

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

David Tisoň

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření výkonu signálu v pásmu UKV v komplikovaném prostředí

David Tisoň

Bakalářská práce

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Tisoň**
Osobní číslo: **I14025**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Měření výkonu signálu v pásmu UKV v komplikovaném prostředí.**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

V teoretické části popište šíření signálu v budovách a modely které se používají pro odhad výkonu přijatého signálu. Vytvořte model signálu (v libovolném SW prostředí), pomocí kterého přibližně určíte výkon signálu na přijímači pro danou frekvenci v pásmu UKV a daný počet překážek (ideálně i různé typy), přes které signál musí procházet.

V praktické části pomocí generátoru UKV signálu a měřících přístrojů změřte výkony signálu na přijímači pro různé parametry (vzdálenost od vysílače, různé druhy překážek (zdi) a různé frekvence signálu) v určité budově. Dále porovnejte model s reálným měřením a pro danou budovu najděte odpovídající charakteristiky útlumu pro výše zmíněné parametry.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.

GLOVER, Ian a Peter M GRANT. Digital communications. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2010, xlviii, 1024 p. ISBN 02-737-1830-4.

ADRF6850 datasheet and product info. Analog Devices — Semiconductors and Signal Processing ICs [online]. [cit. 2014-11-06]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/rfif-components/rfif-transceivers/adrf6850/products/product.html>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Pola, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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 12. 5. 2017

David Tisoň

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Polovi, Ph.D. za pomoc a trpělivost při vedení této práce a Danielu Bubnovi, Josefu Tvrdíkoví a Vojtěchu Valentovi za pomoc při měření. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům, kteří mě při studiu podporovali.

ANOTACE

Cílem bakalářské práce je změřený průběhu šíření signálu v komplikovaném prostředí. V práci je rozebráno šíření signálu a modely šíření signálu. Práce obsahuje naměřená data a popis prostředí, kde byla pořízena. Byla vytvořena aplikace pro porovnání naměřených dat s modely šíření signálu. V závěru práce je porovnání naměřených hodnot s modely šíření signálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šíření signálu, měření šíření signálu, modely šíření signálu

TITLE

Measurement of signal strength in UHF band in a complicated environment

ANNOTATION

The aim of the bachelor thesis is to measure the signal propagation process in a complicated environment. The dissemination of signal and signal propagation models are analyzed in this work. The work contains the measured data and description of the environment where it was taken. There is application created to compare measured data with signal propagation models in thesis. There is also comparison of measured values with propagation signal models at the end of the thesis.

KEYWORDS

signal propagation, measurement of signal propagation, signal propagation models

OBSAH

ÚVOD	13
1 Šíření elektromagnetických vln	14
1.1 Rozdělení frekvenčního pásma	15
1.2 Pásmo UKV	16
1.3 Šíření vln ve volném prostoru	17
1.4 Radiokomunikační rovnice	19
1.5 Měření na volném prostranství.....	20
2 Modely šíření signálu.....	21
2.1 rozdělení modelů šíření	21
2.1.1 Empirické modely	21
2.1.2 Deterministické modely	22
2.1.3 Semi-deterministické modely	22
2.2 One-Slope model.....	23
2.3 Model ITU-P P.1238.....	24
2.4 Multi-Wall model.....	25
2.5 Dual-Slope model.....	26
2.6 ITU-R P.1411 model pro přímou viditelnost	27
2.7 Hatův model.....	28
3 Měření.....	29
3.1 Rušení.....	29
3.2 Měření na volném prostoru	30
3.3 Měření šíření signálu chodbou	31
3.4 Měření průchodu signálu stěnami 1	33
3.5 Měření průchodu signálu stěnami 2	35
3.6 Měření průchodu signálu podlažími.....	37
4 Aplikace	39

4.1	Výběr modelu šíření.....	40
5	Porovnání.....	41
5.1	One-Slope model.....	41
5.2	Dual-Slope model.....	43
5.3	Multi-Wall model.....	45
5.4	Model ITU-R P.1411 pro přímou viditelnost.....	46
5.5	Model ITU-R P.1238	47
	ZÁVĚR.....	50
6	Použitá literatura	52
7	Přílohy.....	53

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Maxvellovy rovnice	14
Obrázek 2 - elektromagnetické spektrum	15
Obrázek 3 - mnohocestné šíření.....	16
Obrázek 4 - měření na volném prostranství.....	20
Obrázek 5 - příklad šíření signálu podle One-slope modelu	23
Obrázek 6 - šíření signálu podle Multi-Wall modelu	26
Obrázek 7 - Rušení měřeného pásma	29
Obrázek 8 - měření na volném prostoru	30
Obrázek 9 - Naměřené hodnoty z měření na volném prostoru	31
Obrázek 10 - Měření šíření signálu chodbou.....	32
Obrázek 11 - Naměřené hodnoty z měření šíření signálu chodbou	32
Obrázek 12 - Fotografie prostoru při měření stěn 1.....	33
Obrázek 13 - Náčrt prostoru při měření stěn 1	34
Obrázek 14 - Naměřené hodnoty z měření průchodu stěnami 1.....	34
Obrázek 15 - Fotografie prostoru při měření průchodu stěnami 2	35
Obrázek 16 - Náčrt prostoru při měření stěn 2	36
Obrázek 17 - Naměřené hodnoty z měření průchodu stěnami 2.....	36
Obrázek 18 - Fotografie prostoru při měření útlumu podlaží.....	37
Obrázek 19 - Náčrt prostoru při měření průchodu skrz podlaží	38
Obrázek 20 - Naměřené hodnoty z měření průchodu podlažími	39
Obrázek 21 - Okno aplikace	40
Obrázek 22 - Parametry modelů	41
Obrázek 23 - Porovnání One-Slope modelu a měření na chodbě.....	42
Obrázek 24 - Příklad porovnání Dual-Slope modelu.....	43
Obrázek 25 - Příklad porovnání Dual-Slope modelu 2.....	45
Obrázek 26 - Multi-Wall model.....	45
Obrázek 27 - Muti-Wall model po úpravě.....	46
Obrázek 28 - model ITU-R P.1411.....	47
Obrázek 29 - Model ITU-R P.1238	47
Obrázek 30 - upravený model ITU-R P.1238.....	48

Tabulka 1 - Rozdělení radiových vln.....	15
Tabulka 2 - koeficienty útlumu pro různá prostředí	21
Tabulka 3 - Parametr n pro různé interiéry	24
Tabulka 4 - Parametry One-Slope modelu	42
Tabulka 5 - odpovídající hodnoty L_0	43
Tabulka 6 - Koeficienty n_1	44
Tabulka 7 - Koeficienty n_2	44
Tabulka 8 - Koeficient n pro model ITU-R P.1238	48
Tabulka 9 - Koeficient k pro model ITU-R P.1238	49

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

UKV	Ultra krátké vlny
ITU	International Telecommunication Union
RSS	Received signal strength

ÚVOD

V dnešní době jsou stále větší nároky na přenos dat a informací bezdrátovou cestou. Je však stále velmi složité popsat jak se signál šíří, zejména v městské zástavbě a uvnitř budov. Dochází zde v mnoha odrazům, ohybům a průchodům signálu překážkou, což velmi ztěžuje popis signálu v daném místě.

Cílem práce je změření výkonu signálu v komplikovaném prostředí uvnitř budov. Vytvoření aplikace, která bude sloužit pro porovnání neměřených hodnot s modely, které se používají k popisu útlumu signálu a následné vyhodnocení, jak vybrané modely dokázaly postihnout útlum signálu.

Tato práce může sloužit jako podklad pro lokalizaci pomocí systému RSS, který pracuje na základě měření přijatého výkonu v závislosti na vzdálenosti od zdroje signálu. Je-li dobře zmapován prostor, kde se signál šíří, je možné určit polohu objektu v daném místě s velmi malou odchylkou.

V teoretické části je popsáno šíření signálu a vybrané modely, které toto šíření popisují.

V praktické části je popsáno měření v prostorech, které jsou odlišné z hlediska šíření signálu. Je zde popsána mnou vytvořená aplikace v prostředí Matlab, která umožňuje porovnání naměřených hodnot s modely šíření signálu z teoretické části. V závěru práce je zhodnoceno, jak teoretické modely odpovídaly naměřeným hodnotám.

1 ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

Základem dnešních mobilních a datových služeb je bezdrátová komunikace, aby takováto komunikace mohla proběhnout, musí dojít k odpoutání vlny od vodiče (antény) a jejímu přijetí jinou anténou. Tento děj nám popisují Maxwellovy rovnice.

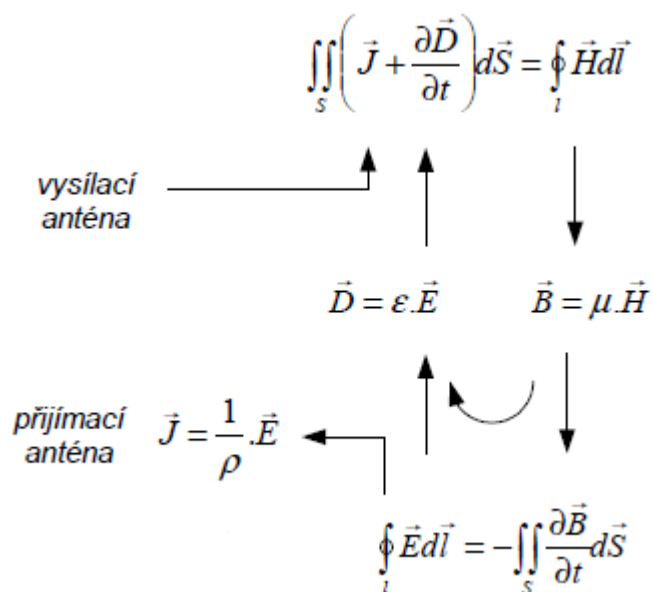
$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad (1)$$

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \iint_s \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad (2)$$

Tímto přeměňováním se může elektromagnetické pole odpoutat od vodiče (antény) kterým prochází proud a šířit se do okolí. V izolantu (vzduchu) se vlna šíří pomocí Maxwellova posuvného proudu[1].

$$\sum I = \oint_l \vec{H} d\vec{l} \quad (3)$$

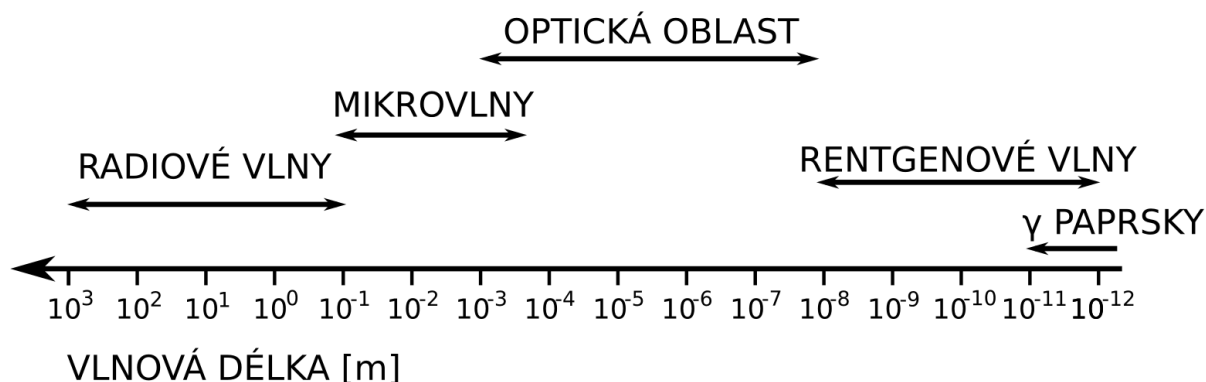
Přeměnu elektrického pole na magnetické na vysílací anténě, vztahy mezi jednotlivými ději a přijetí na přijímací anténě názorně popisuje obrázek 1.



Obrázek 1 - Maxwellovy rovnice[1]

1.1 Rozdělení frekvenčního pásma

Jednou ze základních vlastností elektromagnetické vlny je její frekvence. Elektromagnetické záření se vyskytuje ve velkém rozsahu frekvencí viz. Obrázek 2.



Obrázek 2 - elektromagnetické spektrum[10]

K radiovému přenosu však nevyužíváme celé elektromagnetické spektrum. Pro radiový přenos využíváme záření s vlnovou délkou od jednoho milimetru až po tisíce kilometrů[3]. Jejich rozdělení je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 - Rozdělení radiových vln[2]

Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka	Český název
ELF	3mHz-3kHz	1000km-100km	Extrémně dlouhé vlny
VLF	3kHz-30kHz	100km-10km	Velmi dlouhé vlny
LF	30kHz-300kHz	10km-1km	Dlouhé vlny
MF	300kHz-3MHz	1km-100m	Střední vlny
HF	3MHz-30MHz	100m-10m	Krátké vlny
VHF	30MHz-300MHz	10m-1m	Velmi krátké vlny
UHF	300MHz-3GHz	1m-10cm	Ultra krátké vlny
SHF	3GHz-30GHz	10cm-1cm	Mikrovlny
EHF	30GHz-300GHz	1cm-1mm	Mikrovlny

1.2 Pásmo UKV

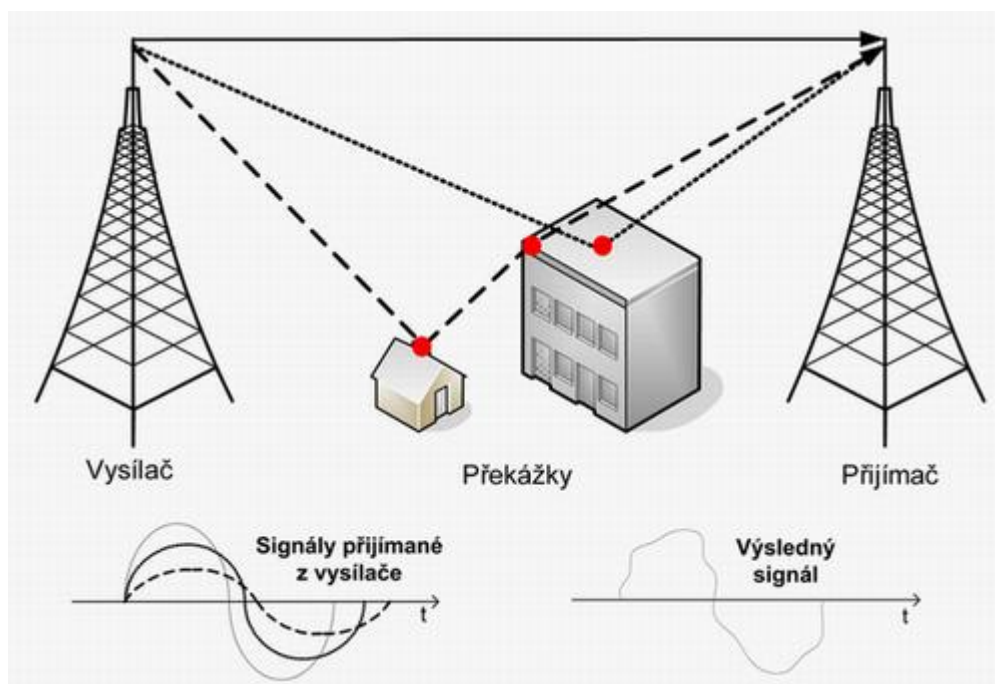
Současné mobilní služby pracují převážně v pásmu UKV. Důvodem použití tohoto pásma jsou výhodné vlastnosti elektromagnetických vln v této vlnové délce. Mezi důležité vlastnosti těchto vlnových délek patří:

- a. relativně malé ztráty šířením,
- b. dobrá schopnost odrážet se,
- c. ohýbat se a pronikat překážkami v zástavbě.

Navíc tyto vlnové délky umožňují konstrukci malých antén do mobilních telefonů[2].

Ztráty šířením (Path loss) - Tento typ ztrát je daný především prostředím, kterým se signál šíří a vzdáleností mezi anténami. Tato hodnota je konstantní a udává střední hodnoty signálu v daném bodě. Hodnota se určí průměrem z velkého počtu měření v dostatečném časovém intervalu na daném místě[2,8].

Mnohocestné šíření - V případě pevného spoje téměř nedochází k mnohocestnému šíření, protože antény bývají směrové a tak dojde třeba jen k jednomu odrazu, který je v blízkém směru a má malé zpoždění (jednotky nanosekund), tudíž přijímaný signál nám tolik neovlivní. U mobilních spojů dochází k mnohocestnému šíření neustále. K mnohocestnému šíření dochází mnoha paprsky ze všech směrů, zpoždění tudíž může být hodně velké (desítky mikrosekund)[2].



Obrázek 3 - mnohocestné šíření[4]

Pomalé úniky (slow fading) - Jedná se o útlum způsobený zastíněním spoje a to například terénem, zástavbou, stromy nebo lidmi. Při pohybu mobilní antény dochází k pomalému kolísání úrovně signálu. Z hlediska vlnových délek se jedná o rozdíl alespoň v řádu desítek a signál při takovém zastínění může poklesnout až o desítky decibel[2,8].

Rychlé úniky (fast fading) - Rychlé úniky způsobuje především mnohocestné šíření. Způsobují velké a rychlé kolísání signálu. Dochází k fázovému sčítání velkého množství odrazů v prostoru. Rychlé úniky jsou velmi proměnné v čase, což je způsobeno pohybem mobilní antény a měnícím se okolím[2,8].

1.3 Šíření vln ve volném prostoru

Pro izotropní zářič, který je umístěn do volného prostoru, kde nedochází k odrazům, platí, že Střední hodnota Poyntingova vektoru bude mít hodnotu

$$S = \frac{P_c}{4\pi r^2} = E_{ef}H_{ef} = \frac{E_{ef}^2}{120\pi} \quad (4)$$

kde,

P_c - je celkový vyzářený výkon izotropním zářičem,

120π - charakteristická impedace volného prostoru[2].

Po úpravě rovnice dostaneme výraz pro efektivní hodnotu elektrického pole ve vzdálenosti r od zdroje

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_cD}}{r} = \frac{\sqrt{30P_1G}}{r} \quad (5)$$

kde,

D - je směrovost antény,

G - je zisk antény[2].

Pro amplitudu elektrického pole potom platí

$$E = \sqrt{2}E_{ef} = \frac{\sqrt{60P_cD}}{r} = \frac{\sqrt{60P_1G}}{r} \quad (6)$$

Na vstupu přijímací antény bude výkon

$$P_P = \frac{P_V G_V}{4\pi r^2} \cdot \frac{G_P \lambda^2}{4\pi} \quad (7)$$

Z této rovnice můžeme vyjádřit přenosovou rovnici spoje

$$P_P = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{P_V}{G_V G_P} \quad (8)$$

Z tohoto výrazu můžeme určit přenosové ztráty, které jsou dané poměrem přijatého a vysílaného výkonu. Tyto ztráty nazýváme ztráty volným prostorem a definují pokles výkonu mezi přijímací a vysílací anténou.

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (9)$$

Vztah v rovnici (8) platí pro šíření volným prostorem a nepočítá s jinými ztrátami, než jsou ztráty šířením volným prostorem. Při skutečném vysílání však musíme počítat s mnoha jinými případy ztrát jako například odraz elektromagnetické vlny, ztráty absorbcí a rozptylem, které jsou dány vlastnostmi konkrétních míst, kde se vlna šíří. Proto se tato rovnice upravuje pro použití v konkrétních podmínkách[2].

Obecně můžeme ostatní ztráty charakterizovat činitelem tlumení W , který přidáme do rovnic a dostaneme celkovou velikost ztrát[2].

$$L_c = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_V G_P} W \quad (10)$$

1.4 Radiokomunikační rovnice

Radiokomunikační rovnice je jeden z nejdůležitějších vztahů v radiové komunikaci. Udává souvislost mezi výkonem, který vyzařuje vysílač a výkonem, který přijme přijímač. Rovnice bere na vědomí všechny důležité faktory, které mohou šíření tohoto signálu ovlivnit. V základním tvaru však platí pouze pro idealizované prostředí.

$$P_r = P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 L_\varphi L_p G_r \quad (11)$$

kde,

P_t je výkon, který je odevzdán vysílačem do vstupu antény.

G_t Je zisk vysílací antény. Vyjadřuje schopnost antény soustřeďovat vyzařování do jednoho směru. Zisk je počítán jako poměr výkonu, který anténa vysílá do hlavního směru a výkonu, který by do tohoto směru vyzařoval izotropický zářič, který vyzařuje do všech směrů stejně. V praxi se zisk antény neporovnává s izotropickým zářičem, ale s půlvlnným dipólem, který má zisk 2,16 dB oproti izotropickému zářiči.

G_r Je zisk přijímací antény. Zisk přijímací antény je analogický k zisku Vyzařovací antény, nýbrž nevyjadřuje schopnost vysílat signál, ale přijímat signál.

$\frac{\lambda}{4\pi d}$ Jsou ztráty šířením ve volném prostoru. Umožňují určit, Jaká část z vyslaného výkonu dopadne na přijímací anténu.

λ Je vlnová délka.

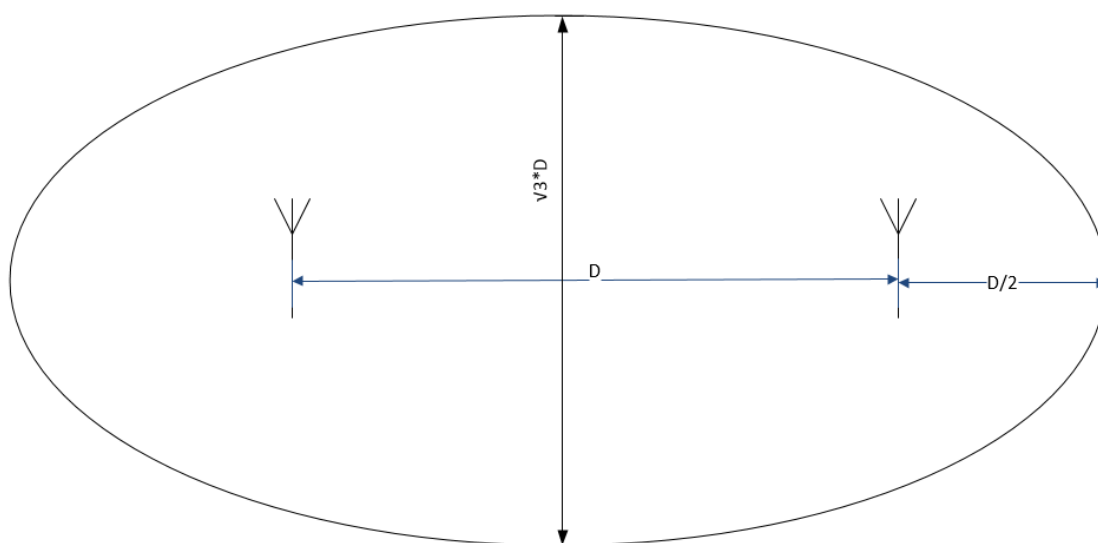
d Je přímá vzdálenost obou antén.

L_φ Jsou ztráty nepřesným zaměřením antény. Vznikají, když přijímací anténa není natočena přesně do směru vysílání. Tyto ztráty jsou problémem hlavně u antén s velkou směrovostí, kde i malé odchylky v zaměření mohou znamenat velké ztráty.

L_p Jsou polarizační ztráty. Vznikají tehdy, když vlny dopadající na přijímací anténu mají jinou polarizaci, než anténa přijímací. Například když elektrické pole vysílaného signálu má vertikální polarizaci a přijímací anténa je natočena pro přijímání horizontální polarizace[5].

1.5 Měření na volném prostranství

Místo měření velice ovlivňuje konečný výsledek měření. Běžná anténní měření se provádějí na volném prostranství, protože je to nejjednodušší a podmínky lze vcelku dobře napodobit kdekoliv. Měření na volném prostranství má svá pravidla, hlavně co se týká rozměru prostoru a vzdálenosti antén. Viz obrázek 4. Zkušební stanoviště musí být na plochem rovném terénu a nesmí na něm být žádné překážky. V místě měření by se neměla vyskytovat žádná silná elektromagnetická pole. Rušivý signál by měl být alespoň o 20 dB slabší než úroveň vysílaného signálu[7].



Obrázek 4 - měření na volném prostranství[6]

Zkušební stanoviště ve tvaru elipsy je výhodné, protože vlna, která by se případně odrazila od překážky na okraji elipsy, by byla utlumená minimálně o 6 dB. Na okrajích pracoviště však žádné velké odrazové plochy nebývají, tak tento tvar poskytuje dostatečnou ochranu proti odrazům měřeného signálu[6].

2 MODELÝ ŠÍŘENÍ SIGNÁLU

Pro popis šíření signálu se používají modely šíření, které se snaží určit, jak se signál v jakém místě zatlumí a jaký výkon bude mít v jednotlivých místech. Modely šíření se používají i v komplikovaném prostředí, tedy v městské zástavbě a uvnitř budov, kde dochází k mnoha odrazům, ohybům a signál se zde šíří mnoha cestami.

2.1 rozdělení modelů šíření

K popsání toho, jak se bude signál šířit, vzniklo množství modelů, které popisují předpokládané hodnoty síly signálu v jednotlivých místech zájmu.

2.1.1 Empirické modely

Empirické modely jsou velmi jednoduché a rychlé na výpočet. Modelování je založeno na velkém počtu měření, z nichž se určí průběh funkce, která nejlépe odpovídá naměřeným datům.

Základní empirický model je definovaný rovnicí

$$L_p = L_0(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (12)$$

kde L_p je útlum šířením v dB

L_0 je referenční útlum v dB ve vzdálenosti d_0

d_0 je referenční vzdálenost. Typicky se volí 1 km v makrobuňkách a 1 m v mikrobuňkách a pikobuňkách.

n je činitel určující spád útlumové křivky, který závisí na prostředí.

Tabulka 2 - koeficienty útlumu pro různá prostředí[2]

Typ prostředí	n
Volný prostor	2
město	2,5-4
Město - při zastíněný	3-5
Uvnitř budov - přímá viditelnost	1,6-1,8
Uvnitř budov - bez přímé viditelnosti	4-6

2.1.2 Deterministické modely

Deterministické modely se snaží modelovat šíření signálu pomocí fyzikálních principů. Snaží se modelovat šíření vlny v materiálově i geometricky složitých prostředích. Nevýhodou takového modelování je potřeba přesné znalosti prostoru, kde se vlna šíří. Aby tyto modely nebyly tolik složité, dochází k jejich zjednodušování. Při zjednodušení deterministického modelu se může uvažovat:

- jednodušší popis prostředí
- periodizování okolního prostředí

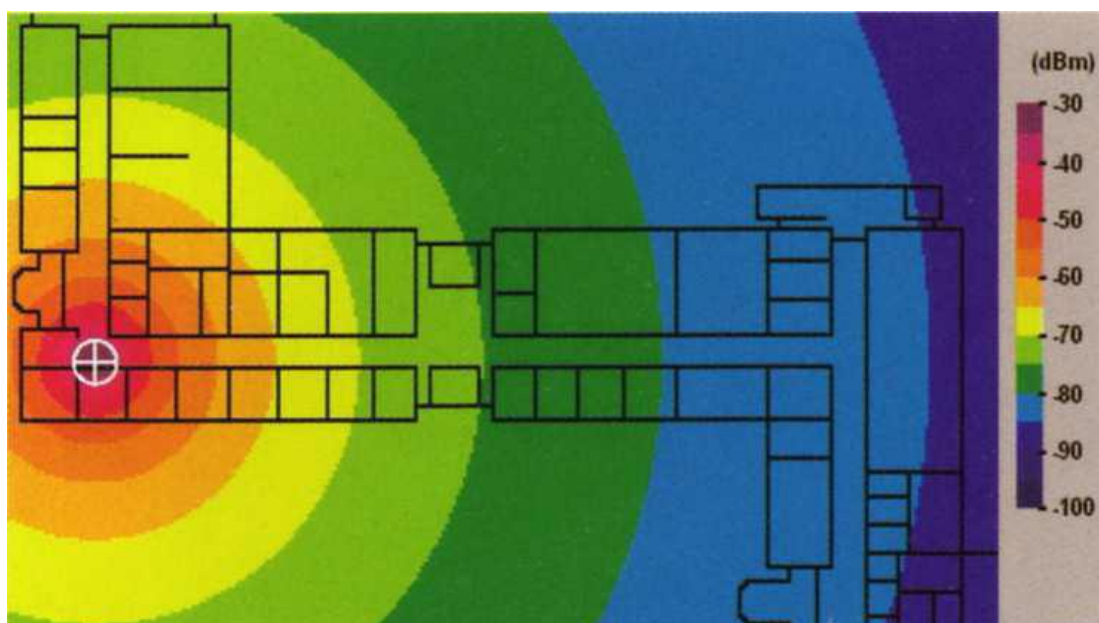
Nejlepší postup modelování, který nejvíce odpovídá skutečnému šíření paprsku je metoda sledování paprsku (ray tracing). Při tomto modelování se využívá principu geometrické optiky, kdy je každý směr šíření nahrazen paprskem. Čím více paprsků dokážeme popsat, tím je tento model přesnější, avšak náročnější na výpočet. Tato metoda modelování je nejlepší v husté zástavbě nebo uvnitř budov, kde dochází k mnoho odrazům[2].

2.1.3 Semi-deterministické modely

Semi-deterministické, někdy také semi-empirické, modely jsou kombinací deterministických a empirických modelů. Základem těchto modelů je deterministický model, který se upraví podle naměřených výsledků[2].

2.2 One-Slope model

Tento model je odvozený od základního empirického modelu. Je ideální k rychlému zjištění přibližného útlumu signálu. Nepřesnost modelu je při dobře zvolených parametrech menší než 10 dB. Tento model nebere ohled na překážky, proto je útlum signálu stejný ve všech místech stejně vzdálených od zdroje signálu[8].



Obrázek 5 - příklad šíření signálu podle One-slope modelu

Vztah pro výpočet útlumu u One-Slope modelu je následující

$$L(d) = L_1 + 10n \log(d) \quad (13)$$

kde,

$L(d)$ je výsledná hodnota ztrát šířením [dB],

d je přímá vzdálenost mezi vysílací anténou a bodem pozorování [m],

L_1 je referenční útlum pro vzdálenost 1m [dB],

n je spádový koeficient.

Parametry modelu se upravují podle naměřených hodnot, obecně však platí.

- ve velkých prostorech s přímou viditelností, kde nedochází k vlnovodnému efektu, je hodnota n přibližně 2.

- Při zastínění spoje překážkou se udává hodnota $n = 4$.
- Na chodbách, kde nastává vlnovodný efekt, je hodnota $n < 4$.

2.3 Model ITU-P P.1238

Tento model je podobný One-Slope modelu. Liší se však ve výpočtu referenčního útlumu, tudíž má jiné obecné hodnoty pro zadávané parametry. Tento model bere v úvahu i průchod signálu podlažími[8].

Výpočet střední hodnoty útlumu pro tento model je následující.

$$L(d) = 20\log(f) + 10n\log(d) + L_f(k_f) - 28 \quad (14)$$

kde,

$L(d)$ je výsledná hodnota ztrát šířením [dB],

d je přímá vzdálenost mezi vysílací anténou a bodem pozorování [m],

f je frekvence [MHz],

n je spádový koeficient.

L_f je činitel útlumu pro průchod podlažím [dB],

k_f je počet podlaží[8].

Tabulka 3 - Parametr n pro různé interiéry[8]

Frekvence	Obytné interiéry	Kanceláře	Komerční prostory
0,9 GHz	-	3,3	2
1,2-1,3 GHz	-	3,2	2,2
1,8-2 GHz	2,8	3	2,2
4 GHz	-	2,8	2,2
5,2 GHz	-	3,1	-

2.4 Multi-Wall model

Je semi-empirický model, který počítá i s členěním interiéru a tak dokáže lépe popsat šíření signálu. Pro modelování tohoto modelu je potřeba znát rozmístění stěn, díky čemuž je tento model složitější na výpočet. Nevýhodou tohoto modelu je, že nedokáže počítat s vlnovodným efektem vznikajícím v dlouhých a úzkých prostorech[8].

Útlum signálu u multi-Wall modelu je dán vztahem

$$L(d) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + \sum_i k_{wi} L_{wi} + k_k^{\left(\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right)} L_f \quad (15)$$

kde,

$L(d)$ je celkový útlum [dB],

d je vzdálenost [m],

λ je vlnová délka [m],

k_{wi} je počet příček typu i , které protíná spojnice vysílač - přijímač,

L_{wi} je činitel útlumu pro příčku typu i [dB],

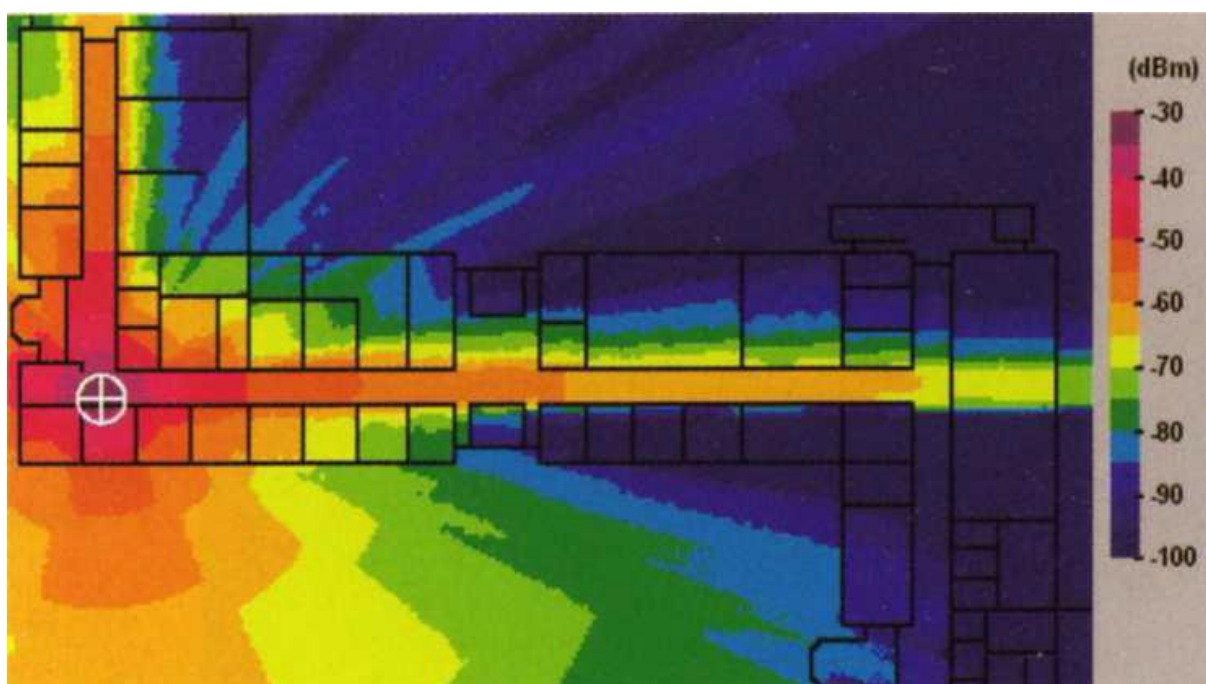
k_f je počet podlaží, která protíná spojnice vysílač - přijímač,

L_f je činitel útlumu pro průchod podlažím [dB],

b je konstanta nelinearity útlumu průchodem skrz více podlaží.

První člen vzorce představuje ztráty volným prostorem, z toho vyplývá, že bez příček je to vlastně One-Slope model. Konstanta nelinearity b představuje nárůst ztrát při průchodu přes víc podlaží. Při takovýchto podmínkách se již signál nešíří skrz podlaží ale výtahovými šachtami, schodišti a odrazy od okolních budov. Pokud se vlna šíří méně než přes tři podlaží, je možno zanedbat exponent koeficientu k_f a počítat jednoduchý součin $k_f L_f$ [8].

Při popisu šíření je těžké říct jaký útlum má každá jednotlivá příčka, protože šíření signálu ovlivňuje i vybavení místností, zavřené či otevřené dveře a další faktory, proto se obvykle spokojíme s rozdělením na slabé a silné příčky z hlediska útlumu signálu[8].



Obrázek 6 - šíření signálu podle Multi-Wall modelu

I přes složitější výpočet nám Multi-Wall model neposkytne přesnou představu o šíření signálu. Model totiž nepočítá s vícenásobnými odrazy od překážek, kovovými překážkami a jak již bylo zmíněno vlnovodným efektem v dlouhých chodbách[8].

2.5 Dual-Slope model

Je vhodný pro prostory s přímou viditelností a větší vzdáleností, protože narozdíl od One-Slope modelu počítá i s Fresnelovým bodem zlomu[8].

$$d_0 = \frac{h_1 h_2}{\lambda} \quad (16)$$

kde,

d_0 je Fresnelův bod zlomu [m],

$h_{1,2}$ jsou výšky přijímací antény [m],

λ vlnová délka [m].

Výpočet se poté rozdělí na část před bodem zlomu a po něm.

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log(d) \quad (17)$$

$$L(d) = L_1 + 10n_1 \log(d_0) + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (18)$$

kde,

$L(d)$ je výsledná hodnota ztrát šířením [dB],

L_1 je referenční útlum pro vzdálenost 1m [dB],

d je přímá vzdálenost mezi vysílací anténou a bodem pozorování [m],

n_1 je spádový koeficient pro $d < d_0$,

n_2 je spádový koeficient pro $d > d_0$,

2.6 ITU-R P.1411 model pro přímou viditelnost

Tento model je odvozen od Dual-Slope modelu a je určen pro pásmo UKV. Jedná se tedy o empirický model, který počítá i se zastíněním přenosové trasy[8].

bod zlomu se zjistí rovnicí

$$d_0 = \frac{4h_1 h_2}{\lambda} \quad (19)$$

a referenční hodnota ztrát L_{BP} se poté spočítá

$$20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda} \quad (20)$$

když $d \leq d_0$ tak platí

$$L_{min}(d) = L_{BP} + 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (21)$$

$$L_{min}(d) = L_{BP} + 20 + 25 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (22)$$

když $d \geq d_0$ tak platí

$$L_{min}(d) = L_{BP} + 40 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (23)$$

$$L_{min}(d) = L_{BP} + 20 + 40 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (24)$$

kde,

$L_{min}(d)$ je dolní hodnota ztrát šířením [dB],

$L_{max}(d)$ je horní hodnota ztrát šířením [dB],

2.7 Hatův model

Jeden z nejstarších a nejrozšířenějších modelů. Model je odvozen od měření v Japonsku a popisuje šíření signálu v různých částech měst. Jeho parametry jsou upravovány pro použití v městech s jinou architekturou[2,8].

Výpočet střední hodnoty ztrát je následující.

$$L(d) = L_1 + 10n \log(d) \quad (25)$$

kde L_1 se vypočítá

$$L_1 = C_1 + C_2 \log(f) - 13,82 \log h_b - a(h_m) + C_0 \quad (26)$$

a kde,

L je střední hodnota ztrát šířením [dB],

d je vzdálenost [m],

f je frekvence [MHz],

h_b je výška pevné antény,

h_m je výška mobilní antény,

C_0 je koeficient pro šíření v zástavbě,

C_1, C_2 jsou indexy pro různé kmitočty,

$a(h_m)$ je koeficient závisející na frekvenci a hustotě zástavby.

3 MĚŘENÍ

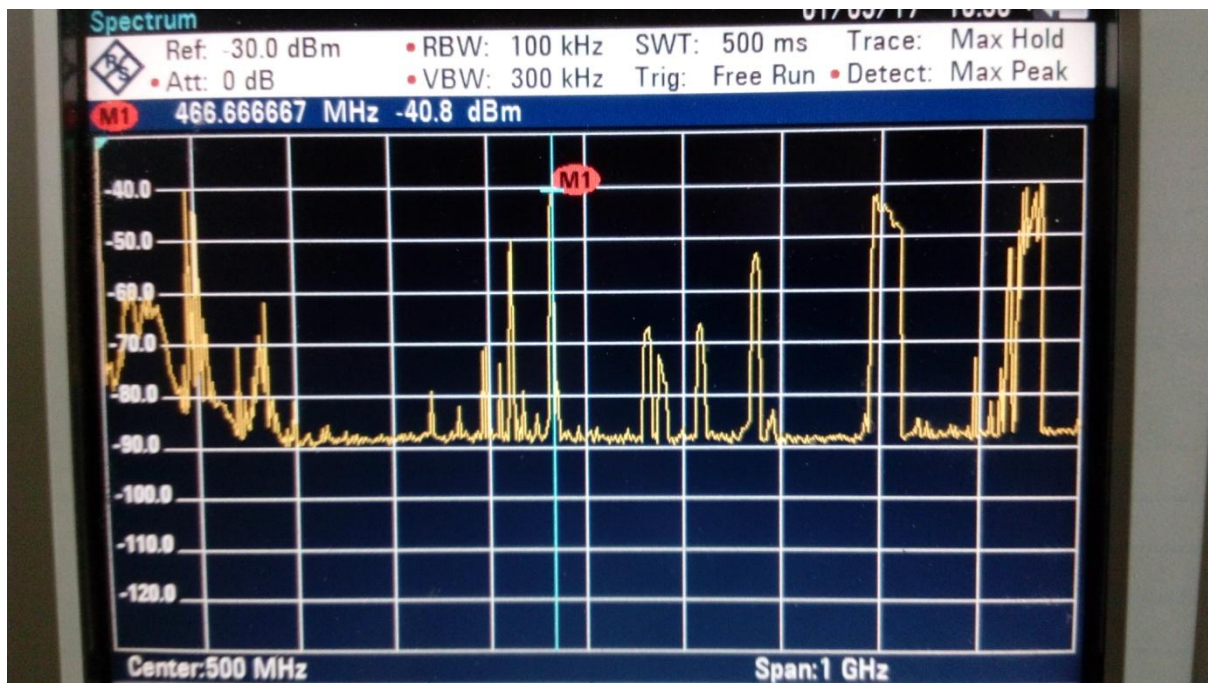
Podstatnou částí této bakalářské práce je praktické měření útlumu signálu. Pro měření bylo vybráno několik prostorů, které jsou navzájem odlišné, aby byly patrné rozdíly šíření signálu v různých částech budov. K měření byl použit generátor Rohde & Schwartz SMB 100A, spektrální analyzátor Rohde & Schwartz FSH4 a antény Audio-technika ATW-A49.

Pro měření byly vybrány frekvence v pásmu UKV, a to 440 a 900 MHz, což jsou hraniční frekvence antén použitých při měření. Mezi těmito dvěma frekvencemi byly pro větší počet vzorků vybrány ještě další tři frekvence, a to 600, 700 a 800 MHz.

Při všech měřeních byl použit stejný vysílaný výkon, a to 30 dBm.

3.1 Rušení

Při měření musíme počítat také s ostatními signály, které se v místě měření šíří. Před měřením by tedy mělo být změřeno frekvenční pásmo, v kterém měříme, aby bylo jisté, že se na měřicím zařízení zobrazuje námi vysílaný signál. Na obrázku 7 je rušivý signál změřený v prostorách školy, kde probíhala většina měření.



Obrázek 7 - Rušení měřeného pásma

Na obrázku 7 je vidět, že rušivý signál dosahuje hodnot až -40 dBm, což je při některých měřeních hodnota vyšší, než měl námi vysílaný signál. Na námi měřených frekvencích jsme neměli s odstupem signál/šum problém. Nejhorší případ nastal při měření průchodu podlažími, kdy síla námi vysílaného signálu klesla až na hodnoty přes -40 dBm. Na frekvenci

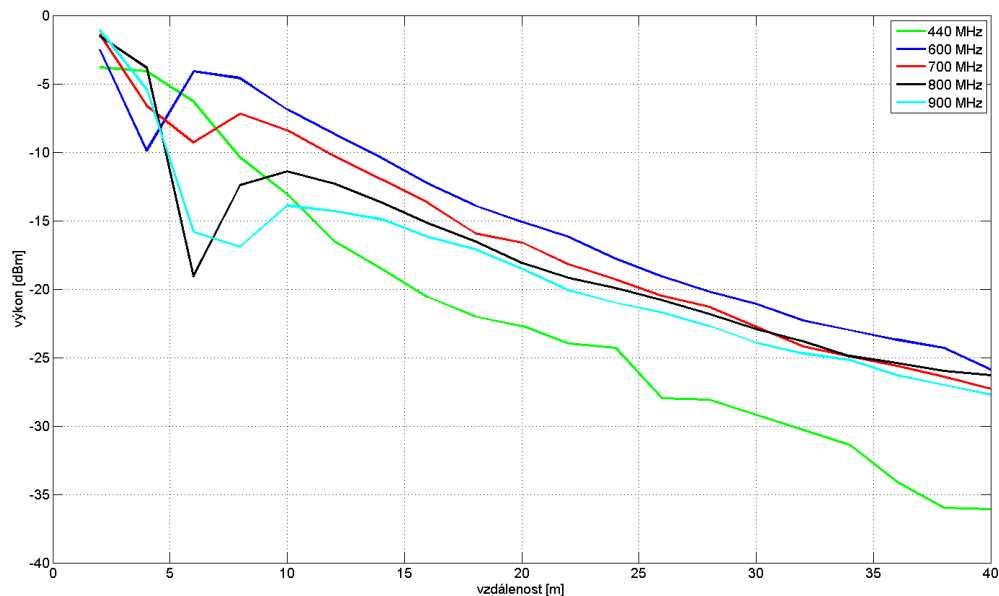
800 MHz byl šum patrný a dosahoval hodnot -50 dBm. Jednalo se o signál T-Mobile LTE 800[9].

3.2 Měření na volném prostoru

Abychom mohli posoudit, jaký má komplikované prostředí dopad na útlum signálu, bylo žádoucí nejprve změřit útlum na volném prostranství, kde je signál vystaven jen málo nežádoucím vlivům jako odraz signálu od země. Dostaneme tak představu o tom, jak se samotný signál šíří. Fotografie z měření na volném prostoru je na obrázku 8.



Obrázek 8 - měření na volném prostoru



Obrázek 9 - Naměřené hodnoty z měření na volném prostoru

Z obrázku 9 je patrné, že útlum jednotlivých frekvencí je velmi podobný. Útlum jednotlivých frekvencí je v rozmezí do 10 dBm. Tedy kromě frekvence 440 MHz, která má útlum vyšší. Zároveň dochází k velkému útlumu v blízkém okolí antény, a to na vzdálenosti 6 m, který je pravděpodobně způsoben odrazy od země.

3.3 Měření šíření signálu chodbou

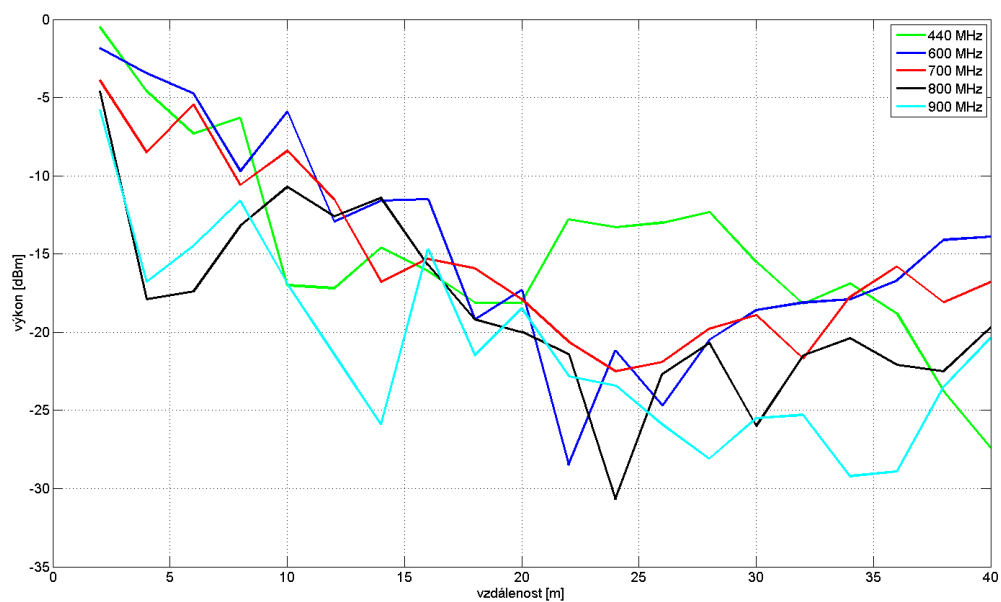
Typickým prostorem, kde se vlna v budovách šíří jsou chodby. Chodby jsou pro šíření signálu typické v tom, že zde nejsou překážky a dochází zde k odrazům signálu, takže jeho útlum není tak velký. V dlouhých chodbách může docházet k vlnovodnému efektu, který také pomáhá šíření signálu.

Měření šíření signálu chodbou bylo provedeno ve školní budově ve večerních hodinách, aby výsledky nebyly ovlivněny výskytem osob. Fotografie chodby je na obrázku 10.



Obrázek 10 - Měření šíření signálu chodbou

Naměřené výsledky jsou v grafu na obrázku 11.



Obrázek 11 - Naměřené hodnoty z měření šíření signálu chodbou

Již na první pohled jsou patrné velké výkyvy v naměřených hodnotách. Dle mého názoru jsou tyto rozdíly dány velkým počtem sčítaných odražených signálů v bodě měření. I když jsou zde velké rozdíly mezi měřeními na po sobě jdoucích vzdálenostech, Hodnota výkonu signálu je na největších vzdálenostech mezi -13 a -28 dBm, což jsou hodnoty při nejhorším srovnatelné s měřením na volném prostoru, spíše lepší. Je zde také patrný trend, kdy všechny signály, kromě signálu na frekvenci 440 MHz, mají velký útlum ve vzdálenosti mezi 20ti a 30ti metry a poté se síla signálu opět zvyšuje.

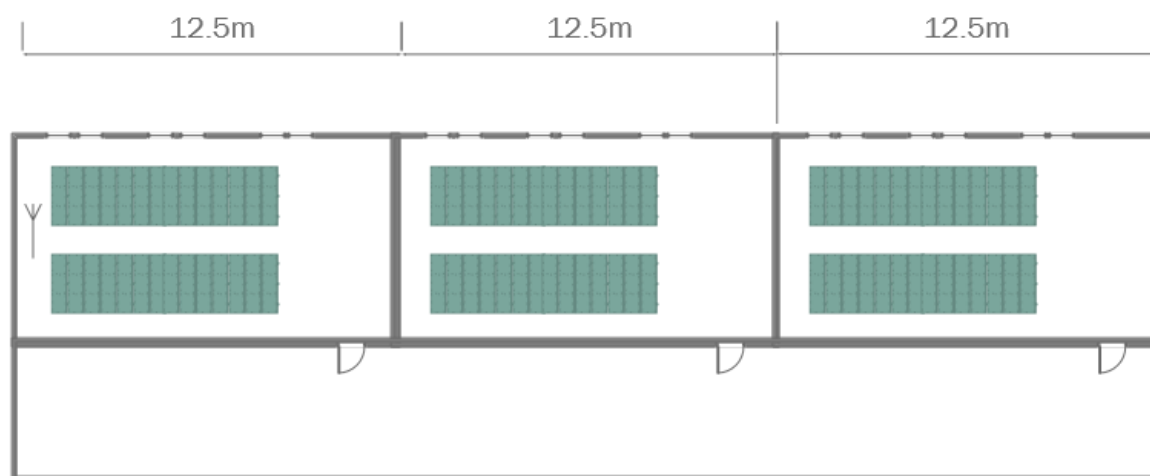
3.4 Měření průchodu signálu stěnami 1

Jako jedno z měření v interiéru bylo zvoleno měření šíření signálu při průchodu stěnami. Šlo o prostor učeben, kde nebylo tolik nábytku a signál se tak mohl odrážet přímo od stěn nebo se šířit uličkou mezi lavicemi. Viz obrázek 12.



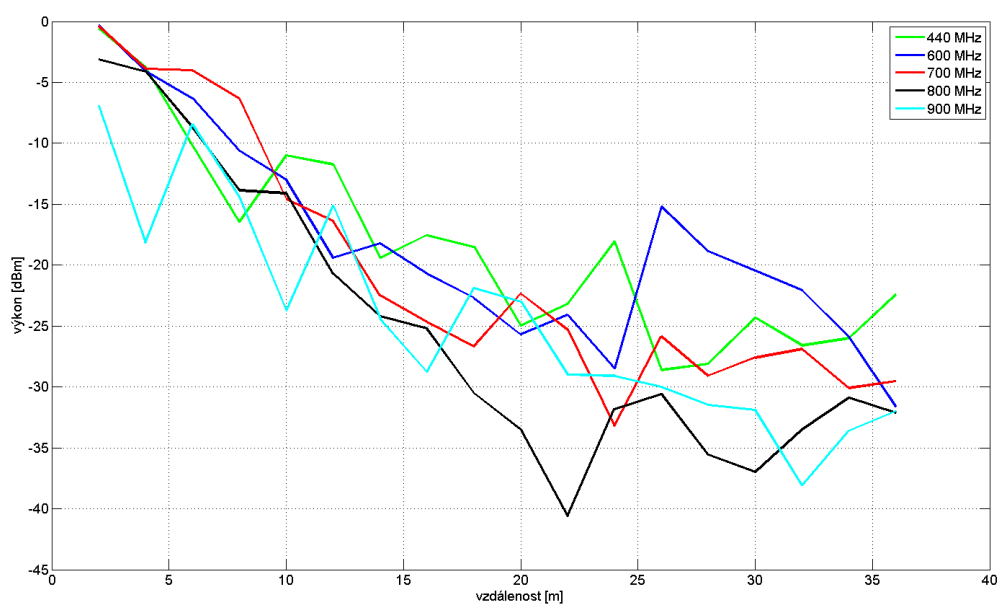
Obrázek 12 - Fotografie prostoru při měření stěn 1

Signál jsem měřil nejdříve při přímé viditelnosti a při větší vzdálenosti již za stěnami. Stěny mezi učebnami byly široké 30 cm. Náčrt prostoru je na obrázku 13.



Obrázek 13 - Náčrt prostoru při měření stěn 1

Hodnoty z tohoto měření jsou v grafu na obrázku 14.



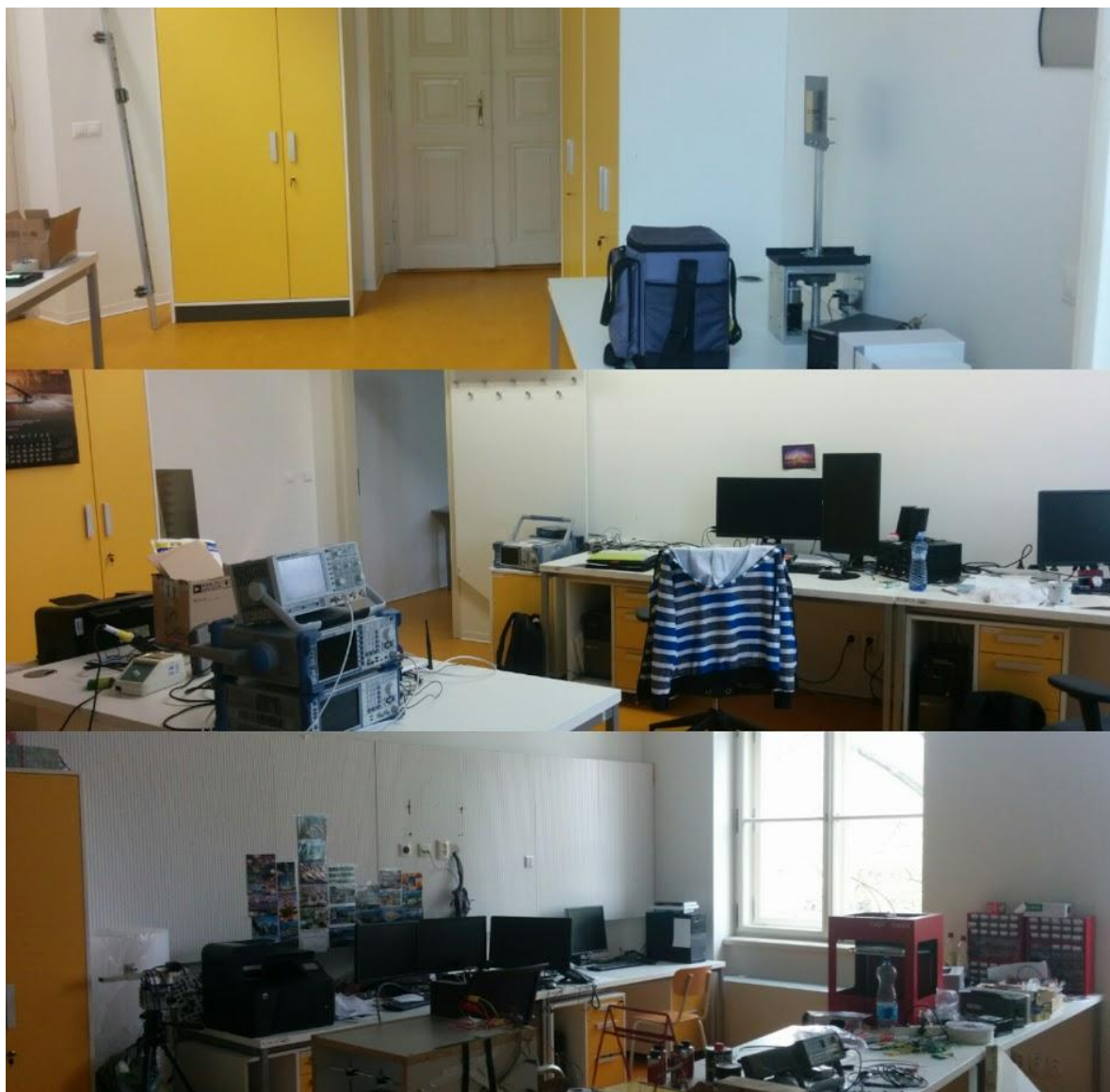
Obrázek 14 - Naměřené hodnoty z měření průchodu stěnami 1

Na obrázku 14 můžeme vidět, že signál, na rozdíl od měření na volném prostranství, má pro jednotlivé frekvence mnohem větší odchylky. Je to dáno sčítáním přímého signálu a signálů odražených od stěn. Rovněž můžeme vidět, že po průchodu první stěnou se signál na všech frekvencích ztlumí asi o 5 až 10 dBm. Při průchodu druhou stěnou už se však všechny

signály nezatlumí. Naopak u většiny signálů hodnota přijímaného signálu vzroste. U většiny signálů je tento nárůst v rozmezí od 0,5 do 10 dBm. Extrémním případem je pak signál s frekvencí 600 MHz, kde se signál při průchodu stěnou zesílil o 13 dB. Jediným signálem, u kterého při průchodu druhou stěnou došlo k výraznému poklesu úrovně signálu je frekvence 440 MHz.

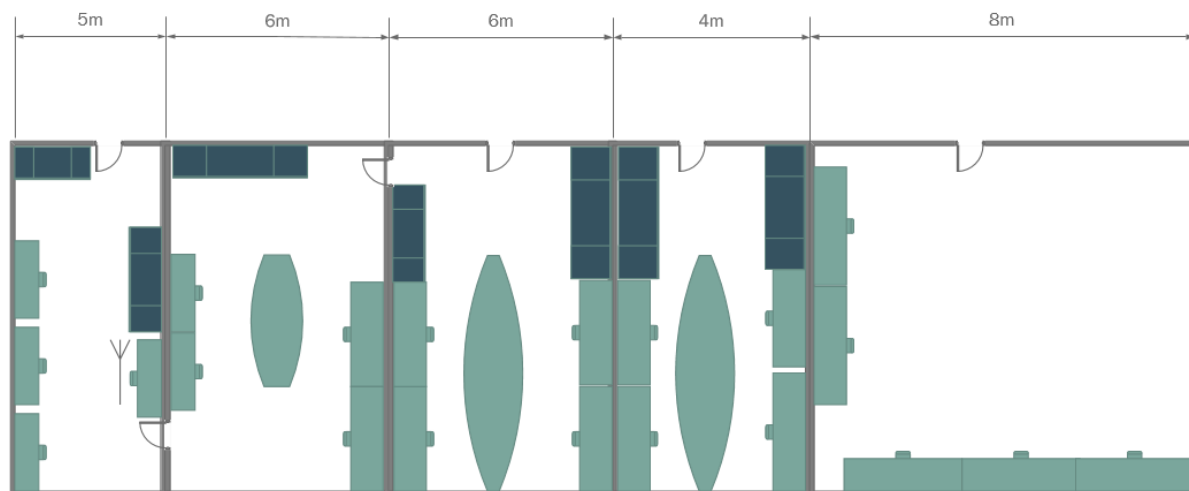
3.5 Měření průchodu signálu stěnami 2

Pro další měření v interiéru byl zvolen prostor kanceláří. Kanceláře byly vybaleny nábytkem, tudíž zde docházelo k mnoho odrazům a zatlumení od skříní a vybavení interiéru. Viz obrázek 15.



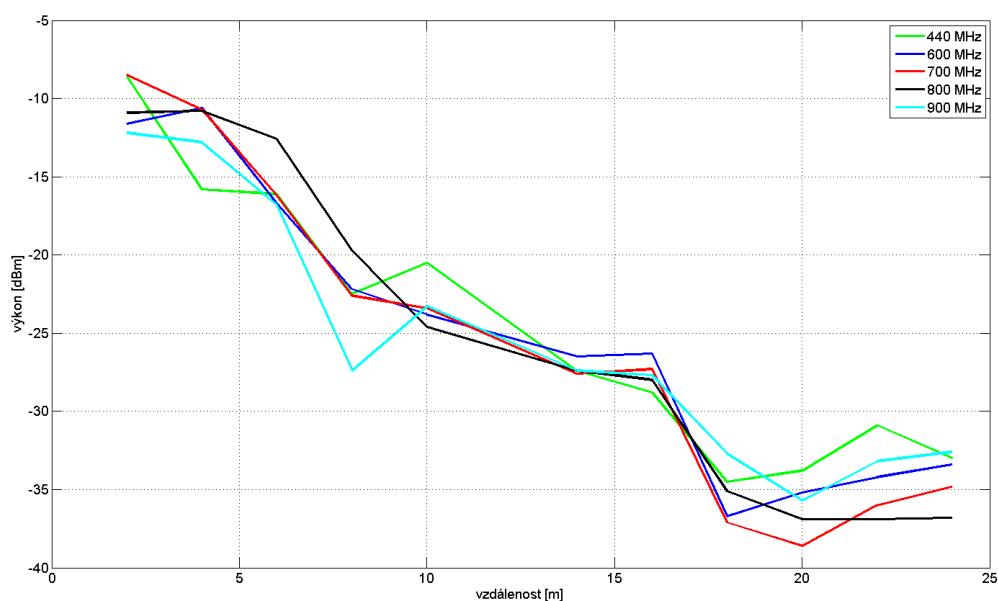
Obrázek 15 - Fotografie prostoru při měření průchodu stěnami 2

V tomto prostoru jsem první bod měření měl již za stěnou. V prostoru se nacházely další 3 stěny, přes které se signál šířil, viz obrázek 16.



Obrázek 16 - Náčrt prostoru při měření stěn 2

První stěna měla šířku 40 cm. Další stěny, které oddělovaly kanceláře, měly šířku 20 cm.



Obrázek 17 - Naměřené hodnoty z měření průchodu stěnami 2

Z obrázku 17 je patrné, že na rozdíl od měření na volném prostoru, prvnímu měření průchodu stěnami, při tomto měření byla hned před prvním naměřeným vzorkem stěna. Tím pádem hned první vzorek má nižší úroveň signálu. U měření, kde první vzorky měly přímou

viditelnost, byla první hodnota okolo 0 až -5 dBm. Při tomto měření se projevilo zatlumení stěnou a první naměřená hodnota byla v rozmezí -8 až -12 dB. U tohoto měření se na rozdíl od prvního měření průchodu stěnami patrný útlum na každé ze stěn. Signály měly velmi podobný útlum, hlavně v třetí a čtvrté místnosti, které byly úzké, a nedocházelo zde k tolika odrazům. Signály měly největší rozdíl hodnot v druhé a čtvrté místnosti, ale i přes tyto rozdíly neměly mezi sebou výsledky takové odstupy, jako tomu bylo při prvním měření průchodu stěnami. Rozdíl mezi měřeními průchodu stěnami byl také v materiálu stěn. V případě měření 2, které probíhalo ve starší budově, byly zdi cihlové. Při měření 1 byly učebny odděleny příčkami nejspíše ze sádkartonu nebo jiného lehkého materiálu.

3.6 Měření průchodu signálu podlažími

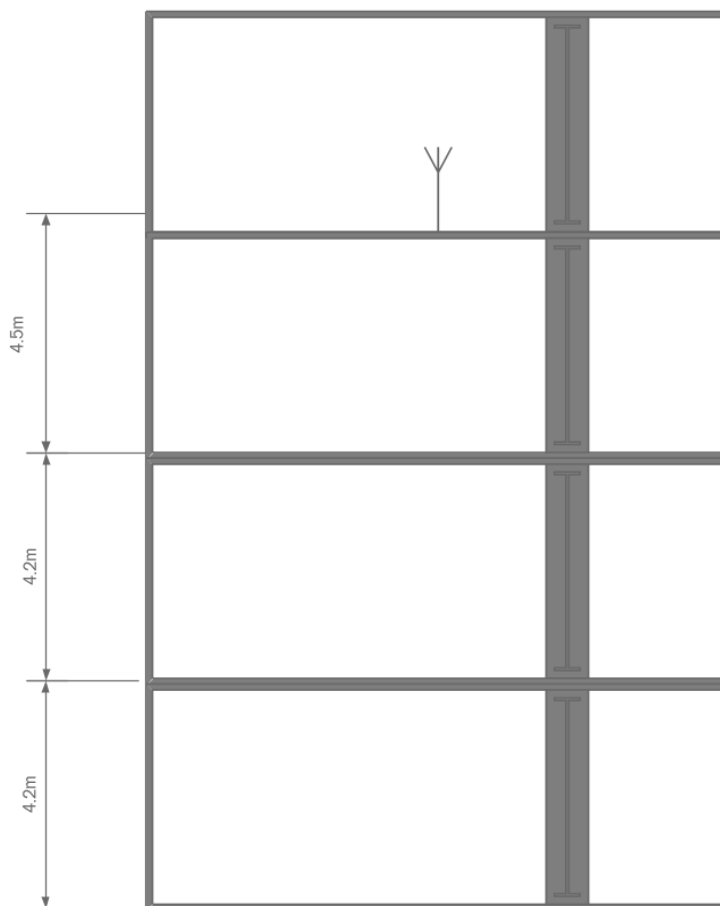
Typickou překážkou, na které v budovách dochází k velkému útlumu, jsou podlahy, respektive stropy. Signál se přes ně šíří velice špatně, kvůli jejich šířce a materiálu, z něhož je podlaha udělána. Často také dochází k tomu, že signál se do jiného patra lépe šíří po schodištích a výtahovými šachtami, nežli přímo stropy.

K měření šíření signálu napříč podlažími byla zvolena respiria ve školní budově. Respiria jsou přesně pod sebou, mají stejné rozměry a je v nich jen minimum nábytku, což by mělo zaručit dobré podmínky pro měření. Viz obrázek 18.



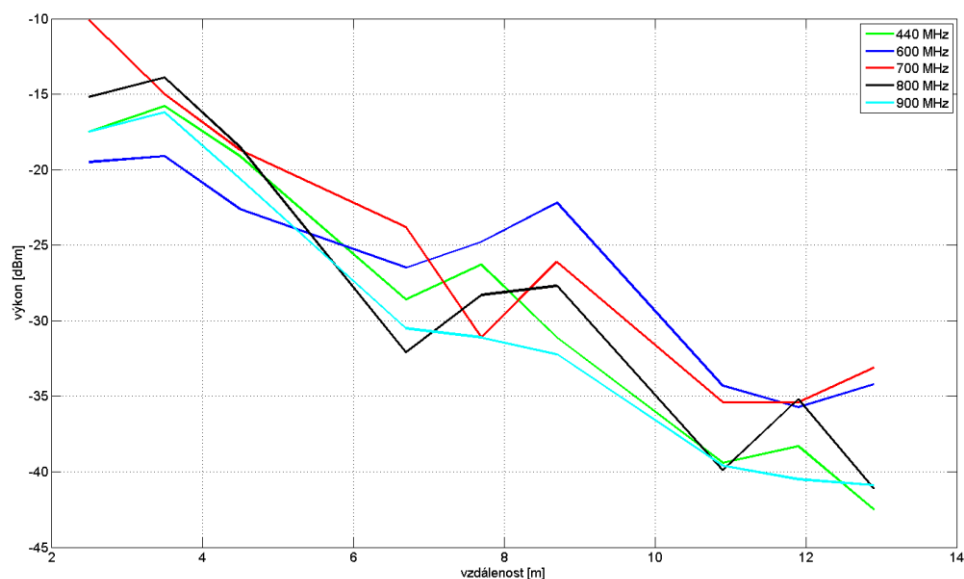
Obrázek 18 - Fotografie prostoru při měření útlumu podlaží

Na každém podlaží byly naměřeny 3 hodnoty, a to těsně u podlahy, 1 m nad podlahou a 2 m nad podlahou. Šířka podlahy byla vždy 40 cm. Jednotlivá podlaží byla vzdálena 4,5 m 8,7 m a 12,9 m od vysílače umístěného v nejvyšším patře. Viz obrázek 19.



Obrázek 19 - Náčrt prostoru při měření průchodu skrz podlaží

Výsledky měření jsou na obrázku 20.

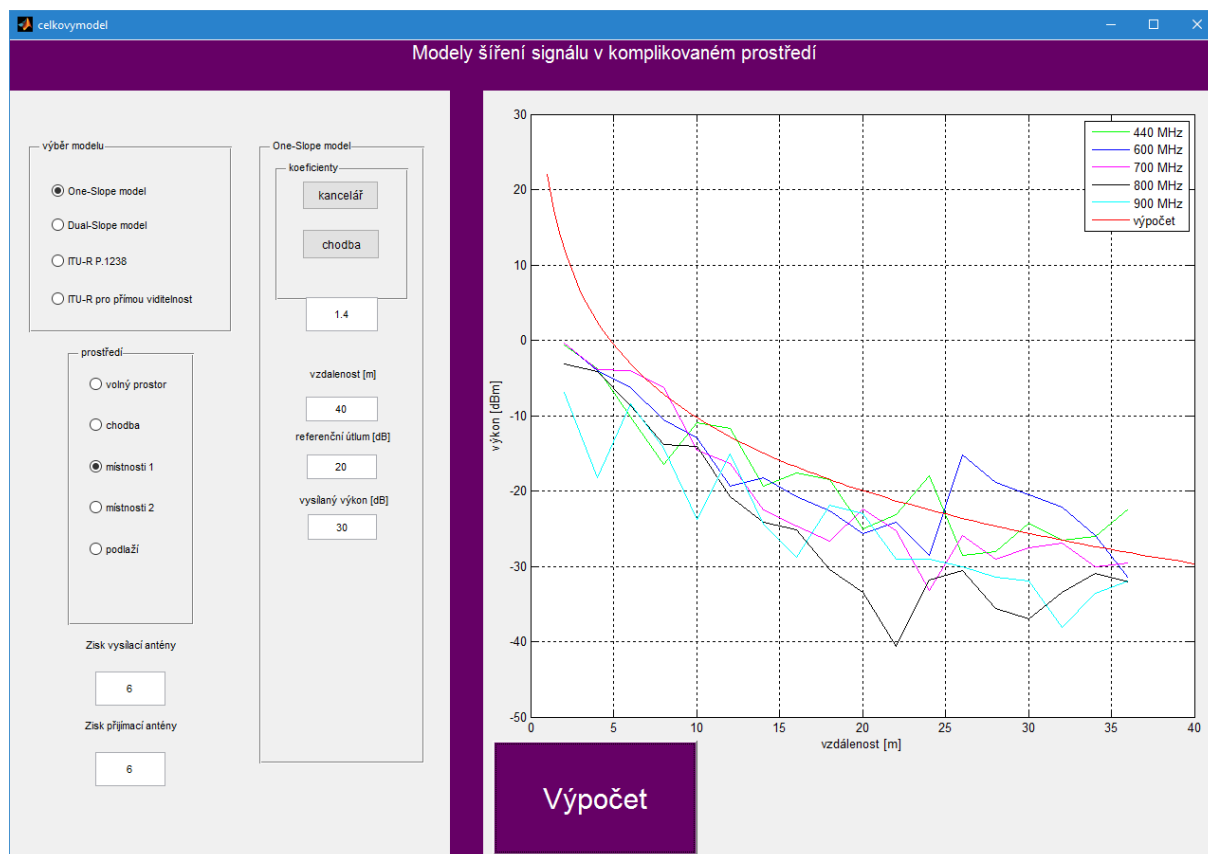


Obrázek 20 - Naměřené hodnoty z měření průchodu podlažími

Hned hodnoty z prvního patra mají hodnoty mezi -10 až -20 dBm, což je o hodně větší pokles než u hodnot z měření, kde byly první hodnoty změřeny při přímé viditelnosti a jejich hodnoty se pohybovaly mezi 0 až -5 dBm. V druhém podlaží od vysílače signál opět výrazně poklesl. Jeho hodnoty se pohybovaly mezi -25 až -33 dBm, kromě signálu na frekvenci 600 MHz, který měl v tomto patře hodnoty lepší než signály na ostatních frekvencích. Mezi těmito dvěma podlažími tedy došlo k útlumu v průměru o 10 dB. Při měření v třetím podlaží od vysílače byl zaznamenán opět viditelný pokles signálu. Nejmenší útlum zde měly signály na frekvencích 800 a 700 MHz, které měly nejmenší útlum okolo -35 dBm. Ostatní signály dosáhly útlumu okolo -40 dBm. V porovnání s ostatními prostory mělo toto měření, dle předpokladů, největší útlum.

4 APLIKACE

Jako součást bakalářské práce byla v programu MATLAB vytvořena aplikace, pro účely porovnání naměřených dat s vybranými modely šíření signálu.



Obrázek 21 - Okno aplikace

Na obrázku 21 je vytvořená aplikace. V levé části se nachází panely pro výběr modelů, prostředí a jednotlivých parametrů modelu. V pravé části je poté graf, který vykreslí zadané hodnoty.

4.1 Výběr modelu šíření

V aplikaci je možné vykreslit čtyři různé modely šíření signálu.

- One-Slope model
- Dual-Slope model
- ITU_R P.1238 model
- ITU-R P.1411 pro přímou viditelnost

Po výběru modelu se vždy zobrazí okno se vstupními parametry modelu. Viz obrázek 22.

Dual-Slope model	One-Slope model	ITU-R přímá viditelnost	ITU-R P.1238
vzdálenost [m]		vzdálenost [m]	vzdálenost [m]
40		40	40
vysílaný výkon [dB]		vysílaný výkon [dB]	vysílaný výkon [dB]
30		30	30
frekvence v MHz		frekvence v MHz	frekvence v MHz
900		900	900
referenční útlum [dB]		výška antény 1	koefficient šíření
30		2	1
koefficient před bodem zlomu		výška antény 2	Ztráty podlažím [dB]
2		2	20
koefficient za bodem zlomu			Počet podlaží
4			1
výška antény 1			Úprava konstanty
2			28
výška antény 2			
2			

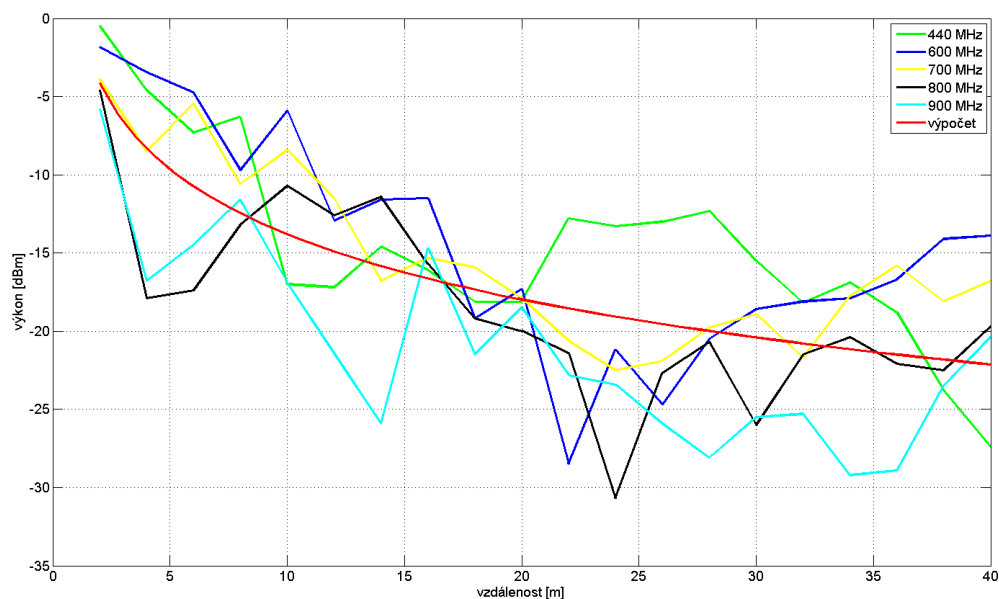
Obrázek 22 - Parametry modelů

5 POROVNÁNÍ

Závěrečná část práce se zabývá porovnáním, jak modely šíření signálu odpovídají reálnému měření. V této části se také pokusím určit konstanty a koeficienty, které se nejvíce přiblíží výsledkům reálného měření.

5.1 One-Slope model

One-Slope model, jako jediný model použitý v této práci není závislý na frekvenci, což značně zjednodušuje jeho vyhodnocení. Na obrázku 23 je vidět porovnání výsledků měření průchodu signálu stěnami 1 a One-Slope modelu.



Obrázek 23 - Porovnání One-Slope modelu a měření na chodbě

K aplikaci One-Slope modelu na konkrétní prostory je potřeba velký počet měření, Jeho výpočet je poté již rychlý a jednoduchý. K úpravě modelu pro konkrétní prostory je důležité měnit 2 parametry, a to koeficient útlumu n a referenční útlum L_1 .

Tabulka 4 - Parametry One-Slope modelu

prostředí	n	L_1
Chodba	0,6	42
Stěny 1	1	35
Stěny 2	1,1	42
podlaží	1,4	43
VP	0,9	38

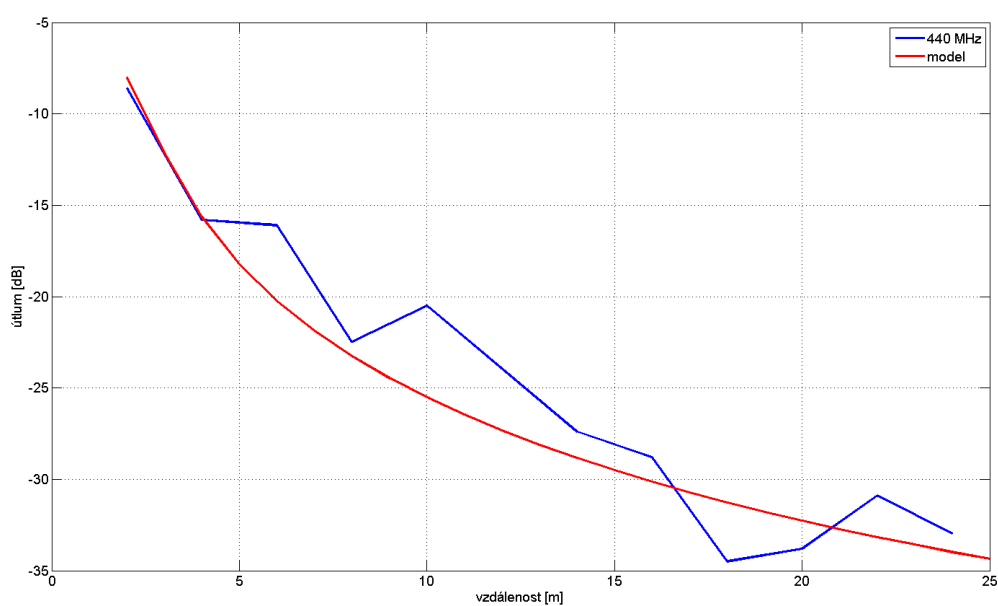
One-Slope model by měl být univerzální a měl by jít přizpůsobit na nejrozumnější případy šíření signálu, což se v našem případě potvrdilo. Rovněž by měl udávat přibližnou představu o šíření v daném prostoru a jeho odchylka od skutečné hodnoty by neměla přesáhnout 10 dB. V tomto případě model vyhověl a jen výjimečně se změřená hodnota lišila o více než 10 dB.

5.2 Dual-Slope model

Dual-Slope model na rozdíl od One-Slope modelu počítá s Fresnelovým bodem zlomu. Navíc je také jeho výpočet závislý na frekvenci, měl by tak podal lepší představu o šíření signálu než model předešlý.

Pro přiblížení se naměřeným hodnotám je nutné upravit 3 proměnné, viz kapitola 2.5

Příklad porovnání Dual-Slope modelu s naměřenými hodnotami je na obrázku 24.



Obrázek 24 - Příklad porovnání Dual-Slope modelu

Naměřeným hodnotám dobře odpovídaly tyto koeficienty.

Tabulka 5 - odpovídající hodnoty L_0

frekvence	chodba	Stěny 1	Stěny 2	podlaží	Volný prostor
440 MHz	42	42	50	58	45
600 MHz	44	42	52	62	44
700 MHz	45	42	50	52	43
800 MHz	47	44	52	57	43
900 MHz	48	49	54	58	43

Z tabulky je patrné, že pro měření, která měla přímou viditelnost na vysílač je dobrý referenční útlum mezi 42mi až 47mi decibely. Největší referenční útlum se pak pro měření skrz podlaží, který se pohybuje mezi 52mi až 62mi decibely.

Tabulka 6 - Koeficienty n_1

frekvence	chodba	Stěny 1	Stěny 2	podlaží	Volný prostor
440 MHz	0,8	1	0,6	0,1	0,2
600 MHz	0,1	0,4	0,1	0,01	0,1
700 MHz	0,5	0,4	0,3	0,7	0,1
800 MHz	0,3	0,4	0,1	0,3	0,3
900 MHz	0,7	0,4	0,4	0,4	0,5

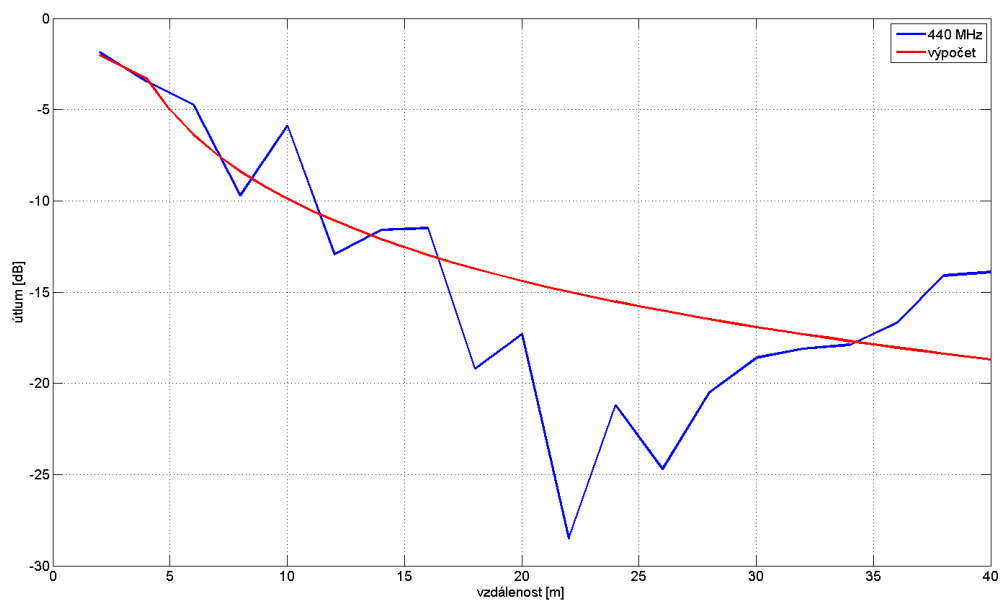
Tabulka 7 - Koeficienty n_2

frekvence	chodba	Stěny 1	Stěny 2	podlaží	Volný prostor
440 MHz	0,5	0,7	0,9	1,4	1
600 MHz	0,6	1	1,2	1,2	0,8
700 MHz	0,4	1,2	1,3	1,5	1
800 MHz	0,7	1,4	1,5	1,9	0,9
900 MHz	0,4	1	1	2	0,9

Koeficienty n_1 se u některých měření pohybují v širokých mezích, například u měření podlaží v rozsahu 0,01 až 0,7. Naopak například u prvního měření průchodu stěnami se koeficient nemění a téměř pro všechny frekvence zůstává stejný.

Koeficienty n_2 mají malé rozmezí pro měření, kde nebyly žádné překážky, pro měření, kde signál procházel zdmi nebo stropy, se jejich rozptyl zvyšuje.

Dual-Slope model se dobře ztotožnil s naměřenými hodnotami ze všech 5ti měření. Výsledky modelu se od naměřených výsledků lišily maximálně o 5 dB, v některých případech o 10 dB. Model nedokázal postihnout měření ve volném prostoru, kde signál slábl téměř lineárně, a větší skokové změny při měření průchodu podlažími. Nejhorší situace, která pro model nastala, byla při srovnání s měřením šíření chodbou na frekvenci 600 MHz. Viz obrázek 25.

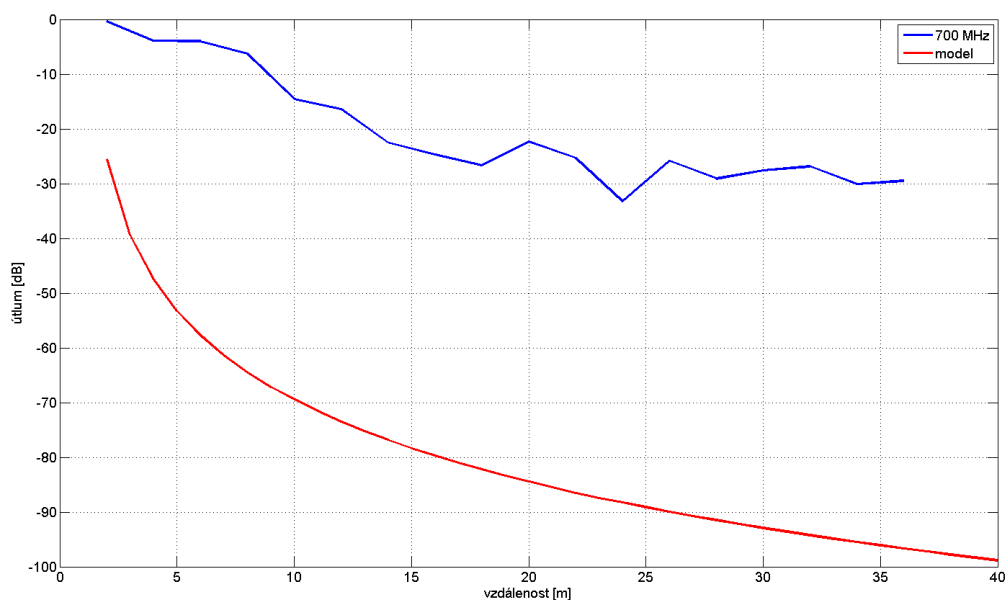


Obrázek 25 - Příklad porovnání Dual-Slope modelu 2

5.3 Multi-Wall model

Multi-Wall model by měl nejlépe postihnout chování signálu při šíření přes překážky viz. kapitola 2.4.

Při porovnání s měřenými hodnotami Multi-Wall model vůbec nevyhověl. Viz obrázek 26.



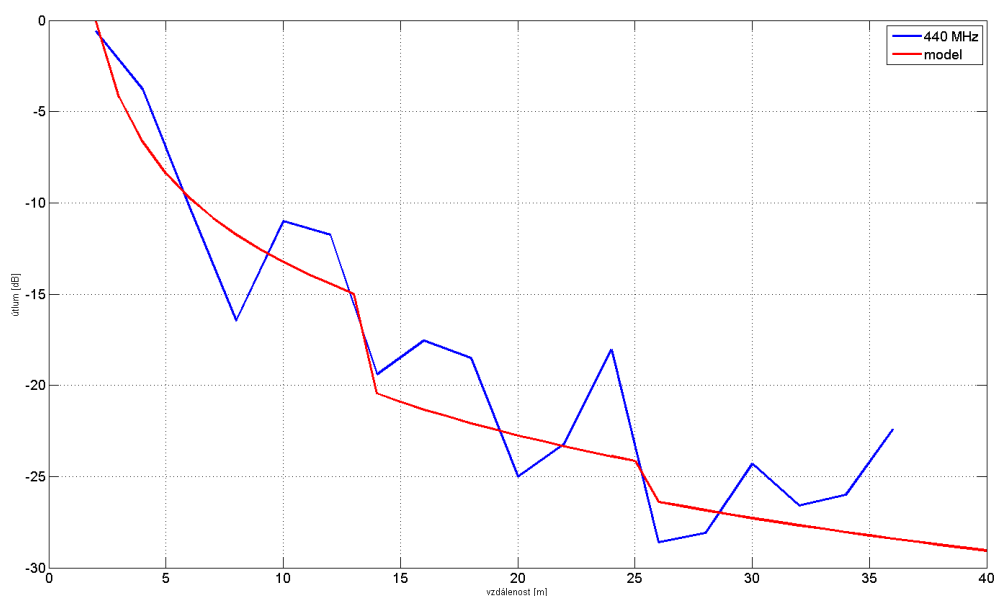
Obrázek 26 - Multi-Wall model

Multi-Wall model si sám počítá referenční útlum a uživatel jen doplní parametry stěn. Vše závisí na tom, jestli referenční útlum dobře vystihne útlum signálu, což se v žádném z porovnávaných průběhů nestalo.

Pro lepší postihnutí referenčního útlumu signálu by přitom stačilo upravit rovnici tím, že by do ní byly přidány koeficienty, které by křivku korigovaly.

$$L(d) = L_1 + 20 n_1 \log\left(\frac{n_1 d}{\lambda}\right) + \sum_i k_{wi} L_{wi} + k_k \left(\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b\right) L_f \quad (27)$$

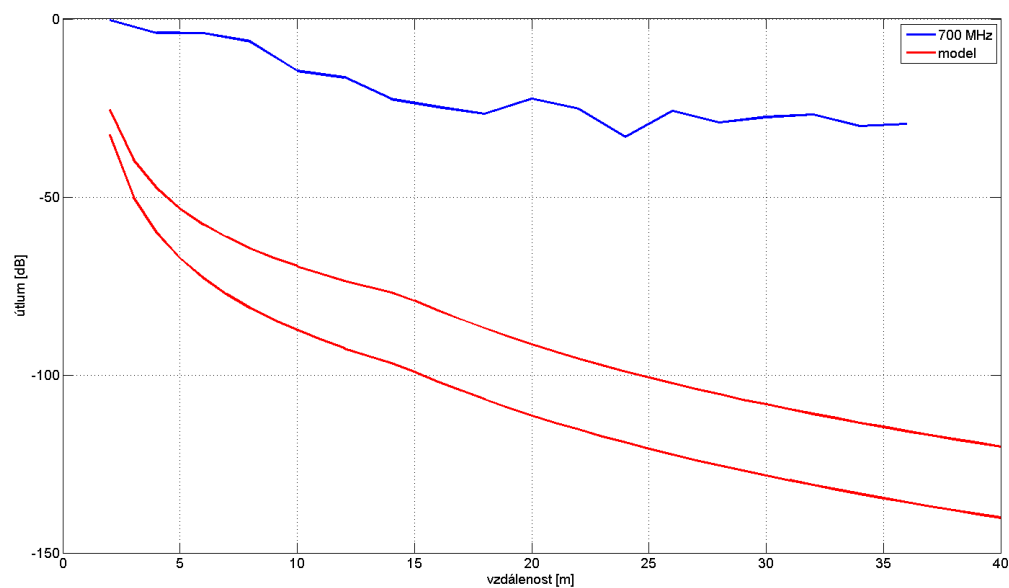
Po těchto úpravách výpočtu vyšla křivka, odpovídající naměřeným hodnotám.



Obrázek 27 - Muti-Wall model po úpravě

5.4 Model ITU-R P.1411 pro přímou viditelnost

Tento model je určený pro mikrobuňky, dá se tedy předpokládat, že výsledkům měření uvnitř budov nebude odpovídat, což se také potvrdilo. Viz obrázek 28.

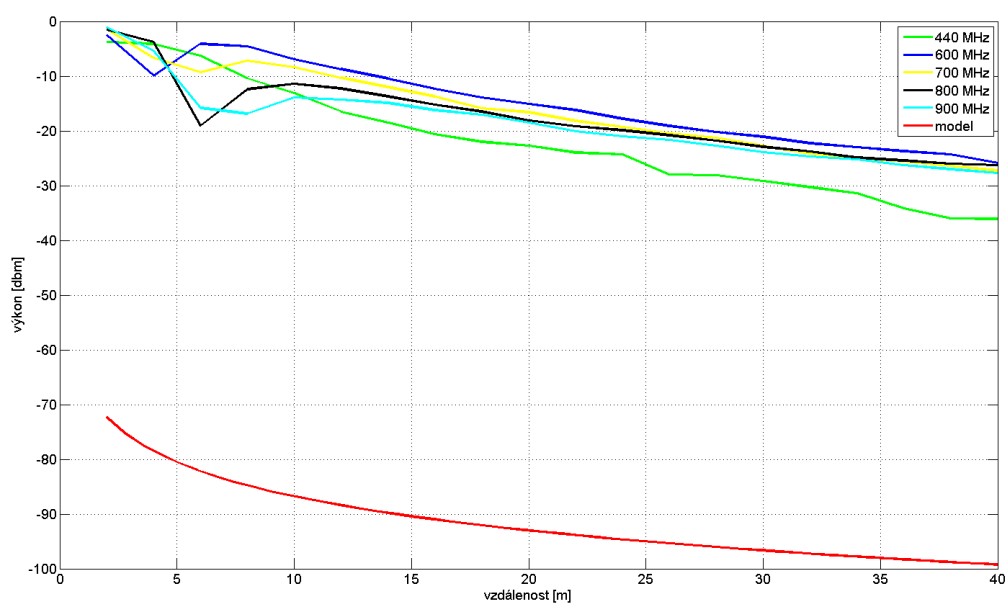


Obrázek 28 - model ITU-R P.1411

Tento model má všechny parametry přesně dané, nedá se tedy jednoduše přizpůsobit naměřeným hodnotám.

5.5 Model ITU-R P.1238

Model je podobný One-Slope modelu. Liší se ve výpočtu referenčního útlumu, který si počítá sám, což se ukázalo jako horší řešení vzhledem k naměřeným hodnotám. Viz. obrázek 29.

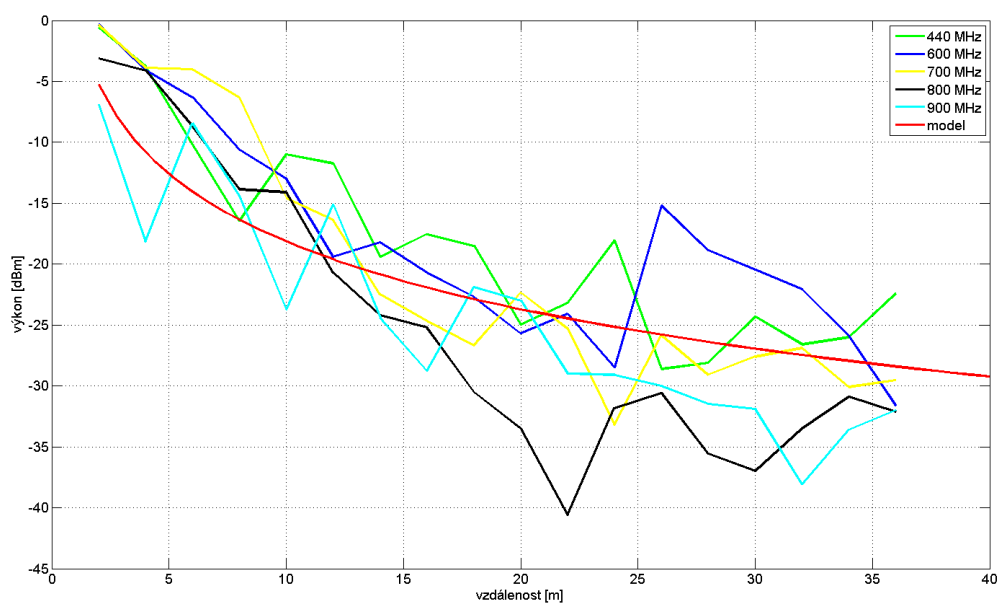


Obrázek 29 - Model ITU-R P.1238

V modelu je proměnná n , která není předem daná. Dále se zadává útlum a počet podlaží. Model rovněž konstantně odečítá útlum -28 dB.

$$L(d) = 20\log(f) + 10n\log(d) + L_f(k_f) - k \quad (28)$$

Bude-li se tako konstanta upravovat (dále konstanta k), viz rovnice 28, dostaneme průběhy, odpovídající naměřeným hodnotám Viz obrázek 30.



Obrázek 30 - upravený model ITU-R P.1238

Naměřeným hodnotám odpovídají tyto hodnoty.

Tabulka 8 - Koeficient n pro model ITU-R P.1238

frekvence	chodba	Stěny 1	Stěny 2	podlaží	Volný prostor
440 MHz	0,5	1,1	1,1	1,5	0,9
600 MHz	0,5	1	1,1	1,7	0,9
700 MHz	0,5	1,1	1,1	1,6	0,9
800 MHz	0,5	1	1,2	1,6	0,9
900 MHz	0,5	1,1	1,2	1,6	0,9

Tabulka 9 - Koeficient k pro model ITU-R P.1238

frekvence	chodba	Stěny 1	Stěny 2	podlaží	Volný prostor
440 MHz	80	88	80	83	86
600 MHz	86	93	86	92	91
700 MHz	88	96	88	94	94
800 MHz	90	98	93	97	97
900 MHz	93	103	96	99	100

ZÁVĚR

V teoretické části práce jsou popsány základní vztahy pro šíření elektromagnetické vlny. Dále jsou zde uvedeny modely šíření signálu, které se používají při plánování pokrytí. Jedná se o modely popisující šíření signálu hlavně v městské zástavbě, kde je velmi složité popsat, jak se signál bude šířit. Tyto modely jsou využity v kapitole 5.

V praktické části jsou popsány měření výkonu v prostorech odlišných z pohledu šíření signálu.

- volný prostor - Měření na volném prostoru bylo důležité pro porovnání s ostatními měřeními a dalo nám představu, jak se signál šíří bez překážek a mnohonásobných odrazů (s výjimkou odrazu od země). Signál se zde šířil s téměř lineárním poklesem výkonu.
- chodba - zde se signál šířil s malým útlumem. Docházelo zde k mnohonásobným odrazům od stěn, což způsobilo kolísání výkonu signálu v jednotlivých vzdálenostech.
- šíření skrz stěny - pro tento typ šíření byly provedeny dvě měření. První měření bylo provedeno v místnostech téměř bez nábytku a docházelo zde k mnohonásobným odrazům, kvůli kterým byl rozdíl výkonu signálu před stěnou a za stěnou minimální. V druhém případě bylo měření provedeno ve vybavených kancelářích a šlo jasně rozeznat útlum výkonu za stěnou. Při těchto měřeních došlo k větším útlumům než na volném prostoru.
- šíření skrz podlaží - Při tomto měření byl naměřen velký útlum výkonu signálu, který se s každým podlažím výrazně zvětšil.

V rámci bakalářské práce byla vyvinuta aplikace, která slouží k zobrazení průběhu modelů šíření signálu uvedených v teoretické části. Aplikace také umožňuje porovnání modelů s naměřenými hodnotami.

Při porovnání naměřených dat s modely šíření signálu byly vyvozeny následující závěry.

- One-Slope model - dokázal přizpůsobit parametry všem prostorům, které byly změřeny. Tento model jako jediný z použitých nebyl závislý na frekvenci, což se však ukázalo jako nepodstatné a při porovnání s naměřenými hodnotami nepřekračoval rozdíl 10 dB.

- Dual-Slope model - je velice podobný One-Slope modelu, což se projevilo i na velmi podobných výsledcích. Počítá rovněž s Fresnelovým bodem zlomu, který se ovšem nacházel v blízkosti antény, takže neměl na popis signálu velký dopad.
- Multi-Wall model - Tento model měl ve srovnání s předchozími o hodně horší výsledky než předcházející modely. Problém spočíval ve výpočtu referenčního útlumu, který si model počítá sám na základě frekvence. Po navržené úpravě výpočtu model velmi dobře zachytil šíření signálu.
- Model ITU-R P.1411 pro přímou viditelnost - Tento model je určený pro mikrobeňky, což bylo patrné i při porovnání s naměřenými hodnotami, kdy vůbec nepostihl průběh signálu.
- Model ITU-R P.1238 - Základní vzorec modelu nevystihl naměřené hodnoty, po úpravě výpočtu měl model podobné výsledky jako One-Slope model.

Obecně se ukázalo, že empirické modely mnohem lépe odpovídají naměřeným hodnotám (viz obrázek 24). Musíme však mít velké množství naměřených hodnot. Determinističtější modely neodpovídaly naměřeným hodnotám (viz obrázek 29). Nepotřebovaly však velké množství vstupních dat pro výpočet.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] **BRTNÍK, Bohumil.** *Teoretická elektronika*. Pardubice, 2015. Dostupné také z: www.stag.upce.cz
- [2] **MAZÁNEK, Miloš, Jaroslav VOKURKA a Pavel PECHAČ.** *Antény a šíření vln*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01855-5.
- [3] **Rádiové vlny.** In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1diov%C3%A9_vlny
- [4] **ŠAFRÁNEK M. a KOCUR Z.** Vícecestné šíření. In: *Bezdrátové systémy v přístupové síti* [online]. Praha, 2008 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://access.feld.cvut.cz/storage/200802032018_10_uniky.png
- [5] **DOBEŠ Josef a ŽALUD Václav.** *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0132-2.
- [6] **SVAČINA Jiří.** *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky*. Brno, 2002. Dostupné také z: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [7] **DŘÍNOVSKÝ, Jiří.** *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010 [cit. 2017-04-15]. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [8] **PECHAČ, Pavel.** *Modely šíření vln v zástavbě: [modely pro plánování mobilních rádiových systémů: WLAN WiFi, DECT, GSM, UMTS]*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001861.
- [9] **GSMweb:** *Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice* [online]. 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- [10] Elektromagnetické spektrum. In: *Univerzita Karlova: Matematicko-fyzikální fakulta* [online]. Praha, 2008 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/optika/obrazky/pic/optika_1-1.png

7 PŘÍLOHY

Příloha A – CD s aplikací a naměřenými hodnotami

Složka Aplikace

Obsahuje aplikaci s názvem *celkovymodel* vytvořenou v prostředí Matlab a soubory s daty z měření.

Složka Naměřené hodnoty

Obsahuje soubor *Naměřené_hodnoty.xlsx* s naměřenými hodnotami.

Složka Bakalářská práce

Obsahuje bakalářskou práci ve formátu PDF.

Složka Skripty

Obsahuje skripty vytvořené prostředí Matlab, které byly použity při porovnávání naměřených hodnot s modely šíření signálu a soubory s daty z měření.