



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ PŘENOSU V AUTOMOBILU V PÁSMU MILIMETROVÝCH VLN

TRANSMISSION MEASUREMENTS IN AN AUTOMOBILE MILLIMETER WAVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Potočňak

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Kotal

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Martin Potočňák

ID: 164372

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Měření přenosu v automobilu v pásmu milimetrových vln

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti a problematiku měření přenosu v automobilu v pásmu milimetrových vln. Navrhněte měřící přípravky pro měření. Dále vypracujte postup a způsob měření v automobilu, kde bude vysílací anténa umístěna pevně v zadní části automobilu a přijímací anténa bude v přední části s možností polohování napříč automobilu (od levého předního sloupku k pravému přednímu sloupku).

V praktické části práce se věnujte sestavení měřících přípravků a realizaci navrženého měření, zhodnocení, zpracování výsledků a porovnání dosažených výsledků s výsledky uvedenými v doporučené literatuře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MOELLER, C.P., LOHR, J., DOANE, J.L. The measured performance of a millimeter wave beam splitter [in gyrotrons]. Infrared and Millimeter Waves, 2002. Conference Digest. Twenty Seventh International Conference. DOI: 10.1109/ICIMW.2002.1076207

[2] SCHACK, M., JACOB, M., KURNER, T., "Comparison of in-car UWB and 60 GHz channel measurements," in Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on , vol., no., pp.1-5, 12-16 April 2010

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5505745&isnumber=5504894>

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Martin Kotol

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cieľom práce bol návrh uchopenia a posúvania vysielacej antény v automobile s následným meraním prenosu signálu pri zmenách parametrov: obsadenosť vozidla a poloha antén. Vysielacia a prijímacia anténa je tvorená otvoreným ústím vlnovodu. Prenos signálu bol meraný vektorovým sieťovým analyzátorom ZVA 67 od firmy Rhode&Schwarz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Milimetrové vlny, prenos signálu v automobile, poloha antén, zmena posádky, bezlicenčné pásmo.

ABSTRACT

The aim of this work is design how to grip and change position of transmitting antenna in vehicle and measurement of signal changes due to different parameters, such as people in vehicle and position of antennas. Transmitting and received antenna is designed as open-ended waveguide. Signal transmission was measured by Rhode&Schwarz vector network analyzer ZVA 67.

KEYWORDS

Millimeter waves, signal transmission in vehicle, position of antennas, change of passengers, royalty free frequency band

POTOČŇAK, M. *Měření přenosu v automobilu v pásmu milimetrových vln*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 39 s. 5 s příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Kotol.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření přenosu v automobilu v pásmu milimetrových vln jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Martinovi Kotolovi za užitočnú odbornú, pedagogickú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní bakalárskej práce.

OBSAH

Zoznam obrázkov	viii
Zoznam tabuliek	x
Úvod	1
1 Milimetrové vlny	2
1.1 Základné vlastnosti, výhody a nevýhody milimetrových vln	2
1.2 Využitie bezdrôtovej komunikácie v automobiloch, prenos na 60 GHz ..	4
2 Odrazy vlnenia a možné cesty signálu v automobile	6
3 Význam LOS a interferencia vln	8
4 Vlnovody a ich problematika	10
5 Príprava meracích prístrojov a samotného merania	12
5.1 Vysielacia a prijímacia anténa	16
5.2 Merací prístroj.....	18
6 Výsledky merania	19
6.1 Grafické výsledky nameraných hodnôt	19
6.2 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt	26
6.2.1 Priemer.....	26
6.2.2 Smerodajná odchýlka.....	30
6.2.3 Rozptyl.....	31
6.2.4 Rozpätie	33
6.2.5 Variačný koeficient.....	34
6.3 Porovnanie výsledkov meraní.....	36
7 Záver	37
Literatúra	38
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	39
A Návrh zariadenia, ukážka kódu použitého k spracovaniu hodnôt	40
A.1 Model bežca, na ktorý sa pripojila Rx anténa.....	40

A.2	Model lišty	41
A.3	Ukážka kódu k načítaniu a vyhodnoteniu nameraných hodnôt, graficky a štatisticky	42

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2-1	Odraz rovinnej vlny od rovinného prostredia – kolmá polarizácia.[9]7
Obrázok 3-1	Šírenie rovinných vln rôznymi smermi.[10]..... 9
Obrázok 4-1	Bežné priečne prierezy kovových vlnovodov: obdĺžnikový, kruhový, vlnovod Π , vlnovod H..... 10
Obrázok 5.0-1	Rozmiestnenie antén v automobile.[14]..... 12
Obrázok 5.0-2	Lišta s bežcom upevnená v prednej časti automobilu.....13
Obrázok 5.0-3	Vysielacia anténa (Tx) upevnená v druhej polohe (B).....14
Obrázok 5.0-4	Lišta s bežcom doplnená o absorpčné ihlany a prijímaciu anténu (Rx).....14
Obrázok 5.0-5	Bloková schéma merania prenosu signálu v automobile. 15
Obrázok 5.1-1	Otvorené ústie vlnovodu WR15 použité ako prijímacia anténa. 16
Obrázok 5.1-2	Ilustračný obrázok vyžarovacej charakteristiky vlnovodu WR15 pre kmitočet 60 GHz. 17
Obrázok 5.1-3	Vlnovod WR15 použitý u vysielacej antény..... 17
Obrázok 5.1-4	Zosilňovač vysokofrekvenčného signálu.....18
Obrázok 6.1-1	Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; prázdne auto a 5 polôh prijímacj antény..... 20
Obrázok 6.1-2	Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; vodič a 5 polôh prijímacj antény. 21
Obrázok 6.1-3	Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacj antény..... 22
Obrázok 6.1-4	Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; 2. polohu prijímacj antény a 1. - 5. konfigurácia posádky. 23
Obrázok 6.1-5	Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; 2. polohu prijímacj antény a 6. - 10. konfigurácia posádky. 24
Obrázok 6.1-6	3D graf závislosti S_{21} pri zmene frekvencie, polohy prijímacj antény (Rx) a vysielacej antény (Tx). 25
Obrázok 6.2.1-1	Priemer prenosu S_{21} pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacj antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx). 26
Obrázok 6.2.1-2	Priemer prenosu S_{21} pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacj antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx). 27
Obrázok 6.2.1-3	Priemer prenosu S_{21} pre automobil obsadený vodičom a 5 polôh prijímacj antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx). 28

Obrázok 6.2.1-4	Priemer prenosu S_{21} pre automobil obsadený vodičom s dvomi pasažiermi na zadných sedadlách a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	28
Obrázok 6.2.1-5	Priemer prenosu S_{21} pre každú konfiguráciu posádky a 1. polohu prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	29
Obrázok 6.2.1-6	Priemer prenosu S_{21} pre každú konfiguráciu posádky a 3. polohu prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	29
Obrázok 6.2.2-1	Std pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	30
Obrázok 6.2.2-2	Std pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	30
Obrázok 6.2.2-3	Std pre automobil obsadený vodičom a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	31
Obrázok 6.2.2-4	Std pre automobil obsadený vodičom s dvomi pasažiermi na zadných sedadlách a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	31
Obrázok 6.2.3-1	Maximálna a minimálna hodnota prenosu S_{21} pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	32
Obrázok 6.2.3-2	Maximálna a minimálna hodnota prenosu S_{21} pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	32
Obrázok 6.2.4-1	Rozpätie hodnôt pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	33
Obrázok 6.2.4-2	Rozpätie hodnôt pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	34
Obrázok 6.2.5-1	CV pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	35
Obrázok 6.2.5-2	CV pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).....	35

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1-1	Služby, systémové otázky a šírenie vĺn v pásme milimetrových vĺn.[3]..	3
Tabuľka 5-1	Zoznam merania a zmena konfigurácie posádky.....	16

ÚVOD

S postupnou výrobou zariadení využívajúcimi stále viac zahŕtené kmitočtové spektrum a zvyšujúcimi sa požiadavkami na komfort v automobiloch, a nie len tam, sa posúva využiteľnosť milimetrových vln v každodennom živote.

Cieľom tejto práce je navrhnúť uchopenie a v konečnom dôsledku zistiť, a porovnať, ako sa umiestnenie vysielačích a prijímačích antén v automobile prejavuje na zmene prenosu signálu. Svoju úlohu v tom zohráva použitý materiál aj usporiadanie interiéru automobilu, jeho obsadenosť osobami, po prípade batožinou. V teoretickej časti som rozobral milimetrové vlny, výhody a ciele prenášania signálu na 60 GHz, problematiku odrazov a skladania elektromagnetických vln. Časť práce je venovaná aj vlnovodom a ich problematike, najmä kvôli skutočnosti, že vysielačia a prijímačia anténa je tvorená otvoreným ústím vlnovodu.

V tejto práci sa zameriam na frekvenčné pásmo od 55 GHz do 65 GHz. Výhoda tohto pásma je to, že je bezlicenčné, avšak nevýhodou je značný útlm signálu na 60 GHz spôsobený molekulami kyslíka a vysoká cena komponentov. Prenos signálu budem merať pre rôzne polohy prijímacej antény v prednej časti automobilu a nemennú, stálu polohu vysielačej antény v zadnej časti automobilu. Taktiež sa zameriam na zmeny prenosu signálu pri rôznych konfiguráciách posádky. Namerané výsledky spracovávam graficky a štatisticky.

1 MILIMETROVÉ VLNY

1.1 Základné vlastnosti, výhody a nevýhody milimetrových vln

Milimetrové vlny ako časť elektromagnetického spektra sú považované za oblasť o rozsahu od jednotiek milimetrov po desiatky milimetrov vlnovej dĺžky. Pri pohľade na elektromagnetické spektrum sa milimetrové vlny radia medzi mikrovlnné a infračervené žiarenie. Z frekvenčného hľadiska milimetrové vlny zaberajú frekvenčnú oblasť od 30 GHz do 300 GHz. Tá sa zvykne označovať ako UHF (Extremely High Frequency). Vysoká frekvencia milimetrových vln ich predurčuje k širokému využitiu v telekomunikačnej oblasti.[1]

Milimetrové vlny otvárajú nové možnosti pri prenášaní signálov. Taktiež pracujú v doposiaľ nevyužívanom frekvenčnom pásme. Spektrum od 0 GHz po 30 GHz je takmer celé využívané rôznymi zariadeniami a službami ako napríklad Wi-fi či satelitný televízny prenos. Využívanie milimetrových vln ma za následok odľahčenie zahlteného spektra a najmä zvýšenie prenosových rýchlostí. V modernom bezdrôtovom svete je to smer, ktorým sa chce každý uberať. Bezdrôtový prenos dát v oblasti mikrovlnných frekvencií a nižších je obmedzený rýchlosťou približne 1 Gbit/s. Na prvý pohľad sa môže zdať, že aj to sú vysoké hodnoty. So zvyšujúcim sa počtom zariadení, ktoré dokážu využívať a prijímať milimetrové vlny, je ich rýchlosť prenosu dát až 10 Gbit/s a viac cestou, ktorú je potrebné rozvinúť v nasledujúcich rokoch.[2]

Využívanie milimetrových vln je sprevádzané aj určitými limitáciami. Keďže prenos na takýchto vysokých frekvenciách je možný len na priamu viditeľnosť a so zvyšujúcou sa vzdialenosťou vysielačieho a prijímačieho bodu sa rýchlo utlmí. Nie je možné ignorovať vplyv počasia a molekúl kyslíka. Dážď, hmla, či nečistoty vo vzduchu negatívne vplyvajú na prenos signálu. Molekuly kyslíka (O_2) na 60 GHz majú za následok dodatočný útlm signálu vplyvom ich rezonancie a pohltienia energie. Voda (H_2O) ma za následok zvýšený útlm na ešte vyšších frekvenciách. Je potrebné povedať, že tento útlm sa logicky nevyskytuje vo vesmíre a satelitné služby nie sú týmto ovplyvňované.[2]

Prehľad typických služieb, systémových otázok a šírenia vln v pásme milimetrových vln:

Typické služby	komunikácia len na priamu rádiovú viditeľnosť; budúce satelitné služby; širokopásmové pevné bezdrôtové prístupové systémy; budúce pevné služby využívajúce vysoko umiestnené platformy v stratosfére.
Systemové otázky	malé veľmi smerové antény; zatiaľ veľmi drahé komponenty; veľmi široká šírka pásma; malý dosah.
Šírenie	priama vlna; výrazný útlm vplyvom prekážok, atmosféry a hydrometeorov.

Tabuľka 1-1 Služby, systémové otázky a šírenie vln v pásme milimetrových vln.[3]

1.2 Využitie bezdrôtovej komunikácie v automobiloch, prenos na 60 GHz

Bezlicenčné pásmo 55 GHz - 65 GHz umožňuje vysokorýchlostný a vysoko objemový prenos dát. Táto skutočnosť je v značnej miere využívaná v automobilovom priemysle, ktorý využíva veľké množstvo elektroniky. So zvyšujúcim sa dopytom po vysokorýchlostnom prenose dát v oblasti mobilných telefónov a bezdrôtovej techniky sa zvyšuje dopyt po spoľahlivej technike v automobile bez ohľadu na počet pasažierov, interiér, alebo miesto, kde sa automobil nachádza. Tento fenomén sa netýka len automobilov. Výmena klasických kabeláží v kanceláriách, domoch, priemyselných budovách je taktiež predmetom záujmu.[4]

Všeobecne prenos na 60 GHz je primárne pre zariadenia (prijímač - vysielateľ), ktoré nie sú veľmi vzdialené od seba. Je potrebné vziať do úvahy silnú závislosť prenosu signálu na parametroch okolia, či už sa nachádzame v automobile - odraz od okien, pasažierov, rôznych materiálov použitých v automobile, alebo pred budovou a komunikujeme s človekom na druhom konci tejto budovy. Prenos na 60 GHz je iný ako tradičné vysielanie a viac smerová komunikácia WPAN a WLAN. Komunikácia na 60 GHz je odkázaná na LOS komunikáciu s malou možnosťou zvládnuť oblasti odrážajúce signál a vzdialenosť jednotiek metrov. Pri prekážke akou je budova, útlm prenosu prechodom materiálov budovy pri 60 GHz je veľmi vysoký. Očakáva sa, že difrakcia na rohoch budovy a rozptyl od objektov neďaleko rohov budov bude dominantný pri prenose signálu.[5]

S podobnými výsledkami je potrebné počítať aj pri prenose v automobile. Ako jeden z hlavných parametrov považujem zmenu prenosu spôsobenú pasažiermi. Minimálne jeden človek sa počas jazdy v automobile nachádza stále. Ak vezmeme tienenie signálu človekom ako takým, hodnoty útlmu vyskočia až na hodnotu 50 dB. Ďalším dôležitým faktorom je polarizácia antén. Pri nesprávnej polarizácii môže útlm vzrásť až o 20 dB v komunikačnom kanály s ortogonálnou polarizáciou medzi prijímačom a vysielateľom. Pri 60 gigahertzovej technológii je primárne zameranie nie na jednu danú polarizáciu, ako napr. FM-ka a jej horizontálna polarizácia alebo TV a jej vertikálna polarizácia. Zámer je používať dvojito polarizované antény, ktoré by sa dali využiť v cieľovej skupine používateľov mobilných telefónov.[5][6]

Bezlicenčné 60 GHz pásmo je momentálne veľmi lukratívnou oblasťou v automobilovom priemysle. So zvyšujúcim sa využívaním bezdrôtových technológií všeobecne a využívaním elektrickej kabeláže v automobile, ktorá v niektorých prípadoch tvorí viac než 30 kg hmotnosti, je snaha o postupné bezdrôtové prepojenie v automobile prioritou do budúcnosti. Využitie to nájde napríklad v multimediálnom vybavení automobilu, HD streamovaní videa na obrazovkách v automobile atď. 60 gigahertzové pásmo v tomto vyhráva nad využívanými pásmami UWB. Pri 60 GHz je schopné prenášať rýchlosťou až 6 Gbit/s. Táto skutočnosť je veľmi ovplyvňovaná parametrami v automobile ako je rozmiestnenie antén, obsadenosť auta, materiál

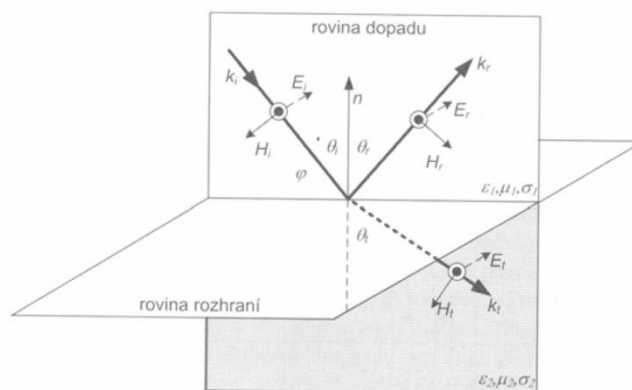
použitý v interiéru a mnoho dalších.[7]

2 ODRAZY VLNENIA A MOŽNÉ CESTY SIGNÁLU V AUTOMOBILE

Pri snahách o využitie spektra milimetrových vln je potrebné brať do úvahy charakteristiku šírenia signálov v tomto kmitočtovom pásme. Pokiaľ sa bavíme o pásmach s nízkou hodnotou kmitočtov, tieto signály sa vedú šíriť do veľkých vzdialeností a vedú jednoducho prechádzať napr. budovami. Zatiaľ čo milimetrové vlny je možnosť využívať na kratšie vzdialenosti, prechádzať pevným materiálom vedú len ťažko. Táto skutočnosť sa využíva pri prenášaní signálov zahusteným spektrom, čo v konečnom dôsledku zefektívni využitie spektra a zvýši zabezpečenie komunikačného kanála. Celkový mechanizmus prenosu elektromagnetických vln je ovplyvňovaný viacerými faktormi. Menovite sa jedná o odraz vlnenia, interferenciu vlnenia, lom a rozptyl vlnenia. Ďalšia časť je venovaná odrazom vlnenia.[8]

Odraz vlnenia nastáva pri elektromagnetickej vlne rovnako ako pri iných typoch vlnení a riadi sa rovnakými zákonmi fyziky. Vezmime do úvahy ideálny prípad, kedy rozhranie dvoch prostredí tvorí rovinná, hladká a nekonečne rozľahlá plocha. Podmienkou je odlišnosť prostredia nachádzajúceho sa pred a za touto plochou. Prostredie je obecné popísané materiálovými konštantami, ktoré sú pre každé prostredie odlišné (vzduch, voda, sklo atď.). Okrem odrazu vlnenia dochádza na rozhraní prostredí aj k lomu, resp. refrakcii vlny. Odraz vlnenia sa riadi najmä Snellovým zákonom lomu a to nezávisle od charakteru plochy rozhrania, pokiaľ je plocha konečná, ale zároveň mnohonásobne väčšia než dĺžka vlny. To platí, pokiaľ je obsahom záujmu len pole v blízkosti ožiarenej strany, relatívne ďaleko od okrajov.[9]

Na obrázku 2-1 je zobrazená harmonická vlna po dopade na plochu rozhrania. Prostredia pred a za rovinou rozhrania sú rozdielne a popísané materiálovými konštantami $\mu_1 \epsilon_1 \sigma_1$ a $\mu_2 \epsilon_2 \sigma_2$, pričom μ_1 a μ_2 označujú permeabilitu prostredí, ϵ_1 a ϵ_2 označujú permitivitu prostredí, σ_1 a σ_2 vodivosť prostredí. Dopadajúca vlna sa v mieste dopadu čiastočne odrazí a čiastočne preniká do druhého prostredia. Uhol, pod ktorým vlna dopadá, označuje veličina θ_i , uhol odrazu od roviny rozhrania označuje veličina θ_r , a uhol lomu θ_t . Veľkosť uhla lomu sa meria od kolmice k rovine rozhrania. \mathbf{k}_i , \mathbf{k}_r , a \mathbf{k}_t sú vlnové vektory dopadajúcej, odrazenej a prenikajúcej vlny.[9]



Obrázok 2-1 Odraz rovinatej vlny od rovinného prostredia – kolmá polarizácia.[9]

Zo Snellovho zákona lomu vyplýva[9]

$$\theta_i = \theta_r, \quad (2.1)$$

$$k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_r, \quad (2.2)$$

kde k_1 a k_2 sú konštanty šírenia.

To, čo je potrebné v každom prípade vyšetriť, je veľkosť odrazenej vlny, resp. vlny, ktorá prešla do druhého prostredia. Energia vlny sa pri každom odraze znižuje a zmena jej smeru má vo väčšine prípadov nechcený účinok. Svoju úlohu v tomto zohráva aj polarizácia vlnenia a orientácia vektora \mathbf{E} dopadajúcej vlny. Existuje polarizácia kolmá a rovnobežná, a pokiaľ je vymedzená podmienka, že rovinou rozhrania je zemský povrch, kolmá polarizácia sa rovná horizontálnej a rovnobežná polarizácia vertikálnej.[9]

Predstavme si, že sa zdroj vlnenia nachádza v automobile. Ideálny stav s akým bolo počítané doposiaľ, odraz a lom na dokonale rovinatej ploche, tu je prítomný len ťažko. Vlnenie sa bude rozdielne odrážať od čelného skla, od strechy automobilu, od opierky hlavy na prednom sedadle či od dverí. S určitou istotou sa dá povedať, že opierka hlavy nie je dokonale rovná a hladká plocha. V takýchto prípadoch sa hovorí o drsnom, nerovnom povrchu a vzniku rozptylu vlny. Nerovnosť povrchu sa javí ako zdroj sekundárneho vlnenia. Vlnenie sa vyžaruje do rôznych smerov s odlišnou hodnotou intenzity vlnenia. Existuje Rayleighové kritérium, ktoré definuje prijateľný rozdiel fáz odrazených vln od nerovností na povrchu a ten činí $\pi/4$ rad.[9]

3 VÝZNAM LOS A INTERFERENCIA VLŇN

Komunikácia na milimetrových vlnách medzi dvoma bodmi je založená na tzv. viditeľnosti. Medzi dvomi anténami je vyžadovaný voľný priestor, nazývaný LOS (line-of-sight). LOS je teda prítomné, ak medzi dvomi komunikujúcimi bodmi neexistuje žiadna fyzická prekážka. Prekážky, ktoré majú za následok zmenu LOS sú budovy, stromy, kopce a v neposlednom rade aj tvar interiéru automobilu, ako je to v našom prípade. Ak sa berie do úvahy reálny prípad prenosu signálu medzi dvomi bodmi, je potrebné rozlišovať medzi optickým LOS a rádiovým LOS. Optický LOS zahrňuje priestor, ktorý je viditeľný voľným okom a dá sa objektívne určiť, kde sa nachádza určitá prekážka. Rádiový LOS je založený na koncepte Fresnelových elíps. V skutočnosti to znamená, že pri bežných atmosférických podmienkach je rádiový horizont približne o 30 percent za optickým. Je potrebné ale podotknúť, že obe typy LOS majú svoj význam a potenciálne využitie. Sú možné prípady, kedy určitý prenos signálu nastáva pri optickom LOS ale nie pri rádiovom LOS. S významom LOS sme sa stretli v nasledujúcom meraní, kde z výsledkov bude jasné, ako meniaci sa poloha Rx antény - teda zmena LOS medzi oboma anténami, vplýva na hodnotu prenosu signálu.[8]

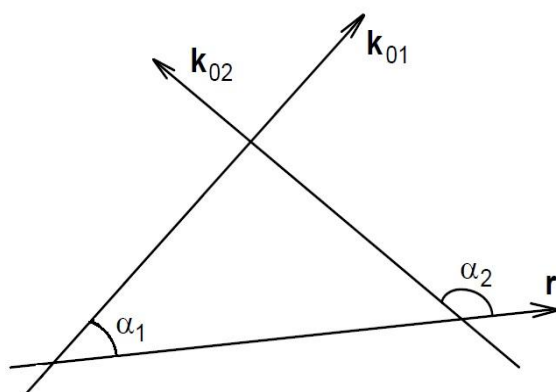
V predchádzajúcej kapitole bol načrtnutý odraz, lom a rozptyl vlnenia. Z toho vyplýva, že v určitom čase v miestnosti alebo v automobile, sa nachádza viac než len jedna elektromagnetická vlna. V takomto prípade sa hovorí o interferencii, skladaní vlŇn. Pre jednoduchosť sa budeme zaoberať šírením dvomi koherentnými lineárne polarizovanými vlnami. Pojmom koherentné sú označované vlny, ktoré majú konštantný fázový rozdiel a presne takéto vlny vznikajú odrazom od plochy rozhrania. Výhodou lineárne polarizovanej vlny je rovnaký smer vektorov intenzity poľa. V nasledujúcej časti sú rozobrané dve situácie, a to keď sa obe vlny šíria buď rovnakým alebo opačným smerom.[10]

-> Vlny sa šíria rovnakým smerom:

Smer šírenia vlny je veľmi dôležitý. Vlny šíriace sa rovnakým smerom sú nahrádzané jedinou vlnou, ktorej smer je totožný so smerom daných vlŇn. Hodnota intenzity výslednej vlny je daná vektorovým súčtom čiastkových intenzít. V prípade, že obe vlny majú rovnakú amplitúdu a fázový posun, výsledná vlna má hodnotu amplitúdy dvakrát väčšiu ako pôvodná vlna. Hovoríme o tzv. konštruktívnej interferencii. V prípade ak obe vlny majú opačnú fázu, pozorujeme vymiznutie vlny - nulovú amplitúdu a teda deštruktívnu interferenciu. Je známa ešte čiastočná interferencia, kedy hodnota amplitúdy výslednej vlny nie je dvojnásobok amplitúdy pôvodnej vlny, ale nemá ani nulovú hodnotu.[10]

-> Vlny majú rôzny smer šírenia:

Sú brané do úvahy dve koherentné vlny šíriace sa rôznymi smermi ako je to vyobrazené na obrázku 3-1. Vlastnosti vlnenia sú pozorované pre smer daný vektorom r .



Obrázok 3-1 Šírenie rovinných vln rôznymi smermi.[10]

Po určitých úvahách by sa nakoniec došlo k veľmi podstatnému záveru: vzniku stojatého vlnenia. Výsledná hodnota intenzity vlny prestane byť závislá na čase ale je daná vzdialenosťou r . V určitom bode a vo vzdialenosti r vzniká minimum - intenzita vlny má nulovú hodnotu a maximum - intenzita vlny má maximálnu hodnotu v danom bode.[10]

Pokračujme ďalej v predstave, že sa nachádzame v automobile a prenášame bezdrôtovo cez vzduchové prostredie. Interferencia je jedným z hlavných príčin útlmu signálu, ale je potreba rozlišovať čo, a ako ovplyvňuje tento útlm. Faktom je, že interferencii sa nedá vyhnúť, no snahou by malo byť potlačiť jej vplyv na najnižšiu možnú úroveň. Pri prenose v automobile signál narazí na viacero fyzických prekážok, napríklad sedadlo vodiča/spolujazdca, opierka hlavy či palubná doska. Je to práve materiál, ktorý udáva ako ľahko dokáže signál cezeň prejsť.

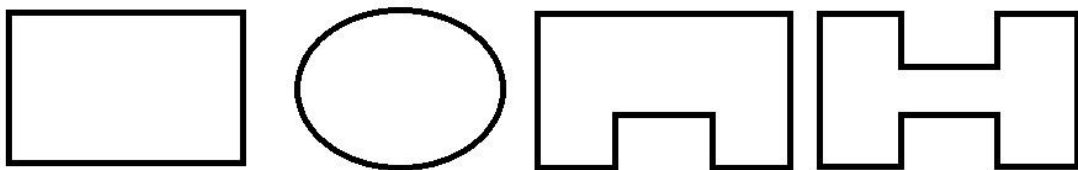
Kovy predstavujú väčšiu prekážku pre signál ako napríklad textília či iné podobné materiály. V interiéri automobilu sa s kovom dá priamo stretnúť len výnimočne. Väčší vplyv bude mať okno v podobe skla či funkčnosť iných elektronických zariadení počas jazdy.

Vo všeobecnosti každý materiál v okolí prenosu signálu zanechá svoju stopu či už sa nachádza priamo v automobile alebo na otvorenom priestranstve. Preto je dôležité tieto skutočnosti zohľadniť pri návrhu umiestnenia prenosových antén.[11]

4 VLNOVODY A ICH PROBLEMATIKA

Vlnovody boli vynálezom, ktorý pomohol dostať útlm pri prenose vysokofrekvenčného signálu na relatívne nízku úroveň. Vlnovod nie je nič iné ako dutá kovová tyč. Takéto pomenovanie je síce dosť všeobecné, ale pravdivé. Vo vysokofrekvenčných pásmach sú najpoužívanejším typom vedení. Výhodou je ich robustnosť, spoľahlivosť či vysoké prenášané výkony. Nevýhodou je cena týchto komponentov, ich prepojenie s miniatúrnymi aktívnymi súčiastkami. Napriek nižším stratám oproti iným typom vedenia, vo vlnovodoch sú rozoznávané 3 príčiny strát pri prenose signálu. Sú to straty vplyvom nedokonalé vodivých stien vlnovodu - vlnovody sú kovové zariadenia a na vysokých kmitočtoch sa začína prejavovať povrchový jav na ich stenách charakterizovaný hĺbkou vniku. Straty vplyvom stratového dielektrika - ak je vlnovod zaplnený vzduchom, tieto straty sa nemusia uvažovať. Posledný typ strát je vplyvom odrazu vlny od vstupu vlnovodu. Na rozdiel od predchádzajúcich dvoch sa tento jav vyskytuje len v pásme nepriepustnosti.[10][12]

Tvar vlnovodu je teoreticky ľubovoľný, avšak najčastejšie sú používané 4 tvary, ktoré sú zobrazené na obr. 4-1. Vlnovody typu H alebo Π sú širokopásmovejšie, čo má za následok pokles prenášaného výkonu.[10]



Obrázok 4-1 Bežné priečne prierezy kovových vlnovodov: obdĺžnikový, kruhový, vlnovod Π , vlnovod H.

Parametre popisujúce vlastnosti vlnovodov sú ich dĺžka a šírka. Berúc do úvahy, že dĺžka vlny je rovná podielu rýchlosti svetla a hodnoty frekvencie, uvažujúc oblasť vákua, výsledkom je jej veľkosť v hodnotách rádovo v cm až mm. Práve takéto fakty je potrebné rešpektovať pri navrhovaní vlnovodých štruktúr s tým, že priečne rozmery vlnovodu musia byť porovnateľné s hodnotou vlnovej dĺžky.[10]

Elektromagnetická vlna sa vo vlnovode šíri odrazom od stien. Túto vlnu je ale potrebné nejako vybudieť. To sa deje napríklad pomocou prúdovej sondy pretekanou vysokofrekvenčným prúdom.

Zamerajme sa teraz na šírenie vlny v priečnom smere. V tomto smere sa vlna šíriť nebude z jednoduchého dôvodu - nemá sa kam šíriť. Predstavme si opäť obdĺžnikový vlnovod. V priečnom smere sa kvôli odrazu vln od stien vlnovodu vytvorí stojaté vlnenie. V pozdĺžnom smere sa budú šíriť dva typy vln. Vlna TM a vlna TE. TM

označuje vlnu transversálne magnetickej. Vektor magnetickej intenzity sa šíri v pozdĺžnom smere. TE označuje vlnu transversálne elektrickú. Vektor elektrickej intenzity sa šíri taktiež len v pozdĺžnom smere.[10]

Pri šírení harmonickej vlny vlnovodom je zistená zaujímavá skutočnosť. Po prekročení určitého kmitočtu sa vlna vo vlnovode šíri bez útlmu. Vlna o kmitočte menšom ako spomínaný kmitočet sa šíriť nebude, resp. bude silne utlmovaná. Tento kmitočet je rovnaký pre vlny TE aj TM. Nazýva sa kritický kmitočet.[10]

$$\omega_{krit} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (4.1)$$

Permeabilita μ a permitivita ε sa vzťahujú k podmienkam vo vnútri vlnovodu. Rozmery vlnovodu sú reprezentované a a b . Celočíselné koeficienty m a n určujú vidové čísla. Tu platí pravidlo, že so zvyšujúcimi sa vidovými číslami rastie hodnota kritického kmitočtu. Doposiaľ bolo počítané len s jednou harmonicou vlnou. Čo sa bude diať, ak sa bude vlnovodom šíriť vlna zložená z niekoľkých kmitočtov? Zo vzťahu 4.1 je jasné, že platí len pre jeden význačný kmitočet. Pre každý ďalší kmitočet vlny bude rýchlosť vlny rozdielna. [10]

Odpoveďou na tieto skutočnosti je snaha prevádzkovať vlnovody výhradne v pásme jednovidovosti. Pásmo jednovidovosti je zdola ohraničené kritickým kmitočtom najnižšieho vidu, zhora je ohraničené kritickým kmitočtom nasledujúceho vidu. Nedodržanie tejto podmienky má za následok šírenie vln rôznych vidov a následnú interferenciu vln. Dôležitým pojmom vo vlnovodej technike je dominantný vid, čo nie je nič iné ako vid s najnižším kritickým kmitočtom. [10][13]

Konkrétnym vlnovodom použitým pri meraní je venovaná časť nasledujúcej kapitoly.

5 PRÍPRAVA MERACÍCH PRÍSTROJOV A SAMOTNÉHO MERANIA

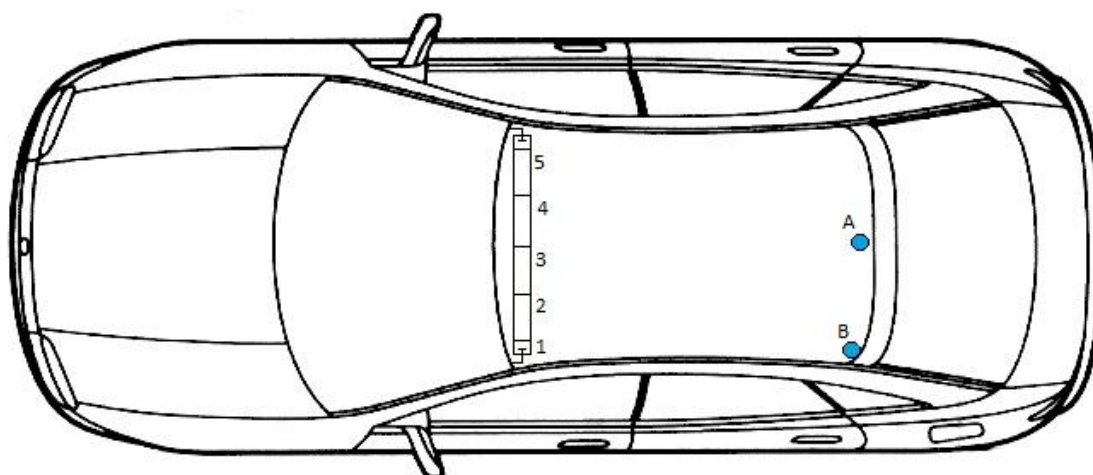
Pred začatím merania bolo potrebné vymyslieť a skonštruovať spoľahlivý systém uchopenia prijímacej antény (ďalej označovaná ako Rx anténa) v prednej časti automobilu a vysielačnej antény (ďalej označovaná ako Tx anténa) v zadnej časti automobilu. Ako jednu z podmienok som si určil, že Rx anténa musí byť polohovateľná, teda meranie som chcel uskutočniť pre viacero možných polôh. Automobil Škoda Octavia (4659 mm x 1814 mm x 1461 mm), vybavený sedadlami potiahnutými textíliou, v ktorej meranie prebiehalo, umožňuje po odobraní tienidiel nad hlavami vodiča a spolujazdca využiť pevný držiaci bod pre lištu, ktorá by zabezpečovala uchopenie a polohovanie Rx antény.

Vybrané bolo nasledovné rozmiestnenie antén: Tx anténa je umiestnená v dvoch polohách. Prvá poloha je v strede zadnej časti automobilu, druhá poloha nad operadlom hlavy pasažiera za vodičom. Obe tieto polohy dávajú reálny pohľad na zmeny prenosu signálu vďaka nie vždy priamemu výhľadu Tx na Rx anténu, rôznym možným cestám signálu atď. Celkový popis a ukážka rozmiestnenia antén je zobrazená na obrázku 5.0-1.

Bod 1 zobrazuje prvú polohu Rx antény, nachádzajúcu sa v ľavej krajnej polohe v prednej časti. Postupne sa bude anténa posúvať do polôh 2, 3, 4, 5. V tomto poradí bolo uskutočnené meranie a v spracovaných grafických výstupoch sa rešpektuje toto poradie.

Bod A zobrazuje prvú polohu vysielačnej antény (Tx).

Bod B zobrazuje druhú polohu vysielačnej antény (Tx).



Obrázok 5.0-1 Rozmiestnenie antén v automobile.[14]

Nasledujúca časť je venovaná výrobe a návrhu lišty použitej pri posuve Rx antény. Bolo potrebné nájsť kompromis medzi hmotnosťou antény, obmedzeným priestorom v automobile a materiálom lišty. Rozhodol som sa pre hliníkovú lištu, ktorej posuvná časť, na ktorú sa pripevní Rx anténa, je realizovaná závitovou tyčou. Posuvná časť je doplnená o podporné l-ko, zabraňujúce pohybovaniu sa do strán a ohybu závitovej tyče. Výsledný návrh lišty je zobrazený v prílohe A.1 a A.2.

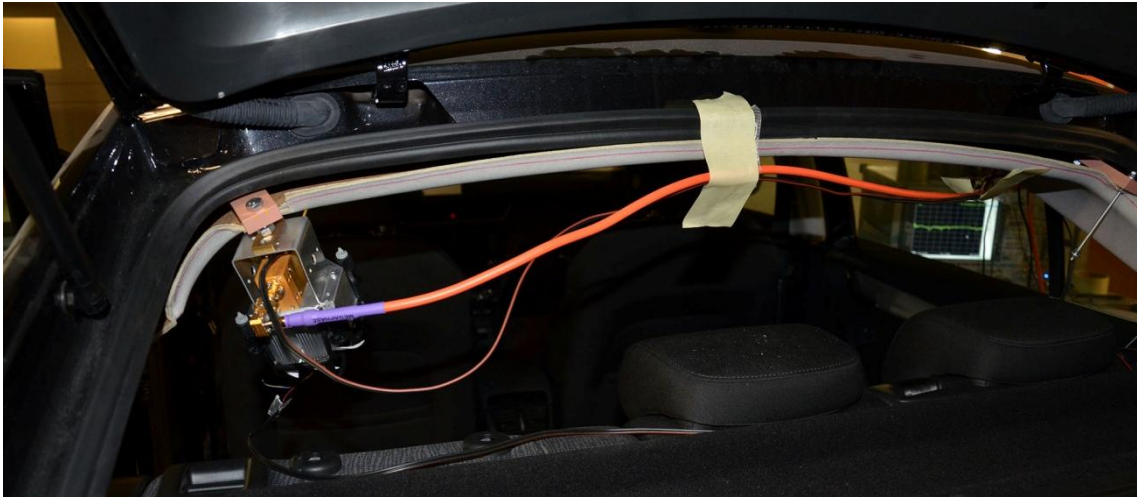
S ohľadom na materiál lišty ktorým je hliník, boli najkritickejšie časti zakryté absorpčnými ihlanmi pre čo najväčšie pohltenie elektromagnetických vln, elimináciu odrazov a možnú interferenciu. Ako posledný detail sa do lícnej hliníkovej časti vyryli vzdialenosti v milimetroch, pre presné určenie vybraných polôh antény.

Na nasledujúcich obrázkoch je vidieť lištu upevnenú v prednej časti automobilu spolu s absorpčnými ihlanmi a vlnovodom. Zábery sú z vykonaného merania a informácie k použitým vlnovodom sa nachádzajú v ďalšej časti tejto kapitoly.



Obrázok 5.0-2 Lišta s bežcom upevnená v prednej časti automobilu.

Následne je potreba pripevniť Tx anténu. Dôležité bolo zabezpečiť pevné uchytenie bez možnosti pohybu antény počas merania. Dosiahlo sa to plastovými držiakmi prichytenými o karosériu auta. Zábery z merania ukazujú pripevnenú Tx anténu v zadnej časti automobilu.



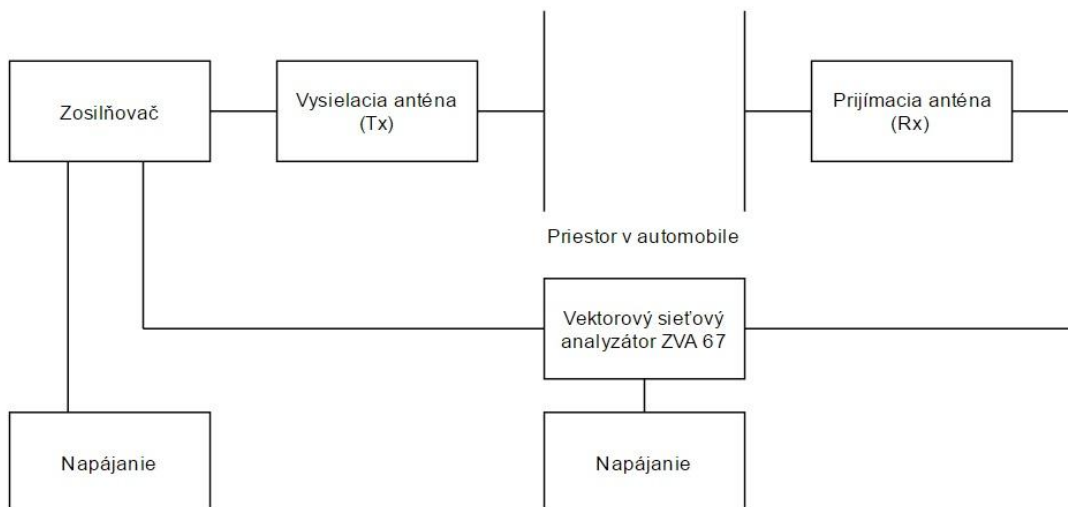
Obrázok 5.0-3 Vysielacia anténa (Tx) upevnená v druhej polohe (B).

Spomínané absorpčné ihlany sa pripevnili na najkritickejšie miesta na lište a v okolí vlnovodu pred meraním, vid' obrázok číslo 5.0-4.



Obrázok 5.0-4 Lišta s bežcom doplnená o absorpčné ihlany a prijímaciu anténu (Rx).

Následne prikladám blokovú schému meracieho pracoviska.



Obrázok 5.0-5 Bloková schéma merania prenosu signálu v automobile.

Posledným bodom bol výber parametrov, ktoré sa budú meniť a v tejto závislosti sledovať daný prenos S_{21} . Referenčné meranie, od ktorého boli neskôr vyvodzované závery a hodnotenia, som určil v konfigurácii jednej polohy Tx antény a piatich polôh Rx antény, a to isté pre druhú polohu Tx antény. Týchto desať meraní sa uskutočnilo v prázdnom, neobsadenom aute. Zmena, ktorá bude nastávať, je teda obsadenosť auta posádkou, menovite vodičom, spolujazdcom, pasažierom 1 za vodičom a pasažierom 2 za spolujazdcom. S posunom antény a jej meniacou sa polohou pribudne ďalšia prekážka v podobe človeka, čo spôsobí značnú zmenu prenosu signálu. Postavu vodiča som zvolil ako nemennú súčasť každého merania z dôvodov nám jasných. V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené všetky konfigurácie posádky pre jednu polohu Rx a jednu polohu Tx antény.

Meranie, pre jednu polohu Rx a Tx antény	Vodič	Spolujazdec	Pasažier 1, za vodičom	Pasažier 2, za spolujazdcom	Batožina na zadných sedadlách
1.					
2.	X				
3.	X	X			
4.	X	X	X		
5.	X	X	X	X	
6.	X		X		
7.	X			X	
8.	X		X	X	
9.	X				X
10.	X	X			X

Pozn. : X označuje nachádzajúcu sa osobu/vec v automobile.

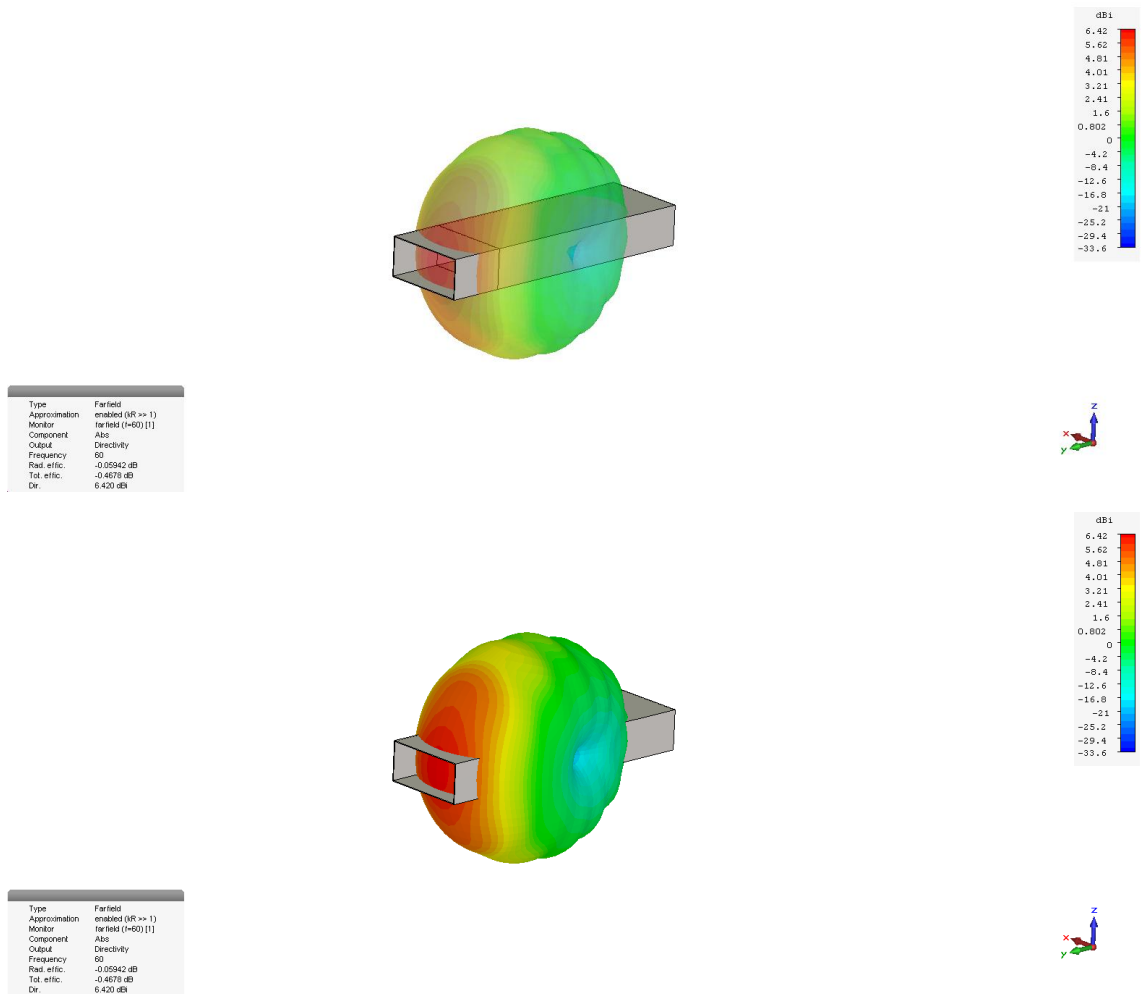
Tabuľka 5.1 Zoznam merania a zmena konfigurácie posádky

5.1 Vysielacia a prijímacia anténa

Ako bolo už spomenuté, použitú anténu tvorí otvorené ústie vlnovodu. Prijímacia a vysielacia časť je tvorená vlnovodom WR15, vyrobeným firmou Quinstar Technology. Ide o obdĺžnikový vlnovod s vnútornými rozmermi 3,7592 mm x 1,8796 mm. To odpovedá frekvenčnému pásmu V, s rozmedzím frekvencií od 50 GHz do 75 GHz. Následne prikladám obrázky tohto vlnovodu a jeho ilustračnú vyžarovaciu charakteristiku pri 60 GHz.



Obrázok 5.1-1 Otvorené ústie vlnovodu WR15 použité ako prijímacia anténa.

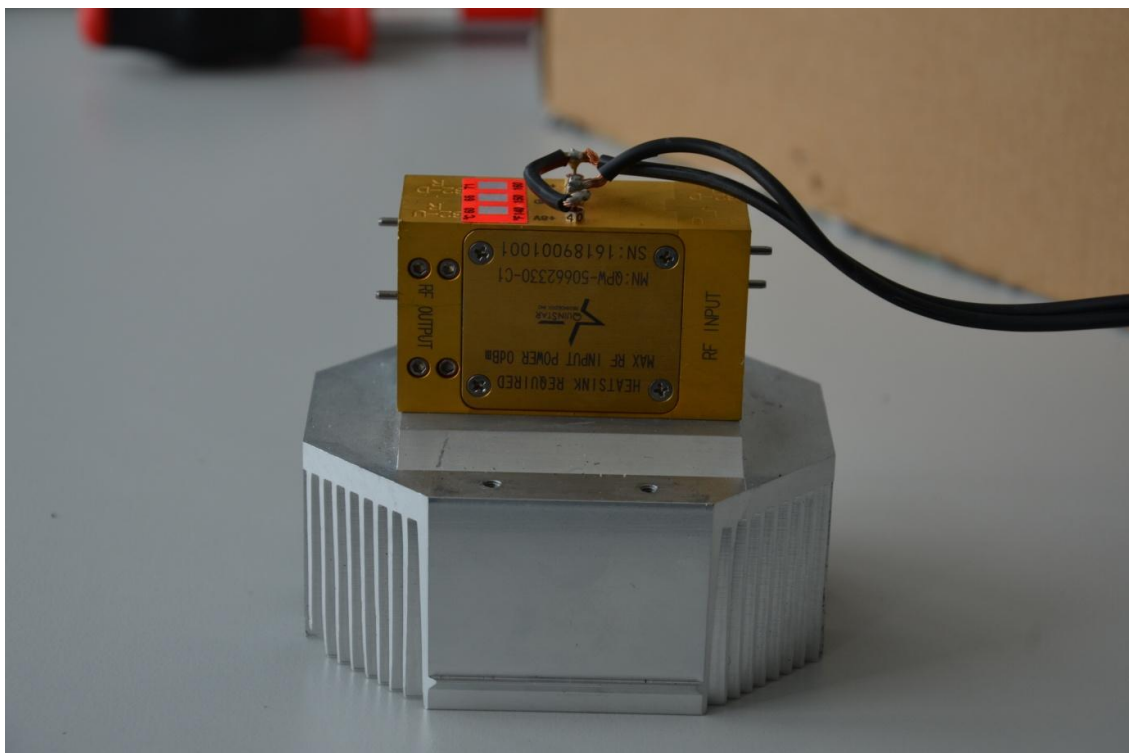


Obrázok 5.1-2 Ilustračný obrázok vyžarovacej charakteristiky vlnovodu WR15 pre kmitočet 60 GHz.

Tx anténa je taktiež tvorená otvoreným ústím vlnovodu, ktorý je ale pripojený k zosilňovaču pre frekvenčné pásmo 55 GHz - 65 GHz. Zosilňovač vyrobila firma Quinstar Technology. Kvôli podmienkam v automobile a celkom rýchlemu ohrevu počas používania bol vybavený chladičom nasadeným zo spodnej strany. Na nasledujúcom obrázku je možné vidieť dané zariadenie.



Obrázok 5.1-3 Vlnovod WR15 použitý u vysielačnej antény.



Obrázok 5.1-4 Zosilňovač vysokofrekvenčného signálu.

Prepojenie Tx a Rx antén so sieťovým vektorovým analyzátorom zabezpečili vysokofrekvenčné káble. Priamo za prijímacím vlnovodom bola použitá súčiastka, tzv. splitter, ktorá otáča e-m vlnu o 90° (pre lepšie pripojenie káblov). Pred začiatkom merania bola nutná kalibrácia prístroja nazývaná aj normalizácia - ide o kalibráciu len jedného prechodu, pri 0 dB a fáze 0° . Vstupný výkon činil -10 dBm, rozsah kmitočtov 55 GHz - 65 GHz a kmitočtový krok 10 MHz. Počet meraní pre daný kmitočtový rozsah: 1001. Po teplotnej stabilizácii (cca 30 minút) bolo začaté meranie.

5.2 Merací prístroj

Vzhľadom na veľké hodnoty kmitočtov bolo potrebné použiť ako merací prístroj vektorový sieťový analyzátor ZVA 67 od firmy Rhode&Schwarz. Niekoľko údajov o samotnom analyzátore[15]:

- využitie až štyroch možných testovacích portov,
- frekvenčný rozsah : 10 kHz - 67 GHz,
- šírka pásma : 1 Hz - 1 MHz,
- dynamický rozsah pri šírke pásma 10 Hz : typicky 140 dB
- rýchlosť výpočtu : 3,5 μ s pre jeden testovací bod

6 VÝSLEDKY MERANIA

Výsledkom merania pre každú špecifickú konfiguráciu - umiestnenie Tx antény, polohy Rx antény a zloženie posádky auta - je jeden súbor obsahujúci hodnoty S_{21} v závislosti na frekvencii (55 GHz - 65 GHz). Vzhľadom na veľké množstvo nameraných hodnôt som sa pre ich spracovanie rozhodol využiť program Matlab. Vytvoril som program, ktorý načítava namerané hodnoty a uloží ich za sebou podľa času, kedy boli namerané. Keďže poznám poradie merania a zodpovedajúcu konfiguráciu antény a posádky, je tento spôsob načítavania hodnôt prehľadný, a dobre sa s tým ďalej pracuje. Načítané hodnoty sa uložia do matice s rozmerom 1001 x 50. Hodnota 1001 označuje frekvencie, na ktorej sme prenos S_{21} merali a hodnota 50 počet meraní pre jednu polohu vysielacej antény. Ukážka kódu je uvedená v prílohe A3.

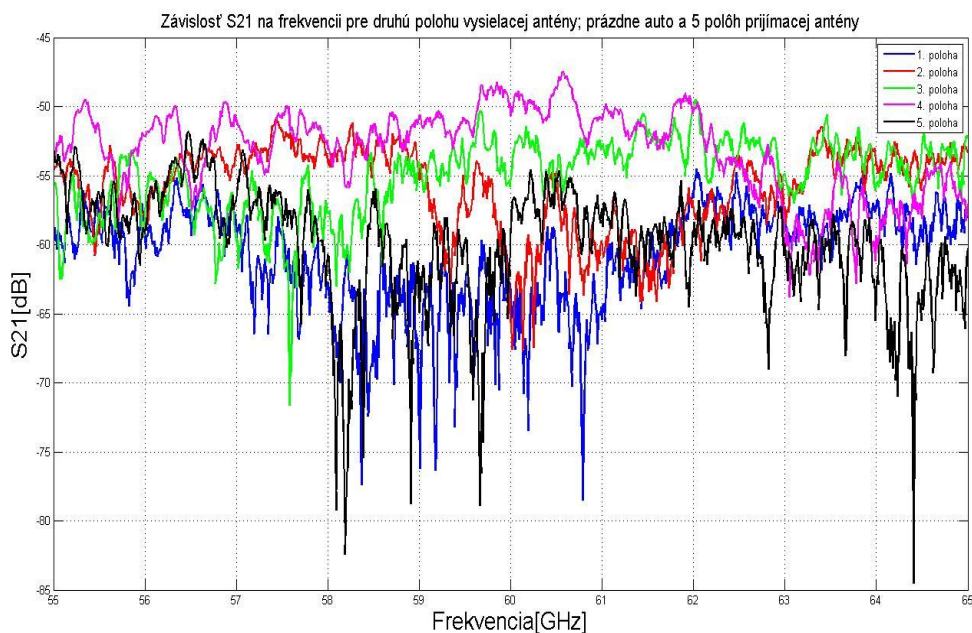
6.1 Grafické výsledky nameraných hodnôt

Uvedené sú výsledky pre druhú polohu Tx antény. Je to z toho dôvodu, že boli dosiahnuté viditeľne lepšie hodnoty ako pri prvej polohe antény.

Namerané hodnoty prenosu som porovnal s hodnotami vypočítanými podľa vzťahu 6.1. Ten na základe vzdialenosti Rx od Tx antény a frekvencie s ktorou meriame, počíta hodnotu útlmu.[16]

$$L_f = -27,55 \text{ dB} + 20 * \log(f) + 20 * \log(l) . \quad (6.1)$$

L_f označuje útlm, f frekvenciu v MHz a l dĺžku v metroch. V našom prípade (pracujeme na 60 GHz a antény sú vo vzdialenosti 1,2 m od seba), teoretická hodnota útlmu by mala dosahovať 69,6 dB. Nasledujúca časť ukáže, aký vplyv na hodnotu prenosu, resp. útlmu, má poloha prijímacej antény, nasledovaná zmenami obsadenosti automobilu posádkou.



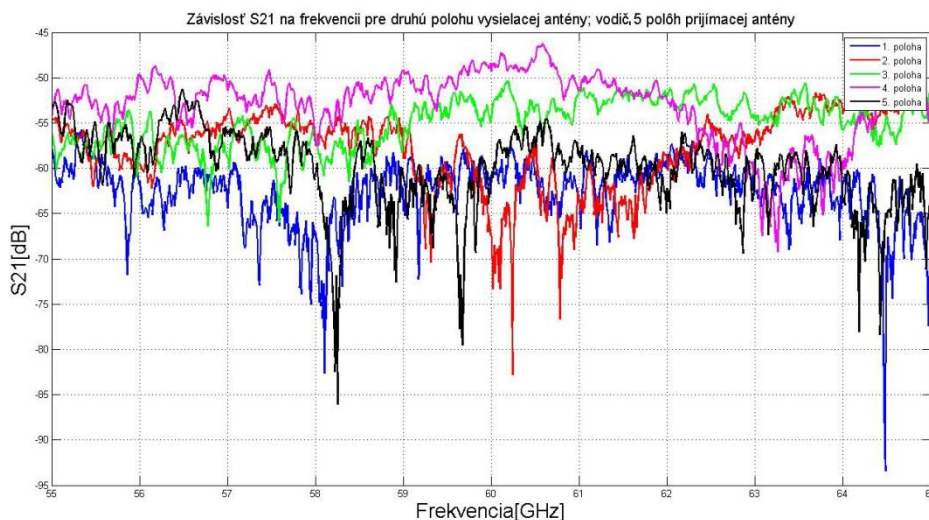
Obrázok 6.1-1 Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; prázdne auto a 5 polôh prijímacej antény.

Na obrázku 6.1-1 je vidieť hodnoty S_{21} pri referenčnom meraní, teda v prázdnom aute, kde každý farebný priebeh znázorňuje inú polohu Rx antény. Tx anténa sa nachádza v druhej polohe, ktorá odpovedá písmenu B z obrázka 5.0-1.

Z daných priebehov je vidieť, že pre 1. polohu a 5. polohu je hodnota S_{21} dosť podobná pre celý rozsah frekvencií. O niečo lepšie hodnoty dosahuje 2. poloha Rx antény, ale aj tu je vidieť značne vysokú mieru útlmu signálu. Táto skutočnosť je daná najmä tým, že v týchto polohách sa medzi Tx a Rx anténou nachádzalo sedadlo vodiča, teda bola prítomná určitá fyzická prekážka medzi dvoma anténami. Prenos medzi oboma anténami bol najpravdepodobnejšie pomocou odrazov, a to konkrétne od strechy automobilu, operadla hlavy u sedadla vodiča a odrazom, lomom vlny od okien.

Priebeh S_{21} s anténou v prvej polohe vykazuje aj značný útlm signálu spôsobený molekulami kyslíka na 60 GHz. Kyslík nie je jediným dôvodom pre tieto vysoké hodnoty útlmu, ale je jedným z hlavných príčin. Je zreteľné, že prenos v tejto polohe utrpel najviac v okolí 60 GHz. Najväčší útlm vykazuje ale 5. poloha. Hodnoty pod úrovňou -65 dB, či prepád jednej hodnoty na -85 dB prakticky demonštrujú nevyužitelnosť zapojenia Rx a Tx antén v zadaných polohách pre spoľahlivý prenos.

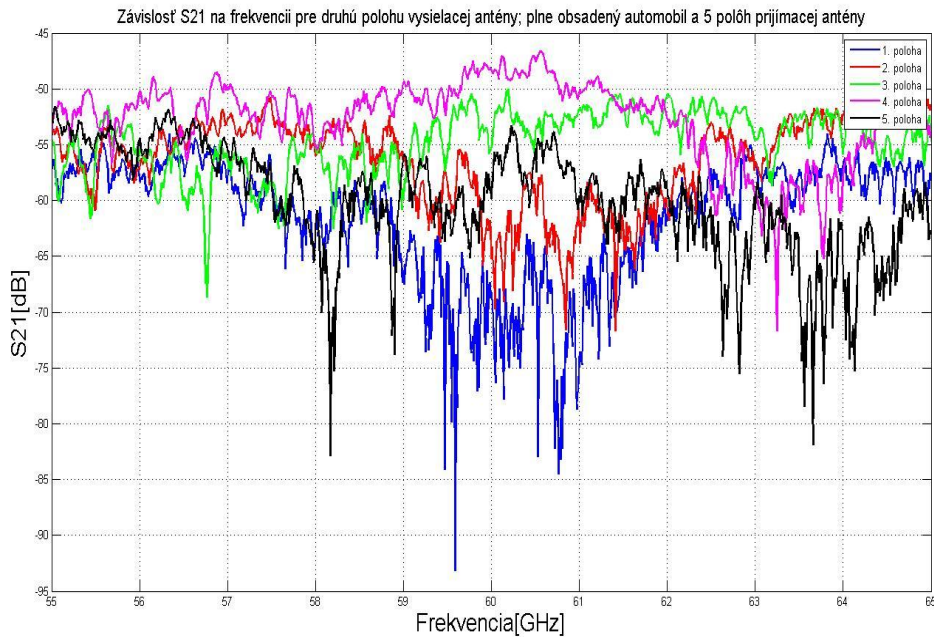
Najlepšie hodnoty vykazuje poloha číslo 4, nasledovaná polohou číslo 3. V týchto polohách bolo medzi anténami najmenšie množstvo rušivých vplyvov ako už spomínané sedadlo vodiča/spolujazdca. Pozorovateľný je význam LOS, ktorý som predniesol v teoretickej časti.



Obrázok 6.1-2 Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielacej antény; vodič a 5 polôh prijímacej antény.

Ako prvé si z obrázka 6.1-2 všimneme, že hodnota prenosu signálu sa výrazne nezmenila. Sú viditeľné prepady prenosu signálu na určitých frekvenciách spôsobené nepriaznivou interferenciou, či ohybom signálu. Skutočnosť je, že vodič čelí Tx anténe opretý o sedadlo a opierku hlavy, tým pádom signál nebol vystavený drastickým zmenám počas prenosu. Nepatrné zmeny v prenosovej ceste reflektujú minimálne zmeny hodnôt S_{21} . Stále ale nachádzame polohy, v ktorých je prenos výrazne lepší alebo horší. Ako sa dalo očakávať, polohy s horším prenosom signálu sú stále 1. a 5. - naše krajné polohy, a poloha 2. V polohe 2. je vidieť asi najvýraznejšiu zmenu vplyvom postavy vodiča a to práve na 60 GHz. V konečnom dôsledku je výsledok pre túto konfiguráciu posádky očakávaný.

Predpokladaný je aj výsledok pre polohu 4., resp. 3. Poloha 4. má opäť najlepšie výsledky pre prenos signálu, tesne nasledovaná polohou 3. Tieto polohy sú ideálne s ohľadom na umiestnenie Tx antény. Poloha 3. je tak isto veľmi dobrá pre budúce praktické umiestnenie antény v automobiloch. Nachádza presne v strede automobilu, v blízkosti spätného zrkadla a ďalších komponentov, kde nie je náročné umiestniť anténu so snahou o prenášanie signálu.



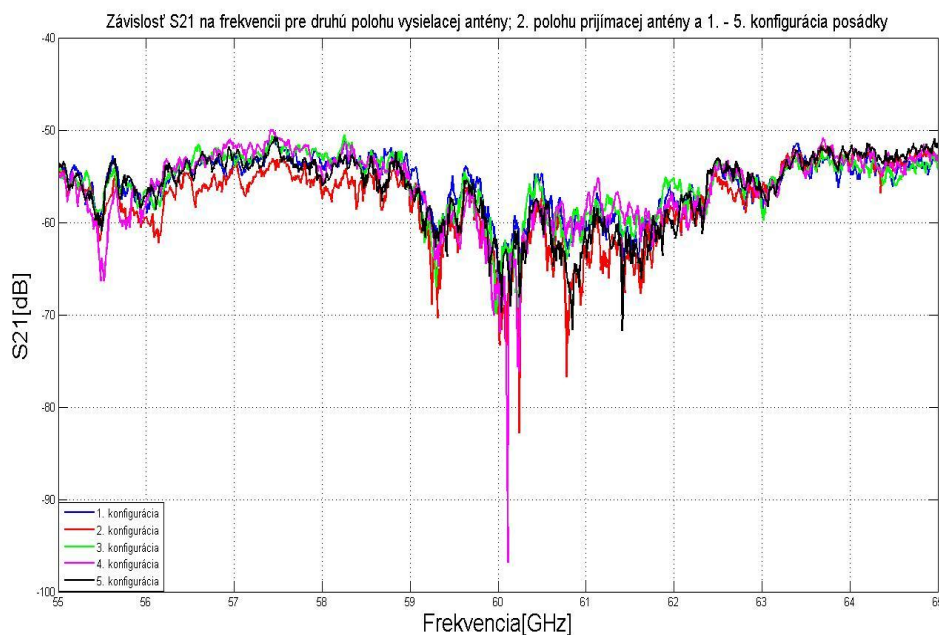
Obrázok 6.1-3 Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielačnej antény; plne obsadený automobil a 5 polôh prijímačnej antény.

Jedna z veľmi častých konfigurácií posádky je zobrazená na obrázku 6.1-3. V porovnaní s prvým meraním v prázdnom aute, hodnoty prenosu pre rôzne polohy nie sú až tak odlišné ako by sa dalo očakávať. Štatisticky je hodnota prenosu pre každú polohu Rx antény menšia, s výraznými prepismi prenosu v polohách 1 a 5 v okolí 60 GHz. Najlepšie opäť obstála poloha 4, nasledovaná polohou 3, kde hodnota S_{21} dosahuje pri 60 GHz najlepšie hodnoty : -47 dB, resp. -50 dB.

Pri tejto konfigurácii je najviac pravdepodobné budúce využitie bezdrôtovej komunikácie na 60 GHz. V plne obsadenom aute bude najväčšia záťaž na spoľahlivé poskytovanie spomínaných služieb (HD stream videa atď.).

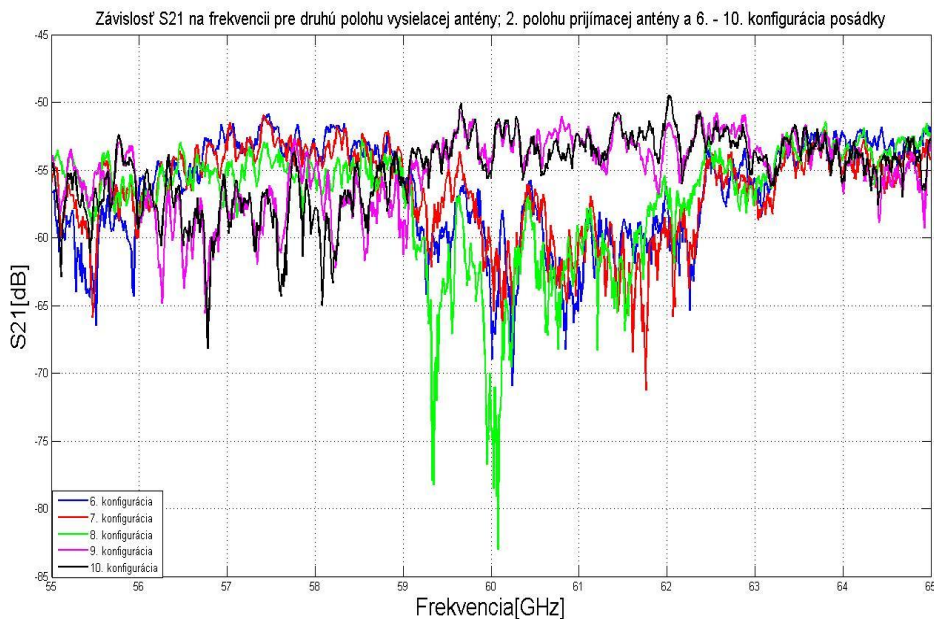
V predchádzajúcej časti sme sa venovali zmenám hodnôt S_{21} pre danú konfiguráciu posádky, no bez zmeny polohy Rx antény. V ďalšej časti sa pozrieme na hodnoty S_{21} pri pevne danej polohe antény, avšak so zmenami v konfigurácii posádky.

Na nasledujúcom obrázku 6.1-4 je znázornená zmena prenosu pre fixnú polohu Rx antény už so zmenami v obsadenosti automobilu. Číslovanie konfigurácií zodpovedaná rozpisu z tabuľky 5.0-1.



Obrázok 6.1-4 Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielačnej antény; 2. polohu prijímačnej antény a 1. - 5. konfigurácia posádky.

Druhá poloha Rx antény prináša zaujímavý výsledok. Pre prvých 5 konfigurácií je hodnota prenosu veľmi podobná, bez markantnejších odchýlok. Pozoruhodný fakt je najmä ten, že 1. konfigurácia znázorňuje prázdne auto, teda referenčnú hodnotu pre toto meranie. Ďalšie 4 konfigurácie neprispievajú k zmenám prenosu tak, ako by sa mohlo očakávať. Pozorovateľný je prepád prenosu v tesnom okolí 60 GHz pre všetky zobrazené konfigurácie, spôsobený dodatočne molekulami kyslíka rezonujúcimi na týchto frekvenciách.



Obrázok 6.1-5 Graf závislosti S_{21} pre druhú polohu vysielačnej antény; 2. polohu prijímacej antény a 6. - 10. konfigurácia posádky.

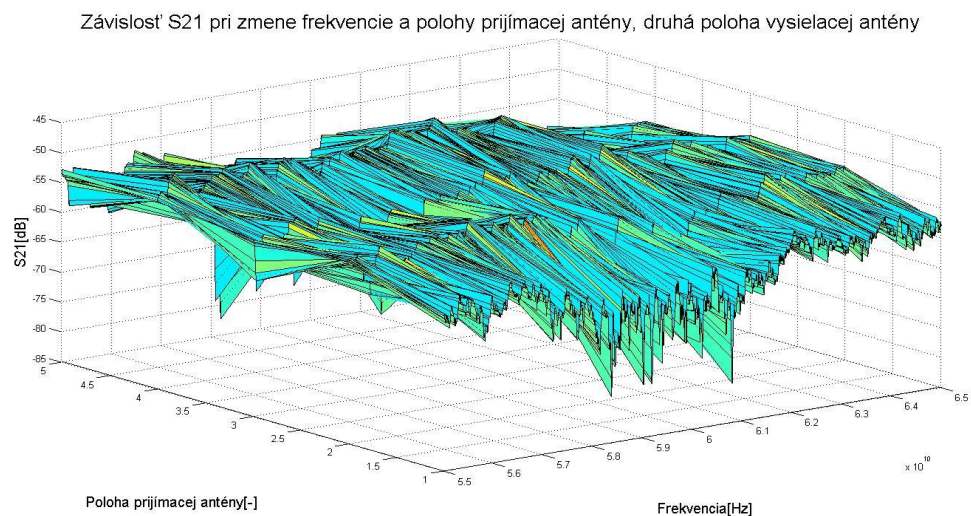
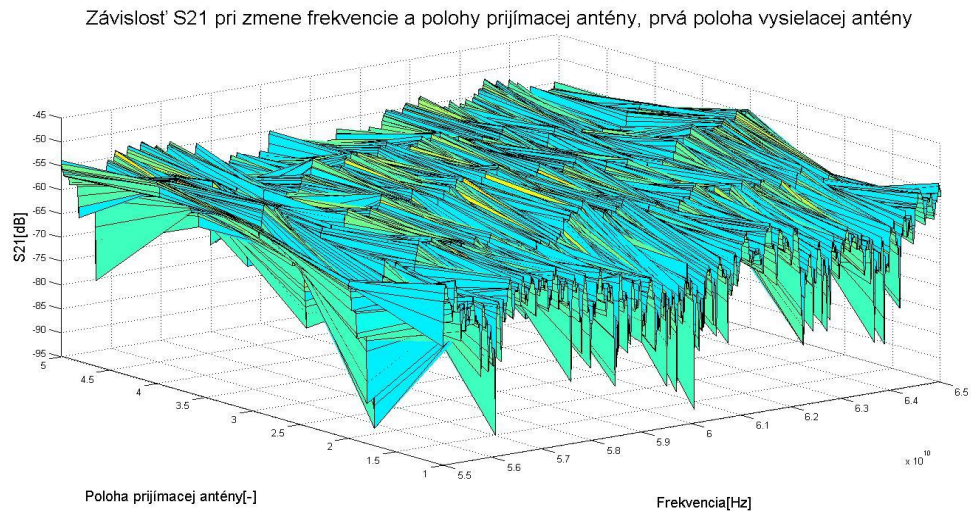
Obrázok 6.1-5 ukazuje očakávaný priebeh hodnôt s druhou polohou Rx antény. Pre 5. až 10. konfiguráciu posádky vidieť zreteľný rozdiel v prenose signálu.

Konfigurácia 9 a 10, teda vodič s batožinou a vodič, spolujazdec a batožina, dosahujú počas celého frekvenčného rozsahu takmer totožné hodnoty. Táto skutočnosť potvrdzuje tvrdenie z predchádzajúcich grafov o tom, že spolujazdec sa od Rx antény v tom bode nachádza dostatočne ďaleko na to, aby zasahoval a ovplyvňoval hodnoty prenosu signálu.

Konfigurácie 6,7 a 8 sú síce viditeľne odlišné od 9 a 10, ale aj oni sa medzi sebou nelíšia dosť na toľko, aby sme mohli vyvodit' určitý záver. Konfigurácie označujú vodiča s pasažierom 1, s pasažierom 2 a s oboma týmito pasažiermi. Prítomnosť ľudí na zadných sedadlách ovplyvňuje prenos veľmi podobne a nie je viditeľná zmena, či ide o jedného alebo dvoch pasažierov, a na akom sedadle vzadu sedia.

Výsledky pre tretiu, štvrtú a piatu polohu Rx antény kopírujú stav, ktorý bol načrtnutý pre jej druhú polohu. Pre konfigurácie 1 až 5 sú rozdiely len minimálne, zatiaľ čo konfigurácie 6 až 10 ukazujú väčšie zmeny prenosu. Opäť je možné vybrať konfiguráciu 6,7 a 8, ktorá hovorí o tom, že prenos signálu sa mení len okrajovo so zmenami obsadenosti dvoch zadných sedadiel. Konfigurácia 9 a 10 popisuje, že spolujazdec nemá vplyv na prenos signálu v automobile s vodičom a batožinou na zadných sedadlách.

Keďže sa počas merania menili až 3 veličiny navzájom (frekvencia, poloha Rx antény a konfigurácia posádky), každý z predchádzajúcich 2D grafov bral v úvahu jednu z týchto veličín ako konštantu. Preto som sa rozhodol na koniec pridať zaujímavý 3D graf, ktorý popisuje zmeny S_{21} pri zmenách polohy Rx antény a frekvencie naraz. Jeden pre prvú polohu a druhý pre druhú polohu Tx antény.



Obrázok 6.1-6 3D graf závislosti S_{21} pri zmene frekvencie, polohy prijímacej antény (Rx) a vysielačnej antény (Tx).

Grafy potvrdzujú to, že pre druhú polohu Tx antény sú hodnoty S_{21} viditeľne lepšie a s menej častými prepadmi na hodnoty až okolo -90 dB, ako je tomu pri prvej polohe Tx antény. Následne je vidieť, že pre obe polohy Tx antény, prvá a piata poloha Rx antény dosahuje jednoznačne najhoršie hodnoty.

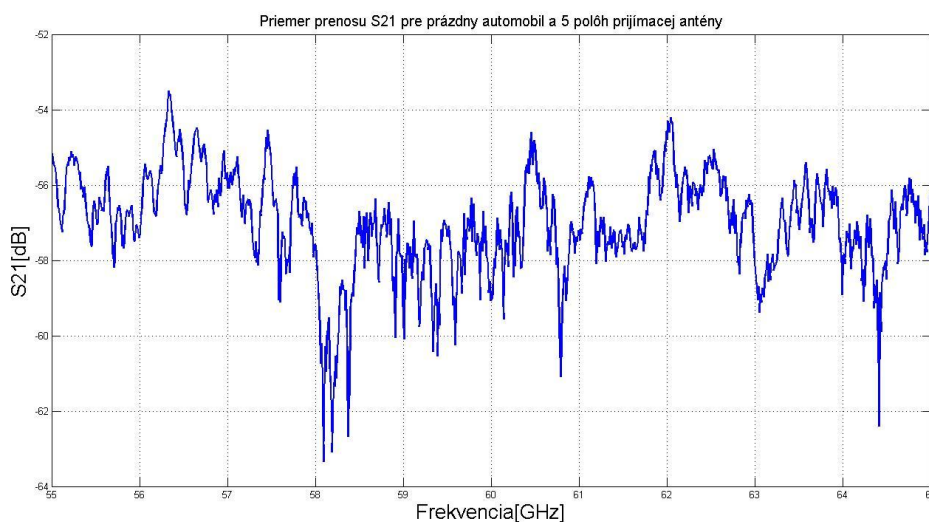
V nasledujúcej časti si namerané hodnoty rozoberieme zo štatistického hľadiska. To nám doplní a prehĺbi poznatky, ktoré sme doteraz odpozorovali.

6.2 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt

Vzhľadom na veľký počet meraní a nameraných hodnôt je štatistické vyhodnotenie jeden zo spôsobov ako prehľadne a jasne určiť dopad, aký má na prenos signálu v automobile zmena polohy Rx antény a zmena konfigurácie posádky. Zaoberal som sa veličinami ako priemer, smerodajná odchýlka, rozptyl hodnôt, rozpätie a variačný koeficient. Všetky grafické výstupy v tejto kapitole sú pre druhú polohu Tx antény, teda bod B z obrázka 5.0-1.

6.2.1 Priemer

Priemer som spracoval spolu s ostatnými štatistickými veličinami graficky. Vyniesol som do grafu priemerované hodnoty prenosu S_{21} pre každú hodnotu frekvencie, pričom som vybral štyri konfigurácie posádky a každú polohu Rx antény. Výsledok nám dáva presný pohľad na to, ako závisí hodnota prenosu S_{21} od frekvencie, obsadenosti auta a polohy Rx antény.



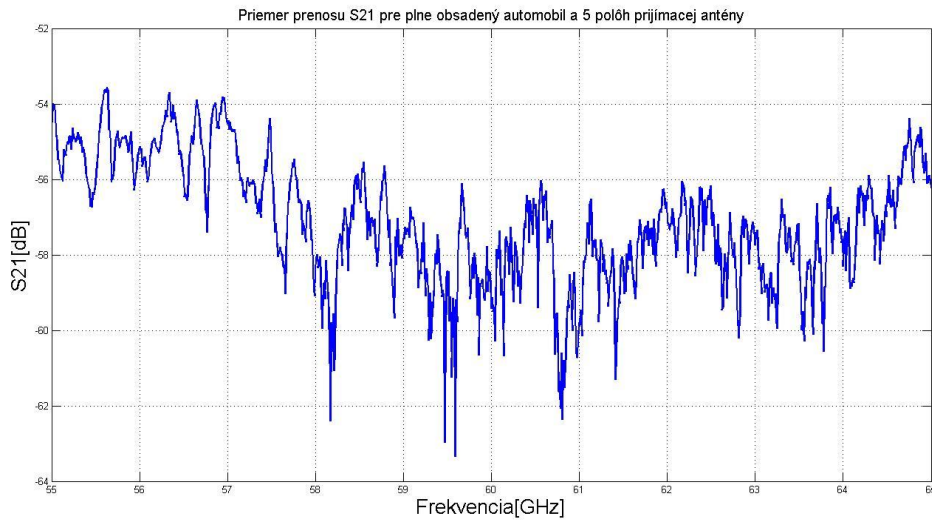
Obrázok 6.2.1-1 Priemer prenosu S_{21} pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx).

Obrázok 6.2.1-1 popisuje, aké hodnoty naberá prenos signálu v prázdnom automobile, nezávislé od polohy Rx antény. Z grafu vieme vyvodit' dva dôležité závery. Zreteľný je prepád prenosu signálu na určitých frekvenciách. Jeden konkrétne v blízkom okolí 58 GHz, ktorý je spôsobený vplyvom rôznych odrazov, ohybov či interferencie signálu od sedadiel, palubnej dosky alebo aj strechy automobilu. Určitý vplyv má aj rezonancia molekúl kyslíka a tým následné pohlcovanie energie.

Je vidieť, že okrem troch lokálnych prepádov, sa hodnota prenosu poväčšine drží v rozmedziach hodnôt -56 dB až -58 dB. Tieto hodnoty sú očakávané pre prenos v okolí

60 GHz.

Následne prikladám graf prenosu pri plne obsadenom automobile, kde je možné porovnať hodnoty pri tejto druhej hraničnej konfigurácii posádky.

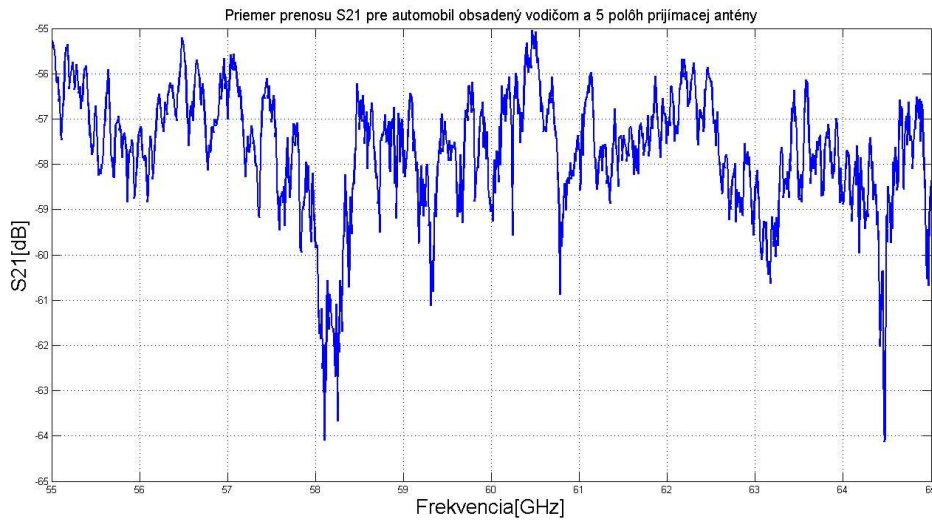


Obrázok 6.2.1-2 Priemer prenosu S_{21} pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx).

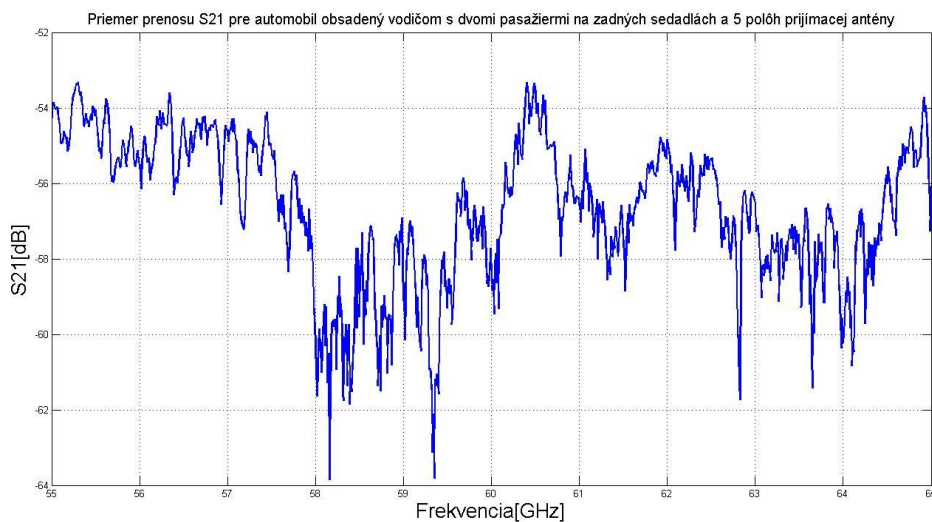
Plne obsadený automobil zaznamenáva o trochu väčší útlm, či už na 60 GHz alebo vybraných nižších/vyšších frekvenciách.

Na prvý pohľad by sa mohlo zdať, že obsadením automobilu prenos signálu poklesne výraznejšie pôsobením viacerých nových prekážok na trase medzi oboma anténami. Pováčšine je to tak, no napriek tomu zaznamenáme situácie, kedy konkrétnym umiestnením človeka napomôžeme k lepšej hodnote S_{21} . Pre určité polohy je dôležitým faktorom odraz signálu od strechy automobilu, a tým následné obchádzanie fyzickej prekážky v tvare človeka alebo sedadla.

Nasledujúce obrázky popisujú automobil obsadený len vodičom, čo je jedna z najčastejších konfigurácií posádky, a automobil obsadený vodičom s dvomi pasažiermi na zadných sedadlách.



Obrázok 6.2.1-3 Priemer prenosu S_{21} pre automobil obsadený vodičom a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).



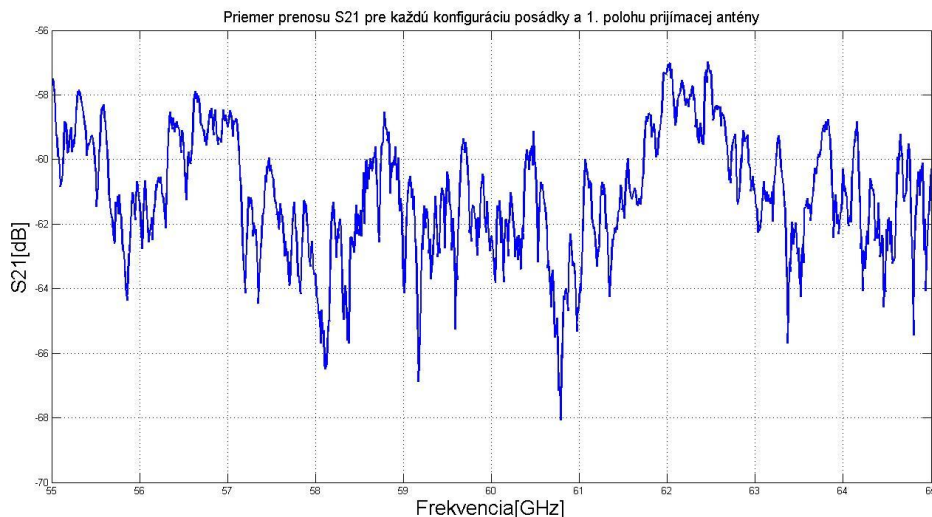
Obrázok 6.2.1-4 Priemer prenosu S_{21} pre automobil obsadený vodičom s dvomi pasažiermi na zadných sedadlách a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

Obe obrázky 6.2.1-3/4 popisujú špecifický vplyv posádky na prenos signálu. S vodičom sú hodnoty prenosu horšie, v porovnaní s automobilom doplneným o pasažierov v zadnej časti. Tí majú za následok výraznejší prepád prenosu v pásme medzi 58 GHz - 59,5 GHz, no okrem toho, prenos dosahuje lepšie hodnoty ako ten pre vodiča samotného. Špecifické umiestnenie Tx antény a posádky v tomto prípade kladne ovplyvňuje prenášaný signál a znižuje útlm. Celkovo, hodnoty S_{21} nedosahujú neočakávane nízke či vysoké hodnoty ale je potreba si byť vedomí zmeny, ktorá môže nastať.

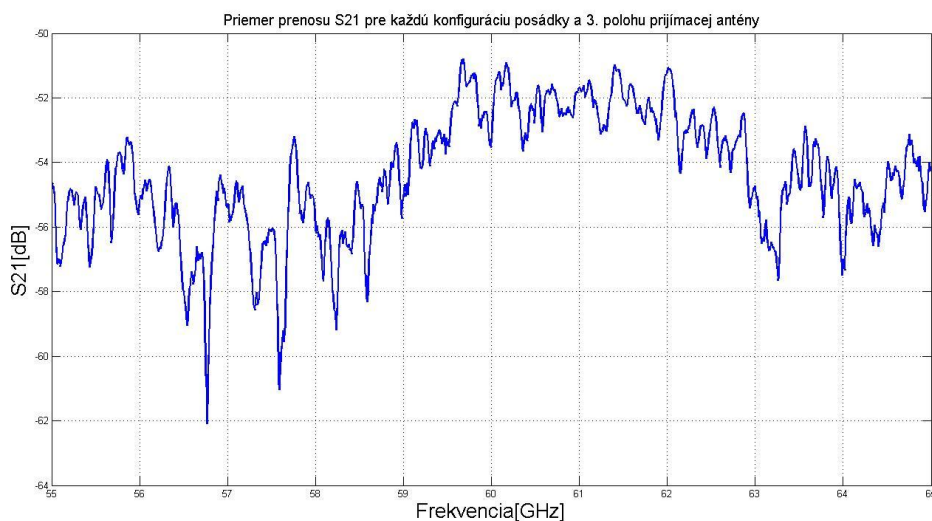
Obe obrázky popisujú špecifický vplyv posádky na prenos signálu. Následne som spriemeroval hodnoty prenosu všetkých konfigurácií posádky pre práve jednu polohu

Rx antény. Pripomínam, že vysielačacia anténa sa nachádza stále v ľavej zadnej časti automobilu, teda bod B z obrázka 5.0-1.

Do tejto časti som vybral len prvú a tretiu polohu Rx antény. Viditeľný je rozdiel, či antény na seba mieria alebo nie, teda tzv. LOS.



Obrázok 6.2.1-5 Priemer prenosu S_{21} pre každú konfiguráciu posádky a 1. polohu prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačacej antény (Tx).



Obrázok 6.2.1-6 Priemer prenosu S_{21} pre každú konfiguráciu posádky a 3. polohu prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačacej antény (Tx).

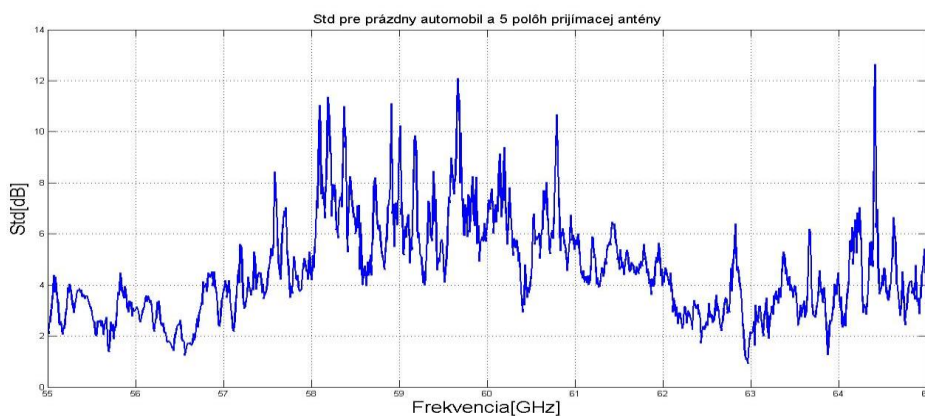
Obrázky 6.2.1-5/6 poukazujú na veľký rozdiel v polohe Rx antény a následný prenos, ktorý tomu odpovedá. Prvá poloha Rx antény nespadá pod tzv. LOS medzi anténami. Fyzické prekážky ako aj následný veľký počet odrazov, ohybov či interferencie signálu má na svedomí vysoký útlm signálu.

Pri tretej polohe Rx antény z obrázka 6.2.1-6 je pozoruhodné vymiznutie špičkových hodnôt útlmu v rozmedzí frekvencií 59 GHz - 63 GHz. Pre určitú frekvenčnú oblasť dosahuje prenos rekordných -51 dB. V porovnaní s hodnotami horšími ako -60 dB, by mala existovať jednoznačná snaha o umiestnenie Rx antény do, resp. v okolí polohy číslo 3 (obrázok 5.0-1).

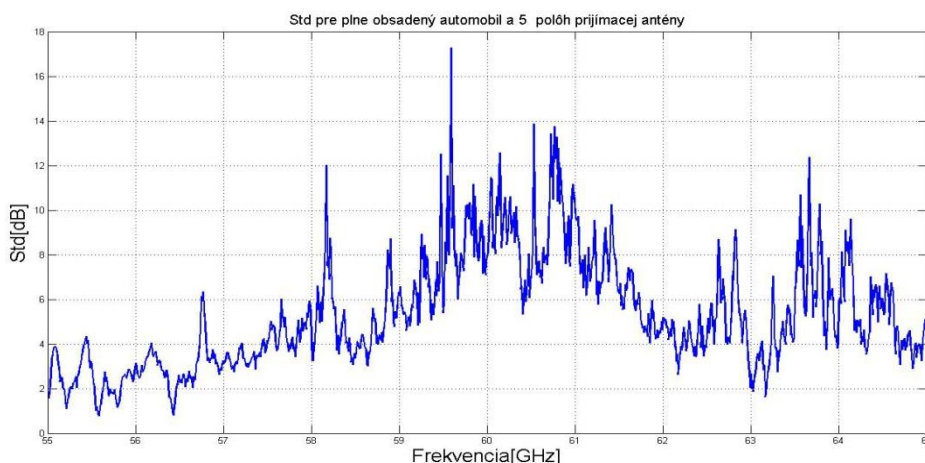
6.2.2 Smerodajná odchýlka

Podobne ako pre priemer som postupoval pri vyhodnotení smerodajnej odchýlky (std). Zo štatistiky vieme, že std hovorí o variácií, resp. rozptylu hodnôt z určitej sady hodnôt. Na nasledujúcich štyroch grafoch je vidieť std pre prázdny automobil, plne obsadený automobil a automobil s vodičom, a vodičom s dvomi pasažiermi vzadu.

Opäť ako v predchádzajúcom prípade, hodnoty std sú znázornené pre druhú polohu Tx antény, teda bod B z obrázka 5.0-1.

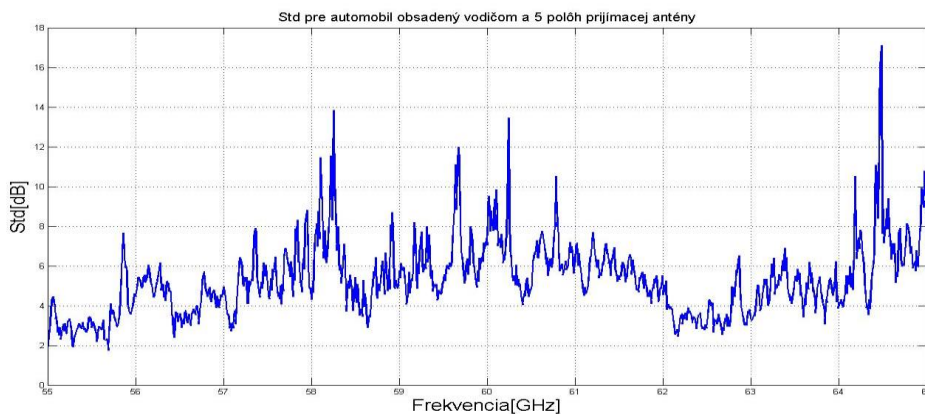


Obrázok 6.2.2-1 Std pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

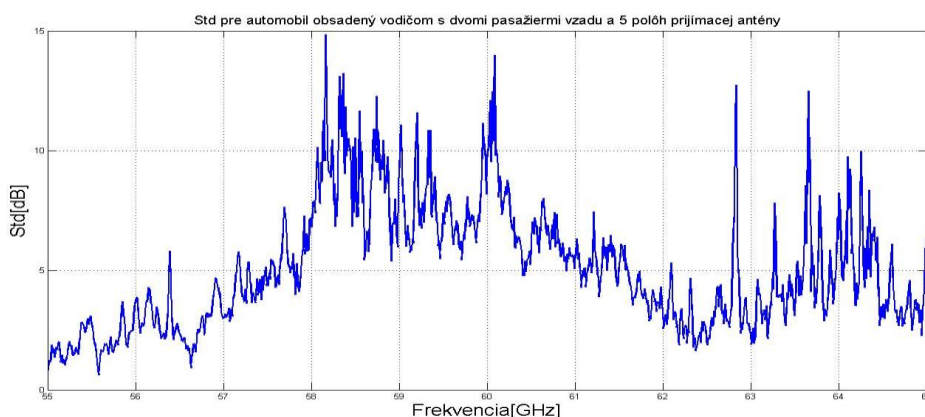


Obrázok 6.2.2-2 Std pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

Z obrázkov 6.2.2-1/2 je zjavný väčší prepad hodnôt S_{21} s kompletnou zmenou obsadenosti. Štyria ľudia vniesli posun špičkových hodnôt útlmu v závislosti na frekvencii. Taktiež zvýšené hodnoty std v týchto oblastiach hovoria o výraznejších zmenách S_{21} v plne obsadenom aute a výraznejšom prepade hodnôt S_{21} oproti priemeru.



Obrázok 6.2.2-3 Std pre automobil obsadený vodičom a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx).



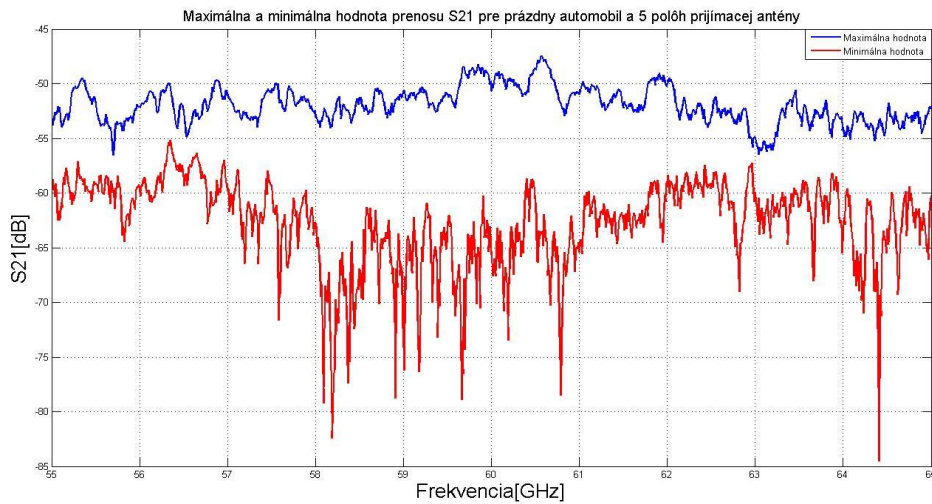
Obrázok 6.2.2-4 Std pre automobil obsadený vodičom s dvomi pasažiermi na zadných sedadlách a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx).

Oba predchádzajúce obrázky 6.2.2-3/4 potvrdzujú vyššie popísaný stav. Ten je do určitej miery rovnaký pre všetky kombinácie posádky spolu so zmenami polohy Rx antény. V okolí 60 GHz má std klasicky najväčšie hodnoty.

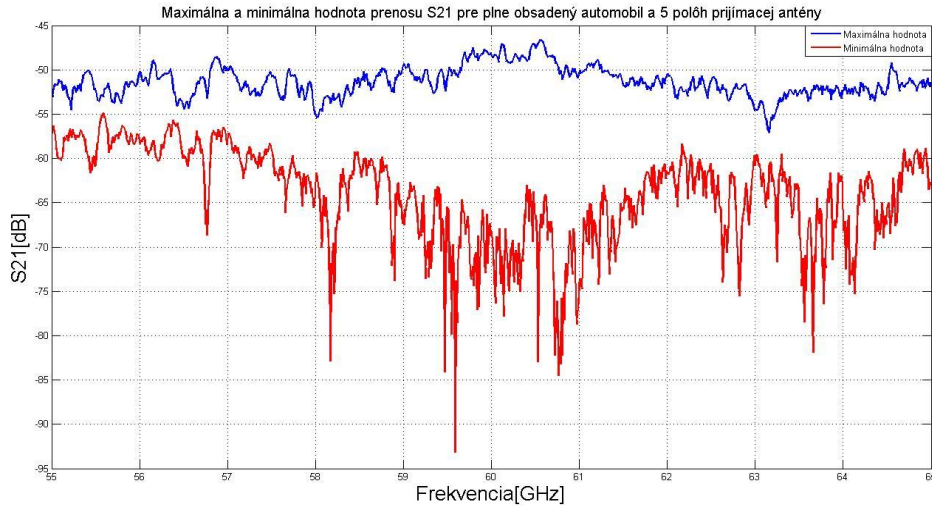
6.2.3 Rozptyl

Z definície rozptylu vieme, že sa jedná o kvadrát smerodajnej odchýlky. Hodnoty rozptylu sú vždy kladné. Rozptyl som ale poňal trochu odlišne, a to tak, že som do grafu vyniesol maximálne a minimálne hodnoty prenosu S_{21} pre určitú polohu Rx antény,

resp. konfiguráciu posádky. Takéto grafy nám znázorňujú limitné pásma hodnôt, nad a pod ktoré nestúpol, neklesol prenos signálu. Na nasledujúcich obrázkoch sú znázorené tieto hodnoty pre vybrané konfigurácie posádky, nehľadiac na špecifickú polohu Rx antény. Tx anténa sa nachádza v polohe B (obrázok 5.0-1).



Obrázok 6.2.3-1 Maximálna a minimálna hodnota prenosu S_{21} pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).



Obrázok 6.2.3-2 Maximálna a minimálna hodnota prenosu S_{21} pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

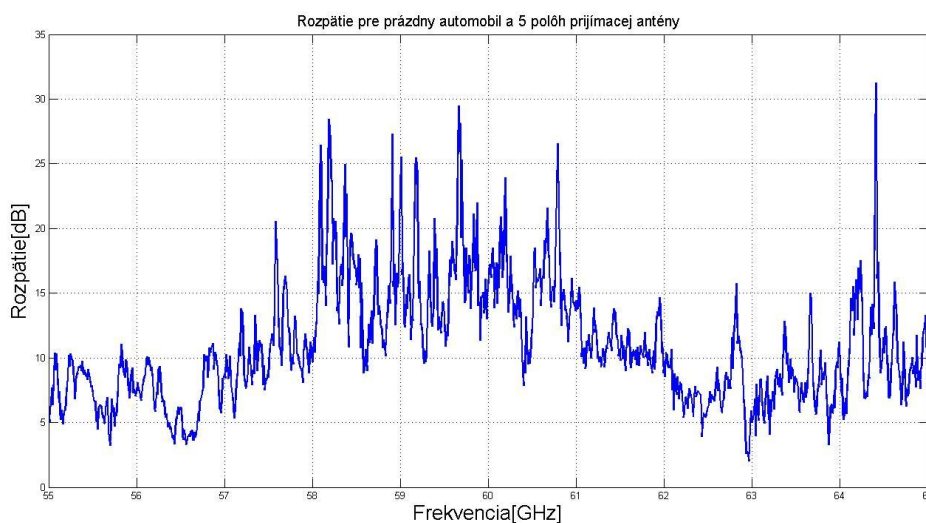
Z predchádzajúcich dvoch grafov je zrejmé, že prenos signálu sa pre prázdny a plne obsadený automobil výrazne nelíši. To je spôsobené rovnomerným usadením osôb v automobile. Tento fakt spôsobuje väčší počet odrazov signálu, interferenciu a preto sa pre určitú frekvenčnú oblasť môžu dokonca hodnoty prevyšovať tie pre prázdny automobil.

Obrázok 6.2.3-2 poukazuje aj na fakt, že pri plne obsadenom automobile je možné dosiahnuť veľmi dobré výsledky prenosu signálu. Plná obsadenosť logicky znamená najvyššiu možnú mieru využívania komunikačného kanála. A práve tu sa fakt, že hodnoty prenosu dosiahli v určitom prípade hodnotu lepšiu ako -50 dB, nám hodí do budúceho teoretického posúdenia rentability využívania takejto bezdrôtovej komunikácie v automobile.

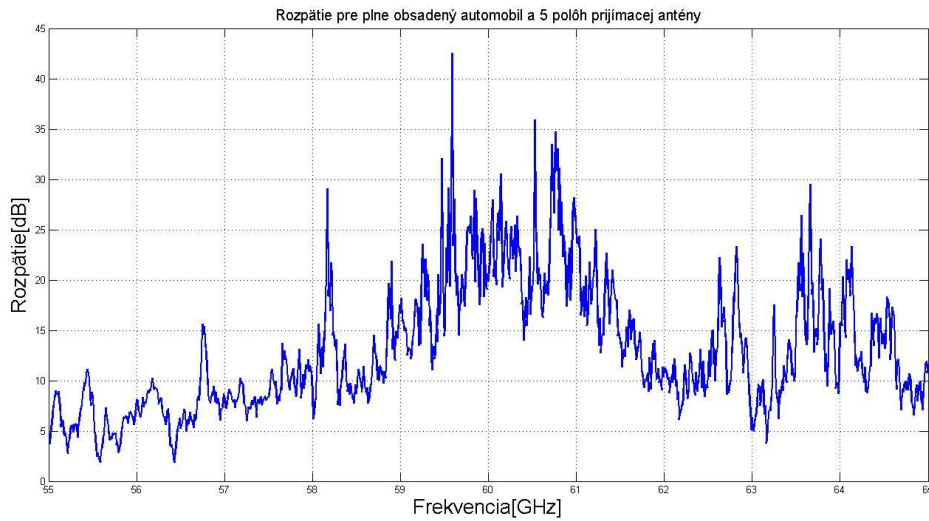
Väčšina hodnôt sa nachádza v rozpätí od -55 dB do -60 dB. No aj tento fakt má dobrú výpovednú hodnotu s uvažovaním toho, že neberieme do úvahy konkrétnu polohu Rx antény. Rx anténa má dominantný vplyv na zmeny prenosu signálu, popri zmenách posádky.

6.2.4 Rozpätie

Hodnota rozpätia nám určuje rozsah hodnôt od najnižšej po najvyššiu hodnotu meranej veličiny z určitej sady hodnôt. Dá nám to prehľad o tom, pri akej polohe Tx antény a konfigurácii posádky došlo k najväčším/najmenším rozpätiam hodnôt prenosu signálu. V tomto prípade som sa zameril na rozpätie hodnôt pre vybranú konfiguráciu posádky pre všetky polohy Rx antény a pre vybranú polohu Rx antény pre všetky konfigurácie posádky. Následný grafický výstup je pre druhú polohu Tx antény.



Obrázok 6.2.4-1 Rozpätie hodnôt pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).



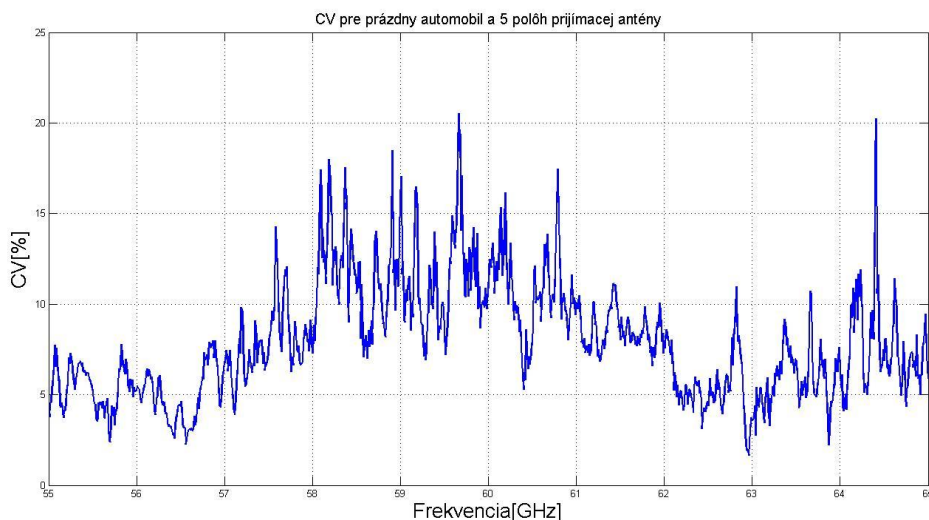
Obrázok 6.2.4-2 Rozpätie hodnôt pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielacej antény (Tx).

V oboch prípadoch, prázdny a plne obsadený automobil, hodnoty rozpätia vzrástli v okolí 60 GHz, kde zaznamenávame najväčšie hodnoty útlmu a teda aj najväčšie rozpätia nameraných hodnôt pre dané frekvenčné pásmo.

Druhá poloha Tx antény sa vyznačuje menšími hodnotami rozpätia ako prvá poloha. Taktiež je zrejmé, že 1. a 5. poloha Rx antény vykazuje takmer totožné hodnoty. Môžeme opäť potvrdiť, že druhá poloha vysielacej antény obstála lepšie a je odporúčaná pri budúcom prevedení, resp. využívaní antén na prenos signálu v automobile v 60 GHz pásme.

6.2.5 Variačný koeficient

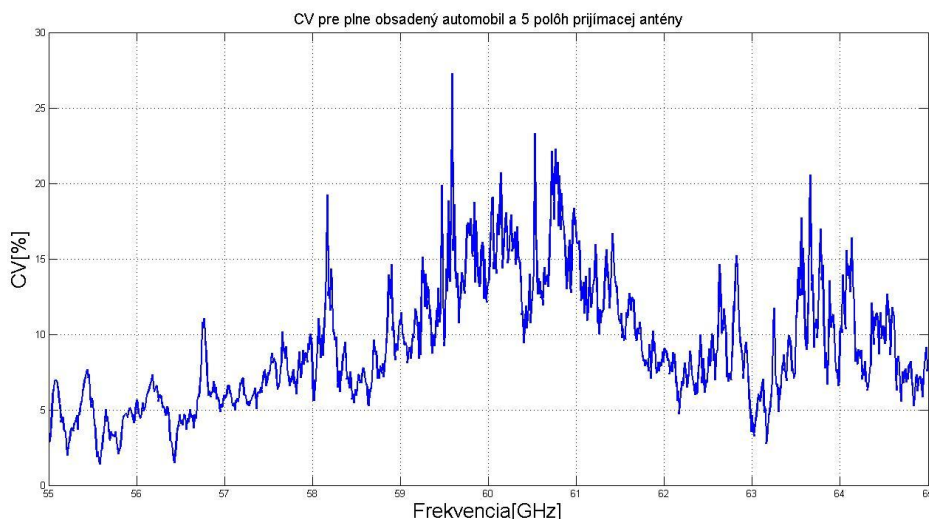
Ako posledný bod štatistického vyhodnotenia som zvolil variačný koeficient (CV). Variačný koeficient je definovaný ako podiel smerodajnej odchýlky a aritmetického priemeru, vynásobený 100%. Vyjadruje percentuálnu odlišnosť jednotlivých hodnôt vybraného súboru od priemeru pre tento súbor hodnôt.



Obrázok 6.2.5-1 CV pre prázdny automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

Obrázok 6.2.5-1 poukazuje na fakt, že pre celé frekvenčné pásmo drvivá väčšina hodnôt nepresahuje 13% hranicu. Určité lokálne zvýšenia sú viditeľné, no to len potvrdzuje tvrdenia z predchádzajúcich častí práce. V oblasti od 55 GHz - 57 GHz je vidieť veľmi nízke hodnoty CV, okolo 5%, čo predstavuje spoľahlivý prenos signálu v tomto pásme s minimálnymi lokálnymi extrémami, ktoré by mohli priamo ohroziť využívanie potenciálneho komunikačného kanálu.

Podobný priebeh nájdeme pri každej konfigurácii posádky či polohy Rx antény. Nasledujúci obrázok znázorňuje CV pri plne obsadenom automobile. Viditeľný je posun maximálnych špičkových hodnôt na iné frekvenčné hodnoty čo odzrkadľuje zmenu obsadenosti automobilu.



Obrázok 6.2.5-2 CV pre plne obsadený automobil a 5 polôh prijímacej antény (Rx), 2. poloha vysielačnej antény (Tx).

6.3 Porovnanie výsledkov meraní

Podobné meranie prenosu signálu v automobile vykonala aj trojica pánov, Moritz Schack, Martin Jacob a Thomas Kürner, ktorý pozorovali zmeny v prenose signálov v automobile pre frekvenčné pásmo UWB, 5 - 8,5 GHz, a pásmo od 67 - 70,5 GHz. Zaoberal som sa ich výsledkami v pásme 67 - 70,5 GHz.[6]

Ich meranie prebehlo v automobile Audi A8 limousine (5192 mm x 1455 mm x 1894 mm). Rozloženie meracích antén bolo opačné ako v mojom prípade. Tx anténa sa nachádzala v prednej časti automobilu medzi sedadlom vodiča a spolujazdca. Rx anténa bola položená na nadstavci na zadných sedadlách a posúvala sa v deviatich polohách. Je potrebné poznamenať, že bola rozlišovaná polarizácia antén, ktoré boli tvorené taktiež otvoreným ústím vlnovodov WR-10. Vykonané boli merania v prázdnom aute a meranie s vodičom a spolujazdcom. Zistené boli nasledujúce hodnoty.[6]

Pri vertikálnej polarizácii antén, so vstupom pasažierov do auta, vzrástla hodnota útlmu v priemere o 4,4 dB - z hodnoty 58,8 dB na 63,2 dB. V závislosti na polohe Rx antény namerané hodnoty útlmu začínali na takmer 70 dB pri krajnej, prvej polohe Rx antény. Hodnota útlmu klesala s postupným posúvaním antény do stredu automobilu, s najlepšou hodnotou tesne pod 60 dB. S približovaním sa k druhej krajnej polohe, útlm znova stúpol. Vplyv posádky znamenal zvýšenú hodnotu útlmu pre každú polohu Rx antény.[6]

Hodnoty tohto výskumu odpovedajú faktom, ktoré boli zistené v mojom meraní. Taktiež bolo zaznamenané zvýšenie útlmu pre prípad vstupu pasažierov do automobilu. Prenos signálu je najlepší v prípade priameho výhľadu Rx a Tx antén na seba. Namerané hodnoty sa samozrejme líšili od seba, každopádne potvrdzujú fakt, ktorý bol zistený počas môjho merania. V popisovanom meraní zistili najväčšiu hodnotu útlmu na hodnote 76,1 dB. V mojom meraní bola táto hodnota výrazne prekonaná hodnotou 98 dB pre prípad s druhou polohou Tx antény, prvou polohou Rx antény a pre vodiča so spolujazdcom v automobile. Táto extrémne vysoká hodnota mohla byť spôsobená interferenciou v mieste Rx antény na danom kmitočte.[6]

7 ZÁVER

Zadaním bakalárskej práce bol návrh uchopenia a rozmiestnenia vysielacej a prijímacej antény v automobile s následným meraním prenosu signálu v pásme milimetrových vln pri zmene polôh týchto antén a zmene obsadenosti automobilu.

Prvá časť popisuje vlastnosti milimetrových vln a ich význam, použitie v automobile. Ďalej sa práca zaoberá teoretickými poznatkami o šírení a skladaní vln. Jedna kapitola sa venuje problematike vlnovodov, keďže vysielacou a prijímacou anténou je otvorené ústie vlnovodu.

Pre uchopenie antén boli vybrané lišty a držiaky z hliníka a vybraných 10 konfigurácií posádky, ktorá sa menila pre každé usporiadanie antén. Meranie ukázalo dôležitosť priameho výhľadu antén na seba, bez ohľadu na obsadenie automobilu. Takéto polohy antén dosahovali hodnoty S_{21} v priemere o 10,5 dB (na kmitočte 60 GHz), pre polohu B vysielacej antény v zadnej časti automobilu, lepšie ako v prípade polohy bez priameho výhľadu antén na seba. Pre polohu A vysielacej antény v zadnej časti automobilu je zmena na úrovni 16 dB. Najhoršie dopadla poloha prijímacej antény číslo 1 v ľavej krajnej polohe, a to pre obe polohy vysielacej antény. Hodnoty pri 60 GHz činili -70 dB (A) a -62,5 dB (B). Najlepšie obstála poloha číslo 3, prijímacia anténa upevnená v strede automobilu, opäť pre obe polohy vysielacej antény s výsledkami -54 dB (A) a -52 dB (B).

Čo sa týka konfigurácie posádky, jej vplyv je úzko naviazaný na polohu prijímacej antény. Pasažieri na zadných sedadlách, vďaka svojmu umiestneniu, v určitých polohách dokonca pozitívne vplývajú na hodnotu prenosu. Pri 3. polohe prijímacej antény sme dospeli k hodnotám nepresahujúcim -50 dB. Vodič a pasažier majú viac negatívnejší vplyv, najmä vďaka svojej polohe brániacej priamemu výhľadu antén na seba a vzniku ohybu, či interferencie vln.

V prípade obsadenia zadných sedadiel batožinou prenos signálu dosahuje stabilné a prijateľné hodnoty. Batožina svojou veľkosťou teda nekonkuruje človeku. Je umiestnená na sedadle, kde výrazne nezasahuje do vyžarovacej charakteristiky antény a zároveň textilný materiál taktiež nepredstavuje žiaden problém, ktorý by mal vyústiť do zlej, resp. nepravidelnej možnosti spoľahlivého využívania komunikačného kanála.

Pre budúce využitie 60 GHz pásma v automobile na prenos signálu odporúčam umiestniť vysielaciu anténu do zadnej časti automobilu, vľavo do oblasti nad hlavu pasažiera sediaceho za vodičom. Prijímaciu anténu ideálne do stredu v prednej časti automobilu, do oblasti okolo spätného zrkadla, resp. častí s elektronikou, ktorá sa v okolí nachádza. Prenos signálu je silne závislý od možnosti priameho výhľadu antén na seba (LOS) a od každej fyzickej prekážky na ceste signálu medzi anténami.

LITERATÚRA

- [1] Portál ETHW.org [online]. 2016 [cit. 2015-09-17]. Dostupné z : http://ethw.org/Millimeter_Waves
- [2] FRENZEL, L. [online]. 2016 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z : <http://www.electronicdesign.com/communications/millimeter-waves-will-expand-wireless-future>
- [3] LÁČIK, J. *Šíření rádiových vln a užití kmitočtového spektra*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2009. 12 s.
- [4] C. R. Anderson and T. S. Rappaport, "In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 3, pp. 922-928, May 2004.
- [5] J. S. Lu, P. Cabrol, D. Steinbach and R. V. Pragada, "Measurement and Characterization of Various Outdoor 60 GHz Diffracted and Scattered Paths," *MILCOM 2013 - 2013 IEEE Military Communications Conference*, San Diego, CA, 2013, pp. 1238-1243.
- [6] H. K. Pan, "Dual-polarized Mm-wave phased array antenna for multi-Gb/s 60GHz communication," *Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on*, Spokane, WA, 2011, pp. 3279-3282.
- [7] M. Schack, M. Jacob and T. Kiirner, "Comparison of in-car UWB and 60 GHz channel measurements," *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 2010, pp. 1-5.
- [8] LEHPAMER, Harvey. *Microwave transmission networks: planning, design, and deployment*. New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0071432493.
- [9] LÁČIK, J. *Elektromagnetická vlna, parametry antén, přenos signálu spojovacím řetězcem*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2009. 14 s.
- [10] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2006. 133 s. ISBN 80-214-3301-9.
- [11] HARWOOD, Mike. *Exam cram: CompTIA Network+*. 3rd ed. Indianapolis, Ind.: Pearson, c2009. Exam cram. ISBN 0789737965.
- [12] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky*. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2222-X.
- [13] RAIDA, Z. *Multimediální učebnice Elektromagnetické vlny, antény a vedení* [online] 2014 [cit. 2015-05-08] Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/index.htm>
- [14] Car Drawing Top View. 2015 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z : <http://eskay-eskay.blogspot.cz/2015/03/car-drawing-top-view.html>
- [15] Portál Rhode-Schwarz.com [online]. 2016 [cit. 2016.5.22]. Dostupné z : https://www.rohde-schwarz.com/product/zva-productstartpage_63493-9660.html
- [16] Portál Wikipedia.com [online]. 2016 [cit. 2016.4.24]. Dostupné z : https://en.wikipedia.org/wiki/Link_budget

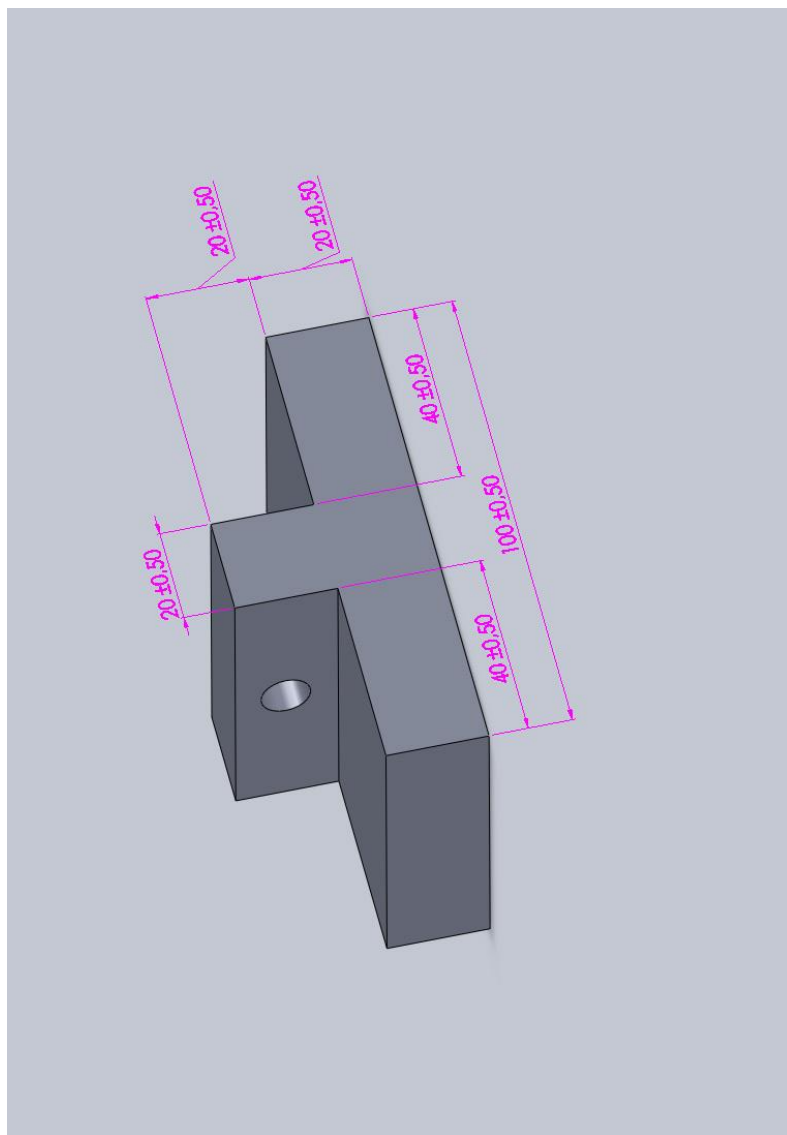
ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

μ	Permeabilita
ε	Permitivita
ω	Uhlová rýchlosť
r	Polomer
f	Frekvencia
L_f	Útlm signálu
l	Vzdialenosť
k	Vlnové číslo
E	Elektrická intenzita
k_i	Vlnový vektor dopadajúcej vlny
k_r	Vlnový vektor odrazenej vlny
k_t	Vlnový vektor prenikajúcej vlny
k_{01}	Modul vlnového vektora
k_{02}	Modul vlnového
σ	Vodivosť prostredia
θ_i	Uhol dopadu
θ_r	Uhol odrazu
θ_t	Uhol lomu
a	Šírka vlnovodu
b	Výška vlnovodu
m	Koeficient určujúci vidové číslo
n	Koeficient určujúci vidové číslo
S_{21}	Napäťové zosilnenie, prenos signálu
TEM	Transverzálne elektromagnetická vlna
TE	Transverzálne elektrická vlna
TM	Transverzálne magnetická vlna
E-M	Elektromagnetické, napr. vlnenie

A NÁVRH ZARIADENIA, UKÁŽKA KÓDU POUŽITÉHO K SPRACOVANIU HODNÔT

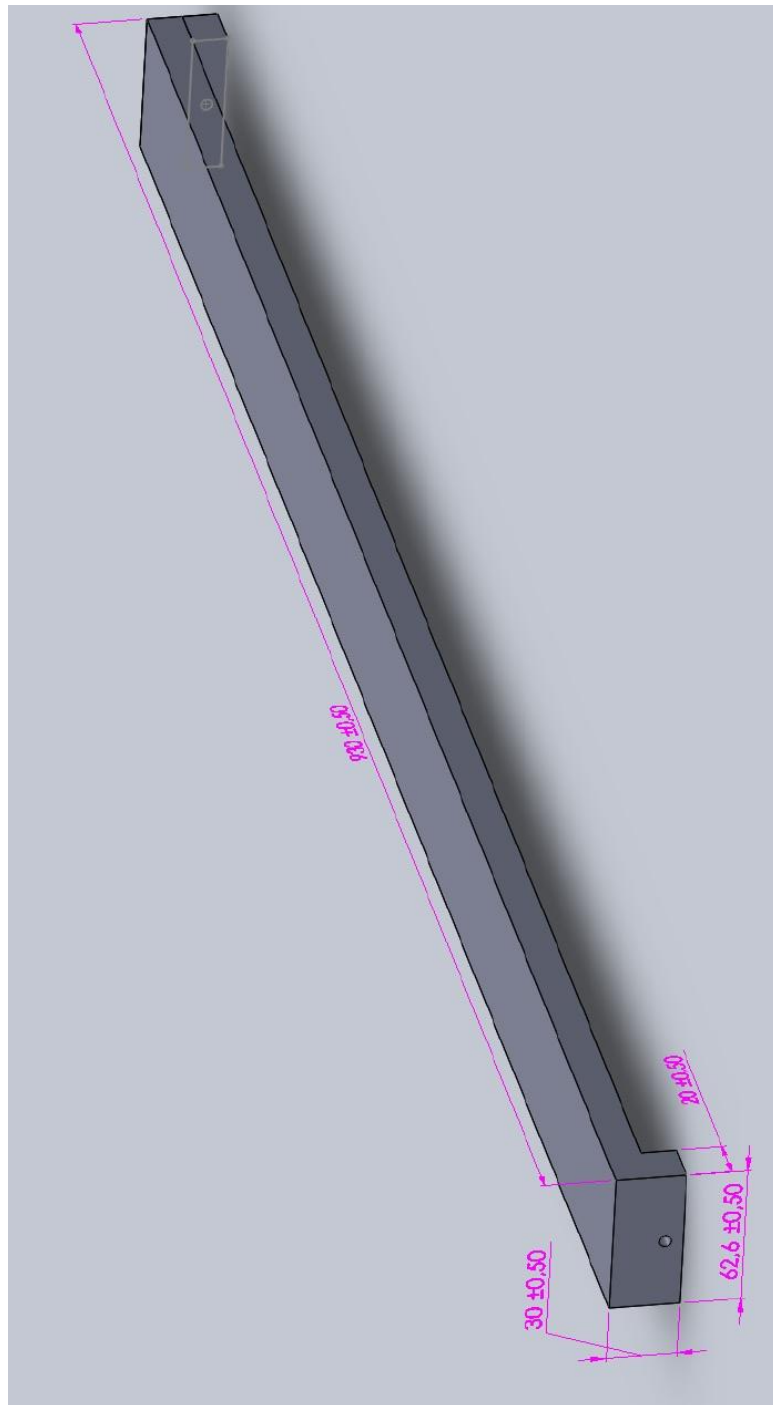
A.1 Model bežca, na ktorý sa pripojila Rx anténa

(100mm x 62,5mm x 40mm)



A.2 Model lišty

(930mm x 62,5 mm x 30/10mm)



A.3 Ukážka kódu k načítaniu a vyhodnoteniu nameraných hodnôt, graficky a štatisticky

Načítanie dát

```
filename = dir('C:\Users\Desktop\hodnoty*.slp');
[~,index] = sortrows({filename.date}.'); % radenie podľa času
filename = filename(index);
clear index
numfiles = length(filename);
delimiter = '\t';
startRow = 6;
```

Načítanie dát zo súboru podľa stĺpcov

```
dataArray(:,i) = textscan(fileID(i,1), formatSpec , 'Delimiter',...
                        delimiter, 'EmptyValue' ,NaN,'HeaderLines' ,...
                        startRow-1, 'ReturnOnError', false);
```

Priradiť hodnoty k premenným:

```
meas_s21 = dataArray;
freqHz(:,1) = dataArray(:,1){:,1}; % kmitočtová osa

for i = 1:length(dataArray)
    meas_s21(:,i) = dataArray{1,i}{1,2}; % výber nameraných hodnôt S21, závisí od
                                        spôsobu ako analyzátor ukladá hodnoty
end
```

Priemer

```
A = mean(meas_s21(:, [1,10]), 2)

% ukážka pre výpočet priemeru jednej polohy Rx antény - [1,10]
```

Smerodajná odchýlka

```
B = std(meas_s21(:, [1,10]), 0, 2)

% ukážka pre výpočet std jednej polohy Rx antény - [1,10]
```

Rozptyl

```
C = max(meas_s21(:, [1,10]), [], 2)
D = min(meas_s21(:, [1,10]), [], 2)

% ukážka pre výpočet max/min hodnoty jednej polohy Rx antény - [1,10]
```

Rozpätie

```
E = range(meas_s21(:, [1,10]), 2)

% ukážka pre výpočet rozpätia hodnot jednej polohy Rx antény - [1,10]
```

Variačný koeficient (CV)

```
CV = B./abs(A)*100;

% Vzťah pre CV = std/priemer*100%
```

2D graf

```
for i = 1 % výber z hodnôt
    figure()
    plot(freqHz/10^9, meas_s21(:, i), 'LineWidth', 2) % prvý stĺpec z meas_s21 = 1.
    poloha prijimacej antény a 1. konfigurácia posádky
    hold on
    plot(freqHz/10^9, meas_s21(:, i+1), 'r', 'LineWidth', 2) % druhý stĺpec z meas_s21 = 1.
    poloha prijimacej antény a 2. konfigurácia posádky
    hold on
    plot(freqHz/10^9, meas_s21(:, i+2), 'g', 'LineWidth', 2) % tretí stĺpec z meas_s21 = 1.
    poloha prijimacej antény a 3. konfigurácia posádky
    hold on
    plot(freqHz/10^9, meas_s21(:, i+3), 'm', 'LineWidth', 2) % štvrtý stĺpec z meas_s21 = 1.
    poloha prijimacej antény a 4. konfigurácia posádky
```

```

hold on
plot(freqHz/10^9,meas_s21(:,i+4),'k','LineWidth',2) % piaty stĺpec z meas_s21 = 1.
poloha prijimacej antény a 5. konfigurácia posádky

legend('1. konfigurácia','2. konfigurácia','3. konfigurácia','4.
konfigurácia','5. konfigurácia')
grid on
title('Vlastný názov grafu','FontSize',15);
xlabel('Frekvencia[GHz]','FontSize',20);
ylabel('S21[dB]','FontSize',20);

end

```

3D graf

```

hold off

osa_z(:,1)= meas_s21(:,1); % jednotlivé pozície prijimacej antény
osa_z(:,2)= meas_s21(:,11);
osa_z(:,3)= meas_s21(:,21);
osa_z(:,4)= meas_s21(:,31);
osa_z(:,5)= meas_s21(:,41);
osa_z=osa_z'; % prehodenie riadkov za stĺpce

osa_y=(1:5); % počet pozícií prijimacej antény

osa_x=freqHz; % kmitočtová osa

surf1(osa_x,osa_y,osa_z) % vykreslenie 3D grafu

% waterfall(osa_x,osa_y,osa_z) % vykreslenie viac grafov do 3D priestoru

title('Vlastný názov grafu','FontSize',20);
xlabel('Frekvencia[Hz]','FontSize',15);
ylabel('Poloha prijimacej antény[-]','FontSize',15);
zlabel('S21[dB]','FontSize',15);

```