



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

ODRAZNÁ PLOCHA OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

RADAR CROSS SECTION OF PASSENGER CARS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radovan Hanslík

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Radovan Hanslík

ID: 155164

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Odrazná plocha osobních automobilů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možné přístupy k počítačové simulaci odrazné plochy osobních automobilů a vzájemně je porovnejte. Vlastnosti přístupů ověřte na podrobném elektromagnetickém modelu odrazné plochy automobilu Škoda Octavia. Vyberte optimální přístup k numerické simulaci a svůj výběr vysvětlete.

Odraznou plochu automobilu počítejte pro směry ozařování, které odpovídají projíždění automobilu kolem stacionárního radaru. Navrhněte a realizujte experiment, kterým budou výsledky výpočtů ověřeny.

V závěrečné diskusi se věnujte vlivu velikosti a tvaru automobilu na odraznou plochu. Podkladem pro diskusi by měly být výsledky simulací, založených na velmi hrubých numerických modelech různých typů automobilů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SCHIPPER, T.; FORTUNY-GUASCH, J.; TARCHI, D.; REICHARDT, L.; ZWICK, T.; RCS measurement results for automotive related objects at 23-27 GHz, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, 2011, p. 683-686.

[2] SCHICK, M.; FIEDLER, R.; LEZAR, E.; JAKOBUS, U.; Car-to-car communication using efficient far-field RCS simulations to account for reflecting objects in the communication path, Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation, 2012, p. 2039–2042.

[3] PALUBINSKAS, G.; RUNGE, H.; Radar signatures of a passenger car, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, vol. 4, no. 4. P. 644-648.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá simulací odrazné plochy osobních automobilů. Jsou zde popsány základní odrazné vlastnosti objektů. Dále jsou popsány vybrané numerické metody, které se využívají při počítačových simulacích reálných objektů. V kapitole 2 je popsána simulace v prostředí CST Microwave Studio za použití dvou různých numerických metod. Výsledky jsou grafy odrazné plochy osobního automobilu v závislosti na směru dopadající vlny pro kmitočty 1 GHz, 24,125 GHz a 33 GHz a také vizualizace míst na povrchu automobilu, které se nejvíce podílí na odrazu el-mag. vlny.

Klíčová slova

Odrazná plocha, simulace, RCS, CST

Abstract

This diploma thesis is aimed at radar cross section of passenger cars. Basic scattering parameters of simple targets are described. Some numeric methods used for computing radar cross section are discussed. CST Microwave Studio is used for simulation of passenger car with two different solvers. For the results there are plots of radar cross section of a car for 1 GHz, 24.125 GHz and 33 GHz. There is a plot of visualized hotspots.

Keywords

Radar Cross Section, simulation, RCS, CST

Bibliografická citace:

HANSLÍK, Radovan. *Odravná plocha osobních automobilů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119378>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zbyněk Raida.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Odrazná plocha osobních automobilů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: **15. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **15. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Úvod..... | 10 |
| 2. | Odrazná plocha..... | 11 |
| 2.1 | Odrazná plocha základních tvarů | 11 |
| 2.2 | Simulace odrazné plochy – numerické metody | 13 |
| 2.3 | Porovnání programů pro simulaci odrazné plochy | 15 |
| 2.4 | Měření odrazné plochy..... | 16 |
| 3. | Simulace odrazné plochy | 17 |
| 4. | Závěr | 28 |

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

| | | |
|-------|-----|--------------------------------------|
| RCS | ... | Radar cross section |
| FDTD | ... | Finite Difference Time Domain Method |
| MLFMM | ... | Multi Level Fast Multipole Method |
| SBR | ... | Shooting and bouncing rays |

Symboly:

| | | | |
|----------|-----|----------------|---------------------|
| σ | ... | odrazná plocha | [dBm ²] |
|----------|-----|----------------|---------------------|

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Koule | 12 |
| Obr. 2: Rovinná obdélníková deska..... | 12 |
| Obr. 3: Válec..... | 12 |
| Obr. 4: Trojúhelníkový koutový odražeč..... | 13 |
| Obr. 5: Čtvercový koutový odražeč..... | 13 |
| Obr. 6: Umístění radaru vůči silnici..... | 17 |
| Obr. 7: Model automobilu | 17 |
| Obr. 8: Model automobilu – vnitřní struktura..... | 18 |
| Obr. 9: Buzení rovinnou vlnou | 18 |
| Obr. 10: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Integral eq. solver | 19 |
| Obr. 11: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Integral eq. solver, polární souřadnice.... | 19 |
| Obr. 12: Počáteční body dopadu paprsků | 21 |
| Obr. 13: Vizualizace odražených paprsků | 22 |
| Obr. 14: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Asymptotic solver | 22 |
| Obr. 15: Odrazná plocha pro $f = 24$ GHz, Asymptotic solver | 23 |
| Obr. 16: Sinogram..... | 23 |
| Obr. 17: Hotspoty | 24 |
| Obr. 18: Porovnání obou solverů pro $f = 1$ GHz | 24 |
| Obr. 19: Porovnání SBR Raytubes a SBR..... | 25 |
| Obr. 20: Porovnání horizontální a vertikální polarizace..... | 26 |
| Obr. 21: Vliv funkce Extract curvature information..... | 26 |
| Obr. 22: Bistatický režim..... | 27 |

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá simulací odrazné plochy osobních automobilů. Jsou zde popsány základní odrazné vlastnosti objektů. Jsou zde také uvedeny vzorce pro výpočet odrazné plochy základních jednoduchých tvarů. Pro složité objekty se využívá počítačové simulace. Pro tyto simulace jsou popsány vybrané numerické metody. Následně je popsána simulace odrazné plochy osobního automobilu za použití dvou různých metod v prostředí CST Microwave Studio.

2. ODRAZNÁ PLOCHA

Efektivní odrazná plocha (angl. Radio Cross Section – RCS) je fiktivní plocha, kterou lze nahradit měřený objekt a která vyvolá stejnou intenzitu pole v místě přijímací antény jako skutečný měřený objekt. Efektivní odrazná plocha udává míru odraženého výkonu od objektu směrem k radaru (anténě). Velikost odrazné plochy závisí na řadě faktorů, jako je tvar objektu, jeho celková velikost a velikost vůči vlnové délce, materiálu, polarizaci vlny, směru příchodu ozařující elektro-magnetické vlny. Velikost RCS se vypočte [1]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left(4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right), \quad (1.1)$$

kde R je vzdálenost mezi radarem a cílem, E_s je intenzita elektrického pole dopadající vlny a E_i je intenzita elektrického pole odražené vlny.

Odrazové vlastnosti cílů se liší v závislosti na vlnové délce (λ) a rozměrech cíle (l):

pro nízké frekvence, kdy velikost cíle je mnohem menší než vlnová délka ($l \ll \lambda$) lze cíl považovat za bodový a jeho odrazná plocha je téměř zanedbatelná, např. letadlo ve velké vzdálenosti

pro střední frekvence, kdy jsou rozměry vlnové délky srovnatelné s rozměry cíle, dochází k rezonanci a k odrazu signálu přispívají všechny části o patřičných rozměrech

pro vysoké frekvence, rozměry cíle jsou mnohem větší než vlnová délka ($l \gg \lambda$), lze použít aproximace geometrické optiky nebo fyzikální optiky a odražený signál lze považovat za součet signálů od jednotlivých bodů rozmístěných na povrchu cíle.

Velikost odrazné plochy také závisí na způsobu měření a typu použitého radaru. Ten může být buď monostatický nebo bistatický. Monostatický radar má vysílací i přijímací část umístěnou v jednom bodě, resp. blízko vedle sebe, zatímco bistatický radar má přijímací část umístěnou na jiném místě, než je část vysílací. [1]

2.1 Odrazná plocha základních tvarů

Pro některé základní tvary lze vypočítat velikost odrazné plochy pomocí vzorců. Ty platí při ozařování rovinnou vlnou a nejčastěji také jen pro určité úhly ozáření.

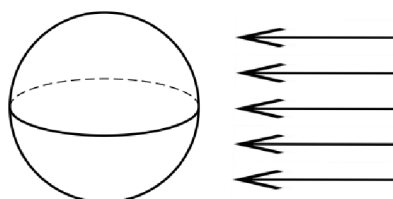
Koule – pro perfektně vodivou kouli (Obr. 1) závisí efektivní odrazná plocha na poměru poloměru koule r a vlnové délky λ , pro $r/\lambda < 0,13$ platí vztah [2]:

$$\sigma = 9 \cdot \left(2\pi \frac{r}{\lambda} \right)^4 \cdot \pi \cdot r^2. \quad (1.2)$$

Pro větší poměry r/λ hodnota odrazné plochy osciluje a pro velké poměry $r \gg \lambda$ odpovídá hodnota odrazné plochy přibližně ploše kruhu dané koule, tedy [2]

$$\sigma = \pi \cdot r^2. \quad (1.3)$$

Vzhledem k symetrii koule se jedná o ideální nesměrový odrazeč, který se hodí k použití jako referenční bod o známé efektivní odrazné ploše při měření skutečných komplexních objektů nebo pro kalibraci radarových systémů.

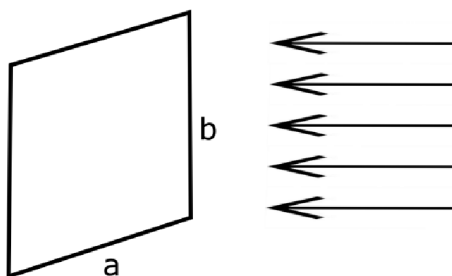


Obr. 1: Koule

Rovinná obdélníková deska – odrazná plocha pro obdélníkovou desku (Obr. 2) se vypočte [3]:

$$\sigma = \frac{2\pi a^2 b^2}{\lambda^2}, \quad (1.4)$$

kde a a b jsou rozměry desky. Tento vzorec platí při ozáření desky kolmo k ploše obdélníku.

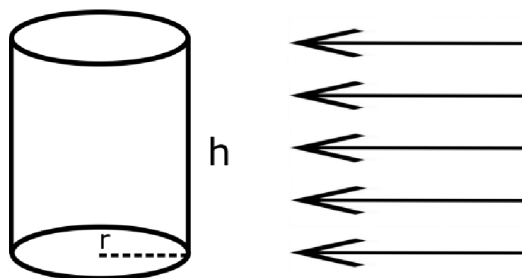


Obr. 2: Rovinná obdélníková deska

Válec – odrazná plocha válce (Obr. 3) se určí jako [3]:

$$\sigma = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}, \quad (1.5)$$

kde r je poloměr válce a h je výška válce.

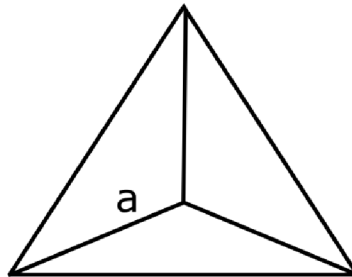


Obr. 3: Válec

Trojúhelníkový koutový odražeč – koutový odražeč (Obr. 4) je umělý cíl, který má velkou odraznou plochu velmi málo závislou na úhlu dopadu záření. Koutový odražeč se skládá ze tří navzájem kolmých vodivých stěn trojúhelníkového tvaru, které se navzájem protínají. Koutový odražeč má největší hodnotu odrazné plochy ve směru symetrie koutu. Dopadající paprsek se v odražeči odráží od všech tří stěn a vrací se zpět do původního směru záření. Koutový odražeč je nejvíce účinný pouze v jedné osmině koule. Pro pokrytí více směrů je možné využít seskupení více koutových odražečů. Odrazná plocha trojúhelníkového koutového odražeče se vypočte jako [2]:

$$\sigma = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (1.6)$$

kde a je délka hrany odražeče.

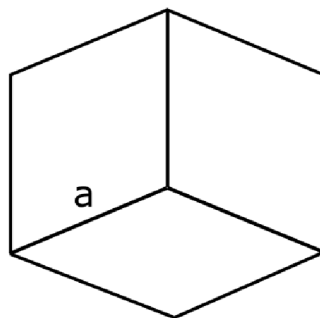


Obr. 4: Trojúhelníkový koutový odražeč

Čtvercový koutový odražeč – od trojúhelníkového koutového odražeče se liší pouze tvarem stěn, které mají čtvercový tvar. To má vliv i na velikost odrazné plochy, která se vypočítá jako [2]:

$$\sigma = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2}. \quad (1.7)$$

Čtvercový koutový odražeč (Obr. 5) má při stejné délce hrany a devětkrát větší odraznou plochu oproti trojúhelníkovému odražeči. Koutové odražeče se používají jako referenční body v prostoru při určování polohy, nebo jako reference o známé velikosti odrazné plochy při měření odrazné plochy neznámých objektů. [2][4]



Obr. 5: Čtvercový koutový odražeč

2.2 Simulace odrazné plochy – numerické metody

Reálné objekty je možné částečně aproximovat jednoduchými tvary, pro které jsou známy vztahy pro výpočet odrazné plochy. Celková odrazná plocha by se poté vypočetla, jako jednotlivé příspěvky těchto základních tvarů. Tento způsob je ovšem značně nepřesný. Proto se pro určení odrazné plochy reálných objektů využívá buď měření nebo software pro řešení elektro-magnetických rovnic. Do tohoto softwaru lze

nahrát přesný CAD model simulovaného objektu. Různé softwary využívají pro výpočet odrazné plochy různé numerické metody. Některé z nich zde budou krátce popsány.

Geometrická optika – používá se pro elektro-magnetické vlnění s vlnovou délkou mnohem menší než ozařované objekty. Popisuje šíření elektro-magnetických vln v podobě paprsků, ty se mohou šířit samostatně nebo ve svazcích. Paprsky se šíří přímočaře v homogenním prostředí a při dopadu na rozdílné prostředí dojde k jejich odrazu, ohybu nebo pohlcení. Geometrická optika je zjednodušená metoda šíření elektro-magnetických vln, neboť nebere v potaz některé vlastnosti vlnění jako je difrakce, interference nebo polarizace. [1][5]

Fyzikální (vlnová) optika – je vysokofrekvenční aproximace, která je přesnější než geometrická optika, ale nedosahuje přesnosti plně vlnového přístupu k šíření elektro-magnetických vln. Tato metoda využívá stejný princip jako geometrická optika, tedy daný objekt je ozařován elektro-magnetickou vlnou ve formě paprsků. Ty vyvolají povrchový proud. Odražená vlna se získá řešením integrálních rovnic s danými povrchovými proudy. Povrchové proudy přispívají ke zpětnému šíření pouze v místech ozařených dopadající vlnou, pro neozářené části zkoumaného objektu se proudy uvažují nulové. [1][5]

Tyto dvě metody jsou obecně méně přesné v okolí hran a okrajů. Pro zvýšení přesnosti mohou být doplněny dalšími metodami, které se hodí pro výpočet difrakce.

Metoda momentů – je numerická metoda, která řeší elektro-magnetické rovnice v integrálním tvaru. Tyto rovnice převede na lineární rovnice v maticového tvaru, které jsou výpočetně jednodušší. Tato metoda vytváří diskretizační síť povrchu nebo objemu objektu. Tato metoda vytváří hustou matici, to znamená, že se zvětšujícími se rozměry roste náročnost výpočtu přibližně s druhou mocninou. [6]

Metoda konečných diferencí (Finite Difference Time Domain Method – FDTD) - tato metoda řeší Maxwellovy rovnice v časové oblasti. Je založena na diskretizaci parciálních diferenciálních rovnic, u kterých jsou nahrazeny derivace diferenciály. Tato metoda také vyžaduje diskretizační síť objektu a u velkých objektů rostou její nároky na výpočetní paměť. [1]

Multi Level Fast Multipole Metod – jedná se o aproximační metodu, která vychází z metody momentů a používá se pro řešení elektricky velkých problémů. Tato metoda dělí prvky diskretizační sítě do shluků a pokud se tyto shluky nachází v navzájem vzdálené oblasti, určí se nový bod ve středu mezi těmito shluky, se kterým se následně počítá namísto původních prvků. Tím se sníží hustota matice a také náročnost výpočtu. Oproti metodě momentů snižuje požadavky na výpočetní paměť z N^3 na $N \log N$ a nároky na dobu simulace z N^2 na $N_{\text{iter}} \cdot N \log N$, kde N je počet neznámých a N_{iter} je počet iterací solveru. [3]

Paprsková metoda (Shooting and bouncing rays) – tato metoda je založena na vyslání velkého množství paprsků, které se při dopadu na objekt odrazí. Pro určení těchto odrazů je využíváno principů geometrické optiky. Následně je použito principů fyzikální optiky pro výpočet pole odraženého signálu. [5]

2.3 Porovnání programů pro simulaci odrazné plochy

Ansyz HFSS

Ansyz HFSS je software pro širokou škálu elektromagnetických simulací. Disponuje několika solvery pro řešení různých druhů problémů. Ansyz HFSS používá několik numerických metod:

Metodu konečných prvků pro solver pracující ve frekvenční oblasti. Ta je vhodná především pro simulaci parametrů antén, integrovaných obvodů, vlnovodů a dalších elektricky malých prvků.

Metoda konečných prvků pro solver pracující ve časové oblasti se používá pro simulaci přechodových jevů elektromagnetického pole a k jeho vizualizaci. Využívá se zde stejná metoda konečných prvků pro vytváření meshovací sítě jako u solveru pracujícího ve frekvenční oblasti. Díky tomu je možno provádět více různých simulací s pomocí různých solverů a kombinovat výsledky bez nutnosti vytvářet různé meshovací sítě pro jednotlivé metody.

Integrální solver využívá 3D metodu momentů a hodí se především k simulaci návrhu a umístění antén a také k simulaci odrazné plochy. Je tedy vhodný i pro řešení elektricky velkých problémů.

ANSYS HFSS SBR+

je asymptotický solver, který využívá paprskovou metodu. Hodí se pro výpočet parametrů antén, vyzařovacích parametrů a radarových vlastností velkých objektů, při malé výpočetní náročnosti. Hodí se také pro výpočet RCS.

Matlab

Simulovat odraznou plochu je možné také v prostředí Matlab. Existuje zde pro to určený systémový objekt *phased.RadarTarget*. Tato možnost se ovšem hodí jen pro simulaci základních geometrických tvarů, případně pro objekty skládající se z více takových jednoduchých objektů. Přesto zde lze nastavit několik parametrů jako polarizace, monostatický nebo bistatický režim, rychlost šíření signálu a pracovní frekvenci.

FEKO

FEKO je komplexní výpočetní software pro elektromagnetické výpočty, včetně výpočtu odrazné plochy. Obsahuje v sobě několik numerických metod, umožňující volbu různé úrovně přesnosti i výpočetní náročnost. Pro objekty, které nejsou příliš elektricky velké nabízí metodu Multilevel fast multipole method (MLFMM). Pro simulaci i elektricky velkých objektů je vhodnější použití některé z dostupných asymptotických metod jako jsou metody využívající fyzikální optiku nebo paprskovou metodu.

CST

CST je jeden z předních software určených pro elektromagnetické výpočty. Obsahuje několik solverů využívající různé numerické metody jako je Multilevel fast multipole method (MLFMM), nebo metoda paprsková. Bližší popis programu CST je uveden níže.

2.4 Měření odrazné plochy

Odrážnou plochu lze měřit v monostatickém nebo bistatickém režimu. Měření odrazné plochy je ideální provádět ve vzdálené oblasti antény. Jenou z možností je provádět měření v bezodrazové komoře, kde je měřený objekt umístěn na otočném podstavci. Ten musí být pokryt pohltivým materiálem, aby nepřispíval do měřené charakteristiky. V případě měření objektu velikosti vozidla musí být měřicí komora dostatečně velká i potřebnou minimální vzdáleností mezi měřicí anténou a vozidlem.

Vzhledem k potřebnému prostoru se měření odrazné plochy provádí také venku na otevřeném prostranství. Na přesnost takového měření má vliv především okolní prostředí, jako jsou budovy či objekty za měřeným vozidlem a také odrazy od země.

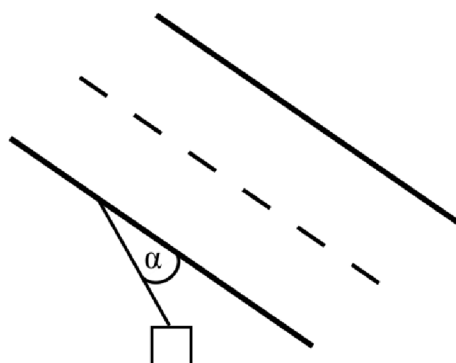
Další možností je použití zmenšeného modelu vozidla vyrobeného například z pěny a potaženého kovovou vrstvou. A poté provést měření na vyšší frekvenci se stejným poměrem vlnové délky k rozměrům modelu, jako je poměr velikosti reálného objektu a vlnové délky použitého signálu.

Pro určení absolutní hodnoty odrazné plochy měřením se používá srovnání s objektem o předem známé hodnoty RCS. Takovým objektem mohou být různé koutové odražeče, nebo kovová koule se známými rozměry. Hlavní výhodou odražeče typu koule je nezávislost orientace vůči měřicímu radaru. [7] [8] [9]

3. SIMULACE ODRAZNÉ PLOCHY

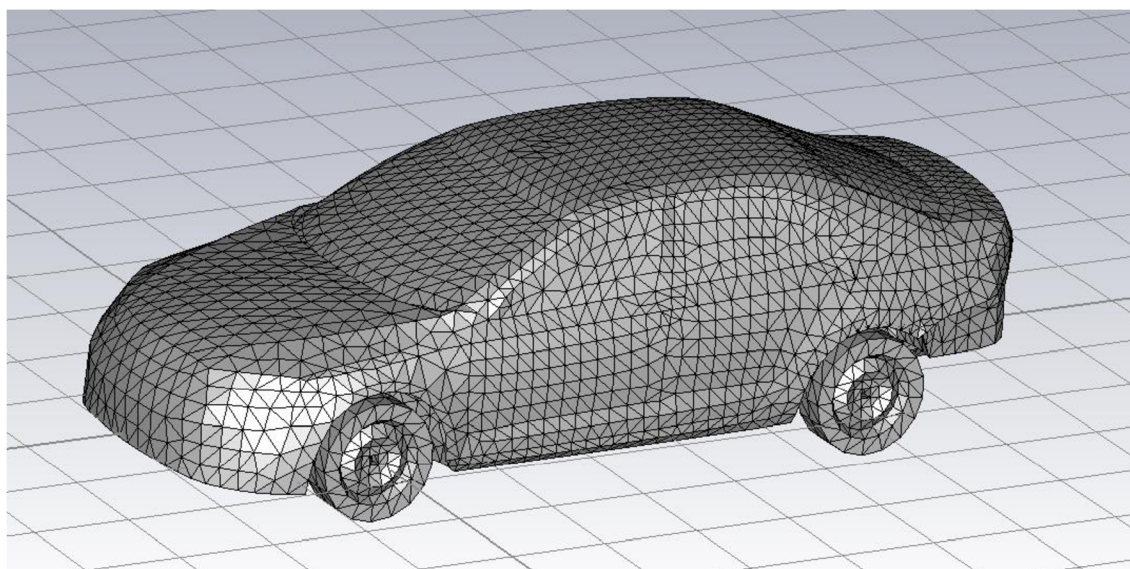
Pro simulaci byl zvolen program CST Microwave Studio. Jedná se o velice komplexní software se širokou nabídkou numerických metod. Pro simulaci odrazné plochy automobilu byly vybrány dva různé solvery, každý využívající jinou numerickou metodu.

Simulace odrazné plochy automobilu jsou prováděny převážně pro monostatickou konfiguraci radaru, tedy směr pozorování odražené vlny je stejný jako směr ozařovací vlny. Jsou zde uvedeny závislosti odrazné plochy na natočení vozidla vůči dopadající vlně. Také jsou zde uvedeny hodnoty pro úhel $\alpha = 22^\circ$ (Obr. 6), který odpovídá umístění radaru pro měření rychlosti vůči silnici. Tento radar pracuje na frekvenci 24,125 GHz nebo 33 GHz.

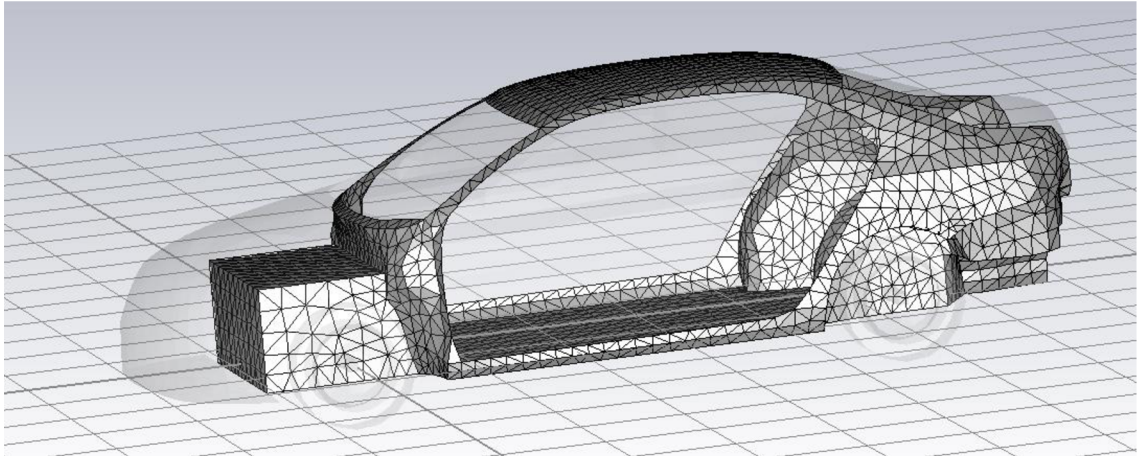


Obr. 6: Umístění radaru vůči silnici

Všechny simulace byly prováděny na zjednodušeném modelu Škoda Octavia (viz Obr. 7) s částečně tvarovanou vnitřní strukturou, jako je například blok motoru (viz Obr. 8). Materiál vozidla je s ohledem na požadavky jednotlivých solverů a také náročnost výpočtu nastaven jako dokonale vodivý materiál.

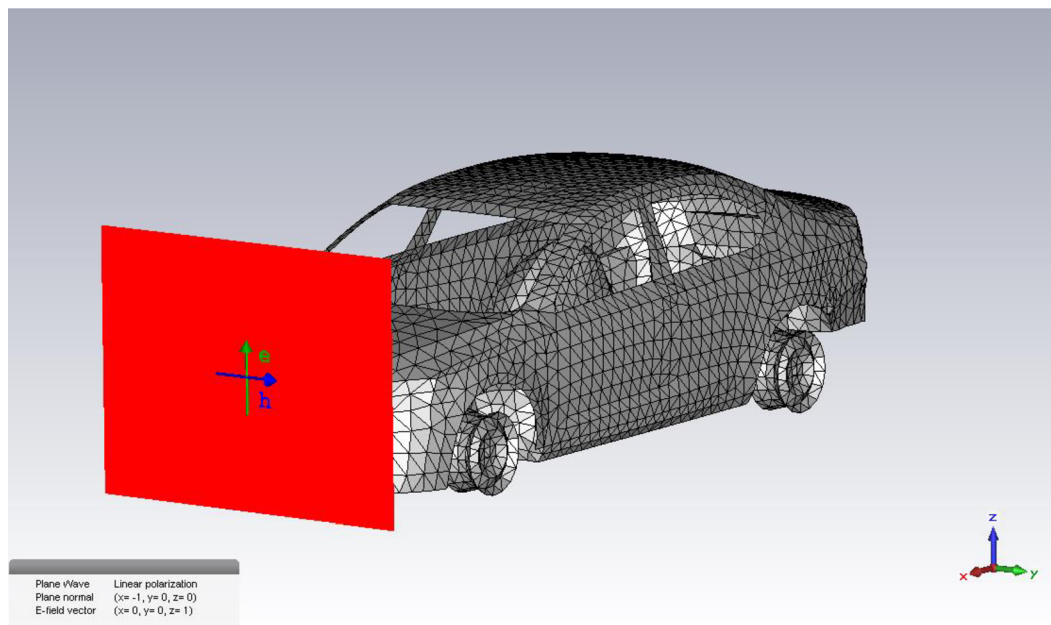


Obr. 7: Model automobilu



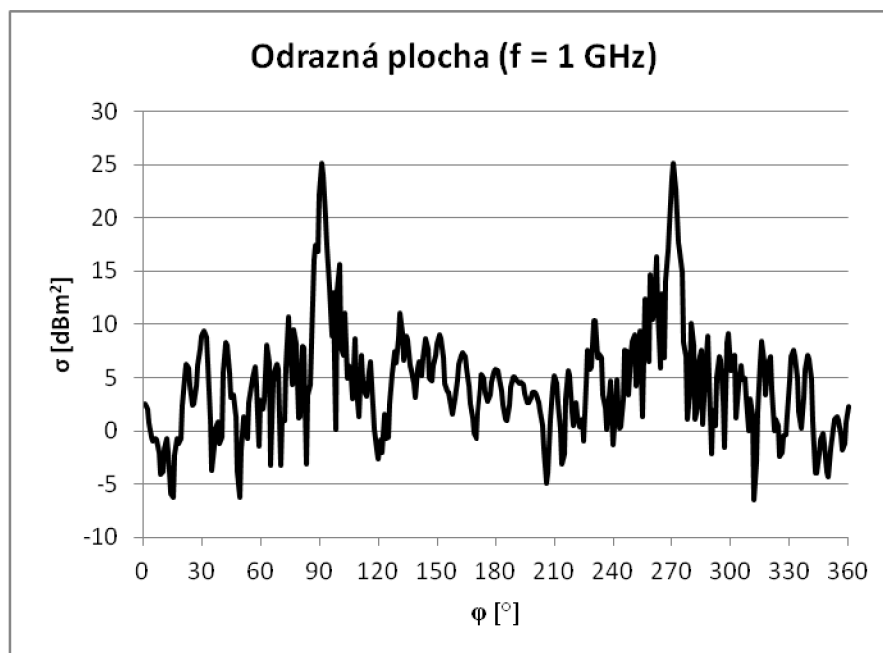
Obr. 8: Model automobilu – vnitřní struktura

Integral equation solver – tento solver je vhodný pro práci s elektricky velkými modely, a to především pro výpočet problémů týkajících se vzdálené oblasti, odrazné plochy a S-parametrů. Jako numerickou metodu využívá tento solver Multi Level Fast Multipole Metod. Tato metoda pracuje pouze s povrchovou diskretizací modelu, tím je snížena výpočetní náročnost oproti jiným metodám využívající diskretizaci v celém objemu modelu. Pro buzení lze zvolit buď rovinnou vlnu nebo diskretní port. Pro tuto simulaci je zvolena možnost buzení rovinnou vlnou (viz Obr. 9) s orientací vektoru elektrické složky ve vertikálním směru. Tento solver je vhodný především pro simulaci elektricky velkých objektů, výpočet odrazné plochy s rychlým rozmítáním pro monostatický radar, výpočet S-parametrů, simulace E a H složky elektromagnetického pole a povrchových proudů.

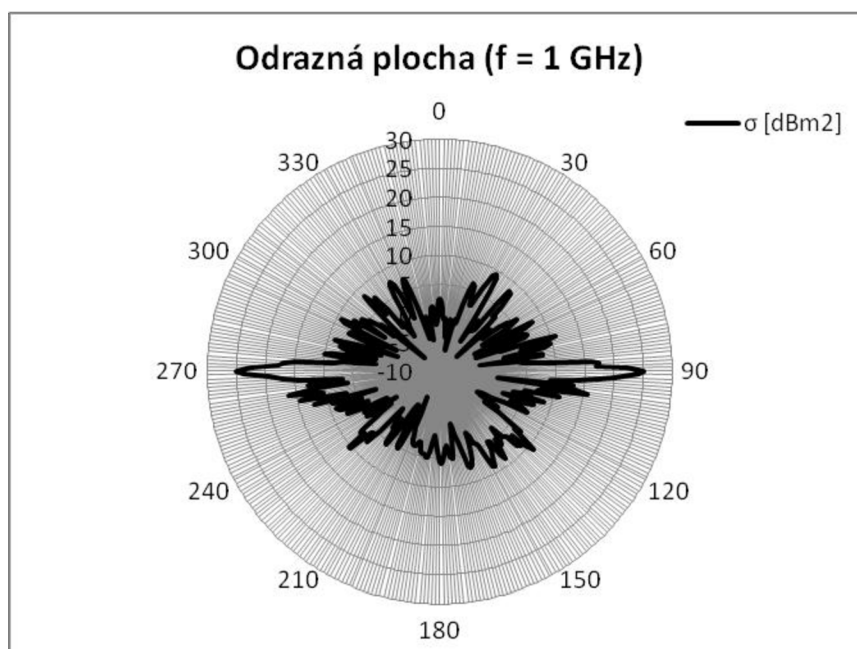


Obr. 9: Buzení rovinnou vlnou

Simulace za použití tohoto solveru je časově náročná a má velké nároky na dostupnou výpočetní paměť. Z důvodu nedostatku paměti nebylo možné provést simulaci za použití tohoto solveru pro kmitočet 24,125 GHz a jsou zde uvedeny výsledky simulace pro frekvenci 1 GHz (viz Obr. 10 a Obr. 11) v kartézských a polárních souřadnicích.



Obr. 10: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Integral eq. solver



Obr. 11: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Integral eq. solver, polární souřadnice

Asymptotic solver – jedná se o analýzu ve frekvenční oblasti, založené na paprskové metodě. Je vhodná pro simulaci objektů o velikosti mnohonásobně větší, než je vlnová délka, pro které je tato metoda mnohem efektivnější než jiné metody. Tento solver vyžaduje modely tvořené dokonale vodivým materiálem (PEC) nebo jinými elektricky vodivými materiály. Využití tohoto solveru je především pro monostatické a bistatické odrazné vlastnosti elektricky velkých struktur, umístění antén na elektricky velkých objektech, simulace vzdálených oblastí, odrazných ploch a vizualizace míst, které nejvíce přispívají k odrazu dopadající vlny - tzv. hotspotů.

Nastavení solveru:

Jako jedno z hlavních nastavení je výběr módu, v jakém bude simulace probíhat. A to buď monostatický nebo bistatický. V monostatickém módu je úhel pozorování shodný s úhlem ozařování. V bistatickém módu je úhel ozařování odlišný od pozorovacího úhlu a je zde tedy možnost nastavit oba úhly nezávisle na sobě. Dalším módem je *Field sources*, který umožňuje vložení cizího zdroje záření. V tomto módu lze simulovat umístění antény surčitou směrovou charakteristikou a dalšími vlastnostmi. V tomto módu je směr ozařování určen umístěním zdroje záření a jeho orientací vůči ozařovanému předmětu, a proto je možnost nastavení pouze pozorovacího úhlu. Jako poslední možnost je mód *Range profiles*.

Záložka *Accuracy* umožňuje zvolit přesnost výpočtu a to Low, Medium a High. Nastavení přesnosti výpočtu má vliv na náročnost. Při nastavení Low je přesnost nízká, stejně tak je nízká výpočetní náročnost, při volbě High je přesnost výpočtu i náročnost vysoká a volba Medium nabízí kompromis mezi předchozími dvěma možnostmi. Kromě těchto přednastavených možností, je zde ještě volba *Custom*, která nabízí přes tlačítko *Settings* manuální volbu jednotlivých parametrů.

Záložka *Solver* nabízí možnost zvolit typ paprskové metody. A to buď *SBR* (shooting and bouncing rays), která využívá samostatné paprsky, nebo *SBR Raytubes*, která vysílá paprsky ve svazcích. Použití nezávislých paprsků se hodí více jako robustní metoda pro geometricky nepřesná tělesa, zatímco metoda s paprsky ve svazcích poskytuje lepší výsledky pro elektricky velká tělesa.

Pro metodu *SBR* se nastavuje hustota paprsků na jednotku vlnové délky (*Ray density per wavelength*). Tento parametr určuje počet paprsků na vlnovou délku při ozařování a má největší vliv na přesnost a náročnost výpočtu. S ohledem na velikost simulovaného objektu je vhodné pro menší objekty tento parametr zvýšit pro dosažení větší přesnosti. Typické hodnoty jsou od 10 paprsků pro elektricky velmi rozměrné objekty po 40 nebo více paprsků pro elektricky malé objekty. Minimální počet paprsků (*Minimum number of rays*) je parametr, kterým se stanovuje minimální počet paprsků. A to z důvodu, že pro elektricky malé objekty by mohla nastat situace, kdy z důvodu nastavení malé hustoty paprsků na vlnovou délku by byl celkový počet paprsků nedostatečný pro dostatečné ozáření simulovaného objektu a správnost simulace. Maximální plocha paprskového svazku ve vlnových délkách². (*Max. area of ray tube in wavelengths²*). Dle doporučení není nutno tento parametr nijak upravovat a lze ponechat původní hodnotu.

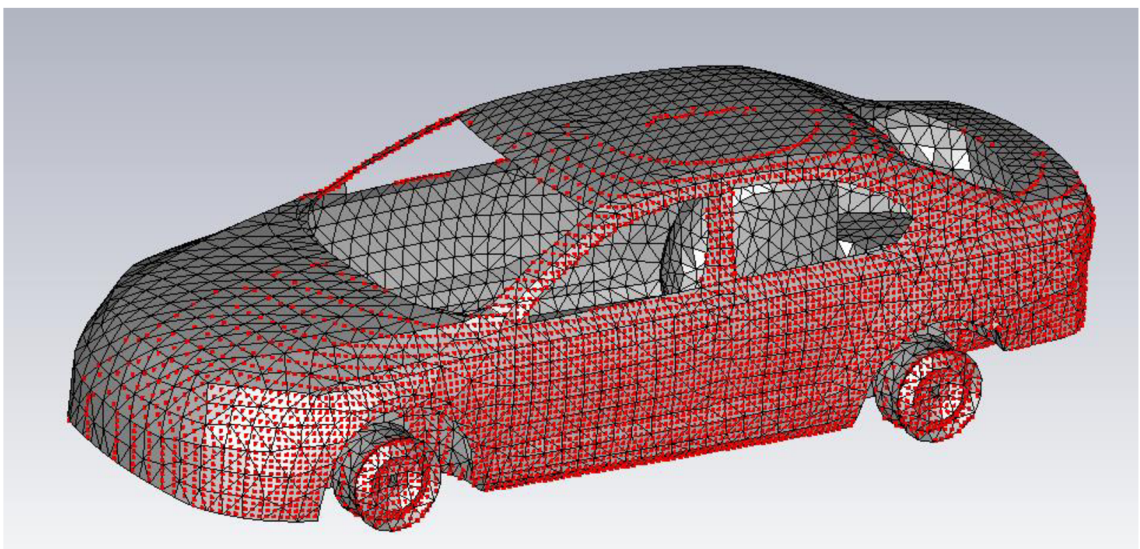
Pro *SBR Raytubes* jsou možnosti nastavení následující. Vzdálenost paprsků (*Ray spacing in wavelengths*) – tento parametr určuje vzdálenost mezi paprsky při ozařování, a to v jednotkách vlnové délky. Čím menší je vzdálenost mezi jednotlivými paprsky, tím větší je přesnost výpočtu. Minimální počet paprsků (*Minimum number of rays*) je parametr, který stejně jako v předchozím případě zajišťuje minimální počet paprsků pro dostatečné ozáření všech částí simulovaného objektu i pro elektricky malé objekty.

Adaptivní vzorkování paprsků (*Adaptive ray sampling*) – tato možnost specifikuje, zda se hustota paprsků automaticky zvýší v důležitých oblastech, a to rozdělením paprskových svazků na více částí. Tato možnost je doporučována, jelikož přináší dobrý poměr zvýšení kvality vůči zvýšení výpočetní náročnosti. Toto dělení paprskových svazků lze upřesnit dalšími dvěma parametry, a to Maximální vzdáleností paprsků ve vlnových délkách (*Maximum ray distance in wavelengths*) – tento parametr určuje maximální délku hrany paprskového svazku, než dojde k jeho automatickému rozdělení. Menší hodnoty znamenají větší přesnost. Minimální vzdáleností paprsků ve vlnových délkách (*Minimum ray distance in wavelengths*) – tento parametr naopak určuje nejmenší délku hrany paprskového svazku při adaptivním vzorkování. Tento parametr zabraňuje přílišnému zjemňování na malých hranách, které by velice zvyšovali výpočetní náročnost s jen velmi malým přínosem na přesnost výpočtu.

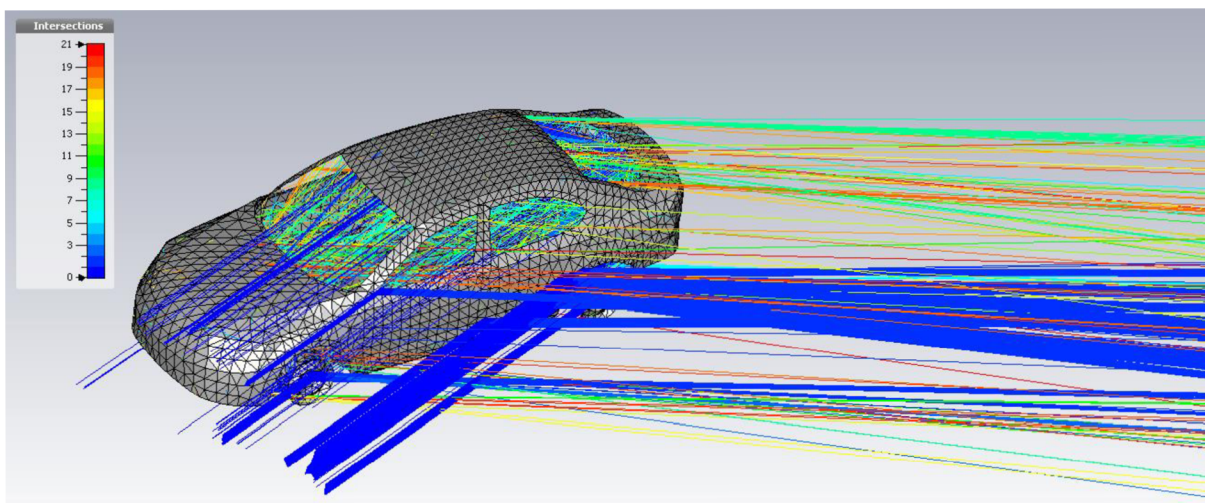
Mezi další možnosti nastavení patří zahrnutí difrakce na hranách (*Include metallic edge diffraction*) – tato možnost specifikuje, zda má simulace zohledňovat difrakci paprsků na hranách modelu. Obecně je doporučeno mít tuto možnost zapnutou pro zvýšení přesnosti výpočtu. Ostatní nastavení lze ponechat ve výchozím nastavení.

V záložce *Mesh* je ve výchozím nastavení zatrženo Použití zakřivených trojúhelníků (*Use curved triangles*), které určuje, že pro všechny zakřivené plochy budou použity zakřivené trojúhelníky v meshovací mřížce. Toto nastavení má pozitivní vliv na přesnost simulace za cenu mírně vyšších nároků na operační paměť. *Extract curvature information* je parametr, který je vhodné použít při importu modelu ve formátu, který neobsahuje informace o zakřivení povrchu.

Záložka *Ray storage* obsahuje parametry pro vizualizaci paprsků simulace. Je zde možnost zobrazení jednotlivých kroků simulace. A to ozařovací paprsky, body dopadů paprsků (viz Obr. 12) a také odražené paprsky (viz Obr. 13).

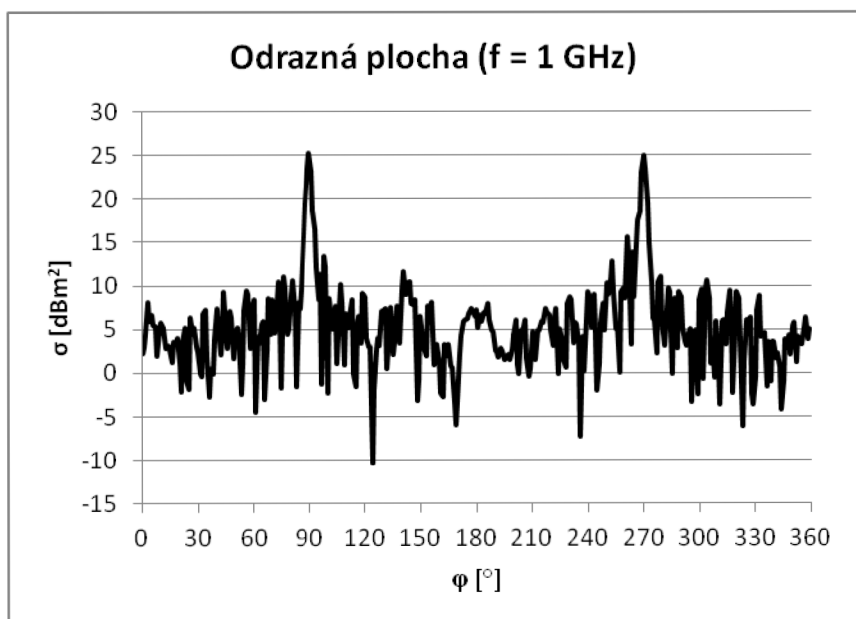


Obr. 12: Počáteční body dopadu paprsků

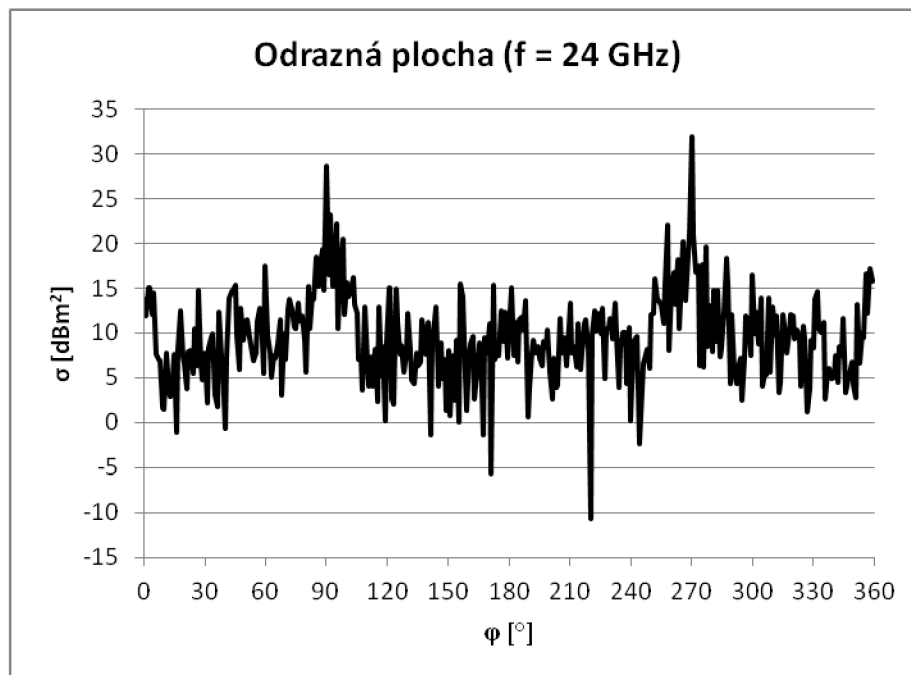


Obr. 13: Vizualizace odražených paprsků

Tento solver je méně náročný, co se týká doby simulace i požadavků na paměť. Proto je vhodnější pro simulaci na vyšších kmitočtech. Na Obr. 14 jsou uvedeny grafy velikosti odrazné plochy v závislosti na natočení vozidla vůči dopadající vlně pro kmitočty 1 GHz. A na Obr. 15 a jsou tytéž parametry pro frekvenci 24,125 GHz.

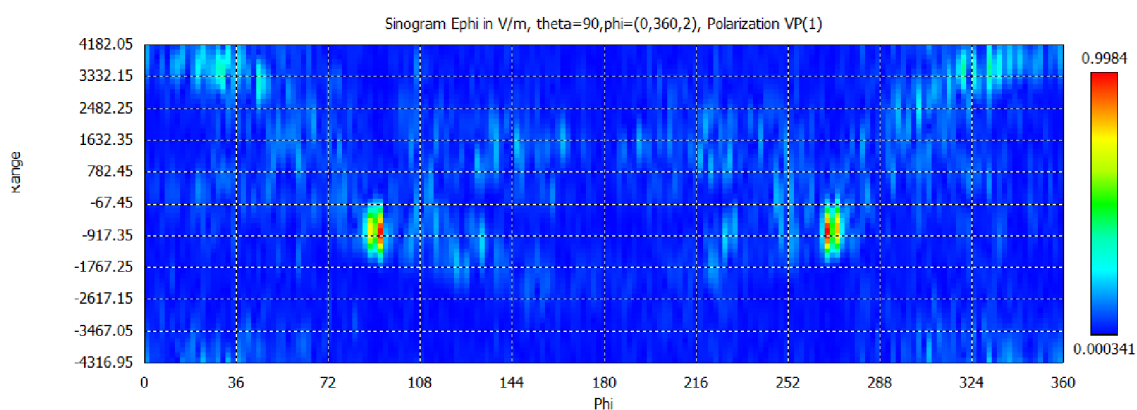


Obr. 14: Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Asymptotic solver



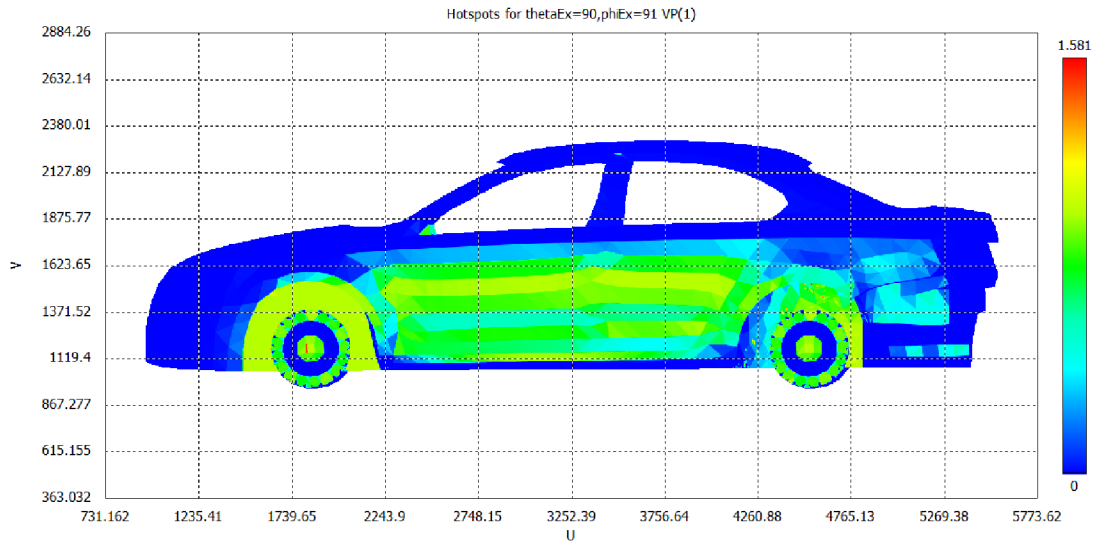
Obr. 15: Odrazná plocha pro $f = 24$ GHz, Asymptotic solver

Tento solver nabízí i možnost zobrazit sinogram, tedy graf rozložení elektrického pole v závislosti na vzdálenosti, která je odvozena od středu modelu. A to pro všechny úhly natočení vozidla (viz Obr. 16). Tyto hodnoty jsou normovány k maximální hodnotě.



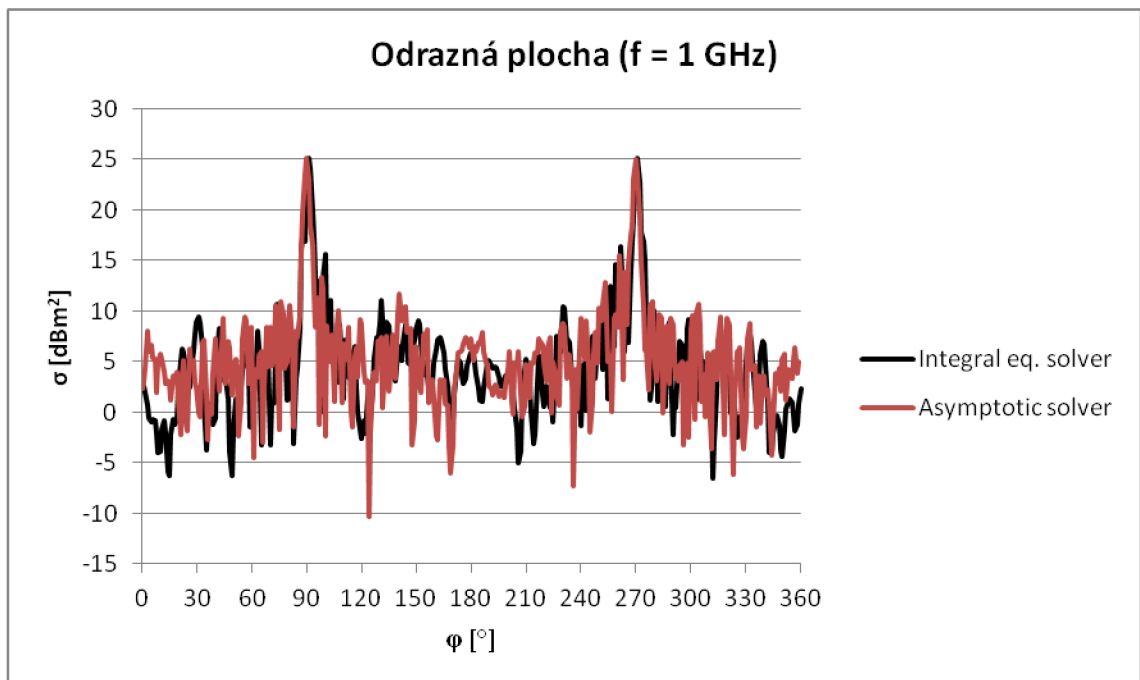
Obr. 16: Sinogram

Pokud vezmeme tyto hodnoty pro jeden vybraný úhel, můžeme tyto hodnoty vizualizovat na modelu automobilu (viz Obr. 17), kde jsou vidět místa, která nejvíce přispívají k odrazu signálu – tzv. hotspots.



Obr. 17: Hotspoty

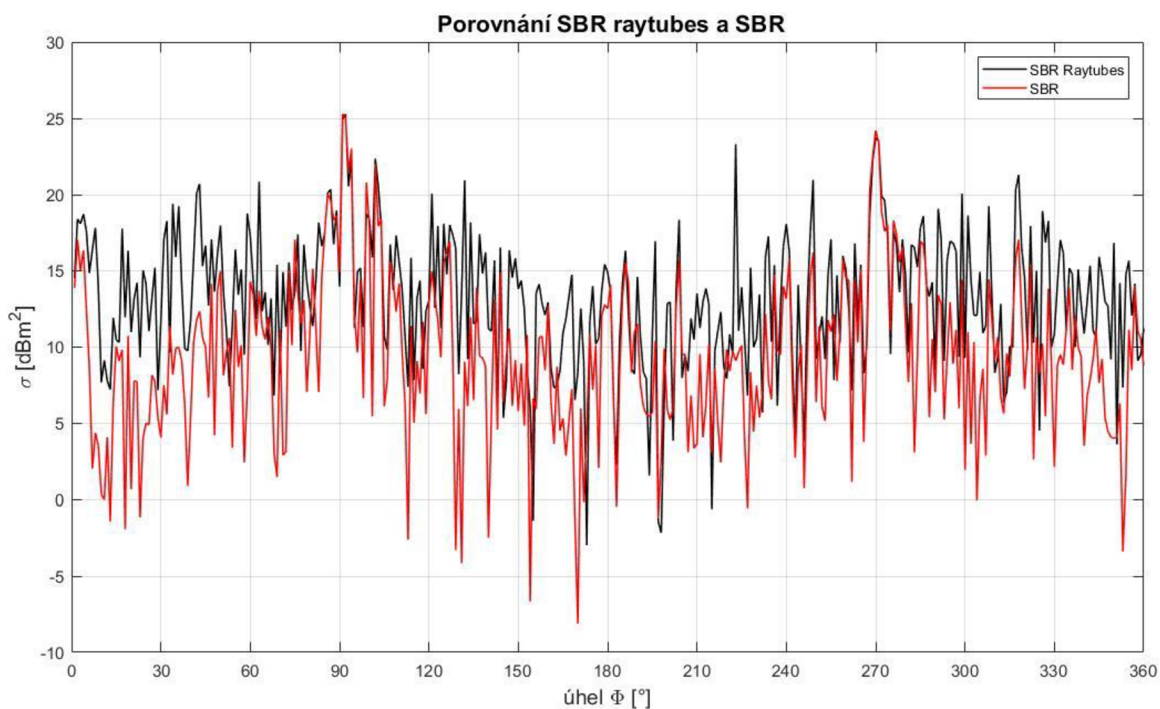
Na Obr. 18 je porovnání obou solverů pro frekvenci 1 GHz.



Obr. 18: Porovnání obou solverů pro f = 1 GHz

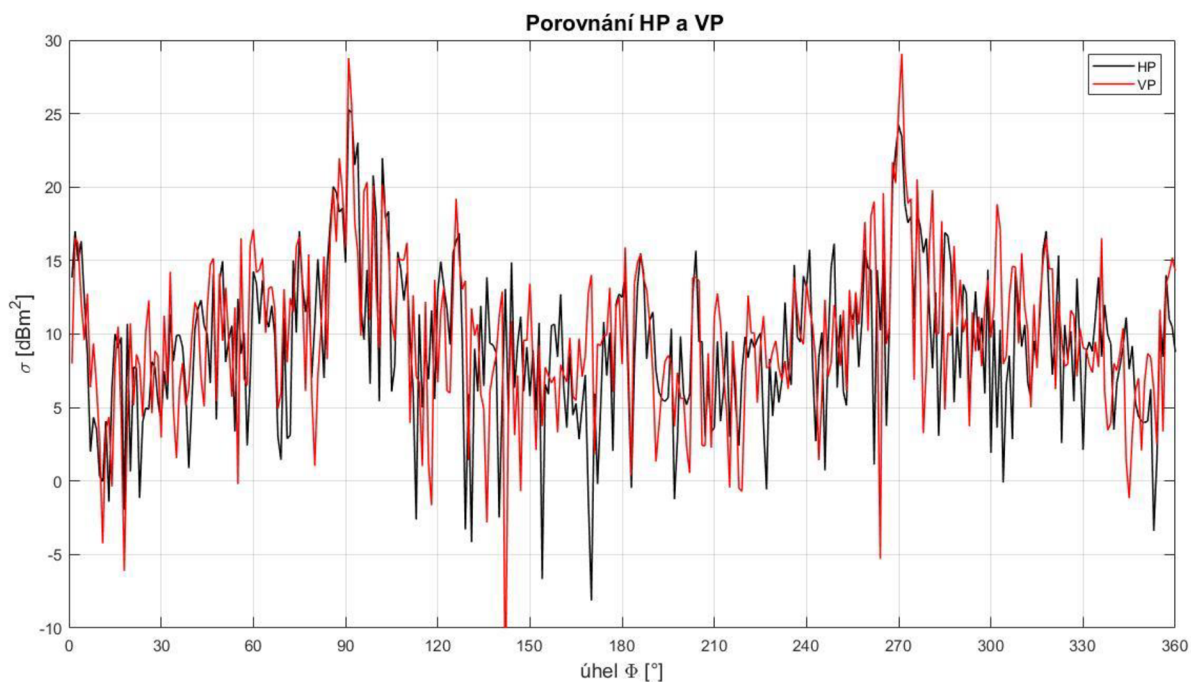
Porovnání nastavení parametrů CST na výsledky simulace

Všechny následující simulace jsou simulovány pro frekvenci $f = 33$ GHz, v monostatickém režimu se změnou úhlu po 1° .



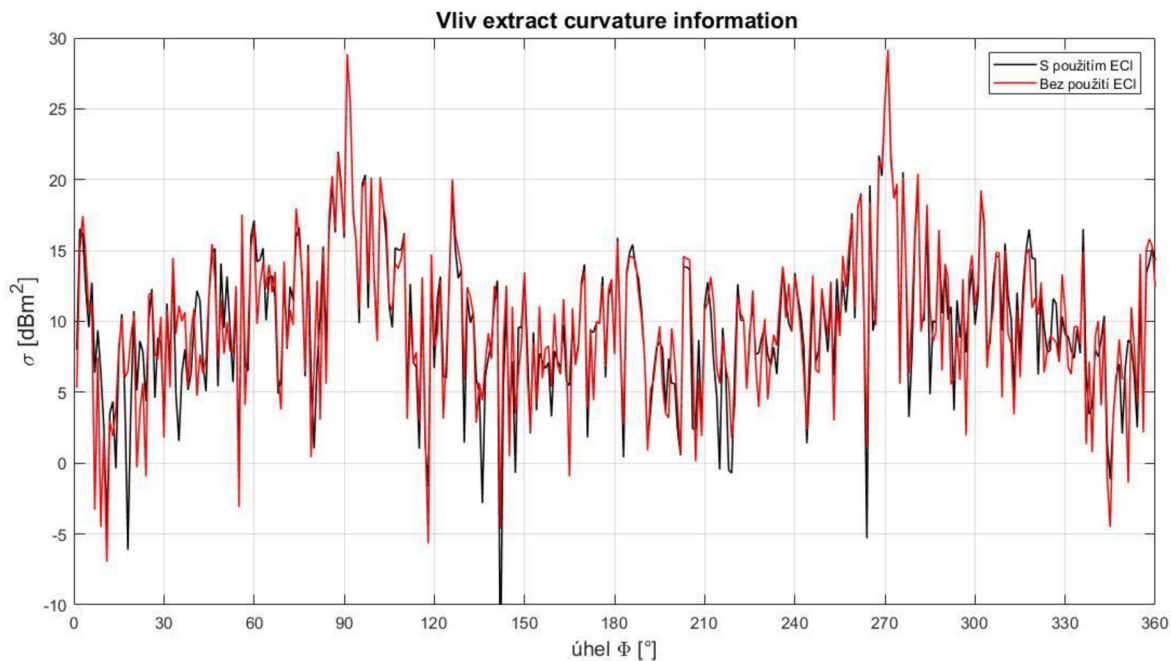
Obr. 19: Porovnání SBR Raytubes a SBR

V grafu na Obr. 19 lze vidět rozdíly mezi simulacemi při použití rozdílných paprskových metod. Černě je vyobrazena metoda SBR Raytubes a červeně metoda Shooting and bouncing rays. Obě simulace mají shodné maximum pro úhly 90° , resp. 270° , tedy pro pohledy z boku vozidla. Liší se ovšem v okolí 30° a 150° a to o 5 až 10 dB. Výsledek simulace s metodou SBR má větší rozdíly mezi maximy a ostatními úhly oproti metodě SBR raytubes.



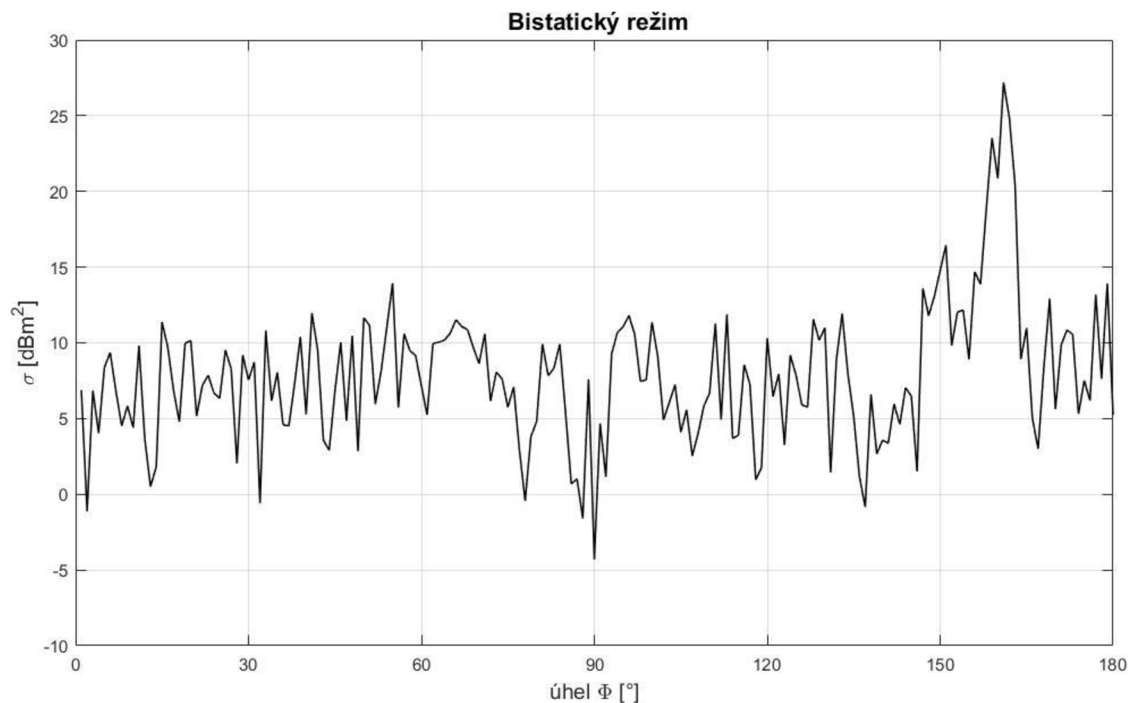
Obr. 20: Porovnání horizontální a vertikální polarizace

V grafu na Obr. 20 jsou znázorněny rozdíly při změně polarizace rovinné vlny. Maximum pro horizontální polarizaci je 25,3 dBm^2 , maximum pro vertikální polarizaci je 29,1 dBm^2 . Jinak mají oba výsledky simulace podobný průběh. Liší se pouze lokálními odchylkami. Ostatní nastavení bylo pro obě simulace stejné, a to typ solveru SBR a použití Extract curvature information pro generaci meshovací sítě.



Obr. 21: Vliv funkce Extract curvature information

Při importu modelu ve formátu, který neobsahuje informace o zakřivení povrchu je možné zvolit záložku pro odvození těchto informací (Extract curvature information). Vliv tohoto parametru lze vidět v grafu na Obr. 21. Oba průběhy se od sebe příliš neliší, přesto nejsou úplně stejné a největší odchylky lze pozorovat v okolí úhlu 45°.



Obr. 22: Bistatický režim

Na Obr. 22 je znázorněn výsledek simulace v bistatickém režimu. Úhel ozařování je zvolen 22°. Úhel pozorování je rozmítán v rozmezí 0° až 180° s krokem jednoho stupně. Největší hodnota je v okolí úhlu 158°. Vzhledem k tomu, že je boční strana vozidla téměř plochá, dochází v tomhle úhlu k největšímu odrazu ozařovaného signálu.

4. ZÁVĚR

V této diplomové práci je seznámení s pojmem odrazná plocha a jsou zde uvedeny vzorce pro výpočet odrazné plochy pro základní geometrické tvary. Dále jsou zde popsány vybrané numerické metody a programy pro simulaci odrazné plochy. V kapitole 3 je popsána simulace v prostředí CST Microwave Studio a výsledkem jsou grafy odrazné plochy pro různé frekvence a také porovnání nastavení solveru na výsledek simulace.

Literatura

- [1] ULISIK, C., CAKIR, G., CAKIR, M., SEVGI, L. Radar Cross Section (RCS) Modeling and Simulation, Part 1: A Tutorial Review of Definitions, Strategies, and Canonical Examples. In: IEEE Antennas and Propagation Magazine (Volume: 50, Issue: 1, Feb. 2008), pp. 115-126.
- [2] ŠEBESTA, J. Radiolokace a radionavigace – přednášky. Vyd: VUT v Brně, FEKT, 2004. 131 s. ISBN 978-80-214-2482-6.
- [3] MAAMRIA, T., KIMOUCHE, H. Investigation of monostatic RCS measurement for simple and complex shapes at 9.4 GHz. In: 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), p. 5. ISBN 978-1-4673-6673-1.
- [4] HOSSAIN, A., FAYSAL, Z., U., SOBHAN, S., ARA, F.,O. Implementation and Verification of Simulation Methods to Determine Radar Cross Section of Simple Targets. In: 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, p. 4, ISBN 978-1-4799-4819-2.
- [5] BUDDENDICK, H., EIBERT, T., F. Efficient multi-aspect RCS simulations based on the Shooting and Bouncing Rays technique. In: 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 2062-2066.
- [6] GIBSON, W., C. The Method of Moments in Electromagnetics. 1st Edition New York: Chapman and Hall/CRC, 288 pages, ISBN 978-1-4200-6145-1.
- [7] SCHIPPER, T.; FORTUNY-GUASCH, J.; TARCHI, D.; REICHARDT, L.; ZWICK, T.; RCS measurement results for automotive related objects at 23-27 GHz, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, 2011, p. 683-686.
- [8] SCHICK, M.; FIEDLER, R.; LEZAR, E.; JAKOBUS, U.; Car-to-car communication using efficient far-field RCS simulations to account for reflecting objects in the communication path, Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation, 2012, p. 2039–2042.
- [9] PALUBINSKAS, G.; RUNGE, H.; Radar signatures of a passenger car, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, vol. 4, no. 4. P. 644-648.