

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH ZASÍŤOVÁNÍ VZDÁLENÉ OBLASTI

DESIGN OF REMOTE AREA NETWORKING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Mikulský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Anna Kubánková, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Petr Mikulský

ID: 183803

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh zasíťování vzdálené oblasti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologiemi používanými při zasíťování vzdálených oblastí. Udělejte teoretický rozbor těchto technologií, zjistěte výhody a nevýhody každé z technologií. Na základě modelových možností připojení v dané oblasti a s použitím rozebraných technologií navrhnete fyzickou a logickou topologii sítě pro tuto oblast. Pomocí simulačního softwaru analyzujte a optimalizujte navrženou síť. Zvolte nejvhodnější řešení zasíťování pro zvolenou oblast.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVOTNÝ, Vit. Architektura sítí (skriptum). FEKT VUT v Brně, 2009.

[2] CISCO. Internetworking Technologies Handbook. USA: Cisco Press, 2001. ISBN 1-58705-001-3.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Anna Kubánková, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zasíťování dvou vesnic poblíž města Lževsk. Úvodní část práce popisuje jednotlivé technologie, které mohou být použity pro vytvoření sítě. V další části bakalářské práce je vypracován návrh sítě, návrh obsahuje logickou a fyzickou topologii sítě. Poslední část bakalářské práce obsahuje simulaci navržené sítě v elektromagnetickém simulačním nástroji Wireless InSite.

KLÍČOVÁ SLOVA

Návrh sítě, technologie, vzdálená oblast, WiFi 802.11ac, Wireless InSite.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with creation of network for two villages near the russian city lzhevsk. The introductory part of the thesis describes single technologies, that can be used for creation of the network. In the successive part of the bachelor thesis a network design is created, that contains logical and physical network topology. Last part contains simulation of created network in an electromagnetic simulation tool Wireless InSite.

KEYWORDS

Network design, outlying area, technology, WiFi 802.11ac, Wireless InSite.

MIKULSKÝ, Petr. *Návrh zasíťování vzdálené oblasti*. Brno, Rok, 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Anna Kubánková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh zasíťování vzdálené oblasti“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce paní Ing. Anně Kubánkové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Přenosová média	13
1.1 Venkovní vedení	13
1.2 Kabelová vedení	13
1.2.1 Metalická vedení	13
1.2.2 Optická vedení	14
1.3 Bezdrátová vedení	15
1.3.1 Pozemní rádiové přenosy	15
1.3.2 Družicové spoje	15
1.3.3 Optické přenosy	15
2 Přístup po elektrické síti	16
3 Digitální účastnická přípojka	17
3.1 Asymetrické xDSL	17
3.2 Symetrické xDSL	18
4 Optické sítě	19
4.1 Pasivní optické sítě	19
4.1.1 APON	19
4.1.2 EPON	20
4.1.3 GPON	20
4.2 Aktivní optické sítě	20
4.3 Dvoubodové optické sítě	20
5 Bezdrátové sítě	21
5.1 Rádiové sítě WLAN – WiFi	22
5.1.1 Vývoj standartů 802.11	22
5.1.2 Topologie sítě	23
5.2 Rádiové sítě WMAN – WiMAX	24
5.2.1 Topologie sítě	24
6 Návrh zasíťování	26
6.1 Analýza lokality	26
6.2 Návrh sítě	26

7	Dostupné simulátory	32
7.1	Wireless InSite	32
7.2	Riverbed Modeler	32
7.3	NS3	33
7.4	Výběr simulačního softwaru	33
7.5	Další použitý software	35
7.5.1	Global Mapper	35
8	Analýza navržené sítě	36
8.1	Prostředí Wireless InSite	36
8.1.1	Načtení topografické mapy	36
8.1.2	Import terénních dat	36
8.1.3	Vytvoření elektromagnetické vlny	37
8.1.4	Vytvoření antény	37
8.1.5	Umístění vysílače/přijímače	37
8.1.6	Vytvoření studijní oblasti	38
8.1.7	Tvorba komunikačního systému	38
8.2	Porovnání s webovým kalkulátorem	39
8.3	Simulace vlivu okolního rušení	40
8.3.1	Původní návrh sítě	40
8.3.2	Zvýšení výkonu vysílače v Iževsku	41
8.3.3	Rušící stanice	42
8.3.4	Optimální nastavení vysílačů	43
9	Závěr	44
	Literatura	45
	Seznam příloh	49
A	Technické parametry vysílače	50
A.1	Originální ruský dokument	50
A.2	Český překlad	51
B	Powerbeam 5ac datasheet	53
B.1	PBE-5AC-300	53
B.2	PBE-5AC-400	54
B.3	PBE-5AC-620	55
C	Terénní profily	56

D	Obsah přiloženého CD	58
D.1	Elektronická verze bakalářské práce	58
D.2	Projekty v simulátoru Wireless InSite	58

Seznam obrázků

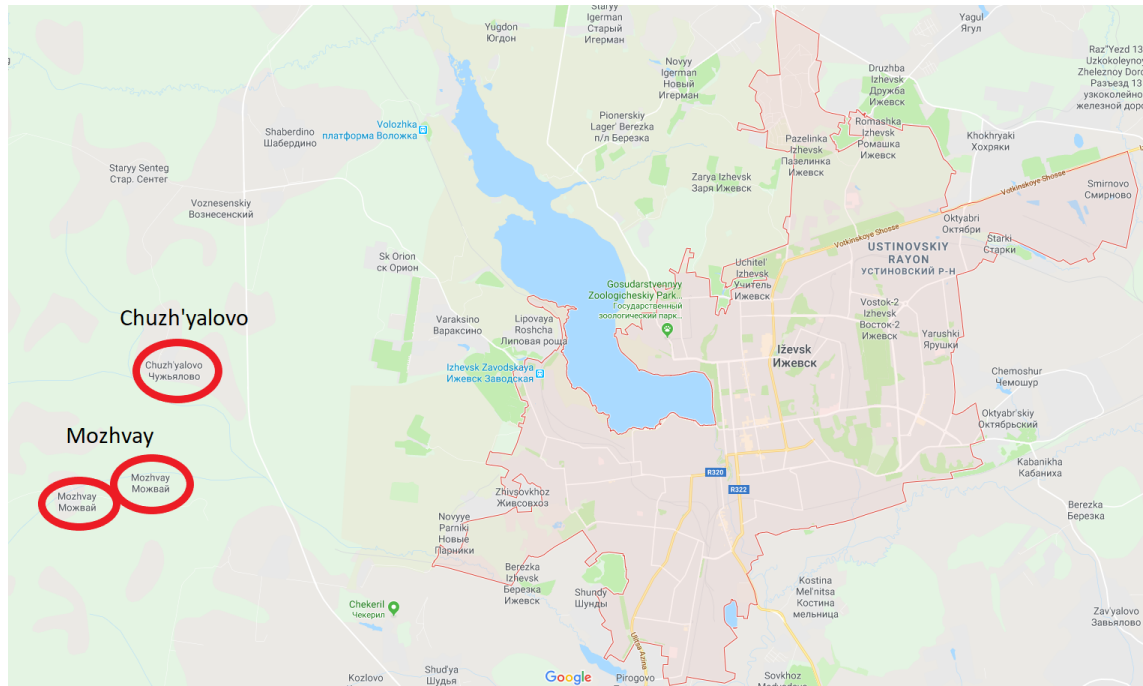
1	Mapa oblasti pro zasíťování [1].	11
5.1	Rozdělení bezdrátových sítí podle užití.	21
5.2	Konfigurace sítě ad hoc a infrastrukturní sítě.	23
5.3	Topologie sítě WiMax.	24
6.1	Mapa rádiových PP spoju.	27
6.2	PBE-5AC-620.	27
6.3	EdgeRouter Lite-3.	27
6.4	Výpočet rádiového spoje Ivžesk – bod X.	28
6.5	PBE-5AC-400.	28
6.6	Router X SFP.	28
6.7	Výpočet rádiového spoje bod X – Mozhvay (větší část).	29
6.8	Výpočet rádiového spoje bod X – Mozhvay (menší část).	29
6.9	Výpočet rádiového spoje bod X – Chuzh’yalovo.	30
6.10	Logická topologie navržené sítě.	30
8.1	Rozmístění rušících stanic.	42
C.1	Terénní profil spoje bod X – Iževsk.	56
C.2	Terénní profil spoje Mozhvay (větší část) – bod X.	56
C.3	Terénní profil spoje Mozhvay (menší část)– bod X.	57
C.4	Terénní profil spoje bod X – Chuzyalovo.	57

Seznam tabulek

7.1	Porovnání vybraných simulátorů	34
8.1	GPS souřadnice jednotlivých vysílačů/přijímačů	37
8.2	Porovnání výsledků ze softwarového nástroje Wireless InSite s webovým kalkulátorem.	39
8.3	Rádiový spoj Iževsk – bod X, vysílací výkon 15 dBm.	40
8.4	Rádiový spoj bod X – Mozvay (větší část), vysílací výkon 15 dBm.	40
8.5	Rádiový spoj bod X – Mozvay (menší část), vysílací výkon 15 dBm.	41
8.6	Rádiový spoj bod X – Chuzh’yalovo, vysílací výkon 15 dBm.	41
8.7	Rádiový spoj Iževsk – bod X, vysílací výkon 24 dBm.	41
8.8	Rušení generované jednotlivými rušícími stanicemi (při různých vysílacích výkonech) na rádiový spoj Bod X – Iževsk.	42
8.9	Vliv rušících stanic (při různých vysílacích výkonech) na propustnost rádiového spoje Bod X – Iževsk.	43

Úvod

Tato práce se věnuje návrhu zasíťování vzdálené oblasti, konkrétně se jedná o dvě malé vesničky Mozhvay a Chuzh'yalovo v Rusku, nedaleko velkého průmyslového města Ivžesk viz obr. 1.



Obr. 1: Mapa oblasti pro zasíťování [1].

Chuzh'yalovo je větší z těchto dvou vesnic, žije zde 57 lidí. Vesnice Mozhvay má dvě části, první část má 47 stálých obyvatel, v druhé části žije jen 15 obyvatel (údaje z roku 2015). Ivžesk, který se nachází asi 1100 km východně od Moskvy, je hlavním městem Urmudské republiky a má zhruba 646 tisíc obyvatel (údaje z roku 2017). Ivžesk proslul zejména výrobou slavné útočné pušky AK-47, jejíž konstruktér Mikhail Timofeevich Kalashnikov se do města přistěhoval roku 1949. Po M. T. Kalashnikovovi dokonce pojmenovali místní státní technickou univerzitu Kalashnikov Izhevsk State Technical University [2].

Prvních pět kapitol semestrální práce slouží jako teoretický rozbor technologií používaných při zasíťování. První kapitola seznamuje s druhy přenosových médií. Přístupová média jsou zde rozdělena podle typu vedení na venkovní, kabelová a bezdrátová. Druhá kapitola popisuje přístup po elektrické síti. Třetí kapitola je zaměřena na digitální účastnické přípojky xDSL, problémy spojené s touto technologií a na jednotlivé typy této technologie. Čtvrtá kapitola bakalářské práce je věnována

optickým sítím, především se věnuje pasivním optickým sítím. Pátá kapitola seznamuje s druhy bezdrátových sítí, podrobněji jsou zde popsány rádiové sítě WiFi a WiMAX. Kapitola šestá je praktickou částí semestrální práce, ve které je vypracován vlastní návrh možného řešení zasíťování vzdálené oblasti. V kapitole je popsána navržená fyzická a logická topologie sítě pro zadanou oblast. Sedmá kapitola pojednává o vybraných softwarových simulátorech, které jsou vhodné pro simulaci navržené sítě. V osmé kapitole je vypracována analýza navržené sítě, pomocí elektromagnetického simulačního nástroje Wireless InSite.

1 Přenosová média

Přenosová média jsou zprostředkovatelem spojení mezi dvěma body, existuje jich široká škála a lze je rozdělit do několika kategorií.

1.1 Venkovní vedení

Venkovní drátové vedení bylo hojně využíváno v minulém století, avšak dnes se používá stále méně, zejména díky špatným přenosovým vlastnostem. Venkovní vedení je silně ovlivňováno povětrnostními podmínkami a trpí velkou poruchovostí, způsobenou např. námrazou nebo silným větrem [3].

1.2 Kabelová vedení

1.2.1 Metalická vedení

Symetrická – Jedná se o kroucené *Cu* páry, při výrobě je dbáno, aby jednotlivé vodiče dosahovaly minimální kapacitní nerovnováhy, minimálních rozdílů útlumu vodičů, minimální hodnoty přeslechu na blízkém a na vzdáleném konci, minimalizují se rozdíly v impedanci a zpětném odrazu.

Podle frekvenčních možností dělíme tyto kabely do 7 kategorií:

- **Level 1, 2** – pro telefonní provoz;
- **Cat3** – pro data, 10 MHz, ISDN (*Integrated Services Digital Network*);
- **Cat4** – pro data, 16 MHz, Token Ring, Ethernet;
- **Cat5** – pro data, 100–300 MHz, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Ethernet;
- **Cat5e** – pro data, rozšířená Cat5 (vyšší nároky na splnění standardu);
- **Cat6** – pro data, 500 MHz, 1000Base-TX;
- **Cat6a** – pro data, 500 MHz, 10GBase-T;
- **Cat7** – pro data, 1 200 MHz, 10GBase-T, multimédia.

Dále můžeme kroucené symetrické páry dělit podle stínění:

- **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*) – nestíněná kroucená dvojlinka;
- **STP** (*Shielded Twisted Pair*) – stíněná kroucená dvojlinka (každý pár kabelů je stíněný zvlášť);
- **FTP** (*Foil Shielded Twisted Pair*) – stíněná kroucená dvojlinka (stínění je provedeno až kolem všech párů kabelu).

Nesymetrická koaxiální vedení – Symetrické kabely nelze využít pro přenos širších frekvenčních pásem, pro tyto přenosy se využívají koaxiální kabely tvořené stíněním a jedním vnitřním drátovým vodičem, jelikož u nich nevzniká vzájemné ovlivňování souběžných párů. Koaxiální kabely se nejčastěji využívají jako svody od televizní antény, televizní rozvody [3] [4].

1.2.2 Optická vedení

Pro přenos informace je využíván světelný paprsek. Optický přenosový systém je tvořen zdrojem světelného záření (laser, luminesenční dioda), optickým prostředím (optické vlákno) a detektorem záření (fotodioda). Optické vlákno je vyrobeno ze skla nebo plastu. Při přenosu na rozdíl od metalických kabelových vedení u optických vedení, nevznikají elektrická ani magnetická pole, proto je optický přenosový systém odolnější proti vnějším rušivým signálům. Pro přenos informace optickým vláknem se využívají tzv. optická okna, oblasti kolem vlnových délek 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Optická vlákna můžeme spojovat svářením, lepením nebo pomocí konektorů. Optická vlákna dělíme na jednovidová a mnohovidová, hlavní rozdíl je v průměru optického vlákna. Průměr vlákna má vliv na rozptyl a odraz světla v optickém vlákně, rozptyl světla určuje maximální délku optického spoje.

Jednovidová optická vlákna – Tyto vlákna mají velmi malý průměr jádra a umožňují přenos pouze jednoho vidu elektromagnetické vlny, jako zdroje světelného záření se používají lasery. Jednovidová optická vlákna mají velkou přenosovou kapacitu, jejich maximální dosah činí až 100 km bez použití regenerátoru signálu. Jednovidová optická vlákna používané v telekomunikacích pracují na vlnové délce 1310 nebo 1550 nm.

Mnohovidová optická vlákna – Přenášejí více vidů, mají menší přenosovou kapacitu a větší průměr jádra. Používají se pro přenosy na krátkou vzdálenost do 600 m. Na rozdíl od jednovidových optických vlákn pracují na vlnové délce 850 nm a jako světelný zdroj využívají luminesenční diodu [3] [4].

1.3 Bezdrátová vedení

Výhodou všech bezdrátových vedení je nepotřebnost kabeláže. Tato výhoda přináší možnost mobility koncových uživatelů a rychlou instalaci těchto systémů.

1.3.1 Pozemní rádiové přenosy

- **do 1 GHz** – Analogový rozhlas a TV, analogové bezdrátové telefony, digitální mobilní systémy.
- **nad 1 GHz (mikrovlny)** – Bluetooth, DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunication*), FWA (*Fixed Wireless Access*), WLAN (*Wireless Local Area Network*), WiMAX [3].

1.3.2 Družicové spoje

Nejvýznamnější družice jsou umístěny na geostacionární dráze, jsou propojeny se stanicemi na pozemském povrchu. Družicové spoje jsou vhodné zejména pro realizaci spojení v oblastech bez vybudované telekomunikační infrastruktury (neobydlené oblasti, moře, vzdušný prostor, ...). Tyto spoje jsou využívány pro přenos telefonických hovorů, dat, TV. Družice jsou umístěné ve výšce 35 000 km, z pohledu pozorovatele ze Země se jeví jako stacionární [3] [4].

1.3.3 Optické přenosy

Optické bezdrátové přenosy využívají laserový spoj a jako přenosové médium slouží atmosféra. Jedná se o spoje na přímou viditelnost, jsou snadno realizovatelné duplexní spoje. Uplatnění nacházejí v sítích LAN (*Local Area Network*) a MAN (*Metropolitan Area Network*). Optické přenosy jsou realizovatelné na vzdálenost maximálně v jednotkách kilometrů [3] [4].

2 Přístup po elektrické síti

Elektrická síť je velmi rozšířená, proto je tato technologie zajímavá z hlediska využití existujících rozvodů, hlavně v málo osídlených oblastech, které nejsou pokryty ani kabelovou sítí. Tuto technologii používají energetické společnosti po celém světě pro vzdálená měření a řízení. Bohužel využití elektrické sítě znamená pro datové přenosy nutnost řešit řadu technických problémů. Elektrická síť představuje velmi rušivé přenosové médium, je nutné zvolit vhodné kódování, modulaci, techniky detekce a korekce chyb.

Širokopásmová komunikace po elektrické síti PLC (*Power Line Communications*) zahrnuje tyto typy komunikačních systémů:

- **přístupové sítě nízkého napětí** (do 1 kV) – díky rozdílné topologii systémů distribuce energie v Evropě a Americe se liší provedení sítě. V Evropě jsou kvůli delším vzdálenostem přístupové elektrické sítě zapotřebí opakovače, naopak Americe je potřeba jen PLC zakončovací modem instalovaný v transformátoru, který má rozhraní pro připojení k páteřní síti. Na straně distribučního transformátoru je zakončení vedení a u uživatele je zakončení sítě;
- **přístupové sítě středního napětí** (1–36 kV) – zakončovací modemy v transformátorech propojeny přímo po vedení středního napětí, oproti přístupovým sítím nízkého napětí mají menší šum a umožňují delší vzdálenosti přenosu. Vyžadují speciální vazební obvody jako ochranu před napětím ze sítě;
- **domácí sítě** – využití domácích rozvodů pro realizace rychlé komunikace ve vnitřním prostředí.

3 Digitální účastnická přípojka

Digitální účastnická přípojka je vyhrazená dvoubodová služba, která je realizovaná po stávajícím telefonním vedení. Jako přenosové médium jsou použity metalické kabely (kroucená dvojlinka). Maximální kapacita, kterou je metalické vedení schopné poskytnout, je 52 Mbit/s. Po DSL přípojce je možné přenášet data, hlas i video. Telefonní síť je jednou z nejrozšířenějších infrastruktur ve světě, a tudíž má velký předpoklad pro uplatnění v řešení rychlého přístupu k internetu.

U technologie DSL záleží zejména na délce vedení od nejbližší ústředny k uživateli, na tloušťce a celkové kvalitě vedení. Pro provozovatele DSL přináší možnost plně využít stávající metalické vedení a s relativně malými náklady docílit služeb stejné kvality jako v případě nákladnější výměny přípojek za optické kabely. Existuje celá rodina standardů xDSL. Pro poskytování širokopásmového přístupu k internetu jsou z technologií xDSL perspektivní ADSL (*Asymmetric DSL*), SDSL (*Symmetric DSL*) a VDSL (*Very-high-bit-rate DSL*). Technologie ADSL je určena zejména pro domácnosti, technologie SDSL hlavně pro podniky a technologie VDSL umožňuje poskytování obrazových služeb s vysokou kvalitou.

Hlavní problémy přenosu xDSL:

- **ztráta šířením** (*propagation loss*) – závisí na vysílacím kmitočtu, vzdálenosti a fyzických vlastnostech metalického vedení;
- **přeslech na vzdáleném konci FEXT** (*Far-End crossTalk*) – toto rušení vzniká, když je více signálů přenášeno v totožném směru po různých UTP párech a spektra těchto signálů se překrývají;
- **přeslech na blízkém konci NEXT** (*Near-End crossTalk*) – toto rušení vzniká, když je více signálů přenášeno v opačném směru po různých UTP párech a spektra těchto signálů se překrývají, mnohem závažnější dopad než FEXT;
- **nesouhlasná impedance** – vzniká ve všech spojovacích místech komunikačního vedení;
- **šum** – rušení způsobené okolními systémy [5].

3.1 Asymetrické xDSL

- **ADSL** (*Asymmetric DSL*) – větší kapacita směrem k uživateli (downstream) do 8 Mbit/s než směrem od uživatele (upstream) do 1 Mbit/s, na stejném vedení lze zároveň provozovat telefonní linku.
- **ADSL2** – hlavním přínosem oproti ADSL je zavedení flexibilní struktury rámce bez pevné délky, což umožňuje podstatně snížit režii přenosu. ADSL2 umožňuje downstream až 12 Mbit/s a upstream až 3,5 Mbit/s.

- **ADSL2+** – největší inovace spočívá v rozšíření kmitočtového pásma a ve zvýšení počtu subnosných. ADSL2+ teoreticky umožňuje downstream až 24 Mbit/s. Těchto teoretických rychlostí je dosaženo při malé vzdálenosti mezi účastníkem a DSLAM. S narůstající délkou vedení klesá maximální přenosová rychlost, při délce nad 3 km dosahují všechny varianty ADSL zhruba stejné maximální přenosové rychlosti.
- **RDSL** (*Rate-Adaptive DSL*) – obdoba ADSL, navíc oproti ADSL disponuje schopností analyzovat stav komunikačního vedení a přizpůsobit přenosovou rychlost [5] [8].

3.2 Symetrické xDSL

- **SDSL** (*Symmetric DSL*) – symetrická varianta ADSL, přenosové rychlosti se pohybují maximálně do 2 Mbit/s, vzdálenost do 6 km.
- **HDSL** (*High-bit-rate DSL*) – symetrické využití přenosového pásma rychlostí do 2,048 Mbit/s po 2 nebo 3 párech na vzdálenost do 4 km.
- **VDSL** (*Very-high-bit-rate DSL*) – nejrychlejší varianta xDSL, umožňuje jak asymetrické (dopředný směr až 52 Mbit/s, zpětný směr až 2,3 Mbit/s), tak symetrické přenosy (až 36 Mbit/s v každém směru) na vzdálenost 300 m až 1 km, využívá kmitočty nad 1 MHz.
- **VDSL2** – podstatným vylepšením je rozšíření kmitočtového pásma a zdvojnásobení rozteče subkanálů. Teoretická přenosová rychlost je na krátké vzdálenosti až 100 Mbit/s, v praxi bývá na jednom kabelu instalováno větší množství digitálních systémů (desítky až stovky párů v kabelu). V tomto případě lze při 20 % obsazení kabelu dosáhnout na 500 m rychlosti 25 Mbit/s symetricky.
- **IDSL** (*ISDN DSL*) – symetrické DSL na bázi ISDN, plně duplexní kanál o přenosové rychlosti 144 kbit/s (součet dvou kanálů 64 kbit/s + řídicí kanál 16 kbit/s), nemusí navazovat spojení v ústředně, neumožňuje přenášet vedle dat i hlas [5] [8].

4 Optické sítě

Přístup po optické síti je s ohledem na spolehlivost a kapacitu bezkonkurenční. Spolehlivost (měřená např. chybovostí) je oproti metalickým nebo bezdrátovým sítím výrazně lepší. Mezi další klady optických sítí patří vysoká životnost optického kabelu, odolnost vůči elektromagnetickému rušení nebo korozi. Komunikace po optické síti je velmi bezpečná, neboť je optický kabel odolný proti nežádoucímu odposlechu. Již vybudovaná optická síť je ve srovnání s metalickou nebo kombinovanou sítí levnější jak na provoz, tak na údržbu (optická síť nevyžaduje tolik přepínačů a další elektroniky). Z ekonomických důvodů je budování optických sítí velmi náročné. Je potřeba počítat nejen s náklady na zakoupení techniky, ale také s náklady na práce spojenými s pokládáním kabelů. Optické připojky FTTx (*Fiber To The x*) jsou realizovány mnoha způsoby, které se liší architekturou a místem, kam je síť dovedena (např. FTTC (*Fiber To The Curb*), FTTH (*Fiber To The Home*), FTTS (*Fiber To The Subscriber*), FTTB (*Fiber To The Building*), ...). Nejčastěji se můžeme setkat s pasivní optickou sítí PON (*Passive Optical Network*) ve variantách APON (*ATM Passive Optical Network*), GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) nebo EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), méně často s řešením dvoubodových optických spojů nebo aktivní optickou sítí [5].

4.1 Pasivní optické sítě

Pasivní optická síť PON (*Passive Optical Network*) se skládá ze zakončení optického vedení OLT (*Optical Line Termination*) na straně ústředny, na které se připojují optické rozbočovače. K nim se připojují optické síťové jednotky ONU (*Optical Network Unit*). Vzdálenost mezi OLT a ONU může dosahovat až desítky km. Pasivní optické rozdělovače (splittery) nebo rozbočovače umožňují sdílet kapacitu sítě pro 32 domácností. PON je velmi levné řešení ve srovnání s instalací individuálních kabelů ke každému účastníkovi [5].

4.1.1 APON

Pasivní optická síť APON je založena na ATM, zajišťuje různé úrovně kvality služby pro různé typy provozu. Umožňuje buď symetrickou službu rychlostí 155 Mbit/s nebo asymetrickou službu downstream 622 Mbit/s a upstream 155 Mbit/s. Přenosové médium se skládá z jednoho nebo dvou vláken. Zakončovací systém APON podporuje více zakončení optické sítě, tím se snižují náklady na jednoho uživatele [5].

4.1.2 EPON

Pasivní optické sítě EPON na bázi Ethernetu EPON jsou v současné době nejrozšířenější varianta pasivních optických sítí. Je to dáno zejména nativní podporou Ethernetu, nižšími náklady a pořizovacími cenami koncových jednotek [6].

4.1.3 GPON

Gigabitová optická síť GPON podporuje provoz v nativním režimu (hlas ani data není nutno zapouzdřovat do IP (*Internet Protocol*) paketů nebo ATM buněk pro přenos sítí. GPON má oproti APON a EPON minimální režii, ta se pohybuje kolem 7%. GPON je pro provozovatele atraktivní díky nízkým pořizovacím i provozním nákladům [5].

4.2 Aktivní optické sítě

Aktivní přístupové sítě tvoří základ hybridních sítí, na optickou část sítě ve vyšší úrovni navazuje nižší úroveň tvořená dalšími technologiemi jako např. xDSL nebo rádiové prostředky. Hlavní výhodou aktivních přístupových sítí oproti pasivním sítím PON je možnost překlenutí větších vzdáleností mezi OLT a ONU, nevýhodou jsou náklady na jejich budování. Je nutné zajištění napájení aktivních síťových prvků použitých v distribuční síti (rozbočovačů, opakovačů nebo muldexů) [5] [7].

4.3 Dvoubodové optické sítě

Domácnostem vyhovuje PON jako sdílená širokopásmová síť, firmy mohou kvůli bezpečnosti a kapacitě preferovat dvoubodové spoje. Vyhrazený dvoubodový spoj je kapacitně výhodnější než pasivní síť, protože znamená přímé připojení účastníků k centralizovanému přepínači [5].

5 Bezdrátové sítě

Nespornou výhodou bezdrátových sítí je jednoduché a nenákladné budování síťové infrastruktury, odpadá totiž nutnost pokládat kabelové trasy. Propojení stanic elektromagnetickými vlnami poskytuje větší pružnost sítě a umožňuje pohyblivost koncových uživatelů. Bezdrátové sítě můžeme dělit dle mnoha různých kritérií:

1. Podle typu signálu:

- **rádiové sítě** – nejběžnější, rádiový signál prochází zdmi, některé sítě v závislosti na technologii vyžadují přímou viditelnost, s rostoucím kmitočtem klesá dosah, pro komunikaci ve volném prostředí jsou vhodné mikrovlnné technologie (přenosy do 50 km), pro vnitřní prostředí jsou vhodné systémy s rozprostřeným spektrem;
- **optické bezdrátové sítě** – velký dosah (stovky metrů), nutná přímá viditelnost, velká přenosová rychlost;
- **infračervené sítě** – malý dosah, neprůchodnost překážkami.

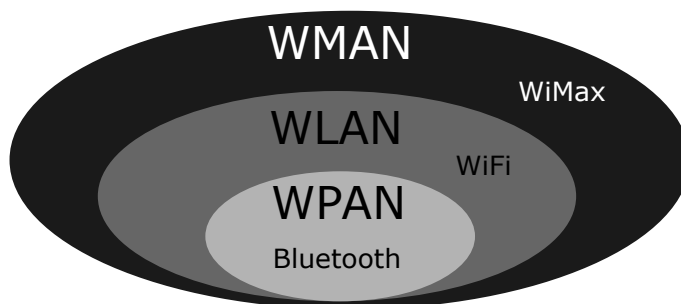
2. Podle kmitočtového pásma: rádiové sítě potřebují ke své činnosti přidělené kmitočtové pásmo. Kmitočtové pásmo může být:

- **licenční** – sdílí pouze omezený počet sítí, placené;
- **bezlicenční** – bezplatné, pouze omezení vyzařovacího výkonu, často bývají přetížená nejrůznějšími typy provozu.

Licence na konkrétní pásma jsou většinou vydávány v národním měřítku. Provoz sleduje a upravuje regulátor a jeho kontrolní složky.

3. Podle užití:

- **bezdrátové metropolitní sítě** (*WMAN, Wireless Metropolitan Network*) – využití v řešení poslední míle;
- **lokální sítě** (*WLAN, Wireless Local Area Network*) – využití v řešení poslední míle i v domácích sítích;
- **osobní sítě** (*WPAN, Wireless Personal Area Network*) – využití v řešení domácích sítích [5].



Obr. 5.1: Rozdělení bezdrátových sítí podle užití.

5.1 Rádiové sítě WLAN – WiFi

Sítě WLAN už se dnes nepoužívají pouze jako řešení domácích sítí, nacházejí uplatnění jako veřejný přístup k Internetu (tzv. *hot spot*) na místech s velkou koncentrací uživatelů, a také např. k překlenutí poslední míle obzvláště na venkově formou AP (*Access Point*). Zkratkou WiFi (*Wireless Fidelity*) je označována rodina bezdrátových komunikačních standardů WLAN 802.11, které pracují v bezlicenčních pásmech ISM (*Industrial Scientific and Medical*). Hlavními problémy jsou zajištění bezpečnosti bezdrátové komunikace a náchylnost bezdrátového vysílání k rušení, a to všemi zařízeními pracujícími na daném kmitočtu. Jelikož standardy pracují v pásmech ISM, dochází k rušení velmi často, obzvláště ve velkých městech, kde jsou tato pásma silně zarušena. Dosah a rychlost vysílání závisí na použitých kmitočtech, kvalitu přenosu také omezuje velikost sítě a omezený počet systémů nacházejících se v daném prostoru tak, aby nedocházelo k nežádoucímu rušení [5].

5.1.1 Vývoj standartů 802.11

IEEE 802.11 (rok 1997)

- pásmo 2,4 až 2,485 GHz;
- přenosová rychlost do 2 Mbit/s (1 nebo 2 Mbit/s);
- fyzická vrstva – princip FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) nebo DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

IEEE 802.11b (rok 1997)

- pásmo 2,4 až 2,485 GHz;
- přenosová rychlost až 11 Mbit/s;
- fyzická vrstva – princip DSSS.

IEEE 802.11a (rok 1999)

- pásmo 5,15 až 5,725 GHz;
- přenosová rychlost až 54 Mbit/s;
- fyzická vrstva – princip OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

IEEE 802.11g (rok 2003)

- pásmo 2,4 až 2,485 GHz;
- přenosová rychlost až 54 Mbit/s;
- fyzická vrstva – modulace 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), princip OFDM nebo DSSS.

IEEE 802.11n (rok 2009)

- pásmo 2,4 až 2,485 GHz a 5,15 až 5,725 GHz;
- přenosová rychlost do 600 Mbit/s;
- fyzická vrstva – princip OFDM, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

IEEE 802.11ac (rok 2013)

- pásmo 5 GHz;
- přenosová rychlost do 1 Gbit/s, šířka pásma $n \times 20$ MHz (až 80 MHz – adaptivní změna šířky pásma);
- fyzická vrstva – použití modulace až 256-QAM a 8x8 MIMO, OFDM [9].

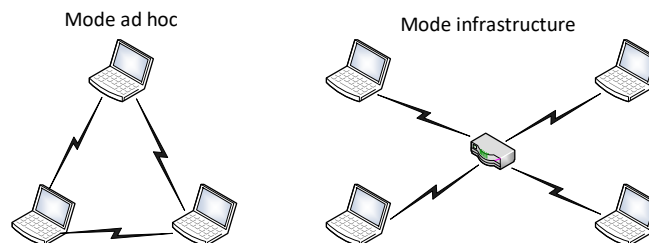
5.1.2 Topologie sítě

Bezdrátová síť WiFi může obsahovat tyto druhy fyzických komponentů sítě:

- distribuční systém – představuje páteřní síť;
- přístupový bod AP – poskytuje bezdrátový přístup k distribučnímu systému;
- stanice – fixní nebo mobilní zařízení, využívající pro komunikaci WiFi (např. smartphone, notebook);
- bezdrátové médium – přenosové médium, z technického pohledu lze popsat dostupnými rádiovými frekvencemi pro datový přenos.

Síť Wifi může pracovat ve dvou konfiguracích naznačených na obr. 5.2:

- **Nezávislé sítě ad hoc** – tvoří jednotlivě navzájem komunikující stanice, nezávisle na prostředníkovi, není tedy nutné instalovat žádnou podpůrnou síťovou infrastrukturu. Tato síťová konfigurace je vhodná pro zajištění rychlého spojení dvou a více stanic pro potřeby nárazového přenosu dat, které trvá omezenou dobu. Nevýdou je nutnost správné konfigurace sítě na straně jednotlivých stanic.
- **Infrastrukturní síť** – představují sítě s distribučním systémem, pro zajištění komunikace mezi stanicemi využívají prostředníka v podobě fixního přístupového bodu. Fixní přístupový bod funguje nejen jako základnová stanice, ale také jako datový most. Všechny základnové stanice komunikují pouze s přístupovým bodem, v jehož dosahu se nachází. Rozmístění přístupových bodů se volí tak, aby zajišťovaly co nejlepší pokrytí požadované oblasti. Pro zajištění mobility uživatelů bez ztráty spojení je nutné, aby se oblasti pokrytí sousedních přístupových bodů alespoň částečně překrývaly [9].



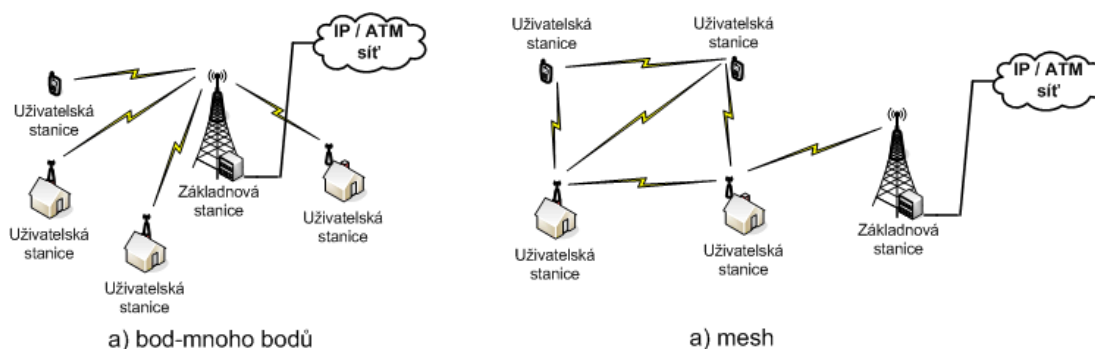
Obr. 5.2: Konfigurace sítě ad hoc a infrastrukturní sítě [10].

5.2 Rádiové sítě WMAN – WiMAX

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) podle normy IEEE 802.16 pracuje jak v licenčním, tak v bezlicenčním frekvenčním pásmu 2–11 GHz a nepožaduje přímou viditelnost, jelikož pracuje v režimu NLOS (*Non Line Of Sight*). WiMAX má maximální dosah ve venkovských oblastech až 50 km, v husté městské zástavbě má dosah do 3–5 kilometrů. WiMAX používá směrové antény a umožňuje kapacitu do 75 Mbit/s, kterou sdílejí všichni uživatelé, kteří jsou připojeni k dané základnové stanici. Základnové stanice jsou většinou instalovány na střechy budov, nejdříve komunikují s anténami přijímačů, pevně umístěnými na střechách, poté s vnitřními anténami. Technologie WiMAX byla navržena tak, aby vyhověla požadavkům na spolehlivost a dostupnost komunikační sítě v 99,999 %, a tudíž nachází uplatnění nejen v přístupových sítích, ale také v metropolitní bezdrátové komunikaci [11].

5.2.1 Topologie sítě

WiMAX může využít topologie point-to-multipoint (bod-mnoho bodů), kdy základnová stanice v centru komunikuje s mnoha připojenými uživateli zároveň, také může využívat topologii mesh (smyčkovou). Topologie mesh je v bezdrátových systémech efektivní, jelikož koncoví uživatelé mohou využít replikace signálu bezdrátovými směrovači na cestě od základnové stanice, takže nemusí být nutně v dosahu nebo přímé viditelnosti, signál neputuje přímo k cílovému přijímači, ale skok po skoku (hop by hop) [11].



Obr. 5.3: Topologie sítě WiMax [12].

Architektura sítě WiMAX se typicky skládá ze 2 částí:

- **Základnová stanice BS** (*Base Station*) – Základnová stanice se skládá z indoorové části zahrnující potřebnou technologii a ze stožáru s anténou. Základnová stanice pokrývá svým signálem území o poloměru cca 10 km (teoreticky až 50 km). Základnová stanice je k veřejným sítím připojena pomocí optických vláken, metalických kabelů, mikrovlnných spojů nebo jiných vysokorychlostních spojení typu PP (*Point to Point*), která se označují jako páteřní (backhaul).
- **Účastnická stanice SS** (*Subscriber Station*) – Tyto stanice mohou mít samostatnou anténu nebo se může jednat o samostatný box nebo o PC kartu, která je umístěna v notebooku nebo ve stolním počítači. Přístup k základnové stanici je podobný přístupu k bezdrátovému přístupovému bodu AP v síti WiFi. Pro připojení k základnové stanici se většinou používá topologie typu PMP (*Point to Multipoint*) (NLOS). Účastnická stanice obvykle obsluhuje budovu pomocí kabelové nebo bezdrátové sítě LAN [9].

6 Návrh zasíťování

6.1 Analýza lokality

Skrze e-mailovou konverzaci s pracovnící magistrátu města Ivžesk Aleksandrou Sterkhovovou bylo ověřeno, že se v dané lokaci nenachází žádný poskytovatel internetového připojení. Při návrhu je nutno brát v potaz, že daná lokace slouží zejména jako rekreační oblast. V těchto vesnicích se nachází desítky drobných rekreačních objektů, kam si jezdí od ruchu velkoměsta odpočinout obyvatelé města Ižesvk. Z tohoto důvodu je nutné počítat jako potencionální zájemce o internetové připojení i majitele těchto drobných rekreačních objektů. Pro návrh zasíťování v rámci této bakalářské práce je předpokládáno dohromady 150 potencionálních klientů rovnoměrně rozdělených mezi vesničky, tzn. 50 klientů v Chuzh'yalově a po 50 v každé části Mozhvaye. V okolí vesnic neexistuje vybudovaná přístupová optická síť, ke které by bylo možné se připojit. Nejbližší místo, kde by bylo takové připojení možné, je město Ivžesk. Z ekonomických důvodů byla výstavba optické sítě vyloučena. Vybudování takové sítě by bylo nákladné nejen kvůli vysokým nákladům na materiál a přístroje, ale především kvůli výdajům spojenými s budováním optických sítí, jako jsou výkopové práce nebo věcná břemena.

Technologie xDSL pro tento návrh také nebyla optimální volbou, neboť nejbližší ústředna se nachází až ve vzdálenosti cca 10 km. Technologie xDSL je ekonomicky realizovatelná pouze v hustě obydlených oblastech, protože kvalita přenosu přímo závisí na vzdálenosti mezi účastníkem a nejbližší ústřednou.

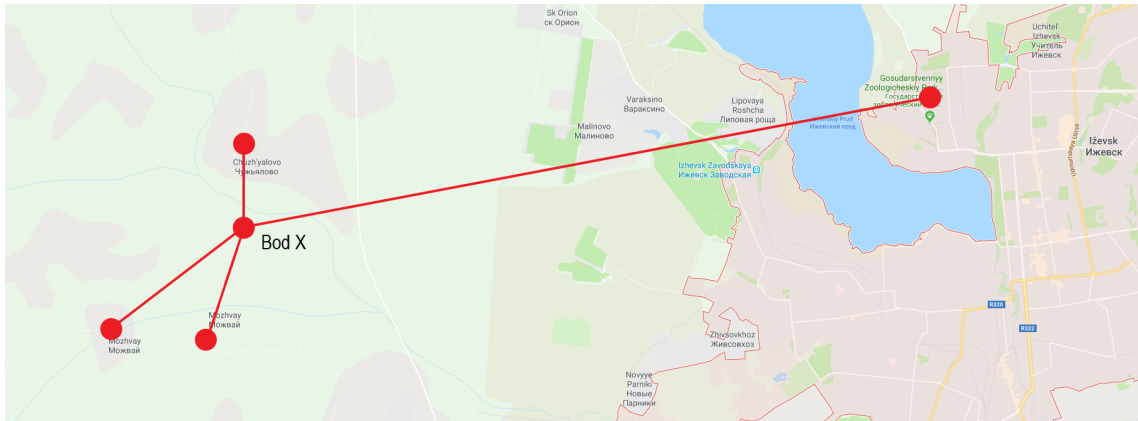
Zasíťování pomocí přístupu po elektrické síti nebylo zvoleno, s ohledem na nutnost řešení řady technických problémů, kterou sebou tato technologie nese.

Družicový spoj by byl sice lehce realizovatelný, avšak vzhledem k vysokým cenám za poskytované služby byla tato možnost taktéž zavrhnuta.

Řešení této bakalářské práce bude založeno na bezdrátových sítích a to zejména pro snadnou instalaci a pružnost těchto sítí. Nenutnost pokládání kabeláže umožňuje snadné překlenutí větších vzdáleností. Navíc při vysílání v bezlicenčním pásmu ISM jsou náklady na vybudování a provoz takové sítě velmi nízké.

6.2 Návrh sítě

V návrhu je počítáno s připojením k páteřní síti již existujícího ISP ve městě Ivžesk (např. Dom.ru, Mark-ITT, Rostelecom, . . .), odkud povede rádiový PP spoj až do bodu mezi Mozhvay a Chuzh'yalovo (dále jako bod X). Z bodu X dále povedou 3 rádiové PP do Chuzh'yalova a obou částí Mozhvay viz obr. 6.4, kde bude překlenutí poslední míle řešeno prostřednictvím bezdrátové přístupové sítě WiFi.



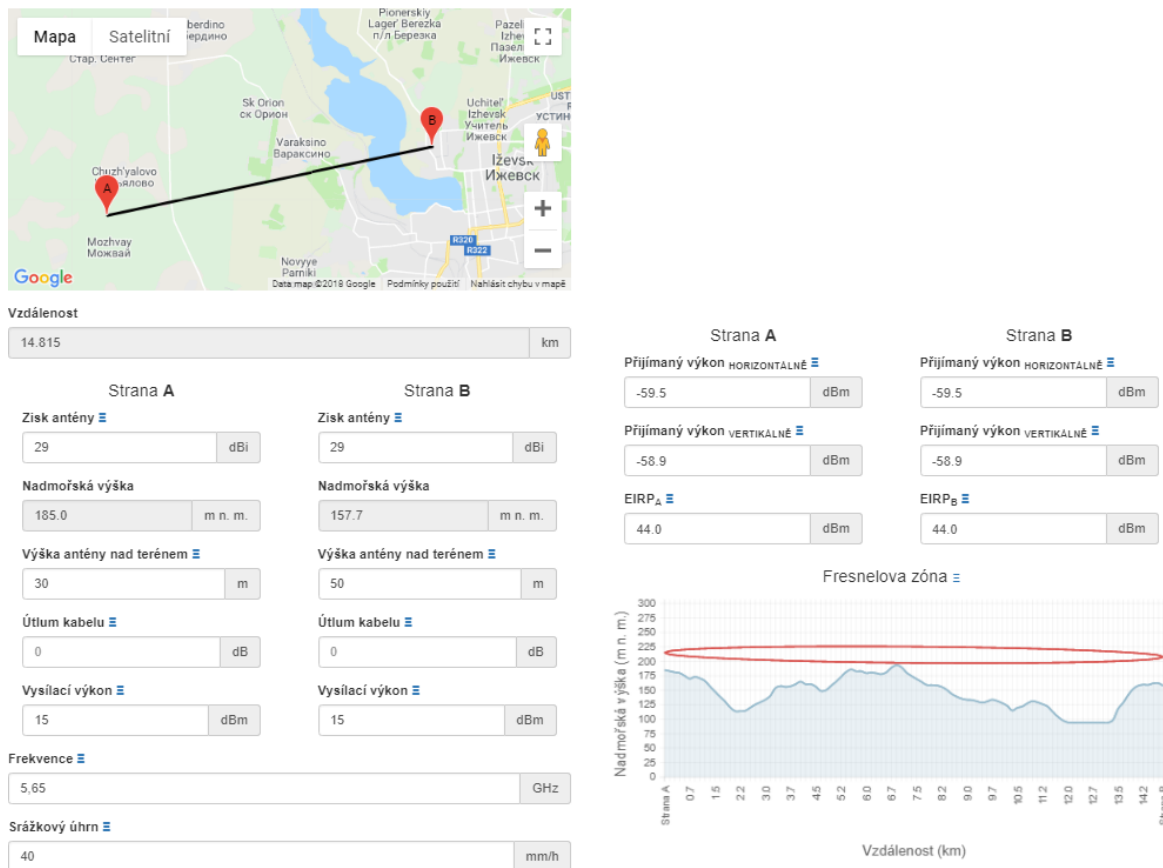
Obr. 6.1: Mapa rádiových PP spojů [1].

Připojení v Ivžesku bude v místě, kde se nachází moderní 17 podlažní budova, ne- daleko katedry výpočetní techniky Kalashnikovy iževské státní technické univerzity. V místě připojení je předpokládána konektivita, jednak kvůli blízkosti univerzity, a také kvůli moderním stavbám, jenž se v okolí místa nachází. Vysílač bude umístěn na střeše 17 podlažní budovy, pro účel výpočtu výšky vysílače byla počítána konstrukční výška podlaží 2,8 m.

Před vysílačem bude zapojen router Ubiquiti EdgeRouter Lite-3 (obr. 6.3), který v sobě má implementovaný Firewall. Toto zařízení má za úkol oddělit síť navrho- vanou, od sítě místního ISP. Jako vysílač do bodu X bude použit Ubiquiti PBE- 5AC-620 (obr. 6.2). Výpočty všech rádiových spojů byly prováděny pomocí kal- kulátoru radioreléových spojů na webových stránkách [http://cz.jirous.com/ vypocet-wifi](http://cz.jirous.com/vypocet-wifi). Všechny rádiové spoje budou pracovat na frekvenci 5,65 GHz v bez- licenčním ISM pásmu. Parametry vysílačů byly voleny tak, aby odpovídaly ruským normám pro bezdrátový přístup v rádiových bezlicenčních frekvenčních pásmech 5150–5350 MHz a 5650–6425 MHz viz příloha A.



Obr. 6.2: PBE-5AC-620 [13]. Obr. 6.3: EdgeRouter Lite-3 [14].



Obr. 6.4: Výpočet rádiového spoje Ivžesk – bod X [15].

V bodě X bude postavena 30 metrová věž. Na věži bude instalován ve směru na Iževsk opět vysílač PBE-5AC-620. PBE-5AC-620 bude propojen s Ubiquity EdgeMAX EdgeRouterem X SFP. Díky tomu, že router podporuje technologii PoE (*Power over Ethernet*), stejně jako všechny vysílače kategorie Ubiquiti PowerBeam ac, bude napájet všechny vysílače na něj připojené. Na router budou připojeny 2 vysílače PBE-5AC-300, první bude mířit na větší část obce Mozhvay, druhý na Chuzh'yalovo a jeden vysílač PBE-5AC-400 bude nainstalovaný směrem k menší části obce Mozhvay. K věži bude nutno přivést elektrické vedení pro napájení routeru.



Obr. 6.5: PBE-5AC-400 [13]. Obr. 6.6: EdgeRouter X SFP [16].

Vzdálenost
1.434 km

Strana A	Strana B
Zisk antény 22 dBi	Zisk antény 22 dBi
Nadmořská výška 185.0 m n. m.	Nadmořská výška 130.2 m n. m.
Výška antény nad terénem 30 m	Výška antény nad terénem 10 m
Útlum kabelu 0 dB	Útlum kabelu 0 dB
Vysílací výkon 15 dBm	Vysílací výkon 15 dBm

Frekvence
5.65 GHz

Srážkový úhrn
40 mm/h

Strana A	Strana B
Přijímaný výkon HORIZONTÁLNĚ -51.9 dBm	Přijímaný výkon HORIZONTÁLNĚ -51.9 dBm
Přijímaný výkon VERTIKÁLNĚ -51.8 dBm	Přijímaný výkon VERTIKÁLNĚ -51.8 dBm
EIRP_A 37.0 dBm	EIRP_B 37.0 dBm

Obr. 6.7: Výpočet rádiového spoje bod X – Mozhvay (větší část) [15].

Vzdálenost
2.704 km

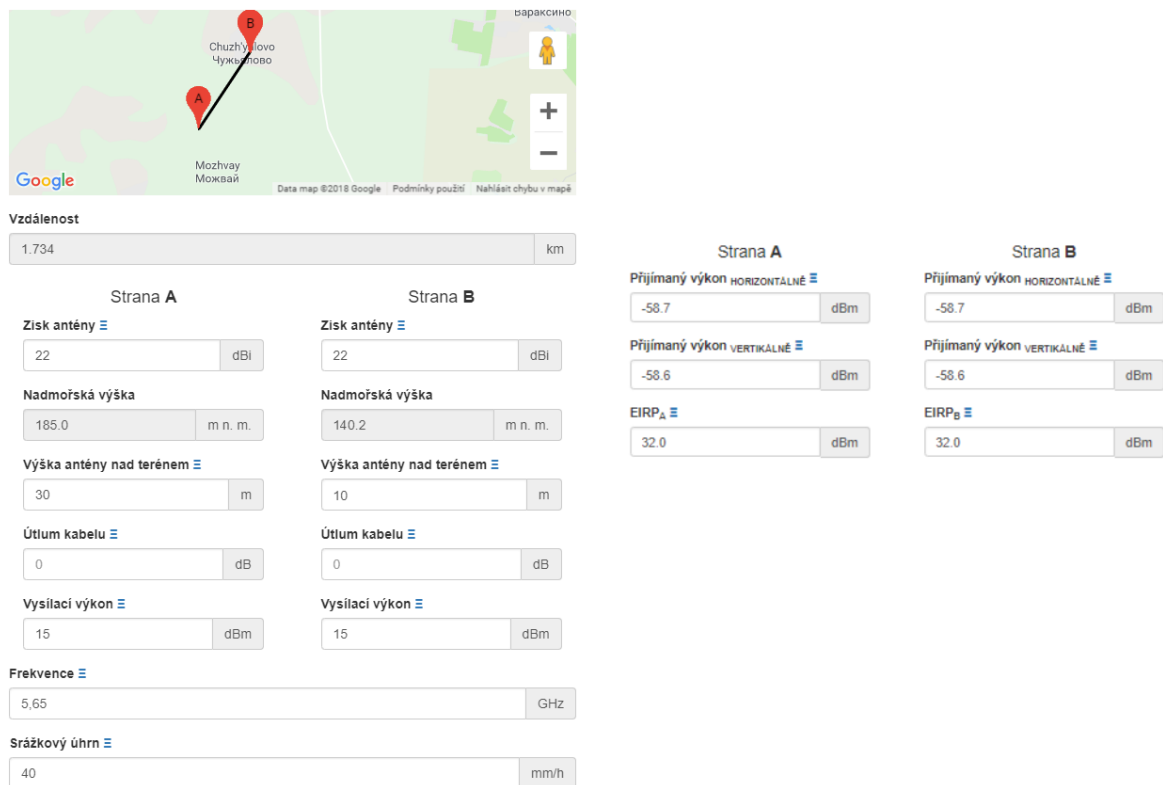
Strana A	Strana B
Zisk antény 25 dBi	Zisk antény 25 dBi
Nadmořská výška 185.0 m n. m.	Nadmořská výška 137.9 m n. m.
Výška antény nad terénem 30 m	Výška antény nad terénem 10 m
Útlum kabelu 0 dB	Útlum kabelu 0 dB
Vysílací výkon 15 dBm	Vysílací výkon 15 dBm

Frekvence
5.65 GHz

Srážkový úhrn
40 mm/h

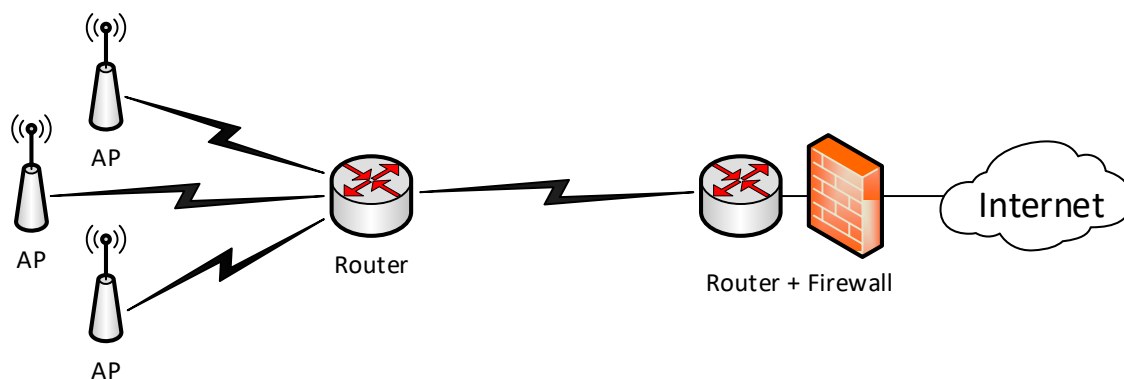
Strana A	Strana B
Přijímaný výkon HORIZONTÁLNĚ -51.9 dBm	Přijímaný výkon HORIZONTÁLNĚ -51.9 dBm
Přijímaný výkon VERTIKÁLNĚ -51.7 dBm	Přijímaný výkon VERTIKÁLNĚ -51.7 dBm
EIRP_A 40.0 dBm	EIRP_B 40.0 dBm

Obr. 6.8: Výpočet rádiového spoje bod X – Mozhvay (menší část) [15].



Obr. 6.9: Výpočet rádiového spoje bod X – Chuzh'yalovo [15].

V obou částech Mozhvaye a v Chuzh'yalově (viz. obr. 6.4) budou postaveny věže o výšce 10 m. Na každé z věží bude instalován shodný vysílač, jaký je namířen z bodu X do konkrétní lokace. Všechny vysílače je nutné správně namířit a důkladně upevnit, aby nedocházelo k vychýlení vlivem větru. Překlenutí poslední míle bude řešeno ve všech třech oblastech pomocí WiFi 802.11ac. Na každý z těchto stožárů bude připevněn AP MikroTik OmniTIK 5 ac. Klient bude připojen k AP pomocí zařízení MikroTik SXTsq 5 ac, které také podporuje standart 802.11ac.



Obr. 6.10: Logická topologie navržené sítě.

Když porovnáme hodnoty přijímaných výkonů všech rádiových spojů (spočtených pomocí kalkulátoru radioreléových spojů s interaktivní mapou na webových stránkách) s hodnotami uvedenými v datasheetu pro jednotlivé vysílače (viz příloha B), zjistíme, že jsou všechny vypočtené hodnoty vyšší než -65 dBm, a tudíž bude použita nejlepší možná modulace signálu 256QAM ($\frac{5}{6}$) umožňující nejvyšší propustnost navržené sítě.

Návrh je podmíněn ruskou legislativou, která předepisuje pro bezdrátový přístup v radiovém frekvenčním pásmu 5650–6425 MHz maximální výkon vysílače 0 dBW a maximální vyzařovaný výkon 23 dBW, pro frekvenční pásmo 5150–6425 MHz je maximální přípustná hodnota výkonu vysílače pouze -10 dBW a vyzařovaný výkon nesmí přesáhnout 13 dBW. Všechna bezdrátová zařízení v navrhované síti budou pracovat ve frekvenčním pásmu 5,65–6,425 GHz, neboť ruské zákony dovolují v tomto frekvenčním pásmu použití výkonnějších vysílačů. Pro výpočty a simulace bude použit kmitočet 5,65 GHz.

U radioreléových spojů hraje velkou roli okolní rušení, které může vznikat např. díky nedalekým zařízením pracujících ve stejném frekvenčním pásmu (všesměrová anténa apod.). Obzvláště velká města bývají silně zarušena. Z tohoto důvodu je překlenutí poslední míle ve velkých městech řešeno ve většině případů jinak, než bezdrátovou přístupovou sítí (technologie xDSL, optické sítě). Vzhledem k zeměpisné vzdálenosti zadané oblasti nebylo možné v lokalitě změřit úroveň rušení ani lokalizovat zařízení, která by mohla rušení generovat a zahrnout je do scénáře ve vhodném síťovém simulátoru.

Pro spoje z bodu X do vesniček rušení velký problém nepředstavuje, lze předpokládat minimální rušení, navíc se jedná o spoje na krátkou vzdálenost. Použité vysílače (PBE-5AC-300 a PBE-5AC-400) mají nižší zisk antény, a tudíž je zde velká rezerva pro zvýšení výkonů vysílačů (PBE-5AC-300 až 30 dBm, PBE-400 až 28 dBm).

Můžeme téměř s jistotou tvrdit, že rádiový spoj Iževsk – bod X bude rušení vystaven, výkon vysílače lze oproti návrhu navýšit o 9 dB až na 24 dBm. Dále je možné měnit pracovní kmitočet v rozmezí 5150–5875 MHz. K ideálnímu nastavení parametrů vysílače by bylo nutná jeho instalace a monitorování provozu nebo znalost vnějších rušivých vlivů, a jejich přenesení do vhodného simulačního softwaru.

Každému z potenciálních 150 zákazníků bude nabízeno připojení s rychlostí až 2 Mbit/s download i upload. Propustnost navrhované sítě tak musí činit alespoň 300 Mbit/s, jestliže chceme pokrýt i scénář, ve kterém v jeden moment budou všichni klienti připojeni a budou plně využívat maximální nabízenou rychlost připojení. Tento scénář je ovšem vysoce nepravděpodobný.

7 Dostupné simulátory

7.1 Wireless InSite

Wireless InSite je softwarový nástroj vyvinutý společností Remcom. Remcom je americká společnost zabývající se vývojem elektromagnetických softwarových simulátorů, na trhu působí déle než 20 let. Vyjma programu Wireless InSite obsahuje jejich produktová nabídka např. WaveFarer (software pro simulaci automobilového radaru) nebo XFDTD (3D elektromagnetický simulační software). Mezi zákazníky společnosti Remcom patří velké mezinárodní společnosti, např. Philips, Samsung, Huawei, Lenovo, ... [17].

Program Wireless InSite je simulační nástroj, který predikuje vliv budov a členitosti terénu na propagaci elektromagnetického vlnění. Softwarový nástroj umožňuje simulovat, jak obydlená oblast v okolí přijímačů a vysílačů ovlivní výslednou sílu přijímaného signálu. Součástí programu jsou také vestavěné editory, které slouží pro návrh terénu nebo budov. Tyto návrhy lze mezi sebou kombinovat. Mimo vestavěné editory program podporuje i přímý import zmíněných prostředí. Wireless InSite modeluje fyzické charakteristiky nepravidelného terénu a městské zástavby, provádí elektromagnetické kalkulace a následně vyhodnocuje šíření signálu [18] [19].

7.2 Riverbed Modeler

Riverbed Modeler (původně OPNET Modeler) je určen pro návrh, simulaci, analýzu a optimalizaci sítě, spadá do produktů společnosti Riverbed Technology. Společnost Riverbed Technology se specializuje na vývoj a optimalizaci jak síťových aplikací, tak simulačních programů. Mezi produkty společnosti Riverbed patří např. SteelConnect, SteelCentral, SteelHead, SteelFusion atd. Riverbed Modeler analyzuje síť s cílem porovnat dopad různých návrhů technologií na chování typu end-to-end. Tento nástroj umožňuje simulaci všech typů sítí i technologií. Uživatel vytváří vlastní síť pomocí GUI (*Graphical User Interface*). Nevýhodou tohoto programu je jeho uživatelská složitost, osvojení simulátoru je časově náročnější. Společnost Riverbed poskytuje tento software zdarma univerzitám po celém světě pro akademický výzkum a výuku. Více než 25 000 vysokoškolských profesorů a studentů využívá produkty společnosti Riverbed v oblasti elektrotechniky, informatiky, informačních systémů a souvisejících oborů. Nespornou výhodou univerzitního programu je umožnění studentům nainstalovat si Riverbed Modeler i doma. Na webových stránkách společnosti si lze vygenerovat akademickou licenci tohoto produktu [20].

7.3 NS3

Projekt NS-3 (Network Simulator 3) byl zahájen v roce 2006. Jedná se o náhradu, nikoliv rozšíření NS-2. Stejně jako NS-2 je NS-3 síťový simulátor diskretních událostí, zaměřuje se především na výzkumné a vzdělávací účely. Jedná se o svobodný, veřejně dostupný software licencovaný pod licenci GNU GPLv2. Díky této licenci je software veřejně k dispozici jak pro výzkum, použití, tak i vývoj.

NS-3 je napsán v C++ a pythonu. NS-3 je knihovna programovacího jazyku C++, která poskytuje uživateli sadu síťových simulačních modelů. Uživatel provádí vlastní simulaci ve vývojovém prostředí (např. Eclipse) této knihovny a jazyka C++. NS-3 obsahuje i nástroje pro vizualizaci, např. NetAnim.

Softwarová infrastruktura NS-3 umožňuje rozvoj simulačních dostatečně realistických modelů, aby mohl být NS-3 použit jako emulátor sítě v reálném čase. Simulační jádro NS-3 podporuje výzkum jak IP sítí, tak i non-IP sítí. Velká část uživatelů NS-3 se zaměřuje na simulace bezdrátových IP sítí, které zahrnují modely pro WiFi, WiMAX nebo LTE (*Long Term Evolution*) pro první (vrstva síťového rozhraní) a druhou (síťová vrstva) vrstvu referenčního síťového modelu TCP/IP a řadu statických nebo dynamických směrovacích protokolů. Nespornou výhodou tohoto simulačního softwaru je, že každé tři měsíce je vydávána nová stabilní verze NS-3 s novými modely vyvinutými, dokumentovanými, validovanými a udržovanými nadšenými výzkumníky [21] [22].

7.4 Výběr simulačního softwaru

Výše navržená síť je založená na technologii Wifi 802.11ac, konkrétně se jedná o čtyři rádiové point-to-point spoje a tři access pointy, jejichž prostřednictvím budou k síti připojeni potenciální klienti. Fyzická topologie sítě je velmi jednoduchá, obsahuje jen minimum síťových prvků. Bezdrátová zařízení jsou velmi citlivá vůči rušení, proto funkčnost sítě založené na bezdrátových zařízeních závisí především na dostatečné síle přijímaného signálu a odolnosti sítě, vůči okolnímu elektromagnetickému rušení. Hlavními zkoumanými parametry sítě navržené v této bakalářské práci budou: hodnoty přijímaných výkonů pro jednotlivé point-to-point spoje, propustnost sítě a v neposlední řadě odolnost rádiových spojů proti možnému okolnímu rušení. Dále bude zapotřebí navrhnout takové hodnoty výkonů jednotlivých vysílačů, které zajistí použití modulace 256QAM ($\frac{5}{6}$). V tabulce 7.1 můžeme nalézt základní porovnání vybraných simulačních softwarových nástrojů.

Tab. 7.1: Porovnání vybraných simulátorů

Simulátor	Licence	Programovatelný	GUI
Wireless InSite	komerční	ne	ano
Riverbed Modeler	akademická	ne	ano
NS-3	GNU GPLv2	ano	ne

Síťový simulátor diskretních událostí NS-3 disponuje knihovnamí, které podporují simulaci sítí postavených na technologii WiFi 802.11ac. Hlavní výhodou NS-3 oproti zbylým simulátorům je bezplatná plnohodnotná licence GNU GPLv2. Nevýhodou se může jevit absence grafického uživatelského rozhraní, někteří uživatelé mohou sledovat provádění simulací pomocí knihovny NS-3 a jazyka C++ ve vývojovém prostředí náročným.

Program Rivebed Modeler stejně jako NS-3 podporuje technologii WiFi, ale je na rozdíl od simulátoru NS-3 vybaven GUI. Rivebed Modeler je velmi komplexní software, ve kterém lze nastavovat a upravovat obrovské množství parametrů vlastní simulace. Osvojení si simulátoru je pro jeho obsažnost časově velmi náročné. V programu se bohužel nepodařilo nalézt možnost, jak simulovat rádiový point-to-point spoj využívající technologii WiFi 802.11ac.

Ideální volbou se jeví elektromagnetický softwarový simulátor Wireless InSite. Společnost Remcom poskytuje na požádání stažení plné verze simulátoru s 30 denní licenci, takže má zakazník dostatek času na odzkoušení softwaru. Za účelem simulace sítě navržené v této bakalářské práci, byla společností Remcom poskytnuta 30 denní licence programu Wirell Insite. Společně s programem lze stáhnout manuál (Wireless InSite Reference Manual) a uživatelskou příručku (Wireless InSite User´s Guide), obsahující podrobné návody (krok za krokem) pro vytvoření základních simulací. Do programu lze snadno importovat 3D modely terénu a tudíž lze nasimulovat propagaci signálu v zadané lokaci. Simulátor disponuje mnoha typy antén, včetně směrových antén použitých v návrhu, podporuje technologii WiFi 802.11ac, umožňuje měnit úroveň okolního rušení, simulovat, jak rušení generované blízkými zařízeními (např. všesměrová anténa) ovlivní propustnost navržených rádiových spojů apod. Softwarový nástroj není oproti programu Riverbed Modeler nijak extrémně složitý nebo časově náročný na osvojení. Z výše uvedeného jasně plyne, proč byl simulátor elektromagnetických vln Wireless InSite zvolen jako vhodný simulační software.

7.5 Další použitý software

7.5.1 Global Mapper

Global Mapper je uživatelsky přívětivá GIS (*Geographic Information System*) aplikace, za kterou stojí společnost Blue Marple Geographics. Aplikace nabízí přístup k řadě prostorových datových souborů, uživatelům nabízí přístup do databáze obsahující topografické mapy, geologické mapy nebo soubory s terénními daty z celého světa. Uživatel si z databáze stáhne požadovaná data. Stažená data mohou být libovolně modifikována. Uživatel má možnost zobrazená data exportovat v jakémkoli z široké škály podporovaných formátů [23].

Získat údaje o polohopisu a výškopisu zadané oblasti a legálně je bez poplatku exportovat pro další práci bylo velmi problematické. Dříve užívaná aplikace Google Earth již volná stažení terénních dat neumožňuje, změna smluvních podmínek způsobila i nedostupnost webových kalkulačů rádiových spojů s interaktivní mapou (včetně kalkulačů použitého v této práci na webových stránkách <<http://cz.jirous.com/vypocet-wifi>>). Společnost Blue Marble po e-mailové komunikaci naopak projevila velké pochopení a poskytla pro účely zpracování bakalářské práce zdarma 14-denní plnou licenci svého programu Global Mapper (cena za plnou licenci činí 549 USD).

8 Analýza navržené sítě

8.1 Prostředí Wireless InSite

V této podkapitole jsou stručně popsány základní prvky prostředí Wireless InSite a postupy použité pro vytvoření simulace navržené sítě.

Softwarové prostředí je tvořeno 5 základními okny:

- Hlavní okno (*Main Window*) – Po zavření okna dojde k ukončení programu.
- Zobrazení projektu (*Project View*) – Zobrazuje všechna aktuálně načtená data.
- Hierarchie projektu (*Project Hierarchy*)
- Zprávy o výsledku (*Calculation Log*)
- Multimediální přehrávač (*Movie Player*)

Hlavní okno se dále skládá z 9 základních prvků:

- Obrázky (*Images*)
- Prostředí (*Features*)
- Materiály (*Materials*)
- Elektromagnetické vlny (*Waveforms*)
- Antény (*Antennas*)
- Vysílače/Přijímače (*Transmitters/Receivers*)
- Studijní oblasti (*Study areas*)
- Komunikační systémy (*Comm. systems*)
- Výstup (*Output*)

8.1.1 Načtení topografické mapy

Nejdříve je potřeba v aplikaci Global Mapper stáhnout z databáze světovou topografickou mapu (*World Topo Map*), zacílit požadovanou oblast a data exportovat ve formátu TIFF (*File → Capter Screen Contents to Image → TIFF → OK*). V tomto formátu jsou obsaženy i údaje o zeměpisné délce a šířce. V softwarovém prostředí Wireless InSite se přepneme do hlavního okna, zvolíme možnost *Project → Open → Image*, následně ze souborového systému vybereme obrázek, ten můžeme pojmenovat (*Short description*) a volbou *OK* načtení potvrdíme.

8.1.2 Import terénních dat

Obdobně jako při načtení topografické mapy nejříve v aplikaci Global Mapper stáhneme terénní data (*Terrain Data*), která exportujeme ve formátu GeoTIFF (*File → Export → Elevation Grid Format → GeoTIFF → OK*). Import dat provedeme následovně: *Project → Import → Terrain*, vybereme cestu k souboru a potvrdíme pomocí tlačítka *Import*.

8.1.3 Vytvoření elektromagnetické vlny

V hlavním okně klikneme na *Project* → *New* → *Waveform*, pro účely této simulace byla zvolena sinusoida (*Sinusoid*), jako hodnotu nosné frekvence (*Carrier Frequency*) nastavíme 5650 MHz a šířku pásma (*Effective bandwidth*) 80 MHz, potvrdíme *OK*.

8.1.4 Vytvoření antény

Směrové antény PowerBeam ac vytvoříme následovně: *Project* → *New* → *Antenna*, z nabídky antén vybereme směrovou (*Directional*) a potvrdíme *OK*. Otevře se okno s parametry antény. Do pole *Short description* vyplníme název antény (např. PBE-600), následně v kolonce *Waveform* vybereme dříve vytvořenou elektromagnetickou vlnu. Odškrtneme možnost *Maximum gain* (dBi) a zapíšeme hodnotu zisku příslušné antény. Zisk všech antén můžeme nalézt v datasheetech, viz. příloha B. Vytvoření antény dokončíme stisknutím *OK*.

Obdobně lze vytvořit všesměrovou anténu (*Omnidirectional antenna*), která bude využita jako generátor rušení.

8.1.5 Umístění vysílače/přijímače

Pro umístění vysílače je potřeba otevřít okno *Project View*, poté zvolíme: *Project* → *New* → *Transmitter Set* → *Points*, klikneme nejprve levým a potom pravým tlačítkem myši poblíž polohy vysílače. V nově otevřeném okně vysílač pojmenujeme *Short description*, nastavíme příslušné GPS souřadnice podle tabulky 8.1 (*Origin longitude*, *Origin latitude*). V *Transmitter properties* vybereme vhodnou anténu (*Antenna*) a elektromagnetické vlnění (*Waveform*), parametry uložíme *OK*. Pro nastavení výšky vysílače nad terénem klikneme na *Layout Properties* → *Edit control points* a změníme hodnotu v poli *Z(m)*.

Tab. 8.1: GPS souřadnice jednotlivých vysílačů/přijímačů

	Zeměpisná délka	Zeměpisná šířka
Bod X	52.937252	56.842500
Iževsk	53.173971	56.870021
Chuzh'yalovo	52.951927	56.857003
Mozhvay (větší část)	52.933319	56.829836
Mozhvay (menší část)	52.902934	56.825795
Rušič 1	53.176011	56.867968
Rušič 2	53.168300	56.865975
Rušič 3	53.159306	56.868107

U přijímačů je postup téměř totožný, při vytváření místo *Transmitter Set* zvolíme *Receiver Set*, pro změnu parametrů upravujeme v menu *Receiver properties* nikoli *Transmitter properties*. Dalším rozdílem je, že při vytváření přijímačů nenastavujeme výkon.

8.1.6 Vytvoření studijní oblasti

Studijní oblast vymezuje území, na kterém simulační software provádí kalkulace. Začneme stiskem *New* → *Study area*, program nabízí dvě možnosti: automatické vytvoření oblasti na základě umístění použitých prvků (*Fit to features*) a možnost manuálního výběru (*Specify location and size*). Vybereme jednu z nabízených možností a potvrdíme *Begin*. Studijní oblast vhodně pojmenujeme (*Short description*), jako *Propagation model* z vybereme *Vertical Plane*. V menu *Output Requests* zaškrtneme položky *Received power* a *Terrain*. Volbou *OK* vytvoříme studijní oblast.

8.1.7 Tvorba komunikačního systému

Pro přidání Komunikačního systému zvolte *Project* → *New* → *Comm. System*. Komunikační systémy slouží pro jištění propustnosti v komunikačním prostředí, mezi jednotlivými vysílacími a přijímacími sadami. Komunikační systém umožní měnit úroveň rušení okolí všech vysílačů/přijímačů (v rozmezí -250 dB až 250 dB).

Do komunikačního systému lze zahrnout libovolné stanice. Stanice je možné přepnout do režimu *Base station* nebo *Interferer*.

8.2 Porovnání s webovým kalkulátorem

Po vykreslení terénních profilů, bylo zjištěno, že hodnota výšky věže v bodě x byla zvolena jako příliš vysoká. Oproti původnímu návrhu byla změněna výška věže v bodě X z původních 30 na 20 metrů. V příloze C, která obsahuje terénní profily jednotlivých rádiových spojů, je možné si ověřit, že 20 metrová věž bude dostačující. Tato změna výrazně sníží náklady na vybudování navržené sítě.

Tab. 8.2: Porovnání výsledků ze softwarového nástroje Wireless InSite s webovým kalkulátorem.

Rádiový spoj	Web. kalku.	Wireless InSite		
	Přijatý výkon [dBm]	Přijatý výkon [dBm]	Použitá modulace	Propustnost [Mbit/s]
Iževsk – bod X	-58,90	-55,39	256QAM ($\frac{3}{4}$)	351
Bod X – Mozhvay (vč)	-51,80	-52,29	256QAM ($\frac{5}{6}$)	390
Bod X – Mozhvay (mč)	-51,70	-54,86	256QAM ($\frac{5}{6}$)	390
Bod X – Chuzh'yalovo	-58,70	-56,72	256QAM ($\frac{3}{4}$)	351

V tabulce 8.2 můžeme pozorovat, že se hodnoty přijímaných výkonů webového kalkulátoru oproti simulátoru Wireless InSite mírně liší. Toto mohlo být způsobeno nepřesným umístěním vysílačů pomocí interaktivní mapy ve webovém kalkulátoru. Dalším faktorem může být srážkový úhrn, který program Wireless InSite nezahrnuje do svých výpočtů.

Největší rozdíl výsledků oproti předpokladům nalézáme u použité modulace. U všech čtyř rádiových spojů přesahuje přijatý výkon hodnotu -65 dBm, a tudíž dle údajů obsažených v datasheetech jednotlivých vysílačů (viz. příloha B) měla být použita modulace 256QAM ($\frac{5}{6}$) a dosažena přenosová rychlost až 450 Mbit/s. Modulace 256QAM ($\frac{5}{6}$) byla použita při hodnotách přijímaného výkonu vyšší než -55 dBm. Můžeme tedy říci, že nejnovější generace vysílačů PowerBeam ac má lepší citlivost přijímačů ve srovnání se zařízením v simulátoru Wireless InSite asi o 10 dBm.

Z tohoto důvodu budou veškeré následující výsledky simulací vyjma hodnot přijímaných výkonů zkreslené, v reálném nasazení by měla síť vykazovat daleko lepší odolnost proti okolnímu elektromagnetickému rušení a vyšší propustnost sítě.

8.3 Simulace vlivu okolního rušení

8.3.1 Původní návrh sítě

Pro všechny čtyři rádiové spoje byly vytvořeny simulace, které si kladou za cíl zjistit, jak okolní elektromagnetické rušení ovlivní propustnost jednotlivých rádiovým spojů. Všechny vysílací výkony byly nastaveny dle prvotního návrhu (tzn. 15 dBm). Hodnoty rušení lze měnit v rozsahu -250 dBm až 250 dBm. Nejdříve byla nastavena nejnižší přípustná hodnota rušení -250 dBm, tato hodnota byla postupně zvyšována až do doby, kdy byla propustnost daného rádiového spoje rovna 0 Mbit/s. Naměřená data byla zaznamenána do níže uvedených tabulek. V tabulkách můžeme nalézt hodnoty rušení, propustnosti spoje a také použité modulace.

Tab. 8.3: Rádiový spoj Iževsk – bod X, vysílací výkon 15 dBm.

Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace	Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace
-250	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-85	263,25	64QAM ($\frac{2}{3}$)
-110	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-80	175,50	16QAM ($\frac{3}{4}$)
-105	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-75	117,00	16QAM ($\frac{1}{2}$)
-100	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-70	58,50	QPSK ($\frac{1}{2}$)
-95	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-65	29,25	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-90	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-64	0,00	

Tab. 8.4: Rádiový spoj bod X – Mozvay (větší část), vysílací výkon 15 dBm.

Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace	Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace
-250	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-80	263,25	64QAM ($\frac{2}{3}$)
-105	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-75	175,50	16QAM ($\frac{3}{4}$)
-100	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-70	117,00	16QAM ($\frac{1}{2}$)
-95	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-65	58,50	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-90	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-63	29,25	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-85	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-60	0,00	

Tab. 8.5: Rádiový spoj bod X – Mozvay (menší část), vysílací výkon 15 dBm.

Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace	Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace
-250	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-85	263,25	64QAM ($\frac{2}{3}$)
-110	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-80	234,25	64QAM ($\frac{1}{2}$)
-105	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-75	117,00	16QAM ($\frac{1}{2}$)
-100	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-70	87,75	QPSK ($\frac{3}{4}$)
-95	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-65	29,25	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-90	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-62	0,00	

Tab. 8.6: Rádiový spoj bod X – Chuzh'yalovo, vysílací výkon 15 dBm.

Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace	Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace
-250	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-85	263,25	64QAM ($\frac{2}{3}$)
-110	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-80	175,50	16QAM ($\frac{3}{4}$)
-105	351,00	256QAM ($\frac{3}{4}$)	-75	117,00	16QAM ($\frac{1}{2}$)
-100	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-70	58,50	QPSK ($\frac{1}{2}$)
-95	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-65	29,25	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-90	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-64	0,00	

8.3.2 Zvýšení výkonu vysílače v Iževsku

Nejvyšší úroveň elektromagnetického rušení lze předpokládat v městě Iževsk. Pro funkčnost celé sítě bude důležitým parametrem odolnost rádiového spoje Iževsk – bod X proti okolním rušivým vlivům. Oproti prvotnímu návrhu umožňuje ruská legislativa zvýšit vysílací výkon tohoto spoje až na 24 dBm. Výsledná data ze simulace odolnosti tohoto rádiového spoje proti okolnímu rušení při vysílacím výkonu jsou zaznačena v tabulce 8.7.

Tab. 8.7: Rádiový spoj Iževsk – bod X, vysílací výkon 24 dBm.

Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace	Rušení [dBm]	Propustnost [MBit/s]	Použitá modulace
-250	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-70	175,50	16QAM ($\frac{3}{4}$)
-90	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-65	117,00	16QAM ($\frac{1}{2}$)
-85	390,00	256QAM ($\frac{5}{6}$)	-60	58,50	QPSK ($\frac{1}{2}$)
-80	292,50	64QAM ($\frac{3}{4}$)	-55	29,25	BPSK ($\frac{1}{2}$)
-75	263,25	64QAM ($\frac{2}{3}$)	-54	0,00	

8.3.3 Rušící stanice

Pro reálnou představu, jak velké rušení mohou generovat zařízení pracující na stejném kmitočtu jako navržené vysílače, byly do simulace přidány tři rušící stanice ve městě Iževsk, jejich rozmístění je zachyceno na obrázku 8.1. Jedná se o všesměrové antény MikroTik OmniTIK 5 ac (frekvence 5,65 GHz, šířka pásma 40 MHz, zisk antény 7,5 dBi).



Obr. 8.1: Rozmístění rušících stanic.

Na přijímači v městě Iževsk bylo měřeno, jak velké elektromagnetické rušení generují jednotlivé všesměrové antény, při různých vysílacích výkonech (0; 5; 10; 15 a 20 dBm). Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 8.8.

Tab. 8.8: Rušení generované jednotlivými rušícími stanicemi (při různých vysílacích výkonech) na rádiový spoj Bod X – Iževsk.

	Vysílací výkon [dBm]				
	0	5	10	15	20
Rušení [dBm]					
Rušič 1	-73,62	-68,62	-63,62	-58,62	-53,62
Rušič 2	-80,01	-75,01	-70,01	-65,01	-60,01
Rušič 3	-85,52	-80,52	-75,52	-70,52	-65,72

Další simulace měla za cíl zjistit, jak se rušení generované všesměrovými anténami (opět při různých hodnotách vysílacího výkonu) projeví na propustnosti rádiového spoje bod X – Iževsk. Výsledná data jsou uvedeny v tabulce 8.9.

Tab. 8.9: Vliv rušících stanic (při různých vysílacích výkonech) na propustnost rádiového spoje Bod X – Iževsk.

	Vysílací výkon [dBm]				
	0	5	10	15	20
	Propustnost [MBit/s]				
Rušič 1	263,25	175,5	117,00	58,50	0,00
Rušič 2	292,5	263,25	175,50	117,00	58,50
Rušič 3	390	292,5	263,25	234,00	117,00

8.3.4 Optimální nastavení vysílačů

Pro zjištění ideálních nastavení výkonů jednotlivých vysílačů by bylo nutné tyto vysílače nasadit do provozu, protože nemáme k dispozici data o skutečném okolním rušení. Můžeme předpokládat minimální rušení v okolí vesniček Mozhvay a Chuzh'yalovo. V případě vysílače v Iževsku bude velmi pravděpodobně zapotřebí nastavit vyšší vysílací výkon. Může nastat i situace, kdy bude rušení v okolí vysílače v Iževsku tak silné, že rádiový spoj nebude přenášet žádná data. V takovém případě bude nutné hledat v Iževsku jiné místo s konektivitou, nižším okolním rušením a přímou viditelností na vysílač v bodě X. Je potřeba nastavit jen tak vysoké hodnoty vysílacích výkonů, aby byla dosažena požadovaná přenosová rychlost a spolehlivost. Zbytečně vysoký vysílací výkon bude generovat velké elektromagnetické rušení.

9 Závěr

V prvních pěti kapitolách bakalářské práce je vypracovaný teoretický rozbor technologií používaných při zasítování (xDSL, APON, EPON, GPON, WiMAX, WiFi, ...). V teoretickém rozboru jsou zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých technologií. V šesté kapitole je vyhotovena analýza vzdálené oblasti, jsou zde diskutovány možnosti použití jednotlivých technologií. Na základě analýzy byl vypracovaný vlastní návrh fyzické a logické topologie. Vlastní řešení je založeno na bezdrátových sítích, konkrétně bude použita technologie WiFi 802.11ac. Toto řešení bylo zvoleno především pro snadnou instalaci a pružnost těchto sítí, navíc při vysílání v bezlicenčním pásmu ISM jsou náklady na vybudování a provoz takové sítě velmi nízké. V sedmé kapitole je vyhotoven rozbor vybraných simulačních softwarových nástrojů a dalšího použitého softwaru. Jako nejvhodnější simulační software byl pro svou jednoduchost a možnost simulace point-to-point rádiových spojů zvolen elektromagnetický simulátor Wireless InSite. Začátek osmé kapitoly je věnován prostředí Wireless InSite. V osmé kapitole se dále nachází porovnání hodnot přijímaných výkonů webového kalkulátoru a simulátoru WirelessInSite, drobné odchylky mohly být způsobeny nepřesným umístěním vysílačů ve webovém kalkulátoru nebo srážkovým úhrnem, který program Wireless InSite nezahrnuje do svých výpočtů. V neposlední řadě je zpracována analýza odolnosti navržené sítě proti okolnímu elektromagnetickému rušení. Největší rozdíl výsledků oproti předpokladům nalézáme u použité modulace, nejnovější generace vysílačů PowerBeam ac má lepší charakteristiky než zařízení v simulátoru Wireless InSite. V reálném nasazení by měla navržená síť vykazovat vyšší propustnost a lepší odolnost proti okolnímu rušení.

Literatura

- [1] *Google maps* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <<https://www.google.com/maps>>
- [2] *Official web page of the city Izhevsk* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <<http://www.izh.ru/en/info/14195.html>>
- [3] NOVOTNÝ, Vít. *Architektura sítí*. Brno, 2011. Skriptum. VUT FEKT.
- [4] FILKA, Miloslav. *Přenosová média*. Brno, 2011. Skriptum. VUT FEKT.
- [5] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě* Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0139-8.
- [6] LAFATA, P. *Pasivní optická přístupová síť EPON*[online]. Praha, 2009 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050003>>
- [7] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě*[online]. Praha, 2004 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>>
- [8] MACHNÍK, Petr a Libor MICHALEK. *Základy telekomunikačních sítí pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava, 2014. Skriptum. VŠB-TUO.
- [9] ŠEBESTA, Roman a Marek DVORSKÝ. *Rádiové sítě I pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2018-11-9]. Dostupné z: <<https://vut-vsbs.cz/home/get-file?file=448&portal=Portal2>>. Skriptum. VŠB-TUO.
- [10] Ad-Hoc and Infrastructure Modes. In: *Wireless Spot* [online]. 2009 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <<http://wireless-spot.blogspot.com/2009/11/ad-hoc-and-infrastructure-modes.html>>.
- [11] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z: [technologie pro datovou, hlasovou i multimediální komunikaci]*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-1278-0.
- [12] MACH, P. *Podporované síťové architektury* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008050005>>.

- [13] *PowerBeam ac Datasheet* [online]. In: . [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/StoItem/4196/PowerBeam5ac_DS.pdf>.
- [14] EdgeRouter Lite 3 In: *LAN-SHOP* [online]. [cit. 2018-12-2]. Dostupné z: <<https://www.lan-shop.cz/ubiquiti-erlite-3-edgerouter-lite-161059>>.
- [15] Výpočet radioreléového spoje. *Jirous antény* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <<http://cz.jirous.com/vypocet-wifi>>.
- [16] EdgeRouter X SFP In: *Ubiquiti Networks* [online]. [cit. 2018-12-2]. Dostupné z: <<https://store.ubnt.com/products/edgerouter-x-sfp>>.
- [17] *Remcom Official Page* [online]. [cit. 2019-17-04]. Dostupné z: <<https://www.remcom.com>>
- [18] Remcom Inc. *Wireless InSite Reference Manual* Version 3.3.1, February 2019.
- [19] Remcom Inc. *Wireless InSite User's Guide* Version 3.3.1, February 2019.
- [20] *Rivebed Official Page* [online]. [cit. 2019-5-03]. Dostupné z: <<https://www.riverbed.com>>
- [21] *NS-3 Official Page* [online]. [cit. 2019-5-02]. Dostupné z: <<https://www.nsnam.org>>
- [22] MAZLIZA, Othman, Bilal M. SARDAR a Khan ATTA UR REHMAN. *A Performance Comparison of Network Simulators for Wireless Networks* [online]. [cit. 2019-5-08]. Dostupné z: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1307/1307.4129.pdf>>
- [23] *Blue Marble Geographics Official Page* [online]. [cit. 2019-5-02]. Dostupné z: <<https://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php>>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AP	Access Point
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BS	Base Station
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FEXT	Far-End crossTalk
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTP	Foil Shielded Twisted Pair
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTH	Fiber To The Home
FTTS	Fiber To The Subscriber
FTTx	Fiber To The x
FWA	Fixed Wireless Access
GIS	Geographic Information System
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HDSL	High-bit-rate Digital Subscriber Line
IDSL	IDNS Digital Subscriber Line
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISM	Industrial Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitan Area Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NEXT	Near-End crossTalk
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLT	Optical Line Termination

ONU	Optical Network Unit
PLC	Power Line Communications
PMP	Point to Multipoint
PoE	PoE
PON	Passive Optical Network
PP	Point to Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RADSL	Rate-Adaptive Digital Subscriber Line
SDSL	Symmetric Digital Subscriber Line
SS	Subscriber Station
STP	Shielded Twisted Pair
UTP	Unshielded Twisted Pair
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Seznam příloh

A	Technické parametry vysílače	50
A.1	Originální ruský dokument	50
A.2	Český překlad	51
B	Powerbeam 5ac datasheet	53
B.1	PBE-5AC-300	53
B.2	PBE-5AC-400	54
B.3	PBE-5AC-620	55
C	Terénní profily	56
D	Obsah přiloženého CD	58
D.1	Elektronická verze bakalářské práce	58
D.2	Projekty v simulátoru Wireless InSite	58

A Technické parametry vysílače

A.1 Originální ruský dokument

Основные технические характеристики РЭС фиксированного
беспроводного доступа в полосах радиочастот
5150-5350 МГц и 5650-6425 МГц

Наименование параметра	Значение параметра в полосах радиочастот	
	5150-5350 МГц	5650-6425 МГц
Метод радиодоступа	TDMA, OFDMA Доступ на основе временного и ортогонального частотного мультиплексирования	
Метод разделения каналов	TDD временное разделение каналов	
Методы модуляции	цифровые	
Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости на уровне -3 дБ в сети «точка-точка», не более, град	5	
Максимальная мощность передатчика, дБВт*	-10	0

* Конкретные значения максимального удаления абонентских станций от базовых станций и максимальная мощность передатчиков должны определяться по результатам экспертизы и указываться в заключении экспертизы.

Наименование параметра	Значение параметра в полосах радиочастот	
	5150-5350 МГц	5650-6425 МГц
Максимальная ЭИИМ (equivalent isotropically radiated power; EIRP) передатчика, дБВт	13	23
Относительный уровень побочных излучений передатчика	В соответствии с нормами ГКРЧ на допустимые побочные излучения	

A.2 Český překlad

Aplikace
na rozhodnutí GKRCCh
ze dne 15. července 2010 č. 10-07-02

Hlavní technické charakteristiky pevného OZE
bezdrátový přístup v rádiových frekvenčních pásmech
5150-5350 MHz a 5650-6425 MHz

Název parametru	Hodnota parametrů v pásmech rádiových frekvencí	
	5150-5350 MHz	5650-6425 MHz
Metoda radiového přístupu	TDMA, OFDMA Přístup založený na dočasných a ortogonální frekvenční multiplexování	
Metoda separace kanálu	TDD Časové dělení kanálu	
Modulační metody	digitální	

Název parametru	Hodnota parametrů v pásmech rádiových frekvencí	
	5150-5350 MHz	5650-6425 MHz
Šířka antény v horizontální rovině na úrovni -3 dB v síti "bod-k-bod", ne více, stupňů	5	
Maximální výkon vysílače, dBW *	-10	0
Maximální vysílač EIRP (ekvivalentní izotropně vyzařovaný výkon, EIRP), dBW	13	23
Relativní vysílající rušivé emise	V souladu s normami přípustných rušivých emisí SCRIP	

* Specifické hodnoty maximálního odebrání účastnických stanic ze základnových stanic a maximální výkon vysílače by měly být určeny výsledky zkoušky a specifikovány v závěru zkoušky.

B Powerbeam 5ac datasheet

B.1 PBE-5AC-300

PBE-5AC-300					
Dimensions	325 x 325 x 256 mm (12.8 x 12.8 x 10.1")				
Weight	1.203 kg (2.65 lbs)				
Power Supply	24V, 0.5A Gigabit PoE				
Max. Power Consumption	5.5W				
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)				
Supported Voltage Range	20-26VDC				
Operating Frequency	Worldwide	USA: U-NII-1	USA: U-NII-2A	USA: U-NII-2C	USA: U-NII-3
	5150 - 5875 MHz	5150 - 5250 MHz*	5250 - 5350 MHz*	5470 - 5725 MHz*	5725 - 5850 MHz*
Gain	22 dBi				
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port				
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 560 MHz				
Memory	64 MB DDR2, 16 MB Flash				
LEDs	(1) Power, (1) LAN, (4) WLAN				
Signal Strength LEDs	Software-Adjustable to Correspond to Custom RSSI Levels				
Max. VSWR	1.5:1				
Channel Sizes	PtP Mode		PtMP Mode		
	10/20/30/40/50/60/80 MHz		10/20/30/40 MHz		
Polarization	Dual Linear				
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic				
Mounting	Pole-Mount (Kit Included)				
Wind Loading	145.2 N @ 120 km/h (33 lbf @ 75 mph)				
Wind Survivability	120 km/h (75 mph)				
ESD/EMP Protection	Air: ± 24 kV, Contact: ± 24 kV				
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)				
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing				
Wireless Approvals	FCC, IC, CE				
RoHS Compliance	Yes				
Salt Fog Test	IEC 68-2-11 (ASTM B117), Equivalent: MIL-STD-810 G Method 509.5				
Vibration Test	IEC 68-2-6				
Temperature Shock Test	IEC 68-2-14				
UV Test	IEC 68-2-5 at 40° C (104° F), Equivalent: ETS 300 019-1-4				
Wind-Driven Rain Test	ETS 300 019-1-4, Equivalent: MIL-STD-810 G Method 506.5				

PBE-5AC-300 Output Power: 25 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	25 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm Min.	± 2 dB
	2x QPSK (½)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (½)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	24 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (5/6)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (5/6)	-74 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB
8x 256QAM (5/6)	21 dBm	± 2 dB	8x 256QAM (5/6)	-65 dBm	± 2 dB		

B.2 PBE-5AC-400

PBE-5AC-400					
Dimensions	420 x 420 x 275 mm (16.54 x 16.54 x 10.83")				
Weight	1.753 kg (3.87 lbs)				
Power Supply	24V, 0.5A Gigabit PoE				
Max. Power Consumption	8.5W				
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)				
Supported Voltage Range	20-26VDC				
Operating Frequency	Worldwide	USA: U-NII-1	USA: U-NII-2A	USA: U-NII-2C	USA: U-NII-3
	5150 - 5875 MHz	5150 - 5250 MHz*	5250 - 5350 MHz*	5470 - 5725 MHz*	5725 - 5850 MHz*
Gain	25 dBi				
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port				
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 560 MHz				
Memory	64 MB DDR2, 16 MB Flash				
LEDs	(1) Power, (1) LAN, (4) WLAN				
Signal Strength LEDs	Software-Adjustable to Correspond to Custom RSSI Levels				
Max. VSWR	1.5:1				
Channel Sizes	PtP Mode		PtMP Mode		
	10/20/30/40/50/60/80 MHz		10/20/30/40 MHz		
Polarization	Dual Linear				
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic				
Mounting	Pole-Mount (Kit Included)				
Wind Loading	278.4 N @ 120 km/h (63 lbf @ 75 mph)				
Wind Survivability	120 km/h (75 mph)				
ESD/EMP Protection	Air: ± 24 kV, Contact: ± 24 kV				
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)				
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing				
Wireless Approvals	FCC, IC, CE				
RoHS Compliance	Yes				
Salt Fog Test	IEC 68-2-11 (ASTM B117), Equivalent: MIL-STD-810 G Method 509.5				
Vibration Test	IEC 68-2-6				
Temperature Shock Test	IEC 68-2-14				
UV Test	IEC 68-2-5 at 40° C (104° F), Equivalent: ETS 300 019-1-4				
Wind-Driven Rain Test	ETS 300 019-1-4, Equivalent: MIL-STD-810 G Method 506.5				

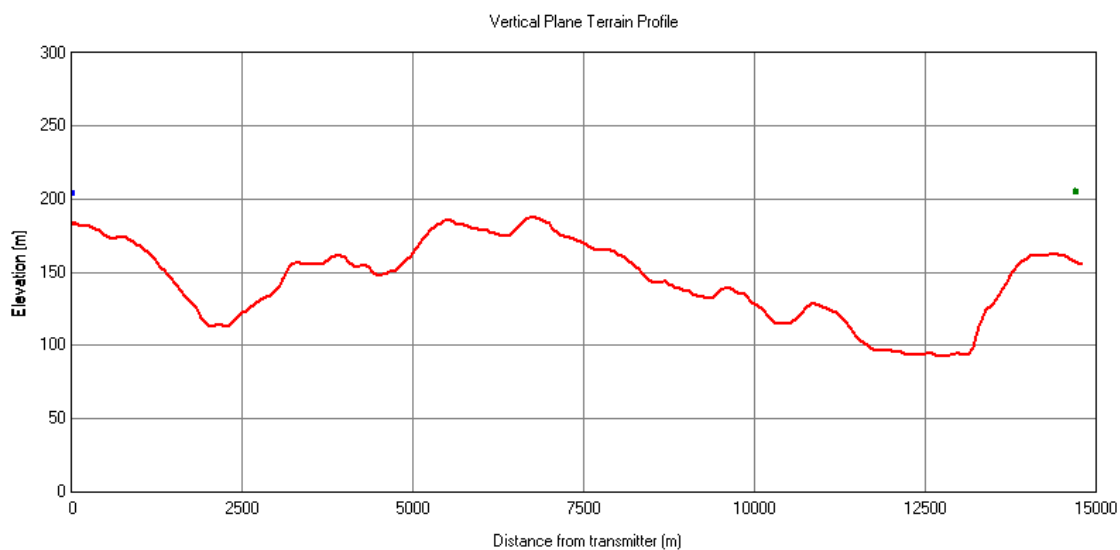
PBE-5AC-400 Output Power: 25 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	25 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm Min.	± 2 dB
	2x QPSK (½)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	25 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	25 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (½)	25 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (½)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	24 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (5/8)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (5/8)	-74 dBm	± 2 dB
	8x 256QAM (¾)	21 dBm	± 2 dB		8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB
8x 256QAM (5/8)	21 dBm	± 2 dB	8x 256QAM (5/8)	-65 dBm	± 2 dB		

B.3 PBE-5AC-620

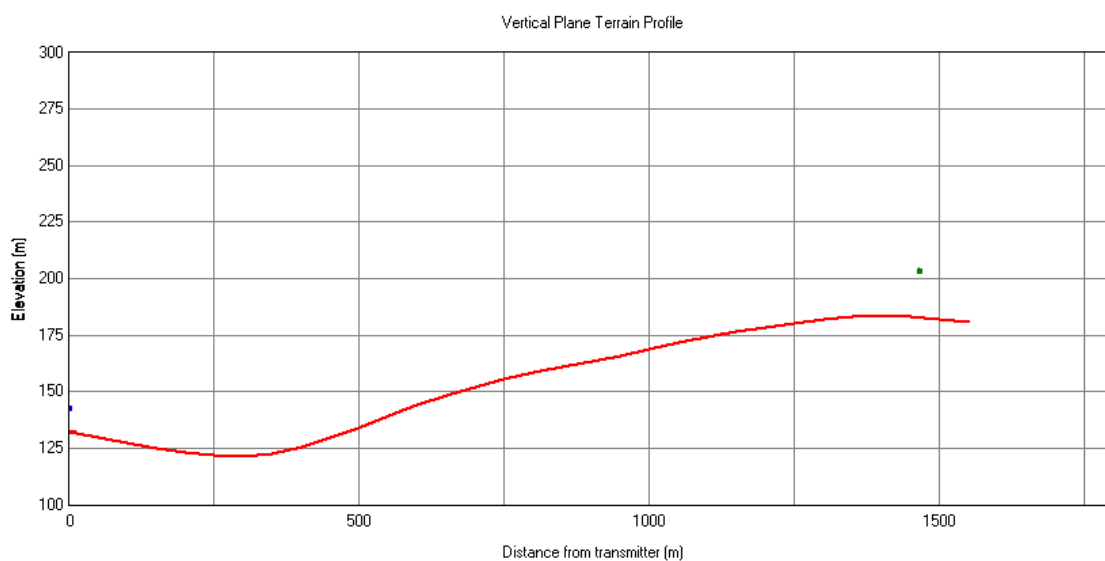
PBE-5AC-620					
Dimensions	620 x 620 x 386 mm (24.41 x 24.41 x 15.2")				
Weight	6.4 kg (14.1 lbs)				
Power Supply	24V, 0.5A Gigabit PoE				
Max. Power Consumption	8.5W				
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)				
Supported Voltage Range	20-26VDC				
Operating Frequency	Worldwide	USA: U-NII-1	USA: U-NII-2A	USA: U-NII-2C	USA: U-NII-3
	5150 - 5875 MHz	5150 - 5250 MHz*	5250 - 5350 MHz*	5470 - 5725 MHz*	5725 - 5850 MHz*
Gain	29 dBi				
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port				
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 720 MHz				
Memory	128 MB DDR2, 16 MB Flash				
LEDs	(1) Power, (1) LAN, (4) WLAN				
Signal Strength LEDs	Software-Adjustable to Correspond to Custom RSSI Levels				
Max. VSWR	1.6:1				
Channel Sizes	PtP Mode		PtMP Mode		
	10/20/30/40/50/60/80 MHz		10/20/30/40 MHz		
Polarization	Dual Linear				
Enclosure	Outdoor UV Stabilized Plastic				
Mounting	Pole-Mount (Kit Included)				
Wind Loading	Radome Excluded		Radome Included		
	1510 N @ 200 km/h (340 lbf @ 125 mph)		1830 N @ 200 km/h (411 lbf @ 125 mph)		
Wind Survivability	200 km/h (125 mph)				
ESD/EMP Protection	Air: ± 24 kV, Contact: ± 24 kV				
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)				
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing				
Wireless Approvals	FCC, IC, CE				
RoHS Compliance	Yes				
Salt Fog Test	IEC 68-2-11 (ASTM B117), Equivalent: MIL-STD-810 G Method 509.5				
Vibration Test	IEC 68-2-6				
Temperature Shock Test	IEC 68-2-14				
UV Test	IEC 68-2-5 at 40° C (104° F), Equivalent: ETS 300 019-1-4				
Wind-Driven Rain Test	ETS 300 019-1-4, Equivalent: MIL-STD-810 G Method 506.5				

PBE-5AC-620 Output Power: 24 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (½)	24 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (½)	-96 dBm Min.	± 2 dB
	2x QPSK (½)	24 dBm	± 2 dB		2x QPSK (½)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (¾)	24 dBm	± 2 dB		2x QPSK (¾)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (½)	24 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (½)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (¾)	24 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (¾)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (½)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (½)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (¾)	23 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (¾)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (9/16)	22 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (9/16)	-74 dBm	± 2 dB
8x 256QAM (¾)	20 dBm	± 2 dB	8x 256QAM (¾)	-69 dBm	± 2 dB		

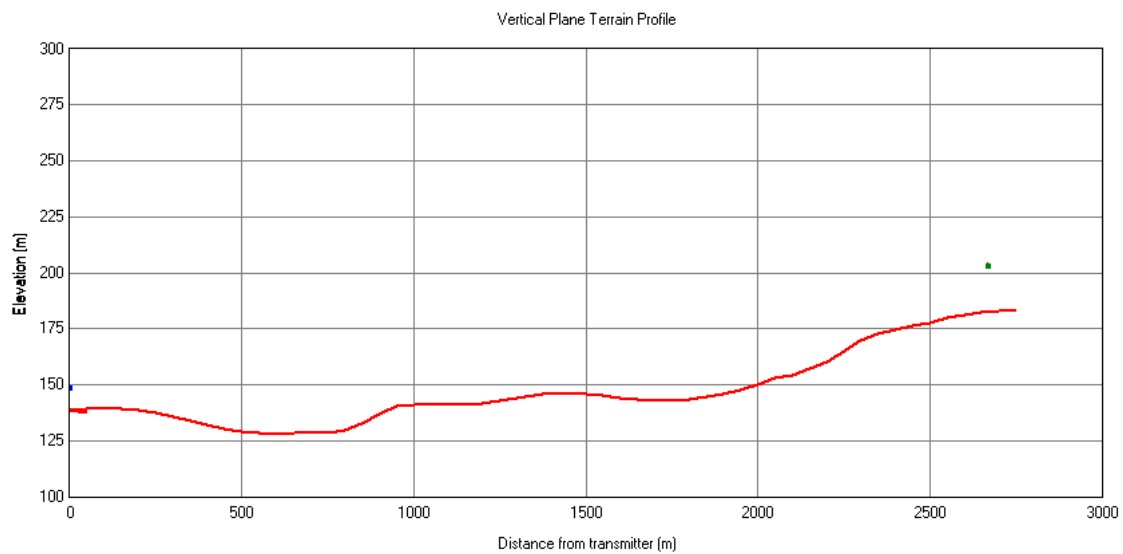
C Terénní profily



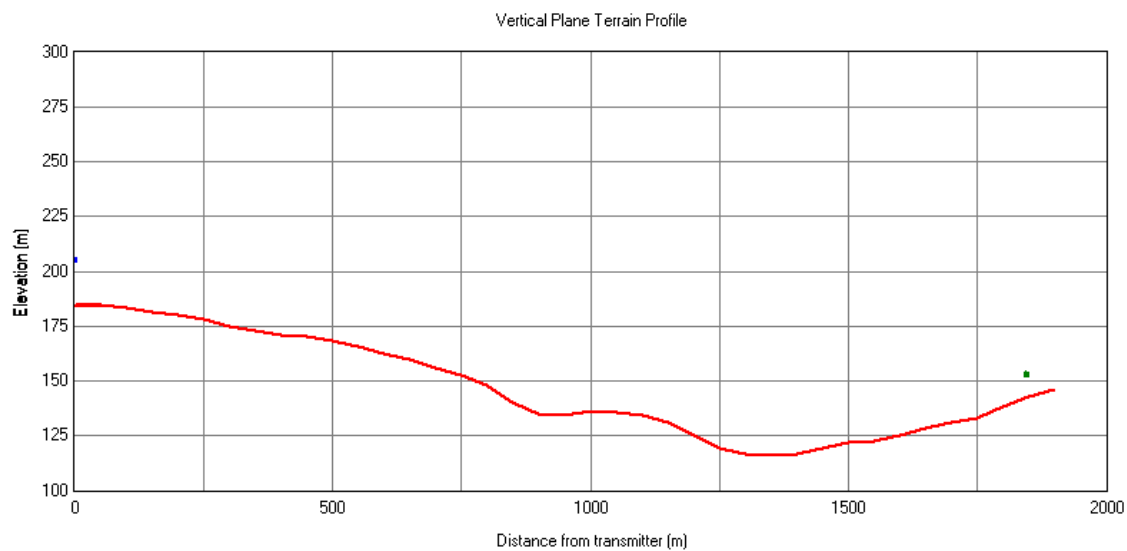
Obr. C.1: Terénní profil spoje bod X – Iževsk.



Obr. C.2: Terénní profil spoje Mozhvay (větší část) – bod X.



Obr. C.3: Terénní profil spoje Mozhvay (menší část)– bod X.



Obr. C.4: Terénní profil spoje bod X – Chuzyalovo.

D Obsah přiloženého CD

D.1 Elektronická verze bakalářské práce

D.2 Projekty v simulátoru Wireless InSite

Všechny projekty se nachází ve složce Projekty_Wireless_InSite. Složka obsahuje čtyři další adresáře, ve kterých jsou simulace jednotlivých rádiových spojů:

- `bodX_Chuzh'yalovo`
- `bodX_Mozhvay(mensi_cast)`
- `bodX_Mozhvay(vetsi_cast)`
- `Izhevsk_bodX`

V softwarovém prostředí Wireless InSite pro načtení projektu vždy otevíráme soubor s příponou `.setup` (např. `Chuzh'yalovo.setup`).