

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření a analýza přenosových charakteristik bezdrátových spojů
v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz

Bc. Jiří Kočárník

Diplomová práce

2011

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Kočárník**
Osobní číslo: **I09400**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Měření a analýza přenosových charakteristik bezdrátových spojů v pásmech 2,4 a 5 GHz**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce se bude zabývat proměřením přenosových charakteristik (výkon, chybovost u datových spojů) spoje LOS a NLOS v pásmech 2,4 a 5 GHz. Měření se uskuteční ve vybraných druzích prostředí (venkovní, uvnitř budovy) a data z měření budou ukládána pomocí PC, charakteristiky budou zaznamenávány dlouhodobě. Získané přenosové charakteristiky budou podrobeny statistické analýze a ve vybraných případech budou korelovány s jinými charakteristikami, jako jsou charakteristiky optických spojů a meteorologické parametry. Pro každé prostředí bude vytvořen model šíření. Součástí práce bude sestavení a oživení bezdrátových spojů a proměření anténních charakteristik v laboratorním prostředí, případně v bezdrazové komoře.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

ZANDL, Patrick.: Bezdrátové sítě WiFi : Praktický průvodce, Brno, Computer Press, 2006, 204 s., ISBN 80-722-663-2

PECHAČ, Pavel.: Šíření vln v zástavbě: modely pro plánování mobilních rádiových

systémů WLAN, WiFi, DECT, GSM, UMTS. 1. vydání., Praha, BEN - technická literatura, 2005, 108 s., ISBN 80-7300-186-1

MAZÁNEK, Miloš, PECHAČ, Pavel.: Šíření elektromagnetických vln a antény, ČVUT Praha, 2004, 259 s., ISBN 80-01-03032-6

PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, Praha, BEN - technická literatura, 2007, 200 s., ISBN 978-80-7300-223-7

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

14. prosince 2010

Termín odevzdání diplomové práce:

29. srpna 2011



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 7. 2011

Bc. Jiří Kočárník

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za rady, připomínky a návrhy týkající se diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem ostatním studentům, kamarádům, kteří mi byli nápomocni v průběhu studia a především rodině, která mě vždy ve studiu podporovala.

Anotace

Práce se zabývá měřením a analýzou přenosových charakteristik (výkon, chybovost) spojů s přímou viditelností a bez přímé viditelnosti v pásmech 2,4 a 5 GHz. Ze získaných přenosových charakteristik jsou vytvořeny modely šíření signálu pro různá prostředí. V rámci práce byl realizován spoj v pásmu 5 GHz na hoře Milešovka, kde byl sledován vliv atmosférickým jevů na přenosové charakteristiky. Součástí práce je rozbor a měření charakteristik antén, které jsou využity pro sestavení bezdrátových spojů v obou pásmech.

Klíčová slova

wifi; 802.11; šíření signálu; LOS; NLOS; empirický model; vyzářovací charakteristika; anténa

Title

Measurement and analysis of signal propagation for wireless channels in the 2,4 GHz and 5 GHz.

Annotation

The thesis deals with measurement and analysis of transmission characteristics (signal power, bit error rate) in line of sight and non line of sight environments in 2,4 GHz and 5 GHz bands. Propagation models are then created by real measured transmission characteristics. Wireless channel in 5 GHz band was implemented in the environment of Milešovka hill for analysis of influence of atmosphere on the transmission characteristics. This thesis contains measurements of radiation patterns of antennas.

Keywords

wifi; 802.11; signal propagation; LOS; NLOS; empirical model; radiation pattern; antenna

Obsah

1	Úvod do šíření elektromagnetických vln.....	14
1.1	Rovinná vlna	14
1.2	Kulová vlna	16
2	Charakteristiky antén a jejich měření	20
2.1	Vysílací charakteristiky antény	20
2.1.1	<i>Zisk antény</i>	21
2.1.2	<i>Šířka hlavního laloku</i>	22
2.1.3	<i>Odstup postranních laloků</i>	23
2.2	Přijímací charakteristiky antény.....	23
2.2.1	<i>Efektivní plocha antény</i>	23
2.3	Použité antény při měření	24
2.3.1	<i>Pásmo 2,4 GHz</i>	25
2.3.2	<i>Pásmo 5 GHz</i>	25
2.4	Měření anténních charakteristik.....	26
2.4.1	<i>Vyzařovací charakteristika antény – 2,4 GHz</i>	26
2.4.2	<i>Vyzařovací charakteristika antény – 5 GHz</i>	28
3	Šíření elektromagnetických vln	30
3.1	Radiokomunikační rovnice	31
3.1.1	<i>Radiokomunikační rovnice ve ztrátovém prostředí</i>	32
3.2	Fresnelovy zóny	33
3.3	Šíření elektromagnetických vln nad rovinnou zemí.....	35
4	Bezdrátové spoje standardu 802.11	39
4.1	Fyzická vrstva	40
4.1.1	<i>Ortogonální frekvenční multiplex OFDM</i>	40
4.1.2	<i>Přímé rozprostřené spektrum DSSS</i>	41
4.2	Standard 802.11b	42
4.3	Standard 802.11g	43
4.4	Standard 802.11a.....	44
5	Vybrané přenosové charakteristiky bezdrátových spojů.....	46
5.1	Přijímaný výkon signálu	46
5.1.1	<i>Empirický model – One-Slope</i>	47

5.2	Chybovost bezdrátového spoje	48
5.2.1	<i>Propustnost (Throughput)</i>	48
6	Měření přenosových charakteristik	49
6.1	Použitý hardware.....	49
6.1.1	<i>Routerboard</i>	50
6.1.2	<i>Mini PCI karta</i>	51
6.2	Návrh metodiky měření a systém zpracování výsledků.....	52
6.2.1	<i>Záznam měřených dat a způsob zpracování</i>	53
6.3	Měření chybovosti 802.11a.....	54
6.4	Realizace bezdrátových spojů v budově	55
6.4.1	<i>Měření spojů s přímou optickou viditelností LOS</i>	56
6.4.2	<i>Měření zastíněných spojů NLOS</i>	58
6.4.3	<i>Výsledky měření přijímaného výkonu reálné wifi sítě</i>	60
6.5	Realizace bezdrátových spojů ve volném prostoru	63
6.6	Realizace bezdrátového spoje na Milešovce.....	66
6.6.1	<i>Způsob zpracování naměřených dat</i>	67
7	Zhodnocení spoje na Milešovce	69
7.1	Výkon signálu	69
7.2	Korelace	70
8	Závěr	73

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Šíření rovinné vlny	16
Obrázek 2 – Sférický souřadný systém.....	17
Obrázek 3 – Yagi anténa, typ BD 2G4	25
Obrázek 4 - Yagi anténa, typ ASD17.....	25
Obrázek 5 – Polární graf anténní charakteristiky (2,4GHz)	27
Obrázek 6 – Řez anténní charakteristikou ve směru azimutu (2,4 GHz).....	27
Obrázek 7 - Polární graf anténní charakteristiky (5 GHz)	28
Obrázek 8 – Řez anténní charakteristikou ve směru azimutu (5 GHz)	29
Obrázek 9 – Vzájemné umístění antén.....	31
Obrázek 10 – Fresnelovy zóny.....	33
Obrázek 11 – Poloměr Fresnelovy zóny (2,4 a 5 GHz).....	34
Obrázek 12 – Šíření vlny nad rovinnou zemí.....	35
Obrázek 13 – Spádová křivka při šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí (2,4 GHz).....	37
Obrázek 14 - Spádová křivka při šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí (5 GHz)	38
Obrázek 15 – Model ISO OSI.....	39
Obrázek 16 – Částečný překryv subnosných u OFDM.....	40
Obrázek 17 – OFDM spektrum ze spektrálního analyzátoru [9]	41
Obrázek 18 – Rozprostřené spektrum – princip.....	42
Obrázek 19 – DSSS spektrum ze spektrálního analyzátoru.....	42
Obrázek 20 – Kanály v pásmu 2,4 GHz [13].....	43
Obrázek 21 – RouterBoard RB 411	50
Obrázek 22 – miniPCI wifi karta WNC CM9.....	51
Obrázek 23 – Uživatelské rozhraní WinBox	52
Obrázek 24 – Základní schéma spoje.....	53
Obrázek 25 – Chybovost 802.11a	55
Obrázek 26 – Plán podlaží, rozmístění antén a měřených bodů	56
Obrázek 27 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 2,4 GHz v prostoru chodby.....	57
Obrázek 28 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 5 GHz v prostoru chodby.....	58

Obrázek 29 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů pro pásmo 2,4 GHz v prostorách laboratoří	59
Obrázek 30 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů pro pásmo 5 GHz v prostorách laboratoří	60
Obrázek 31 - Plán podlaží, rozmístění přístupových bodů a měřených bodů.....	61
Obrázek 32 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP1	62
Obrázek 33 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP2	62
Obrázek 34 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP3	63
Obrázek 35 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 2,4 GHz ve volném prostranství.....	64
Obrázek 36 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 5 GHz ve volném prostranství.....	65
Obrázek 37 – Bezdrátový spoj na Milešovce.....	66
Obrázek 38 – Naměřené vzorky přijatého výkonu v průběhu jednoho týdne.....	69
Obrázek 39 – Přijatý výkon v průběhu jednoho týdne průměrovaný po jedné minutě	70
Obrázek 40 – Intenzita srážek v průběhu jednoho týdne	71
Obrázek 41 – Útlum optického spoje.....	71
Obrázek 42 – Realizace spoje v prostoru chodby (pásmo 5 GHz)	77
Obrázek 43 – Realizace spoje prostoru chodby (pásmo 2,4 GHz)	78
Obrázek 44 – Realizace spoje ve volném prostranství (pásmo 5 GHz).....	78
Obrázek 45 – Realizace spoje ve volném prostranství (pásmo 2,4 GHz).....	79
Obrázek 46 – Realizace spoje na Milešovce – pohled od přijímače k vysílači	79
Obrázek 47 – Realizace spoje na Milešovce – pohled na vysílač.....	80
Obrázek 48 – Realizace spoje na Milešovce – instalace vysílací stanice	80

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry antén BD 2G4	25
Tabulka 2 – Parametry antén ASD17.....	26
Tabulka 3 – Základní vlastnosti 802.11b	43
Tabulka 4 – Kmitočtová pásma 802.11a.....	44
Tabulka 5 – Základní vlastnosti 802.11a	45
Tabulka 6 – Vlastnosti RouterBoardu RB 411	51

Tabulka 7 – Citlivost miniPCI wifi karty WNC CM9	51
Tabulka 8 – Výstup z textového souboru.....	54
Tabulka 9 – Parametry nalezených modelů	58
Tabulka 10 – Parametry nalezených modelů	60
Tabulka 11 - Parametry nalezených modelů	63
Tabulka 12 – Parametry nalezených modelů	65
Tabulka 13 – Stuktura načítaných dat.....	67
Tabulka 14 – Korelační koeficienty	72

Seznam zkratek

AP	Access Point
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCK QPSK	Complementary Code Keying Quadrature Phase Shift Keying
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FSL	Free Space Loss
GUI	Graphical User Interface
HR-DSSS	High Rate Direct Sequence Spread Spectrum
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISP	Internet Service Provider
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PER	Packet Error Rate
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RSSI	Received Signal Strength Indication
SNR	Signal to Noise Ratio
TMT	Theoretical Maximum Throughput
UDP	User Datagram Protocol
WIFI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Networ

Úvod

Problematika šíření elektromagnetických vln je v dnešní době aktuální téma, protože radiokomunikační služby jsou jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí. Za poslední desetiletí jsme byli svědky velkého rozmachu např. mobilních komunikačních služeb nebo bezdrátového připojení k internetu pomocí standardu 802.11. Dnes již nikoho nepřekvapí, že tento standard je „zabudován“ např. v televizi nebo tiskárně. V ČR je nejvýznamnější využití standardu 802.11 pro poskytování přístupu k internetu. Dnes se již můžeme téměř na každém místě připojit k tzv. přístupovému bodu AP (Access Point). Poskytovatelé internetu ISP (Internet Service Provider) budují své rozsáhlé sítě na rozlehlém území, často o velikosti desítek km². Využívají se bezlicenční pásma 2,4 GHz, 5 GHz. Často se pásmo 2,4 GHz využívá pro lokální sítě uvnitř budov vyšší pásmo potom pro realizaci tzv. poslední míle nebo páteřních spojů sítě. Je tedy namístě zabývat se vlastnostmi šíření signálů v těchto pásmech v různých druzích prostředí. V práci jsou rozebrány vlastnosti šíření signálu jak v uzavřených prostorách, tak ve volném prostoru bez vlivů překážek a terénních nerovností. Dále pak vliv atmosférických jevů (deště) na šíření signálu v pásmu 5 GHz.

V první kapitole je vyložen úvod do šíření elektromagnetických vln, kdy jsou zavedeny dvě důležité abstrakce v podobě rovinné a kulové vlny.

Druhá kapitola potom využívá poznatky z první kapitoly a rozebírá základní charakteristiky antén a následně jsou charakteristiky změřeny pro antény, které se využívaly pro realizaci veškerých bezdrátových spojů.

Ve třetí kapitole je popsána obecná problematika šíření elektromagnetických vln, zejména pak šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí, a aplikace radiokomunikační rovnice pro určení výkonové bilance spoje.

Čtvrtá kapitola rozebírá základní vlastnosti standardu 802.11b,g,a na fyzické vrstvě.

V páté kapitole jsou rozebrány charakteristiky bezdrátových spojů. Je zmíněna obecná problematika chybovosti bezdrátových spojů, důraz je kladen na standard 802.11. Dále je popsán empirický model pro šíření signálu, tzv. One-Slope model.

V šesté kapitole je popsán návrh metodiky měření a způsob zpracování výsledků z jednotlivých realizovaných bezdrátových spojů. Dále jsou rozebrány jednotlivé realizované spoje a zhodnoceny naměřené výsledky z těchto spojů. Bezdrátové spoje se realizovali v budově Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice (LOS, NLOS), dále pak na letišti u Chrudimi, kde nebyly terénní nerovnosti a další překážky (LOS). Samostatnou kapitolou je pak realizace bezdrátového spoje na hoře Milešovka pro posouzení vlivů atmosférických jevů (deště) na instalovaný spoj v pásmu 5 GHz a srovnání s optickým bezdrátovým spojením.

V sedmé kapitole jsou shrnuty výsledky z bezdrátového spoje na Milešovce.

1 Úvod do šíření elektromagnetických vln

Elektromagnetické pole je popsáno v každém bodě prostoru Maxwellovými rovnicemi, které se vyjadřují v integrálním a diferenciálním tvaru. Popis těchto rovnic je uveden např. v [1]. V rovnicích vystupují čtyři vektorové veličiny: intenzita elektrického pole \mathbf{E} , intenzita magnetického pole \mathbf{H} , elektrická indukce \mathbf{D} a magnetická indukce \mathbf{B} . Tyto veličiny jsou mezi sebou svázány materiálovými vztahy:

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon \cdot \mathbf{E} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}.\end{aligned}\tag{1.1}$$

Parametry, které vystupují v rovnicích (1.1) jsou permitivita prostředí $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ a permeabilita prostředí $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$. Ve vakuu mají tyto veličiny hodnoty $\varepsilon_0 = 10^{-9} / (36\pi)$ [F/m] a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]. Relativní permitivita ε_r a relativní permeabilita μ_r jsou bezrozměrné veličiny, udávající kolikrát je permitivita či permeabilita daného prostředí větší než ve vakuu [1]. Je zvykem, že pro popis elektromagnetického pole se používají veličiny \mathbf{E} a \mathbf{H} . V homogenním prostředí můžeme zbylé dvě snadno dopočítat.

Řešení Maxwellových rovnic v integrálním tvaru pro určení prostorového nebo časového rozložení pole je velice obtížné a často řešitelné pouze numerickými metodami. Snadněji se rovnice řeší v diferenciálním tvaru. V tomto tvaru však rovnice popisují jevy jen v oblastech, kde jsou vektory spojitě diferencovatelné (neplatí na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými materiálovými parametry). Pokud se zabýváme pouze šířením elektromagnetických vln a ne jejich vznikem, potom můžeme řešení soustavy rovnic hledat v lineárním homogenním a izotropním prostředí bez zdrojů pro případ harmonické vlny $e^{j\omega t}$. Řešení se nejčastěji hledá ve tvaru rovinné vlny (kartézský souřadný systém) a kulové vlny (kulový souřadný systém).

1.1 Rovinná vlna

Rovinná vlna je řešením Maxwellových rovnic v kartézském souřadném systému. Řešení soustavy rovnic pro případ harmonické vlny lze nalézt ve tvaru [2]:

$$\begin{aligned}
E_x &= E_{x_0} \cdot e^{-jk_x \cdot x} \cdot e^{-jk_y \cdot y} \cdot e^{-jk_z \cdot z} \cdot e^{j\omega t} \\
E_y &= E_{y_0} \cdot e^{-jk_x \cdot x} \cdot e^{-jk_y \cdot y} \cdot e^{-jk_z \cdot z} \cdot e^{j\omega t} \\
E_z &= E_{z_0} \cdot e^{-jk_x \cdot x} \cdot e^{-jk_y \cdot y} \cdot e^{-jk_z \cdot z} \cdot e^{j\omega t}
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Stejné vztahy platí i pro složku \mathbf{H} elektromagnetického pole. V rovnicích (1.2) vystupuje vektor $\mathbf{k} \equiv (k_x, k_y, k_z)$, který se nazývá *vlnový vektor*. Pokud si představíme prostor, který v čase t_0 pomyslně zamrzne, potom pátráme po útvarech v prostoru, kde bude stejná fáze elektromagnetického vlnění ψ . Množina bodů, které mají v daný okamžik t_0 stejnou fázi ψ se nazývá *vlnoplocha*. Fáze vlny se dá z rovnic (1.2) vyjádřit následovně [2]:

$$\psi = \omega \cdot t_0 - k_x \cdot x - k_y \cdot y - k_z \cdot z. \tag{1.3}$$

Vlnoplocha, která je určena rovnicí (1.3) je rovina kolmá k vlnovému vektoru \mathbf{k} a proto této vlně říkáme *rovinná vlna*. Elektromagnetická vlna se šíří prostorem rychlostí c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}, \tag{1.4}$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}. \tag{1.5}$$

Z rovnice (1.4) je vidět, že rychlost závisí na materiálových parametrech. Stejnou rychlostí c se s časem posouvá vlnoplocha ve směru vlnového vektoru \mathbf{k} . Vzdálenost, kterou vlnoplocha „urazí“ za dobu jedné periody se nazývá *vlnová délka*:

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot c}{\omega}. \tag{1.6}$$

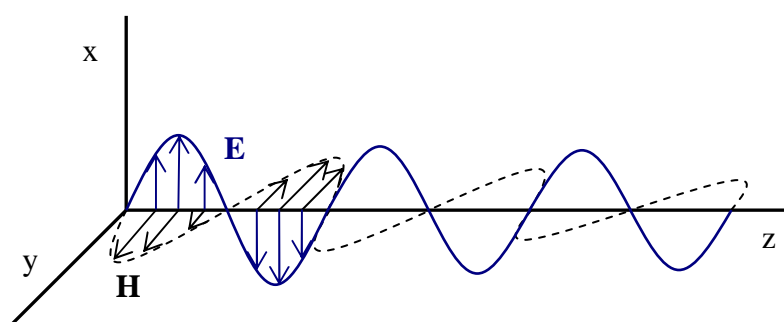
Jde o vzdálenost dvou po sobě jdoucích vlnoploch, které mají stejnou fázi (neboli fázi s rozdílem 2π).

Pokud se vlna šíří prostředím, kde materiálové konstanty (parametry) μ_r a ϵ_r nejsou čistě reálné veličiny, potom také vlnový vektor \mathbf{k} není reálný, ale komplexní:

$$\mathbf{k} = \sqrt{-j\omega \cdot \mu \cdot (j\omega \cdot \varepsilon)} = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} = \beta - j\alpha. \quad (1.7)$$

V rovnici (1.7) je β fázová konstanta a α měrný útlum. Imaginární složka vlnového vektoru představuje pokles amplitudy vlny při šíření. Pokud zavedeme souřadnou soustavu, kde se vlna bude šířit ve směru osy z , tzn., že i vlnový vektor \mathbf{k} bude ležet ve směru osy z (Obrázek 1), potom složky vlnového vektoru k_x, k_y budou nulové a \mathbf{E} klesá podle osy z :

$$|\mathbf{E}(z)| = |E_0| \cdot e^{-\alpha \cdot z}. \quad (1.8)$$



Obrázek 1 – Šíření rovinné vlny

Z obrázku (Obrázek 1) je patrné, že \mathbf{E} i \mathbf{H} leží na vlnoploše a jsou kolmé jak na sebe, tak i na vlnový vektor \mathbf{k} .

Definujme ještě jeden důležitý vektor, tzv. *Poyntingův vektor* [2]:

$$|\mathbf{S}| = \frac{1}{2} \cdot |\mathbf{E}| \cdot |\mathbf{H}^*| \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (1.9)$$

Absolutní hodnota Poyntingova vektoru představuje hustotu výkonu, kterou elektromagnetická vlna přenáší a má vždy stejný směr jako vlnový vektor \mathbf{k} .

Musíme si uvědomit, že rovinná vlna ve skutečnosti neexistuje. Aby mohla existovat, potřebovala by k vybuzení homogenní rozložení zdrojů na nekonečné rovině. Rovinná vlna představuje významnou abstrakci, která usnadňuje řadu výpočtů.

1.2 Kulová vlna

Kulová vlna je řešením Maxwellových rovnic v kulovém (sférickém) souřadném systému. Stejně jako vlny rovinné nejsou ani kulové vlny úplně reálné, protože

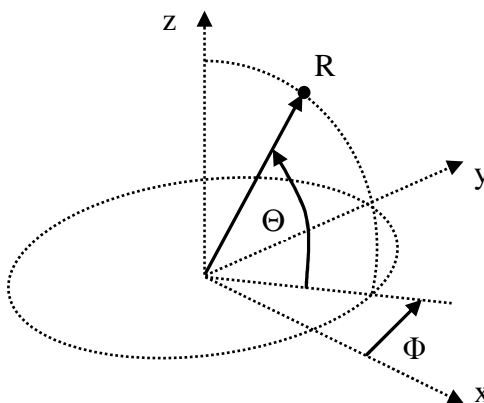
předpokládají, že bychom v počátku vyzařování měli nekonečně malý bodový zdroj. Většina vln se dá ale aproximovat tak, že v určité vzdálenosti od skutečného zdroje (má konečný rozměr D) můžeme vlnu považovat za kulovou. Tato vzdálenost se označuje jako *vzdálená zóna*. Bez důkazu uveďme, že lze vlnu považovat za kulovou, pokud je vzdálenost R od zdroje dostatečně velká [2]:

$$R \gg \frac{D^2}{\lambda}. \quad (1.10)$$

Pokud budeme kulovou vlnu pozorovat z dostatečně velké vzdálenosti R na malé ploše o rozměrech L , můžeme ji považovat za rovinnou. Bez důkazu opět uveďme, že vzdálenost musí být [2]:

$$R \gg \frac{L^2}{\lambda}. \quad (1.11)$$

Když je nějaké kulové rozložení \mathbf{E} a \mathbf{H} , používá se nejen kartézský souřadný systém, ale také kulový souřadný systém (Obrázek 2).



Obrázek 2 – Sférický souřadný systém

Význam souřadnic je následující: R je vzdálenost od počátku souřadnic, Φ je azimut (tzn. úhel 0 až 2π v nějaké rovině), Θ je elevace (tzn. obecně úhel $\pm \pi/2$ od roviny). V této soustavě se tedy vektory rozkládají na tři složky, ve směru R , Φ , Θ . \mathbf{E} a \mathbf{H} leží vždy v rovině kolmé ke směru šíření (vlnovému vektoru \mathbf{k}), směr šíření je radiální. Z toho vyplývá, že složky vektorů E_R, H_R jsou nulové.

Pro řešení Maxwellových rovnic v kulovém souřadném systému se stejně jako u rovinné vlny předpokládá lineární homogenní a izotropní prostředí bez zdrojů,

charakterizované pouze konstantami μ a ε . Řešení hledáme opět pro harmonickou vlnu $e^{j\omega t}$ ve formě součinu funkcí souřadnic [2]:

$$\begin{aligned} E_{\Phi} &= E_{\Phi_0} \cdot f_R(R) \cdot f_{\Phi}(\Phi, \Theta) \cdot e^{j\omega t} \\ E_{\Theta} &= E_{\Theta_0} \cdot f_R(R) \cdot f_{\Theta}(\Phi, \Theta) \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Stejně vztahy platí i pro složku \mathbf{H} elektromagnetického pole. Je vidět že složky vektorů \mathbf{E} a \mathbf{H} se rozkládají na součin dvou funkcí. Pro funkci radiální vzdálenosti R dostaneme integrací [2]:

$$f_R(R) = \frac{e^{-jk \cdot R}}{k \cdot R}. \quad (1.13)$$

Pro funkce $f_{\Phi}(\Phi, \Theta)$ a $f_{\Theta}(\Phi, \Theta)$ nejsou vztahy tak jednoznačné jako pro funkci $f_R(R)$, protože závisejí na okrajových podmínkách v počátku a jsou hodně komplikované. Vždy ale platí [2]:

$$\begin{aligned} \text{Im}\{f_{\Phi}(\Phi, \Theta)\} = 0 &\Rightarrow \text{Arg}\{f_{\Phi}(\Phi, \Theta)\} = 0 \text{ nebo } \pi \\ \text{Im}\{f_{\Theta}(\Phi, \Theta)\} = 0 &\Rightarrow \text{Arg}\{f_{\Theta}(\Phi, \Theta)\} = 0 \text{ nebo } \pi \end{aligned} \quad (1.14)$$

Stejně jako u rovinné vlny, vyjádříme fázi vlny v čase t_0 např. pro složky E_{Φ} [2]:

$$\Psi_{E_{\Phi}} = \omega \cdot t_0 - \mathbf{k} \cdot R + \text{Arg}\{E_{\Phi_0}\} + \text{Arg}\{f_{\Phi}(\Phi, \Theta)\} = \omega \cdot t_0 - \mathbf{k} \cdot R + \text{Arg}\{E_{\Phi_0}\}. \quad (1.15)$$

Vlnoplocha určená rovnicí (1.15) je kulová plocha ve vzdálenosti R a proto této vlně říkáme *kulová vlna*. Z rovnice je patrné, že fáze vlny nezávisí na Φ ani na Θ .

Velice důležitá je závislost funkce $f_R(R)$ na vzdálenosti R v rovnici (1.13). Vlna se šíří radiálním směrem. Pokud se budeme vzdalovat od počátku vyzařování, bude \mathbf{E} a \mathbf{H} klesat jako $1/R$ a hustota výkonu jako $1/R^2$.

Dále je v čitateli rovnice (1.13) výraz $e^{-jk \cdot R}$. Stále mluvíme o komplexních harmonických signálech. Takové signály mají komplexní kmitočet $e^{j\omega t}$ a v našem případě v součinu s $e^{-jk \cdot R}$. Jestliže je vlnový vektor \mathbf{k} reálné číslo (prostředí je bezeztrátové), tak ostatní veličiny (ω, t, R) jsou také reálná čísla a potom fázi vlny můžeme vyjádřit:

$$\Psi = \omega \cdot t - k \cdot R. \quad (1.16)$$

Z toho plyne, že pokud je \mathbf{k} reálné, potom čítecel v rovnici (1.13) představuje pouze neustálou lineární změnu fáze vlny s tím, jak se mění čas a vzdálenost. Pokud je však prostředí ztrátové, tzn., že vlnový vektor \mathbf{k} je komplexní, můžeme psát:

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}' - j\mathbf{k}'' . \quad (1.17)$$

Potom dosazením do rovnice (1.13) a vynásobením $e^{j\omega t}$ dostaneme:

$$e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}} \cdot e^{j\omega t} = \underbrace{e^{j(\omega t - \mathbf{k}' \cdot \mathbf{R})}}_{\text{změně fáze}} \cdot \underbrace{e^{-\mathbf{k}'' \cdot \mathbf{R}}}_{\text{pokles amplitudy}} . \quad (1.18)$$

V rovnici (1.18) jsou dvě části. První část, stejně jako v rovnici (1.13), mění pouze fázi vlny a druhá část zmenšuje amplitudu vlny. Za \mathbf{k}'' můžeme dosadit měrný útlum α . Jde o ztráty v pravém slova smyslu, kdy je potřeba si uvědomit rozdíl s případem, když se vlna šíří v bezztrátovém prostředí a dochází pouze k divergenci („ředění“) hustoty výkonu podle $1/R^2$.

2 Charakteristiky antén a jejich měření

V následující kapitole budou probrány základní charakteristiky antén a následné měření charakteristik dvou směrových antén, které se využívaly při realizaci bezdrátových spojů v obou pásmech.

2.1 Vysílací charakteristiky antény

Jak bylo ukázáno v kapitole 1.2, tak v dostatečně velké vzdálenosti od antény, která má konečný rozměr, lze vyzařovanou vlnu považovat za kulovou. Hustota výkonu, která je stále dále od zdroje záření klesá jako $1/R^2$ a je násobena stále stejným koeficientem (funkcí) $f(\Phi, \Theta)$ ať je v kterékoliv vzdálenosti. Tzn. $f(\Phi, \Theta)$ nezávisí na vzdálenosti a rozložení \mathbf{E} a \mathbf{H} po kulové ploše bude stále stejné (ať už jsme např. 100 m nebo 200 m od zdroje, pouze hustota výkonu bude klesat). Nikdy nemůže existovat kulová vlna, která by měla funkci $f(\Phi, \Theta)$ na kulové ploše konstantní. Tzn. absolutní hodnota funkce $|f(\Phi, \Theta)|$ musí mít někde maximum (může jich být více) a právě v maximum anténa vyzařuje nejvíce. Pokud se funkce $f(\Phi, \Theta)$ podělí maximem absolutní hodnoty funkce $\max|f_\Phi(\Phi, \Theta)|$, dostaneme *napětřovou vyzařovací charakteristiku* antény v polarizaci E_Φ [2]:

$$\frac{f_\Phi(\Phi, \Theta)}{\max|f_\Phi(\Phi, \Theta)|} \equiv f(\Phi, \Theta). \quad (2.1)$$

Pokud *napětřovou vyzařovací charakteristiku* (2.1) umocníme, dostaneme *výkonovou vyzařovací charakteristiku* antény v polarizaci E_Φ [2]:

$$|f(\Phi, \Theta)|^2. \quad (2.2)$$

Podobně bychom postupovali pro druhou polarizaci E_Θ .

Každá anténa je tedy zásadně charakterizována výkonovou vyzařovací charakteristikou a tím vlastně o anténě víme vše. Ovšem $|f(\Phi, \Theta)|^2$ je poměrně komplikovaná funkce dvou proměnných. V praxi, pro potřeby výpočtů komunikačních systémů se taková komplikovaná funkce těžko využívá. Je tedy dobré popsat (charakterizovat) funkci $|f(\Phi, \Theta)|^2$ nějakými číselnými parametry.

2.1.1 Zisk antény

V kapitole 1.1 bylo ukázáno, co je to Poyntingův vektor. Integrál absolutní hodnoty reálné složky Poyntingova vektoru přes uzavřenou plochu představuje celkový výkon, který vytéká z dané plochy [2]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot \iint_{R=\text{konst.}} |\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*| \cdot dS = \\ & = \frac{1}{2} \cdot \iint_{\Phi, \Theta} \frac{E_{\Phi} \cdot H_{\Theta} \cdot f_{\Phi}^2(\Phi, \Theta) + E_{\Theta} \cdot H_{\Phi} \cdot f_{\Theta}^2(\Phi, \Theta)}{k^2 \cdot R^2} \cdot R^2 \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \cdot d\Phi \end{aligned} \quad (2.3)$$

Předpokládejme, že se pohybujeme v bezeztrátovém prostředí. Jestliže někde v prostoru vyzařuje libovolný výkon, který vytéká z uzavřené plochy, tak v každém místě plochy je vždy stejný. Protože je známo, že v dostatečné vzdálenosti od zdroje lze považovat šířící se vlnu za kulovou, pak onu uzavřenou plochu, přes kterou se integruje, volíme v podobě kulové plochy. Jak je vidět ve vztahu (2.3) můžeme vektorový součin $|\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*|$ rozložit na součin funkcí $f_R(R)$ a $f(\Phi, \Theta)$. Vzdálenost R je konstantní. Pro jednotlivé polarizace následně dostaneme [2]:

$$\begin{aligned} P_{\text{Celk.}(\Phi)} &= \frac{1}{2} \cdot \underbrace{E_{\Phi} \cdot H_{\Theta} \cdot \max[f_{\Phi}^2(\Phi, \Theta)]}_{S_{\max}(R)} \iint_{\Phi, \Theta} \frac{f_{\Phi}^2(\Phi, \Theta)}{\max[f_{\Phi}^2(\Phi, \Theta)]} \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \cdot d\Phi \\ P_{\text{Celk.}(\Theta)} &= \frac{1}{2} \cdot \underbrace{E_{\Theta} \cdot H_{\Phi} \cdot \max[f_{\Theta}^2(\Phi, \Theta)]}_{S_{\max}(R)} \iint_{\Phi, \Theta} \frac{f_{\Theta}^2(\Phi, \Theta)}{\max[f_{\Theta}^2(\Phi, \Theta)]} \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \cdot d\Phi \end{aligned} \quad (2.4)$$

V rovnicích (2.4) je část označena jako $S_{\max}(R)$, která představuje hustotu výkonu ve vzdálenosti R , kde anténa vyzařuje maximum.

Nyní řekněme, že celkový výkon $P_{\text{Celk.}}$ vydělíme $4\pi \cdot R^2$. Dostaneme tak průměrnou hodnotu celkového výkonu, který se vyzáří na 1 m^2 ve vzdálenosti R . Hypotetická anténa (v praxi neexistuje), která by vyzařovala všemi směry stejně, se nazývá *izotropická anténa (zářič)*. Taková anténa by měla tedy ve vzdálenosti R hustotu výkonu [2]:

$$S_{\text{izotrop.}} = \frac{P_{\text{Celk.}}}{4\pi \cdot R^2} = S_{\text{max}}(R) \cdot \frac{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \left[\int_{\Theta=-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} |f(\Phi, \Theta)|^2 \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \right] \cdot d\Phi}{4\pi} \quad (2.5)$$

Pokud rovnici (2.5) upravíme, dostaneme nejdůležitější parametr antény a tím je *izotropický zisk antény* (obvykle pouze *zisk antény*) [2]:

$$G = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{izotrop.}}} = \frac{4\pi}{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \left[\int_{\Theta=-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} |f(\Phi, \Theta)|^2 \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \right] \cdot d\Phi} \quad (2.6)$$

Zisk antény G (2.6) je tedy poměr mezi hustotou výkonu, kterou vyzařuje anténa do směru maxima a hustotou průměrnou, neboli takovou, kterou by vyzařovala izotropická anténa.

Pokud bychom předpokládali ideální pravoúhlou anténní charakteristiku (bez postranních laloků), mohli bychom psát [2]:

$$G = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{izotrop.}}} = \frac{4 \cdot \pi}{\Phi_{3\text{dB}} \cdot \Theta_{3\text{dB}}} \quad (2.7)$$

Je třeba si uvědomit, že pokud je prostředí ztrátové (v praxi běžně) i poté zůstává zisk antény stejný. Je sice pravda, že výkon bude v určité vzdálenosti menší proti bezeztrátovému prostředí, ale zisk antény zůstane stále stejný – když se výkon např. $10\times$ zeslabí, tak se zeslabí jak v maximu tak i všude jinde.

2.1.2 Šířka hlavního laloku

U antény nás zajímají další charakteristiky. Pokud provedeme řez výkonovou vyzařovací charakteristikou antény, můžeme definovat šířku hlavního laloku (svazku) antény v poklesu o -3 dB. Definiuje se v řezu Φ a Θ . Běžně se používá označení: šířka svazku ve směru azimutu nebo šířka svazku ve směru elevace. Dalo by se říci, že se jedná o charakteristiky výkonové vyzařovací charakteristiky antény.

Nyní se ještě vrátíme k zisku antény G (2.6) a jeho souvislosti s šířkou hlavního laloku. V definičním vztahu (2.6) je ve jmenovateli integrál z výkonové charakteristiky antény. Pokud budeme zužovat hlavní lalok, integrál charakteristiky bude klesat a tím pádem poroste zisk G .

Dále šířka hlavního laloku souvisí s rozměry antény. Předpokládáme, že anténa má rozměr D a pole je rovnoměrně rozloženo na její apertuře. Bez odvození můžeme napsat vztah pro šířky hlavních laloků [2]:

$$\Phi, \Theta_{3dB} \cong \frac{\lambda}{D_{\Phi, \Theta}} [rad]. \quad (2.8)$$

Ze vztahu (2.8) je vidět, že čím je větší anténa, tím bude šířka hlavního laloku užší a čím bude větší vlnová délka, tím bude širší hlavní lalok a anténa bude mít menší zisk. Protože obvykle není ozáření antény rovnoměrné, je efektivní šířka antény trochu menší a šířka svazku se tím zvětší. Typicky se ve stupních uvádí vztah [2]:

$$\Phi, \Theta_{3dB} \cong \frac{K \cdot \lambda}{D_{\Phi, \Theta}} [deg], \quad K = 60 \text{ až } 65. \quad (2.9)$$

2.1.3 Odstup postranních laloků

Další číselná charakteristika, která je důležitá, je odstup postranních laloků. Ideální by bylo, kdybychom ve vyzařovací charakteristice antény neměli žádné postranní laloky, protože nám vlastně ubírají energii na úkor vyzařování do hlavního směru. Dále se může stát, že bychom mohli rušit nějaké sousední vyzařování jiných antén. Odstup postranních laloků vyjadřuje veličina *potlačení postranních laloků* v [dB].

2.2 Příjímací charakteristiky antény

Obecně můžeme přijímací a vysílací antény zaměnit, protože mezi nimi není žádný rozdíl. Z hlediska příjmu signálu, kdy nás zajímá, jak velký výkon anténa přijme, můžeme definovat přijímací charakteristiky antény.

2.2.1 Efektivní plocha antény

Vezměme si příklad, kdy signál přijímáme anténou, která má konečný rozměr a je umístěna v dostatečné vzdálenosti (např. 1 km) od vysílací antény. Jedná se tedy o kulovou vlnu, která má poloměr 1 km. Příjem studujeme v malém rozměru (např. 1×1 m), takže vlnu můžeme považovat za rovinnou (pouze pro ten daný příjem). Dopadající rovinná vlna je charakterizována hustotou výkonu S , která je všude stejná. Nyní nás bude zajímat, kolik se z dopadající hustoty výkonu dostane do vstupního konektoru přijímače (z antény).

Poměr mezi přijatým výkonem a hustotou dopadajícího výkonu je konstanta, která má rozměr m^2 a nazývá se *efektivní plocha antény* A_{ef} a popisuje přijímací vlastnosti antény. Je důležité si uvědomit, že se jedná pouze o jakousi konstantu, protože některé antény mají plochu antény, která se nedá ani přesně určit (typicky Yagi antény). U výpočtu A_{ef} se vychází z rozměrů aperturní antény (ne drátové antény) a spočítá se plocha, která odpovídá epertuře antény, šířka svazku a následně efektivní plocha antény.

Šířky hlavních laloků jsou svázány s efektivními rozměry antény podle vztahu (2.8). Pokud rovinná vlna dopadá ve směru maxima anténní charakteristiky, můžeme psát [2]:

$$A_{\text{ef}} = D_{\Phi} \cdot D_{\Theta} = \frac{\lambda^2}{\Phi_{3\text{dB}} \cdot \Theta_{3\text{dB}}}. \quad (2.10)$$

Jestliže do rovnice (2.10) dosadíme za šířky hlavních laloků z rovnice (2.8), dostaneme konečný vztah pro efektivní plochu antény, pokud známe zisk antény [2]:

$$A_{\text{ef}} = G \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}, \quad (2.11)$$

a výsledný vztah pro přijatý výkon anténou je:

$$P_p = S \cdot A_{\text{ef}} = S \cdot G \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}. \quad (2.12)$$

Pokud nebude vlna dopadat ve směru maxima anténní charakteristiky, potom musí platit [2]:

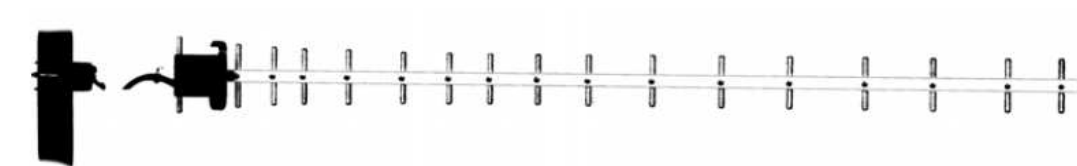
$$P_p = S \cdot A_{\text{ef}} = S \cdot G \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot |f(\Phi, \Theta)|^2. \quad (2.13)$$

2.3 Použité antény při měření

Pro měření anténních charakteristik byly zvoleny antény používané při realizaci bezdrátových spojů. Protože nebyla k dispozici bezodrazová komora, měření probíhalo v poměrně volné městské zástavbě tak, aby se částečně eliminovaly odrazy od okolního terénu.

2.3.1 Pásmo 2,4 GHz

Pro měření charakteristik antény v pásmu 2,4 GHz byly vybrány směrové antény typu Yagi, typové označení BD 2G4 (Obrázek 3).



Obrázek 3 – Yagi anténa, typ BD 2G4

Výrobce udává následující parametry antén (Tabulka 1) [3]:

Tabulka 1 – Parametry antén BD 2G4

Typové označení	BD 2G4
Kmitočtový rozsah [MHz]	2400 ÷ 2500
Zisk [dBi]	16 ÷ 17
Šířka hlavního laloku v rovině H	27° ÷ 29°
Šířka hlavního laloku v rovině E	25° ÷ 27°
Předozadní poměr [dB]	> 20
Polarizace	horizontální, vertikální

2.3.2 Pásmo 5 GHz

Pro měření charakteristik antény v pásmu 5 GHz byly vybrány směrové antény typu Yagi, typové označení ASD17 (Obrázek 4).



Obrázek 4 - Yagi anténa, typ ASD17

Výrobce udává následující parametry antén (Tabulka 2) [4]:

Tabulka 2 – Parametry antén ASD17

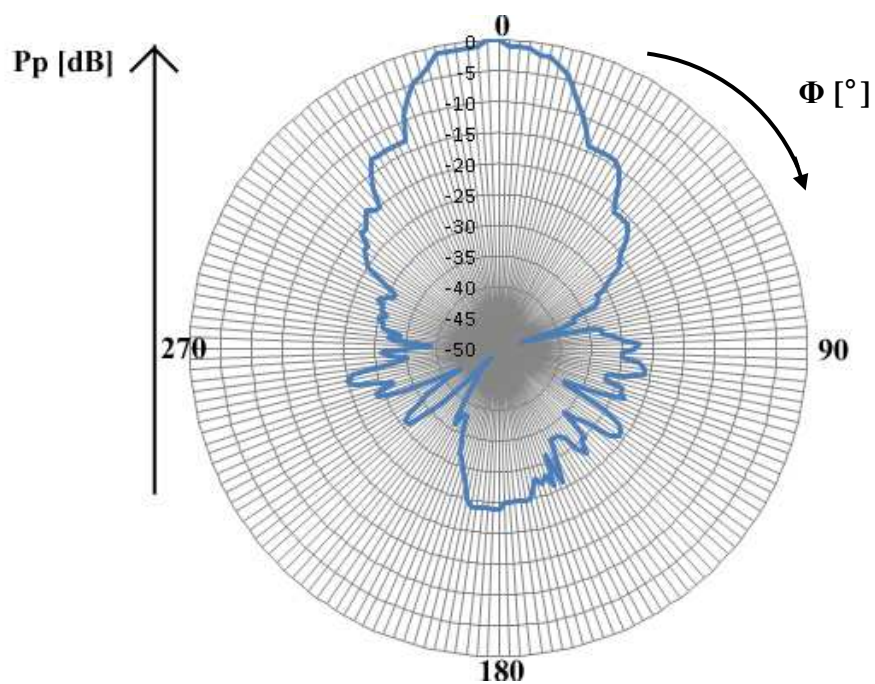
Typové označení	ASD17
Kmitočtový rozsah [MHz]	5000 ÷ 6000
Zisk [dBi]	17
Šířka hlavního laloku v rovině H	25°
Šířka hlavního laloku v rovině E	25°
Předozadní poměr [dB]	-
Polarizace	horizontální, vertikální

2.4 Měření anténních charakteristik

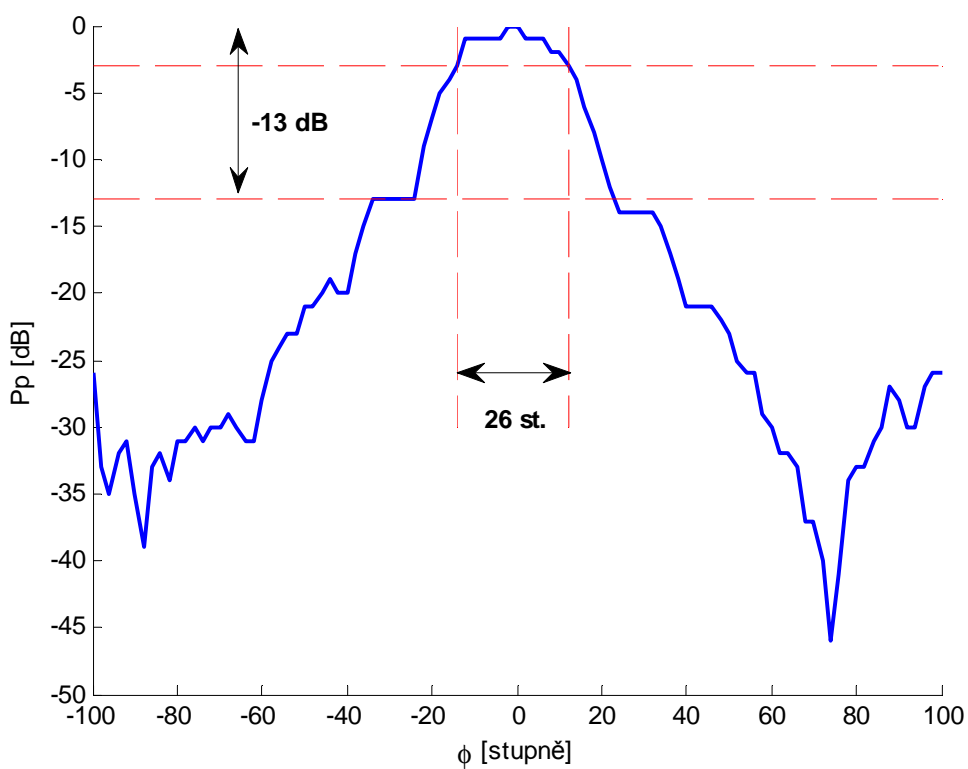
Pro oba typy antén bylo pro měření vyzařovací charakteristiky vybráno stejné prostředí v městské zástavbě. Antény byly umístěny na stativech 1,3 m nad zemí a vzdálenost od antén byla 4 m. Jedna anténa (vysílací) byla umístěna na pevném stativu a druhá (měřená) anténa na otočném stativu, který umožňoval odečítání hodnot (přijímaný výkon) s krokem 2° v rovině azimutu. Do vysílací antény byl nastaven pevný vysílací výkon ze síťového zařízení RouterBoard – popis tohoto zařízení je podrobně uveden v kapitole 5. Přijímaný výkon P_p byl opět zaznamenáván pomocí RouterBoardu. Anténní charakteristiky byly měřeny pouze ve směru azimutu Φ . Pro obě antény je následně vykreslen polární graf anténní charakteristiky. Přijaté výkony P_p v [dBm] jsou normovány. To znamená, že nejvyšší naměřený výkon je normován na 0 dB (v tomto směru anténa vyzařuje nejvíce) a následně nás zajímá pokles úrovně výkonu signálu v [dB] v závislosti na úhlu Φ . Aby bylo možné přesně určit odstup postranních laloků a šířku hlavního laloku, je vykreslen řez vyzařovací charakteristikou ve směru azimutu.

2.4.1 Vyzařovací charakteristika antény – 2,4 GHz

Na následujícím obrázku (Obrázek 5) je vidět polární graf naměřené anténní charakteristiky a na dalším obrázku (Obrázek 6) je řez charakteristikou ve směru azimutu. Odstup postranních laloků byl zjištěn o -13 dB a šířka hlavního laloku Φ_{3dB} je 26°.



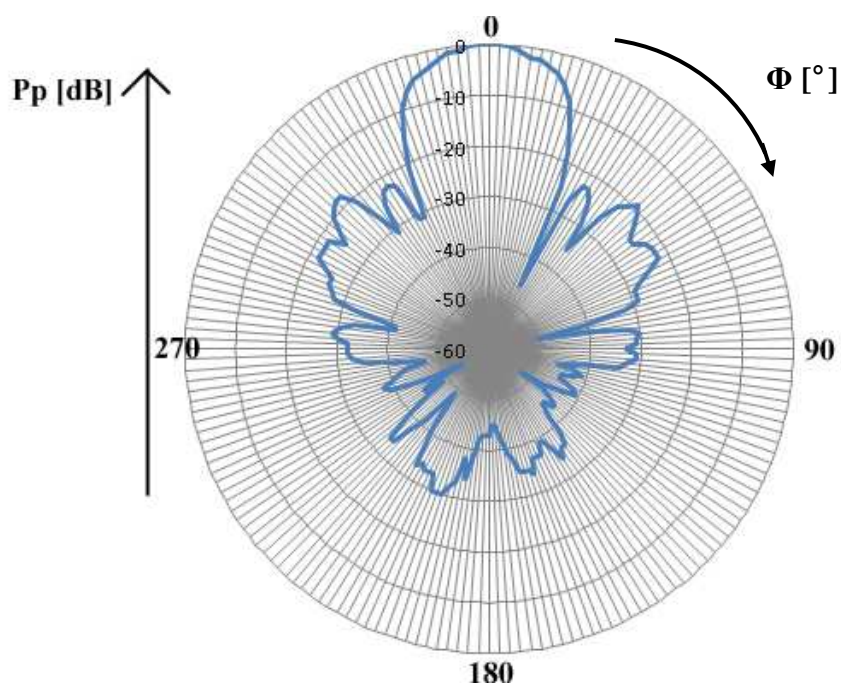
Obrázek 5 – Polární graf anténní charakteristiky (2,4GHz)



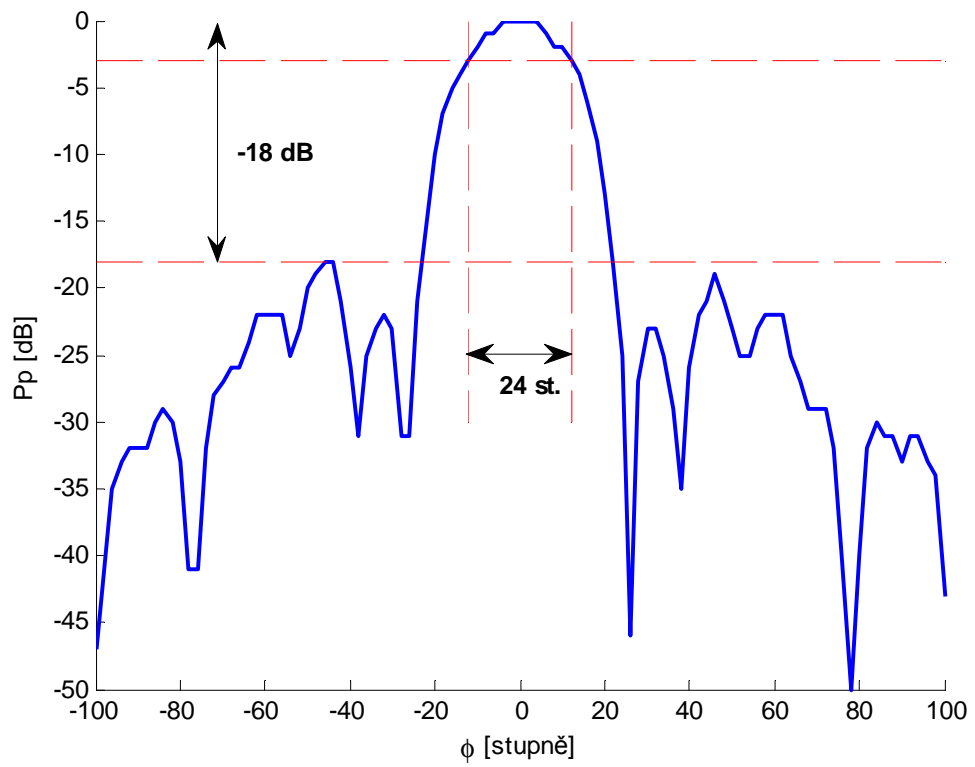
Obrázek 6 – Řez anténní charakteristikou ve směru azimutu (2,4 GHz)

2.4.2 Vyzařovací charakteristika antény – 5 GHz

Na následujícím obrázku (Obrázek 7) je vidět polární graf naměřené anténní charakteristiky a na dalším obrázku (Obrázek 8) je řez charakteristikou ve směru azimutu. Odstup postranních laloků byl zjištěn o -18 dB a šířka hlavního laloku Φ_{3dB} je 24° .



Obrázek 7 - Polární graf anténní charakteristiky (5 GHz)



Obrázek 8 - Řez anténní charakteristikou ve směru azimutu (5 GHz)

3 Šíření elektromagnetických vln

Teorie šíření elektromagnetických vln vychází obecně z Maxwellových rovnic. V kapitole 1 byly ukázány dvě důležité abstrakce elektromagnetické vlny a to v podobě rovinné a kulové vlny. Pokud je vysílací a přijímací stanice vzhledem k sobě v dostatečné vzdálenosti, můžeme předpokládat, že se vlna šíří jako kulová a tuto abstrakci využijeme u výkonových bilancí spojů.

Podle geometrického uspořádání spoje můžeme rozdělit elektromagnetické vlny do několika skupin. Vedle ionosférické a troposférické vlny existuje vlna tzv. přízemní, která je oblastí našeho zájmu. Pro ještě větší přiblížení rozdělíme přízemní vlnu na:

- přízemní povrchová vlna,
- přízemní prostorová vlna.

O přízemní povrchové vlně mluvíme tehdy, pokud je tzv. relativní elektrická výška přijímací a vysílací antény menší než $1/2$ [1]. V tomto případě se vlna šíří mezi částečně vodivou zemí a nevodivým vzduchem (rozhraní země – vzduch). Dochází k postupnému zakřivování dráhy paprsku a vliv atmosféry na útlum vlny je možné zanedbat, neboť ke ztrátám dochází v částečně vodivé zemi. Relativní elektrická výška je dána poměrem:

$$\frac{h}{\lambda}, \quad (3.1)$$

kde h je skutečná výška antén a λ je vlnová délka. Pokud mluvíme o vlnách ve frekvenčních pásmech 2,4 a 5 GHz, tedy o vlnových délkách 12,5 cm, resp. 6 cm, můžeme oblast našeho zájmu zúžit na tzv. přízemní prostorovou vlnu.

První možností šíření přízemní prostorové vlny je přímo mezi vysílací a přijímací anténou, pokud není přímá spojnice mezi anténami zastíněna. Takový spoj označujeme LOS (Line Of Sight). Druhý případ šíření je při zastínění této spojnice. Tento spoj označujeme NLOS (Non Line Of Sight). Vlna v tomto spoji determinuje s veškerými překážkami a dochází k jevům: odraz, ohyb rozptyl.

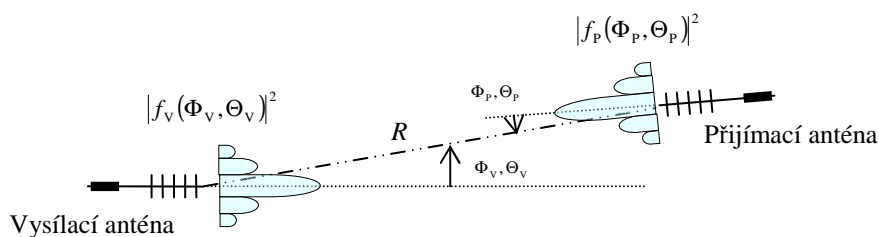
Základní rovnicí, která se běžně využívá pro výpočet výkonové bilance, rádiových komunikačních systémů je radiokomunikační rovnice.

3.1 Radiokomunikační rovnice

Radiokomunikační rovnice vyjadřuje vztah mezi vysílaným a přijímaným výkonem. Jak už bylo zmíněno, pro výpočet výkonové bilance spoje uvažujeme kulovou vlnu. Předpokládáme, že se vlna šíří bezztrátovým izotropním prostředím charakterizovaným parametry ε a μ . Vysílací anténa do takového prostředí vyzáří kulovou vlnu s hustotou výkonu (průměrná hustota výkonu):

$$S = \frac{P_V}{4 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (3.2)$$

kde P_V je vysílací výkon a R vzdálenost od antény. Pokud rovnici (3.2) vynásobíme ziskem vysílací antény G_V , dostaneme hustotu výkon ve směru maxima anténní charakteristiky. Ovšem skutečnost je taková, že antény bývají neideálně vůči sobě pootočený a neleží na stejné spojnici, jak je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 9):



Obrázek 9 – Vzájemné umístění antén

V takovém případě vysílací anténa nevyzařuje ve směru maxima vůči přijímací anténě, a proto je nutné rovnici násobit dále $|f_V(\Phi_V, \Theta_V)|^2$. Dostaneme tak hustotu výkonu vyzářenou do libovolného směru:

$$S = \frac{P_V}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot G_V \cdot |f_V(\Phi_V, \Theta_V)|^2. \quad (3.3)$$

Nyní, když známe hustotu výkonu ve vzdálenosti R , můžeme se ptát, jak velký výkon dostaneme do vstupního konektoru přijímače. Z kapitoly 2 již známe efektivní anténní plochu. Přijímaný výkon P_P potom můžeme vyjádřit:

$$P_P = S \cdot A_{\text{ef}_p} = S \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_P \cdot |f_V(\Phi_P, \Theta_P)|^2. \quad (3.4)$$

Pokud přijímací anténa nepřijímá ve směru maxima své anténní charakteristiky, musíme v rovnici (3.4) opět násobit $|f_p(\Phi_p, \Theta_p)|^2$. Po dosazení do rovnice (3.4) za hustotu výkonu S a následné úpravě dostaneme konečnou rovnici, tzv. radiokomunikační rovnici:

$$P_p = P_v \cdot G_v \cdot G_p \cdot |f_p(\Phi_p, \Theta_p)|^2 \cdot |f_v(\Phi_v, \Theta_v)|^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R} \right)^2. \quad (3.5)$$

Připomeňme, že se pohybujeme v bezeztrátovém prostředí a proto neuvažujeme ztráty ve smyslu poklesu výkonu v důsledku ztrátového prostředí. Pokud bychom měli být úplně přesní, museli bychom dále uvažovat tzv. polarizační ztráty, ztráty způsobené impedančním nepřizpůsobením, ztráty na anténních kabelech atd.

Pokud rovnici (3.5) ještě dále upravíme, dostaneme:

$$P_p = \frac{P_v \cdot G_v \cdot G_p \cdot |f_p(\Phi_p, \Theta_p)|^2 \cdot |f_v(\Phi_v, \Theta_v)|^2}{\underbrace{\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \right)^2}_{FSL}}. \quad (3.6)$$

V literatuře se často objevuje pojem ztráty volným prostorem, anglicky FSL (Free Space Loss) – v rovnici (3.6). Někdy se dále můžeme setkat s chybným označením útlum šířením. Obě označení jsou diskutabilní, protože kdy se energie ztrácí? Pokud se mění v něco jiného – teplo. V tomto případě FSL představuje vlnu, která diverguje, tzn., že se rozpíná a dochází k „ředění“ energie v prostoru při šíření kulové vlny.

Radiokomunikační rovnice se s výhodou používá v logaritmickém tvaru.

$$10 \cdot \log P_p = 10 \cdot \log P_v + G_v + G_p - 10 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \right)^2. \quad (3.7)$$

3.1.1 Radiokomunikační rovnice ve ztrátovém prostředí

Pokud nyní přejdeme od bezeztrátového prostředí ke ztrátovému, kdy se kulová vlna šíří mezi dvěma body bez vlivu terénu, musíme do radiokomunikační rovnice (3.7) přidat ztráty v důsledku ztrátového prostředí L . V rovnici (1.18) byl ukázán pokles amplitudy E v důsledku ztrát. Protože mluvíme o výkonu, můžeme výsledný vztah pro ztráty L v logaritmickém tvaru vyjádřit [2]:

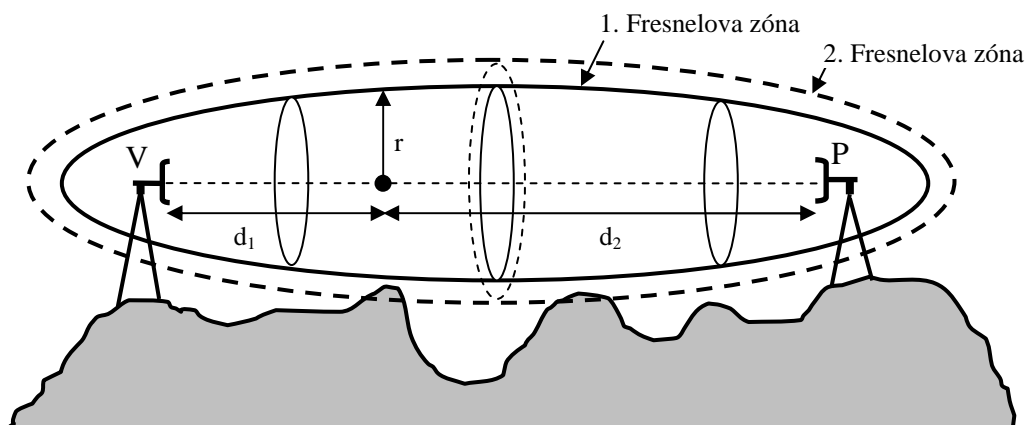
$$10 \cdot \log(e^{-2 \cdot \alpha \cdot R}) = 20 \cdot \alpha \cdot \log(e) \cdot R = 8,686 \cdot \alpha \cdot R \equiv L \cdot R \quad (3.8)$$

Vztah (3.8) je logaritmem úměrný délce. Exponenciální závislost se špatně počítá. Pokud použijeme logaritmy, jde o lineární závislost, tzn., když např. výkon klesne na 1 km o -3 dB, tak klesne o polovinu a na dalším 1 km opět o polovinu atd.

3.2 Fresnelovy zóny

Rádiový spoj na přímou viditelnost LOS označujeme tehdy, pokud přímá spojnice mezi vysílací a přijímací anténou není zastíněna nějakou překážkou.

Nyní si definujeme velice důležitý pojem – Fresnelovy zóny. Přenos elektromagnetické energie vlnou neprobíhá pouze po spojnici mezi vysílací a přijímací anténou, ale v určitém objemu, který má tvar rotačního elipsoidu, jak je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 10):



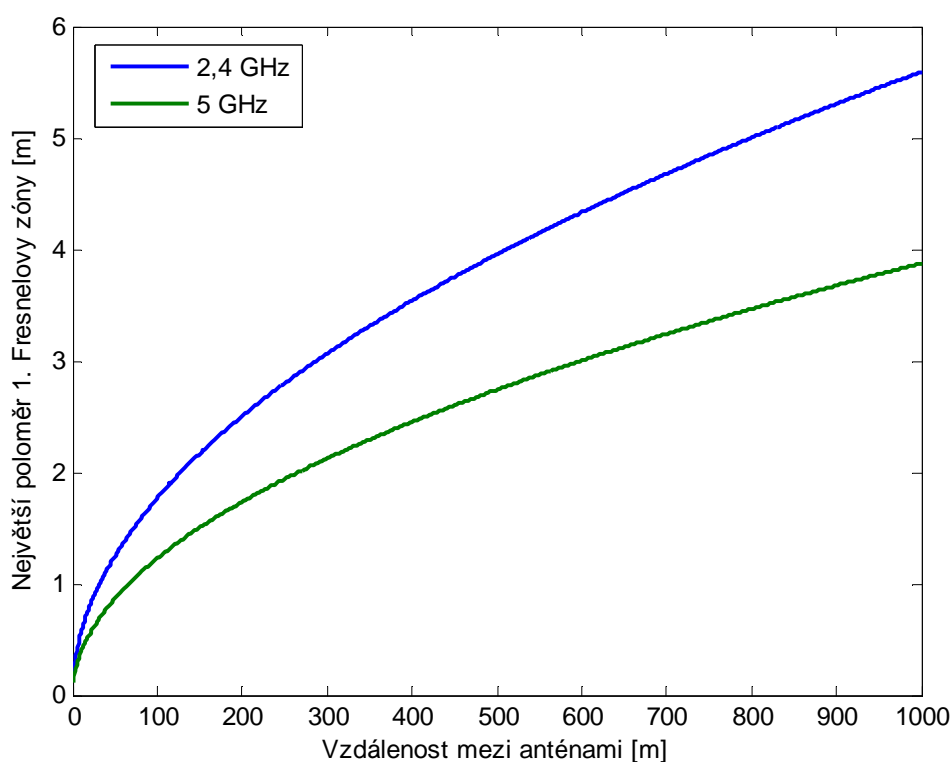
Obrázek 10 – Fresnelovy zóny

Těchto rotačních elipsoidů je teoreticky nekonečně mnoho. Pokud uděláme řez rotačních elipsoidů v rovině kolmé ke směru šíření, dostaneme soustředné kružnice označované jako Fresnelovy zóny. Na každé kružnici je stejná fáze vlny, ovšem každé dvě sousední kružnice jsou v protifázi. „Působení dvou sousedních Fresnelových zón se navzájem téměř ruší, přičemž tato kompenzace se projevuje tím více, čím vyšší je řádové číslo zóny. Výsledkem této kompenzace je, že vzájemné působení všech zón je rovnocenné záření, které je vytvořeno 60 % první Fresnelovy zóny.“ [5]

Pro spolehlivý přenos je tedy zapotřebí, aby žádné překážky neležely v 1. Fresnelově zóně. Poloměr r 1. Fresnelovy zóny v libovolné vzdálenosti d_1 (Obrázek 10) od vysílací antény lze vypočítat:

$$r = \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot \lambda}{d_1 + d_2}}. \quad (3.9)$$

Na následujícím obrázku (Obrázek 11) jsou následně vidět poloměry 1. Fresnelovy zóny ve středech celkových vzdáleností mezi vysílací a přijímací anténou pro frekvenční pásma 2,4 a 5 GHz.

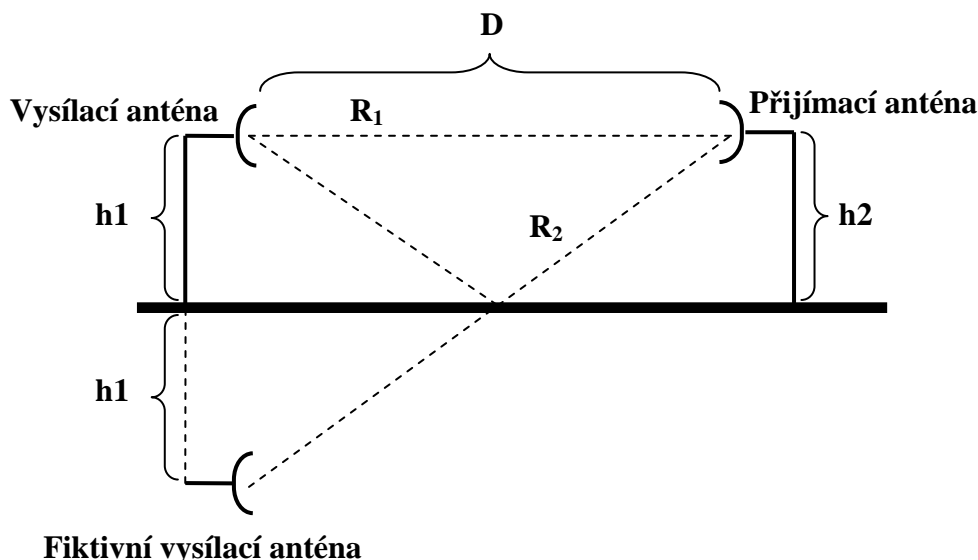


Obrázek 11 – Poloměr Fresnelovy zóny (2,4 a 5 GHz)

V ideálním případě (krátký úsek ve vzduchu bez vlivu okolního terénu) můžeme používat pro výpočty výkonové bilance spoje radiokomunikační rovnici (3.7) s přidáním ztrát L . V případě blízkosti okolního terénu a zastínění 1. Fresnelovy zóny, nelze vztah (3.7) použít jednoznačně.

3.3 Šíření elektromagnetických vln nad rovinnou zemí

Typickým příkladem šíření přízemní prostorové vlny je šíření nad rovinnou zemí, kdy neuvažujeme žádné překážky, zástavbu nebo terénní nerovnosti. V takovém případě se na přijímací anténě sčítá vlna přímá a vlna odražená. Takovou situaci dokážeme řešit pomocí geometrické optiky, kdy k vysílací anténě doplníme fiktivní vysílací anténu, jak je vidět na obrázku (Obrázek 12).



Obrázek 12 – Šíření vlny nad rovinnou zemí

Při součtu obou vln je rozhodující jejich fázový rozdíl. Pokud je vzdálenost D mezi vysílací a přijímací anténou mnohonásobně větší než výšky obou antén h_1, h_2 , můžeme dráhy přímé a odražené vlny R_1, R_2 vyjádřit pomocí Pythagorovy věty:

$$R_1 = \sqrt{D^2 + (h_1 - h_2)^2} = d \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{D}\right)^2} \cong d + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2 \cdot D}, \quad (3.10)$$

$$R_2 = \sqrt{D^2 + (h_1 + h_2)^2} = d \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h_1 + h_2}{D}\right)^2} \cong d + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2 \cdot D}. \quad (3.11)$$

Rozdíl obou drah je pak dán:

$$\Delta R = R_2 - R_1 \cong \frac{2 \cdot h_1 \cdot h_2}{D}. \quad (3.12)$$

Fázový rozdíl obou vln můžeme vyjádřit:

$$\Delta\Phi = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R = \frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot D}. \quad (3.13)$$

Výsledný fázor intenzity elektrického pole E na přijímací anténě je:

$$E = E_{\text{přím}} + E_{\text{odražená}} = \frac{E_0}{R_1} \cdot e^{-jk \cdot R_1} + \frac{E_0}{R_2} \cdot e^{-jk \cdot R_2} \cdot R \cdot e^{-j\Psi}, \quad (3.14)$$

kde E_0 je počáteční amplituda v místě vysílací antény, k je vlnový vektor a $R \cdot e^{-j\Psi}$ je tzv. komplexní činitel odrazu od země [5]. Řekněme, že budeme považovat amplitudy obou vln za shodné:

$$E_1 = \frac{E_0}{R_1} = \frac{E_0}{R_2}. \quad (3.15)$$

Následným dosazením z rovnice (3.15) do rovnice (3.14) a úpravou dostaneme výslednou intenzitu elektrického pole v místě přijímací antény:

$$\begin{aligned} E &= E_1 \cdot \left| 1 + e^{-j\Delta\Phi} \cdot R \cdot e^{-j\Psi} \right| = \\ &= E_1 \cdot \left| 1 + R \cdot \cos(\Psi + \Delta\Phi) - jR \cdot \sin(\Psi + \Delta\Phi) \right| = \\ &= E_1 \cdot \sqrt{[1 + R \cdot \cos(\Psi + \Delta\Phi)]^2 + [R \cdot \sin(\Psi + \Delta\Phi)]^2} = \\ &= E_1 \cdot \underbrace{\sqrt{1 + R^2 + 2 \cdot R \cdot \cos\left(\Psi + \frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot D}\right)}}_F \end{aligned} \quad (3.16)$$

V rovnici (3.16) je část označena jako F . Jedná se o tzv. *činitel tlumení*, který vyjadřuje poměr přijímané intenzity elektrického pole k intenzitě vypočítané pro případ šíření ve volném prostoru. Úroveň přijatého signálu se mění s činitelem tlumení. Pokud budeme z dostatečné vzdálenosti přibližovat přijímací anténu k vysílací anténě, bude úroveň signálu nejříve monotónně narůstat a pak oscilovat mezi oblými maximy a ostrými minimy. Tyto interferenční jevy se budou stále rychleji opakovat s přibližováním se k vysílací anténě. Je to způsobeno rychlejší změnou ΔR [6].

Často nás můžou zajímat místa, kde dochází k výraznému potlačení úrovně přijatého signálu (výkonu), tedy kde nastávají minima. Z rovnice (3.16), resp. z činitele tlumení, můžeme určit polohu minim v [m] od vysílací antény:

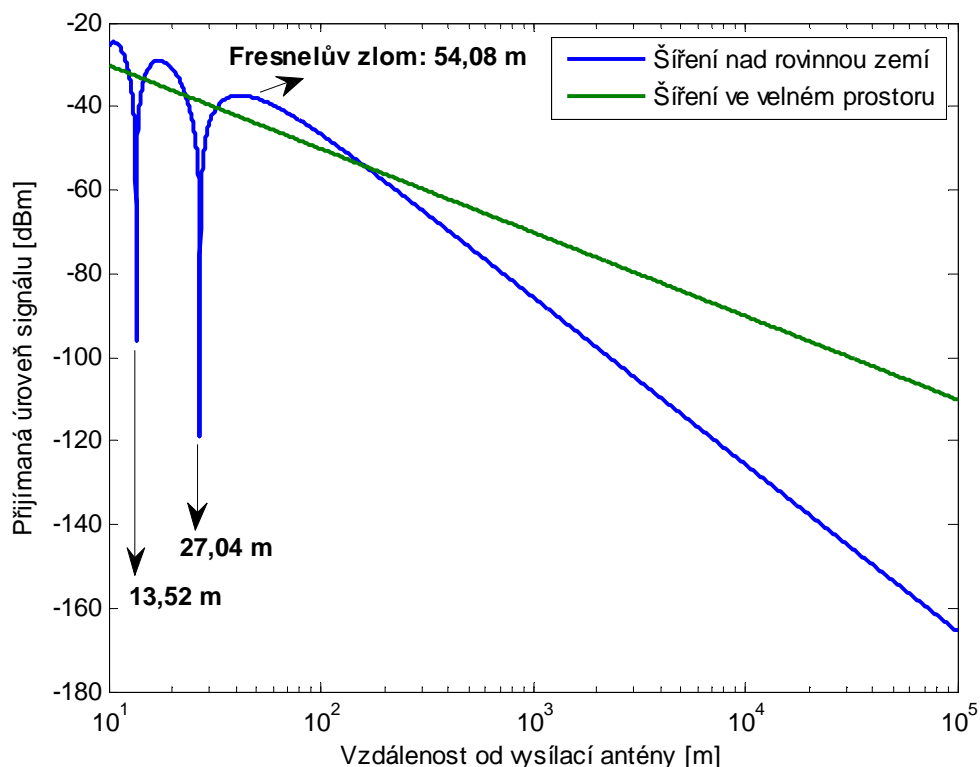
$$D_{\min} = \frac{2 \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot (1 + n)}; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.17)$$

Pokud provedeme zjednodušení v tom smyslu, že pro dobře vodivou zem a pro velmi malé elevační úhly budeme počítat s činitelem odrazu (pro vertikální i horizontální polarizaci): $R = 1$ a $\Psi = \pi$, potom dostaneme:

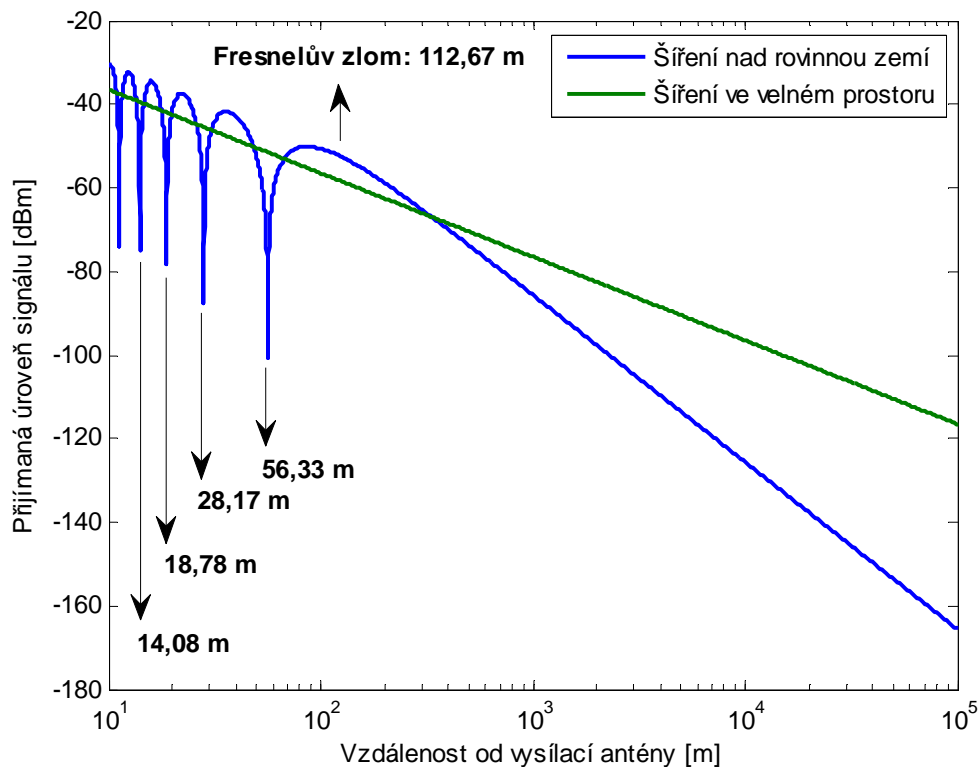
$$E = E_1 \cdot \sqrt{2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot D}\right)} = E_1 \cdot 2 \cdot \left| \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot D}\right) \right| = E_1 \cdot F . \quad (3.18)$$

Pokud je přijímací anténa v dostatečné vzdálenosti od vysílací antény, můžeme funkci sinus v rovnici (3.18) nahradit jejím argumentem a intenzita elektrického pole bude klesat s druhou mocninou vzdálenosti a přijímaný výkon se čtvrtou mocninou vzdálenosti.

Nyní bude uveden příklad. Pro ilustraci budeme předpokládat, že vysílací a přijímací antény jsou ve výšce 1,3 m nad zemí. Předpokládáme frekvenci signálu 2,4 a 5 GHz. Po aplikaci vztahu (3.18) dostaneme spádové křivky při šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí. Výsledek simulace je vidět na následujících obrázcích. Pro frekvenci 2,4 GHz: (Obrázek 13). Pro frekvenci 5 GHz: (Obrázek 14).



Obrázek 13 – Spádová křivka při šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí (2,4 GHz)



Obrázek 14 - Spádová křivka při šíření prostorové vlny nad rovinnou zemí (5 GHz)

Na obrázcích (Obrázek 13, Obrázek 14) je vidět, že až do maxima nejvzdálenějšího od vysílací antény má spádová křivka přibližně stejný charakter jako ve volném prostoru a klesá -20 dB na dekádu. Pro větší vzdálenosti klesá rychleji a to -40 dB na dekádu (platí pro ideálně odrazivou zem). Zlom, kdy spádová křivka při šíření nad rovinnou zemí začne klesat rychleji, se nazývá Fresnelův zlom a jeho vzdálenost vypočítáme:

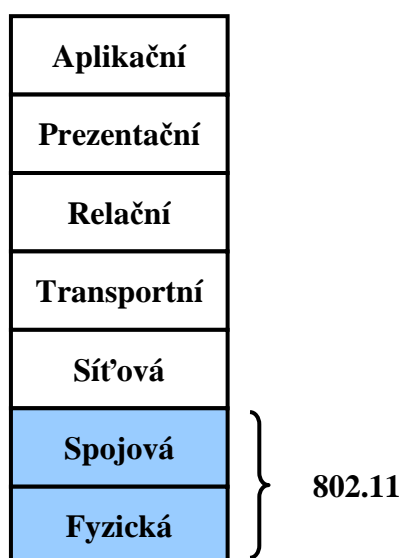
$$D_0 = \frac{4 \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda} . \quad (3.19)$$

Jde o vzdálenost, při které je dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku roven polovině vlnové délky [5]. Dále je v obrázcích vyznačeno, v jaké vzdálenosti od vysílací antény nastávají výrazné poklesy úrovně přijatého signálu.

4 Bezdrátové spoje standardu 802.11

Pro účely měření přenosových charakteristik v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz byl vybrán standard pro bezdrátové lokální sítě WLAN označovaný jako IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Původní verze standardu byla navržena v roce 1997 a dodnes se dočkala několika rozšíření. Přehled všech revizí je možné nalézt v příslušných normách a doporučeních. V dnešní době jsou nejpoužívanější revize 802.11a, 802.11b, 802.11g. Mezi běžnými uživateli je standard 802.11 poněkud chybně vžitý pod názvem WiFi (Wireless Fidelity). WiFi je pouze označení, které uděluje organizace Wifi Alliance těm produktům, které vyhovují standardům 802.11 a splňují požadavky na vzájemnou kompatibilitu.

Každý počítač nebo síťové zařízení, které má být připojeno v počítačové síti, se musí řídit určitými protokoly, resp. soustavou síťových protokolů. Komunikace mezi síťovými zařízeními je rozdělena do několika nezávislých vrstev. Kolik takových vrstev je, záleží na použité soustavě síťových protokolů. Lze se také setkat s označením síťový model, namísto soustavy síťových protokolů. Nejčastěji se můžeme setkat s modelem TCP/IP (soustava protokolů TCP/IP), který je použit v internetu a má čtyři vrstvy. Ještě více vrstev má model ISO OSI (Obrázek 15) [7].



Obrázek 15 – Model ISO OSI

Z obrázku (Obrázek 15) je vidět, že standard 802.11 definuje pouze dvě vrstvy: spojovou a fyzickou. Dále bude popsána pouze fyzická vrstva.

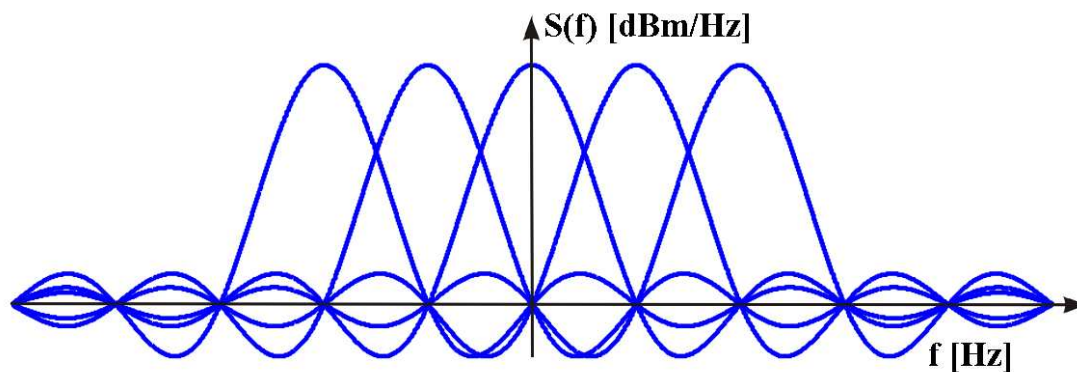
4.1 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva definuje rádiové rozhraní mezi síťovými zařízeními a způsob přenosu rádiových vln mezi nimi. Původní standard 802.11 definoval přenos i pomocí infračervených vln. To se ale příliš nerozšířilo díky špatným přenosovým vlastnostem infračerveného záření.

Dnes se v nejvíce rozšířených standardech používají přenosové mechanismy DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a OFDM (Orthogonally Frequency Division Multiplex).

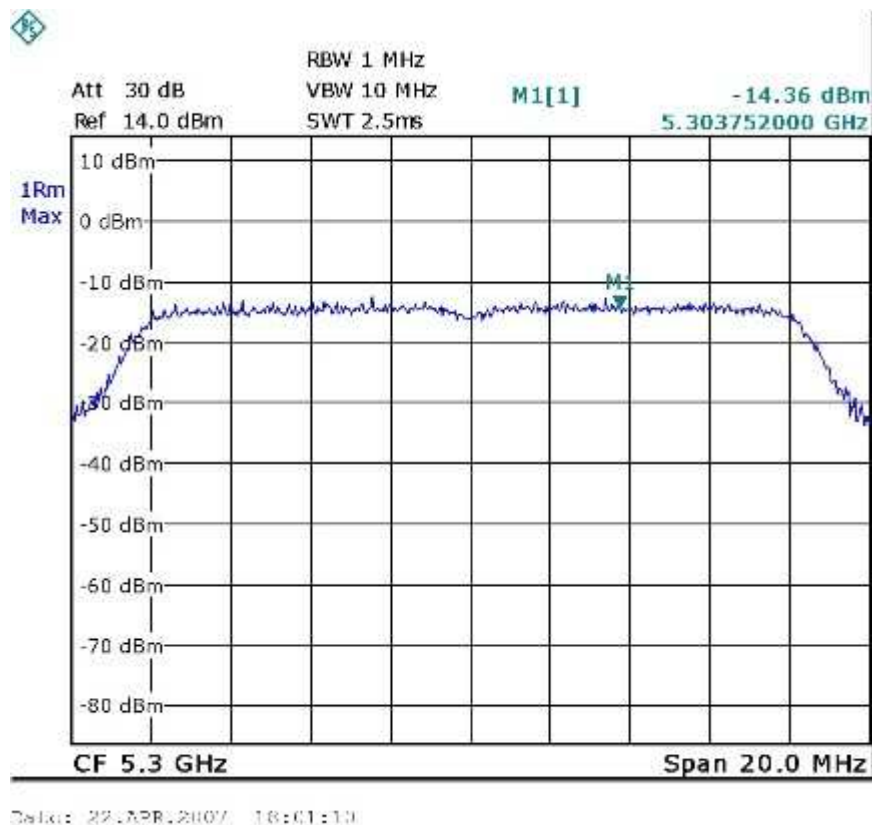
4.1.1 Ortogonální frekvenční multiplex OFDM

Ortogonální frekvenční multiplex neboli technika OFDM, patří do obecnější třídy modulací s více nosnými (Multi-Carrier Modulation). OFDM lze chápat jako řadu jednotlivých modulací, které jsou vedle sebe „naskládány“ v určitém kmitočtovém pásmu tvořeného řadou jednotlivých subnosných. Jednotlivé subnosné jsou vzájemně ortogonální, takže maximum každé subnosné se překrývá s průchody nulou ostatních subnosných [8]. Ukázka je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 16).



Obrázek 16 – Částečný překryv subnosných u OFDM

Ukázka obálky skutečného spektra naměřeného na spektrálním analyzátoru je vidět na dalším obrázku (Obrázek 17).



Obrázek 17 – OFDM spektrum ze spektrálního analyzátoru [9]

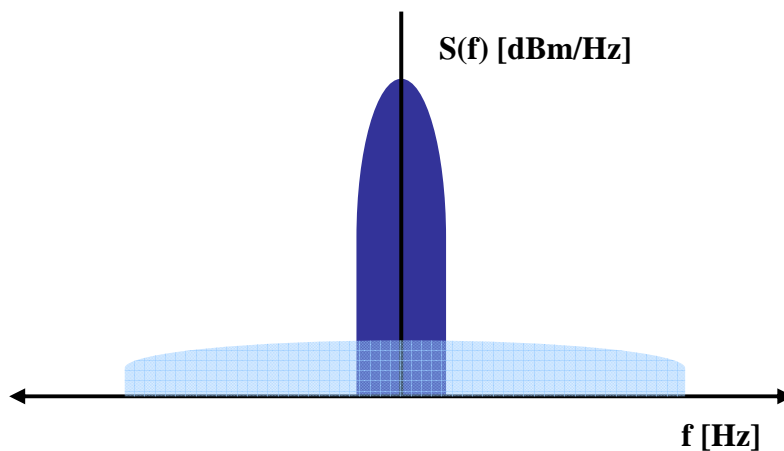
„*Systém OFDM je založen na převodu vstupního vysokorychlostního sériového datového toku na řadu pomalejších paralelních datových toků. Ty jsou poté modulovány na řadu sub-nosných vln a přenášeny k přijímači. Tam se opačným postupem demodulují a převádí na vysokorychlostní sériový signál.*“ [10]

Výhodou OFDM je vysoká spektrální účinnost, odolnost proti interferencím, které jsou způsobeny vícecestným šířením signálu.

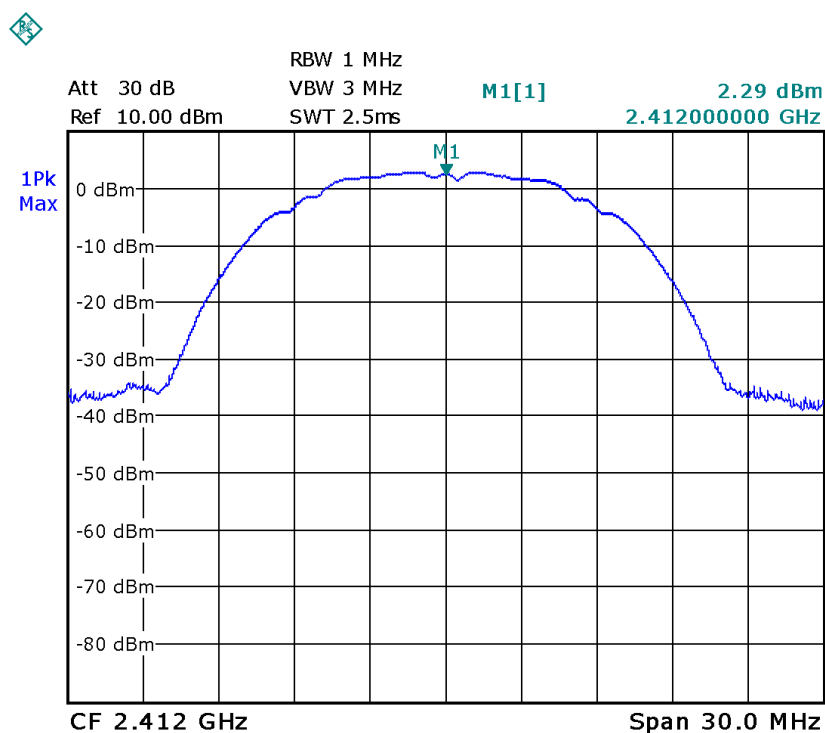
4.1.2 Přímé rozprostřené spektrum DSSS

Systém DSSS přidává do přenášených dat redundantní informace. Tzn., že každý bit uživatelských dat je nahrazen sekvencí bitů (pseudonáhodným kódem) a takto nahrazená data jsou modulována na nosnou vlnu. Pseudonáhodný kód se nazývá rozprostírací posloupnost a bity této posloupnosti se nazývají čipy. Tímto je tedy signál při přenosu rozprostřen do větší části spektra a je méně náchylný na rušení a jeví se jako šum. Na straně přijímače je tedy zapotřebí znát onu pseudonáhodnou sekvenci bitů a probíhají inverzní operace proti operacím na straně vysílače [10], [11]. Na obrázku (Obrázek 18) je ukázán princip rozprostření spektra. V laboratoři

bylo pak spektrum změřeno pomocí spektrálního analyzátoru na frekvenci, která byla použita pro měření přenosových charakteristik spojů (Obrázek 19).



Obrázek 18 – Rozprostřené spektrum – princip

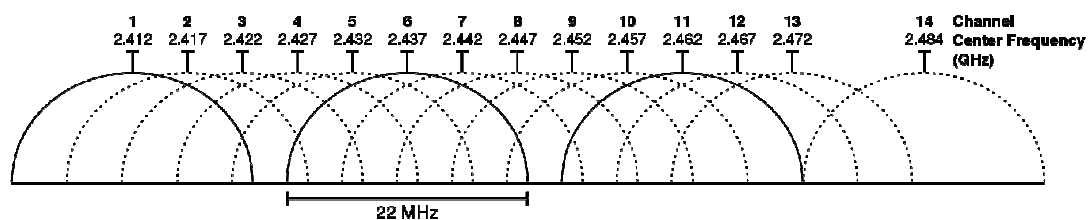


Obrázek 19 – DSSS spektrum ze spektrálního analyzátoru

4.2 Standard 802.11b

Český telekomunikační úřad (ČTU) vyhradil pro standard 802.11b frekvenční pásmo v rozmezí 2400 MHz až 2483,5 MHz [12]. V tomto pásmu je definováno

13 kanálů o šířce 22 MHz. Středů jednotlivých kanálů jsou od sebe vzdáleny 5 MHz. Ilustrace celého pásma je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 20).



Obrázek 20 – Kanály v pásmu 2,4 GHz [13]

„Z obrázku je patrné, že v celém pásmu 2,4 GHz se nacházejí pouze tři nepřekrývající se kanály. Maximální povolený vyzářený výkon (EIRP) celého vysílacího řetězce (vysílač + anténní svod + anténa) je maximálně 100 mW (20 dBm).“ [9]

V následující tabulce (Tabulka 3) jsou shrnuty základní vlastnosti standardu 802.11b na fyzické vrstvě. Tzn., nominální přenosové rychlosti s použitým typem modulace a přenosovým mechanismem.

Tabulka 3 – Základní vlastnosti 802.11b

Přenosový mechanismus	Nominální přenosová rychlost [Mbit/s]	Modulace
HR-DSSS	1	DBPSK
HR-DSSS	2	DBPSK
HR-DSSS	5,5	CCK QPSK
HR-DSSS	11	CCK QPSK

4.3 Standard 802.11g

Standard 802.11g je rozšířením předešlého standardu 802.11b. Používá stejné frekvenční pásmo, ale je použit jiný přenosový mechanismus (OFDM) a jiné typy modulací. Tím je možné dosáhnout vyšších nominálních přenosových rychlostí. Přenosový mechanismus a typy modulací jsou shodné s dále popisovaným standardem 802.11a (Tabulka 5). Oba standardy (802.11b a 802.11g) jsou kompatibilní. V případě potřeby (při slabém signálu) je možné „přepnout“ ze standardu 802.11g na standard 802.11b.

4.4 Standard 802.11a

Standard 802.11a narozdíl od předešlých dvou standardů využívá pásmo 5GHz. Podle [12] je toto pásmo rozděleno do 3 subpásem. Šířka jednoho kanálu je 20 MHz. Kmitočtové rozsahy jsou vidět v tabulce.

Tabulka 4 – Kmitočtová pásma 802.11a

1. subpásmo 802.11a	5150 MHz – 5250 MHz
2. subpásmo 802.11a	5250 MHz – 5350 MHz
3. subpásmo 802.11a	5470 MHz – 5725 MHz

Každé ze tří subpásem má určitá omezení co do velikosti maximálního vysílaného výkonu a místem použití:

- 1. subpásmo lze použít pouze uvnitř budov nebo v dalších uzavřených objektech (letadla, vlaky), kde se předpokládá dostatečný útlum stíněním tak, aby provoz nerušil jiné služby vně objektu. Maximální povolený vyzářený výkon je 200mW (23 dBm).
- 2. subpásmo lze opět použít pouze uvnitř budov a maximální povolený vyzářený výkon je také 200 mW. V tomto subpásmu je navíc omezení, že stanice musí být vybaveny automatickou regulací výkonu, která průměrně poskytuje činitel potlačení rušení alespoň 3 dB oproti maximálnímu povolenému výstupnímu výkonu. Pokud stanice neobsahuje automatickou regulaci výkonu, snižuje se maximální povolený vyzářený výkon o 3 dB, tedy na 100 mW (20 dBm).
- 3. subpásmo lze použít uvnitř budov i ve volném prostředí. Maximální povolený vyzářený výkon je 1 W (30 dBm). Pokud stanice neobsahuje automatickou regulaci výkonu, snižuje se povolený vyzářený výkon na 0,5 W (27 dBm).

V následující tabulce (Tabulka 5) jsou shrnuty základní vlastnosti standardu 802.11a.

Tabulka 5 – Základní vlastnosti 802.11a

Přenosový mechanismus	Nominální přenosová rychlost [Mbit/s]	Modulace
OFDM	6	BPSK
OFDM	9	BPSK
OFDM	12	QPSK
OFDM	18	QPSK
OFDM	24	16-QAM
OFDM	36	16-QAM
OFDM	48	64-QAM
OFDM	54	64-QAM

5 Vybrané přenosové charakteristiky bezdrátových spojů

Od každého bezdrátového spoje standardu 802.11 nebo obecně od rádiového komunikačního systému sloužícího pro přenos zpráv jeho uživatel očekává především spolehlivost. Aby byl systém spolehlivý, musí se před jeho nasazením ověřit měřením základní, řekněme kvalitativní, přenosové charakteristiky nebo je popřípadě predikovat výpočtem, modelováním nebo simulací ve speciálním softwaru. Protože pracujeme se standardem 802.11, budou některé charakteristiky vysvětleny ve vztahu k němu.

5.1 Přijímaný výkon signálu

Přijímaný výkon signálu, který se dostane z antény do vstupního konektoru přijímače, je základní charakteristikou spoje. U bezdrátových spojů se většinou setkáváme s označením RSSI (Received Signal Strength Indicator) neboli naměřeným výkonem signálu [14]. Přijímaný výkon můžeme měřit několika prostředky. Typické a nejpřesnější měření je pomocí spektrálního analyzátoru. Další možností je použít přímo zařízení, které je použito pro realizaci spoje a do něhož jeho výrobce většinou možnost měřit RSSI implementuje. Přesnost je však často diskutabilní.

Samozřejmě je možné hodnotu RSSI v případě přímé optické viditelnosti mezi anténami přijímače a vysílače predikovat výpočtem tak, jak bylo ukázáno v kapitole 3. Problém nastává, pokud je bezdrátový spoj umístěn v budově nebo v městské zástavbě, kde není přímá optická viditelnost většinou zajištěna. V tomto stále se měnícím prostředí (pohybující se lidé, automobily atd.) je výpočet RSSI prakticky neřešitelná úloha, protože se zde uplatňují všechny typy interakcí vlny s překážkami, jako jsou odraz, ohyb, rozptyl. Proto se v praxi využívají více či méně přesné modely šíření signálu k predikci prostorového rozložení úrovně signálu. Výběr modelu je závislý samozřejmě na typu prostředí, ve kterém se signál šíří, ale také na určitém kompromisu mezi přesností modelu a náročností požadavků na vstupní data a složitost výpočtu [15].

5.1.1 Empirický model – One-Slope

Význam slova empirie (z řeckého slova *empeiros*) se dá volně vyložit jako zkušenost získaná pozorováním. Intuitivně je tedy empirický model založen na experimentálních opakovatelných měřeních. Jedná se o nejjednodušší model, kdy pro jeho použití předpokládáme, že RSSI klesá úměrně s n -tou mocninou vzdálenosti od vysílače $1/d^n$. Výhodou tohoto jednoduchého modelu je velice rychlý výpočet a žádné požadavky na vstupní data (geometrie objektu, použité materiály atd.). Z této výhody se do jisté míry stává nevýhoda, protože přesnost nebývá vždy nejlepší. Závisí zejména na parametrech získaných z měření za daných podmínek a v daném typu prostředí. Potom jsou empirické parametry omezeny právě na dané podmínky. Musíme si uvědomit, že podmínky měření se můžou měnit - pohyb osob v budovách, otevřené nebo zavřené dveře, rozmístění vybavení interiéru apod. Stejně tak model platí pouze pro vybrané frekvenční pásmo a umístění antén.

One-slope model je implementací základního empirického modelu. Výpočet tohoto modelu se provede následovně:

$$L(d) = L_1 + 10 \cdot \log(d^n), \quad (5.1)$$

kde:

- $L(d)$ je predikovaná hodnota ztrát šířením [dB],
- d je vzdálenost [m] mezi vysílačem a místem pozorování,
- L_1 je referenční hodnota ztrát [dB] pro vzdálenost 1 m,
- n je spádový koeficient (koeficient útlumu).

Model pro ztráty můžeme vyjádřit i jako model pro přijímaný výkon (hodnoty výkonů jsou v [dB]):

$$P_p(d) = P_1(d_1) + 10 \cdot \log(d^{-n}). \quad (5.2)$$

Vstupními parametry modelu jsou tedy pouze L_1 resp. P_1 a n . Tyto parametry bývají také tabelovány pro různé druhy prostředí. Hlavním předpokladem přesného použití tohoto empirického modelu je správný výběr parametrů. Ideálně se tyto parametry získají z experimentálních měření v daném typu prostředí.

5.2 Chybovost bezdrátového spoje

Pojem chybovost bezdrátového spoje není jednoznačný. V rádiových komunikačních systémech se většinou pod pojmem chybovost uvádí „bitová chybovost“ BER (Bit Error Rate). Je to informace o poměru chybně doručených bitů ku správně doručeným bitům v určitém časovém intervalu. K chybám dochází při demodulaci signálu, kdy jsou špatně vyhodnoceny vyslaná data, resp. modulační funkce. Analogicky pak chyby nastávají v přenášených paketech, tzn., že můžeme vyhodnocovat paketovou chybovost PER (Paket Error Rate) atd.

Dobře měřitelným parametrem chybovosti spoje je propustnost (přenosová rychlost).

5.2.1 Propustnost (Throughput)

Každá z revizí standardu 802.11 nabízí určité maximální nominální přenosové rychlosti dat, které odpovídají různým modulacím, jak bylo ukázáno v kapitole 4. Ovšem nejedná se pouze o uživatelská data, ale i o režijní data. Tzn., že teoretická rychlost přenosu uživatelských dat je mnohem nižší a reálná přenosová rychlost je ještě nižší, neboť na signál působí mnoho rušivých vlivů, které přenos zpomalují. Množství uživatelských dat (počet bitů) přenesených z jednoho bodu do druhého za jednotku času budeme dále označovat jako propustnost (throughput).

Teoretická maximální propustnost 802.11 závisí na mnoha parametrech podle koncepce bezdrátové sítě nebo spoje. Záleží například na velikosti přenášených paketů, na jejich typu - UDP, TCP, na přístupovém mechanismu ke stanici v síti, atd. Výpočtem maximální teoretické propustnosti TMT (Theoretical Maximum Throughput) se zabývá mnoho prací, např. [16]. Ideální by bylo, pokud by spoj dosahoval vždy teoretické rychlosti. Pak bychom mohli konstatovat, že je chybovost spoje nulová. Prakticky se při ideálních podmínkách k této hodnotě blížíme.

Reálná propustnost dosažitelná na daném spoji závisí na typu použité miniPCI wifi karty. Každá bezdrátová karta má jinou, výrobcem udávanou, citlivost (přijatý výkon v dBm), kdy je ještě schopna přijímaný signál zpracovat (většinou jsou si ale hodnoty velice podobné). S citlivostí karty tedy souvisí závislost propustnosti na přijímaném výkonu a odstupu signálu od šumu (SNR). Dalším výrazným faktorem ovlivňující propustnost je rušení z jiných služeb nebo bezdrátových sítí (spojů) standardu 802.11.

6 Měření přenosových charakteristik

Bezdrátové spoje pro měření přenosových charakteristik uvnitř budovy, (v obou pásmech 2,4 a 5GHz), byly umístěny na několika místech Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Jednak se využívaly spoje speciálně sestavené pro účely měření a dále pak byla využita naměřená data studenta J. Kubánka, který pro potřeby své diplomové práce měřil přijímaný výkon z přístupových bodů (školní wifi sítě) v závislosti na vzdálenosti, pomocí přenosného počítače PDA a programem WifiLocator, jehož je autorem [17]. Pro měření chybovosti byl vybrán pouze standard 802.11a, a měření probíhalo v prostorách laboratoře Univerzity Pardubice, kdy se vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem simulovalo pomocí attenuátoru.

Bezdrátové spoje pro venkovní prostředí, v obou pásmech, byly experimentálně sestaveny ve volném prostoru bez vlivu okolního terénu na šířící se signál.

Dále byl pro venkovní prostředí sestaven bezdrátový spoj v pásmu 5 GHz na hoře Milešovka s nadmořskou výškou 836,6 m.n.m. Milešovka je nejvyšší hora Českého středohoří, má kuželovitý tvar a převyšuje ostatní hory ve svém okolí. Jde o největrnější místo v České republice s průměrnou rychlostí větru 30,5 km/h (bezvětrí zde bývá v průměru pouze 8 dní v roce), nejčastěji se vyskytujícími bouřemi a častými mlhami [18]. Není proto náhodou, že na jejím vrcholu je Meteorologická observatoř Milešovka, která spadá pod Ústav fyziky atmosféry AV ČR se sídlem v Praze 4. Meteorologická data, která se dlouhodobě zaznamenávají na Milešovce, budou využita k posouzení vlivu atmosférických jevů (deště) na šíření elektromagnetických vln v pásmu 5 GHz.

Původním záměrem bylo otestovat bezdrátový spoj i v pásmu 10 GHz. Od začátku práce mu byla věnována velká pozornost, nicméně použité řešení se nakonec ukázalo jako nevyhovující.

6.1 Použitý hardware

Pro potřeby měření přenosových charakteristik bylo potřeba vybrat takové zařízení (systém), které by mělo širokou škálu potřebných nastavení parametrů a zároveň jednoduché vyčítání naměřených hodnot. Použité antény jsou stejné jako v případě měření anténních charakteristik v kapitole 2.

6.1.1 Routerboard

V tuzemsku, mezi poskytovateli internetového připojení založených na standardu 802.11, jsou velice rozšířeny produkty Litevské společnosti Mikrotik, která se zaměřuje na vývoj síťových prvků pro bezdrátový přenos dat. Tyto prvky nesou označení RouterBoard. Jedná se o systémy, jež jsou řízeny linuxovým operačním systémem Mikrotik RouterOS. Komunikace s tímto operačním systémem (nastavování parametrů) se provádí přes grafické uživatelské rozhraní GUI Winbox (pro systémy Windows), telnet, ssh, sériovou linku (RS-232). RouterBoard spolu s RouterOS tvoří robustní platformu, která může být nasazena jako přístupový bod AP (Access Point), klient, bridge, router, firewall atd. RouterBoardů je na trhu velké množství. Liší se samozřejmě ve výkonnosti zvoleným typem procesoru, vnitřní paměti RAM, počtem ethernetových portů, rozšiřujících slotů atd. Pro sestavení bezdrátových spojů byl vybrán RouterBoard RB 411 (Obrázek 21).



Obrázek 21 – RouterBoard RB 411

Základní vlastnosti RouterBoardu RB 411 jsou shrnuty v následující tabulce (Tabulka 6):

Tabulka 6 – Vlastnosti RouterBoardu RB 411

Procesor	Atheros AR7100 300 MHz
RAM	32 MB DDR
LAN port	1 × 10/100 Mbit/s
Sloty	1 × miniPCI
I/O ovládání	1 × serial port RS-232C
Napájení	Jack; PoE: 12 - 28V; Jack: 9 - 28V
Rozměry	105 × 105 mm
Provozní teplota	-30 až 60 °C

6.1.2 Mini PCI karta

RouterBoard RB 411 byl osazen miniPCI wifi kartou WNC CM9 (Obrázek 22).



Obrázek 22 – miniPCI wifi karta WNC CM9

U karty nás zajímá hlavně citlivost, která určuje hranici přijatého výkonu signálu, kdy ještě karta dokáže zpracovat signál při určité nastavené přenosové rychlosti. Pokud přijatý výkon klesne pod citlivost karty, dojde k výpadku spojení mezi vysílačem a přijímačem. V následující tabulce (Tabulka 7) jsou uvedeny citlivosti karty pro různé nominální přenosové rychlosti standardů, které uvádí výrobce karty.

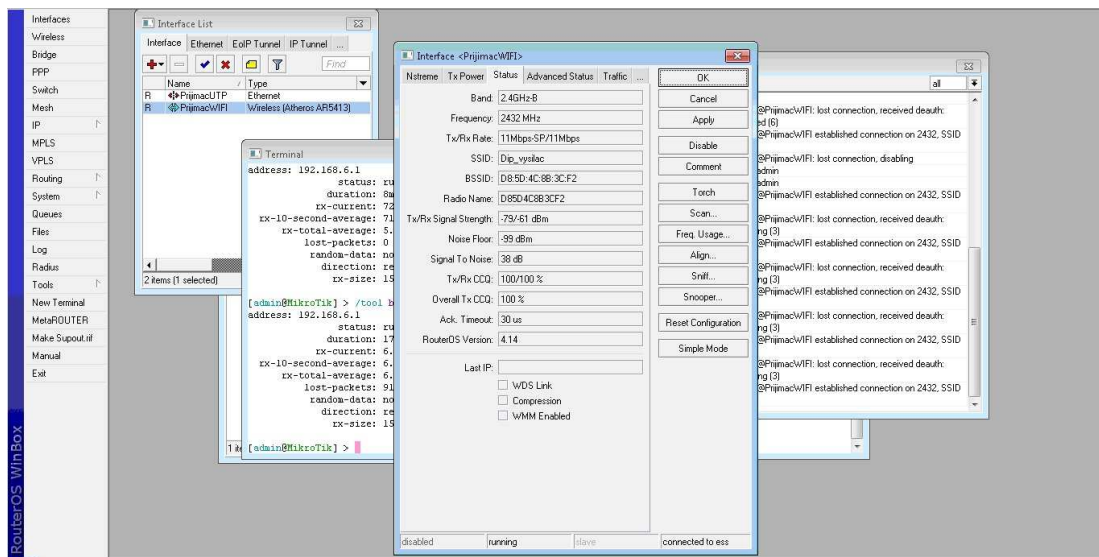
Tabulka 7 – Citlivost miniPCI wifi karty WNC CM9

802.11a – 54 Mbit/s	-67 dBm
802.11a – 6 Mbit/s	-87 dBm
802.11b – 11 Mbit/s	-87 dBm
802.11b – 1Mbit/s	-94 dBm
802.11g – 54 Mbit/s	-70 dBm
802.11g – 6 Mbit/s	-87 dBm

6.2 Návrh metodiky měření a systém zpracování výsledků

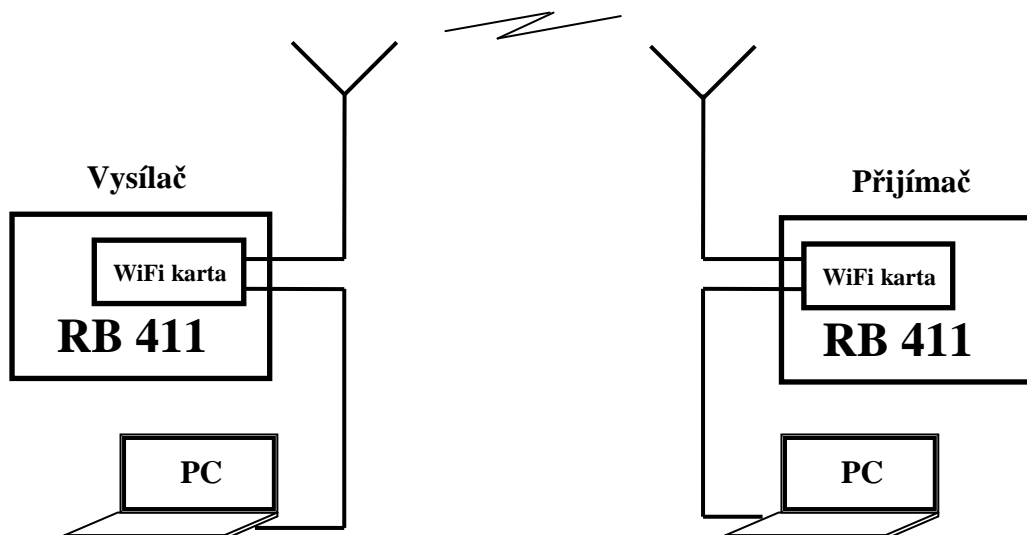
Vysílací i přijímací strana bezdrátového spoje je sestavena z totožného hardwaru (RouterBoard RB 411, miniPCI wifi karta WNC CM9). Na vysílači je spuštěn DHCP server, který automaticky (v případě dostupnosti) přiřadí přijímači IP adresu a naváže spojení. Jedná se tedy o režim Ad-hoc, kdy vysílač je nastaven v módu „bridge“ a přijímací stanice v režimu „station“. Pracovní frekvence byly zvoleny v obou pásmech na samé spodní hranici povolených frekvenčních rozsahů. V pásmu 2,4 GHz se jedná o frekvenci 2,412 GHz a v pásmu 5 GHz je to frekvence 5,180 GHz.

Nastavování parametrů vysílače a přijímače se provádí pomocí grafického uživatelského rozhraní WinBox, dodávaného výrobcem, v operačním systému Windows (Obrázek 23). Počítač s rozhraním WinBox je k RouterBoadru připojen přes UTP kabel. IP adresa počítače je opět automaticky přiřazena z DHCP serveru.



Obrázek 23 – Uživatelské rozhraní WinBox

Aby byly zajištěny stejné podmínky měření ve všech prostředích, jsou veškerá měření prováděna se stejně nastavenými parametry bezdrátového spoje. Základní schéma spoje je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 24).



Obrázek 24 – Základní schéma spoje

6.2.1 Záznam měřených dat a způsob zpracování

Operační systém Mikrotik RouterOS dovoluje pomocí grafického uživatelského rozhraní WinBox vizuálně v každém okamžiku sledovat přenosové charakteristiky spoje (přijímaný výkon, přenosovou rychlost s použitou modulací apod.). V mnoha případech je však potřeba tyto charakteristiky dlouhodobě zaznamenávat. K tomuto účelu se s výhodou používají uživatelem definované skripty.

Skriptovací jazyk, kterým disponuje Mikrotik RouterOS, je velice silný nástroj na řízení celého systému, pomocí něhož lze nastavit veškeré parametry systému, řídit události a zaznamenávat potřebná data (tzv. logy). Takto lze do jisté míry zautomatizovat běh celého systému, např. při nasazení v reálné počítačové síti.

Pro účely měření přijímaného výkonu a měření přenosové rychlosti byl napsán program ve skriptovacím jazyku (zdrojový kód na přiloženém CD). Tento program je umístěn v paměti RouterBoardu na straně přijímače. V programu jsou využívány diagnostické utility vestavěné v RouterOS. Jedná se o nástroj „Ping“ a „Bandwidth test“.

Na začátku programu je nástrojem „Ping“ zjištěna dostupnost spoje. Pokud je spojení navázáno, program automaticky spustí nástroj Bandwidth test, který začne z vysílače, na kterém je spuštěn „Bandwidth Server“ – součást nástroje „Bandwidth test“, odesílat UDP pakety o velikosti 1500 B. Na straně přijímače se následně v cyklech po 1 s měří přijímaný výkon a průměrná přenosová rychlost spoje po uživatelem definovanou dobu. Takto získaná data jsou posílána na vzdálený syslog

server, který běží na připojeném PC k RouterBoardu přijímače. Syslog server ukládá naměřené data do textového souboru. Ukázka výstupu z textového souboru je vidět v tabulce (Tabulka 8):

Tabulka 8 – Výstup z textového souboru

```

Pvys = 0dBm, DataRate = 1Mbit/s, 1.mereni, 2GHz-chodba
2011-08-05 11:56:48 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info start – spojeni navazano
2011-08-05 11:56:51 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64
2011-08-05 11:56:52 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64
2011-08-05 11:56:53 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -40 63
2011-08-05 11:56:54 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64
2011-08-05 11:56:55 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64
2011-08-05 11:56:56 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64
2011-08-05 11:56:57 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -38 65
2011-08-05 11:56:59 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -40 63
2011-08-05 11:57:00 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -40 63
2011-08-05 11:57:01 Local7.Debug 192.168.88.1 script,info -39 64

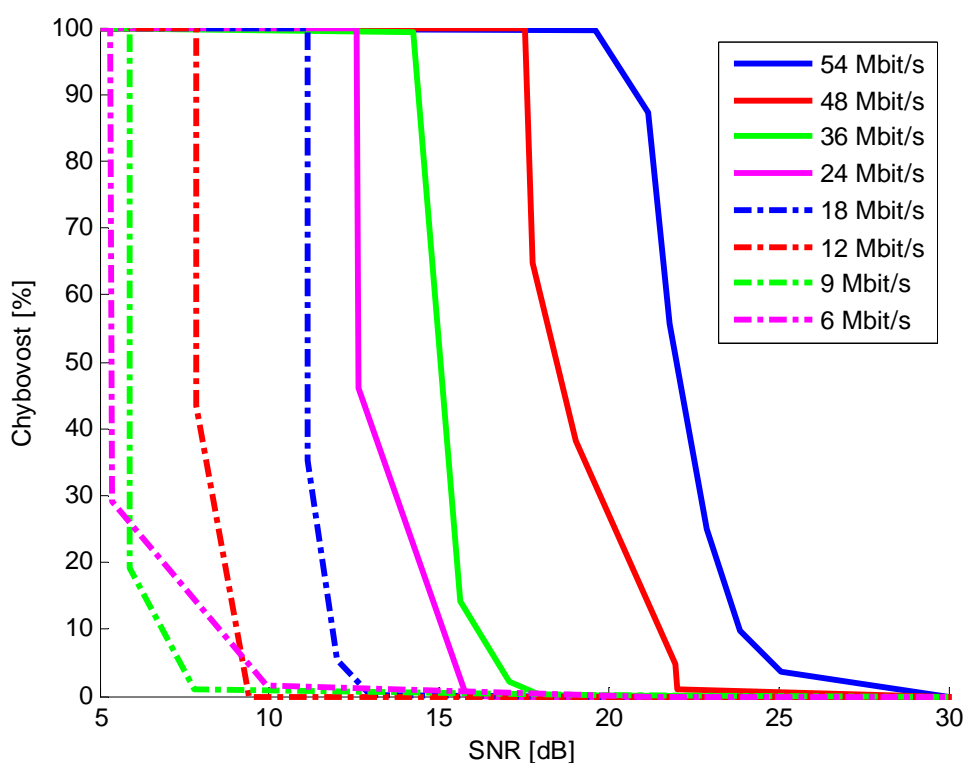
```

V prvním řádku jsou vidět uživatelem definované popisky identifikující parametry měření a druhý řádek oznamuje úspěšnost navázaného spojení. Dále je soubor rozdělen do sloupců. První sloupec obsahuje časové značky měření. V dalších třech sloupcích se zobrazují pro měření nepotřebné údaje. Důležité jsou až poslední dva sloupce, ve kterých jsou ukládány přijímaný výkon signálu a odstup signálu od šumu SNR. V tomto formátu je textový soubor následně načtený do tabulkového programu Excel, ve kterém se smažou nepotřebné sloupce a veškeré zpracování pak probíhá v matematickém softwaru Matlab.

6.3 Měření chybovosti 802.11a

Měření chybovosti standardu 802.11a probíhalo pro značně idealizované podmínky, kdy se nepředpokládalo žádné vnější rušení signálu. Pouze se simulovala vzdálenost, resp. útlum, signálu mezi dvěma body. To se provádělo pomocí attenuátoru. Wifi karta na vysílací straně byla nastavena na pevný vysílací výkon a dále byly „zamknuty“ přenosové rychlosti, resp. modulace. Postupně se zvyšoval útlum na attenuátoru a v závislosti na SNR se měřila propustnost spoje. Každé měření probíhalo po dobu 45 s a program napsaný ve skriptovacím jazyce uložil průměrnou propustnost za měřenou dobu 45 s. V momentě, kdy došlo k výpadku spojení, modulace se ručně změnila na odolnější, přepnutím na nižší nominální přenosovou rychlost. Tímto způsobem se postupně proměřily propustnosti pro každou nominální rychlost standardu 802.11a.

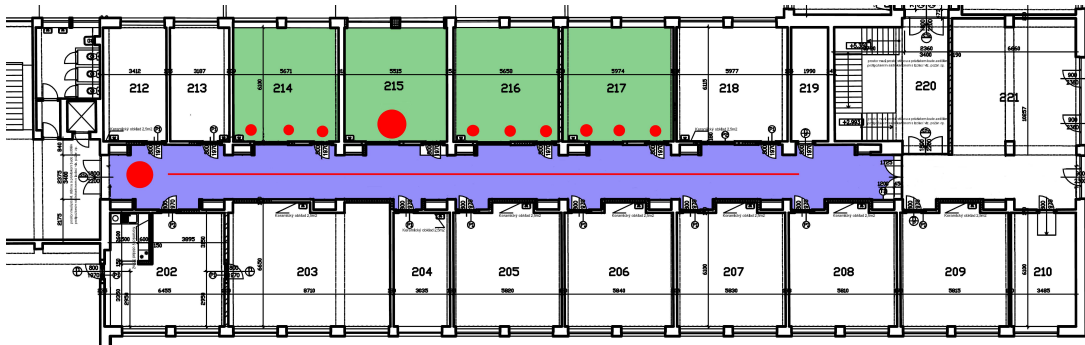
Bylo zjištěno, že nejvíce chyb nastává, pokud se přijímaný výkon blíží k citlivosti wifi karty, neboli je malý odstup signálu od šumu SNR. Dále bylo zjištěno, že zvyšováním přijímaného výkonu nad oblast citlivosti wifi karty nevede ke zlepšení propustnosti a ta se pohybuje kolem stálé střední hodnoty. Aby bylo možné vyjádřit procentuelně chybovost, byla volena jako vztažná hodnota nejvyšší naměřená hodnota propustnosti, která se následně dala do podílu s ostatními naměřenými hodnotami. Výsledek chybovosti pro standard 802.11a je vidět na následujícím obrázku (Obrázek 25).



Obrázek 25 – Chybovost 802.11a

6.4 Realizace bezdrátových spojů v budově

Bezdrátové spoje v obou měřených pásmech byly experimentálně sestaveny ve druhém patře Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Plán celého podlaží je vidět na obrázku níže (Obrázek 26). Pro obě pásma byly sestaveny spoje s přímou optickou viditelností LOS a spoje bez přímé optické viditelnosti NLOS.



Obrázek 26 – Plán podlaží, rozmístění antén a měřených bodů

Antény byly umístěny na stativech 1,3 m nad zemí. V obrázku (Obrázek 26) je umístění vysílacích antén znázorněno velkými červenými značkami. Každý měřený prostor je barevně rozlišen - modrou barvou měřený prostor spoje LOS a zelenou barvou měřený prostor NLOS. Aby byly zaručeny stejné, neměnní se podmínky na každém stanovišti, měření se realizovalo v odpoledních hodinách, kdy v budově fakulty bylo minimum lidí.

6.4.1 Měření spojů s přímou optickou viditelností LOS

Pro realizaci spojů s přímou optickou viditelností LOS byla vybrána chodba fakulty. Měření přijímaného výkonu se provádělo s krokem 1 m a na každém stanovišti se výkon zaznamenával v cyklech po 1 s za dobu 45 s. Vzdálenost prvního měřeného bodu od vysílací antény byla 1 m a vzdálenost posledního měřeného bodu 37 m. V obrázku výše (Obrázek 26) jsou všechna měřící stanoviště proložena červenou čarou.

Protože nebyly v naměřených datech výrazné extrémny, tak se z naměřených hodnot výkonu pro každé stanoviště vypočítal aritmetický průměr. Z takto experimentálně získaných dat bylo potřeba nalézt model, který by co nejvěrněji aproximoval naměřená data. Byl použit regresní model (One-Slope) definovaný v kapitole 5.1.1 – rovnice (5.2).

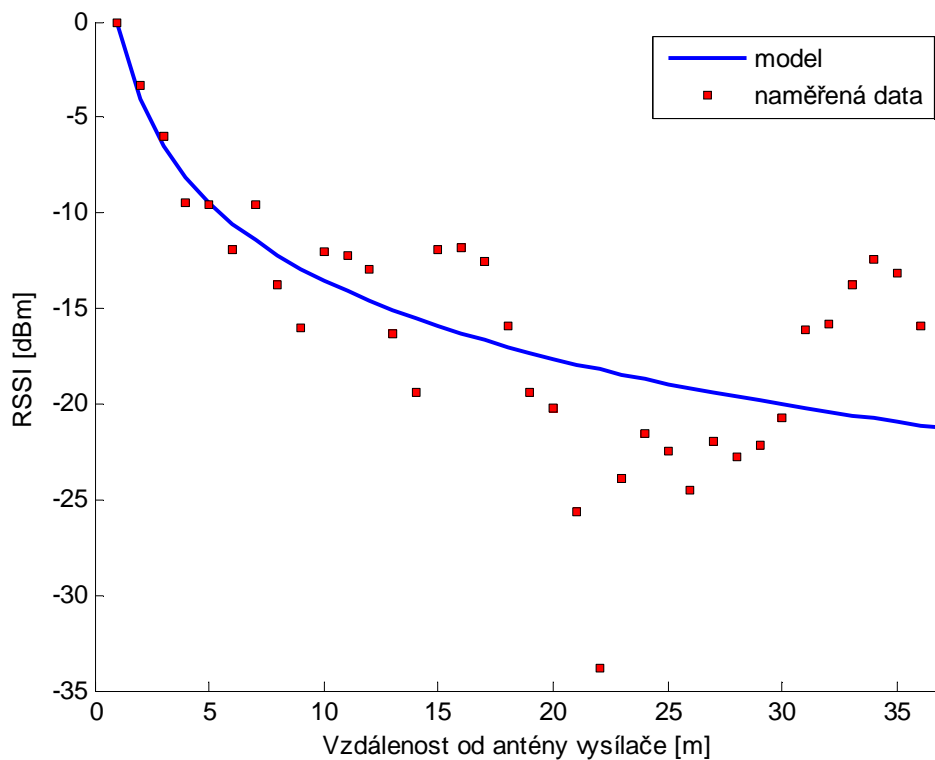
Obecný postup regresní analýzy je nalezení vhodného modelu studované závislosti tak, že se snažíme nahradit každou naměřenou hodnotu (přijímaný výkon) závisle proměnné $y_{\text{nam.}}$ hodnotou vypočtenou $y_{\text{vyp.}}$, tzn. hodnotou ležící na spojitě funkci (modelu) nezávisle proměnné (vzdálenost od vysílací antény) x . Pro určení parametru (spádového koeficientu) n regresního modelu One-Slope, byla

v tabulkovém programu Excel vytvořena účelová funkce ve smyslu minimalizace součtu kvadrátů odchylek:

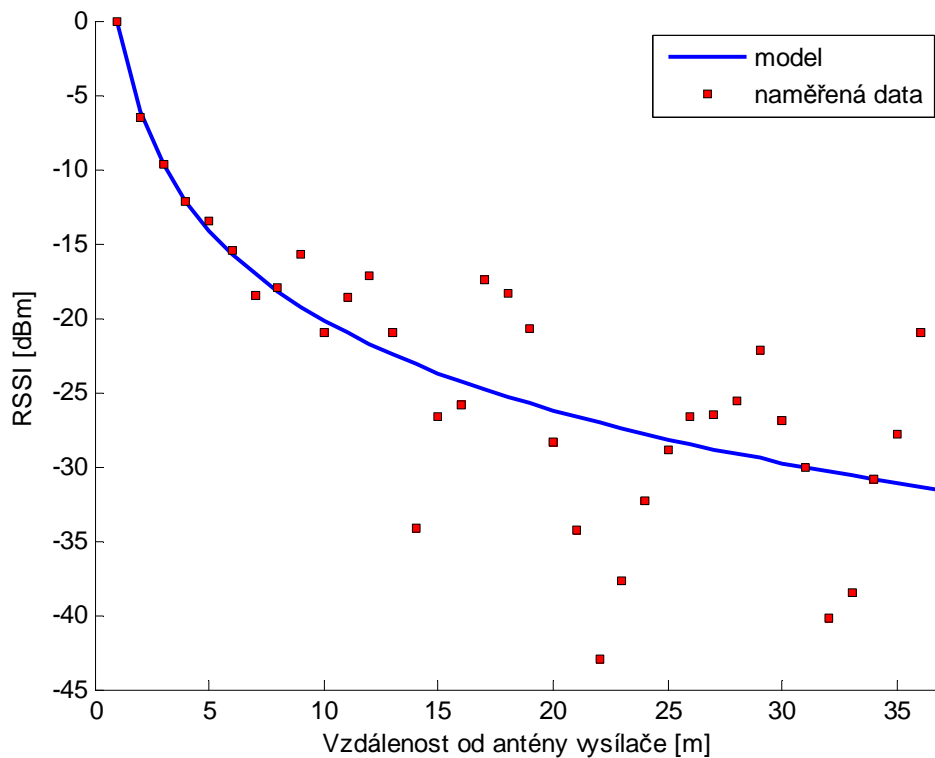
$$\sum_{k=1}^{k=37} (y_{\text{nam.}} - y_{\text{vyp}})^2 = \min, \quad (6.1)$$

kde k je počet naměřených hodnot. Následně byl hledán spádový koeficient n , pro který účelová funkce nabývá minima. K tomuto postupu byl využit vestavěný nástroj „Řešitel“ tabulkového programu Excel. Před zpracováním naměřených dat, byly hodnoty přijatých výkonů normovány. Tzn., nejnižší naměřený výkon RSSI byl normován na hodnotu 0 dBm.

Naměřené hodnoty přijatých výkonů RSSI spolu s nalezenými modely jsou vidět na následujících obrázcích (Obrázek 27, Obrázek 28):



Obrázek 27 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 2,4 GHz v prostoru chodby



Obrázek 28 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 5 GHz v prostoru chodby

V následující tabulce (Tabulka 9) jsou srovnány parametry nalezených modelů a je uveden dostupný tabelovaný spádový koeficient pro pásmo 2,4 GHz z [15].

Tabulka 9 – Parametry nalezených modelů

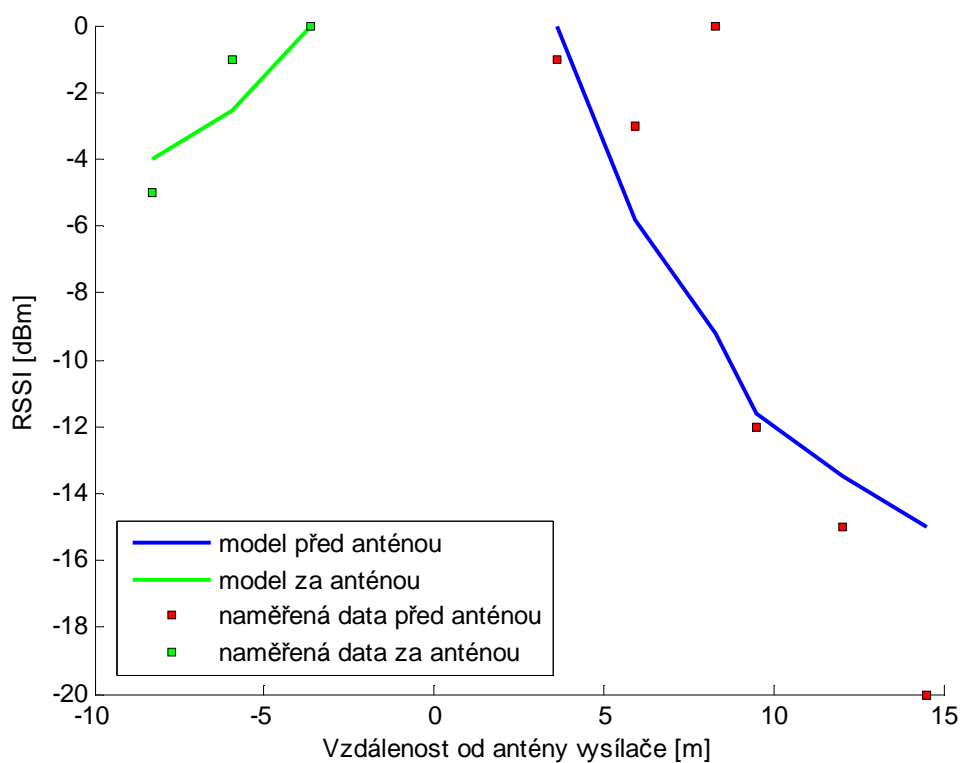
Frekvenční pásmo	Zjištěný spádový koeficient modelu n	Tabelovaný spádový koeficient n
2,4 GHz	1,36	1,2
5 GHz	2,015	-

V tabulce je vidět, že se zjištěný spádový koeficient pro pásmo 2,4 GHz liší od tabelovaného. Dále je vidět, že pro prostředí chodby se lépe hodí frekvenční pásmo 2,4 GHz, kde ztráty se vzdáleností (resp. přijímaný výkon) rostou pomaleji, resp. klesají pomaleji než v pásmu 5 GHz.

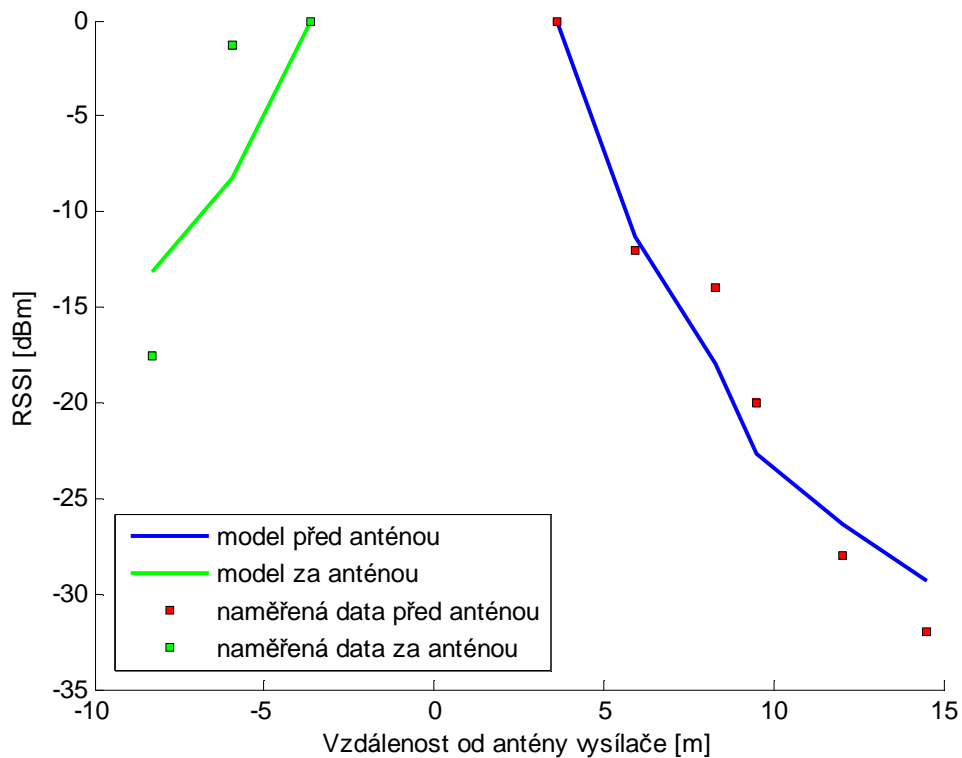
6.4.2 Měření zastíněných spojů NLOS

Pro realizaci spojů bez přímé optické viditelnosti NLOS byly vybrány laboratoře fakulty. Vysílací antény byly umístěny v laboratoři č. 215. Byly nasměrovány doprava v plánu podlaží (Obrázek 26). Měření přijímaného výkonu probíhalo jak

v sousedních laboratořích (č. 216 a č. 217) před anténou, tak v laboratoři (č. 214) za anténou. Měřené body jsou znázorněny malými červenými značkami (Obrázek 26). Měřená stanoviště musela být volena u zdí laboratoří a v omezeném počtu z důvodu nevhodného rozmístění vybavení interiéru. Na každém stanovišti se výkon zaznamenával v cyklech po 1 s za dobu 45 s. Výsledný model byl hledán stejným postupem uvedeným v předešlé kapitole (kapitola 6.4.1). Naměřené hodnoty přijatých výkonů RSSI spolu s nalezenými modely jsou vidět na následujících obrázcích (Obrázek 29, Obrázek 30):



Obrázek 29 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů pro pásmo 2,4 GHz v prostorách laboratoří



Obrázek 30 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů pro pásmo 5 GHz v prostorách laboratoří

V následující tabulce (Tabulka 10) jsou srovnány parametry nalezených modelů.

Tabulka 10 – Parametry nalezených modelů

Frekvenční pásmo	Zjištěný spádový koeficient modelu n
2,4 GHz – před anténou	1,93
2,4 GHz – za anténou	0,84
5 GHz – před anténou	3,76
5 GHz – za anténou	2,75

Ačkoliv bylo málo měřených stanovišť, přesto je patrné, že se signál v pásmu 2,4 GHz šíří lépe než signál v pásmu 5 GHz, v případě zastíněného spoje.

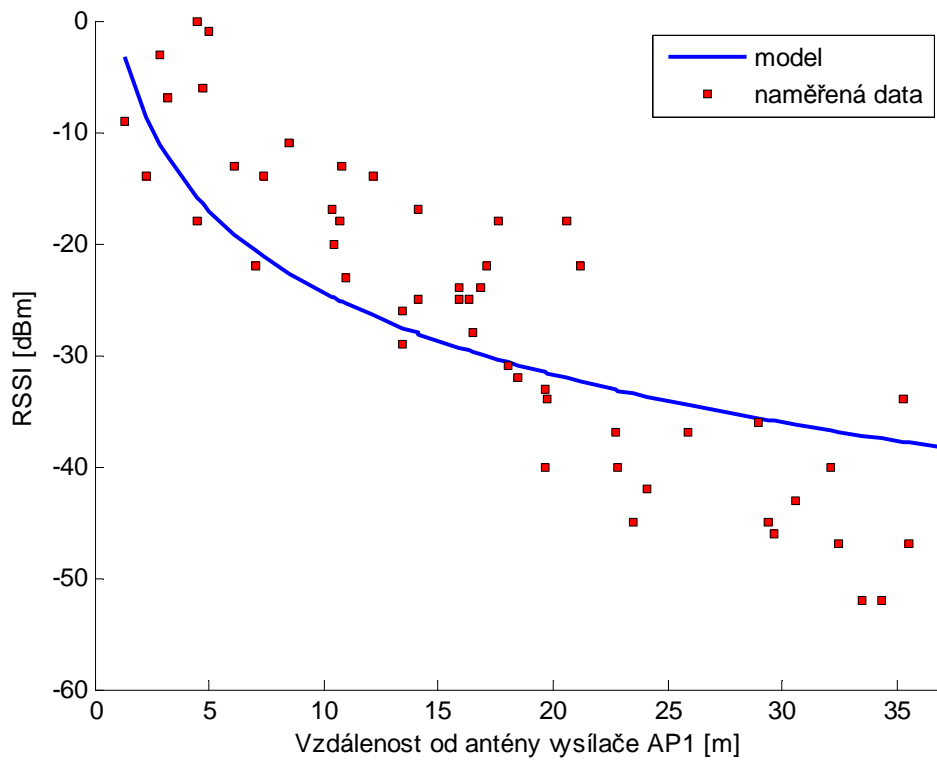
6.4.3 Výsledky měření přijímaného výkonu reálné wifi sítě

Pro zhodnocení šíření signálu z reálných přístupových bodů školní wifi sítě v pásmu 2,4 GHz, byla využita data od studenta J. Kubánka. Plán podlaží prvního patra (Obrázek 31) je převzatý z jeho diplomové práce [17].

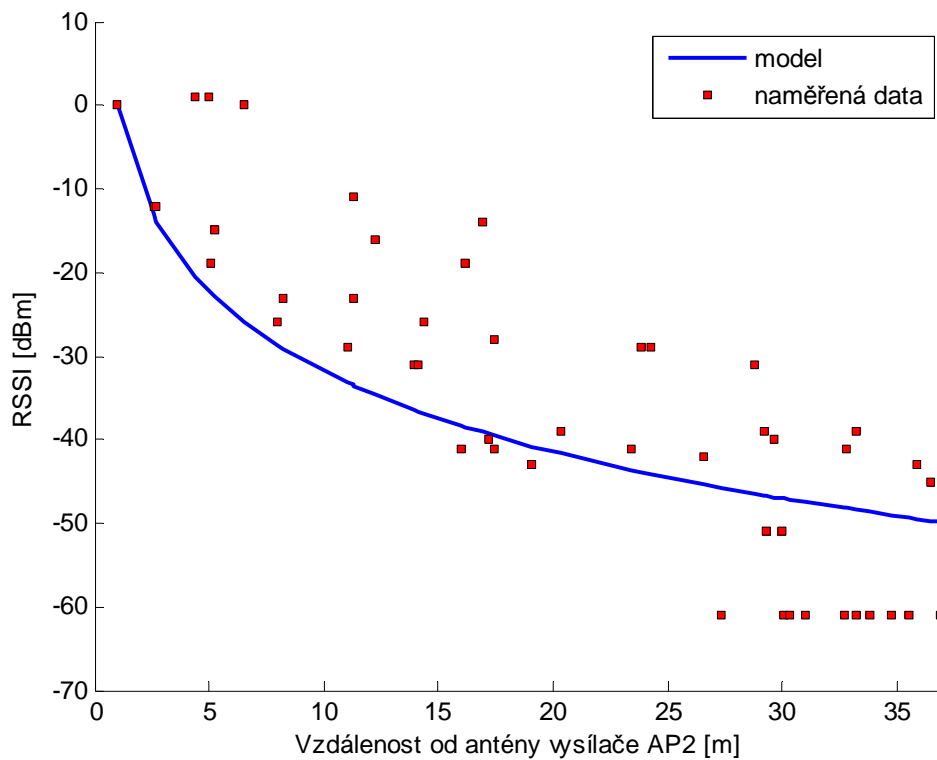


Obrázek 31 - Plán podlaží, rozmístění přístupových bodů a měřených bodů

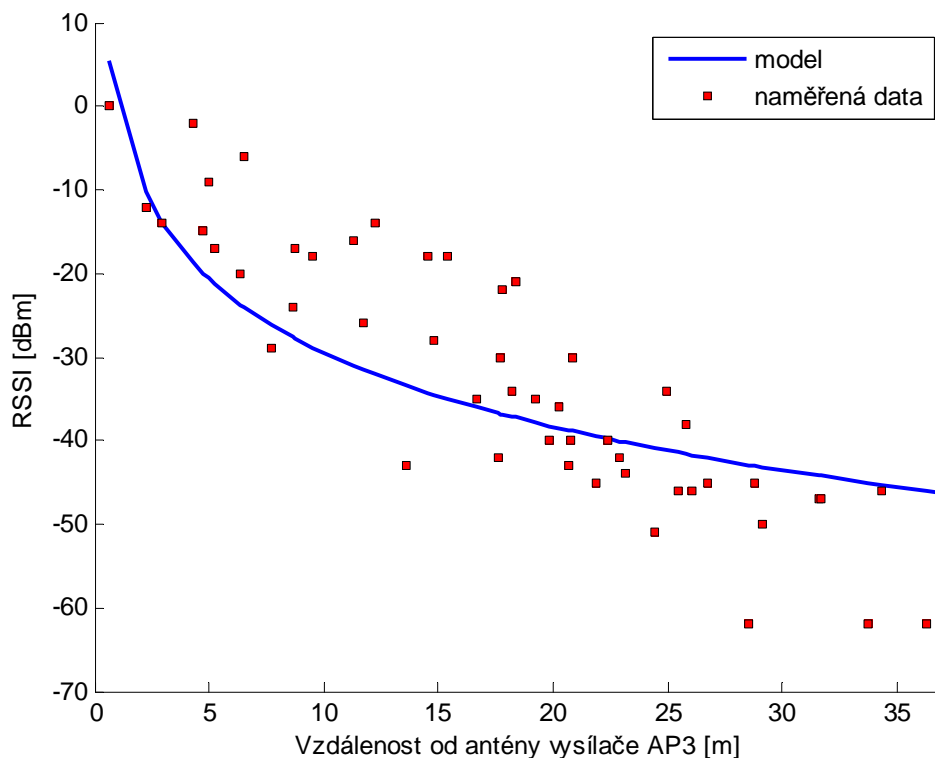
V plánu (Obrázek 31) jsou vidět tři přístupové body AP1, AP2 a AP3. Jsou označeny žlutými značkami. Měření přijímaného výkonu probíhalo od každého přístupového bodu v prostorách chodby 1 (zelená barva), chodby 2 (oranžová barva), chodby 3 (modrá barva). Dále v respiriu (růžová barva) a v učebnách označených PC102, PC103, PC104, PC105, EL101, EL102. Měřená stanoviště jsou označena bílými a červenými značkami. Na první pohled je vidět, že se jedná o kombinace míst, kde je přímá viditelnost na každý z přístupových bodů a míst, kde jsou v cestě šíření signálu překážky. Naměřené hodnoty přijatých výkonů RSSI spolu s nalezenými modely jsou vidět na následujících obrázcích (Obrázek 32, Obrázek 33, Obrázek 34).



Obrázek 32 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP1



Obrázek 33 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP2



Obrázek 34 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů od AP3

V následující tabulce (Tabulka 11) jsou srovnány parametry nalezených modelů.

Tabulka 11 - Parametry nalezených modelů

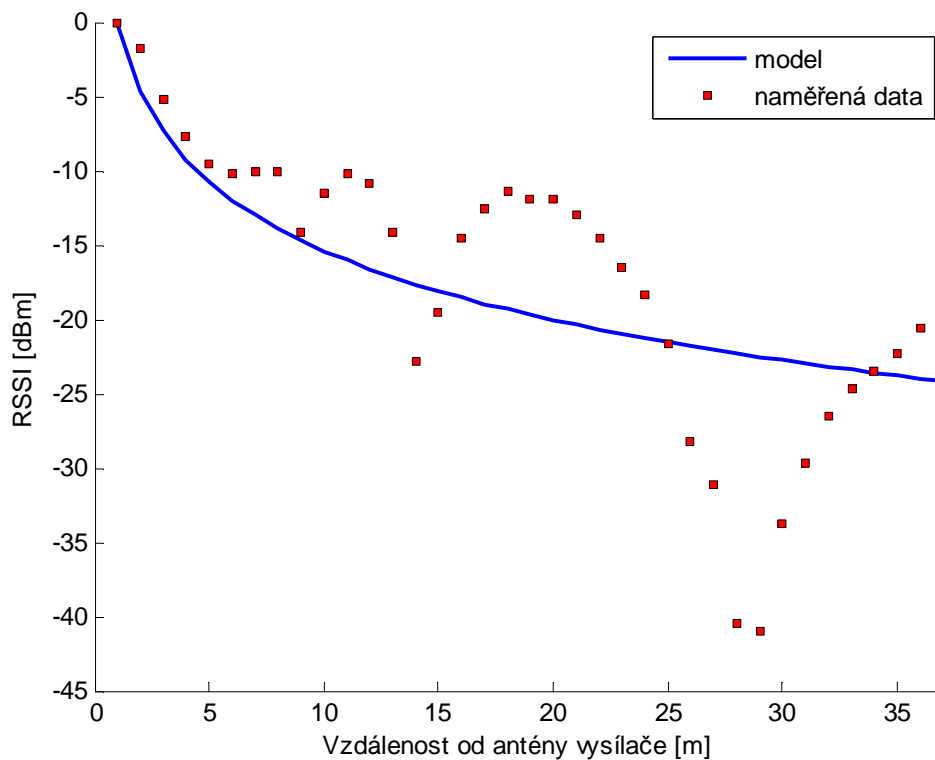
Přístupový bod	Zjištěný spádový koeficient modelu n
AP1	2,44
AP2	3,18
AP3	2,95

6.5 Realizace bezdrátových spojů ve volném prostoru

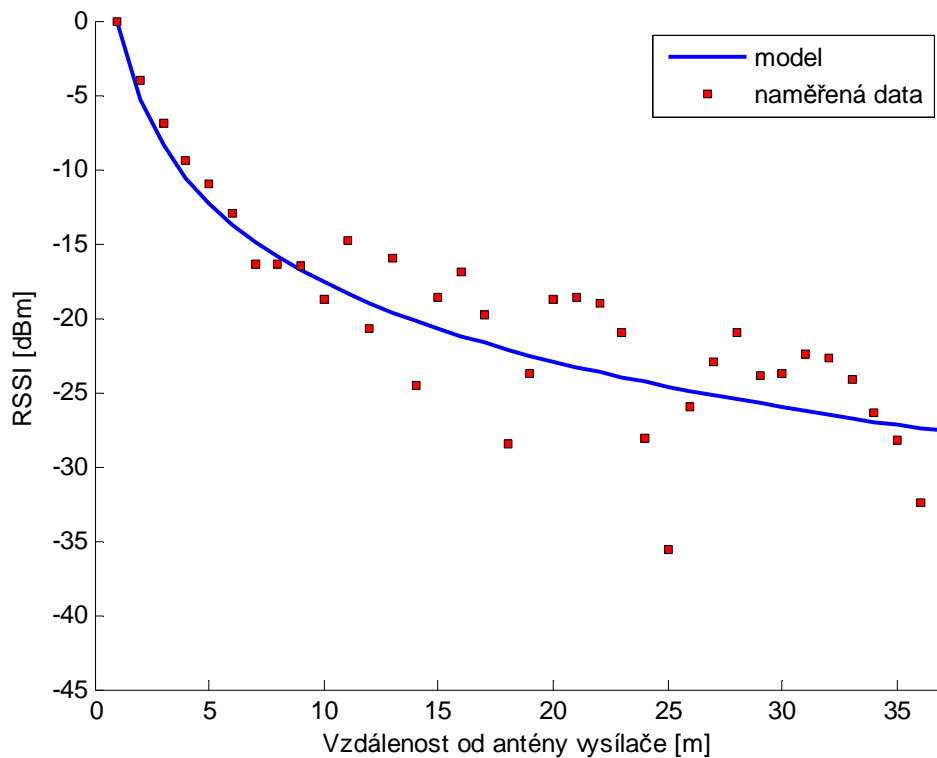
Bezdrátové spoje v obou měřených pásmech byly experimentálně sestaveny na dnes již nepoužívaném letišti u Chrudimi. Letiště je pokryto asfaltem a v okolí je vegetace v podobě polí. Antény byly umístěny opět na stativech ve výšce 1,3 m nad zemí. Napájení bylo zajištěno ze dvou autobaterií.

Měření se provádělo s krokem 1 m a na každém stanovišti se výkon zaznamenával v cyklech po 1 s za dobu 45 s, stejně jako v případě měření v budově fakulty. Vzdálenost prvního měřeného bodu od vysílací antény byla 1 m a vzdálenost

posledního měřeného bodu 37 m. Výsledný model byl hledán postupem uvedeným v kapitole 6.4.1. Naměřené hodnoty přijatých výkonů RSSI spolu s nalezenými modely jsou vidět na následujících obrázcích (Obrázek 35, Obrázek 36).



Obrázek 35 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 2,4 GHz ve volném prostoru



Obrázek 36 - Naměřené hodnoty přijatých výkonů a model pro pásmo 5 GHz ve volném prostoru

V následující tabulce (Tabulka 12) jsou srovnány parametry nalezených modelů.

Tabulka 12 – Parametry nalezených modelů

Frekvenční pásmo	Zjištěný spádový koeficient modelu n
2,4 GHz	1,54
5 GHz	1,76

Opět je vidět, že při nižší frekvenci 2,4 GHz v otevřeném prostoru klesá úroveň výkonu pomaleji než u frekvence 5 GHz. Výsledek z měření v pásmu 2,4 GHz představuje typický příklad šíření signálu nad rovinnou zemí. Naměřené výsledky (Obrázek 35) jsou srovnatelné se simulovanými výsledky (Obrázek 13) z kapitoly 3.3. Pokud oba obrázky porovnáme, je vidět, že se shodují vzdálenosti od vysílací antény, kdy nastávají poklesy v úrovni přijatého výkonu.

6.6 Realizace bezdrátového spoje na Milešovce

Bezdrátový spoj na hoře Milešovka byl realizován v pásmu 5 GHz. Jeho provedení je vidět na dalším obrázku (Obrázek 37).



Obrázek 37 – Bezdrátový spoj na Milešovce

Spoj v pásmu 5 GHz byl umístěn vedle bezdrátového optického spoje ATMO TL - 02_DUAL zkonstruovaného na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. „Byl vyroben přímo k účelu měření útlumu, jelikož bezkabelové spoje běžně dostupné na trhu neposkytují data o přijatém výkonu.“ [19]. Výstupy z tohoto optického spoje budou následně využity ke srovnání s nainstalovaným rádiovým spojením v pásmu 5 GHz. Oba spoje jsou orientovány na jihovýchod na vzdálenost 60 m s vertikálním převýšením 29 m.

Spoj byl na Milešovku umístěn dlouhodobě a k posouzení vlivu atmosférických jevů (deště) na spoj byla data vybrána v délce jednoho týdne. Přijímaný výkon se zaznamenával v cyklech po 1 s. Spoj byl opatřen záložním zdrojem proti výpadku el. proudu. Zařízení je na žádost Ústavu fyziky atmosféry AV dlouhodobě ponecháno na observatoři a záznamy ze zařízení budou použity k dalším výzkumným účelům.

6.6.1 Způsob zpracování naměřených dat

Zpracování dat (výkon signálu) z textového souboru není tak jednoduché jako v případě měření uvnitř budovy nebo ve volném prostranství, kde se hodnoty přijímaného výkonu zaznamenávaly na každém stanovišti pouze 45 s. V případě spoje na Milešovce, kde se mají data ukládat dlouhodobě je zpracování textového souboru s výstupy měření sofistikovanější.

Musíme si uvědomit, že na začátku každého dlouhodobějšího měření je třeba nastavit dobu ukládání dat v programu ve skriptovacím jazyce RouterBoardu. Na Milešovce byla zvolena doba měření 1 týden. Ideálně se tedy jedná o 604800 vzorků s hodnotami přijatého výkonu v intervalech 1 s. Protože RouterBoardy nejsou primárně určeny jako přístroje na měření přijatého výkonu, bylo zjištěno, že dochází k náhodným krátkodobým výpadkům měření. Nejvyšší zjištěná hodnota výpadku byla 1 s. Pokud pak chceme následně průměrovat hodnoty přijatého výkonu po určitých časových intervalech, dochází ke zkreslení časové osy a nepřesným závěrům (např. při korelaci s jinými veličinami).

Aby ke zkreslení časové osy nedocházelo, byl vytvořen v matematickém softwaru Matlab skript, který naměřená data přesně zpracovává. Zdrojový kód lze nalézt v příloženém CD. Podmínkou správného zpracování je přesně definovaná struktura dat, která je načtena do tabulkového procesoru MS Excel 2010 z textového souboru. Tato struktura dat se následně zpracovává pomocí softwaru Matlab. Textový soubor má strukturu, která již byla ukázána dříve (Tabulka 8). Požadovaná struktura načítaných dat do MS Excel 2010 je vidět v následující tabulce (Tabulka 13).

Tabulka 13 – Struktura načítaných dat

29.7.2011	10	29	0	-77
29.7.2011	10	29	1	-78
29.7.2011	10	29	2	-78
29.7.2011	10	29	4	-77
29.7.2011	10	29	5	-77
29.7.2011	10	29	6	-77
29.7.2011	10	29	7	-77
29.7.2011	10	29	8	-77
29.7.2011	10	29	9	-77
29.7.2011	10	29	10	-77

Tabulka 13 má 5 sloupců, přičemž 1. sloupec představuje datum měření, 2. sloupec hodinu měření, 3. sloupec minutu měření, 4. sloupec sekundu měření a v 5. sloupci je hodnota přijímaného výkonu v [dBm]. Záměrně je ukázán výpadek měření v čase 10:29:03. Do programu v softwaru Matlab se načítají pouze poslední 4 sloupce (údaj o datu měření se nenačítá).

Pokud chceme průměrovat hodnoty přijatého výkonu po určitých časových intervalech, zvolíme si časovou „značku“ od které se budou hodnoty přijímaného výkonu průměrovat. Časový interval průměrování byl zvolen na jednu minutu. Toto jsou dva vstupní parametry do programu v softwaru Matlab, přičemž zvolená časová „značka“ musí ležet v tabulkovém procesoru na prvním řádku. V tabulce výše (Tabulka 13) jde o následující řádek:

29.7.2011	10	29	0	-77
-----------	----	----	---	-----

Výstupem z programu Matlab jsou průměrované hodnoty přijatého výkonu a příslušná časová osa k těmto hodnotám. Takto upravená data lze následně využít k dalším matematickým výpočtům (např. korelace) nebo pro vykreslení grafů.

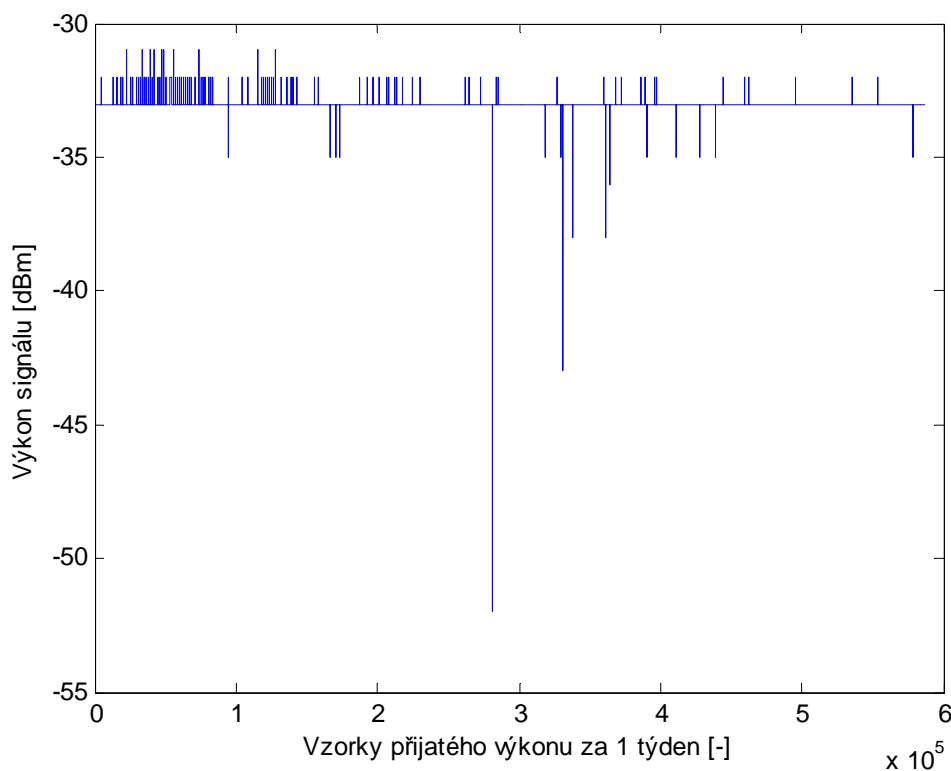
Zhodnocení spoje na Milešovce je v následující samostatné kapitole 7.

7 Zhodnocení spoje na Milešovce

Záměrem bylo posoudit vliv atmosférických jevů na sestavený spoj a dále zjistit souvislost (korelací) přijatého výkonu na frekvenci 5 GHz s atmosférickým útlumem optického spoje. Více o optickém spoji se lze dočíst v diplomové práci V. Brázdy [19]. K dispozici byla data za celý týden, kdy měření na Milešovce probíhalo.

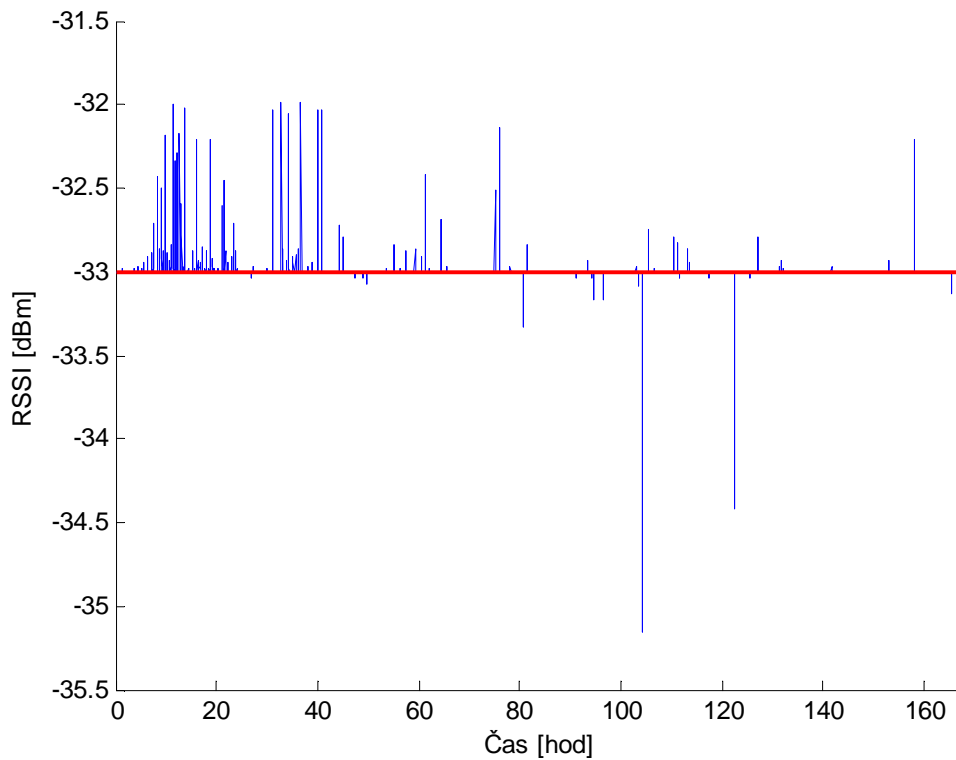
7.1 Výkon signálu

Při prvotní analýze naměřených hodnot přijatého výkonu bylo zjištěno, že se hodnoty výkonu většinou náhodně mění mezi -33 dBm a -34 dBm bez zjevné příčiny. Toto bylo pozorováno již při samotné instalaci spoje a v průběhu jiných měření v rámci spojů v budově a na volném prostranství. Zřejmě se jedná o nepřesnost síťového zařízení RouterBoard. Pro přehlednost byly hodnoty -34 dBm nahrazeny hodnotami -33 dBm. Všechny naměřené vzorky v průběhu jednoho týdne bez časové osy jsou na následujícím obrázku (Obrázek 38).



Obrázek 38 – Naměřené vzorky přijatého výkonu v průběhu jednoho týdne

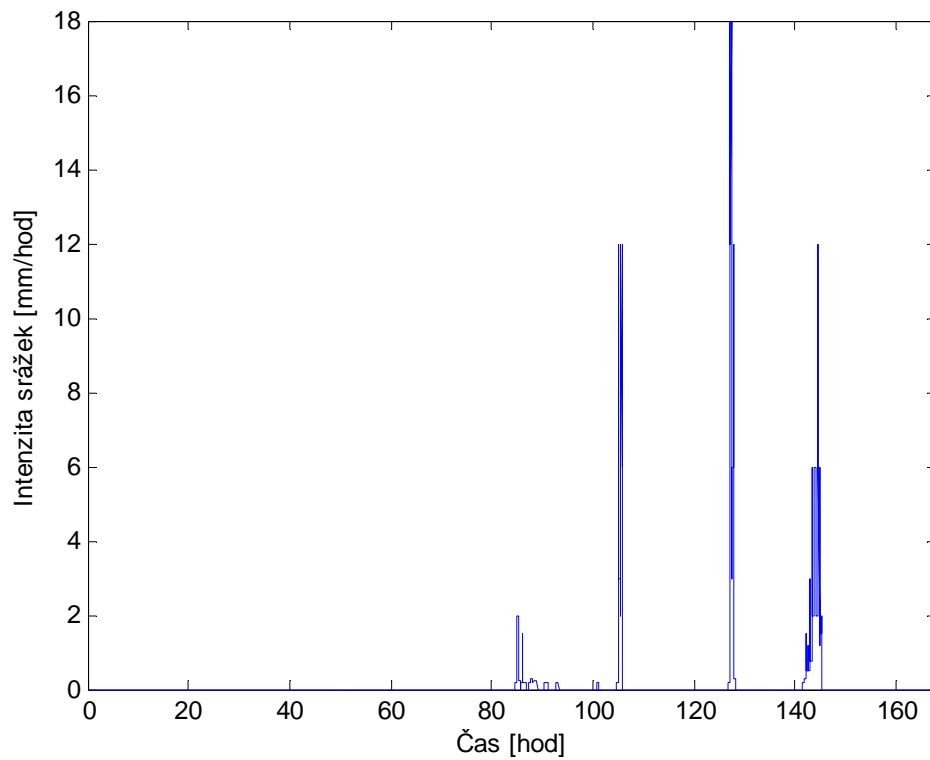
Záměrně byly vykresleny nejdříve všechny vzorky přijatého výkonu (bez časové osy). Je totiž patrné, že ve výsledcích (Obrázek 38) se objevují asi čtyři výraznější změny v úrovni přijatého signálu. Jedná se ovšem pouze o sekundové změny, bez jasné příčiny. Na následujícím obrázku (Obrázek 39) je pro úplnost vykreslen graf s průměrovanými hodnotami přijatého výkonu po jedné minutě.



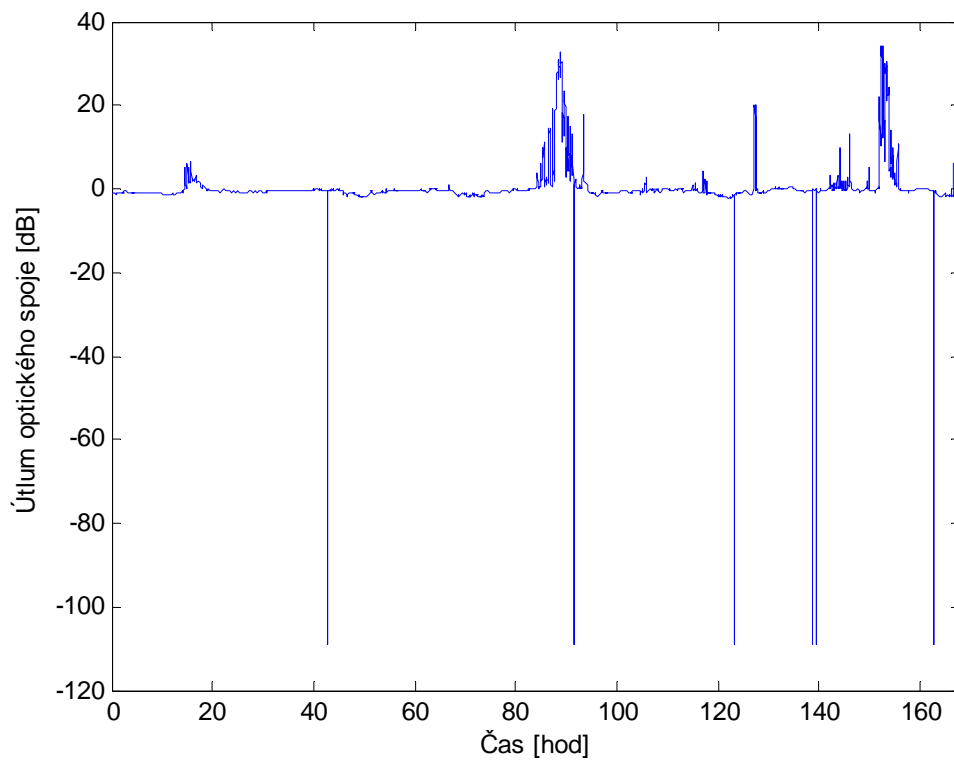
Obrázek 39 – Přijatý výkon v průběhu jednoho týdne průměrovaný po jedné minutě

7.2 Korelace

Pokud se podíváme na přijatý výkon signálu v průběhu jednoho týdne (Obrázek 39) zjišťujeme, že se úroveň signálu příliš nemění, a nepředpokládá se výrazný vliv atmosférických jevů v podobě deště, který byl zaznamenán v průběhu druhé poloviny týdne s intenzitou až 18 mm/hod, jak je vidět na obrázku níže (Obrázek 40). Hodnoty intenzity srážek jsou průměrovány také po jedné minutě. V dalším obrázku (Obrázek 41) je pak znázorněn útlum optického spoje v průběhu jednoho týdne. Hodnoty útlumu optického spoje jsou rovněž průměrovány po jedné minutě. Výpadky spoje jsou zobrazeny poklesem úrovně útlumu pod -100 dB.



Obrázek 40 – Intenzita srážek v průběhu jedno týdne



Obrázek 41 – Útlum optického spoje

Nyní provedeme korelace přijatého výkonu s intenzitou srážek a s útlumem optického spoje. V následující tabulce (Tabulka 14) jsou shrnuty korelační koeficienty.

Tabulka 14 – Korelační koeficienty

Korelace	Korelační koeficient
Přijatý výkon RSSI + intenzita srážek	0,0029
Přijatý výkon + útlum optického spoje	-0.0054

Z korelačních koeficientů lze usoudit, že mezi studovanými veličinami není žádná závislost.

8 Závěr

V diplomové práci byly shrnuty základy z teorie šíření elektromagnetických vln a dále charakteristiky antén. Tyto části pak byly východiskem pro praktická měření.

Protože nebyla k dispozici bezodrazová komora, měření vyzařovacích charakteristik antén bylo realizováno pouze ve volném prostoru. Výsledky z těchto měření se do jisté míry dají považovat za uspokojivé a pro nenáročné aplikace vyhovující. Dále se podařilo vytvořit softwarovou aplikaci napsanou ve skriptovacím jazyku, který dokáže pomocí systému RouterBoard zaznamenávat hodnoty přijatého výkonu v realizovaném bezdrátovém spoji po dobu definovanou uživatelem. Toto řešení pak může být použito pro krátkodobé nebo dlouhodobé záznamy přenosových charakteristik (přijatý výkon, chybovost), kdy jsou hodnoty přehledně ukládány do textového souboru pro možnost dalšího zpracování. Systém se softwarem je možné využívat i k měření vyzařovacích charakteristik antén.

Software spolu se systémem RouterBoard byl pak využit k realizaci bezdrátových spojů v budově Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice a dále k realizaci spojů ve volném prostoru. Po odměření přenosových charakteristik v těchto prostředích byl bezdrátový spoj v pásmu 5 GHz s použitým řešením realizován na hoře Milešovka. Zařízení je na žádost Ústavu fyziky atmosféry AV dlouhodobě ponecháno na observatoři a záznamy ze zařízení budou použity k dalším výzkumným účelům.

Změřené přenosové charakteristiky v prostorách budovy odpovídají teoretickým předpokladům, kdy se obecně jeví pásmo 2,4 GHz vhodnější pro přenos. Z nalezených modelů byly vyčísleny jejich parametry, resp. spádové koeficienty, které ukázaly, že úroveň přijatého výkonu pro pásmo 2,4 GHz klesá se vzdáleností pomaleji, než pro pásmo 5 GHz.

Pro měření přenosových charakteristik ve volném prostoru bylo vybráno dnes již nepoužívané letiště u Chrudimi, kde nejsou terénní nerovnosti a další překážky. Výsledky z tohoto měření, zejména pro pásmo 2,4 GHz, odpovídají teoretickým předpokladům, kdy změřené charakteristiky, resp. přijaté výkonové úrovně signálu odpovídají typickému šíření přízemní prostorové vlny nad zemským povrchem. Zjištěné spádové koeficienty jsou opět menší pro pásmo 2,4 GHz.

Přenosové charakteristiky ze spoje na hoře Milešovka byly měřeny po dobu jednoho týdne. V druhé polovině týdne byla zaznamenána intenzita srážek až 18 mm/hod, která ovšem na spoj neměla vliv, jak bylo zjištěno z korelačního koeficientu. Dále byla zjišťována souvislost mezi přijatým výkonem a útlumem optického spoje. Z výsledného korelačního koeficientu můžeme opět říci, že není žádná závislost.

Seznam literatury

- [1] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Elektronické skriptum. Brno : VUT Brno, [200?]. 116 s
- [2] BEZOUŠEK, Pavel. *Technika rádiových komunikačních systémů*. Elektronická verze přednášek. Univerzita Pardubice, [200?].
- [3] Směrová anténa. *RCD Radiokomunikace* [online]. [cit. 2011-08-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.rcd.cz/cz/pdf/bd2g4-cz.pdf>>.
- [4] *ADMET* [online]. [cit. 2011-08-29]. ASD17. Dostupné z WWW: <<http://www.admet.cz/?14,asd17#>>.
- [5] PECHAČ, Pavel; ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření vln : pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vydání. Praha : Ben - technická literatura, 2007. 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [6] MAZÁNEK, Miloš; PECHAČ, Pavel; VRBA, Jan. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. 1. vydání. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. 103 s. ISBN 978-80-01-03997-7 (brož.).
- [7] DOSTÁLEK, Libor; KABELOVÁ, Alena. *Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS*. 2. aktualizované vydání. Praha : Computer Press, 2000. 420 s. ISBN 80-7226-323-4.
- [8] BUMBÁLEK, Z. Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích. *Pandatron : Elektrotechnický magazín* [online]. 2010, 1, [cit. 2011-08-01]. Dostupný z WWW: <http://pandatron.cz/?1497&modulacni_techniky_v_modernich_bezdratovych_sitich>.
- [9] KOCUR, Z.; ŠAFRÁNEK, M. Fyzická vrstva Wi-Fi. *Access server* [online]. 2008, [cit. 2011-08-22]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=fyzicka-vrstva-wi-fi&cisloclanku=2008050006>>.
- [10] KOCUR, Z.; ŠAFRÁNEK, M. Bezdrátové systémy v přístupové síti. *Access server* [online]. 2008, [cit. 2011-08-20]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=bezdratove-systemy-v-pristupove-siti&cisloclanku=2008020002>>.

- [11] PETERKA, Jiří. Jak probíhají bezdrátové přenosy v sítích WLAN?. *eArchiv* [online]. 2002, 1, [cit. 2011-08-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.earchiv.cz/b02/b0900016.php3>>.
- [12] Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12. [online]. Praha : ČTU, 2010 [cit. 2011-08-22]. Dostupné z WWW: <http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf>.
- [13] IEEE 802.11b-1999. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-09-01]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11b-1999>.
- [14] Received signal strength indication. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, last modified on 2011 [cit. 2011-08-23]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Received_signal_strength_indication>.
- [15] PECHAČ, Pavel. *Šíření vln v zástavbě : modely pro plánování mobilních rádiových systémů WLAN, WiFi, DECT, GSM, UMTS*. 1. vydání. Praha : Ben - technická literatura, 2006. 108 s. ISBN 80-7300-186-1.
- [16] REZA AKHAVAN, Mohammad. *Study the Performance Limits of IEEE 802.11 WLANs* [online]. Sweden, 2006. 49 s. Diplomová práce. Luea University of Technology. ISBN 1653-0187.
- [17] KUBÁNEK, Jan. *Software pro určování polohy mobilního zařízení* [online]. Pardubice, 2011. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [18] ŠEDIVÝ, Jiří. *České středohoří* [online]. 2004, 12.08.2011 [cit. 2011-08-12]. Milešovka. Dostupné z WWW: <<http://www.ceskestredohori.cz/mista/milesovka.htm>>.
- [19] BRÁZDA, Vladimír. *Šíření optického signálu v atmosféře* [online]. Pardubice, 2011. 68 s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [20] ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě wifi : Praktický průvodce*. 1. vydání. Brno : Computer Press, 2003. 204 s. ISBN 80-722-663-2.
- [21] *Wikipedie* [online]. 2011 [cit. 2011-08-10]. 802.11. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11>.

Příloha – fotografie z měření přenosových charakteristik



Obrázek 42 – Realizace spoje v prostoru chodby (pásmo 5 GHz)



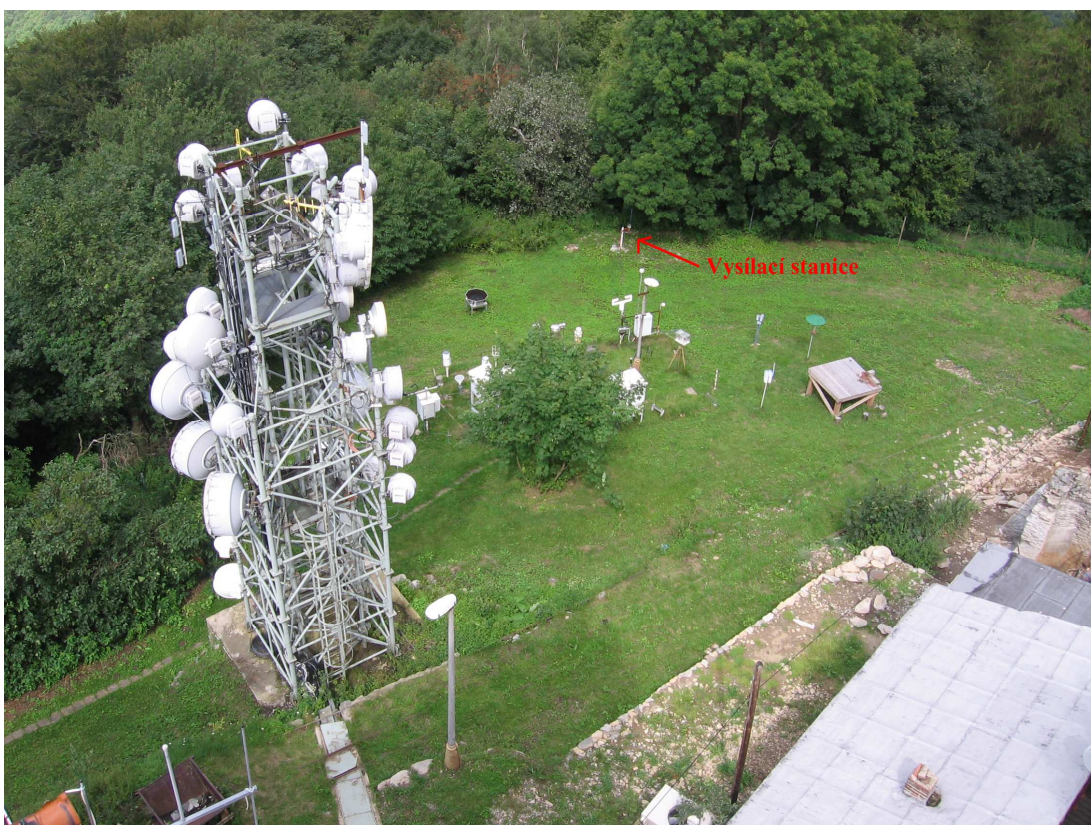
Obrázek 43 – Realizace spoje prostoru chodby (pásmo 2,4 GHz)



Obrázek 44 – Realizace spoje ve volném prostoru (pásmo 5 GHz)



Obrázek 45 – Realizace spoje ve volném prostornství (pásmo 2,4 GHz)



Obrázek 46 – Realizace spoje na Milešovce – pohled od přijímače k vysílači



Obrázek 47 – Realizace spoje na Milešovce – pohled na výsíláč



Obrázek 48 – Realizace spoje na Milešovce – instalace vysílací stanice