GHz
Kanceláře	18	12
Kóje	27	18
Haly a posluchárny	45	22

Standard 802.11n, pracující jak v 2,4 GHz, tak v 5 GHz pásmu, funguje na principu prostorových proudů, přičemž podpora u bezdrátových zařízení se značí notací T x R: S, kde T a R označují vysílající, respektive přijímací rádiové řetězce (Radio Chains), zatímco S označuje maximální počet prostorových proudů. Více prostorových proudů zvyšuje jak rychlost, tak kvalitu přenosu, nicméně i v případě použití tohoto standardu u jedno anténových stanic se zlepšuje efektivita, protože lze pozorovat podstatné zlepšení maximální teoretické i reálné propustnosti (až o 10%, respektive 30%) [8], především z důvodu vyššího počtu pomocných nosných vln, použití kratších ochranných intervalů, agregovaných rámců, blokových potvrzení a kratších SIFS²³ (nazývaných RIFS²⁴). Zmiňovaným jedno anténovým zařízením může standard přinést i zlepšení dosahu, a s tím související vyšší přenosovou rychlost na větší vzdálenost, jak je znázorněno na obrázku 10 [4].

²³ Short Interframe Space

²⁴ Reduced Interframe Space



Obrázek 10 - Zlepšení dosahu pomocí 802.11n (zdroj: [24])

4.1.2 Šíření signálu

Při plánování bezdrátové sítě je vhodné znát principy šíření rádiového signálu a faktory, které ho ovlivňují. Takových vlivů je celá škála, přičemž většina z nich je negativních. Síla signálu se uvádí v decibelech (dB), konkrétně v jednotkách dBi nebo dBm (kde 0dBm = 1mW). Při budování bezdrátové sítě je nutné znát hodnoty efektivního izotropního vyzařovaného výkonu (EIRP²⁵), jehož hodnoty v Evropě reguluje organizace ETSI. EIRP se vypočítá jako součet výstupního výkonu vysílače a zisku antény mínus ztráta kabelu. Maximální povolený vysílací výkon je omezen na 17dBm se ziskem antény 3dBi, celkové EIRP je tedy 20dBm, přičemž lze používat ziskovější antény na úkor vysílacího výkonu. Toto omezení kontroluje v procesu certifikace dříve zmiňovaná Wi-Fi Alliance.

Útlum volného prostoru představuje přirozený úbytek signálu v závislosti na vzdálenosti od zdroje vysílání. Maximální vzdálenost od přístupového bodu se všesměrovou anténou vysílacího s EIRP 20dBm je v 2,4 GHz pásmu pro rychlost 54 Mbit/s 350 metrů, pro 5 GHz pásmo při stejné rychlosti pouze 90 metrů [6]. Takový dosah je čistě teoretický a v praktických podmínkách ho není možné dosáhnout.

Dalším negativním vlivem je pohlcování, které u elektromagnetických vln funguje podobně jako u zvuku, a proto stěny, koberce, nábytek i lidé rádiové přenosy pohlcují.

Velkým problémem je voda, a tedy i lidé, kteří jsou z 70% složeni právě z ní. Nepříznivý vliv má především ve venkovním prostředí, kde působí obtíže špatné počasí, vodní hladiny, vlhké stromy nebo mokré střechy [25]. Největší překážkou signálu jsou bezesporu kovy a bezpečnostní skla, případně tlusté betonové zdi.

²⁵ Equivalent Isotropically Radiated Power

Tabulka 4 - Úbytek signálu dle materiálu v závislosti na frekvenčním pásmu (zdroj: [26])

Materiál	2,4 GHz (v dB)	5 GHz (v dB)
Bez překážky	-42	-61
Hliník (1mm)	-64	-84
Ocel (1mm)	-58	-85
Dřevo (2cm)	-43	-64
Sádrokarton (2cm)	-42	-65
Sklo	-45	-65
Beton (5cm)	-44	-67
Omítnutý sádrokarton (2cm)	-43	-69
Neprůstřelné sklo	-60	-82

RSSI²⁶ neboli indikátor síly přijatého signálu je výrobcem definovaná škála k určení úrovně signálu. Většinou se uvádí v dBm na stupnici od 0 do -100. Výrobci bezdrátových karet stanovují tyto hodnoty sami, což v praxi znamená, že různé bezdrátové karty mohou mít pro stejnou úroveň signálu různé RSSI.

SNR²⁷ neboli poměr signálu a šumu vyjadřuje úroveň přijímaného signálu v porovnání s okolním šumem. Tuto hodnotu většina používaných bezdrátových karet nedokáže zobrazovat, přestože při řešení problémů může být užitečnější než hodnota RSSI. Specializované měřicí přístroje ji samozřejmě zobrazit dokážou, příkladem může být AirCheck Wi-fi Tester od společnosti FlukeNetworks²⁸ [4].

4.2 Zabezpečení

Velké požadavky jsou v oblasti Wi-Fi kladeny na bezpečnost. Vzhledem k tomu, že bezdrátové sítě jsou už ze své podstaty daleko zranitelnější než klasické kabelové, je třeba jim věnovat dostatečnou pozornost a důkladně zabezpečit uživatelská data. V počátcích se Wi-Fi sítě potýkaly s problémy se slabým zabezpečením, porušením integrity a úniky dat. V roce 2004 byl vydán bezpečnostní standard 802.11i, který kromě zpětně kompatibilního TKIP přinesl nový protokol CCMP, který vrátil bezdrátovým sítím důvěru a dostatečnou míru bezpečnosti [4].

Pro zajištění dostatečné bezpečnosti v podnikovém prostředí je tedy nezbytnou podmínkou, aby přístupové body i klientská zařízení podporovaly bezpečnostní standardy 802.11i a autentizační metodu 802.1X, což v současné době splňuje naprostá většina z nich.

²⁶ Received Signal Strength Indication

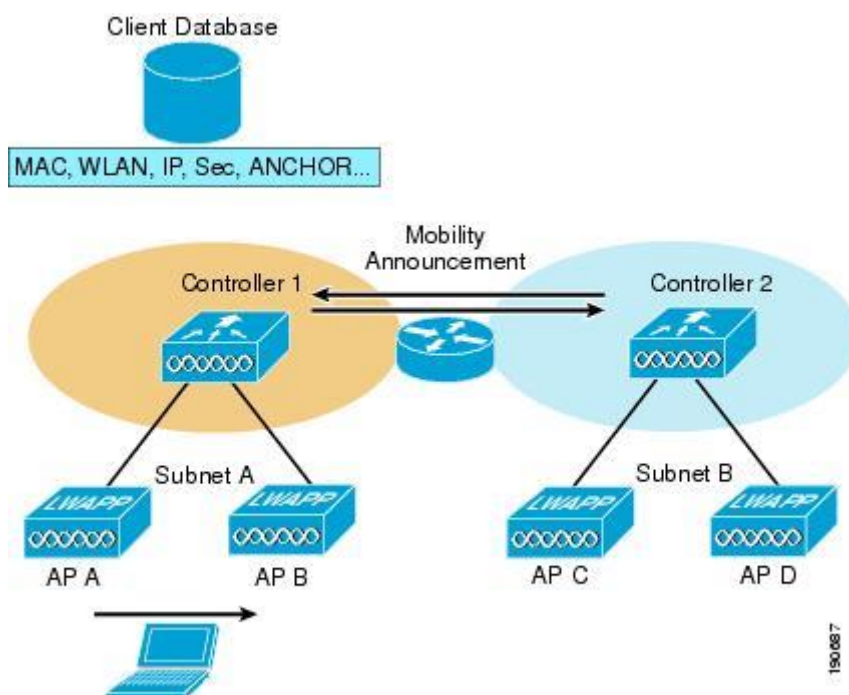
²⁷ Signal-to-noise

²⁸ <http://www.flukenetworks.com/enterprise-network/network-testing/AirCheck-Wi-Fi-Tester>

4.3 Mobilita

Základ mobility v bezdrátových sítích představuje roaming, tedy proces přemístění stanice mezi přístupovými body bez přerušení síťové konektivity. Kdy se přepojit k jinému přístupovému bodu standard 802.11 nspecifikuje, je to tedy na výrobcích hardwaru. Některá bezdrátová zařízení se připojí k prvnímu přístupovému bodu a zůstávají k němu připojená, dokud je dostupný. Jiná zařízení se naopak snaží být vždy připojena k přístupovému bodu s nejsilnějším signálem, což může mít za následek nekonečné roamování mezi dvěma body se stejnou úrovní signálu. Nejlepším řešením tohoto problému je stanovení hodnoty RSSI, o kterou musí být signál nového přístupového bodu lepší, aby se proces roamování zahájil.

Přístupové body řeší problém zachování aktivního síťového spojení. Roaming může probíhat na druhé nebo na třetí vrstvě OSI modelu [27]. Nejjednodušším řešením roamingu druhé vrstvy je použití jediné podsítě (a virtuální LAN). Stanice má po celou dobu připojení k síti (i při změně přístupových bodů) stejnou IP adresu a všechny její přenosy zůstávají aktivní [4].



Obrázek 11 - Roaming na druhé vrstvě (zdroj: [28])

Vzhledem k tomu, že autentizační metoda 802.1X je poměrně časově náročná, je vhodné používat mechanismus zvaný FT²⁹, jež byl představen ve standardu 802.11r, který je věnovaný rychlému roamingu a většina výrobců bezdrátových prvků ho implementuje. Šifrovací PMK³⁰ všech stanic se

²⁹ Fast Transition

³⁰ Pairwise Master Key

shromažďují v databázi bezdrátového řadiče, který ho při přidružení předává konkrétním přístupovým bodům. Výhoda spočívá v tom, že každá stanice musí provést celou 802.1X autentizaci pouze jednou, na rozdíl od běžné předautorizace specifikované v 802.11i, kdy se musí plně autentizovat s každým přístupovým bodem [29].

Standard 802.11k se věnuje asistovanému roamingu a definuje operace související s RRM³¹. Stanice kompatibilní s tímto standardem jsou schopné rychle identifikovat okolní přístupové body, které jsou k dispozici coby cíle roamingu. Jak již bylo zmiňováno dříve, stanice se nejčastěji snaží připojit k přístupovému bodu s nejsilnějším signálem, což může vést k jeho přetížení. Pokud se stanice připojí k vedlejšímu nevyužitému přístupovému bodu s mírně slabším signálem, může dosáhnout daleko vyšší reálné rychlosti.

Standard 802.11v se zabývá bezdrátovým managementem a umožňuje stanicím vyměňovat si informace o síťové topologii a vytíženosti okolních přístupových bodů, díky čemuž se mohou lépe rozhodovat o možných cílech roamingu [30].

4.4 Kvalita služby

Pro provoz VoIP v produkčním prostředí je vhodné garantovat určitou úroveň kvality služby, neboli QoS. U drátových sítí byl QoS standardizován již v roce 1998 a využívá se především na pomalejších linkách mezi lokalitami. Lokální point to point spoje s vyhrazeným médiem a rychlostmi v řádech gigabitů ve většině případů problémy s propustností nebo zpožděním paketů nemají. Jinak tomu však je v oblasti bezdrátových sítí, které využívají sdílené bezdrátové médium s určitou, oproti drátovým sítím poměrně malou, kapacitou. Pro spolehlivý provoz VoIP v bezdrátové síti je tedy třeba garantovat určitou úroveň kvality služby. Spolehlivým provozem se rozumí maximální zpoždění do 130 milisekund, maximální kolísání zpoždění – jitter do 30 milisekund a ztrátovost paketů do 1% [31].

Technologie přístupu k bezdrátovému sdílenému médiu u standardů IEEE 802.11a, b, g jsou založeny na metodě DCF³², která podporu upřednostnění provozu napříč stanicemi neposkytuje. Jednotlivé stanice sice umí při odesílání vlastních rámců preferovat určitý typ provozu, nicméně možnost prioritizace napříč stanicemi chybí. To znamená, že v případě, kdy v síti komunikují čtyři stanice, přičemž na jedné probíhá VoIP hovor, zatímco ostatní stahují soubory z FTP, mají v bezdrátové síti všechny stejnou prioritu. Tento problém řeší norma IEEE 802.11e, případně technologie WMM.

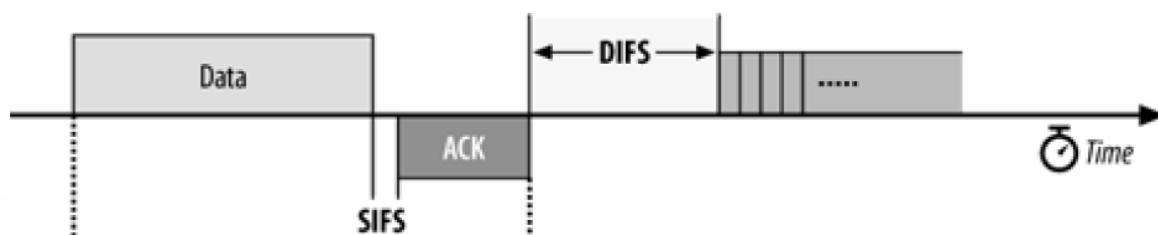
³¹ Radio Resource Management

³² Distributed Coordination Function

4.4.1 Přístup k médiu DCF

Při přenosu bezdrátových rámců se standardně používá schéma pro kontrolu přístupu k médiu CSMA/CA³³, což je bezdrátová obdoba ethernetového CSMA/CD³⁴. Stanice nejprve naslouchá, a pokud považuje médium za prázdné, odešle rámeček. Pokud během naslouchání zachytí jiný rámeček, přečte si z jeho hlavičky hodnotu NAV³⁵, která označuje čas rezervace média. Tato hodnota určuje, jak dlouho ještě bude médium zaneprázdněno. Mezi každým odesílaným rámcem musí být mezera, přičemž jsou používány tři typy, a to SIFS, PIFS³⁶ a DIFS³⁷. Standard 802.11n umožňuje navíc využívat RIFS, který nahrazuje SIFS.

SIFS, respektive RIFS, představuje nejkratší mezeru a je používán pro rámce s vysokou prioritou (k dokončení atomických operací). Po odeslání datového rámce následuje mezera SIFS, a poté potvrzení rámce ACK. Stejně tak se používají pro dokončení RTS/CTS³⁸ nebo pro fragmentované rámce. Mezi samotnými datovými rámci se používá delší mezera DIFS, po které stanice mohou vysílat. Nastane-li kolize, zvolí si každá stanice náhodné číslo zpětného časovače (libovolná hodnota od 0 do 31), po jejímž uplynutí se znovu pokusí rámeček odeslat. Při opětovné chybě se časovač zvýší na hodnoty mezi 0 a 127, při každé další se pak velikost zdvojnásobí [8].



Obrázek 12 - Mezery mezi rámci (zdroj: [12])

Hranice bezdrátové sítě nejsou striktně ohraničeny, a proto může docházet k problému skrytého uzlu. Dvě navzájem neslyšící se stanice (1 a 3) chtějí komunikovat se stanicí mezi nimi (2). Pro takové případy lze použít zmiňovaný mechanismus RTS/CTS, kdy první stanice odešle rámeček RTS a druhá potvrzení CTS. Toto potvrzení přijme i třetí stanice, čímž si nastaví NAV a považuje médium za zaneprázdněné, i když následující přenos rámce od první k druhé stanici neslyší [4].

³³ Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance

³⁴ Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection

³⁵ Network Allocation Vector

³⁶ Point-coordination Interframe Space

³⁷ Distributed-coordination Interframe Space

³⁸ Request to Send/Clear to Send

Druhou metodou přístupu k bezdrátovému médiu je funkce bodové koordinace PCF³⁹, která je použitelná pouze v infrastrukturní síti. Přístupový bod přiděluje časový úsek jednotlivým stanicím, nicméně neumožňuje upřednostňování určitého typu provozu napříč stanicemi. PCF dělí časový interval mezi beacon rámci na dva úseky, a to CP⁴⁰ a CFP⁴¹. V prvním jmenovaném se využívá metoda DCF, zatímco ve druhém přístupový bod posílá klientům informace o tom, který klient má právo vysílat. Tato metoda má své limity a je velmi zřídka implementována [32].

4.4.2 Přístup k médiu HCF

Z důvodu nedostatečné podpory kvality služby v bezdrátových sítích byl v roce 2005 uveden standard IEEE 802.11e, který dodává bezdrátovým sítím podporu QoS. Tento standard vylepšuje metody přístupu k bezdrátovému médiu a přináší novou hybridní koordinační funkci HCF⁴², která nabízí dvě metody přístupu k médiu, a to HCCA⁴³ a EDCA⁴⁴. Na obrázku 13 lze vidět architekturu nových metod a to, že jsou postaveny nad základní metodou DCF standardů IEEE 802.11a, b, g.



Obrázek 13 - Architektura IEEE 802.11e MAC (zdroj: [33])

Při použití metody EDCA je provoz s vyšší prioritou upřednostňován před provozem s nižší prioritou, což ovlivňuje dobu čekání na odeslání. Priorita provozu se přebírá z pole CoS⁴⁵ v hlavičce rámce, které je závislé na poli DSCP⁴⁶ v hlavičce IP paketu. Každá úroveň provozu má přiřazenu příležitost vysílání TXOP⁴⁷, která představuje časový interval, během kterého bezdrátová stanice může přenést jakékoliv množství rámců. Pokud je rámec příliš velký, fragmentuje ho a ke kompletnímu přenosu dat využije více intervalů. Tím se redukuje problém vytížení sítě stanicí s nízkou rychlostí přenosu, neboť časový interval pro přenos se v závislosti na rychlosti připojení nemění. Tato metoda upravuje dobu čekání mezi odesílanými rámci a přidává mezery typu AIFS⁴⁸, které se prodlužují pro provoz s nízkou prioritou

³⁹ Point Coordination Function

⁴⁰ Contention Period

⁴¹ Contention Free Period

⁴² Hybrid Coordination Function

⁴³ Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access

⁴⁴ Enhanced DCF

⁴⁵ Class of Service

⁴⁶ Differentiated Services Code Point

⁴⁷ Transmit Opportunity

⁴⁸ Arbitration Interframe Space

a zkracují pro provoz s vysokou prioritou. Společně s náhodně generovaným číslem, jež je pro každou kategorii provozu z rozdílné škály, se tak zabraňuje kolizím a efektivně se upřednostňují data s vysokou prioritou.

Metoda HCCA rozšiřuje metodu PCF a je považována za nejpokročilejší a nejkomplexnější koordinační funkci [32]. Tato metoda umožňuje zahájení CFP úseku, označovaného CAP⁴⁹, přístupovým bodem kdykoliv je potřeba odeslat nebo přijmout data okamžitě. Během CP úseku se používá metoda EDCA.

4.4.3 WMM

Z důvodu složitě a dlouhé doby implementace normy IEEE 802.11e představila v roce 2004 organizace Wi-Fi Alliance certifikaci WMM, která využívá některé prvky z této normy. Certifikovaná zařízení musí podporovat metodu řízení přístupu k médiu EDCA, zatímco podpora HCCA a ostatních funkcionalit IEEE 802.11e je volitelná.

WMM stanovuje čtyři kategorie provozu, takzvané Access Category. V tabulce 5 lze sledovat mapování těchto kategorií na ethernetový QoS 802.1p. Nejnižší prioritu má kategorie Background, která je určena k přenosu dat a negarantuje šířku pásma či odezvy. Základní kategorií je Best Effort, která se používá na většinu provozu. Druhou nejvyšší prioritu má kategorie Video, která je určena pro přenos konferenčních videí nebo živého vysílání a garantuje určitou šířku pásma. Nejvyšší prioritu pak má kategorie Voice, která je definována pro provozování VoIP v bezdrátové síti a klade nejvyšší požadavky na odezvu a garantovanou konstantní šířku pásma.

Pro efektivní funkcionalitu je ideální, pokud je QoS nasazené v celé počítačové síti a na hraničních síťových prvcích mezi drátovou a bezdrátovou sítí dochází k překladu 802.1p a WMM značení.

Tabulka 5 - Třídy provozu WMM (zdroj: [32])

Priorita	802.1p priorita	802.1p označení	WMM označení	Access Category
Nejnižší	1	Background	Background	AC_BK
	2	Spare		
	0	Best Effort	Best Effort	AC_BE
	3	Excellent Effort		
Nejvyšší	4	Controlled Loan	Video	AC_VI
	5	Video		
	6	Voice	Voice	AC_VO
	7	Network Control		

⁴⁹ Controlled Access Phase

5 Zařízení s podporou VoWLAN

Pro využití služby VoIP v bezdrátové síti lze použít celou řadu zařízení. Zařízení, která podporují VoWLAN pracují na standardech 802.11 na frekvencích 2,4 GHz, 5 GHz nebo obou. Pro podporu v produkčním prostředí je velmi důležitá certifikace WMM od asociace Wi-Fi Alliance, která zajišťuje podporu kvality služby. Dále je vhodná podpora standardů 802.11r, 802.11k, případně 802.11v, které vylepšují roamingové možnosti zařízení.

Přestože jsou v současné době jedním z nejpoužívanějších typů bezdrátových zařízení digitální bezdrátové telefony založené na standardu DECT⁵⁰, nejedná se o VoWLAN, ani VoIP zařízení, neboť nepracují na IP, ani 802.11 standardech. Každý DECT telefon má svoji základnovou stanici, většinou v kanceláři uživatele, která je zapojena do počítačové sítě kabelem a slouží jako hraniční rozhraní mezi bezdrátovým telefonem a drátovou sítí podniku. Ke každé základnové stanici je tedy obvykle připojen pouze jeden bezdrátový přístroj, přičemž mezi sebou komunikují DECT protokolem standardně na frekvenci 1,9 GHz a s bezdrátovými Wi-Fi sítěmi tedy neinterferují. Řízení hovoru spravuje základnová stanice, zatímco bezdrátový telefon slouží pouze jako vzdálený terminál pro příjem a odesílání hlasu. Z výše zmíněných důvodů nelze bezdrátové digitální telefony DECT zařadit mezi zařízení s podporou VoWLAN.

5.1 Podnikové VoWLAN telefony

Podnikové VoWLAN telefony představují nejrobustnější řešení pro VoIP v bezdrátové síti, neboť kombinují vlastnosti DECT telefonů s Wi-Fi standardy a plnohodnotně nahrazují stolní telefonní aparát. Tyto telefony obvykle pracují v prostředí IEEE 802.11a/g/n, podporují tedy obě frekvenční pásma. Vzhledem k tomu, že se jedná o řešení pro podniky, nabízejí podporu pokročilých podnikových zabezpečení, šifrovacích metod, podporu WMM a pokročilé bezdrátové funkce. Většina podnikových VoWLAN telefonů podporuje širokou škálu kodeků a pracuje s protokoly SIP pro navazování spojení a RTP pro přenos hlasu.

Příkladem podnikového VoWLAN telefonu je zařízení OpenStage WL3 [34] od společnosti Unify, které bylo testováno s telefonními ústřednami HiPath 3000 a HiPath 4000. Vzhledem velmi připomíná mobilní telefon a nabízí i jemu podobné přídatné funkce, jako je adresář, podporu SMS zpráv, budík nebo různé vyzváněcí melodie. Tento model navíc nabízí monitoring pomocí protokolu SNMP.

⁵⁰ Digital Enhanced Cordless Telecommunications

5.2 Wi-Fi mobilní telefony

Zařízení nazývaná jako Wi-Fi mobilní telefony (Wi-Fi Cell Phones) představují v současné době nejlepší řešení pro bezdrátový přenos hlasu v podnikovém prostředí s nedostatečným pokrytím mobilní signálem nebo Wi-Fi sítí. Tato zařízení pracují jak v mobilní síti nové generace LTE, tak ve Wi-Fi 802.11 sítích. Jejich hlavní předností je bezvýpadková mobilita a možnost přepnutí z LTE na Wi-Fi i během hovoru, což je žádoucí při pohybu v lokalitách s nízkou úrovní buď mobilního signálu, jako jsou výtahy či podzemní prostory, nebo Wi-Fi signálu, jako jsou venkovní areály či schodiště.

V České republice, v době psaní diplomové práce, testuje Wi-Fi mobilní volání operátor T-mobile [35]. V současné době podporuje pouze jediný model telefonu, a to Samsungu Galaxy S6 Edge, nicméně do budoucna slibuje podporu dalších modelů. Přestože je provoz tohoto systému na VŠE možný, netestoval jsem ho, neboť jsem neměl k dispozici zmiňovaný model telefonu.

5.3 Mobilní telefony

Další cestou jak provozovat VoWLAN, je využití aplikace v mobilním telefonu. Velkou roli má především hardwarová výbava. Mobilní telefony disponují bezdrátovými čipy různých výrobců a dosahují odlišné kvality bezdrátového připojení. Některé mohou pracovat pouze na frekvenci 2,4 GHz, jiné i na frekvenci 5 GHz. Rozdílný je vyzářovací diagram nebo počet a zisk antén. Liší se i podpora standardů IEEE 802.11, ať už rychlostních (802.11n, 802.11ac), tak i doplňkových (802.11k, 802.11r, 802.11v).

Příkladem koncového zařízení může být Apple iPhone, jehož různé modely se podporou bezdrátových funkcí podstatně liší, a tak lze očekávat znatelné rozdíly při použití stejné aplikace na různých modelech. Podporu WMM a standardu 802.11n ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz Apple nabízí od verze iPhone 4 (2010). Podporu 802.11k a 802.11r ve frekvenčních pásmech 2,4 GHz i 5 GHz od verze iPhone 4S (2011), podporu 802.11v od verze iPhone 5S (2013). Podporu standardu 802.11ac Apple nabízí od verze iPhone 6 (2014).

5.3.1 Mobilní aplikace

Aplikací pro mobilní telefony existuje celá řada a liší se především uživatelským rozhraním, podporou platform, operačních systémů a kodeků, a někdy i cenou. Některé telefony s operačním systémem Android mají předinstalovaného nativního SIP klienta.

Mezi nejpoblárnější služby pro internetová volání mezi běžnými uživateli patří Skype, Facebook Messenger, WhatsApp, Viber nebo Google Hangouts. Pro klasické VoIP volání a registraci telefonního čísla na ústředně (či u VoIP operátora) je nutné použít aplikaci s podporou signalizačního protokolu SIP, přičemž ty nejpoblárnější popisují v následujících odstavcích.

OpenScape Mobile je aplikace pro Android a iOS dodávaná k ústředně Unify provozované na VŠE a podporuje rozšiřující funkce jako zobrazení jména volajícího, předání hovoru či skupinové vyzvánění. Přestože je aplikace pro koncové uživatele dostupná ke stažení zdarma, pro její využívání je třeba licence na straně ústředny.

Český VoIP operátor Fayn poskytuje zdarma stejnojmennou aplikaci pro Android. Pro operační systém iOS operátor doporučuje placenou aplikaci Bria. Doporučené kodeky jsou G.711, GSM a G.722 HD [36].

Další tuzemský operátor Odorik.cz doporučuje pro operační systém Android aplikaci zdarma CSipSimple, pro operační systém iOS pak placenou aplikaci Bria. Pro obě platformy je dle operátora vhodná i aplikace zdarma Zoiper [37].

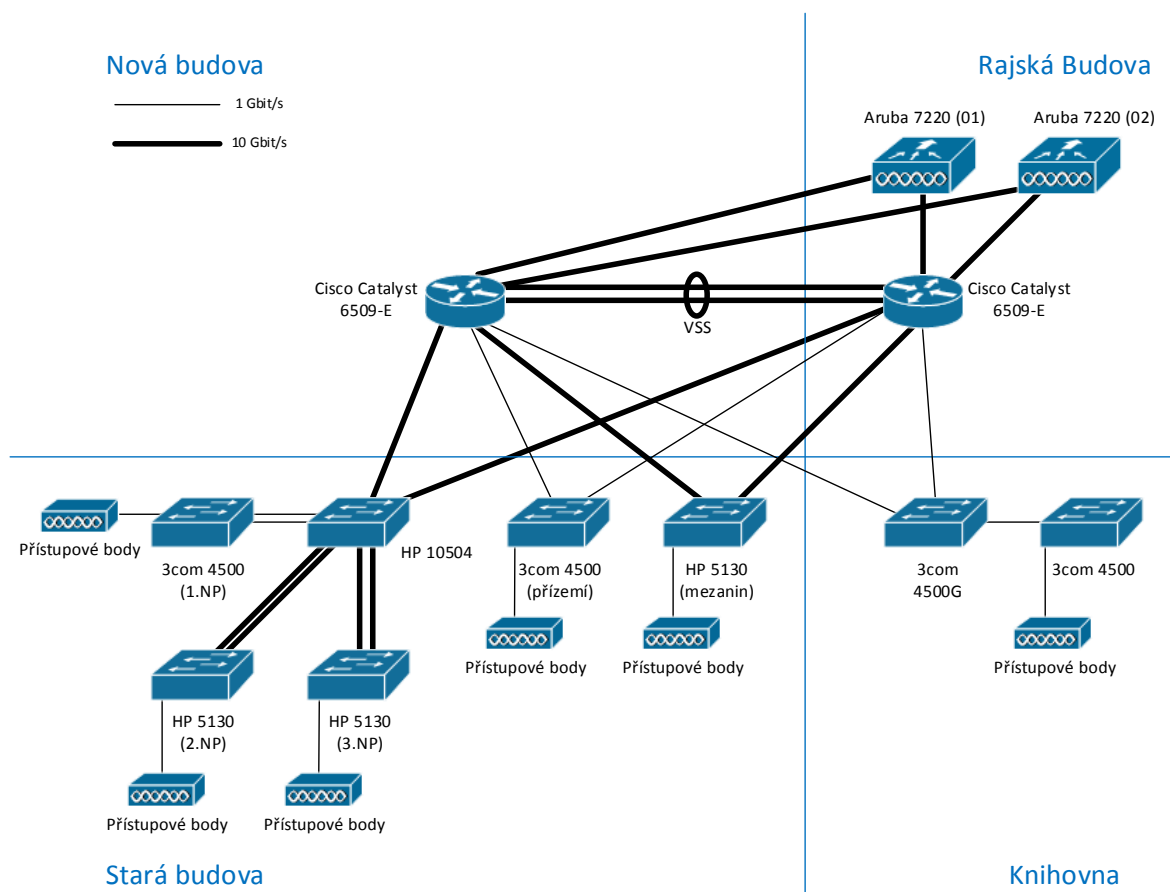
Operátoři 802.cz a Mikrotech konkrétní aplikace nedoporučují, nicméně dle diskuzních fór mají uživatelé kladné zkušenosti s českou aplikací Acrobats Softphone.

Tabulka 6 - Přehled populárních mobilních aplikací (zdroj: autor)

Aplikace	Cena Android	Cena iOS	Podporované kodeky
OpenScape Mobile	Zdarma	Zdarma	G.711, G.722
Fayn	Zdarma	Není k dispozici	G.711, G.722, G.729
Bria	230,-	220,-	G.711, G.722, G.729 (220,-)
CSipSimple	Zdarma	Není k dispozici	G.711, G.722, G.726, G.729 (245,-)
Zoiper	Zdarma	Zdarma	G.711, G.722, G.726, G.729 (245,-)
Acrobats Softphone	135,-	190,-	G.711, G.729 (270,-)

6 Technické vybavení VŠE

Veškeré testování v reálném prostředí jsem prováděl v lokalitě s nově nasazeným bezdrátovým řešením ve Staré budově na Žižkově, jejíž podrobnější strukturu s důrazem na prvky bezdrátové sítě lze vidět na obrázku 14.



Obrázek 14 - Struktura sítě VŠE – Stará budova Žižkov (zdroj: autor)

Design celé počítačové sítě VŠE využívá třístupňového hierarchického modelu, tedy jádra, distribuční vrstvy a přístupové vrstvy. Celá síť je poměrně heterogenní. Služby jádra zajišťuje dvojice L3 přepínačů Cisco řady Catalyst 6509-E. Prvky distribuční a přístupové vrstvy pak tvoří zařízení od společnosti HP, respektive jí akvizovaných výrobců síťových prvků H3C a 3com.

Přepínače jádra Cisco Catalyst 6509-E používají technologii VSS⁵¹, díky které společně tvoří jeden virtuální přepínač. Toho využívají přepínače distribuční vrstvy, které jsou zapojeny optickými spoji o

⁵¹ Virtual Switching System

rychlostech 1 Gbit/s nebo 10Gbit/s do každého prvku jádra a zároveň mohou využívat předností technologie etherchannel, která umožňuje vyvažování zátěže obou linek a vysokou dostupnost.

Distribuční vrstvu v severní části budovy zajišťuje přepínač s vysokou dostupností HP 10504, který obsahuje dva řídicí supervizory a dva 48 portové 10 Gbit/s moduly. Každý prvek přístupové vrstvy je zapojen jedním optickým spojem do každého z nich, čímž je zajištěna vysoká dostupnost i pro koncová zařízení. Distribuční vrstvu jižní části budovy zabezpečuje starší přepínač 3com 4500G, který připojuje prvky přístupové vrstvy jedním metalickým spojem o rychlosti 1 Gbit/s. Distribuční vrstvu výpočetního centra zajišťuje přepínač HP 5130, který připojuje prvky přístupové vrstvy jedním metalickým spojem o rychlosti 1Gbit/s. Několik přístupových bodů je připojeno přes dočasný rozvaděč s hlavním prvkem 3com 4500.

Bezdrátovou síť, telefonní ústřednu a bezpečnostní prvky jsem podrobněji popsal v následujících podkapitolách.

6.1 Bezdrátová síť

Bezdrátovou sítí jsou pokryty všechny výukové i nevýukové prostory VŠE. Kromě areálů na Žižkově (Stará budova, Nová budova, Rajská budova a Italská budova) a Jižním Městě, jsou pokryty i školní koleje (Jarov I. A, B, C, D a E, Jarov II., Jarov III. F a G, Blanice, Vltava a Rooseveltova kolej) a vzdálené lokality školy (Třebešín, Točná, Dobronice, Mariánská a Nicov). Areál Jindřichova Hradce má vlastní infrastrukturu. V současné době je ve všech lokalitách provozováno celkem 766 přístupových bodů připojených k 6 řadičům.

Nové řešení od společnosti Aruba je nasazeno ve Staré budově a skládá se z 2 bezdrátových řadičů Aruba 7220 a 86 přístupových bodů Aruba 103. Každý řadič podporuje až 1 024 přístupových bodů (momentálně disponuje licencí na 128), 24 576 současně připojených uživatelů a maximální propustnost 40 Gbit/s [38]. Každý řadič je v současné době zapojen 10 Gbit/s spoji do obou přepínačů jádra. Mezi sebou řadiče využívají technologii vysoké dostupnosti a sdílí své licence. Se stávajícími licencemi je tedy možné připojit až 256 přístupových bodů v režimu vysoké dostupnosti active/standby, kdy je každý přístupový bod přihlášen k oběma řadičům zároveň. V případě nedostupnosti jednoho z nich dojde k bezvýpadkovému přepnutí režimu a koncoví klienti nezaznamenají žádné potíže.

Přístupové body Aruba 103 jsou napájeny přes PoE⁵², pracují na rychlostních standardech 802.11a/b/g/n a podporují technologii MIMO⁵³ v režimu 2x2:2 se ziskem antén 4dBi v pásmu 2,4 GHz a 4,5dBi v pásmu 5 GHz. Jejich operační teplota je -40°C – 70°C, tedy naprosto dostačující ve všech situacích [39]. V každém frekvenčním pásmu jsou vysílány tři SSID. První z nich, eduroam, je hlavní univerzitní bezdrátová síť a naprostá většina uživatelů se připojuje právě k ní. Druhá síť, conference, slouží pro účastníky konferencí konaných na půdě VŠE. Poslední síť je servisní ad-network, která má skryté SSID a slouží k přihlašování uživatelů notebooků v administraci školy do domény Active Directory.

Přístupové body jsou ve Staré budově nainstalovány v každé z 62 učeben. Zbylých 24 přístupových bodů je rozmístěno v knihovně, kancelářích a na chodbách.

6.2 Telefonní ústředna

Hlavní telefonní ústředna Siemens HiPath 4000 s řídicím systémem Unify OpenScape 4000 v7 je umístěna v rozvaděči v Nové budově na Žižkově. Současná licence umožňuje připojení až 2 350 libovolných zařízení, tedy analogových, systémových a DECT telefonů, případně proprietárních IP telefonů či nezávislých SIP klientů. VoIP modul ústředny podporuje kodeky G.711, G.722 a G.729, bohužel ale nedisponuje licencí na připojení proprietární aplikací OpenScape Mobile v operačních systémech Apple iOS a Android. Tuto licenci se mi nepodařilo zajistit ani pro testovací účely.

Přestože VŠE využívá pobočkové telefonní ústředny i ve vzdálených lokalitách, mezi které patří Jindřichův Hradec, Jarov či Rooseveltova kolej, veškeré testování probíhalo na hlavní telefonní ústředně na Žižkově.

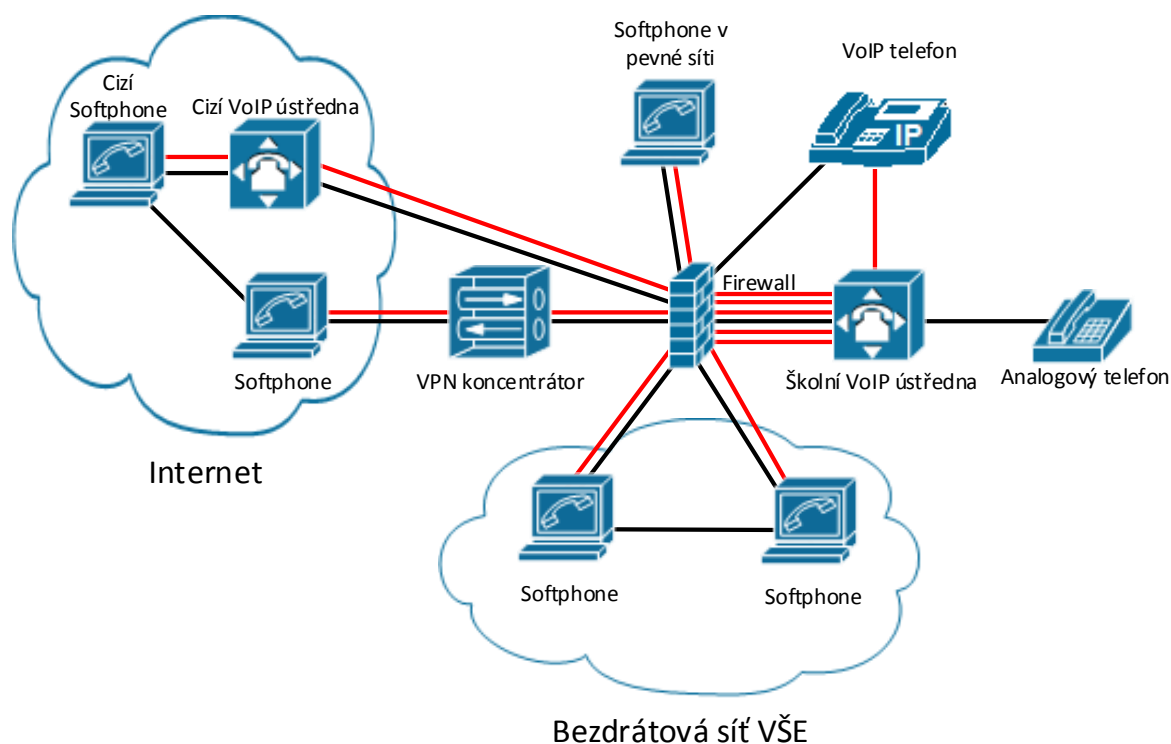
6.3 Zabezpečení

Registrace telefonního čísla na školní VoIP ústředně je z internetu povolena pouze přes VPN koncentrátor, jehož služby poskytuje zařízení Cisco ASA 5540. Průběh volání lze sledovat na obrázku 15, přičemž červená barva zobrazuje cesty signálního protokolu SIP, černá pak možné trasy pro samotnou hlasovou RTP komunikaci. Při pokusu o VoIP volání, ať už z nebo na telefonní číslo registrované školou, zasílá volající zařízení signální požadavek SIP školní VoIP ústředně. Ten vždy prochází firewallem, jež je provozován na Cisco ASA Services modulech na obou prvcích jádra Cisco Catalyst 6509-E (vyjma komunikace mezi VoIP telefony ve speciální podsíti). Ústředna požadavek zpracuje a přepoše požadovanému koncovému zařízení s daným registrovaným telefonním číslem.

⁵² Power over Ethernet

⁵³ Multiple-input multiple-output

Samotný datový tok, vyjma hovorů na analogová zařízení, již probíhá mimo telefonní ústřednu, většinou přes firewall, a řídí se klasickými směrovacími pravidly. Pokud jsou uživatelé ve stejné podsíti, například v bezdrátové síti eduroam, probíhá komunikace přímo mezi klienty. Pokud jsou oba uživatelé v internetu, probíhá datový tok zcela mimo školní infrastrukturu.



Obrázek 15 - SIP a RTP cesty na telefonní čísla VŠE (zdroj: autor)

6.4 Modely nasazení VoIP v bezdrátové síti

Nasazení VoIP v bezdrátové síti VŠE může probíhat podle různých modelů, přičemž je třeba zvážit jejich reálné i ekonomické přínosy a náklady. Samotné analýze jsem se v práci nevěnoval, a proto jsem detailně testoval celou řadu oblastí s cílem dosažení co nejkomplexnějších výsledků, které budou vhodné pro široké spektrum případů užití. Služba by byla přínosná zejména pro „mobilní“ pracovníky, jako jsou zaměstnanci údržby, ostrahy nebo úklidu. Dalšími cílovými uživateli by mohli být například pracovníci výpočetního centra – helpdesku, případně audiovizuálního oddělení. Jako méně přínosnou službu shledávám pro učitele nebo úřednické pracovníky. Při nasazení služby je třeba brát v úvahu cílové uživatele a ideálně nakonfigurovat technické vybavení pro jejich případ užití.

7 Testování

Testování kvality VoIP hovorů v bezdrátové síti jsem rozdělil do tří klíčových oblastí. První oblast se zaměřuje na kvalitu hovoru jako takovou, kdy v připravené laboratoři testuji vliv různých funkcí a parametrů bezdrátové sítě na klienty v nevytíženém i plně vytíženém prostředí. Druhá oblast se věnuje porovnání rozdílného hardwarového a softwarového vybavení. Třetí oblast souvisí s kvalitou hovoru při roamingu, kdy testuji vliv různých funkcí a parametrů bezdrátové sítě v pohybu v reálném prostředí Staré budovy na Žižkově. Testováním tří různých oblastí jsem se snažil dosáhnout co možná nejširších a nejkompaktnějších výsledků, které jsou nezávislé na případném modelu nasazení VoIP v bezdrátové síti VŠE.

Během testování kvality hovoru se věnuji především hodnotám odezvy, jitteru a ztrátovosti paketů, které jsou pro výpočet MOS nejpodstatnější. V průběhu měření je také důležité, aby použité funkcionality či nastavení neměly negativní dopad na běžné klienty. Proto sleduji i vliv jednotlivých nastavení na odezvu, ztrátovost paketů a propustnost (stahování i nahrávání) bezdrátově připojených počítačů.

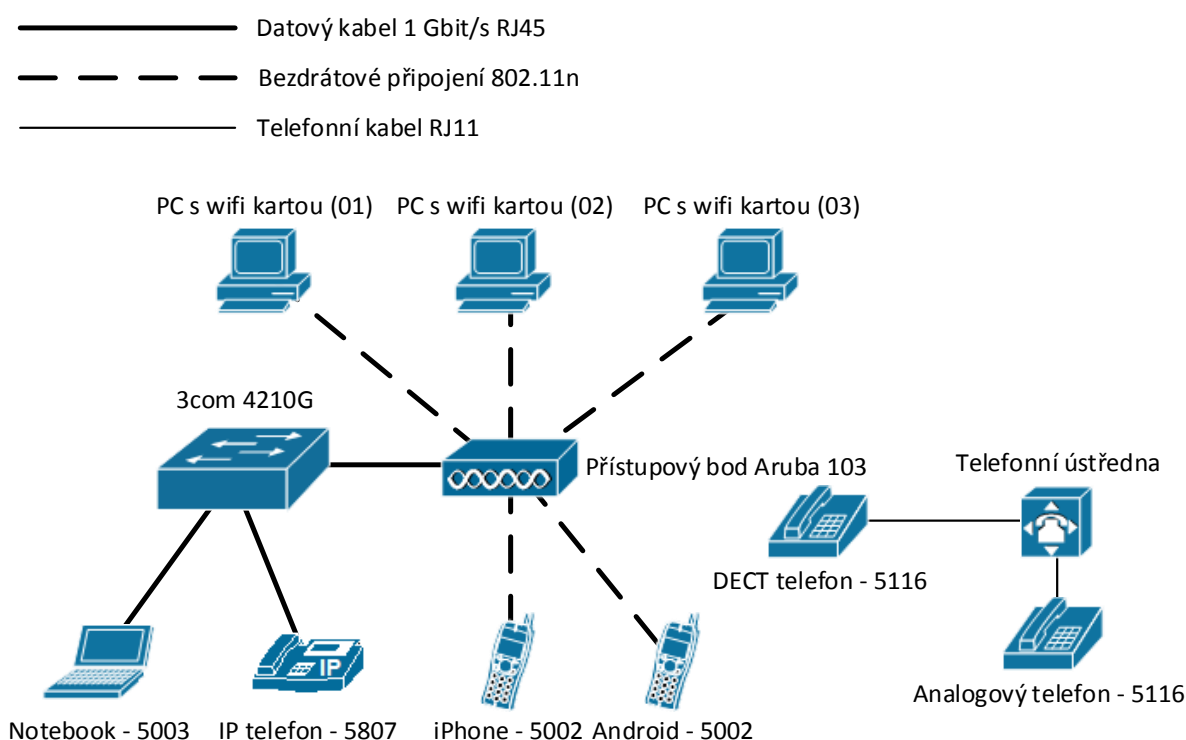
- **Kvalita hovoru v laboratorním prostředí**
 - 1) Kvalita hovoru ve výchozím nastavení
 - 2) Kvalita hovoru při použití detekce hovorů na bezdrátovém radiči
 - 3) Kvalita hovoru s použitím WMM (802.11e)
- **Kvalita hovoru rozdílného hardwarového a softwarového vybavení**
 - 1) Kvalita hovoru při použití kodeků G.711, G.722 a G.729
 - 2) Porovnání kvality hovoru různých zařízení
 - 3) Porovnání kvality hovoru SIP a Skype
- **Kvalita hovoru při roamingu v běžném prostředí**
 - 1) Kvalita hovoru při roamingu ve výchozím nastavení
 - 2) Kvalita hovoru při roamingu s 802.11k a 802.11v
 - 3) Kvalita hovoru při roamingu s 802.11r
 - 4) Kvalita hovoru při roamingu s 802.11r, 802.11k a 802.11v

7.1 Laboratoř

Pro dosažení co nejpřesnějších a nejobektivnějších výsledků je nutné měřit kvalitu hovoru v plně kontrolovaném prostředí, a proto jsem první etapu testů provedl v mnou připravené laboratoři v místnosti SB M12 o víkendech či státních svátcích, kdy škola nebyla veřejně přístupná a neprobíhala žádná výuka ani testy, tudíž bezdrátové médium nebylo ovlivněno okolním působením.

Podstatou laboratoře tedy bylo vytvořit kontrolované prostředí, ve kterém byli VoIP zařízení i běžní bezdrátoví klienti detailně monitorováni a vytěžováni podle potřeb testů.

Schéma laboratoře lze vidět na obrázku 16.



Obrázek 16 - Testovací laboratoř

Laboratoř se skládá z celé řady drátových i bezdrátových zařízení. Jednotlivé komponenty jsou podrobněji popsány v následujících odstavcích.

3com 4210G

Laboratoř je ke školní infrastruktuře připojena přepínačem 3com 4210G, který disponuje 24 metalickými porty s maximální rychlostí 1 Gbit/s a podporou PoE o souhrnné kapacitě 370W. Další 4 porty nabízí možnost vložení optických transceiverů SFP s rychlostí 1 Gbit/s. Přepínač je zapojen dvěma optickými spoji o celkové kapacitě 2 Gbit/s s využitím agregační technologie LACP do přepínačů jádra Cisco Catalyst 6509-E.

Přístupový bod Aruba 103

Přístupový bod Aruba 103 je zapojen 1 Gbit/s metalickým spojem do přepínače 3com 4210G, kterým se pomocí technologie PoE i napájí. Přístupový bod pracuje na rychlostních standardech 802.11a/b/g/n a podporuje technologii MIMO v režimu 2x2:2. Aby v průběhu testů nedocházelo ke změnám kanálu nebo maximálního vysílacího výkonu, nastavoval jsem oba parametry ručně. Na přístupovém bodu jsem v průběhu testů monitoroval kvalitu a vytížení kanálu, procento doby vysílání a přijímání rádia a interferenci. Veškeré testování probíhalo v hlavní univerzitní bezdrátové síti eduroam, jejíž parametry jsou popsány v tabulce 7.

Tabulka 7 - Nastavení sítě eduroam

SSID	eduroam
Zabezpečení	WPA2 Enterprise
Šifrovací metoda	AES
Autentizace 802.1X	EAP – PEAP – MS-CHAPv2
Zobrazení SSID	Ano
Režim přeposílání	Tunel
Preferované pásmo	5 GHz
Izolace uživatelů	Ano
WMM	Ne
Detekce VoIP hovorů	Ne
802.11r	Ne
802.11k	Ne
802.11v	Ne

Bezdrátová síť eduroam je zabezpečena technologií WPA2 Enterprise s použitím šifrovací metody AES a autentizací MS-CHAPv2 na radius serveru. Veškerý provoz přístupového bodu se tuneluje, takže data z klientského zařízení putují přes přístupový bod na bezdrátový radič, kde se rozbíjí a pošlou dál. Ve výchozím nastavení je zapnuta funkce izolace uživatelů a Band Steering, která zařízení s podporou obou frekvenčních pásem snaží připojovat do 5 GHz pásma. Pokročilé funkcionality související s VoIP jako je WMM, detekce hovorů a roamingové standardy 802.11r, 802.11k a 802.11v nejsou ve výchozím nastavení zapnuty.

Notebook

Notebook Dell Vostro 3550 je připojený do přepínače 3com 4210G 1 Gbit/s spojem a jeho parametry lze vidět v tabulce 8. Notebook zastupuje v mé laboratoři koncového VoIP klienta v drátové síti s číslem 5003, které v nainstalovaném softwaru používá.

Tabulka 8 - Parametry testovacího notebooku

Procesor	Intel Core i3-2350M
Frekvence procesoru	2x 2,3 GHz
Operační paměť	4 GB
Pevný disk	500 GB
Ethernetový adaptér	Realtek GBE RTL8167
Operační systém	Windows 7 64bit

Na notebooku je nainstalován síťový analyzátor CommView 6.5 od společnosti TamoSoft [40], který monitoruje aktivitu sítě a zobrazuje podrobné informace o SIP spojeních, registracích a aktivních i již ukončených VoIP hovorech. Software zobrazuje zpoždění, jitter a ztrátovost paketů hovorů. K dispozici je velké množství grafů a tabulek, které detailně zachycují průběh jednotlivých hovorů nebo souhrnně zobrazují výsledky všech hovorů dohromady. Aplikace také nabízí možnost prohlížení jednotlivých paketů a jejich hlaviček.

Na notebooku je taktéž nainstalován monitorovací a testovací nástroj StarTrinity SIP Tester ve verzi 2016-03-12 [41], který dokáže simulovat příchozí i odchozí VoIP volání za použití kodeků G.711, G.723 nebo G.729 a generovat podrobné statistiky o jednotlivých hovorech, včetně jejich nahrávání. Software jsem používal se základní freeware licencí, která pro potřeby mých testů plně dostačovala.

Poslední aplikací je opensource SIP klient MicroSIP ve verzi 3.11.0 [42], který zdarma nabízí podporu kodeků G.711, G.722 i G.729.

IP telefon

IP telefon Siemens Openstage 15 s VoIP číslem 5807 je zapojen 100 Mbit/s spojem do přepínače 3com 4210G, kterým se zároveň pomocí technologie PoE napájí. Telefon je doporučovaný k ústředně HiPath 4000 a je k ní připojen pomocí proprietárního řešení firmy Siemens.

DECT telefon

Základnová stanice bezdrátového DECT telefonu Siemens Gigaset A510 je zapojena telefonním kabelem RJ11 přímo do hlavní telefonní ústředny HiPath 4000 v Nové budově. Tento model umí pracovat i v režimu VoIP, nicméně pro potřeby mých testů jsem ho používal pouze v analogovém DECT režimu s telefonním číslem 5116.

Analogový telefon

Analogový telefon je zapojen telefonním kabelem přímo do hlavní telefonní ústředny HiPath 4000 v Nové budově a sdílí telefonní číslo 5116 s DECT telefonem, neboť přívodní telefonní kabel jsem mezi oběma zařízeními v průběhu testů přepojoval.

iPhone

Mobilní telefon Apple iPhone 6 s operačním systémem iOS 9.2.1 disponuje dvoujádrovým procesorem Apple A8 o frekvencích 1,4 GHz a 1 GB operační paměti DDR3. Wi-Fi adaptér pracuje v obou frekvenčních pásmech na rychlostních standardech 802.11a/b/g/n/ac a podporuje technologii WMM i doplňující standardy 802.11r, 802.11k a 802.11v. Díky tomu byl iPhone s použitým telefonním číslem 5002 hlavním testovacím zařízením při většině měření.

Jako softphone jsem do všech mobilních zařízení zvolil bezplatnou aplikaci Zoiper [43], neboť je k dispozici pro většinu používaných operačních systémů (Apple iOS, Android, Windows, Linux, Mac) a podporuje kodeky G.711, G.722 (za poplatek) a G.729. Při předběžném testování také prokázala stabilitu, bezproblémovost a kvalitní funkcionalitu napříč platformami. V telefonu iPhone je aplikace ve verzi 3.6.1.

Android

Mobilní telefon Sony Xperia E1 s operačním systémem Android 4.4.2 disponuje Wi-Fi adaptérem, který pracuje v 2,4 GHz frekvenčním pásmu na rychlostních standardech 802.11b/g/n a nabízí podporu WMM [44].

Tento telefon sdílí číslo 5002 s telefonem iPhone, neboť jsem v průběhu testování aktivní zařízení přepínal. Na telefonu Sony lze použít nativního Android SIP klienta, nicméně pro možnost lepšího porovnání a zachování objektivit jsem dal přednost bezplatné aplikaci Zoiper [45].

PC s Wi-Fi kartou 01 – 03

Tři all-in-one počítače od společnosti HP, jejichž parametry lze vidět v tabulce 9, jsem doplnil externími USB Wi-Fi adaptéry TPlink TL-WN821N, které pracují ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz s rychlostními standardy 802.11b/g/n a nabízí podporu WMM a technologie MIMO v režimu 2x2:2 [46].

Tabulka 9 - Parametry testovacích PC s Wi-Fi kartou

Procesor	Intel Core i5-6500
Frekvence procesoru	4x 3,2 GHz (turbo 3,6 GHz)
Operační paměť	8 GB
Pevný disk	256 GB
Wi-Fi adaptér	TPlink TL-WN821N
Operační systém	Windows 7 64bit

Na počítačích je nainstalována utilita iperf ve verzi 2.0.5-3 [47], která slouží k podrobným zátěžovým testům připojení a v závislosti na režimu umožňuje odesílat či přijímat TCP nebo UDP provoz. Hlavním výstupem aplikace je měření rychlosti přenosu dat a v případě UDP paketů i ztrátovost a jitter. Utilitu jsem využíval ke kontrolovanému vytížení bezdrátové sítě a monitoringu běžných klientů.

Server

Mimo laboratoř jsem využil ještě virtuální testovací server „blesk“, připojený do školní sítě 1 Gbit/s spojem, na který jsem taktéž nainstaloval utilitu iperf ve verzi 2.0.5-3.

Tabulka 10 - Parametry serveru

Procesor	Intel Xeon CPU E5-2430L
Frekvence procesoru	2x 2,0 GHz (turbo 2,5 GHz)
Operační paměť	2 GB
Pevný disk	17,2 GB
Ethernetový adaptér	VMware VMXNET3 Ethernet Controller
Operační systém	Debian 7.9

Server se stará o kontrolované vytížení všech tří bezdrátově připojených počítačů a zaznamenávání podrobných statistik, díky kterým bylo možné sledovat vliv jednotlivých funkcí a nastavení parametrů bezdrátové sítě na běžné klienty.

7.2 Konfigurace softwaru

Základní nastavení používaných programů popsané v této kapitole bylo v průběhu většiny testů stejné. V případě úpravy parametrů či funkcionalit u specifických testů takovou skutečnost vždy zdůrazním.

CommView – notebook

Aplikaci CommView 6.5 jsem nemusel takřka vůbec konfigurovat, neboť ve výchozím nastavení zobrazovala všechny podstatné informace, včetně dat z VoIP modulu aplikace, v přehledných tabulkách a grafech automaticky.

StarTrinity SIP Tester – notebook

Konfigurace softwaru StarTrinity SIP Tester byla komplikovanější, neboť ve výchozím nastavení aplikace takřka vůbec nefungovala. Nastavení registrace telefonní čísla na VoIP ústředně jsem provedl podle tabulky 11. Z důvodu bezproblémového průchodu firewallem jsem jako transportní režim zvolil protokol TCP, který signalizační protokol SIP pro komunikaci využíval. Samotný datový tok hovorů vždy probíhal pomocí protokolu UDP.

Tabulka 11 - StarTrinity SIP Tester - Registration (UAC)

User name	5003
Password	*****
Registrar host	146.102.0.36
Registrar port	5060
Transport	TCP

V simulaci odchozích hovorů budu používat mnou připravený skript, kterým software volá na zvolené číslo (v tomto případě 5002) za použití kodeku G.711 po dobu 90 sekund. Koncový klient má na zvednutí hovoru limit 10 sekund, jinak se hovor ukončí. Zasílání SDP žádosti slouží k použití signalizace SIP protokolu a následnému zahájení RTP proudu a je nutné jej mít ve skriptu povoleno. „Recordcall value=100“ udává, že se bude nahrávat jak přijímaný zvuk (RX) tak i celý rozhovor (mix RX a TX), pro případné další zpracování.

```
<callxml>
  <call value="$random_least_busy_uac_registration(5002);" maxringtime="10000ms"
sendSdpInInitialInvite="true" codec="G711A" />
  <on event="answer">
    <recordcall value="100" />
    <playaudio value="music.wav" repeat="infinite" maxtime="90000ms" />
    <exit />
  </on>
</callxml>
```

Výsledky budu zobrazovat v tabulce Calls history (CDR), která se pravidelně ukládá do databáze a .csv⁵⁴ souboru. Ve výsledkovém filtru jsem z přibližně 50 měřitelných hodnot ponechal položky Created, Answered Duration, RTP stream, Codec, Caller max RFC3550 jitter, Caller mean RFC3550 jitter, Called max RFC3550 jitter, Called mean RFC3550 jitter, RTCP RTT (min/avg/max), RTCP caller packet loss a RTCP called packet loss, které jsem dále zpracovával.

⁵⁴ Comma-separated values

MicroSIP – notebook

V aplikaci MicroSIP jsem povolil podporu kodeků G.711, G.722 a G.729. V aplikaci jsem neregistroval telefonní číslo, protože ji využiji jen pro testování porovnání kodeků, které provedu přímým SIP voláním na IP adresu PC s Wi-Fi kartou, bez využití VoIP ústředny.

Zoiper – iPhone

Nastavení aplikace Zoiper ve verzi 3.6.1 na telefonu iPhone lze vidět v tabulce 12. Telefon se podle jména účtu – čísla a hesla přihlašuje k doméně – VoIP ústředně. Pro SIP protokol jsem zvolil režim TCP, neboť klade nižší nároky na zařízení a méně vytěžuje baterii. Vzhledem k tomu, že školní IP adresy jsou veřejné, není třeba povolovat funkce Rport, STUN či proxy. Pro možnost navázání přímého spojení z jiného VoIP zařízení jsem nastavil lokální SIP Port na výchozí hodnotu 5060. Porty pro RTP jsem nechal náhodné.

Tabulka 12 - Konfigurace aplikace Zoiper - iPhone

SIP Options	
Account Name	5002
Domain	146.102.0.36
User name	5002
Password	*****
Caller ID	5002
Networks Settings	
Transports	TCP
Rport	Don't Use
Enable STUN	No
Use Outbound Proxy	No
Audio codecs	
a-law	Yes
u-law	No
G. 722	No
G. 729	No
Advanced Settings	
Local SIP Port	5060
Local RTP Port	Random

Zoiper – Android

Nastavení aplikace Zoiper ve verzi 1.35 na telefonu Android lze vidět v tabulce 13 a je velmi podobné nastavení aplikaci na telefonu iPhone. Telefon se podle jména účtu – čísla a hesla přihlašuje k doméně – VoIP ústředně. Pro SIP protokol jsem opět zvolil režim TCP, neboť funguje lépe přes firewall a méně vytěžuje baterii. Stejně jako u verze pro iPhone jsem nepovoloval funkce Rport, STUN či proxy.

V podporovaných sítích jsem povolil pouze Wi-Fi, abych vyloučil situaci, kdy bezdrátové připojení vypadne a telefon by se snažil volat přes mobilní datovou síť. Lokální SIP Port jsem nastavil na výchozí hodnotu 5060. Porty pro RTP jsem nechal náhodné.

Tabulka 13 - Konfigurace aplikace Zoiper - Android

SIP Options	
Account Name	5002
Host	146.102.0.36
User name	5002
Password	*****
Caller ID	5002
Networks Settings	
Transport type	TCP
Use Rport	No
Use STUN	No
Outbound Proxy	No
Supported networks	Wifi
Audio codecs	
a-law	Yes
u-law	No
G. 722	No
G. 729	No
Listening Ports	
Local SIP Port	5060
Local RTP Port	Random

Iperf – PC s Wi-Fi kartou 01 – 03

Pro vytížení bezdrátové sítě a monitoring jsem na počítačích s Wi-Fi kartou připravil pro utility iperf ve verzi 2.0.5 tři skripty. První slouží k testu TCP uploadu, druhý k TCP downloadu, zatímco třetí generuje 8 Mbit/s UDP provoz v obou směrech. Jde tedy o test downloadu i uploadu zároveň.

```
#PC s Wi-Fi kartou 01
#test pro TCP spojení (upload)
spust_tcp_upload.bat
iperf.exe -c blesk.net.vse.cz -P 1 -i 10 -p 5002 -f m -t 3600
#
#PC s Wi-Fi kartou 02
#test pro TCP spojení (download)
spust_tcp_download.bat
iperf.exe -s -P 0 -i 10 -p 5002 -f m
#
#PC s Wi-Fi kartou 03
#test pro obousměrný UDP provoz (upload i download)
```

```

spust_udp_dual.bat
iperf.exe -c blesk.net.vse.cz -u -P 1 -i 10 -p 5001 -f m -b 8M -t 3600 -d -L 5001
#
#popis parametrů
#-c blesk.net.vse.cz = režim klienta se serverem blesk.net.vse.cz
#-s = režim serveru
#-u = udp (bez parametru defaultně tcp)
#-P 0/1 = počet paralelních spojení neomezeně/1
#-i 10 = interval monitoringu 10 sekund
#-p 5001/2 = využití portu 5001/2
#-f m = formát dat Mbit/s
#-b 8M = bandwidth 8 Mbit/s (v režimu UDP)
#-t 3600 = čas testování 3600 sekund (1 hodina)
#-d = duální režim (pro test downloadu i uploadu)
#-L 5001 = naslouchající port 5001 pro duální režim

```

Iperf – server

Pro utilitu iperf v pevné síti jsem na virtuálním serveru blesk.net.vse.cz připravil tři skripty. Každý z nich slouží jako protistrana jednomu ze skriptů na počítačích s Wi-Fi kartou.

```

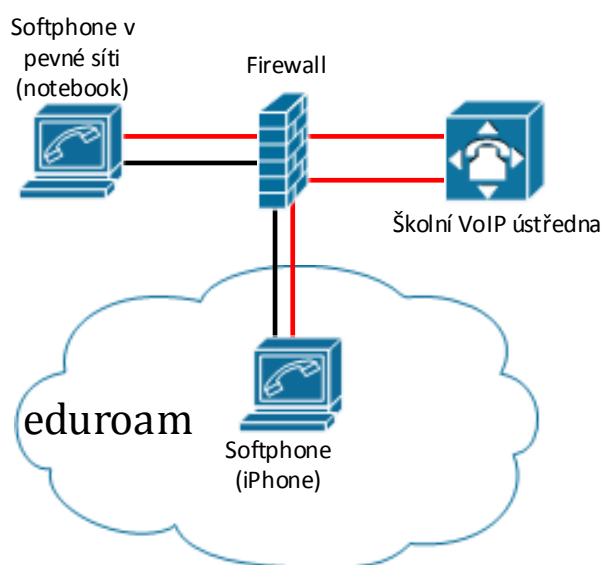
#spuštění serveru v režimu TCP pro testování uploadu PC s Wi-Fi kartou
spust_tcp_server.sh
iperf -s -P 0 -i 10 -p 5002 -f m
#
#spuštění TCP klienta pro testování downloadu PC s Wi-Fi kartou
iperf -c pc-wifi-02 -P 1 -i 10 -p 5002 -f m -t 3600
#
#spuštění serveru v režimu UDP pro testování uploadu i downloadu PC s Wi-Fi kartou
spust_udp_server.sh
iperf -s -u -P 0 -i 10 -p 5001 -f m
#
#popis parametrů
#-s = režim serveru
#-c pc-wifi-02 = režim klienta s IP adresa PC s Wi-Fi kartou 02
#-u = udp (bez parametru defaultně tcp)
#-P 0/1 = počet paralelních spojení neomezeně/1
#-i 10 = interval monitoringu 10 sekund
#-p 5001/2 = využití portu 5001/2
#-f m = formát dat Mbit/s
#-t 3600 = čas testování 3600 sekund (1 hodina)

```

7.3 Kvalita hovoru v laboratorním prostředí

V první etapě testování jsem zkoumal vliv různých nastavení bezdrátové sítě i koncových zařízení na kvalitu hovoru ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a vzájemně výsledky měření porovnával. Během jednotlivých měření jsem používal předpřipravené skripty a pro každou situaci provedl 10 telefonních hovorů o délce 90 sekund. Pro testování nevytíženého prostředí bezdrátové sítě eduroam jsem v době, kdy neprobíhala výuka, vypnul všechny ostatní přístupové body i SSID. Vytížení kanálu se blížilo 0%. Pro testy ve vytíženém prostředí jsem na počítačích s Wi-Fi kartou a serveru blesk.net.vse.cz použil předpřipravené skripty pro utilitu iperf. První počítač sloužil k měření rychlosti TCP downloadu, druhý k rychlosti TCP uploadu. Třetí počítač monitoroval ztrátovost odesílaných a přijímaných UDP paketů o velikosti 8 Mbit/s každým směrem, čímž simuloval několik videokonferenčních hovorů nebo přenos IPTV. Po každé úpravě konfigurace a před spuštěním telefonních hovorů jsem postupně změřil maximální výkon jednotlivých počítačů s Wi-Fi kartou, tedy průměrnou odezvu, maximální TCP download, TCP upload a ztrátovost UDP paketů. Vytížení kanálu se během testování ve vytíženém prostředí blížilo 100%, přičemž v běžné pracovní dny se ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz obvykle pohybuje kolem 40%.

Všechny testy první etapy kvalita hovoru v laboratorním prostředí probíhaly podle obrázku 17. Z notebooku v pevné síti jsem pomocí softwaru StarTrinity SIP Tester volal na mobilní telefon iPhone s aplikací Zoiper, který byl připojený ve 2,4 GHz frekvenčním pásmu bezdrátové sítě eduroam. Při navazování spojení notebook zasílal SIP pakety přes firewall na telefonní ústřednu, která je přeposlala mobilnímu telefonu iPhone s registrovaným číslem (na obrázku červená barva). Samotný datový RTP provoz pak probíhal přes firewall bez účasti telefonní ústředny (na obrázku černá barva).



Obrázek 17 - SIP a RTP cesty v laboratorním prostředí

Pro určení kvality hovoru je nejpodstatnější hodnota MOS, kterou bohužel software StarTrinity SIP Tester nezobrazoval správně, a tak jsem si ji z naměřených údajů vypočítával sám. Jako vzor jsem využil popis od dodavatele řešení monitoringu sítě PingMan Tools [48]. Kvalita hovoru MOS pro kodek G.711 může nabývat maximální hodnoty 4,4 a zjednodušeně se vypočítá pomocí konstanty R_0 o hodnotě 93,2 a z údajů o zpoždění, jitteru a ztrátovosti paketů mnou připraveným vzorcem v Excelu, který je vidět v tabulce 14.

Tabulka 14 - Výpočet MOS v Excelu

Vstupní údaje	Ztrátovost Paketů (%)	P
	Průměrné zpoždění (ms)	Z
	Jitter (ms)	J
	Konstanta kodeku	R_0
Dočasné proměnné	EL (Efektivní latence)	$Z+2*J+10$
	R_1 (zpoždění a jitter)	$R_0 -(EL/4)$
	R (R_1 a ztrátovost)	$R_1-(P*2,5)$
Výsledek	MOS	$1+(0,035)*R+(0,000007)*R*(R-60)*(100-R)$

7.3.1 Výchozí nastavení

V prvním testu jsem měřil kvalitu hovoru ve výchozím nastavení bezdrátové sítě, přístupového bodu i klientů. Veškeré parametry tedy odpovídaly popisu laboratoře.

Před zahájením testovacích hovorů jsem postupně změřil maximální hodnoty propustnosti bezdrátové sítě pro běžné klienty. Každý počítač s Wi-Fi kartou jsem testoval samostatně, přičemž na prvním z nich naměřil maximální TCP download 64,2 Mbit/s, na druhém maximální TCP upload 34,7 Mbit/s a na třetím UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 0,37%. Tyto hodnoty mi posloužily jako základ pro porovnání s hodnotami naměřenými po úpravách konfigurace.

Tabulka 15 - Kvalita hovoru - Výchozí nastavení - Nevytížené prostředí

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
1	24.3.2016 13:02	8,55	23,10	9,29	20,36	0,20	4,38	-
2	24.3.2016 13:06	7,94	21,63	1,05	13,51	0,22	4,39	-
3	24.3.2016 13:10	7,15	9,72	1,40	13,54	0,18	4,39	-
4	24.3.2016 13:12	9,22	25,09	1,39	13,62	0,18	4,39	-
5	24.3.2016 13:16	9,08	24,62	2,47	26,96	0,13	4,39	-
6	24.3.2016 13:18	8,23	18,60	1,39	13,25	0,22	4,39	-
7	24.3.2016 13:21	7,43	10,95	2,36	13,70	0,09	4,39	-
8	24.3.2016 13:24	11,09	30,50	3,03	28,17	0,13	4,39	-
9	24.3.2016 13:26	9,37	26,43	2,69	27,76	0,13	4,39	-
10	24.3.2016 13:28	9,29	22,05	1,43	11,83	0,00	4,40	-
souhrn		8,74	30,50	2,65	28,17	0,15	4,39	-

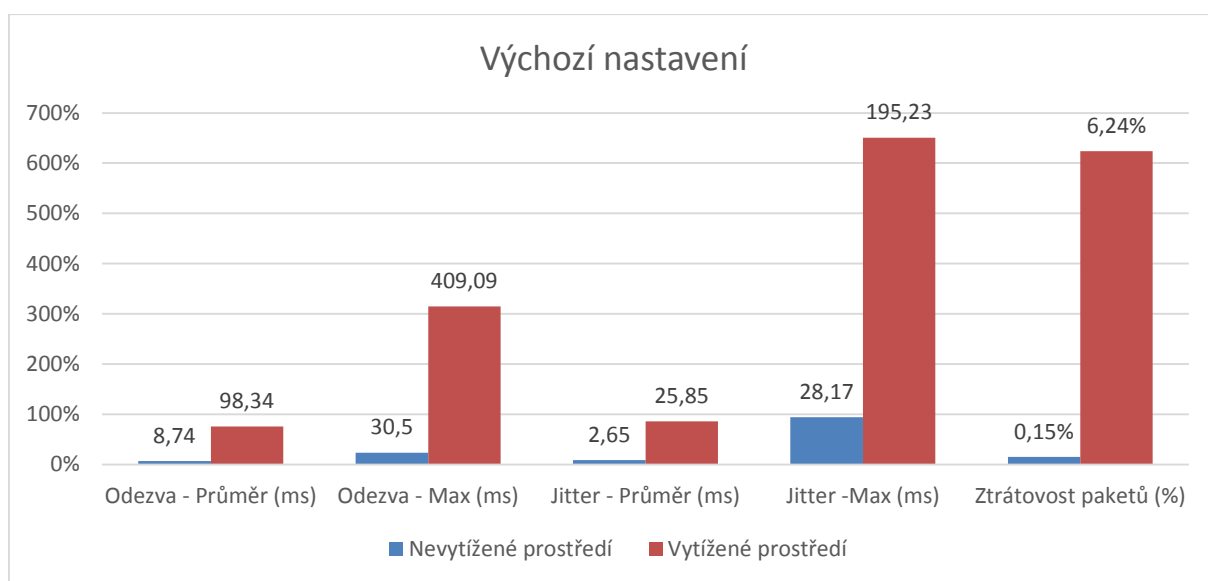
Ve výchozím nastavení jsem v nevytíženém prostředí naměřil velmi dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,39, což je pro použitý kodek G.711 těsně pod hranicí absolutní kvality. Hodnoty průměrné i maximální odezvy byly velmi nízké. Ke znatelnému zhoršení kvality hovoru dochází až kolem hodnoty 130ms. Přestože se maximální úroveň jitteru přibližovala k hraniční hodnotě 30ms, průměrný jitter byl řádově nižší. Ztrátovost paketů 0,15% měla do hraniční hodnoty 1% velmi daleko. Během jednotlivých hovorů docházelo jen k velmi drobným výkyvům. Sloupec ID v této i následujících tabulkách označuje číslo pokusu, kterým byly provázány výsledky z aplikací StarTrinity SIP Tester, CommView a údajů z řadiče.

Tabulka 16 - Kvalita hovoru - Výchozí nastavení - Vytížené prostředí

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
11	24.3.2016 16:35	56,15	108,35	21,18	87,11	4,01	4,04	-
12	24.3.2016 16:38	67,35	138,82	16,51	55,63	2,84	4,14	-
13	24.3.2016 16:41	115,60	275,25	19,52	102,15	8,61	3,48	-
14	24.3.2016 16:43	56,74	195,37	23,84	131,41	5,59	3,88	-
15	24.3.2016 16:47	150,42	332,87	32,32	101,55	6,23	3,69	-
16	24.3.2016 16:50	161,19	409,09	37,15	195,23	9,82	3,23	-
17	24.3.2016 16:54	97,46	213,51	23,59	109,87	5,15	3,88	-
18	24.3.2016 16:57	116,74	273,00	33,84	157,70	5,33	3,82	-
19	24.3.2016 17:00	76,37	206,20	24,78	152,91	6,22	3,79	-
20	24.3.2016 17:02	85,42	216,84	25,80	163,82	8,61	3,50	-
souhrn		98,34	409,09	25,85	195,23	6,24	3,75	-

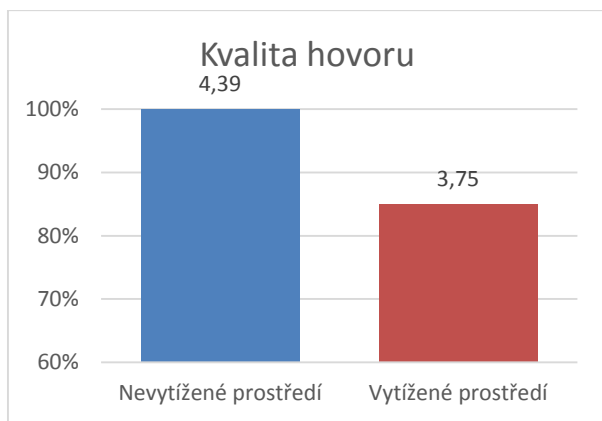
Naproti tomu jsem ve výchozím nastavení a vytíženém prostředí naměřil poměrně špatné výsledky. Průměrný MOS byl 3,75, což pro použitý kodek G.711 odpovídá rozmezí hodnocení „někteří uživatelé nespokojeni“ a „mnoho uživatelů nespokojeno“. Hodnoty průměrné, ale zejména maximální odezvy byly velmi vysoké, neboť u 9 z 10 telefonních hovorů došlo k překročení doporučené hodnoty, ve 2 případech dokonce u průměrné odezvy. Podobně na tom byla i úroveň jitteru, neboť limitní hodnota byla překročena ve všech testovacích hovorech, ve 3 případech pak i u průměrného jitteru. Všechny 10 testovacích hovorů také překročilo limitní hranici ztrátovosti paketů, průměrná ztrátovost paketů byla vysokých 6,24%, což mnohonásobně překračuje limitní hranici. Během jednotlivých hovorů docházelo k velkým a nepředvídatelným výkyvům kvality, ať už z důvodu odezvy, jitteru nebo ztrátovosti paketů.

Při porovnání nevytíženého a vytíženého prostředí lze sledovat na obrázku 18 minimálně desetinásobné rozdíly v naměřených hodnotách. Hladina 100% představuje v tom i následujících grafech limitní hranici pro každý parametr, tedy 130ms pro odezvu, 30ms pro jitter a 1% pro ztrátovost paketů.



Obrázek 18 - Nevytížené a vytížené prostředí ve výchozím nastavení

Na obrázku 19 lze sledovat velkou degradaci kvality hlasu, kterou ve výchozím nastavení a vytíženém prostředí lze považovat za nedostatečnou. Hladina 100% představuje maximální dosažitelný MOS pro kodek G.711, a to 4,4.



Obrázek 19 - Kvalita hovoru ve výchozím nastavení

Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 85,1ms, TCP download 24,04 Mbit/s, TCP upload 12,53 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 8,31%.

7.3.2 Detekce hovorů na řadiči

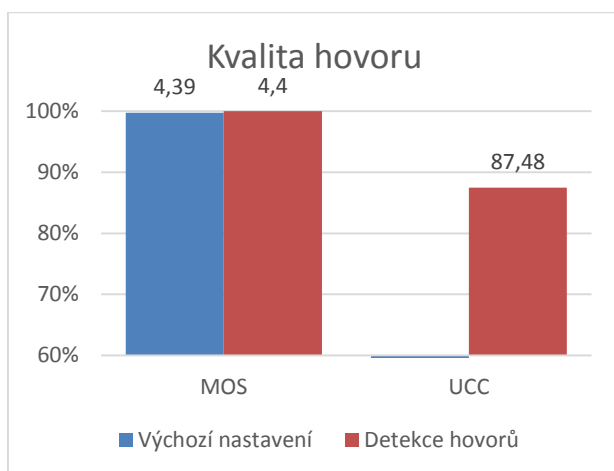
Druhý test měření kvality hovoru jsem provedl po zapnutí detekce hovorů na řadiči. Detekci hovorů zpracovává řadič bezdrátové sítě v součinnosti s přístupovými body pomocí proprietárních mechanismů společnosti Aruba. Co všechno se v nastavení bezdrátové sítě změnilo, se mi v odpovědi od vývojářů nedostalo. Aktivace této funkcionality nezvýšila vytížení procesoru řadiče ani přístupových bodů. Po aktivování detekce hovorů začne řadič zaznamenávat SIP provoz a monitorovat jeho průběh a parametry přístupového bodu a bezdrátového klienta, z kterých vypočítává skóre UCC. To se dle interních informací od vývojářů společnosti určuje dle specifikace ITU-T G.113, přičemž se od základní konstanty R_0 o hodnotě 93,36 odečtou faktory zpoždění (především odezvy a jitteru) a vybavení (zejména použitý kodek a vliv ztrátovosti paketů). Všechny informace monitoruje přístupový bod, který je přeposílá řadiči k reálnému zpracování. UCC skóre do 30 je označováno jako „poor quality“, skóre mezi 31 a 70 jako „fair quality“ a skóre nad 71 jako „good quality“.

Maximální TCP download jednotlivých počítačů s Wi-Fi kartou byl 63,2 Mbit/s, TCP upload 35,8 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 0,43%, tedy hodnoty takřka shodné s hodnotami výchozího nastavení.

Tabulka 17 - Kvalita hovoru - Detekce hovorů na řadiči - Nevytížené prostředí

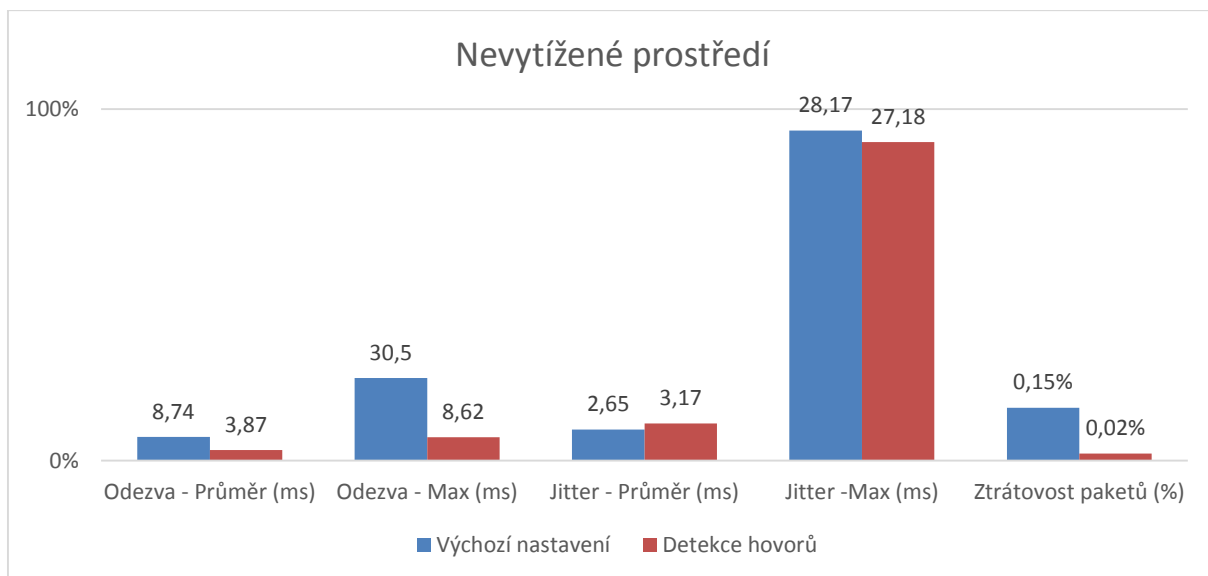
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
21	24.3.2016 14:10	4,26	7,68	3,55	24,13	0,00	4,40	88,61
22	24.3.2016 14:13	3,92	6,64	0,67	18,97	0,00	4,40	88,35
23	24.3.2016 14:15	3,95	6,59	1,21	20,67	0,18	4,39	86,90
24	24.3.2016 14:18	3,75	8,62	0,80	22,74	0,00	4,40	86,76
25	24.3.2016 14:22	3,62	4,21	0,52	23,67	0,00	4,40	86,88
26	24.3.2016 14:26	3,74	5,52	0,83	26,56	0,00	4,40	86,83
27	24.3.2016 14:32	4,03	5,78	0,65	23,21	0,00	4,40	87,76
28	24.3.2016 14:35	4,06	5,48	9,65	27,18	0,00	4,39	86,95
29	24.3.2016 14:41	3,80	5,60	4,89	24,95	0,00	4,40	87,45
30	24.3.2016 14:45	3,57	4,67	8,96	24,10	0,00	4,39	88,29
souhrn		3,87	8,62	3,17	27,18	0,02	4,40	87,48

Při použití detekce hovorů na řadiči jsem v nevytíženém prostředí naměřil téměř dokonalé výsledky, které lze sledovat na obrázku 20. Průměrný MOS byl 4,4, což je pro použitý kodek G.711 hodnocení maximální spokojenosti. Průměrná hodnota UCC 87,48 naměřená řadičem představuje vyšší úroveň nejlepší kategorie „good quality“.



Obrázek 20 - Kvalita hovoru při použití detekce hovorů na řadiči v nevytíženém prostředí

Hodnoty průměrné odezvy byly oproti měření výchozího nastavení poloviční, maximální odezvy dokonce jen třetinové. Úroveň jitteru byla ve srovnání s prvním testováním takřka shodná. Ztrátovost paketů 0,02% představuje jen desetinu naměřené hodnoty ve výchozím nastavení.



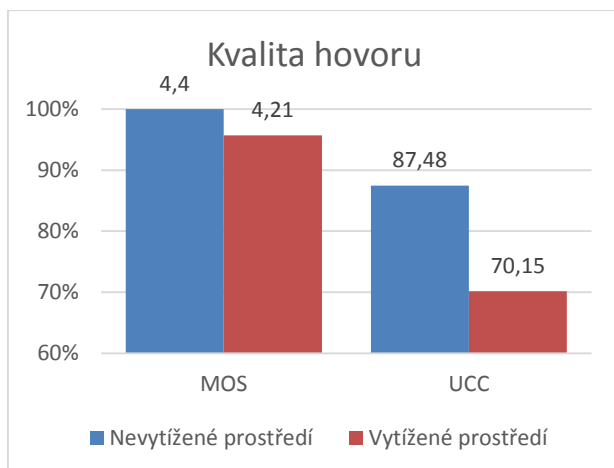
Obrázek 21 - Nevytížené prostředí při zapnuté detekci hovorů na řadiči

Při porovnání výsledků měření v nevytíženém prostředí ve výchozím nastavení a při zapnuté detekci hovorů na řadiči lze říci, že se naměřená kvalita hovoru velmi přiblížila svému maximu a pro koncového uživatele se takřka nedá zlepšit. Z tohoto důvodu jsem v dalších kapitolách nevytížené prostředí považoval za výborné a neprováděl v něm další testování.

Tabulka 18 - Kvalita hovoru - Detekce hovorů na řadiči - Vytížené prostředí

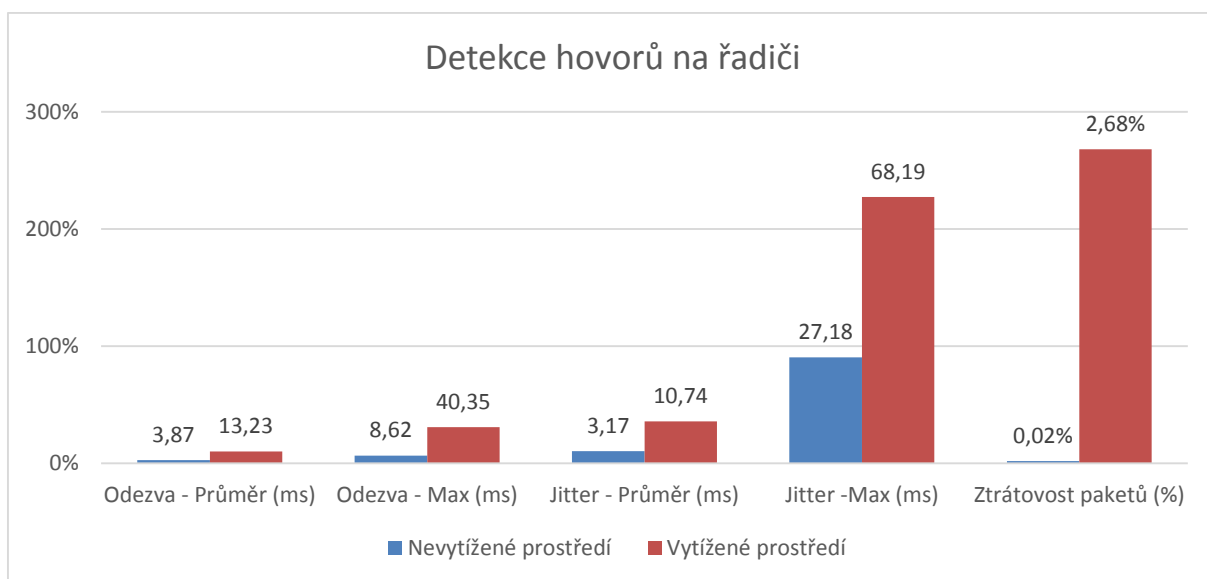
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
31	24.3.2016 17:37	15,98	38,76	8,38	31,50	2,44	4,23	69,40
32	24.3.2016 17:45	11,56	27,51	13,55	36,44	4,35	4,07	69,58
33	24.3.2016 17:50	13,47	40,10	8,20	34,26	3,08	4,18	69,58
34	24.3.2016 17:53	16,05	40,35	13,29	35,27	2,88	4,19	69,56
35	24.3.2016 17:57	9,82	19,03	8,62	47,08	1,97	4,27	69,51
36	24.3.2016 18:02	10,13	27,75	6,54	33,34	2,13	4,26	75,15
37	24.3.2016 18:10	14,07	38,74	12,49	68,19	3,84	4,11	69,78
38	24.3.2016 18:18	12,10	30,27	14,18	31,94	1,86	4,27	69,43
39	24.3.2016 18:27	13,96	32,79	13,80	45,29	2,15	4,25	69,54
40	24.3.2016 18:33	15,16	37,75	8,30	22,82	2,09	4,26	69,95
souhrn		13,23	40,35	10,74	68,19	2,68	4,21	70,15

Při použití detekce hovorů na řadiči jsem ve vytíženém prostředí naměřil poměrně dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,21, což pro použitý kodek G.711 odpovídá hodnocení „spokojení uživatelé“. Průměrná hodnota UCC 70,15 naměřená řadičem představuje rozmezí kategorií „fair quality“ a „good quality“. Porovnání vůči nevytíženému prostředí lze sledovat na obrázku 22.



Obrázek 22 - Kvalita hovoru při zapnuté detekci hovorů řadičem

Při porovnání s výsledky měření výchozího nastavení jsem zaznamenal velice zásadní zlepšení, které lze sledovat na obrázku 23. Průměrná i maximální odezva se zlepšila z 98,34 na 13,23ms, respektive ze 409,09 na 40,35ms. Při žádném z testovacích hovorů tedy nedošlo k překročení doporučených hodnot. Úroveň průměrného jitteru se zlepšila o více než polovinu, nicméně maximální jitter u 9 z 10 hovorů stále přesahoval limitní hodnotu. Přestože se ztrátovost paketů zlepšila o více než polovinu, všech 10 testovacích hovorů překročilo limitní hranici, 8 z nich dokonce o více než dvojnásobek.



Obrázek 23 - Nevytížené a vytížené prostředí při zapnuté detekci hovorů na řadiči

Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 115,1ms, TCP download 21,37 Mbit/s, TCP upload 10,65 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 9,31%, oproti výchozímu nastavení tedy došlo k mírnému snížení rychlosti a zvýšení ztrátovosti UDP paketů.

Při porovnání měření ve vytíženém prostředí ve výchozím nastavení a při zapnuté detekci hovorů na radiči je možné pozorovat znatelné zlepšení. Kvalitu hlasu lze tedy považovat za dostačující, nikoliv však dokonalou, neboť nadále překračuje některé doporučené parametry. Znatelné zlepšení kvality hlasu dostatečně vyváží drobné zhoršení vlastností pro běžné klienty a zapnutí funkce detekce hovorů na radiči lze považovat za vhodné.

7.3.3 Použití technologie WMM

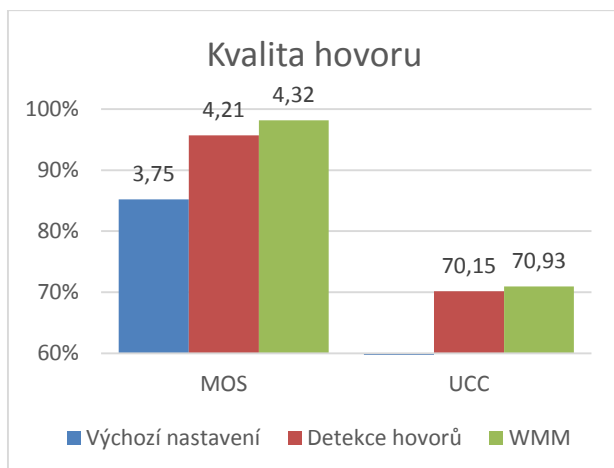
Třetí test měření kvality hovoru jsem provedl po zapnutí technologie Wireless Multimedia (WMM) a přiřazení mapování DSCP parametrů na WMM kategorie. Dále jsem nastavil shaping policy pro testovací přístupový bod na Voice Share 20%, Video Share 50%, Best-effort Share 20%, Background Share 10%, díky čemuž byla zajištěna maximální vyhrazená kapacita kanálu pro jednotlivé typy služeb při jeho plném vytížení.

Maximální TCP download jednotlivých počítačů s Wi-Fi kartou byl 61,8 Mbit/s, TCP upload 33,2 Mbit/s, UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 0,18%, což oproti výchozímu nastavení představuje snížení ztrátovosti paketů o polovinu za cenu drobného snížení maximální propustnosti.

Tabulka 19 - Kvalita hovoru - Použití WMM - Vytížené prostředí

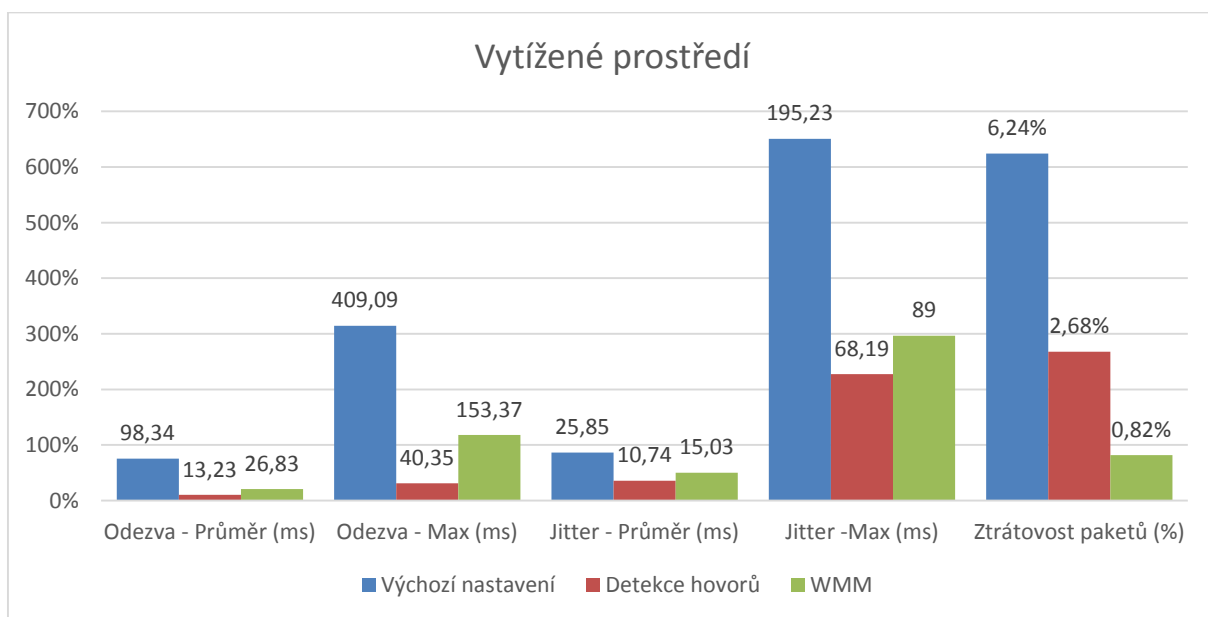
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
41	25.3.2016 14:01	29,12	36,79	19,74	54,70	1,18	4,29	69,18
42	25.3.2016 14:04	17,29	42,07	14,79	89,00	0,42	4,36	69,25
43	25.3.2016 14:06	32,77	81,11	18,15	69,70	1,86	4,25	69,22
44	25.3.2016 14:10	34,92	92,22	18,48	58,01	0,95	4,31	69,22
45	25.3.2016 14:13	24,00	68,00	11,66	40,73	0,13	4,37	69,74
46	25.3.2016 14:18	24,72	70,46	15,23	78,27	1,66	4,27	69,23
47	25.3.2016 14:20	12,43	31,71	7,37	24,05	0,00	4,39	77,83
48	25.3.2016 14:23	20,05	53,54	13,01	33,58	0,04	4,38	72,66
49	25.3.2016 14:26	17,20	43,38	14,75	73,93	0,00	4,38	73,69
50	25.3.2016 14:30	55,80	153,37	17,10	66,25	1,95	4,22	69,30
Souhrn		26,83	153,37	15,03	89,00	0,82	4,32	70,93

Při použití technologie WMM a souvisejících nastavení jsem ve vytíženém prostředí naměřil velmi dobré výsledky, které lze sledovat na obrázku 24. Průměrný MOS byl 4,32, což pro použitý kodek G.711 odpovídá hodnocení „velmi spokojení uživatelé“. Průměrná hodnota UCC 70,93 naměřená radičem takřka odpovídá spodní hranici kategorie „good quality“.



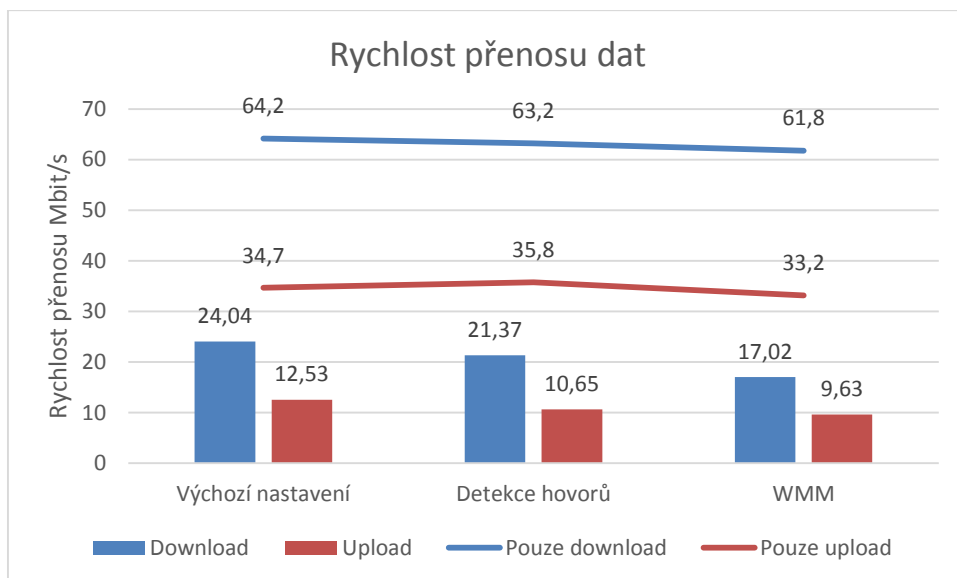
Obrázek 24 - Kvalita hovoru při zapnuté technologii WMM ve vytíženém prostředí

Při porovnání s výsledky měření se zapnutou detekcí hovorů na radiči, které lze sledovat na obrázku 25, došlo k malému zvýšení průměrné i maximální odezvy, nicméně k překročení doporučené hodnoty došlo pouze u 1 testovacího hovoru. Úroveň průměrného jitteru se takřka zdvojnásobila, stále však zůstala pod hranicí limitní hodnoty. Maximální jitter přesahoval limitní hodnotu u 9 z 10 hovorů. Ztrátovost paketů se oproti měření se zapnutou detekcí hovorů na radiči podstatně zlepšila a u 6 z 10 hovorů nepřekročila hraniční hodnotu.

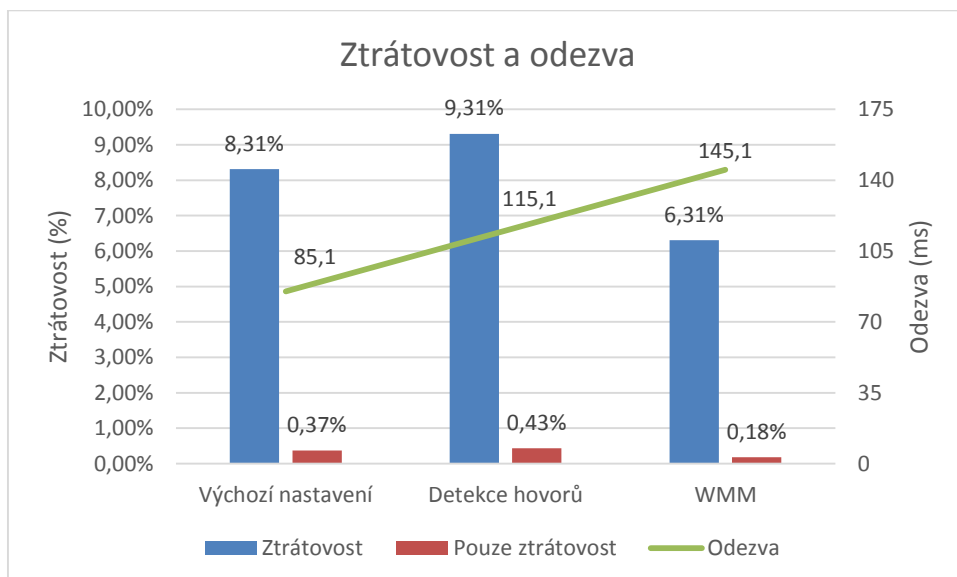


Obrázek 25 - Vytížené prostředí při zapnuté technologii WMM

Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 145,1ms, TCP download 17,02 Mbit/s, TCP upload 9,63 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 6,31%, což oproti stavu s detekcí hovorů na radiči představuje další snížení přenosové rychlosti a zvýšení odezvy za cenu nižší ztrátovosti paketů, jak lze sledovat na obrázcích 26 a 27.



Obrázek 26 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou v laboratorním prostředí



Obrázek 27 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou v laboratorním prostředí

Při porovnání měření ve vytíženém prostředí při zapnuté detekci hovoru na radiči a při použití technologie WMM je možné pozorovat drobné zlepšení. Kvalitu hlasu lze tedy považovat za velmi dobrou, ačkoliv stále mírně překračuje některé doporučené parametry. Dosažení kvality hlasu „velmi spokojení uživatelé“ v plně vytíženém prostředí za cenu mírného zhoršení vlastností pro běžné uživatele lze považovat za správný krok.

7.4 Kvalita hovoru rozdílného hardwarového a softwarového vybavení

Ve druhé etapě testování jsem zkoumal kvalitu hovoru při použití rozdílného hardwarového a softwarového vybavení. Věnoval jsem se tedy použití odlišných kodeků, testování různých drátových i bezdrátových zařízení nebo měření kvality hovoru aplikace Skype. Testování probíhalo ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz v uměle plně vytíženém prostředí pomocí počítačů s Wi-Fi kartou, nastavenou detekcí hovorů na řadiči a zapnutou technologií WMM. Během jednotlivých měření jsem používal předpřipravené skripty a pro každou situaci provedl 10 telefonních hovorů o délce 90 sekund. Vytížení kanálu se dle měřicího přístroje Fluke AirCheck Wi-fi Tester blížilo 100%. První počítač sloužil k měření rychlosti TCP downloadu, druhý k rychlosti TCP uploadu. Třetí počítač monitoroval ztrátovost odesílaných a přijímaných UDP paketů o velikosti 8 Mbit/s každým směrem, čímž simuloval několik videokonferenčních hovorů nebo přenos IPTV.

7.4.1 Kodeky G.711, G.722 a G.729

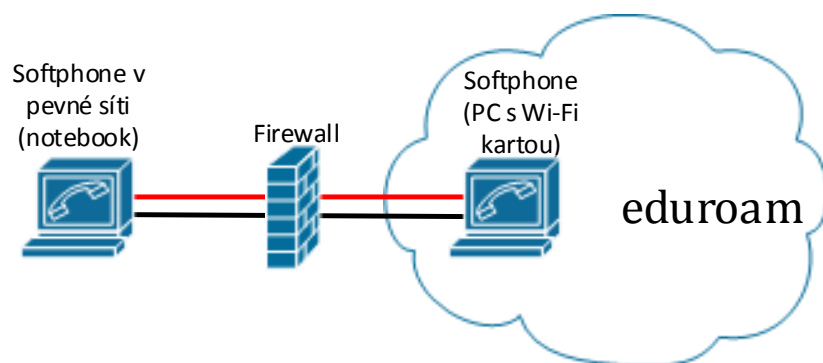
První test jsem zaměřil na srovnání kvality hlasu při použití rozdílných kodeků. Nejrozšířenější kodek G.711, který používají analogové, systémové a DECT telefony jsem porovnával s modernějšími kodeky G.722 a G.729. Prvnímu z nich se přezdívá HD audio a slouží k přenosu hlasu ve vysoké kvalitě, neboť při stejném datovém toku 64 kbit/s nabízí maximální možné MOS 4,5. Druhý z nich je pak určen pro sítě s malou propustností, neboť se vyznačuje velmi nízkým datovým tokem 8 kbit/s a nabízí maximální možné MOS 3,9.

Výpočet MOS z údajů o zpoždění, jitteru a ztrátovosti paketů se pro kodek G.729 vypočítá za pomoci stejného vzorce jako pro kodek G.711, pouze s odlišnou hodnotou konstanty $R_0=77,2$. Postup výpočtu MOS pro kodek G.722 se odlišuje, neboť excelovský vzorec z tabulky 14 je možné použít pouze pro hodnoty konstanty $0 < R_0 < 100$. Vzorec jsem tedy pro potřeby kodeku G.722 musel upravit dle doporučení G.107.1 organizace ITU z roku 2015 [49], které již s hodnotami konstanty R_0 nad 100 počítá. Mnou připravený vzorec v excelu lze vidět v tabulce 20.

Tabulka 20 - Výpočet MOS pro kodek G.722

Vstupní údaje	Ztrátovost Paketů (%)	P
	Průměrné zpoždění (ms)	Z
	Jitter (ms)	J
	Konstanta kodeku	$R_0=129$
Dočasné proměnné	EL (Efektivní latence)	$Z+2*J+10$
	R_1 (zpoždění a jitter)	$R_0-(EL/4)$
	R (R_1 a ztrátovost)	$R_1-(P*2,5)$
	R_x	$R/1,29$
Výsledek	MOS	$1+(0,035)*R_x+(0,000007)*R_x*(R_x-60)*(100-R_x)$

Vzhledem k tomu, že software StarTrinity SIP Tester používaný u předchozích měření neumí s kodekem G.722 pracovat, zvolil jsem pro porovnání kvality hovoru všech kodeků aplikace MicroSIP a CommView na notebooku i počítači s Wi-Fi kartou. První z nich jsem využíval pro zahájení SIP volání s použitím zvoleného kodeku, zatímco druhá sloužila k detailnímu monitorování a zaznamenávání hodnot odezvy, jitteru a ztrátovosti paketů.



Obrázek 28 - SIP a RTP cesty při testování kodeků

Jak je vidět na obrázku na 28, probíhala veškerá komunikace mimo VoIP ústřednu. Pomocí softwaru MicroSIP jsem z notebooku volal přímo na IP adresu počítače s Wi-Fi kartou. Navazování spojení pomocí protokolu SIP i samotný datový RTP tok probíhaly přes firewall.

Tabulka 21 - Kvalita hovoru - Kodek G.722 - Vytížené prostředí

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
51	27.3.2016 15:21	31,72	83,15	16,41	81,75	1,54	4,45	69,26
52	27.3.2016 15:24	15,21	53,62	12,13	83,07	1,52	4,46	70,21
53	27.3.2016 15:27	26,72	99,90	18,62	74,04	0,43	4,48	70,31
54	27.3.2016 15:29	56,78	148,72	23,15	109,26	2,81	4,39	68,92
55	27.3.2016 15:31	13,15	42,15	8,22	25,62	0,00	4,49	70,31
56	27.3.2016 15:33	16,92	62,13	21,18	62,37	0,92	4,47	69,28
57	27.3.2016 15:37	24,86	66,43	13,94	44,28	0,81	4,47	69,98
58	27.3.2016 15:39	47,59	115,37	19,42	47,32	0,52	4,47	71,23
59	27.3.2016 15:42	22,13	71,08	17,15	33,23	0,37	4,48	73,15
60	27.3.2016 15:45	29,12	35,77	19,74	37,35	1,18	4,46	69,82
souhrn		28,42	148,72	17,00	109,26	1,01	4,46	70,25

Testování kodeku G.722 probíhalo ve vytíženém prostředí se zapnutou detekcí hovorů na řadiči a s použitou a nakonfigurovanou technologií WMM. Průměrný MOS byl 4,46, což se pro použitý kodek G.722 velmi blíží maximální hodnotě. Průměrná hodnota UCC 70,25 naměřená řadičem takřka odpovídá spodní hranici kategorie „good quality“. Při porovnání s výsledky měření s použitím kodeku

G.711 došlo k mírnému zvýšení průměrné odezvy, nicméně k překročení doporučené hodnoty došlo pouze u 1 testovacího hovoru. Úroveň průměrného jitteru taktéž lehce vzrostla, maximální jitter přesahoval limitní hodnotu u 9 z 10 hovorů. Ztrátovost paketů se oproti měření s použitím kodeku G.711 mírně zvedla a u 4 z 10 hovorů překročila hraniční hodnotu.

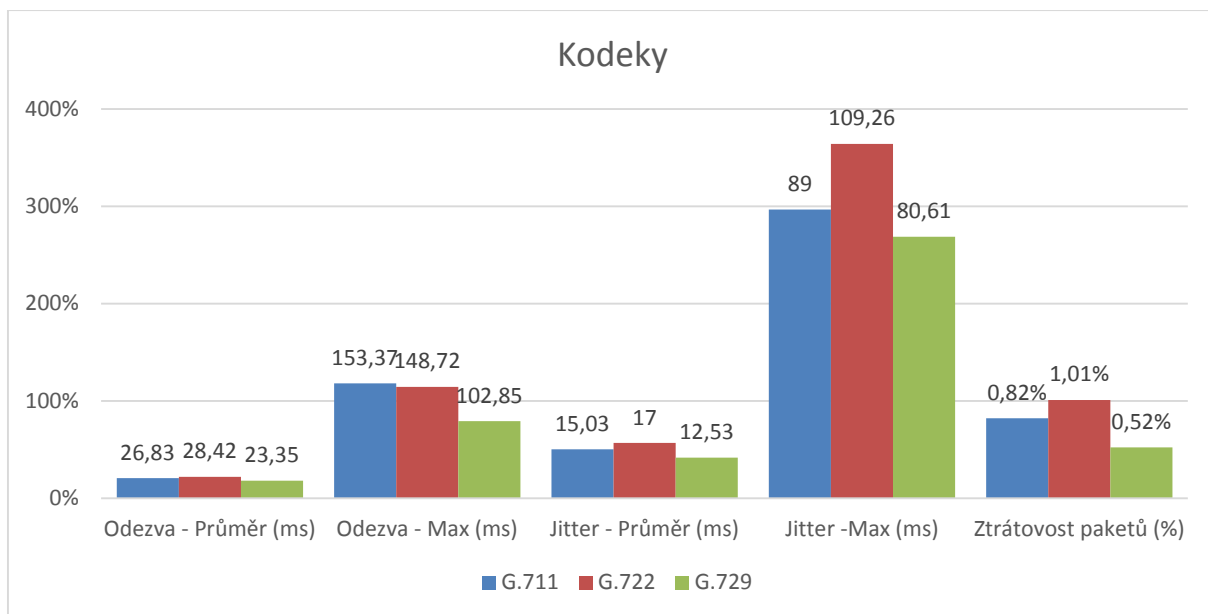
Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 146,3ms, TCP download 16,92 Mbit/s, TCP upload 9,37 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 6,55%, což ve srovnání s měřením za použití kodeku G.711 představuje velmi podobné výsledky.

Tabulka 22 - Kvalita hovoru - Kodek G.729 - Vytížené prostředí

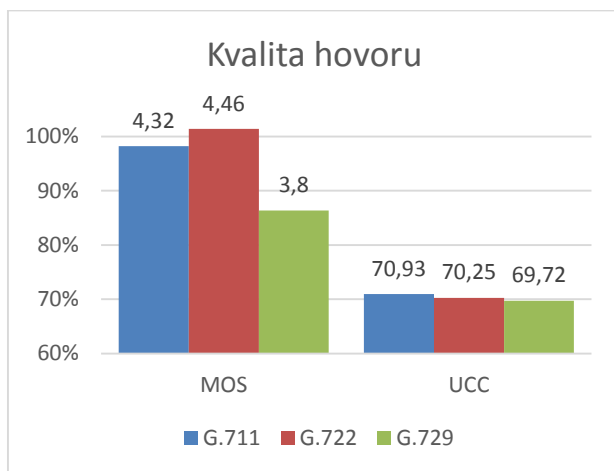
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
61	27.3.2016 16:01	26,31	94,60	16,31	52,20	0,43	3,80	69,81
62	27.3.2016 16:04	16,51	102,85	12,87	45,75	1,21	3,73	68,64
63	27.3.2016 16:06	16,47	32,93	8,99	26,73	0,21	3,85	71,14
64	27.3.2016 16:10	31,15	71,79	13,52	77,61	0,76	3,76	69,39
65	27.3.2016 16:12	24,02	52,24	11,28	35,90	0,82	3,77	69,61
66	27.3.2016 16:14	24,86	62,31	14,85	40,45	0,47	3,80	68,82
67	27.3.2016 16:18	37,62	82,62	19,16	80,61	1,13	3,70	69,19
68	27.3.2016 16:22	22,12	42,13	10,57	23,15	0,02	3,86	70,25
69	27.3.2016 16:25	18,87	31,18	11,23	31,89	0,15	3,84	69,89
70	27.3.2016 16:28	15,52	27,58	6,52	27,92	0,00	3,87	70,45
souhrn		23,35	102,85	12,53	80,61	0,52	3,80	69,72

Testování kodeku G.729 probíhalo ve vytíženém prostředí se zapnutou detekcí hovorů na radiči a s použitou a nakonfigurovanou technologií WMM. Průměrný MOS byl 3,80, což se pro použitý kodek G.729 velmi blíží maximální hodnotě. Průměrná hodnota UCC 69,72 naměřená radičem odpovídá maximální hodnotě kategorie „fair quality“. Při porovnání s výsledky měření s použitím kodeku G.711 došlo k mírnému snížení průměrné odezvy. K překročení doporučené hodnoty nedošlo u žádného testovacího hovoru. Úroveň průměrného jitteru taktéž lehce klesla, maximální jitter přesahoval limitní hodnotu u 7 z 10 hovorů. Ztrátovost paketů se oproti měření s použitím kodeku G.711 mírně snížila a pouze u 2 hovorů překročila hraniční hodnotu.

Při porovnání kodeků G.711, G.722 a G.729 lze na obrázku 29 sledovat naměřené hodnoty a na obrázku 30 pozorovat značné rozdíly v úrovni kvality hovoru MOS, dané zejména díky technickým parametrům samotných kodeků.

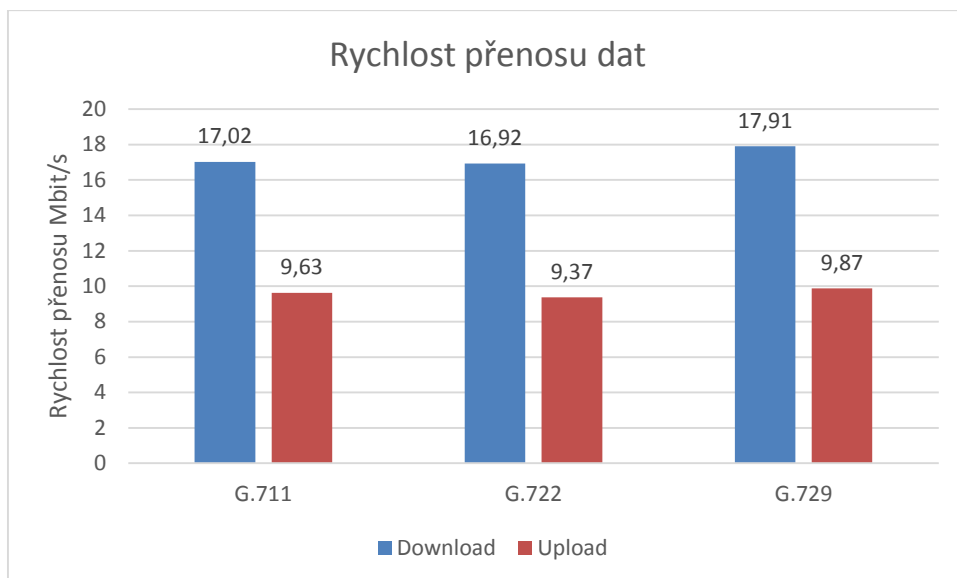


Obrázek 29 - Porovnání kodeků ve vytíženém prostředí

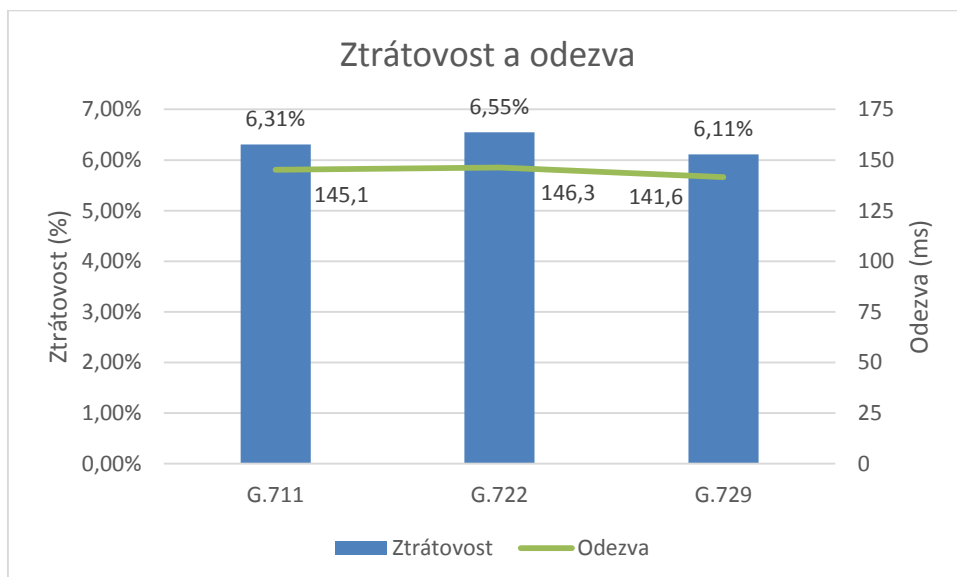


Obrázek 30 - Kvalita hovoru při použití různých kodeků ve vytíženém prostředí

Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 141,6ms, TCP download 17,91 Mbit/s, TCP upload 9,87 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 6,11%, což ve srovnání s měřením za použití kodeku G.711 představuje velmi podobné výsledky a lze je sledovat na obrázcích 31 a 32.



Obrázek 31 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou při použití různých kodeků

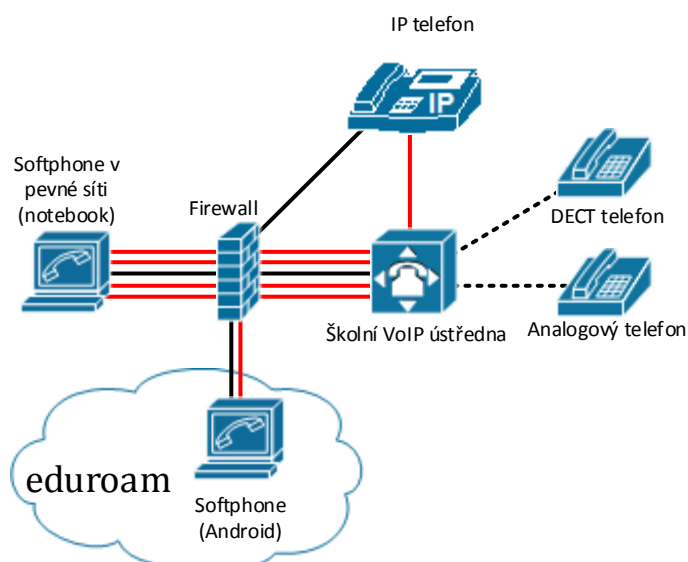


Obrázek 32 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou při použití různých kodeků

Vlastnosti sítě pro běžné uživatele se v závislosti na použitém kodeku takřka nezměnily, a tak lze použití kvalitního kodeku G.722 pro hovory mezi SIP klienty doporučit. Aby při hovorech na zařízení bez podpory SIP nedocházelo k překódování hlasu na ústředně, zůstává jedinou rozumnou možností použití kodeku G.711. Přestože jsem při použití kodeku G.729 naměřil lepší parametry bezdrátového přenosu, díky technickým parametrům kodeku dochází k velké degradaci kvality hovoru a nelze jeho použití v bezdrátové síti doporučit.

7.4.2 Různá zařízení

V druhém testu jsem srovnával kvalitu hovoru různých telefonních zařízení. U těch bezdrátových se zapnutou detekcí hovorů na radiči a s použitou a nakonfigurovanou technologií WMM ve vytíženém prostředí.



Obrázek 33 - SIP a RTP cesty při testování různých zařízení

Cesty SIP a RTP paketů lze sledovat na obrázku 33. Navazování spojení z notebooku na VoIP zařízení probíhalo pomocí signálního protokolu SIP přes firewall a VoIP ústřednu, která požadavky přeposílala koncovým zařízením (na obrázku červená barva). Samotný datový tok pak probíhal mimo VoIP ústřednu, pouze přes firewall (černá barva). Při navazování spojení na analogová zařízení probíhala celá komunikace jak přes firewall, tak přes školní VoIP ústřednu, která RTP pakety převáděla na analogový provoz, který přeposílala analogovému a DECT telefonu (na obrázku tečkovaná spojnice).

Tabulka 23 - Kvalita hovoru - Android - Vytížené prostředí

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
71	27.3.2016 13:56	21,27	57,10	14,57	70,22	1,09	4,31	69,18
72	27.3.2016 13:58	29,16	94,44	14,70	120,71	3,62	4,11	69,26
73	27.3.2016 14:00	11,71	30,74	13,21	59,81	0,49	4,36	69,19
74	27.3.2016 14:03	22,67	64,95	12,60	66,12	0,71	4,34	69,25
75	27.3.2016 14:05	10,60	28,36	11,34	85,86	2,44	4,23	69,19
76	27.3.2016 14:08	10,85	28,26	12,55	90,73	2,44	4,23	69,27
77	27.3.2016 14:10	14,94	41,63	14,28	67,52	1,91	4,26	69,24
78	27.3.2016 14:14	12,31	38,16	15,28	61,61	1,06	4,32	69,35
79	27.3.2016 14:18	19,17	50,96	13,91	72,02	0,91	4,33	69,20
80	27.3.2016 14:21	13,66	36,90	10,86	67,01	1,26	4,31	69,37
souhrn		16,63	94,44	13,33	120,71	1,59	4,28	69,25

Při testování na mobilním telefonu Sony Xperia E1 s operačním systémem Android jsem ve vytíženém prostředí naměřil velmi dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,28, což je hodnota o 0,04 horší než u telefonu iPhone. Průměrná hodnota UCC 69,25 naměřená radičem je oproti telefonu iPhone o 1,68 nižší a blíží se maximu kategorie „fair quality“. Při porovnání s výsledky měření telefonu iPhone došlo ke snížení průměrné i maximální odezvy, u žádného hovoru nedošlo k překročení doporučené hodnoty. Úroveň průměrného jitteru se taktéž mírně zlepšila, nicméně maximální jitter se zvýšil a u všech hovorů přesahoval limitní hodnotu. Ztrátovost paketů se oproti měření na telefonu iPhone takřka zdvojnásobila, přičemž 7 z 10 testovacích hovorů překročilo hraniční hodnotu.

Při porovnání měření na telefonech iPhone a Android lze sledovat velmi podobné výsledky, oba telefony tedy lze považovat za velmi vhodné pro SIP volání. Mírně lepších výsledků v kvalitě hlasu i parametrech bezdrátového přenosu dosáhl iPhone, což lze přisuzovat kvalitnějšímu Wi-Fi čipu.

Tabulka 24 - Kvalita hovoru - IP telefon

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
81	25.3.2016 15:40	1,47	2,53	0,04	0,57	0,00	4,40	-
82	25.3.2016 15:42	1,05	1,21	0,03	0,11	0,00	4,40	-
83	25.3.2016 15:45	1,16	1,21	0,03	0,13	0,00	4,40	-
84	25.3.2016 15:47	1,32	3,71	0,03	0,11	0,00	4,40	-
85	25.3.2016 15:49	1,23	2,22	0,03	0,12	0,00	4,40	-
86	25.3.2016 15:52	1,07	1,25	0,03	0,11	0,00	4,40	-
87	25.3.2016 15:55	1,51	2,69	0,04	0,52	0,00	4,40	-
88	25.3.2016 16:01	1,19	1,31	0,03	0,13	0,00	4,40	-
89	25.3.2016 16:03	1,37	2,01	0,04	0,45	0,00	4,40	-
90	25.3.2016 16:06	1,39	1,97	0,03	0,14	0,00	4,40	-
souhrn		1,28	3,71	0,03	0,57	0,00	4,40	-

Testování kvality hovoru IP telefonu probíhalo v pevné síti, a tak nebylo třeba brát v úvahu nastavení bezdrátové sítě a její vytížení. Naměřená hodnota MOS dosahovala u všech testovacích hovorů pro použitý kodek G.711 maximální hodnoty 4,4. Hodnoty průměrné i maximální odezvy a jitteru byly naprosto minimální. Ke ztrátě paketů nedošlo vůbec. IP telefon tak lze považovat za perfektní zařízení pro VoIP hovory.

Tabulka 25 - Kvalita hovoru - DECT telefon

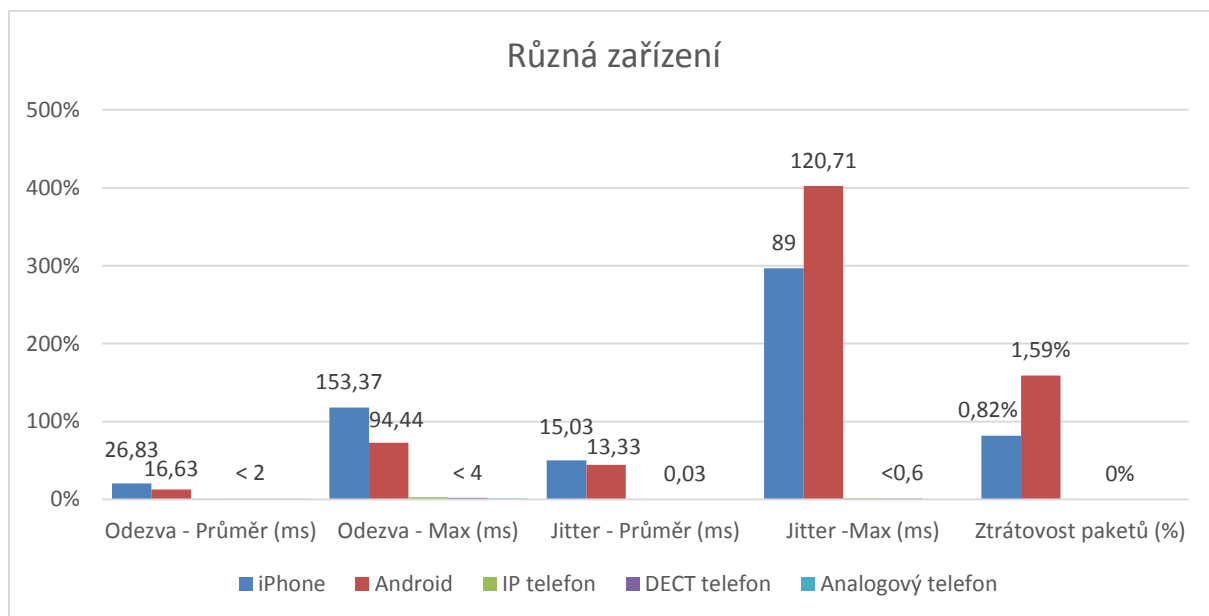
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
91	25.3.2016 16:20	1,17	1,25	0,03	0,07	0,00	4,40	-
92	25.3.2016 16:22	1,42	1,72	0,03	0,23	0,00	4,40	-
93	25.3.2016 16:26	1,13	1,35	0,03	0,09	0,00	4,40	-
94	25.3.2016 16:29	1,28	2,01	0,03	0,07	0,00	4,40	-
95	25.3.2016 16:31	1,15	1,33	0,03	0,08	0,00	4,40	-
96	25.3.2016 16:33	1,19	1,28	0,03	0,35	0,00	4,40	-
97	25.3.2016 16:35	1,45	2,52	0,03	0,06	0,00	4,40	-
98	25.3.2016 16:39	1,33	1,59	0,03	0,08	0,00	4,40	-
99	25.3.2016 16:42	1,21	1,37	0,03	0,05	0,00	4,40	-
100	25.3.2016 16:44	1,37	1,81	0,03	0,07	0,00	4,40	-
souhrn		1,27	2,52	0,03	0,35	0,00	4,40	-

Při testování kvality hovoru DECT telefonu naměřené hodnoty představovaly úsek mezi SIP klientem notebooku (software StarTrinity SIP Tester) a telefonní VoIP ústřednou, která prováděla převod z digitální podoby na analogovou. Zpoždění a případné zhoršení kvality mezi DECT základnovou stanicí a sluchátkem jsem nebyl schopen monitorovat, neboť tato komunikace probíhá ve frekvenčním pásmu 1,9 GHz, pro jehož testování jsem neměl k dispozici potřebné technické vybavení. Toto pásmo však vytíženou bezdrátovou Wi-Fi sítí na frekvenci 2,4 GHz ovlivněno není, čemuž odpovídalo i subjektivní pozorování, kdy mi kvalita hovoru přišla stejná jako v případě IP telefonu. Naměřená hodnota MOS dosahovala u všech testovacích hovorů pro použitý kodek G.711 maximální hodnoty 4,4. Hodnoty průměrné i maximální odezvy a jitteru byly naprosto minimální. Ke ztrátě paketů nedošlo vůbec.

Tabulka 26 - Kvalita hovoru - Analogový telefon

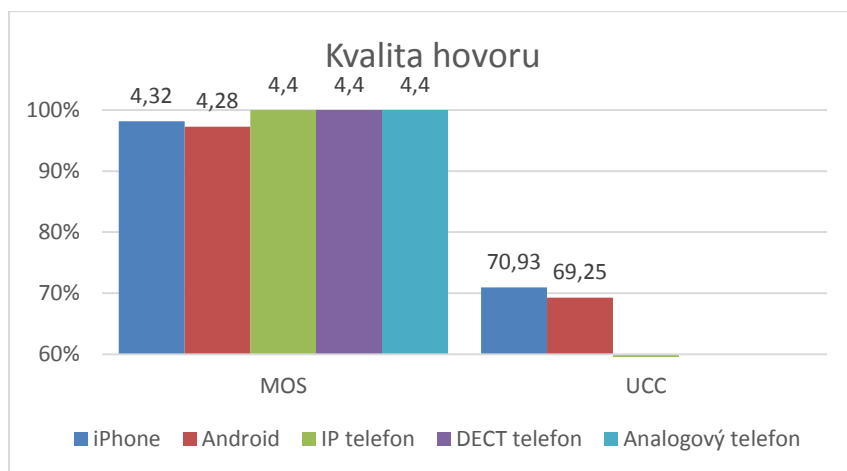
ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
101	25.3.2016 17:06	1,25	1,81	0,03	0,06	0,00	4,40	-
102	25.3.2016 17:09	0,87	1,36	0,03	0,04	0,00	4,40	-
103	25.3.2016 17:11	0,92	1,23	0,03	0,04	0,00	4,40	-
104	25.3.2016 17:13	1,15	1,41	0,03	0,07	0,00	4,40	-
105	25.3.2016 17:15	0,99	1,22	0,03	0,05	0,00	4,40	-
106	25.3.2016 17:18	1,13	1,53	0,03	0,10	0,00	4,40	-
107	25.3.2016 17:22	0,85	1,17	0,03	0,08	0,00	4,40	-
108	25.3.2016 17:24	1,19	1,28	0,03	0,06	0,00	4,40	-
109	25.3.2016 17:27	0,98	1,19	0,03	0,10	0,00	4,40	-
110	25.3.2016 17:30	1,08	1,66	0,03	0,05	0,00	4,40	-
souhrn		1,04	1,81	0,03	0,10	0,00	4,40	-

Při testování kvality hovoru analogového telefonu naměřené hodnoty opět představovaly úsek mezi SIP klientem notebooku (software StarTrinity SIP Tester) a telefonní VoIP ústřednou, která prováděla převod z digitální podoby na analogovou. Pro měření analogové kvality hovoru jsem neměl dostatečné technické vybavení, nicméně subjektivním pozorováním mi přišla kvalita hovoru stejná jako v případě IP nebo DECT telefonu. Naměřená hodnota MOS dosahovala u všech testovacích hovorů pro použitý kodek G.711 maximální hodnoty 4,4. Hodnoty průměrné i maximální odezvy a jitteru byly naprosto minimální. Ke ztrátě paketů nedošlo vůbec.



Obrázek 34 - Porovnání různých zařízení

Výsledky měření všech tří drátových zařízení, tedy IP, DECT a analogového telefonu, poukazují na dosažení maximální kvality hlasu pro použitý kodek G.711. Rozdíly v naměřených parametrech mezi jednotlivými zařízeními lze sledovat na obrázku 34, kvalitu hovoru pak na obrázku 35.



Obrázek 35 - Kvalita hovoru různých zařízení

7.4.3 SIP a Skype

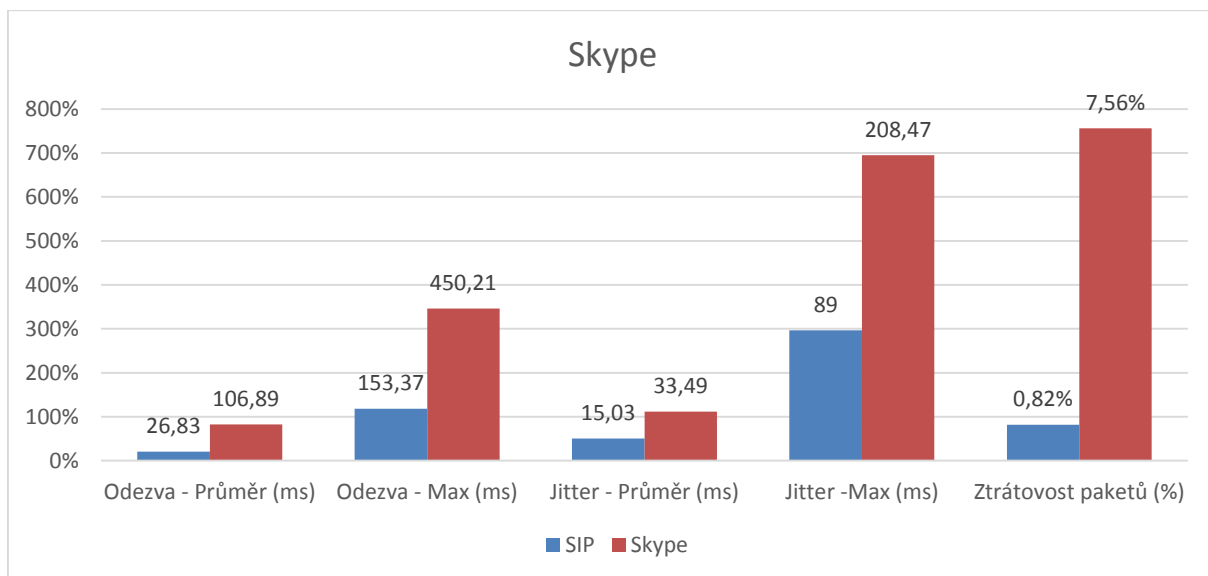
Ve třetím testu jsem srovnával kvalitu hovoru SIP s kvalitou internetového volání pomocí rozšířené sítě Skype ve vytíženém prostředí se zapnutou detekcí hovorů na řadiči a s použitou a nakonfigurovanou technologií WMM. Z notebooku jsem desktopovým klientem Skype volal na telefon iPhone s nainstalovanou mobilní verzí aplikace Skype. Hovor jsem monitoroval pomocí síťového analyzátoru CommView a integrovaného monitoringu v aplikaci Skype vyvolaným volbou Technické informace o hovoru.

Při hovorech aplikace Skype využívala kodek SILK ve verzi SILK_WB_V3 se vzorkovací frekvencí 16 kHz s proměnlivým datovým tokem o průměru 36 kbit/s a použitým protokolem UDP. Přestože výrobce kodeku slibuje v perfektním prostředí MOS přibližně o 0,1 vyšší než kodek G.722, nebyl jsem schopen získat vzorec pro jeho výpočet. Měřil jsem tedy jen hodnoty odezvy, jitteru a ztrátovosti paketů, které jsem porovnával s hodnotami naměřenými během SIP hovorů.

Tabulka 27 - Kvalita hovoru - Skype

ID	Datum a čas	Odezva (ms)		Jitter (ms)		Ztrátovost paketů (%)	MOS	UCC
		Průměr	Max	Průměr	Max			
111	27.3.2016 17:02	87,37	214,85	34,51	131,51	6,52	-	-
112	27.3.2016 17:07	130,25	308,13	29,97	154,13	8,15	-	-
113	27.3.2016 17:11	116,31	272,15	32,15	192,58	7,22	-	-
114	27.3.2016 17:17	157,12	450,21	39,84	208,47	5,84	-	-
115	27.3.2016 17:22	62,82	114,85	30,15	82,76	4,85	-	-
116	27.3.2016 17:26	98,97	158,45	31,81	148,52	5,91	-	-
117	27.3.2016 17:30	147,62	305,21	40,19	108,84	12,31	-	-
118	27.3.2016 17:35	84,31	217,98	31,15	126,15	6,34	-	-
119	27.3.2016 17:39	78,96	245,47	28,47	114,97	8,87	-	-
120	27.3.2016 17:43	105,20	357,42	36,62	182,18	9,56	-	-
souhrn		106,89	450,21	33,49	208,47	7,56	-	-

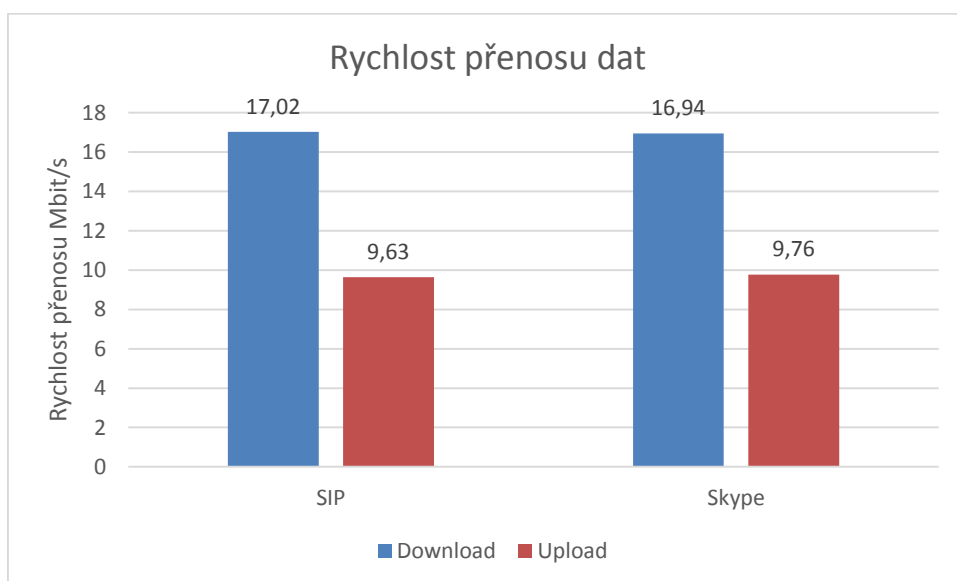
Přestože byla použita funkce detekce hovorů na řadiči i zapnuta a nakonfigurována technologie WMM, dosáhl program Skype ve vytíženém prostředí velmi špatných výsledků, které se podobaly hodnotám naměřeným ve výchozím nastavení bezdrátové sítě. Při porovnání s výsledky měření kvality hovorů SIP ve stejném prostředí došlo k výraznému nárůstu odezvy, přičemž 9 z 10 testovacích hovorů překročilo doporučenou hodnotu. Stejně tak došlo k více než zdvojnásobení jitteru, jehož průměrná hodnota se opět u 9 z 10 testovacích hovorů pohybovala nad hranicí limitní hodnoty. Ztrátovost paketů se téměř zdesetinásobila a všechny testovací hovory mnohonásobně překračovaly hraniční hodnotu.



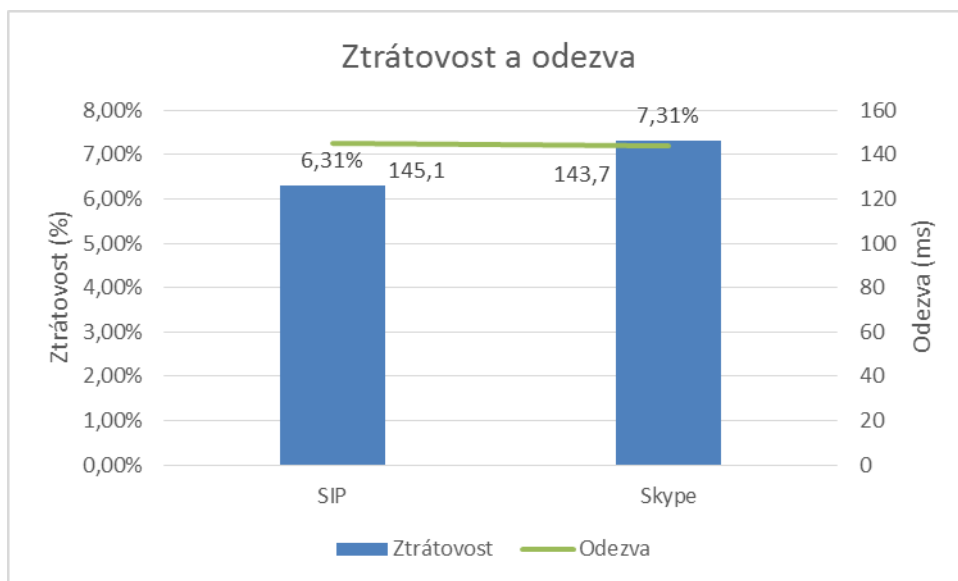
Obrázek 36 - Porovnání SIP a Skype hovorů ve vytíženém prostředí

Při porovnání měření ve vytíženém prostředí při zapnuté detekci hovorů na řadiči a použití technologie WMM lze na obrázku 36 pozorovat obrovské rozdíly mezi protokolem SIP a aplikací Skype. Vzhledem k tomu, že bezdrátový řadič Skype provoz nedetekoval, byly naměřené hodnoty všech parametrů vysoce nevyhovující. Přestože v nevytíženém prostředí může Skype poskytovat velmi vysokou kvalitu hovoru, ve vytíženém prostředí se jeho použití nedá doporučit.

Průměrná odezva připojených počítačů s Wi-Fi kartou byla 143,7ms, TCP download 16,94 Mbit/s, TCP upload 9,76 Mbit/s a UDP ztrátovost pro 8 Mbit/s download i upload 7,31%, což představuje vůči měření SIP hovorů takřka totožné hodnoty, jak lze vidět na obrázcích 37 a 38.



Obrázek 37 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou při testování aplikace Skype

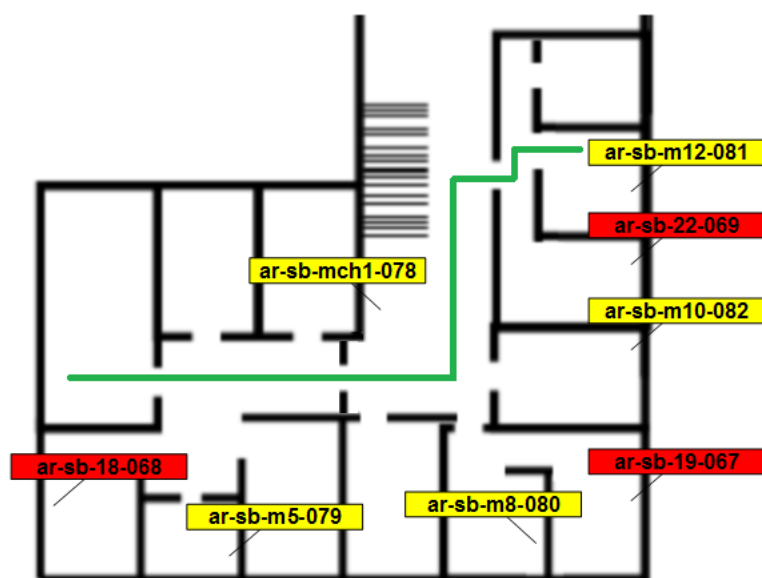


Obrázek 38 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou při testování aplikace Skype

7.5 Kvalita hovoru při roamingu

Ve třetí etapě testování jsem zkoumal vliv různých nastavení bezdrátové sítě i koncových zařízení na kvalitu hovoru při roamingu. Zaměřoval jsem se zejména na možnosti rozšiřujících standardů 802.11k, 802.11v a 802.11r.

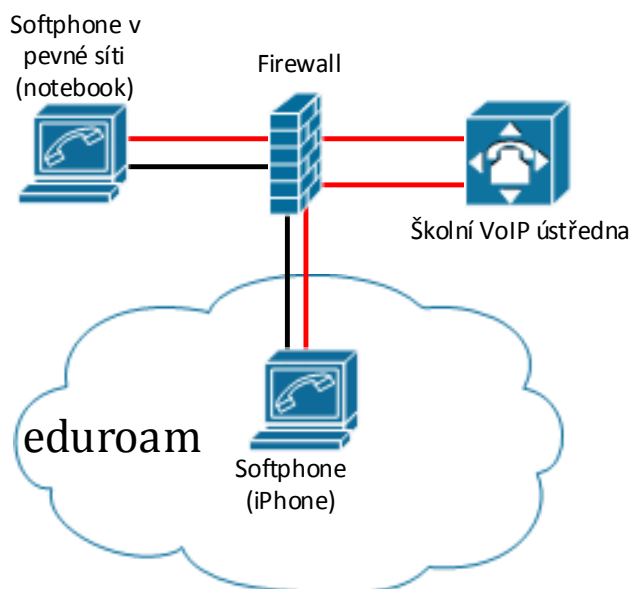
Při plánování této etapy jsem čerpal především z materiálů výrobce bezdrátového řešení Aruba, a to z příručky o radiofrekvenčních a roamingových optimalizacích z roku 2015 [50] a článku věnovaného chytrým telefonům využívajících VoIP služeb v prostředí podnikové bezdrátové sítě [51]. Původně jsem chtěl využít diagnostickou aplikaci Aruba Utilities, která umožňuje detailní monitoring bezdrátového prostředí klienta, včetně zobrazení podrobných informací o kvalitě a síle signálu nebo událostech roamingu, nicméně telefon Sony Xperia s operačním systémem Android nezládal souběžný běh této aplikace a SIP klienta Zoiper a docházelo k nestabilitě a zamrzání jedné nebo obou z nich. Druhý telefon s operačním systémem Android, který jsem měl k dispozici, Nexus 4, sice souběžný běh obou aplikací zvládal, nicméně nepodporoval rozšiřující standardy 802.11k, 802.11v, ani 802.11r a proto byl pro potřeby mých měření nevyhovující.



Obrázek 39 - Trasa testování roamingu

Testovací trasa v mezaninu Staré budovy na Žižkově je zobrazena na obrázku 39, přičemž žluté přístupové body byly umístěny v témže patře, zatímco červené v přízemí. V prvním patře probíhala v době zpracování diplomové práce rekonstrukce, a tak v něm nebyly v provozu žádné přístupové body. Trasa simulovala běžný pohyb zaměstnanců mezi kancelářemi s aktivním VoIP hovorem na mobilním telefonu. Každý testovací hovor trval 60 sekund, přičemž prvních 10 sekund jsem zůstal v kanceláři SB M12, dalších 40 sekund se pohyboval a posledních 10 sekund setrval v cílové místnosti.

Průběh VoIP spojení lze sledovat na obrázku 40. Navazování spojení probíhalo pomocí signálního protokolu SIP vždy přes školní VoIP ústřednu, která požadavek přeposlala koncovému zařízení – mobilnímu telefonu iPhone (červená barva). Samotný datový tok RTP pak probíhal mimo ústřednu, pouze přes firewall (černá barva).



Obrázek 40 - SIP a RTP cesty při testování roamingu

Během všech měření byl použit kodek G.711, přičemž kvalitu hovoru MOS jsem vypočítával z údajů naměřených programem StarTrinity SIP Tester, stejně jako u testů v laboratorním prostředí, tedy dle vzorce v tabulce 14. Hodnotu UCC počítal bezdrátový radič. Kvalitu roamingu jsem určoval podle množství ztracených paketů při každé změně přístupového bodu, které jsem získal kombinací výstupu programu CommView a údajů o roamingu na radiči. Taktéž jsem pro lepší představu o průběhu monitoroval délku připojení ke každému přístupovému bodu. Pro přesnější výpočet kvality roamingu by bylo třeba aktivně monitorovat úroveň signálu na koncovém klientovi, nicméně pro operační systém iOS neexistuje aplikace, která by ho byla schopna zobrazovat. Radič sice informace o úrovni signálu klientů zobrazuje, nicméně není schopen ji aktualizovat častěji než jednou za minutu, což bylo pro mé potřeby nedostatečné.

7.5.1 Výchozí nastavení

V prvním testu měření kvality hovoru při roamingu jsem ponechal konfiguraci bezdrátové sítě z posledního laboratorního testu, kdy byla zapnuta detekce hovorů na radiči a povolena a nakonfigurována technologie WMM. Z notebooku v pevné síti jsem pomocí softwaru StarTrinity SIP Tester volal na mobilní telefon iPhone s aplikací Zoiper, který byl připojený do bezdrátové sítě eduroam. Počítače s Wi-Fi kartou, které vytěžovaly bezdrátové prostředí, nedisponovaly podporou

žádného z testovaných standardů a po celou dobu testování roamingu byly připojeny k výchozímu přístupovému bodu ar-sb-m12-081. Výsledky jednotlivých měření jsem získával vhodným propojením informací získaných z aplikací StarTrinity SIP Tester, CommView a bezdrátového řadiče.

Tabulka 28 - Kvalita hovoru při roamingu - Výchozí nastavení

ID	Datum a čas	Čas připojení k AP (s)			Ztraceno paketů při roamingu		MOS	UCC
		1.	2.	3.	1./2. AP	2./3. AP		
121	2.4.2016 9:50	23	19	18	25	15	4,25	64,57
122	2.4.2016 10:04	30	19	11	81	15	4,17	58,96
123	2.4.2016 10:13	30	27	3	27	22	4,19	62,48
124	2.4.2016 10:22	27	14	6 (13*)	23	2 (10*)	4,29	48,33
125	2.4.2016 10:28	32	22	6	20	13	4,07	60,97
126	2.4.2016 10:36	25	20	15	13	10	4,37	80,79
127	2.4.2016 10:42	21	26	13	6	8	4,33	71,75
128	2.4.2016 10:48	24	32	4	6	3	4,22	61,80
129	2.4.2016 10:53	14	21	25	3	12	4,15	63,71
130	2.4.2016 10:58	22	26	12	5	6	4,37	74,87
Průměr		25	23	11	20,9	10,6	4,24	64,82

Ve výchozím nastavení jsem naměřil poměrně neuspokojivé výsledky. Průměrný MOS byl 4,24, což sice odpovídá hodnocení „spokojení uživatelé“, přesto se ale jedná o hodnotu o 0,08 horší než v plně vytíženém laboratorním prostředí. Průměrná hodnota UCC 64,82 naměřená řadičem, tedy hodnota o 6,11 nižší než ve vytíženém laboratorním prostředí, odpovídá kategorii „fair quality“. Telefon iPhone se během hovoru v průměru připojil k 3 přístupovým bodům o délkách 25, 23 a 11 sekund. Ztrátovost paketů při jednotlivých změnách přístupových bodů se rovnala 20,9, respektive 10,6. Vzhledem k tomu, že při použití kodeku G.711 dochází k přenosu 50 paketů za sekundu, docházelo při každém roamingu v průměru k úplnému reálnému výpadku hlasu na 310 milisekund.

Během jednotlivých testovacích hovorů docházelo k výrazným změnám délky připojení k třetímu přístupovému bodu. Hvězdička u testu číslo 124 udává, že se telefon během hovoru připojil ke čtvrtému přístupovému bodu, přičemž naměřené hodnoty jsou uvedeny v závorce.

Vzhledem k naměřeným hodnotám MOS, UCC a ztracených paketů při změnách přístupových bodů nelze kvalitu hovoru při roamingu ve výchozím nastavení považovat za vyhovující a nastavení bezdrátové sítě za dostačující.

7.5.2 Standardy 802.11k a 802.11v

Druhý test měření kvality hovoru při roamingu jsem provedl po zapnutí a nakonfigurování standardů 802.11k a 802.11v, které jsou úzce spjaty. Standard 802.11k nabízí technologii, která umožňuje přístupovým bodům i klientům dynamicky měřit dostupnost bezdrátových zdrojů. Přístupové body i klienti si vzájemně zasílají informace o sousedech a vytížení linek, díky čemuž mohou dělat lepší rozhodnutí. Klienti tedy pro nalezení vhodného přístupového bodu nemusí naslouchat na všech kanálech, což vede k rychlejšímu času samotného roamingu.

802.11v nabízí vylepšení asistovaného roamingu, kdy se přístupový bod snaží pomáhat při rozhodování o roamingu tím, že předává klientům svá doporučení. Pokud je přístupový bod příliš vytížen, může klienta požádat či mu doporučit, aby přeroamoval. 802.11v napomáhá ke zlepšení propustnosti, přenosové rychlosti a parametrů QoS tím, že VoIP klienty přesměruje k přístupovým bodům s nejlepšími parametry.

Tabulka 29 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11k a 802.11v

ID	Datum a čas	Čas připojení k AP (s)			Ztraceno paketů při roamingu		MOS	UCC
		1.	2.	3.	1./2. AP	2./3. AP		
131	2.4.2016 11:44	20	32	8	17	25	4,29	70,30
132	2.4.2016 11:51	21	26	13	7	2	4,38	62,96
133	2.4.2016 11:58	19	28	13	3	4	4,29	72,29
134	2.4.2016 12:03	22	38	-	3	-	4,37	74,02
135	2.4.2016 12:11	25	35	-	4	-	4,27	50,40
136	2.4.2016 12:24	24	24	12	3	6	4,30	71,03
137	2.4.2016 12:34	21	24	15	6	2	4,35	71,60
138	2.4.2016 12:39	20	25	15	6	4	4,37	77,85
139	2.4.2016 12:43	29	15	16	21	2	4,22	67,34
140	2.4.2016 12:47	22	27	11	14	4	4,32	72,50
Průměr		22	27	10	8,4	6,1	4,32	69,03

Po zapnutí standardu 802.11k a 802.11v jsem naměřil poměrně dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,32, což odpovídá hodnocení „velmi spokojení uživatelé“ a představuje o 0,08 lepší hodnotu než ve výchozím nastavení. Průměrná hodnota UCC 69,03 naměřená řadičem je o 5,21 vyšší než v prvním testu a odpovídá horní hranici kategorie „fair quality“. Telefon iPhone se během hovoru ve většině případů připojil k 3 přístupovým bodům o průměrných délkách 22, 27 a 10 sekund, došlo tedy k větší prioritizaci druhého přístupového bodu na úkor prvního. Ztrátovost paketů se při jednotlivých změnách přístupových bodů rovnala 8,4, respektive 6,1. Při přeroamování tedy došlo v průměru k úplnému reálnému výpadku hlasu na 145 milisekund.

Během jednotlivých testovacích hovorů docházelo k odlišné délce připojení k druhému přístupovému bodu, u dvou měření se telefon iPhone dokonce k třetímu přístupovému bodu vůbec nepřipojil.

Vzhledem k naměřeným hodnotám MOS, UCC a ztracených paketů při změnách přístupových bodů lze pozorovat znatelné zlepšení kvality hovoru při roamingu oproti měření ve výchozím nastavení. Kvalitu telefonních hovorů při použití standardů 802.11k a 802.11v tedy lze považovat za dostačující.

7.5.3 Standard 802.11r

Pro třetí test měření kvality hovoru jsem nakonfiguroval technologii 802.11r, přičemž jsem dočasně vypnul standardy použité u předchozího měření 802.11k a 802.11v. Standard 802.11r zlepšuje kvalitu sítě pro VoIP klienty, neboť nabízí možnost navázání bezpečného spojení a definování QoS parametrů ještě před samotným přeroamováním, což vede k rychlejší reautorizaci a zkracuje případné výpadky. Technologie 802.11r umožňuje přístupovým bodům i klientům dopředu spočítat šifrovací klíče, které v případě roamingu ihned použijí, čímž se celý proces výrazně zrychlí. Existuje však mnoho klientů, kteří tento standard nepodporují a nejsou schopni se k síti se standardem 802.11r vůbec připojit, a proto je třeba ji před nasazením do reálného prostředí důkladně otestovat, případně pro její využití vyhradit speciální SSID určené pro hlasové služby.

Tabulka 30 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11r

ID	Datum a čas	Čas připojení k AP (s)			Ztraceno paketů při roamingu		MOS	UCC
		1.	2.	3.	1./2. AP	2./3. AP		
141	3.4.2016 11:39	23	22	15	3	4	4,33	72,84
142	3.4.2016 11:45	23	22	15	3	5	4,26	67,28
143	3.4.2016 11:50	29	14	17	7	4	3,68	63,70
144	3.4.2016 11:56	23	24	13	3	5	4,34	68,28
145	3.4.2016 12:00	23	23	14	14	4	4,24	67,43
146	3.4.2016 12:03	29	25	6	1	2	4,21	52,54
147	3.4.2016 12:10	24	25	11	2	1	4,38	75,52
148	3.4.2016 12:14	27	19	14	3	4	4,29	71,53
149	3.4.2016 12:17	29	13	5 (13*)	3	7 (2*)	4,31	68,48
150	3.4.2016 12:23	28	18	14	2	6	4,34	69,53
Průměr		26	20	12	4,1	4,2	4,24	67,71

Po zapnutí standardu 802.11r a vypnutí technologií 802.11k a 802.11v jsem naměřil poměrně dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,24, což odpovídá hodnocení „spokojení uživatelé“, ale představuje hodnotu o 0,08 horší než v případě použití technologií 802.11k a 802.11v. Průměrná hodnota UCC 67,71 naměřená radičem je o 1,32 nižší než v předchozím testu, ale o 2,89 vyšší než ve výchozím

nastavení a odpovídá horní hranici kategorie „fair quality“. Telefon iPhone se během hovoru ve většině případů připojil k 3 přístupovým bodům o průměrných délkách 26, 20 a 12 sekund. Tyto hodnoty byly podobné jako ve výchozím nastavení, kdy opět došlo k větší prioritizaci prvního přístupového bodu na úkor druhého. Ztrátovost paketů se při jednotlivých změnách přístupových bodů rovnala 4,1, respektive 4,2, což představuje snížení téměř na polovinu oproti standardům 802.11k a 802.11v, respektive na čtvrtinu vůči výchozímu nastavení. Při přeroamování tedy došlo v průměru k úplnému reálnému výpadku hlasu na 83 milisekund.

Během jednotlivých testovacích hovorů docházelo k výrazným změnám v délce připojení k druhému a třetímu přístupovému bodu. Ztrátovost paketů při roamingu byla poměrně konstantní. Hvězdička u testu číslo 149 udává, že se klient během hovoru připojil ke čtvrtému přístupovému bodu, přičemž naměřené hodnoty jsou uvedeny v závorce.

Přestože se znatelně zlepšila ztrátovost paketů při roamingu, nedošlo vůči měření ve výchozím nastavení k žádnému zlepšení kvality hovoru MOS. Z tohoto důvodu nelze použití funkce 802.11r samotné považovat za dostačující. Při porovnání měření se standardem 802.11r vůči měření s použitím standardů 802.11k a 802.11v můžeme pozorovat výrazné snížení ztrátovosti paketů při roamingu za cenu znatelného zhoršení kvality hovoru MOS.

7.5.4 Standardy 802.11k, 802.11v a 802.11r

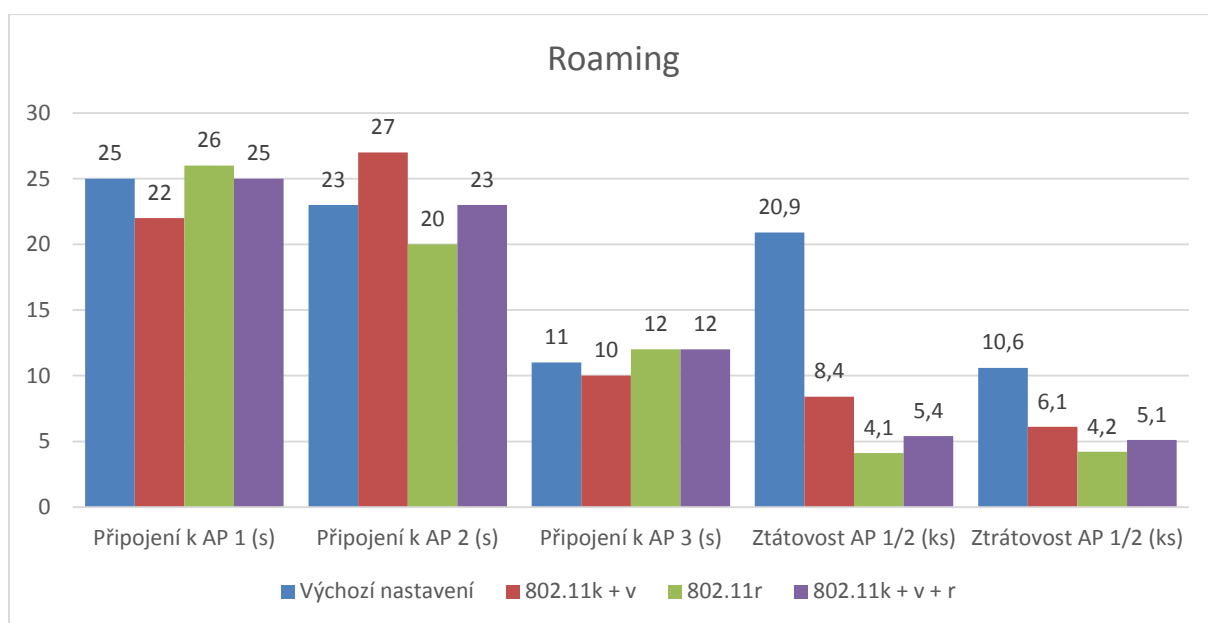
Pro čtvrtý test měření kvality jsem nechal zapnuté a nakonfigurované všechny rozšiřující technologie, tedy 802.11k, 802.11v i 802.11r.

Tabulka 31 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11k, 802.11v a 802.11r

ID	Datum a čas	Čas připojení k AP (s)			Ztraceno paketů při roamingu		MOS	UCC
		1.	2.	3.	1./2. AP	2./3. AP		
151	3.4.2016 13:05	21	26	13	3	4	4,36	78,43
152	3.4.2016 13:09	27	20	13	8	6	4,34	69,50
153	3.4.2016 13:21	26	21	13	2	3	4,36	71,71
154	3.4.2016 13:24	23	22	15	6	6	4,36	72,81
155	3.4.2016 13:29	26	24	10	9	3	4,37	71,96
156	3.4.2016 13:33	21	09	30	6	11	4,22	63,53
157	3.4.2016 13:38	29	31	-	6	-	4,27	73,08
158	3.4.2016 13:45	23	37	-	6	-	4,38	75,57
159	3.4.2016 13:49	27	17	16	5	5	4,34	65,57
160	3.4.2016 13:53	30	16	14	3	3	4,37	75,03
Průměr		25	23	12	5,4	5,1	4,34	71,72

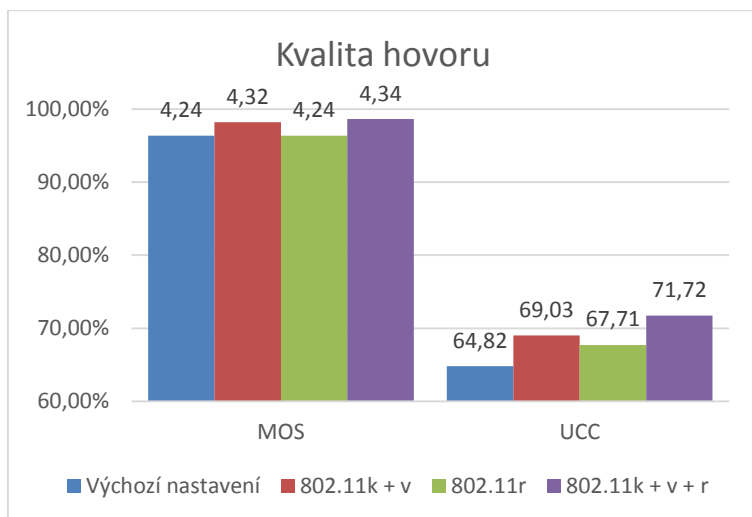
Po zapnutí technologií standardů 802.11k, 802.11v a 802.11r jsem naměřil velmi dobré výsledky. Průměrný MOS byl 4,34, což odpovídá hodnocení „velmi spokojení uživatelé“ a zároveň představuje nejvyšší naměřenou hodnotu ze všech testů kvality hovoru při roamingu. Průměrná hodnota UCC 71,72 naměřená radičem je taktéž ze všech nejvyšší a odpovídá spodní hranici kategorie „good quality“. Telefon iPhone se během hovoru ve většině případů připojil k 3 přístupovým bodům o průměrných délkách 25, 23 a 12 sekund, došlo tedy k podobné prioritizaci prvních dvou přístupových bodů. Ztrátovost paketů při jednotlivých změnách přístupových bodů se rovnala 5,4, respektive 5,1, což je sice o něco více než při použití technologie 802.11r samotné, nicméně jde o znatelné snížení oproti použití pouze 802.11k a 802.11v standardů. Při přeroamování tedy došlo v průměru k úplnému reálnému výpadku hlasu na 105 milisekund.

Během jednotlivých testovacích hovorů docházelo k výrazným změnám v délce připojení k druhému a třetímu přístupovému bodu, ve dvou případech se telefon ani k třetímu přístupovému bodu nepřipojil. Ztrátovost paketů při roamingu byla celkem konstantní.



Obrázek 41 - Délka připojení a ztrátovost paketů při roamingu u jednotlivých standardů

Vzhledem k naměřeným hodnotám délky připojení k jednotlivým přístupovým bodům a množství ztracených paketů, které lze sledovat na obrázku 41, a naměřeným hodnotám MOS a UCC, které lze sledovat na obrázku 42, lze při použití všech tří 802.11 technologií pozorovat znatelné zlepšení kvality hovoru při roamingu oproti použití pouze 802.11k a 802.11v nebo samotného 802.11r. Pro bezdrátovou síť určenou k VoIP hovorům lze tedy použití všech tří standardů zároveň považovat za ideální. Pro zachování zpětné kompatibility se staršími klienty ale nelze použití technologie plošně doporučit.



Obrázek 42 - Kvalita hovoru při roamingu u jednotlivých standardů

8 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval kvalitou hovoru VoIP v bezdrátové síti. V první části práce jsem popsal důležité pojmy související s provozem VoIP, zejména signalizační a transportní protokoly, kodeky a metody pro vyhodnocování kvality hlasu MOS. Dále jsem definoval technologie bezdrátových sítí, především z oblasti zabezpečení, mobility a QoS. Nakonec jsem vymezil kategorie zařízení, které mohou službu VoIP v bezdrátové síti poskytovat.

V druhé části práce jsem navázal na teorii a chtěl ověřit, zda je bezdrátová síť Vysoké školy ekonomické v Praze vhodná k provozu VoIP. Zaměřil jsem se na měření kvality hovoru v běžném i laboratorním prostředí, přičemž jsem vycházel z rad a doporučení odborníků a výrobců bezdrátových zařízení. V první etapě jsem testoval kvalitu hovoru v laboratorním prostředí, přičemž jsem zkoumal vliv různých nastavení sítě i koncových klientů v nevytíženém i uměle plně vytíženém bezdrátovém prostředí. Ve druhé etapě jsem zkoumal vliv rozdílného hardwarového a softwarového vybavení na kvalitu hovoru. Ve třetí etapě jsem testoval kvalitu hovoru při roamingu, kdy jsem v reálném prostředí Staré budovy na Žižkově na testovací trase simuloval pohyb zaměstnance mezi kanceláři a zkoumal vliv jednotlivých nastavení bezdrátové sítě.

Měření kvality hovoru v laboratorním prostředí prokázalo, že v nevytíženém prostředí je kvalita hovoru VoIP dostatečná i ve výchozím nastavení. Ve vytíženém prostředí byla kvalita hovoru nedostačující, situaci podstatně zlepšilo zapnutí detekce hovorů na radiči a následně ještě více použití technologie WMM.

Testování rozdílného hardwarového a softwarového vybavení ukázalo, že pro volání do pevné telefonní sítě je velmi vhodné používat kodek G.711, pro volání mezi dvěma SIP klienty je pak ideální použití širokopásmového kodeku G.722, zatímco kodek G.729 z důvodu nízké kvality není doporučen vůbec. Zařízení zapojená fyzicky do sítě, tedy IP, DECT a analogový telefon vykazovaly maximální úroveň kvality hovoru MOS. Mobilní telefon s operačním systémem Android Sony Xperia E1 dosáhl mírně horších výsledků než telefon Apple iPhone s operačním systémem iOS. Při měření kvality hovoru aplikace Skype jsem neměl k dispozici potřebné technické vybavení pro vypočítání hodnoty MOS. Nicméně podle naměřených údajů odezvy, jitteru a ztrátovosti paketů byla kvalita velmi špatná, radič aplikaci Skype nedetekoval a nebyl schopen hovory přes ni prioritizovat. Nejlepších výsledků v laboratorním prostředí jsem dosáhl při zapnutí detekce hovorů na radiči a nakonfigurování technologie WMM.

Měření kvality hovoru při roamingu prokázalo, že ve výchozím nastavení není VoIP provoz dostatečně kvalitní ani spolehlivý. Naproti tomu v případě použití standardů 802.11k a 802.11v jsem u klientů

s jejich podporou dosáhl velmi dobrých výsledků. Technologie 802.11r sice přinesla ještě vyšší kvalitu hovoru a lepší stabilitu, nicméně z důvodu zpětné nekompatibility se staršími zařízeními ji není vhodné implementovat. Nejlepších výsledků v reálném prostředí jsem dosáhl zapnutím standardů 802.11k a 802.11v.

Za největší přínos diplomové práce lze považovat nalezení optimálního nastavení bezdrátové sítě, kdy jsem dosáhl optimální kvality hovoru při zapnuté a nastavené detekci hovorů na řadiči, technologii WMM a rozšiřujících standardů 802.11k a 802.11v. V takové konfiguraci byla dosažena dostatečná kvalita hovoru jak v laboratorním, tak v reálném prostředí a lze tedy bezdrátovou síť Vysoké školy ekonomické v Praze považovat jako vhodnou pro provoz VoIP.

Zjištěné a naměřené výsledky mohou posloužit jako dobrý základ při návrzích možných modelů nasazení služby v prostředí VŠE. Výsledky práce pomohou i při ověření vhodnosti bezdrátové sítě pro VoIP na jiných univerzitách nebo v korporátním prostředí. Zároveň lze na práci v budoucnu navázat a provést detailnější měření kvality hovoru pomocí pokročilejších nástrojů, například dříve zmiňovaných Aruba Utilities, které jsem neměl možnost použít. V laboratorním měření by šlo rozšířit porovnání kvality hovoru s odpovídajícím technickým vybavením pro měření analogové kvality hovoru u DECT telefonu, případně u aplikace Skype.

9 Terminologický slovník

Termín	Zkratka	Definice
802.1X		Definice autentizace založené na portech, kterou vytvořila organizace IEEE [8]
802.11k		Standard vylepšující management rádiových zdrojů pomocí sdílení informací o sousedních přístupových bodech a detekovatelné síle signálu [52]
802.11r		Standard definující metody rychlého přechodu mezi přístupovými body [vlastní definice autora]
802.11v		Standard definující metody pro vylepšení managementu Wi-Fi, například schopnost snížení výkonu nebo přesměrování paketů k jiným přístupovým bodům za účelem vyvážení zátěže [52]
Digital Enhanced Cordless Telecommunications	DECT	Celosvětový standard bezdrátového telefonu operující ve frekvenčním spektru od 1,8 do 1,9 GHz [52]
Equivalent Isotropically Radiated Power	EIRP	Měření množství energie vyzařované anténou [52]
Jitter		Proměnlivé zpoždění příchozích paketů [19]
Kodek		Algoritmus, který kóduje a dekóduje vlnové křivky zvuku (například G.711 a G.729) [19]
Kvalita služeb	QoS	Sada mechanismů, které umožňují zpracovat zvláštní typy provozu zvláštním způsobem [19]
Latence		Zpoždění paketů [19]
Mean Opinion Score	MOS	Kvalita digitalizovaného hlasu, určená subjektivním měřením, které je odvozeno z hodnocení posluchačů [52]
Nyquistova věta		Pravidlo, které říká, že při vzorkování analogových vlnových křivek musí být rychlost odebrání vzorku alespoň dvakrát tak velká jako nejvyšší vzorkovaná frekvence [19]
Power over Ethernet	PoE	Distribuce napájení pomocí ethernetového kabelu zařízení, které není zapojené do elektrické sítě [52]

Real-time Transport Protocol	RTP	Protokol, který přenáší hlasové pakety [19]
Roaming		Přepojení koncového zařízení z jednoho přístupového bodu na druhý při zachování aktivního spojení [vlastní definice autora]
Řídící protokol RTP	RTCP	Řídící protokol pro RTP, který může poskytovat informace o kvalitě hovoru [19]
Session Initiation Protocol	SIP	Signalizační protokol telefonního spojení, který používá koncept zvaní účastníků k relaci [19]
Signal-to-noise ratio	SNR	Podíl mezi úrovní signálu a šumu, udávaná v decibelech [52]
User Agent	UA	Proces zajišťující komunikaci koncového uzlu v síti používající signalizační protokol SIP – Skládá se ze dvou komponent – User Agent Client (iniciuje spojení) a User Agent Server (přijímá hovory) [19]
Unified Communication and Collaboration	UCC	Skóre kvality hovoru vypočítané bezdrátovým radičem Aruba [vlastní definice autora]
Voice over Internet Protocol	VoIP	Proces zasílání hlasového provozu po síti zapouzdřením hlasového provozu do paketů IP [19]
Voice over Wireless LAN	VoWLAN	Volání pomocí Wi-Fi sítě [52]
Vzorkování		Proces odebrání snímků nebo vzorků analogových hlasových vlnových křivek a znázorňování těchto snímků v binární podobě [19]
Wi-Fi Protected Access 2	WPA2	Metoda Wi-Fi pro chráněný přístup, autentizaci a šifrování s využitím šifrování AES [8]
Wi-Fi Multimedia	WMM	Rozšíření QoS pro Wi-Fi sítě za účelem preference přenosu zvuku a videa v reálném čase [52]

10 Zdroje

10.1 Seznam literatury

- [1] HOLÁSEK, Lukáš. *Ekonomické a technické aspekty využití IP telefonie v segmentu malých a středních podniků*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, 2015, 54 str. Dostupné z: <https://isis.vse.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=44333>
- [2] ČERNÝ, Jan. *VoIP - nový způsob komunikace*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, 2011, 56 str. Dostupné z: <https://isis.vse.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=29842>
- [3] HANOUSEK, Lukáš. *VoIP telefonní ústředna ve střední firmě*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, 2009, 48 str. Dostupné z: <https://isis.vse.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=18571>
- [4] ŠVARC, Lukáš. *Optimalizace bezdrátové sítě VŠE*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, 2013, 58 str. Dostupné z: <https://isis.vse.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=40444>
- [5] KALINA, Tomáš. *QoS v síti VŠE*. Praha: Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky, 2013, 86 str. Dostupné z: <https://isis.vse.cz/auth/zp/index.pl?podrobnosti_zp=35886>
- [6] KONEČNÝ, Jakub. *Optimalizace univerzitní bezdrátové sítě pro provoz hlasových služeb*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Provozně ekonomická fakulta, 2015. 80 str. Dostupné z: <<http://theses.cz/id/tpuc8c/>>
- [7] WALLACE, Kevin. *Cisco VoIP: Autorizovaný výukový průvodce*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 2009, 527 str. ISBN 978-80-251-2228-0.
- [8] CARROLL, Brandon. *Bezdrátové sítě Cisco: Autorizovaný výukový průvodce*. Brno: Computer Press, 2011, 478 str. ISBN 978-80-251-2884-8.
- [9] CHUKWUDI, Obimma, IKECHUKWU, Ekemezie. *Deploying Voice over Wireless Land Area Networks for Enterprises*. Blekinge: Blekinge Institute of Technology, 2008. 70 str. Dostupné z: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:831170/FULLTEXT01.pdf>>
- [10] PALLE, Chandrashekar, MANTOOR, Ashwin, ANTHAM, Karunakar. *Peer to Peer VoIP over IEEE 802.11 WLAN*. Halmstad: Halmstad University, 2012, 78 str. Dostupné z: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:539970/FULLTEXT01.pdf>>
- [11] RADHIKA, N., CHITHRA, K. R., JACOB, A., ANJITHA, S. *QoS based performance analysis of VoWLAN for emergency calls using QualNet*. Koimbatour, Indie: ACM, 2011. Dostupné z: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2185348>>
- [12] GAST, Matthew. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, 2. vydání. Sebastopol: O'Reilly, 2005, 656 str. ISBN 0-596-10052-3

- [13] PCWorld: *VoIP – úvod do problematiky volání po internetu* / *PC World.cz* [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <<http://pcworld.cz/internet/voip-uvod-do-problematiky-volani-po-internetu-8120>>
- [14] VOIPtech: *VoIP Architecture*. [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <<http://www.cs.nccu.edu.tw/~lien/VOIP/VOIPtech/hardcopy.htm>>
- [15] Analog Devices: *Analog Dialogue: Blackfin VoIP* [online]. [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/40-04/blackfin_voip.html>
- [16] eTutorials.org: *Technology-Specific MIBs for Accounting and Performance* [online]. [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <<http://etutorials.org/Networking/network+management/Part+II+Implementations+on+the+Cisco+Devices/Chapter+4.+SNMP+and+MIBs/Technology-Specific+MIBs+for+Accounting+and+Performance>>
- [17] SIPTutorial: *Commands of SOP A Made Easy Tutorial* [online]. [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <<http://www.siptutorial.net/SIP/command.html>>
- [18] Wikipedia: *Session Initiation Protocol* [online]. [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Session_Initiation_Protocol#/media/File:SIP_call_flow_between_UA,_Redirect_Server,_Proxy_and_UA.png>
- [19] WALLACE, Kevin. *VoIP bez předchozích znalostí*. Brno: Computer Press, 2007, 231 str. Cisco systems. ISBN 978-80-251-1458-2.
- [20] McGuire Consulting: *Telecommunications Newsletter-VOIP Bandwidth* [online]. [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <<http://www.mcguireconsulting.com/news/voipbandwidth.html>>
- [21] BRADA, M., ZELENKA J. *Posuzování kvality hlasu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2008. 10 str. Dostupné z: <<http://www.ip-telefon.cz/download/40.pdf>>
- [22] Aerohive Networks: *Wi-Fi Back to Basics – 2.4 GHz Channel Planning*. [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <<http://blogs.aerohive.com/blog/the-wireless-lan-training-blog/wifi-back-to-basics-24-ghz-channel-planning>>
- [23] The Ruckus Room: *Facing Wi-Fi Reality*. [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <<http://www.theruckusroom.net/2012/03/fact-or-fiction-theoretical-throughput-doesnt-help.html>>
- [24] GAST, Matthew. *802.11n: A Survival Guide*. Sebastopol: O'Reilly, 2012, 146 str. ISBN 978-144-9312-046.
- [25] ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě WiFi: praktický průvodce*. Brno: Computer Press, 2003, 190 str. ISBN 80-722-6632-2.
- [26] MILLER, Brad. *Radio Frequency (RF) Shielding in 802.11n*. Iowa: Iowa State University, 2010, 9 str. Dostupné z: <home.eng.iastate.edu/~gamari/CprE537_S10/projects/Final_projects/Brad_Miller_Wireless_Project.pdf>
- [27] Wikipedia: *OSI model*. [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model>

- [28] Cisco: *Cisco Unified Wireless Technology and Architecture*. [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob41dg/ch2_Arch.html>
- [29] GREEN, J., VOON, G. *Aruba Networks: Opportunistic Key Caching*, 2007, 9 str. Dostupné z: <<http://community.arubanetworks.com/aruba/attachments/aruba/115/1097/1/Aruba+OKC+Implementation.pdf>>
- [30] Apple: *Roaming ve Wi-Fi sítích v iOS podle standardů 802.11k, 802.11r a 802.11v – Podpora Apple*. [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <<https://support.apple.com/cs-cz/HT202628>>
- [31] Lupa.cz: *Kvalita služby ve WLAN: 802.11e* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <<http://www.lupa.cz/clanky/kvalita-sluzby-ve-wlan-802-11e/>>
- [32] ZELINKA, Tomáš, SVÍTEK Miroslav. *Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 218 str. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-3232-9.
- [33] Desing and Reuse: *Inside 802.11e: Making QoS a Reality over WLAN Connections* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <<http://www.design-reuse.com/articles/6865/inside-802-11e-making-qos-a-reality-over-wlan-connections.html>>
- [34] Unify: *OpenStage WL3 – Experts Wiki* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://wiki.unify.com/wiki/OpenStage_WL3>
- [35] T-Mobile: *T-Mobile představuje Wi-Fi volání jako první v ČR* [online]. [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <<http://www.t-mobile.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-predstavuje-wi-fi-volani-jako-prvni-v-cr.html>>
- [36] Fayn: *Návody – Fayn.cz*. [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <<http://www.fayn.cz/pece-a-podpora/navody-a-nastaveni/>>
- [37] Odorik.cz: *mobilnitelefony*. [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <<http://www.odorik.cz/w/mobilnitelefony>>
- [38] Aruba Networks: *Aruba 7200 series Mobility Controllers*. [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.arubanetworks.com/pdf/products/DS_7200Series.pdf>
- [39] Aruba Networks: *Aruba 103 series Access Points*. [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.arubanetworks.com/assets/ds/DS_AP103Series.pdf>
- [40] TamoSoft: *Downloads - Wired and Wireless Network Analysis Software by TamoSoft*. [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://www.tamos.com/download/main/index.php>>
- [41] StarTrinity SIP Tester: *VoIP monitoring and testing tool* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://starttrinity.com/VoIP/SipTester/SipTester.aspx>>
- [42] MicroSIP: *MicroSIP Downloads - Installer and Portable version* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://www.micosip.org/downloads>>

- [43] Apple iTunes: *Zoiper SIP softphone - for VoIP phone calls with video on the App Store*. [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <<https://itunes.apple.com/us/app/zoiper-sip-softphone-for-voip/id438949960?mt=8>>
- [44] Wi-Fi Alliance: *Wi-Fi CERTIFIED™ Interoperability Certificate* [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <<http://certifications.prod.wi-fi.org/pdf/certificate/public/download?cid=WFA52480>>
- [45] Google Play: *Zoiper IAX SIP VOIP Softphone – Aplikace pro Android ve službě Google Play*. [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zoiper.android.app&hl=cs>>
- [46] Wi-Fi Alliance: *Wi-Fi CERTIFIED™ Interoperability Certificate* [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <<http://certifications.prod.wi-fi.org/pdf/certificate/public/download?cid=WFA6742>>
- [47] iPerf: *iPerf – Download iPerf3 and original iPerf pre-compiled binaries* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <<https://iperf.fr/iperf-download.php>>
- [48] PingMan Tools: *How is MOS calculated in PingPlotter Pro?* [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <<https://www.pingman.com/kb/article/how-is-mos-calculated-in-pingplotter-pro-50.html>>
- [49] International Telecommunication Union: *G.107.1 : Wideband E-model* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107.1-201506-I/en>>
- [50] Aruba Networks: *RF and Roaming Optimization for Aruba 802.11ac Networks*. [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <<http://community.arubanetworks.com/aruba/attachments/aruba/Aruba-VRDs/28/1/RF%20and%20Roaming%20Optimization%20for%20Aruba%20802.11ac%20Networks.pdf>>
- [51] Aruba Networks: *Smartphone VoIP on Enterprise Wi-Fi*. [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.arubanetworks.com/pdf/WP_SmartphoneVoIP.pdf>
- [52] PC Magazine: *PCMag.com – Encyclopedia*. [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <<http://www.pcmag.com/encyclopedia>>

10.2 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Protokoly VoIP (zdroj: [14]).....	13
Obrázek 2 - Průběh zpracování VoIP hovoru (zdroj: [15]).....	14
Obrázek 3 - Komponenty SIP (zdroj: [16]).....	15
Obrázek 4 - Průběh navázání a ukončení VoIP hovoru (zdroj: [18])	17
Obrázek 5 - Digitalizace hlasu (zdroj: [19]).....	18
Obrázek 6 - Struktura hlasového paketu (zdroj: [20]).....	20
Obrázek 7 - Komponenty sítě 802.11 (zdroj: [12]).....	22
Obrázek 8 - 2,4 GHz spektrum (zdroj: [22]).....	23
Obrázek 9 - 5 GHz spektrum (zdroj: [23]).....	24
Obrázek 10 - Zlepšení dosahu pomocí 802.11n (zdroj: [24])	25
Obrázek 11 - Roaming na druhé vrstvě (zdroj: [28])	27
Obrázek 12 - Mezery mezi rámcí (zdroj: [12]).....	29
Obrázek 13 - Architektura IEEE 802.11e MAC (zdroj: [33]).....	30
Obrázek 14 - Struktura sítě VŠE – Stará budova Žižkov (zdroj: autor)	35
Obrázek 15 - SIP a RTP cesty na telefonní čísla VŠE (zdroj: autor)	38
Obrázek 16 - Testovací laboratoř	40
Obrázek 17 - SIP a RTP cesty v laboratorním prostředí.....	49
Obrázek 18 - Nevytížené a vytížené prostředí ve výchozím nastavení	52
Obrázek 19 - Kvalita hovoru ve výchozím nastavení.....	53
Obrázek 20 - Kvalita hovoru při použití detekce hovorů na radiči v nevytíženém prostředí.....	54
Obrázek 21 - Nevytížené prostředí při zapnutí detekci hovorů na radiči	55
Obrázek 22 - Kvalita hovoru při zapnutí detekci hovorů radičem	56
Obrázek 23 - Nevytížené a vytížené prostředí při zapnutí detekci hovorů na radiči	56
Obrázek 24 - Kvalita hovoru při zapnutí technologii WMM ve vytíženém prostředí	58
Obrázek 25 - Vytížené prostředí při zapnutí technologii WMM	58
Obrázek 26 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou v laboratorním prostředí	59
Obrázek 27 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou v laboratorním prostředí	59
Obrázek 28 - SIP a RTP cesty při testování kodeků	61
Obrázek 29 - Porovnání kodeků ve vytíženém prostředí	63
Obrázek 30 - Kvalita hovoru při použití různých kodeků ve vytíženém prostředí	63
Obrázek 31 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou při použití různých kodeků	64
Obrázek 32 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou při použití různých kodeků	64
Obrázek 33 - SIP a RTP cesty při testování různých zařízení	65
Obrázek 34 - Porovnání různých zařízení	68
Obrázek 35 - Kvalita hovoru různých zařízení	68
Obrázek 36 - Porovnání SIP a Skype hovorů ve vytíženém prostředí	70
Obrázek 37 - Rychlost přenosu dat PC s Wi-Fi kartou při testování aplikace Skype	70
Obrázek 38 - Ztrátovost a odezva PC s Wi-Fi kartou při testování aplikace Skype	71
Obrázek 39 - Trasa testování roamingu	72
Obrázek 40 - SIP a RTP cesty při testování roamingu.....	73
Obrázek 41 - Délka připojení a ztrátovost paketů při roamingu u jednotlivých standardů.....	78
Obrázek 42 - Kvalita hovoru při roamingu u jednotlivých standardů	79

10.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání VoIP kodeků (zdroj: autor)	19
Tabulka 2 - Hodnoty stupnice MOS (zdroj: [21]).....	21
Tabulka 3 - Dosah frekvencí (zdroj: [12])	24
Tabulka 4 - Úbytek signálu dle materiálu v závislosti na frekvenčním pásmu (zdroj: [26])	26
Tabulka 5 - Třídy provozu WMM (zdroj: [32]).....	31
Tabulka 6 - Přehled populárních mobilních aplikací (zdroj: autor)	34
Tabulka 7 - Nastavení sítě eduroam.....	41
Tabulka 8 - Parametry testovacího notebooku.....	42
Tabulka 9 - Parametry testovacích PC s Wi-Fi kartou	44
Tabulka 10 - Parametry serveru	44
Tabulka 11 - StarTrinity SIP Tester - Registration (UAC)	45
Tabulka 12 - Konfigurace aplikace Zoiper - iPhone	46
Tabulka 13 - Konfigurace aplikace Zoiper - Android	47
Tabulka 14 - Výpočet MOS v Excelu	50
Tabulka 15 - Kvalita hovoru - Výchozí nastavení - Nevytížené prostředí.....	51
Tabulka 16 - Kvalita hovoru - Výchozí nastavení - Vytížené prostředí	51
Tabulka 17 - Kvalita hovoru - Detekce hovorů na řadiči - Nevytížené prostředí	54
Tabulka 18 - Kvalita hovoru - Detekce hovorů na řadiči - Vytížené prostředí.....	55
Tabulka 19 - Kvalita hovoru - Použití WMM - Vytížené prostředí.....	57
Tabulka 20 - Výpočet MOS pro kodek G.722	60
Tabulka 21 - Kvalita hovoru - Kodek G.722 - Vytížené prostředí	61
Tabulka 22 - Kvalita hovoru - Kodek G.729 - Vytížené prostředí	62
Tabulka 23 - Kvalita hovoru - Android - Vytížené prostředí	65
Tabulka 24 - Kvalita hovoru - IP telefon	66
Tabulka 25 - Kvalita hovoru - DECT telefon.....	67
Tabulka 26 - Kvalita hovoru - Analogový telefon	67
Tabulka 27 - Kvalita hovoru - Skype	69
Tabulka 28 - Kvalita hovoru při roamingu - Výchozí nastavení.....	74
Tabulka 29 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11k a 802.11v	75
Tabulka 30 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11r	76
Tabulka 31 - Kvalita hovoru při roamingu - 802.11k, 802.11v a 802.11r	77