



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

## 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 2020



# Diplomová práce

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

Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Radovan Hanslík

**ID:** 155164

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**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:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 28.5.2020

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**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.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá simulací odrazné plochy osobních automobilů. V úvodu se práce věnuje základním odrazným vlastnostem objektů. Dále jsou popsány vybrané numerické metody využívané při počítačových simulacích reálných objektů. V rámci této práce je na zjednodušených modelech zkoumán vliv velikosti a tvaru vozidla na odraznou plochu. Správnost simulací je ověřena na objektech o známých referenčních hodnotách. Za použití vybraných numerických metod jsou dále provedeny simulace vozu Škoda Octavia. Výsledky simulací jsou znázorněny v grafech. Součástí práce je také provedení experimentu spočívajícího v průjezdu vozidla kolem stacionárního radaru, díky čemuž je možno ověřit přesnost výsledků provedených simulací.

## **Klíčová slova**

Odrazná plocha, simulace, RCS, CST, Škoda Octavia

## **Abstract**

This diploma thesis is aimed at radar cross section of passenger cars. Basic scattering parameters of simple targets are described. Selected numeric methods used for computing radar cross section are discussed. Shape and size of simplified vehicle models is investigated. Simulations are verified by computing RCS of objects with well-known characteristics. Radar cross section of Skoda Octavia was simulated using selected numeric methods. Results of all performed simulations are shown in included graphs. Experimental measurement of radar cross section of a vehicle was performed so the measured data can be compared with the simulations.

## **Keywords**

Radar Cross Section, simulation, RCS, CST, Skoda Octavia

### **Bibliografická citace:**

HANSLÍK, Radovan. *Odravná plocha osobních automobilů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122299>. 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: **27. května 2020**

.....  
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. Děkuji také své přítelkyni za podporu a motivaci při psaní této práce.*

V Brně dne: **27. května 2020**

.....  
podpis autora

## Obsah

Úvod.....	11
1. Problematika odrazné plochy osobních automobilů.....	12
1.1. Odrazná plocha základních tvarů .....	13
1.2. Měření odrazné plochy osobních automobilů .....	15
1.3. Počítačová simulace odrazné plochy osobních automobilů.....	17
1.3.1. Jednotlivé numerické přístupy .....	17
1.3.2. Počítačové programy pro simulaci odrazné plochy .....	19
2. Ověření numerických přístupů na elektromagnetickém modelu .....	24
2.1. Model vozu Škoda Octavia .....	28
2.2. Jednotlivé přístupy použité na model automobilu Škoda Octavia .....	29
2.3. Závěr porovnání .....	33
3. Vliv velikosti a tvaru automobilu na odraznou plochu .....	34
3.1. Vliv tvaru modelu automobilu na odraznou plochu.....	34
3.2. Vliv velikosti modelu automobilu na odraznou plochu .....	36
3.3. Shrnutí vlivu velikosti a tvaru vozidla na odraznou plochu.....	38
4. Simulace odrazné plochy osobního automobilu.....	39
4.1. Nastavení parametrů Asymptotic solveru pro simulaci odrazné plochy .....	39
4.2. Simulace za použití Asymptotic solveru.....	41
4.3. Experiment .....	46
4.4. Výsledky a závěr experimentu .....	48
5. Závěr.....	49

## Seznam symbolů a zkratek

### Zkratky:

RCS	...	Radar cross section
FDTD	...	Finite Difference Time Domain Method
MLFMM	...	Multi Level Fast Multipole Method
MOM	...	Method of Moments
SBR	...	Shooting and bouncing rays
PO	...	Physical Optics (fyzikální optika)
GO	...	Geometrická optika
PEC	...	Perfect electric conductor (dokonale vodivý materiál)

### Symboly:

$\sigma$	...	odrazná plocha	[dBm <sup>2</sup> ]
$\lambda$	...	vlnová délka	[m]



## Seznam obrázků

Obr. 1 Ozáření koule rovinnou vlnou .....	13
Obr. 2 Rovinná obdélníková deska a dopadající vlna.....	13
Obr. 3 Válec ozařovaný rovinnou vlnou.....	14
Obr. 4 Trojúhelníkový koutový odražeč.....	14
Obr. 5 Ukázka trojúhelníkového koutový odražeč pro měření [10] .....	14
Obr. 6 Model čtvercového koutového odražeče .....	15
Obr. 7 Uživatelské rozhraní programu Ansys HFSS .....	20
Obr. 8 Uživatelské rozhraní programu CST Studio Suite .....	21
Obr. 9 Uživatelské rozhraní POFACETS .....	22
Obr. 10 Porovnání numerických metod na modelu krychle na $f = 1$ GHz v programech CST Studio Suite a Ansys HFSS .....	25
Obr. 11 Porovnání numerických metod na modelu krychle na $f = 10$ GHz v programech CST Studio Suite a Ansys HFSS .....	26
Obr. 12 Model NASA Almond použitý pro simulaci .....	26
Obr. 13 Rovinná vlna dopadající na model NASA Almond .....	26
Obr. 14 Kontrolní výpočet přesnosti simulace na modelu NASA Almond v programu CST Studio .....	27
Obr. 15 Kontrolní výpočet přesnosti simulace na modelu NASA Almond v programu Ansys HFSS .....	28
Obr. 16 Model automobilu.....	29
Obr. 17 Model automobilu – vnitřní struktura.....	29
Obr. 18 Buzení rovinnou vlnou .....	30
Obr. 19 Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Integral equation solver.....	31
Obr. 20 Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Asymptotic solver .....	32
Obr. 21 Porovnání numerických metod na modelu Škoda Octavia.....	32
Obr. 22 Odrazná plocha zjednodušeného modelu (kvádr).....	34
Obr. 23 Elipsoid .....	35
Obr. 24 Vliv tvaru modelu vozidla na odraznou plochu.....	35
Obr. 25 Zjednodušený model vozidla.....	36
Obr. 26 Vliv hrubosti modelu vozidla na odraznou plochu.....	36
Obr. 27 Závislost odrazné plochy koule na její velikosti.....	37

Obr. 28 Vliv velikosti modelu vozidla na odraznou plochu .....	38
Obr. 29 Počáteční body dopadu paprsků .....	40
Obr. 30 Vizualizace odražených paprsků .....	41
Obr. 31 Odrazná plocha pro $f = 1$ GHz, Asymptotic solver .....	41
Obr. 32 Odrazná plocha pro $f = 24$ GHz, Asymptotic solver .....	42
Obr. 33 Rozložení elektrického pole v závislosti na úhlu natočení vozidla .....	43
Obr. 34 Zobrazení hotspotů na modelu vozidla.....	43
Obr. 35 Porovnání paprskových metod SBR Raytubes a SBR.....	44
Obr. 36 Porovnání horizontální a vertikální polarizace .....	44
Obr. 37 Vliv funkce Extract curvature information na přesnost simulace .....	45
Obr. 38 Průběh velikosti odrazné plochy pro bistatický režim.....	46
Obr. 39 Umístění radaru vůči silnici.....	46
Obr. 40 Fotografie měřicího stanoviště při provádění experimentu .....	47
Obr. 41 Časový průběh signálu z radaru při průjezdu vozidla .....	48

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá simulací odrazné plochy osobních automobilů (radar cross section, RCS). V této práci jsou 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 podrobněji popsána simulace odrazné plochy osobního automobilu za použití dvou různých metod v prostředí CST Microwave Studio.

Odrazná plocha je jednou z hlavních charakteristik při použití radarové techniky. Tato plocha popisuje odrazné vlastnosti objektu, který je ozařován radarem. Odrazná plocha jako taková se začala zkoumat s rozvojem radarové techniky v oblasti vojenství jako parametr důležitý pro detekci nepřátelských objektů. Následně byly detailně zkoumány vlastnosti vojenských dopravních prostředků a projevila se snaha o co nejvyšší míru eliminace odrazné plochy pro minimalizaci detekce nepřátelským radarem. S rozvojem radarové techniky do ostatních oblastí lidské činnosti došlo také ke zkoumání odrazných vlastností civilních objektů, především automobilů.

Odrazná plocha se v praxi využívá například na lodích v podobě koutového odražeče pro detekci lodí, tedy jako bezpečnostní prvek. V dnešní době jsou radarové systémy také běžnou výbavou moderních vozidel. Proto je odrazná plocha automobilu důležitým parametrem při běžném provozu, jelikož pomáhá ke správné funkci například adaptivním tempomatům v autě. Tento parametr se používá také při simulaci prostředí pro vyvíjené systémy komunikace mezi vozidly.

Simulace za pomoci vhodného softwaru dokáže věrně napodobit jev z reálného prostředí, tedy například chování elektromagnetické vlny při dopadu na objekt typu vozidla. Na rozdíl od reálného měření totiž simulace nabízí snadné změny parametrů zkoumaných objektů a podmínek, za nichž jsou objekty zkoumány. Hlavními výhodami simulací tedy jsou nízká časová a finanční náročnost. Zatímco u simulace je dostatečným vybavením vhodný software a výpočetní prostředky, u měření je třeba mít k dispozici přímo zkoumaný objekt, dále měřicí pracoviště (bezodrazová komora, venkovní prostory) a také nákladné vybavení a přístroje k měření. Proto je simulace v dnešní době hojně využívána v průmyslu.

V této práci je rozebrána tematika odrazné plochy se zaměřením na automobily. Jsou zde uvedeny možné přístupy počítačové simulace odrazné plochy. Nachází se zde porovnání programů a numerických metod vhodných pro tento druh výpočtů. Dále je zkoumán vliv velikosti a tvaru modelu vozidla na výsledek simulace odrazné plochy a je porovnáno několik druhů zjednodušených modelů vhodných pro aproximaci modelu vozidla. V poslední kapitole jsou provedeny simulace odrazné plochy na modelu vozu Škoda Octavia na frekvencích 1 GHz, 24,125 GHz a 33 GHz, přičemž jsou zkoumány vlivy vstupních parametrů simulace na výsledný průběh odrazné plochy automobilu.

V závěru práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky.

# 1. Problematika odrazné plochy osobních automobilů

Odrážná plocha je parametr, který udává schopnosti objektu odrážet elektromagnetické záření. Jedná se o parametr, který se nejčastěji využívá v radarové technice a popisuje vlastnosti cíle radaru. Využívá se v několika různých odvětvích. Prvním z nich je využití pro vojenské účely, kdy odrazná plocha je jeden z hlavních parametrů určujících detekovatelnost objektů jako jsou letadla či lodě. S tím naopak souvisí i následná snaha o minimalizaci odrazné plochy takových objektů pro snížení pravděpodobnosti detekce radarem ze strany nepřítele. Naopak na civilních lodích se používají koutové odražeče, které mají velkou efektivní odraznou plochu a slouží k tomu, aby byla loď dobře detekovatelná radarem. Tento lze kromě zajištění přehledu o poloze jednotlivých lodí prostřednictvím přehledového radaru využít také při záchraně lodi ve větší vzdálenosti od pevniny, jelikož se jedná o čistě pasivní prvek. V automobilovém průmyslu je čím dál více využívána radarová technika a je tedy zkoumán i parametr odrazné plochy vozidel. Ten se využívá v oblasti měření rychlosti pomocí radaru, pro měření vzdálenosti od okolních vozidel při využití adaptivního tempomatu nebo pro šíření signálu komunikace mezi vozidly. Hodnotu odrazné plochy lze získat výpočtem, simulací nebo měřením.

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 elektromagnetické vlny. Velikost odrazné plochy 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.

Odráživé vlastnosti cílů se liší v závislosti na vlnové délce ( $\lambda$ ) 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, kdy 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. Radary využívané při měření rozlišujeme na monostatické radary a bistatické radary. Zatímco monostatický radar má vysílací i přijímací anténu umístěnou v jednom bodě, resp. blízko vedle sebe, bistatický radar má přijímací část pozičně oddělenou od části vysílací [1].

## 1.1. Odrazná plocha základních tvarů

Pro některé základní tvary lze vypočítat velikost odrazné plochy pomocí vzorců. Tyto vzorce platí pro ozařování rovinnou vlnou a často také pouze pro určitý úhel natočení tělesa vůči dopadající vlně.

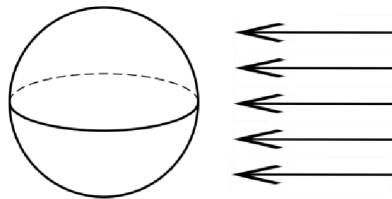
**Koule** – koule je symetrický objekt, její odrazné vlastnosti jsou tedy stejné bez ohledu na natočení vůči směru ozařování. Proto se hodí k použití jako referenční bod o známé efektivní odrazné ploše při měření reálných komplexních objektů nebo pro kalibraci radarových systémů.

Pro perfektně vodivou kouli (Obr. 1) závisí efektivní odrazná plocha na poměru poloměru koule  $r$  a vlnové délce  $\lambda$ , 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  $r/\lambda$  hodnota odrazné plochy osciluje a pro velké poměry  $r \gg \lambda$  odpovídá hodnota odrazné plochy přibližně ploše kruhu dané koule, tedy [2]

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

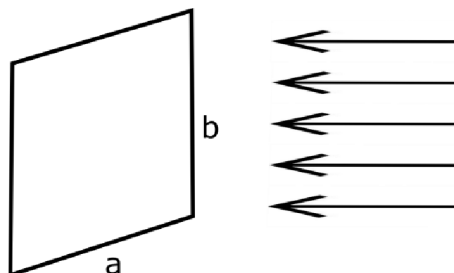


Obr. 1 Ozáření koule rovinnou vlnou

**Rovinná obdélníková deska** – tato se také používá jako referenční objekt pro měření reálných objektů. Výhodou použití tohoto tvaru je snadný výpočet odrazné plochy, jelikož závisí pouze na rozměrech desky. Nevýhodou je nutnost přesné orientace při měření, neboť je hodnota odrazné plochy závislá na úhlu svíraném se směrem prováděného měření. 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 a  $\lambda$  je vlnová délka. Tento vzorec platí pouze při orientaci desky kolmo na směr dopadající vlny.

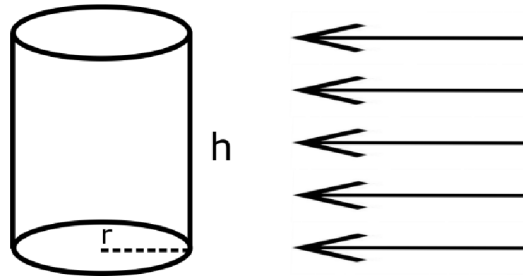


Obr. 2 Rovinná obdélníková deska a dopadající vlna

**Válec** – válec je základním tvarem, který je možno použít pro aproximaci skutečných objektů. Vzorec pro výpočet odrazné plochy válce (Obr. 3) při ozařování z boku válce je [3]:

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

kde  $r$  je poloměr válce a  $h$  je výška válce.

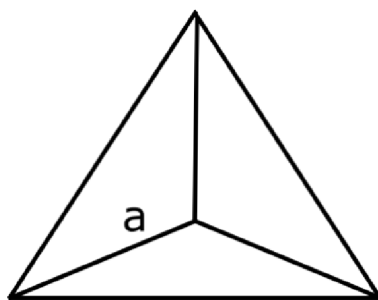


Obr. 3 Válec ozařovaný rovinnou vlnou

**Trojúhelníkový koutový odražeč** – koutový odražeč (Obr. 4) je umělý cíl, který má velkou odraznou plochu nepříliš 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 odrazí od všech tří stěn a následně se vrátí 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. Ukázka takového koutového odražeče pro měření je na Obr. 5. 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

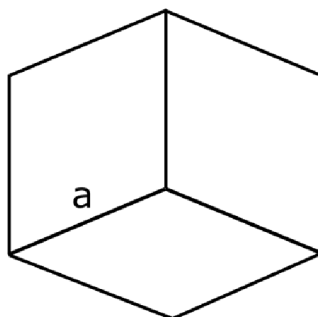


Obr. 5 Ukázka trojúhelníkového koutový odražeč pro měření [10]

**Čtvercový koutový odražeč** – od trojúhelníkového koutového odražeče se liší pouze tvarem stěn, tyto mají čtvercový tvar. Tento fakt 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. 6) 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. 6 Model čtvercového koutového odražeče**

## 1.2. Měření odrazné plochy osobních automobilů

Měření odrazné plochy osobních automobilů spočívá v měření fyzického objektu za pomoci vybavení k tomu určenému, typicky radarového systému – tedy antény, vhodných zesilovačů a osciloskopu nebo vektorového analyzátoru. Pro měření je třeba zvolit vhodné prostředí, které rozlišujeme na venkovní či vnitřní. Měření samotné pak může být ovlivněno vlivy okolního prostředí.

Obecně se jedná o náročnější postup než simulace, a to zejména z hlediska vybavení a časové náročnosti.

Pro měření odrazné plochy osobních automobilů rozlišujeme několik základních typů měření.

### Venkovní měření

U velkých objektů typu vozidla nebo letadla může být nejvhodnějším řešením použití venkovního měřicího pracoviště. Takové pracoviště musí být umístěno na vhodném místě, a to především s ohledem na okolní budovy a jiné objekty, od kterých by se mohl odrážet radarový signál. Také by v blízkosti neměl být zdroj elektromagnetického rušení.

Venkovní pracoviště se skládá z měřicí antény a polohovacího mechanismu pro měřený objekt. Ten sestává z otočné plošiny a pevného nebo výškově polohovatelného podstavce. Polohovatelný podstavec je většinou zploštělého tvaru, aby se minimalizovala plocha orientovaná směrem k anténě. Pakliže některé části polohovacího mechanismu odráží příliš mnoho signálu zpátky k anténě, mohou být překryty absorbérem.

Vzdálenost mezi anténami a měřeným objektem se u venkovních měřicích pracovišť pohybuje v rozsahu od desítek až po stovky metrů. Tato vzdálenost souvisí také s rozsahem frekvencí, na kterých je možné měření provádět. Signál na nízkých

frekvencích má velkou vlnovou délku, a tedy je třeba provádět měření na větší vzdálenosti.

U venkovních měřicích pracovišť lze rozlišovat různé typy uspořádání. Jedním z typů je pracoviště s pevnou výškou objektu, v takovém případě by mělo uspořádání dovolovat měnit vzdálenost antény a testovaného objektu a/nebo měnit pracovní výšku antény. Dalším typem je pracoviště s fixní vzdáleností mezi měřicí anténou a testovaným objektem, u něž by měla být zajištěna polohovatelná výška antény nebo i objektu.

Jedním ze zdrojů rušení u venkovního měření jsou odrazy signálu od země mezi anténou a měřeným objektem. S těmi se lze vypořádat několika způsoby. Buď jsou odrazy zahrnuty do měření a odstraněny až při zpracování signálu, nebo mohou být na zemi umístěny absorbéry, které signál směřující směrem do země pohlcují [15].

### **Měření reálných objektů v bezodrazové komoře**

Měření odrazné plochy lze provádět i v bezodrazové komoře, kde je zaručeno minimální rušení z okolního prostředí, případně má toto rušení časově stabilnější charakter. Překážkou při takovém druhu měření je velikost bezodrazové komory.

Komora o rozměrech, do kterých by se vešlo vozidlo, je velice finančně nákladná, a proto takových měřicích pracovišť není mnoho. Často se taková měřicí prostředí nachází ve vývojových střediscích automobilek [7].

Rozlišujeme několik druhů bezodrazových komor:

- komora plně bezodrazová – taková komora je sestavena z kovových plátů, které zaručují elektromagnetické stínění od okolních rušivých signálů. Vnitřní stěny takovýchto komor jsou pokryty absorbéry – materiálem pohlcujícím radarové záření. Absorbéry mají často tvar jehlanu, tento odráží dopadající vlnu různými směry. Dopadající vlna se tak rozptýlí a je pohlcena okolními stěnami.
- komora částečně bezodrazová – tento typ komory se liší od plně bezodrazové komory tím, že podlaha takové komory není pokryta absorbérem, ale je tvořena podlahou odrazivou (například betonovou). Může být sestavena podobně jako bezodrazová komora, tedy z kovových plátů, nebo může mít podobu hangáru. Finanční náročnost stavby tohoto typu komory je nižší než u komory plně bezodrazové. S ohledem na finanční i stavební náročnost je snazší dosáhnout větší velikosti těchto komor, proto jsou tyto používány k měření odrazné plochy velkých objektů, jako jsou například vozidla.

### **Měření odrazné plochy pomocí zmenšeného modelu**

Další z možností měření odrazné plochy v reálném prostředí je využití zmenšeného modelu zkoumaného objektu. To umožňuje zvolit takové měřítko modelu, aby bylo možno provádět měření v bezodrazové komoře s rozměry, do které by skutečný objekt nebylo možné umístit.

K takovému měření je potřeba anténa (nebo antény) s vhodnou vyzařovací charakteristikou. Musí být také zajištěna dostatečná vzdálenost antény (antén) a měřeného objektu pro zajištění rovnoměrného ozáření a splnění podmínky pro aproximaci dopadající vlny za rovinnou vlnu. Z tohoto důvodu je toto měření vhodné provádět pro kmitočty v řádu jednotek nebo spíše desítek gigahertzů.

Měření tohoto typu bývá obvykle prováděno ve třech krocích. Pořadí jednotlivých kroků není důležité, jelikož se jednotlivá měření mezi sebou následně porovnávají. Kroky tohoto měření jsou:

- změření hodnoty zpětně odraženého signálu od měřeného objektu,



- nahrazení měřeného objektu objektem o známě hodnotě odrazné plochy, např. odražečem, jehož odraznou plochu lze analyticky vypočítat,
- měření prázdné bezodrazové komory pro zjištění hodnoty nežádoucích odrazů, k nimž může, zvláště pak při měření na vysokých kmitočtech, docházet [11].

### **Měření s využitím fázového hologramu pro dosažení rovinné vlny**

Při měření zmenšených modelů v laboratorních podmínkách je také možné využít jako zdroj rovinné vlny fázový hologram.

Fázový hologram má podobu dielektrické desky vyrobené např. z teflonu s vyfrézovanými drážkami. Při průchodu elektromagnetické vlny dochází ke změně fáze v závislosti na tloušťce materiálu, kterým musí vyslaná vlna projít. Při průchodu signálu hologramem se část signálu odrazí zpět, část projde přímo skrz hologram a část projde pod požadovaným úhlem směrem k ozařovanému cíli. Ideální šíření rovinné vlny od hologramu je pod úhlem  $33^\circ$ .

Tato metoda je vhodná pro pásmo submilimetrových vln. Tento druh měření se tedy hodí pro dosažení stejného poměru vlnové délky k velikosti modelu, jako by mělo měření skutečného objektu na poměrně nižších frekvencích. V [12] bylo provedeno experimentální měření na frekvenci 310 GHz. Z toho vyplývá potřeba modelů v malém měřítku vůči skutečným rozměrům. Naopak jsou kladeny vysoké požadavky na měřicí techniku, která je schopna měření na tomto druhu kmitočtů.

## **1.3. Počítačová simulace odrazné plochy osobních automobilů**

Počítačovou simulací se rozumí běh aplikačního programu, pomocí kterého lze simulovat chování matematického modelu konkrétního systému. Slouží k nalezení analytického řešení modelu, které umožňuje predikovat chování systému na základě jeho parametrů, počátečních a okrajových podmínek. Počítačová simulace je často užívána jako doplnění nebo nahrazení modelovaného systému. Nespornou výhodou počítačové simulace je její menší náročnost, co se finančních prostředků a času týče, rovněž odpadá potřeba měřicího pracoviště

Reálné objekty je možné částečně aproximovat jednoduchými tvary, pro které jsou známy vztahy pro výpočet odrazné plochy. Celková odrazná plocha se poté vypočte jako součet jednotlivých příspěvků těchto základních tvarů. Tento způsob je ovšem značně nepřesný. Proto se pro určení odrazné plochy reálných objektů využívá buď měření, nebo software pro řešení elektromagnetických rovnic. Do tohoto softwaru lze nahrát přesný CAD model zkoumaného objektu, na němž se bude simulace provádět. Různé softwary využívají pro výpočet odrazné plochy různé numerické metody. Vybrané numerické metody budou níže rozebrány.

### **1.3.1. Jednotlivé numerické přístupy**

Různé numerické metody se odlišují svou přesností a hodí se pro různé typy výpočtů v závislosti na velikosti a tvaru zkoumaného objektu. Liší se svou výpočetní náročností i hardwarovými požadavky. Pro jednotlivé typy simulací jsou vhodné různé typy výpočetních softwarů, a to zejména s ohledem na výpočetní náročnost a přesnost, která je kladena na konkrétní projekt.

## **Geometrická optika**

Jedná se o numerickou metodu používanou pro elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou mnohem menší, než je velikost ozařovaných objektů. Popisuje šíření elektromagnetických 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 pohlčení. Geometrická optika je zjednodušená metoda šíření elektromagnetických vln, neboť nebere v potaz některé vlastnosti vlnění, jako je difrakce na hranách, interference nebo polarizace [1], [5].

## **Fyzikální (vlnová) optika**

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

Tyto dvě metody, tedy geometrická optika a fyzikální optika, jsou obecně méně přesné v okolí hran a okrajů zkoumaného objektu. Pro zvýšení přesnosti mohou být doplněny dalšími metodami, které ve svých výpočtech zohledňují i difrakci na hranách objektů.

## **Metoda momentů**

Metoda momentů je numerická metoda řešící elektromagnetické rovnice v integrálním tvaru. Tyto rovnice jsou převedeny na lineární rovnice v maticového tvaru, které jsou výpočetně jednodušší. Tato metoda vytváří diskretizační síť povrchu nebo objemu objektu. Metoda momentů vytváří hustou matici, to znamená, že se zvětšujícími se rozměry roste náročnost výpočtu přibližně s druhou mocninou. Je využívána především v programech, které provádí výpočty pomocí integrálních rovnic [6].

## **Metoda konečných diferencí (Finite Difference Time Domain Method – FDTD)**

Jedná se o metodu řešící Maxwellovy rovnice v časové oblasti. Je založena na diskretizaci parciálních diferenciálních rovnic, u nichž jsou nahrazeny derivace diferenciály. Tato metoda také vyžaduje diskretizační síť objektu. U velkých objektů tak rostou požadavky této metody na výpočetní paměť [1].

## **Multi Level Fast Multipole Metod (MLFMM)**

Tato metoda vychází z metody momentů, jedná se o aproximační metodu využívanou pro řešení elektricky velkých problémů. Metoda Multi Level Fast Multipole Metod dělí prvky diskretizační sítě do shluků. Pakliže se tyto shluky nachází v navzájem vzdálené oblasti, určí se nový bod ve středu mezi těmito shluky. Nově vzniklý bod se následně použije pro výpočet namísto bodů původních. 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  $N_{iter} \cdot N \log N$ , kde  $N$  je počet neznámých a  $N_{iter}$  je počet iterací solveru [3].

### **Paprsková metoda** (Shooting and bouncing rays)

Paprsková 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. Co se týče výpočetní paměti, jedná se o metodu nejméně náročnou. Používá se pro elektricky velké objekty (typu loď) na vysokých frekvencích. Metoda umožňuje provádět simulace objektů extrémní velikosti při zachování nízké výpočetní náročnosti, lze ji tedy využít i na méně výkonném hardwaru. Tato metoda se nehodí pro simulaci objektů, jež mají stejnou či podobnou velikost jako je velikost vlnové délky ozařovaného signálu. V takovém případě totiž výrazně vzrůstá nepřesnost simulace [5].

#### 1.3.2. Počítačové programy pro simulaci odrazné plochy

S ohledem na náročnost výpočtů existují mnohé softwary založené na jedné numerické metodě či na více numerických metodách. Softwary se liší možnostmi nastavení i složitostí a přesností výpočtu. Jednotlivé simulační programy se pak kromě vhodnosti pro jednotlivé typy výpočtů odlišují také uživatelskou přívětivostí. Vzhledem k požadované přesnosti výsledku simulace odrazné plochy, dostupným hardwarovým prostředkům a časové náročnosti celkového výpočtu je tak třeba zvolit nejvhodnější výpočetní program.

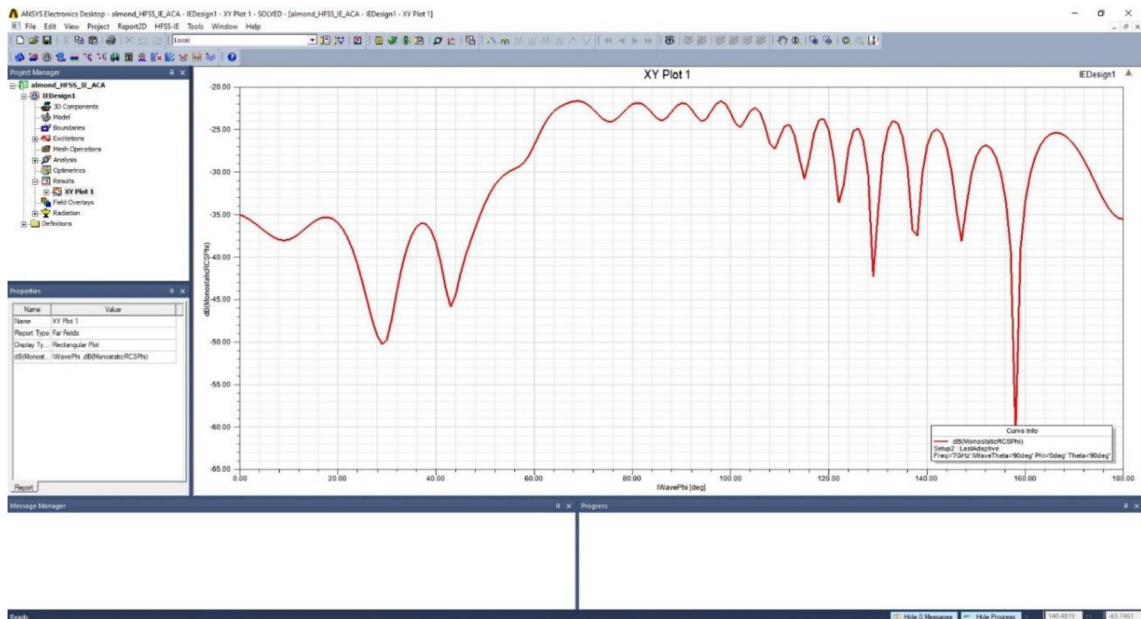
#### **Ansys HFSS**

Ansys HFSS je software pro širokou škálu elektromagnetických simulací. Disponuje několika solvery umožňujícími řešení různých druhů problémů. Ansys HFSS nabízí na výběr z více numerických metod, které uživatel volí s ohledem na typ požadované simulace:

- metoda konečných prvků pro solver pracující ve frekvenční oblasti – tato metoda je vhodná především pro simulaci parametrů antén, integrovaných obvodů, vlnovodů a dalších elektricky malých prvků.
- metoda konečných prvků pro solver pracující v časové oblasti – tato 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.

Součástí Ansys HFSS je HFSS-IE, což je solver využívající integrální rovnice. K řešení rovnic využívá povrchovou meshovací síť a k výpočtu užívá povrchové proudy této sítě. 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.

Z hlediska práce s programem není Ansys HFSS příliš uživatelsky přívětivý. Vyžaduje čas na seznámení se s prostředím programu a jeho jednotlivými funkcemi.



**Obr. 7 Uživatelské rozhraní programu Ansys HFSS**

### **Ansys HFSS SBR+**

Ansys HFSS SBR+ je doplňkový solver, který může být doplněn do programu Ansys HFSS. Jedná se o asymptotický solver, který využívá paprskovou metodu. Hodí se pro výpočet parametrů antén, vyzařovacích parametrů a radarových vlastností velkých objektů. Výpočetní náročnost tohoto solveru je nízká. Hodí se také pro výpočet odrazné plochy.

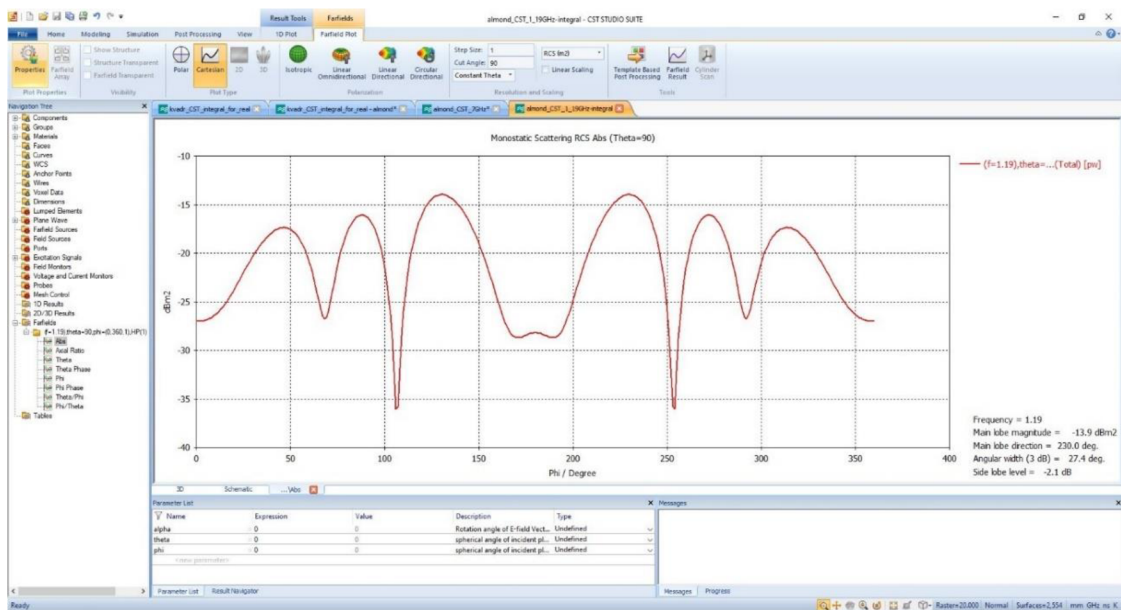
### **FEKO**

FEKO je komplexní výpočetní software pro elektromagnetické výpočty, včetně výpočtu odrazné plochy. Obsahuje v sobě několik numerických metod, jež umožňují volbu různé úrovně přesnosti i výpočetní náročnosti. Tento program umožňuje provádění simulací i pro elektricky velké objekty. Využívá metodu Multilevel fast multipole method (MLFMM). V této práci nebyl tento program dále zvažován.

### **CST Studio Suite (CST)**

CST je jeden z předních softwarů určených pro elektromagnetické výpočty. Obsahuje širokou škálu solverů využívajících různé numerické metody. Pro výpočet odrazné plochy se hodí následující solvery:

- Integral Equation solver – tento solver je založen na metodě momentu, využívá také metodu multilevel fast multipole method. Solver nabízí vysokou přesnost simulace, má ovšem vysoké požadavky na výpočetní paměť. Je vhodný i pro elektricky velké objekty.
- Asymptotic solver – jedná se o solver využívající paprskovou metodu. Lze jej využít i pro extrémně elektricky velké objekty. Asymptotic solver je vhodný pro výpočet parametrů antén, vyzařovacích parametrů a radarových vlastností velkých objektů. Na rozdíl od Integral Equation solveru má nízké požadavky na výpočetní paměť a vyšší přesnosti dosahuje na vyšších frekvencích.

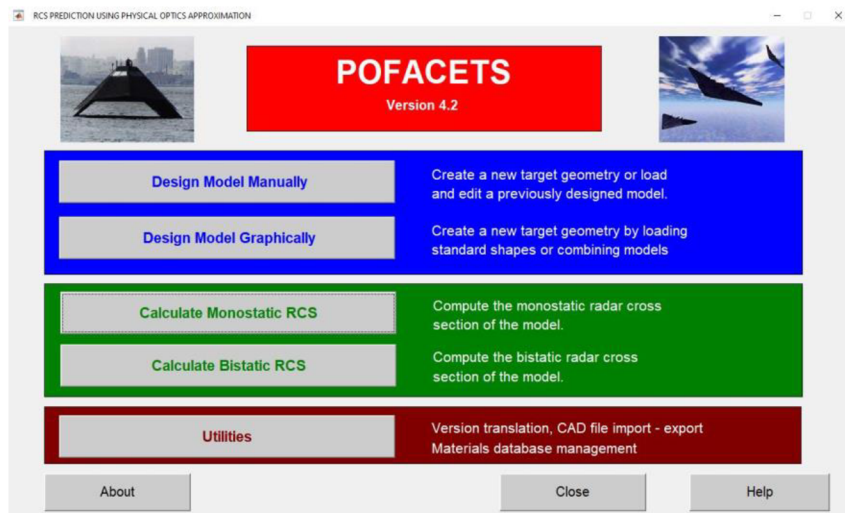


**Obř. 8 Uřivatelské rozhraní programu CST Studio Suite**

## Matlab

Matlab je velice komplexní nástroj, který můžeme mimo jiné využít i k simulaci odrazné plochy. Tento program je však vhodný spíše pro výpočty odrazné plochy základních tvarů a méně složitých objektů. Přesto jej lze zařadit mezi nástroje vhodné pro základní určení odrazné plochy. Mezi vybrané možnosti Matlabu pro výpočet RCS patří:

- Pofacets – jedná se o jeden z nejpropracovanějších programů pro výpočet odrazné plochy v rámci Matlabu. Má dokonce vlastní grafické prostředí. Program využívá pro výpočet šíření vlny fyzikální optiku. Funguje tak, že počítá odraz od každé samostatné části modelu zvlášť a ty potom spojí do výsledného celku. To znamená, že program nepodporuje vícenásobné odrazy dopadajícího paprsku. Dále také nezahrnuje vzájemné stínění jednotlivých částí objektu, difrakci na hranách a šíření povrchové vlny. Program se skládá ze dvou částí – tvorby modelu a části pro výpočet odrazné plochy. Simulovaný objekt je při tvorbě a následném zpracování rozdělen na základní trojúhelníkové plochy. Model lze tvořit manuálně pomocí kombinace základních tvarů, nebo vypsáním pozice jednotlivých bodů, ze kterých je potom tvořen celý objekt. Každá plocha může být ozařována buď pouze z jedné strany, nebo z obou stran. Je zde také možnost importovat soubory typu stl, ale tato funkce není zcela spolehlivá. Vytvořenému objektu lze přiřadit materiál, případně definovat vlastnosti materiálu ručně. Druhá část je zaměřena na výpočet. Tato nabízí jak monostatický, tak bistatický mód. V rámci druhé části je možné nastavit úhel ozařování a pozorování, pracovní frekvenci, polarizaci vlny a rovněž zohlednit odraz od roviny země. Vypočítané výsledky pak můžeme kromě polárních a kartouzských grafů zobrazit také v 3D prostorovém grafu i s modelovaným objektem [13].



**Obr. 9 Uživatelské rozhraní POFACTS**

- Antenna Toolbox – součástí Antenna toolbox je funkce *rscs*, která slouží k výpočtu odrazné plochy. Tato funkce umí pouze výpočet monostatické konfigurace. Obsahuje několik základních modelů antén a zvládne také import souborů typu stl. Umožňuje výpočet jak pro jednotlivé objekty, tak pro skupiny objektů. Tato funkce je vhodná pro základní výpočty a zobrazení odrazné plochy.
- Phased Array System Toolbox – obsahuje několik funkcí pro simulace odrazné plochy jednoduchých geometrických tvarů. Jedná se o funkce *rcscylinder*, *rscdisc*, *rcssphere* a *rcstrunccone*, které slouží pro výpočet odrazné plochy válce, disku, koule a komolého kužele. Parametry funkcí jsou rozměry daných objektů, pracovní frekvence a úhel ozáření. Tento toolbox umožňuje výpočet pouze v monostatickém režimu. Všechny jeho funkce slouží k výpočtu odrazné plochy pro jeden geometrický tvar. Nabízí tedy jednoduchou a rychlou možnost právě tohoto typu výpočtu.
- *rscSignature* class – jedná se o třídu, která vytvoří objekt s parametry odrazné plochy. Hodnoty odrazné plochy se zadávají jako pole hodnot, stejně tak se zadají i hodnoty úhlů elevace a azimutu. S vytvořeným objektem se zadanými vlastnostmi je následně možno pracovat a najde využití při další práci s naměřenými hodnotami odrazné plochy, i když se přímo nejedná o funkci pro její výpočet.
- Targets and Interference Toolbox – tento toolbox obsahuje dva objekty matlabu – pro simulaci pohybujícího se chodce nebo simulaci cyklisty. Oba objekty se skládají z diskretních bodů odrážejících signál. Data pro tyto body jsou získána na základě radarového měření na 77 GHz. U obou modelů lze zadávat řadu parametrů jako je výška postavy, rychlost a směr pohybu. Tyto dvě funkce nabízí zajímavý doplněk pro výpočet odrazné plochy objektů, které se nachází v běžném provozu spolu s automobily.

Matlab umožňuje simulaci odrazné plochy, ale pouze pro jednoduché geometrické tvary. Jeho nároky na výpočetní výkon jsou relativně nízké. V rámci výpočtu odrazné plochy nabízí Matlab základní funkce s jednoduchým uživatelským rozhraním.

Z uvedených softwarů poskytují nejvíce funkcí a s tím spojené i nejširší využití programy CST Studio Suite a Ansys HFSS. Tyto programy nabízí několik numerických metod a tím i velkou škálu možných výpočtů. Vyžadují však čas na seznámení se

s ovládáním programu. Lze je však aplikovat na široké spektrum výpočtů. Ansys HFSS SBR+ je určen pouze pro výpočty s využitím paprskové metody a má tedy zúženou možnost aplikace. Program FEKO neposkytuje tolik možností výpočtů a v této práci nebyl využit. Matlab je vhodný převážně pro simulaci odrazné plochy jednoduchých tvarů. Pro složitější objekty (typu vozidla) není příliš vhodný.

S ohledem na dostupnost a možnosti, které programy nabízí, byly v této diplomové práci využity programy CST Studio Suite, Ansys HFSS a Matlab.

## 2. Ověření numerických přístupů na elektromagnetickém modelu

Pro výběr optimálního přístupu byly provedeny simulace jednoduchých tvarů ve vybraných programech při využití různých numerických metod. Výsledky jednotlivých měření byly následně porovnány a na jejich základě pak vybrána optimální kombinace programu a numerické metody.

Pro elektromagnetickou simulaci byly vybrány programy na základě poznatků shrnutých v rámci předchozí kapitoly. S ohledem na dostupnost byly k simulaci vybrány programy CST Studio Suite, Ansys HFSS a Matlab.

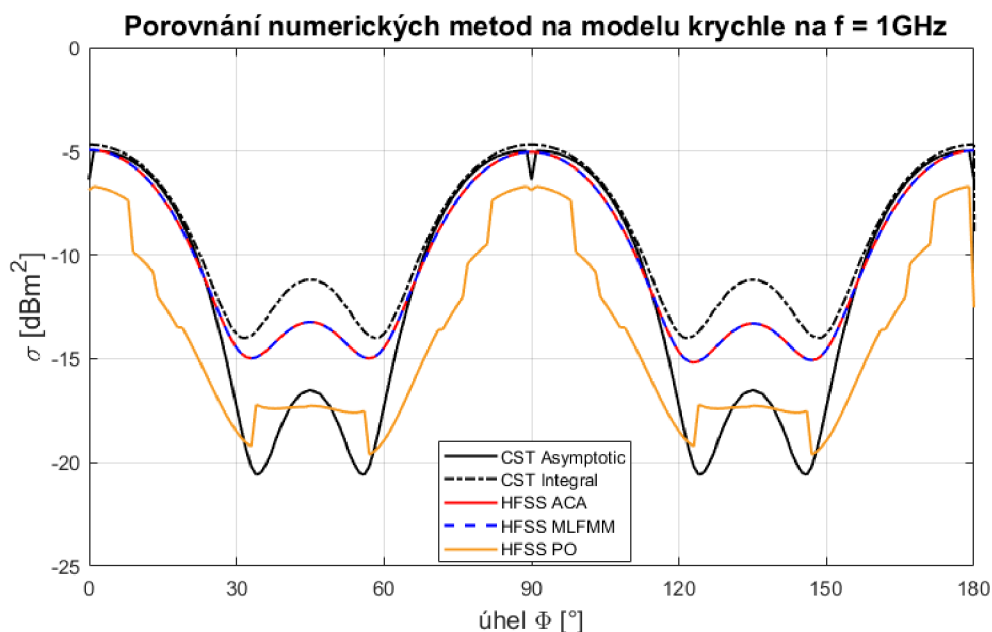
Nejprve byly prováděny simulace na základních tvarech. Pro simulaci byl vybrán tvar krychle, jelikož se jedná o tvar se známými vlastnostmi a výsledek prováděné simulace tohoto tvaru lze porovnat s výsledky běžně dostupnými v literatuře [3].

Pro všechny prováděné simulace byla využita krychle o délce hrany 200 mm a z perfektně elektricky vodivého materiálu (PEC).

Tvar krychle byl následně simulován ve všech vybraných programech. Krychle byla při všech simulacích ozařována rovinnou vlnou z výchozího směru kolmému na stranu krychle. Výsledky byly porovnány s teoretickými předpoklady a rovněž byly porovnány jednotlivé výsledky mezi sebou.

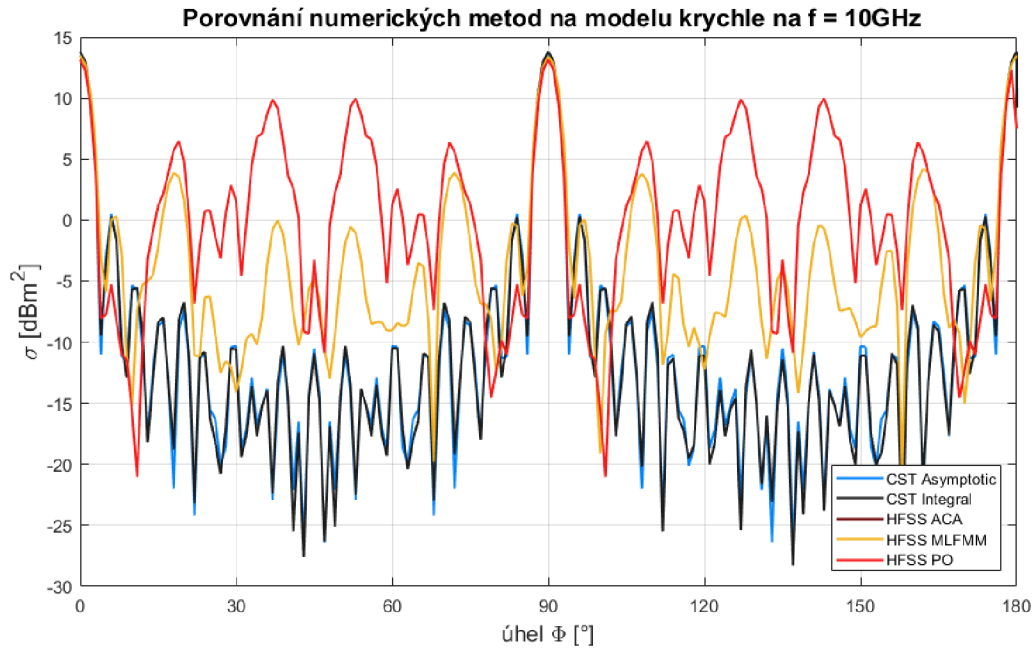
První simulací byla simulace provedená na frekvenci 1 GHz. Tvar odrazné plochy krychle dosahuje maxima vždy při natočení o 90 stupňů, pakliže je počáteční úhel dopadu kolmý na plochu krychle. Velikost tohoto maxima odpovídá přibližně - 5 dBm<sup>2</sup>. Jak je patrné z grafu (Obr. 10), průběhy jednotlivých simulací dosahují v oblasti maxima ve většině použitých programů shody. Výjimkou je průběh v solveru HFSS PO, jehož maximum odpovídá hodnotě přibližně o 2 dB nižší. Průběhy simulací za použití solveru HFSS ACA a HFSS MLFMM mají průběh takřka shodný, liší se pouze o desetiny až setiny decibelu, což lze zjistit při detailnějším zkoumání hodnot grafu. Obecně lze z grafu vyzorovat rozdíl mezi solvery využívajícími metodu integrálních rovnic, což jsou CST Integral Equation Solver, HFSS ACA a HFSS MLFMM, a solvery využívajícími paprskové metody, kterými jsou CST Asymptotic Solver a HFSS PO. Paprskové metody nedosahují na nižších frekvencích takové přesnosti jako solvery využívající metody integrálních rovnic, toto se projeví v oblasti minima grafu. Jako nejméně přesný se ukázal solver HFSS PO, a to právě z důvodu využití paprskové metody v tomto solveru a také z důvodů odlišností vnitřních parametrů, které tento program využívá – na rozdíl od programu CST.





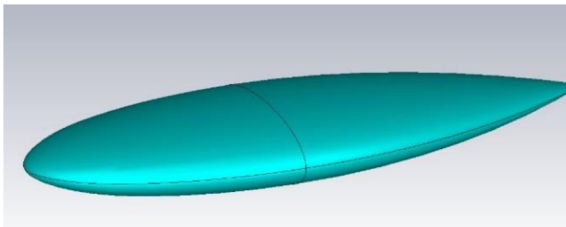
**Obr. 10 Porovnání numerických metod na modelu krychle na  $f = 1\text{GHz}$  v programech CST Studio Suite a Ansys HFSS**

Druhá simulace krychle byla provedena na frekvenci 10 GHz, vlnová délka signálu tak byla přibližně 30 mm, a tedy několikrát menší než rozměry simulovaného objektu. Při takových vlastnostech dochází k výraznému zvýšení přesnosti solveru využívajícího paprskové metody. Z grafu (Obr. 11) jde vidět shody v oblasti maxima, to odpovídá  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $180^\circ$ . Pro ostatní úhly natočení se průběhy výrazně liší. Lze pozorovat výrazné rozdíly mezi programy CST a HFSS. V rámci CST jsou oba průběhy podobné i při použití dvou různých numerických metod. V programu HFSS lze pozorovat shodu mezi solvery ACA a MLFMM, solver PO nabývá vyšších odchylek jak v rámci programu HFSS, tak vůči programu CST.

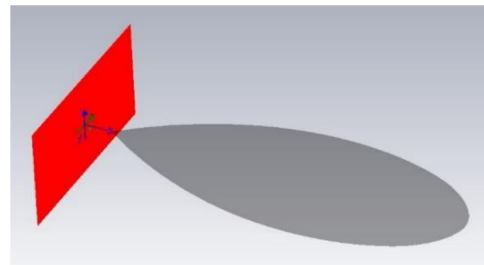


**Obr. 11 Porovnání numerických metod na modelu krychle na  $f = 10$  GHz v programech CST Studio Suite a Ansys HFSS**

K ověření správnosti prováděných simulací byl zvolen referenční model NASA Almond (Obr. 12, Obr. 13), který bývá pro tyto účely využíván. Jedná se o geometrický tvar připomínající mandli. Pro své rozměry bývá odrazná plocha tohoto modelu obvykle simulována na frekvencích 1,19 GHz, 7 GHz a 9,92 GHz. Délka tohoto modelu je 252,4 mm, což odpovídá vlnové délce na frekvenci 1,19 GHz [14].

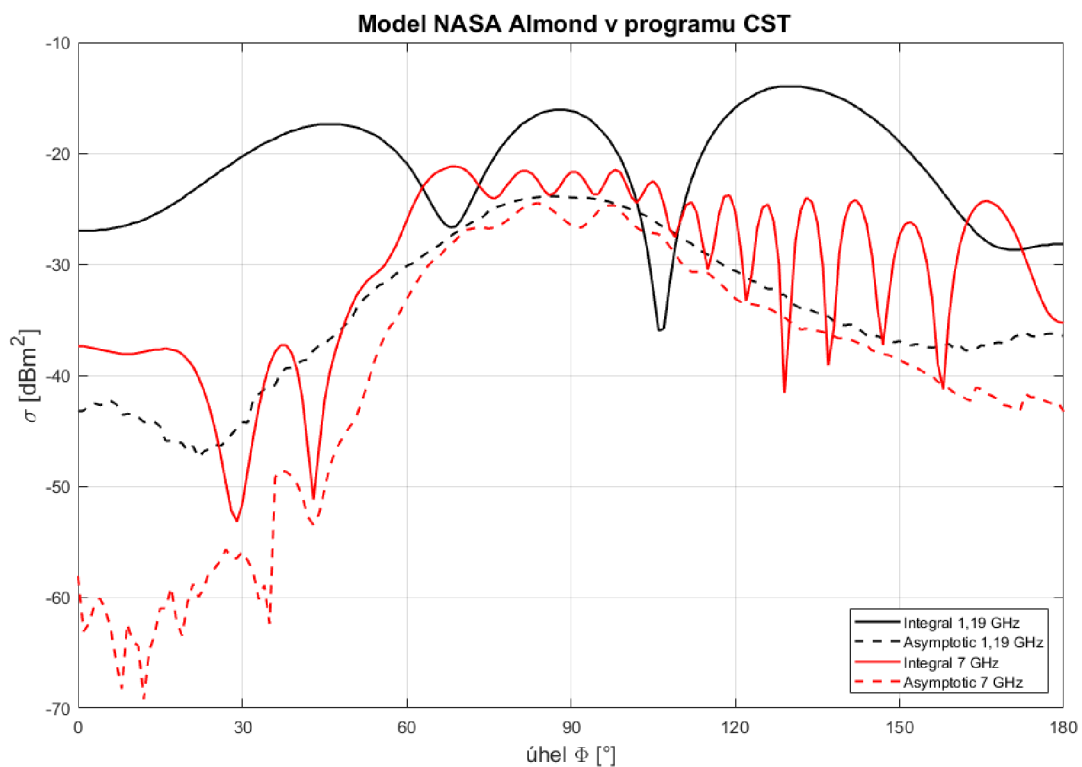


**Obr. 12 Model NASA Almond použitý pro simulaci**



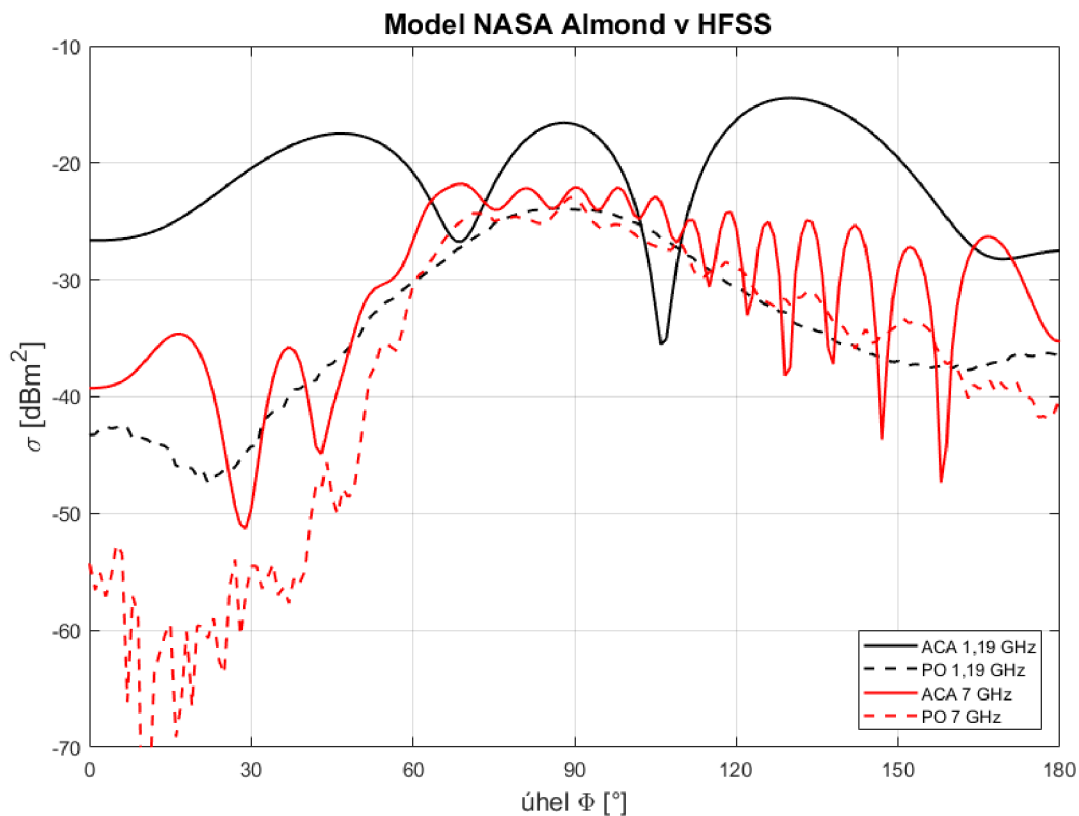
**Obr. 13 Rovinná vlna dopadající na model NASA Almond**

Při provedených simulacích v programu CST Studio využívající integrální metody odpovídají průběhy teoretickým předpokladům (viz Obr. 14), když tyto byly srovnány s průběhy simulací v dostupné literatuře. Při použití Asymptotic Solveru lze opět pozorovat menší přesnost, kdy na frekvenci 7 GHz se průběh grafu blíží průběhu grafu při použití přesnějšího Integral Solveru, zatímco na frekvenci 1,19 GHz odpovídá průběh pouze velikosti plochy, na kterou dopadá ozařovací vlna.



**Obr. 14 Kontrolní výpočet přesnosti simulace na modelu NASA Almond v programu CST Studio**

Simulace v programu Ansys HFSS (viz Obr. 15) rovněž odpovídají teoretickým předpokladům dle dostupné literatury při využití solverů využívajících integrální metody. Při srovnání s programem CST je pozorována obecná shoda, nicméně lze pozorovat mírné odlišnosti v průbězích, které jsou způsobeny rozdílnou implementací numerických metod v jednotlivých programech.

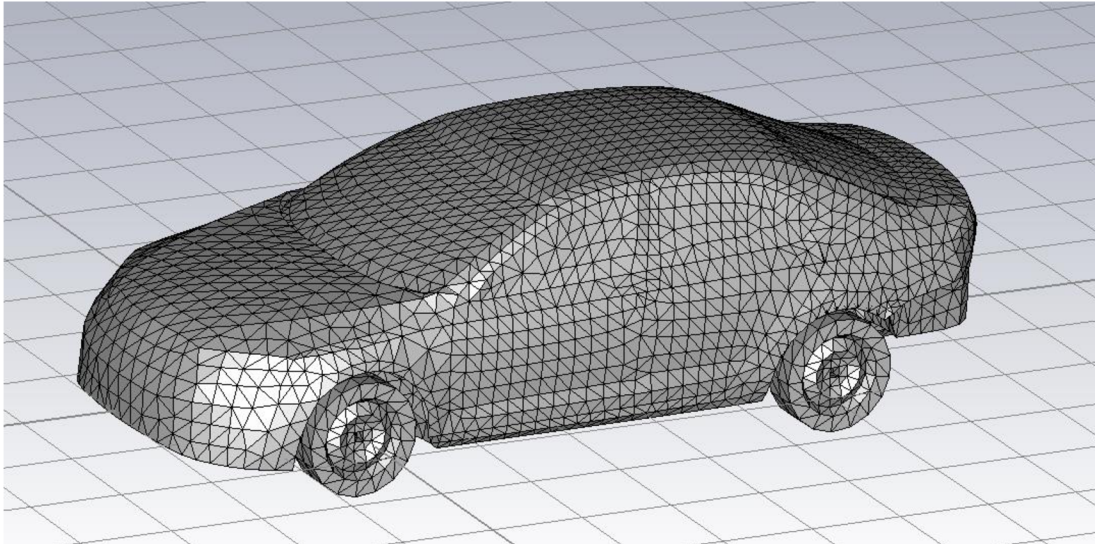


**Obr. 15 Kontrolní výpočet přesnosti simulace na modelu NASA Almond v programu Ansys HFSS**

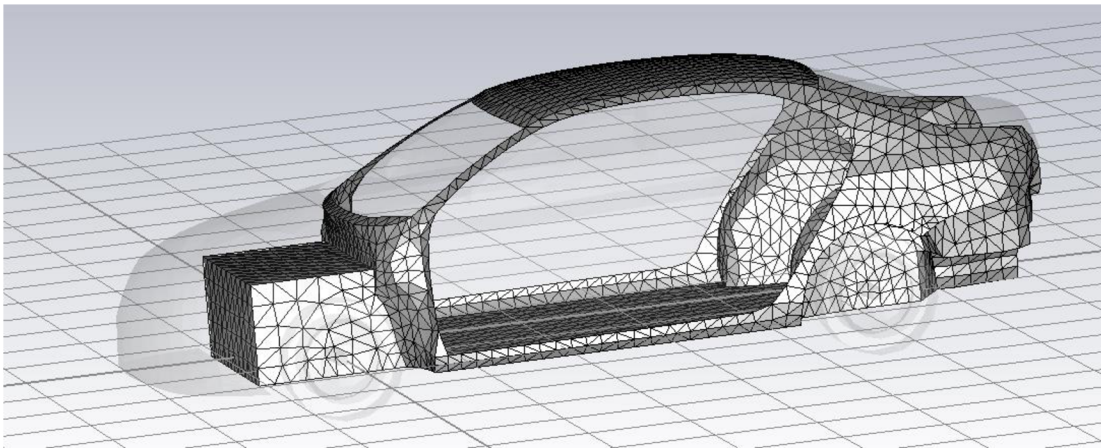
Provedenými simulacemi byla ověřena správnost nastavení a funkce jednotlivých solverů. Z uvedeného plyne, že solvery využívající numerické metody založené na integrálních rovnicích jsou přesnější. Nicméně se zvyšujícím se kmitočtem roste i přesnost výpočtu za použití paprskových metod. Proto je tyto numerické metody možno s výhodou použít na kmitočtech odpovídajících řádově desítkám gigahertzů, na kterých se uplatní jejich výhoda menší výpočetní a hlavně časové náročnosti. Správnost provedených simulací byla ověřena porovnáním se známými údaji modelu NASA Almond.

## 2.1. Model vozu Škoda Octavia

Všechny simulace byly prováděny na zjednodušeném modelu Škoda Octavia. Ten byl poskytnut vedoucím práce, a to ve formátu .nas (Obr. 16). Jedná se o model s částečně tvarovanou vnitřní strukturou, jako je například blok motoru (Obr. 17). Pro výpočty byl materiál vozidla s ohledem na požadavky jednotlivých solverů a také náročnost výpočtu vybrán jako dokonale vodivý materiál (PEC).



**Obr. 16 Model automobilu**



**Obr. 17 Model automobilu – vnitřní struktura**

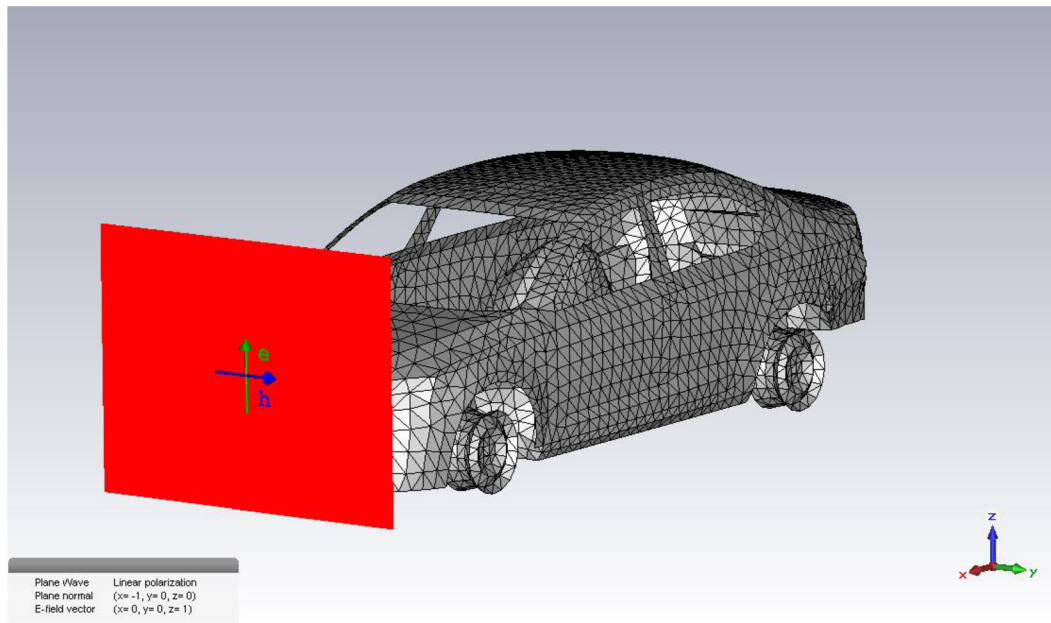
## 2.2. Jednotlivé přístupy použité na model automobilu Škoda Octavia

Na modelu Škoda Octavia byly otestovány vybrané numerické metody. S ohledem na časovou a výpočetní náročnost některých numerických metod byla na počátek zvolena pracovní frekvence 1 GHz. Konkrétní testované numerické metody jsou blíže rozebrány níže – integral equation solver, asymptotic solver. V programu Matlab nemohla být simulace modelu auta Škoda Octavia provedena z důvodu velké výpočetní náročnosti a nevhodnosti Matlabu pro tento typ výpočtu, což je blíže rozebráno v části Počítačové programy pro simulaci odrazné plochy.

### **Integral equation solver**

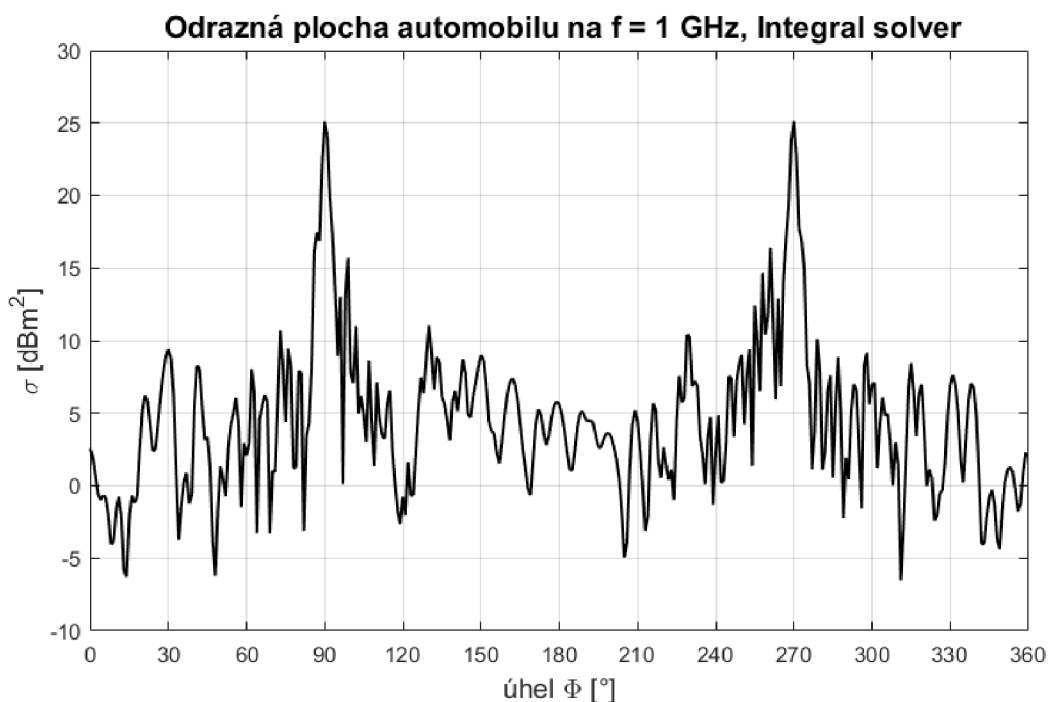
Tento solver je vhodný pro práci s elektricky velkými modely, a to především pro výpočet problémů týkajících se vzdálené oblasti, odrazné plochy a S-parametrů. Jako numerickou metodu využívá tento solver Multi Level Fast Multipole Method. Tato metoda pracuje pouze s povrchovou diskretizací modelu, tím je snížena výpočetní náročnost oproti jiným metodám využívajícím diskretizaci v celém objemu modelu. Pro buzení lze zvolit buď rovinnou vlnu nebo diskretní port. Pro tuto simulaci je zvolena možnost buzení

rovinnou vlnou (Obr. 18) 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. 18 Buzení rovinnou vlnou**

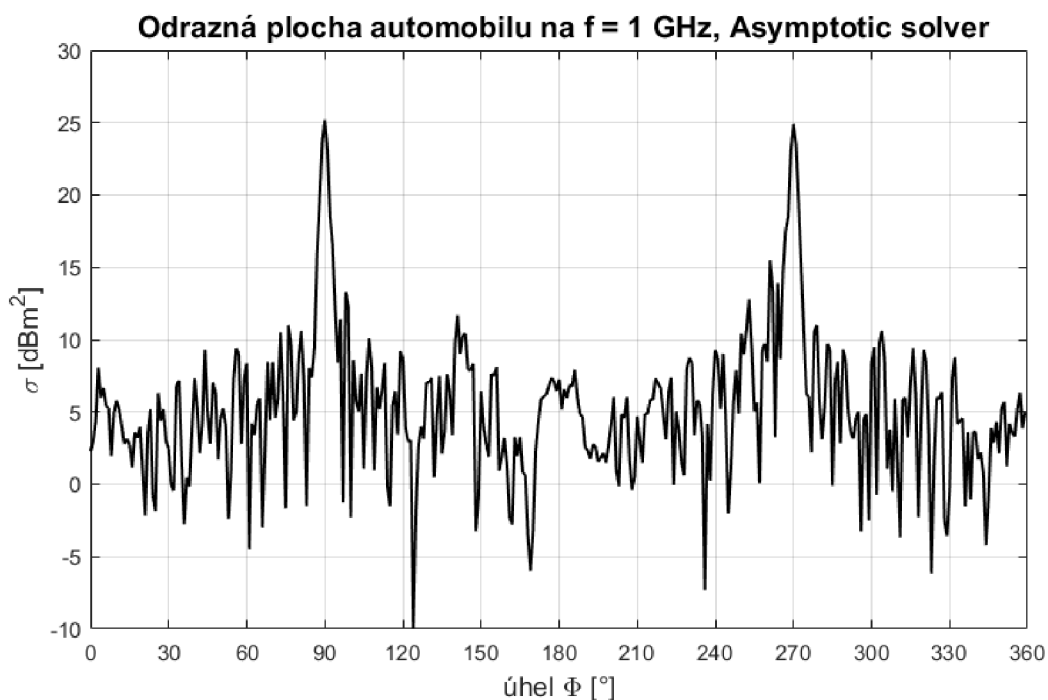
Simulace za použití tohoto solveru je časově náročná a má velké nároky na dostupnou výpočetní paměť. Z důvodu nedostatku paměti nebylo možné provést simulaci za použití tohoto solveru na pracovních kmitočtech radaru a jsou zde uvedeny výsledky simulace pro frekvenci 1 GHz (Obr. 19).



**Obr. 19 Odrazná plocha pro f = 1 GHz, Integral equation solver**

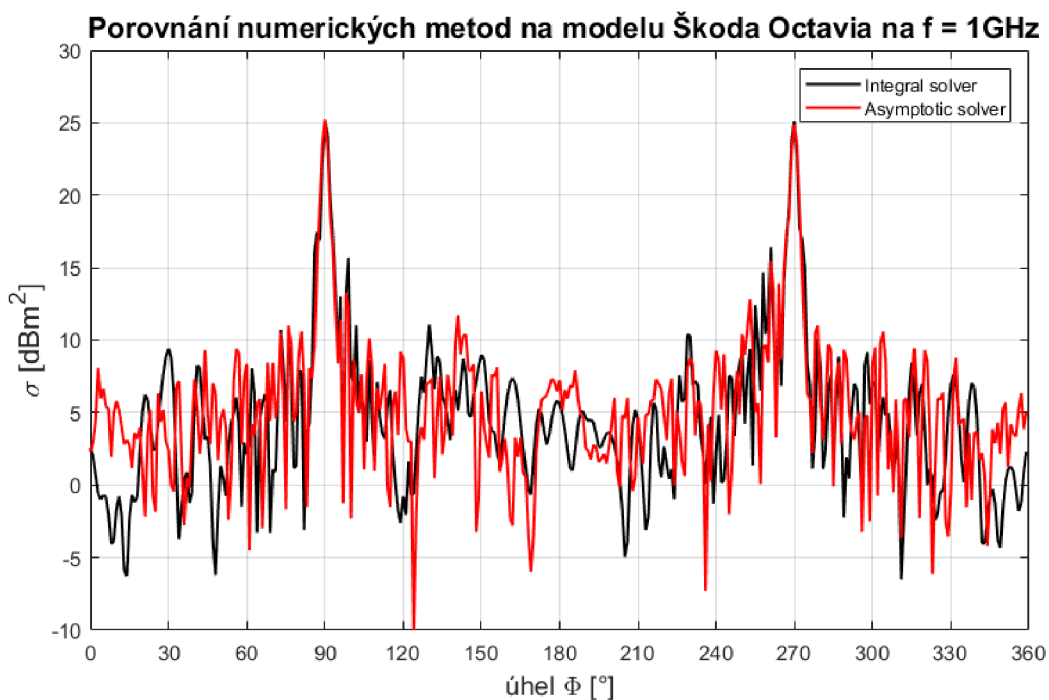
### Asymptotic solver

Jedná se o analýzu ve frekvenční oblasti, tato analýza je založena 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. Výsledek simulace na frekvenci 1 GHz pro tento solver je zobrazen na Obr. 20.



**Obr. 20 Odrazná plocha pro f = 1 GHz, Asymptotic solver**

Následně byly oba výsledky porovnány mezi sebou. V grafu (Obr. 21) lze pozorovat dobrou shodu mezi oběma použitými solvery. Maximum pro oba průběhy je  $25 \text{ dBm}^2$  pro úhly natočení vozidla  $90^\circ$  a  $270^\circ$ , tedy pro natočení vozidla z boční strany. Rozdíly mezi použitými numerickými metodami lze v grafu pozorovat pro úhly natočení mimo dosažená maxima, kde se průběhy od sebe vzájemně odlišují právě z důvodu použití odlišných numerických metod při simulaci.



**Obr. 21 Porovnání numerických metod na modelu Škoda Octavia**



### 2.3. Závěr porovnání

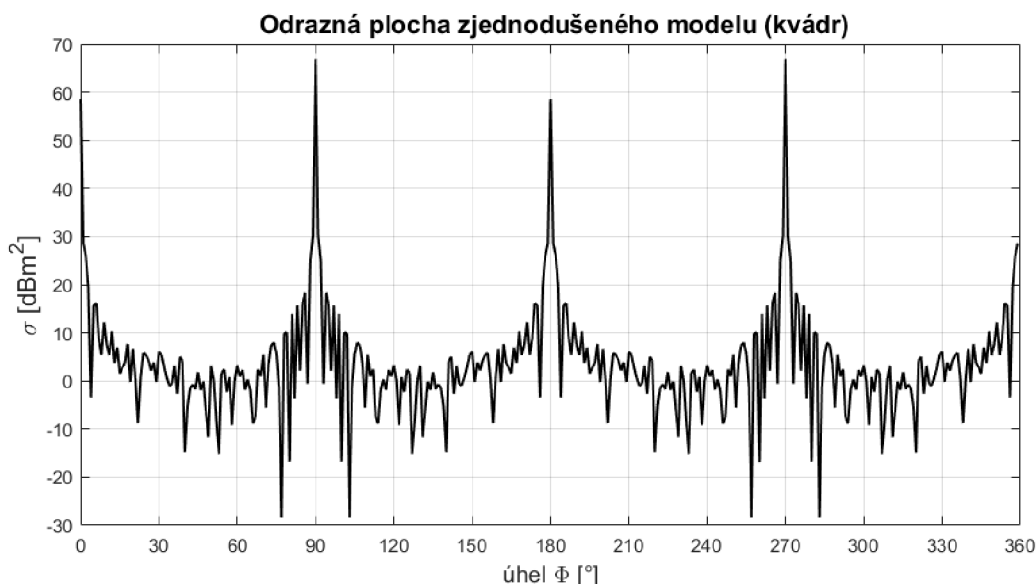
S ohledem na získaná data ze simulací se jeví jako nejvhodnější možnost použití Asymptotic solveru, a to s ohledem na jeho nízké výpočetní nároky a dostatečnou přesnost výpočtů pro zadané frekvence. Právě z uvedených důvodů byl Asymptotic solver zvolen jako vhodný pro další simulace prováděné v rámci této práce.

### 3. Vliv velikosti a tvaru automobilu na odraznou plochu

Modelování odrazné plochy automobilů může být časově velice náročná činnost. S ohledem na složitost modelu a pracovní frekvenci, která má vliv na velikost vlnové délky může jedna simulace trvat řádově i jednotky či desítky hodin. Jeví se tedy jako vhodné prozkoumat vliv hrubosti modelu na přesnost dosažených výsledků. Na základě těchto údajů lze poté vybrat nejvhodnější nastavení hrubosti modelu s ohledem na časovou náročnost takového výpočtu. Následující simulace jsou provedeny na vybrané pracovní frekvenci radaru, a to 33 GHz.

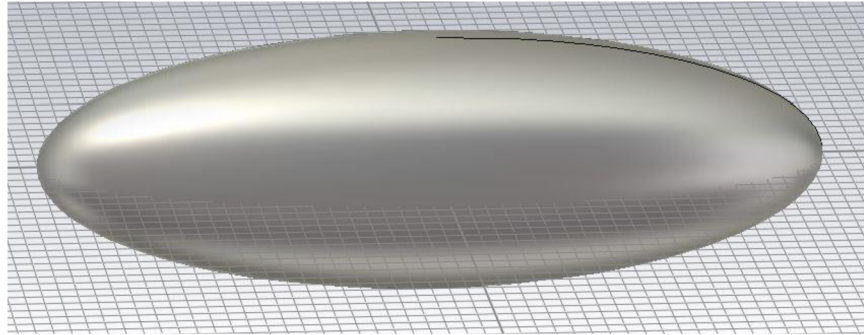
#### 3.1. Vliv tvaru modelu automobilu na odraznou plochu

Jako základní model byl použit kvádr o rozměrech zkoumaného modelu Škoda Octavia, tedy o délce 4603 mm, šířce 1759 mm a výšce 1235 mm. S ohledem na tvar velice podobný krychli, která již byla zkoumána v předchozí kapitole, je podobný i tvar průběhu odrazné plochy, což je patrné z grafu níže (Obr. 22). Oproti kvádru se zde liší hodnoty maxim mezi úhly  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , a to z toho důvodu, že se liší plocha kvádrů pro čelní a boční pohled. Hodnota maxima činí  $66,9 \text{ dBm}^2$ .

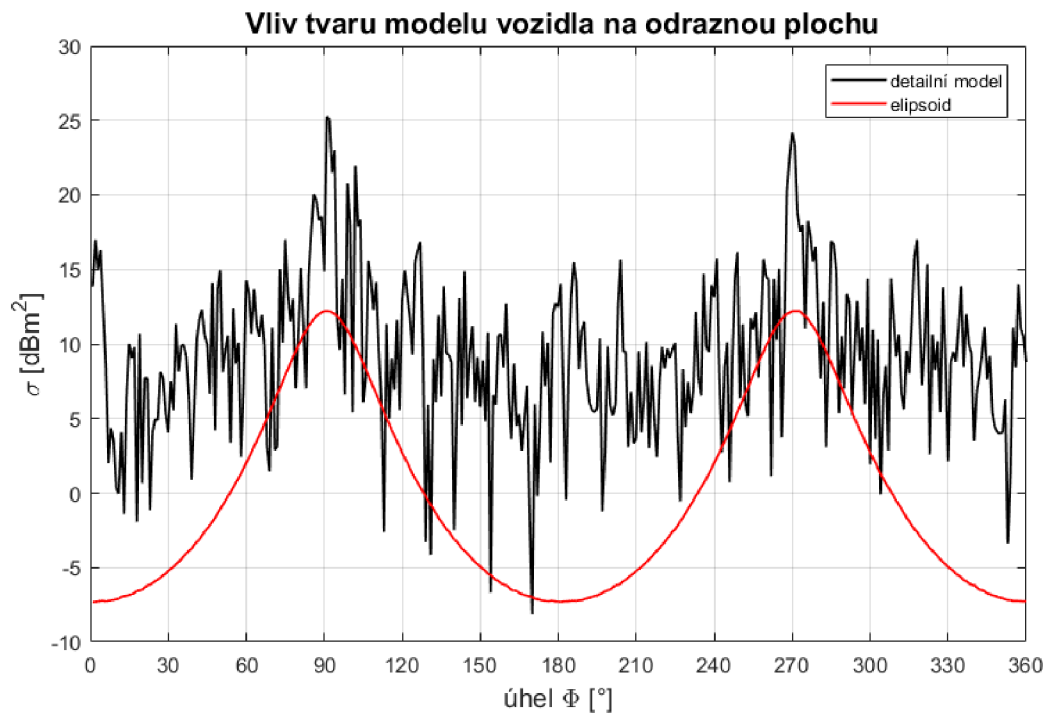


**Obr. 22 Odrazná plocha zjednodušeného modelu (kvádr)**

Mezi často používané modely patří také tvar elipsoidu. Z toho důvodu byl vytvořen model elipsoidu o rozměrech vozidla (Obr. 23), který byl použit pro simulaci. Elipsoid má šířku 1497 mm a délku 4603 mm. Porovnání výsledku simulace elipsoidu s průběhem simulace dodaného modelu vozidla lze vidět na Obr. 24, z tohoto lze pozorovat podobnost mezi průběhem simulace elipsoidu a simulace detailního modelu. Rozdíly těchto dvou modelů jsou dány převážně hrubostí jednotlivých modelů, kdy elipsoid má hladký povrch tvořený křivkou, zatímco model vozidla obsahuje detaily karoserie, které se významně podílí na velikosti odraženého signálu daným směrem a způsobují velkou fluktuaci mezi jednotlivými směry natočení modelu vozidla.

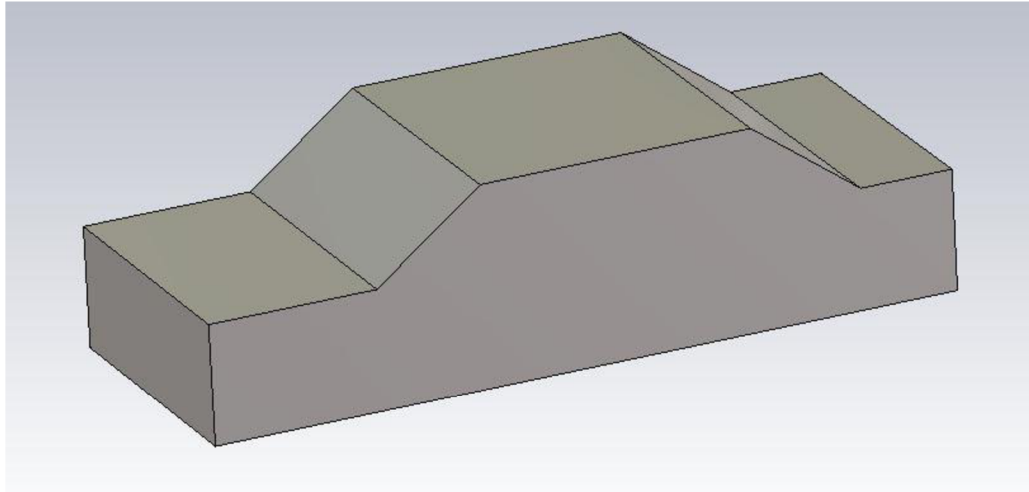


**Obr. 23 Elipsoid**

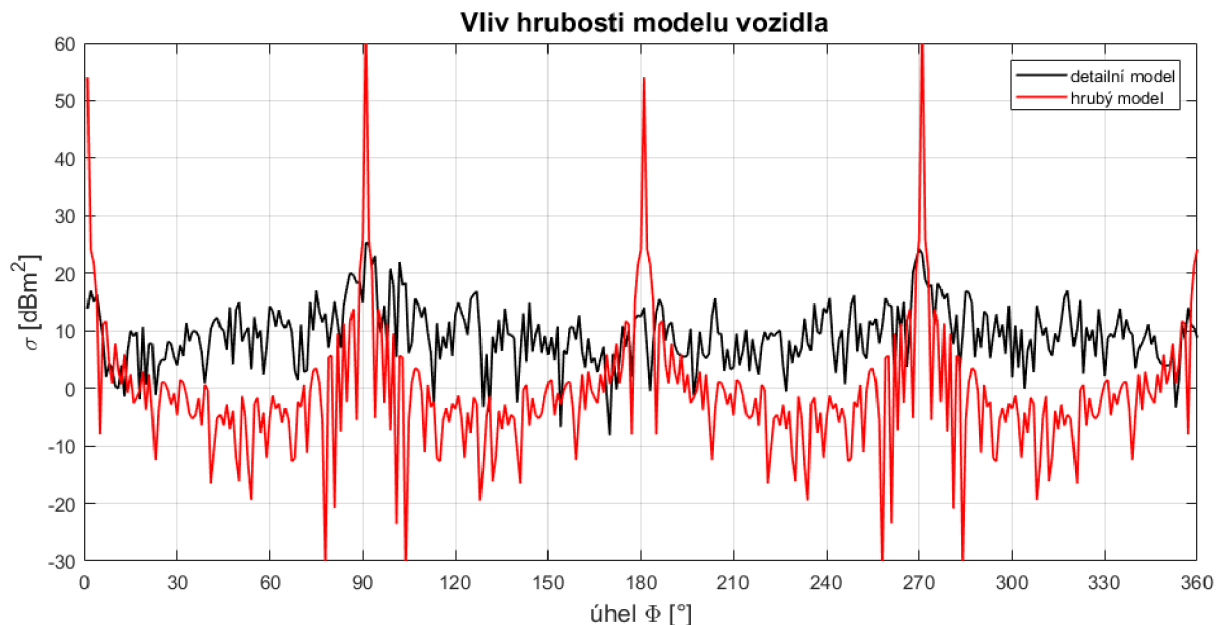


**Obr. 24 Vliv tvaru modelu vozidla na odraznou plochu**

Dalším hrubým modelem bylo vytvoření hrubého modelu vozidla, přičemž tento byl vytvořen ze základních geometrických tvarů (Obr. 25). U tohoto typu modelu se uplatní především velikost celkové ozářené plochy při daném úhlu natočení. Neuplatní se zde detaily karoserie, jako u detailnějšího modelu, které mohou výrazně přispívat k odrazu signálu s malou vlnovou délkou. Porovnání tohoto hrubého modelu s modelem detailním zobrazuje graf níže (Obr. 26). Na něm lze především vidět rozdíly mezi rovnými plochami hrubého modelu a zakřivenými částmi karoserie na modelu detailnějším. Od rovných ploch se signál odráží zpět, tedy bez odrazů do jiných směrů, a to má za následek značnou velikost rozdílu hodnot maxim mezi oběma průběhy.



**Obr. 25 Zjednodušený model vozidla**

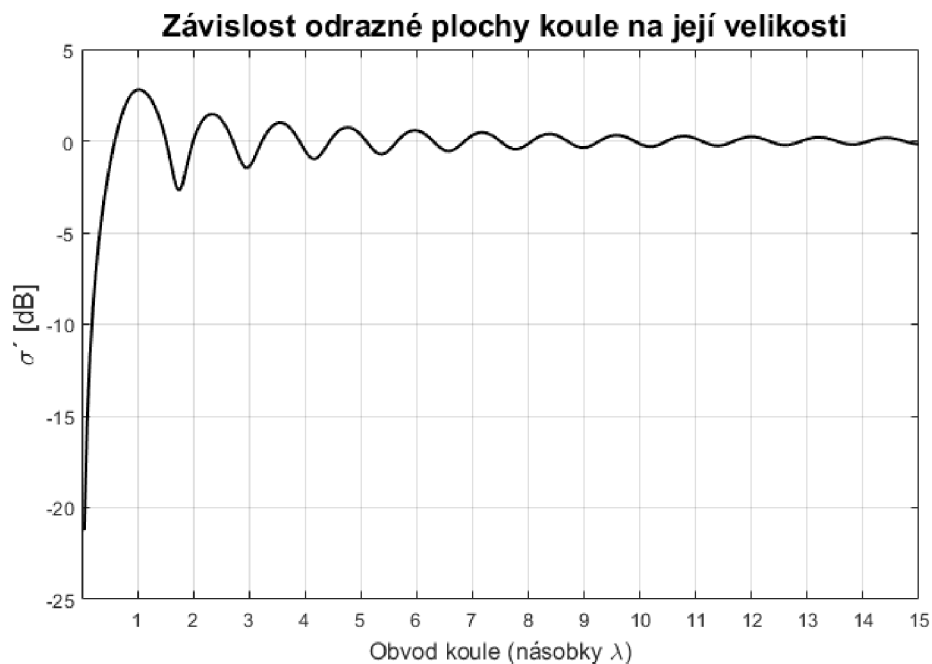


**Obr. 26 Vliv hrubosti modelu vozidla na odraznou plochu**

### 3.2. Vliv velikosti modelu automobilu na odraznou plochu

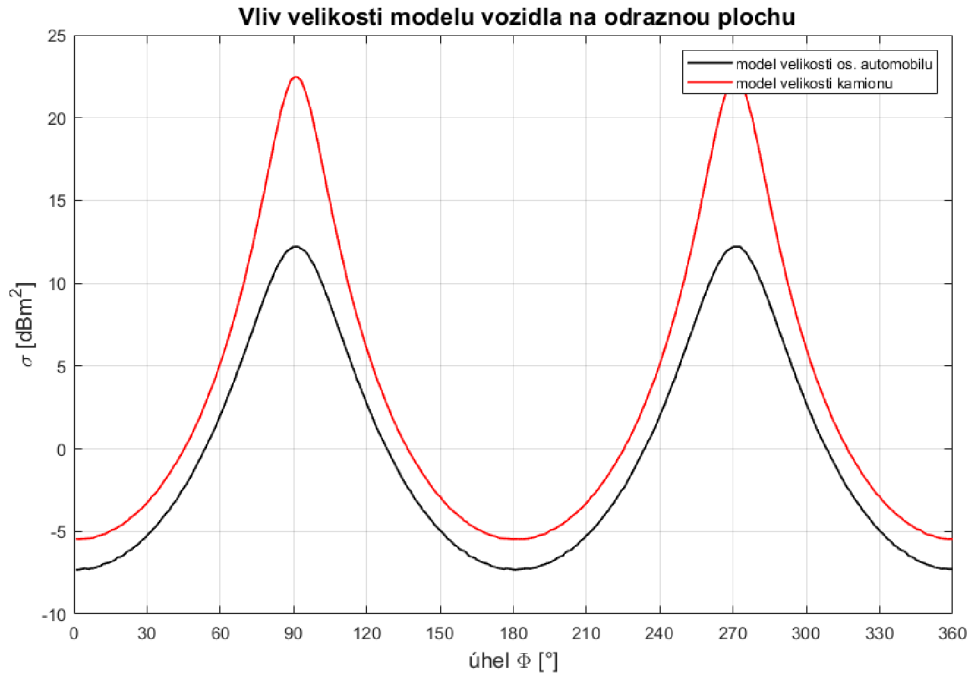
Elektrická velikost simulovaného objektu má zásadní vliv na náročnost dané simulace. Elektrickou velikostí objektu se rozumí poměr skutečných rozměrů simulovaného tělesa vůči velikosti vlnové délky ozařované vlny. V případě vozidla jakožto zkoumaného objektu má toto vozidlo na frekvenci 1 GHz elektrickou velikost menší než na frekvenci 10 GHz. Vliv velikosti tělesa vůči vlnové délce lze pozorovat na níže uvedeném grafu (Obr. 27). V tomto grafu je znázorněna hodnota odrazné plochy koule. Jelikož se jedná o perfektně symetrickým objekt, odrazná plocha je konstantní pro libovolný směr natočení. Průběh grafu zobrazuje velikost odrazné plochy koule s ohledem na její rozměry vůči vlnové délce dopadající vlny. Veličiny v tomto grafu jsou normovány k vlnové délce ozařovaného signálu. Osa x grafu je v násobcích vlnové délky  $\lambda$ , osa y je uvedena

v jednotkách  $\text{dBm}^2/\lambda$ . Ze simulace vyplývá, že se zvyšující se frekvencí se hodnota odrazné plochy ustaluje na konstantní hodnotě.



**Obr. 27 Závislost odrazné plochy koule na její velikosti**

Následně byl zkoumán vliv velikosti modelu na hodnotu odrazné plochy. Pro tento účel byl opět použit model elipsoidu. Velikost tohoto nového modelu odpovídá rozměrům kamionu. Délka modelu je 15 m a průměr 3 m. Průběhy výsledků simulací odrazné plochy se shodují, neboť se jedná o totožný model. Rozdíly lze tedy hledat pouze ve velikosti maxim, které činí  $12,2 \text{ dBm}^2$  pro model odpovídající velikosti osobního automobilu a  $22,5 \text{ dBm}^2$  pro model velikosti kamionu. Obě tyto hodnoty jsou platné pro pracovní frekvenci 33 GHz.



**Obr. 28 Vliv velikosti modelu vozidla na odraznou plochu**

### 3.3. Shrnutí vlivu velikosti a tvaru vozidla na odraznou plochu

Při porovnání výsledků simulací na základě vlivu tvaru simulovaného vozidla, můžeme konstatovat následující:

Elipsoid se svým průběhem odrazné plochy podobá průběhu simulovaného modelu vozidla. Jelikož je elipsoid geometrický tvar s hladkou plochou, má i křivka simulace tohoto tvaru hladký průběh, zatímco průběh modelu vozidla kolísá s ohledem na složitost geometrie modelu. Ta obsahuje některé části, od kterých se signál odráží vícenásobným odrazem a ty se velkou měrou podílí na velikosti odrazné plochy (např. blatníky, kola, zadní část víka kufu).

Co se týče vlivu velikosti modelu vozidla, lze pozorovat přímou úměrnost, a sice, že se zvětšujícími se rozměry vozidla (modelu), roste také velikost odrazné plochy. To odpovídá teoretickým předpokladům. Svou roli zde také hraje fakt, že rozměry vozidla jsou řádově v jednotkách metrů a simulované záření odpovídající radaru na měření rychlosti využívá frekvence v jednotkách, či spíše desítkách gigahertzů, a tedy pracuje s vlnovými délkami řádově v centimetrech či milimetrech. Při takovém rozdílu hodnot se automobil považuje za elektricky velký objekt a při simulaci odrazné plochy se uplatňují zákony fyzikální a geometrické optiky.

## 4. Simulace odrazné plochy osobního automobilu

V rámci této práce byly dále ověřovány vlastnosti přístupů k počítačové simulaci odrazné plochy osobních automobilů na podrobném elektromagnetickém modelu odrazné plochy automobilu Škoda Octavia. Na základě předchozích provedených simulací a poznatků byl pro toto ověřování vybrán Asymptotic solver. Jeho parametry byly ověřeny porovnáním se známými modely, čímž byla ověřena vhodnost jeho využití a očekávána dostatečná přesnost získaných hodnot.

### 4.1. Nastavení parametrů Asymptotic solveru pro simulaci odrazné plochy

V následující části je popsáno podrobné nastavení programu CST Studio a Asymptotic solveru.

Jedním z hlavních nastavení parametrů pro simulaci je výběr módu, v jakém bude simulace probíhat. Tento rozlišujeme na monostatický a 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 dostupným módem je mód *Field sources*, který umožňuje vložení cizího zdroje záření. V tomto módu lze simulovat umístění antény s určitou směrovou charakteristikou a dalšími vlastnostmi antény. Je zde možnost zvolit směr ozařování umístěním zdroje záření a jeho orientací vůči ozařovanému předmětu. Z toho důvodu je možno nastavit pouze pozorovací úhel. Poslední možností, kterou lze zvolit, 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, 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. Na výběr jsou zde možnosti *SBR* (shooting and bouncing rays), která využívá samostatné paprsky, nebo *SBR Raytubes*, která vysílá paprsky ve svazcích. Použití samostatně vysílaných paprsků je vhodnější jakožto robustní metoda pro geometricky složitá tělesa, metoda s paprsky ve svazcích zase 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. Při nastavování simulace je možnost nastavit minimální počet paprsků (*Minimum number of rays*). Tento parametr je vhodné využít zejména pro elektricky malé objekty, u nichž by mohla nastat situace, kdy z důvodu nastavení malé hustoty paprsků na vlnovou délku bude celkový počet paprsků nedostatečný a nebude tak zajištěna správnost simulace. Pro metodu *SBR* lze nastavit také maximální plochu paprskového svazku ve vlnových délkách<sup>2</sup> (*Max. area of ray tube in wavelengths<sup>2</sup>*), tento však zejména není třeba nikterak upravovat, lze ponechat jeho původní hodnotu.

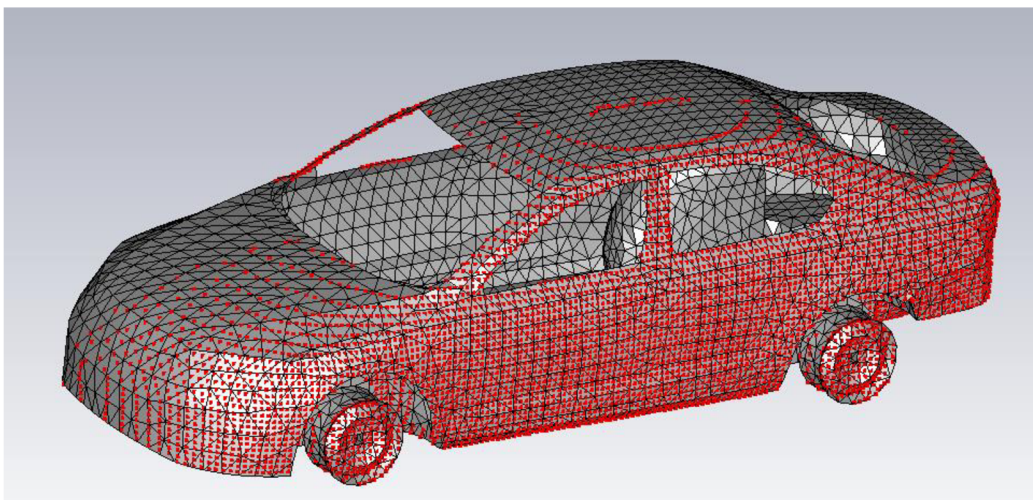
Pro metodu *SBR Raytubes* lze nastavit vzdálenost paprsků (*Ray spacing in wavelengths*), která určuje vzdálenost mezi paprsky při ozařování, parametr je určen v jednotkách vlnové délky. Obecně platí, že čím menší je vzdálenost mezi jednotlivými paprsky, tím větší je přesnost výpočtu. Minimální počet 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*) je možností, pomocí níž lze specifikovat, zda se hustota paprsků automaticky zvýší v důležitých oblastech, a to rozdělením paprskových svazků na více částí. Tuto možnost je doporučeno použít, 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*), která 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*) naopak umožňuje určit nejmenší délku hrany paprskového svazku při adaptivním vzorkování. Tento parametr zabraňuje přílišnému zjemňování na malých hranách, které by velice zvyšovaly výpočetní náročnost s minimálním přínosem na přesnost výpočtu.

Mezi další možnosti nastavení patří zahrnutí difrakce na hranách (*Include metallic edge diffraction*), čímž se nastaví, 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.

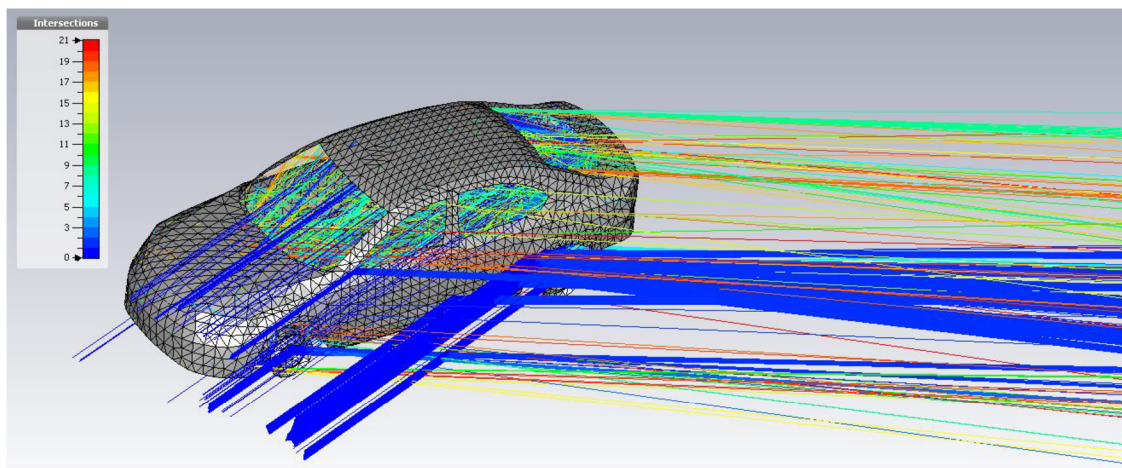
V záložce *Mesh* je ve výchozím nastavení zatrženo Použití zakřivených trojúhelníků (*Use curved triangles*), které určuje, že pro všechny zakřivené plochy budou použity zakřivené trojúhelníky v meshovací mřížce. Toto nastavení má pozitivní vliv na přesnost simulace za cenu mírně vyšších nároků na operační 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 (Obr. 29) a také odražené paprsky (Obr. 30).



**Obr. 29** Počáteční body dopadu paprsků



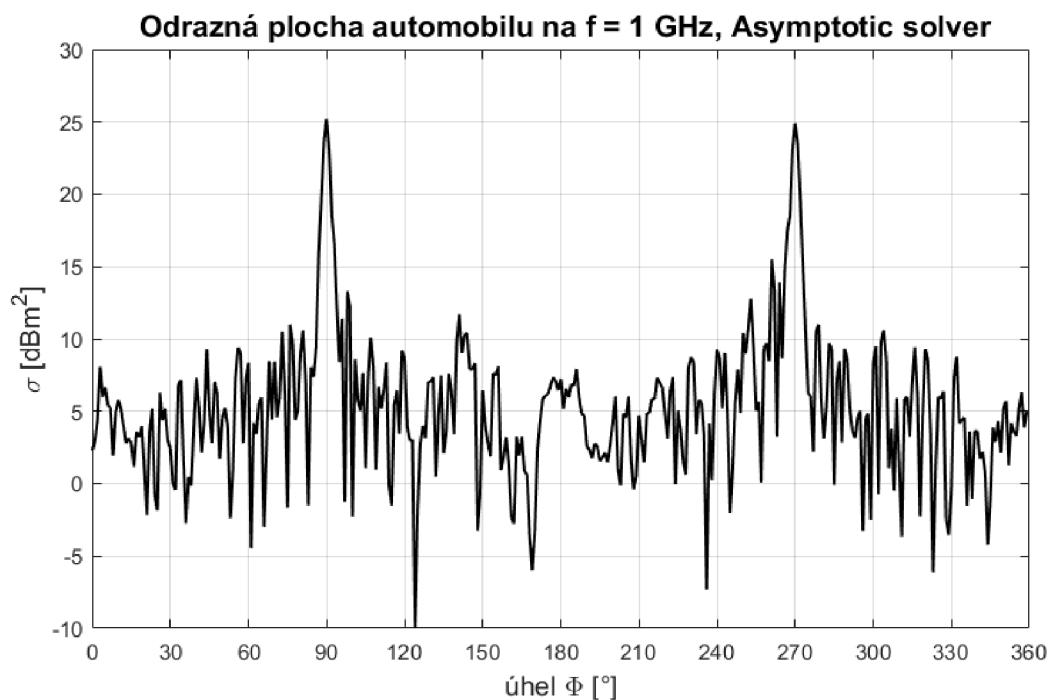


**Obr. 30 Vizualizace odražených paprsků**

#### 4.2. Simulace za použití Asymptotic solveru

Asymptotic solver byl pro zadaný typ simulace zvolen jako nejvhodnější, a to s ohledem na jeho parametry podrobněji popsané v předchozích kapitolách. Zejména pak lze vyzdvihnout jeho nízkou výpočetní a časovou náročnost a vhodnost užití pro simulace na pracovních kmitočtech radaru pro měření rychlosti, které činí 24,125 GHz a 33 GHz.

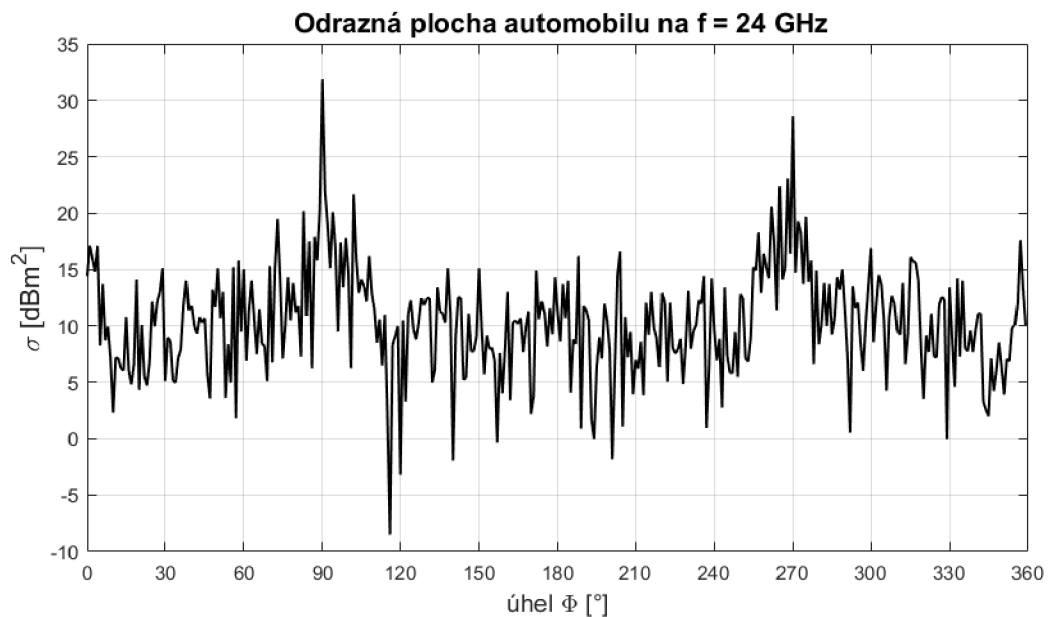
Na úvod byla provedena simulace na frekvenci 1 GHz, ta byla použita jako výchozí pro porovnání s dalšími simulacemi. Výsledek této simulace lze pozorovat na Obr. 31. Je zde znázorněna odrazná plocha pro různé natočení vozidla vzhledem k dopadající rovinné vlně. V grafu lze spatřit dvě maxima, tato odpovídají bočním pohledům na vozidlo. Hodnota těchto maxim činí 25 dBm<sup>2</sup>.



**Obr. 31 Odrazná plocha pro f = 1 GHz, Asymptotic solver**

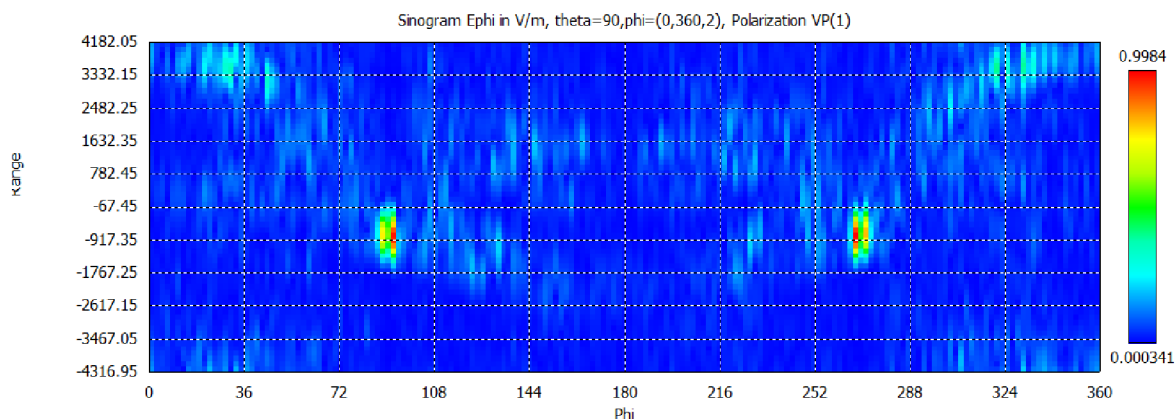
Stacionární radar pro měření rychlosti pracuje na různých kmitočtech, konkrétně pak na kmitočtech 24,125 GHz a 33 GHz. Na následujícím grafu (Obr. 32) je zobrazen parametr odrazné plochy na vybraném kmitočtu 24,125 GHz, odpovídající pracovní frekvenci radaru na měření rychlosti. Při porovnání s hodnotami simulace na  $f = 1$  GHz lze pozorovat vyšší hodnotu maxima, odpovídající hodnotě  $30 \text{ dBm}^2$ . Nesouměrnost obou maxim je pravděpodobně způsobeno náhodným generováním paprsků v asymptotickém solveru, vliv může mít také nesymetrická meshovací síť modelu vozidla pro dvě opačné strany vozidla.

Vzhledem ke složitosti tvaru simulovaného vozidla má odrazná plocha pro různé typy natočení kolísavý charakter. S ohledem na vyšší kmitočet je také nižší vlnová délka, ta má vliv na vyšší hodnoty maxima při úhlu natočení zkoumaného objektu o  $90^\circ$  a  $180^\circ$ . Rozdíl hodnot maxima oproti simulaci na 1 GHz tak činí přibližně 5 dB.



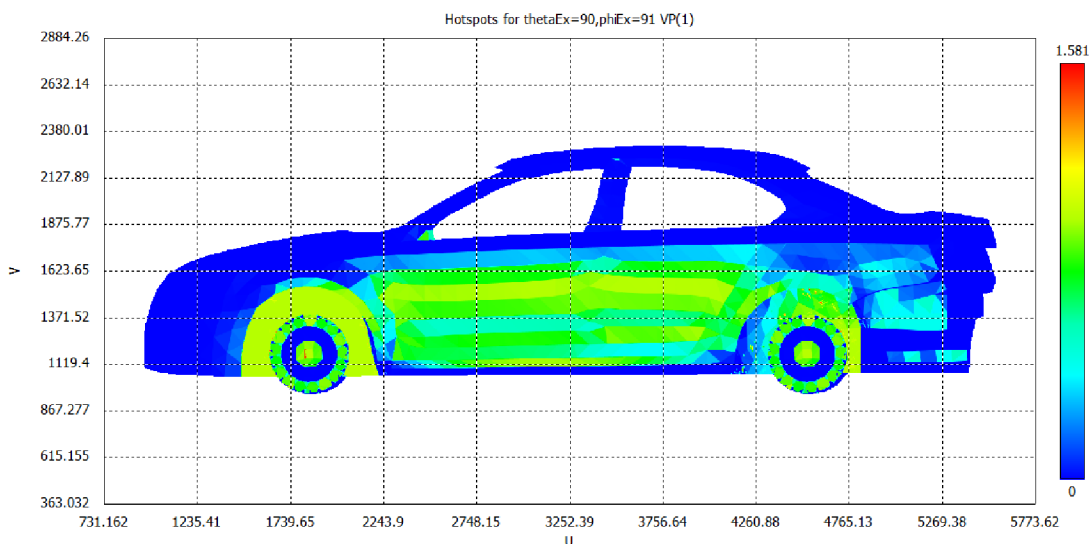
**Obr. 32 Odrážná plocha pro  $f = 24$  GHz, Asymptotic solver**

Asymptotic solver nabízí jako jednu z možností zobrazení sinogramu. Tento graf zobrazuje rozložení elektrického pole v závislosti na vzdálenosti od středu modelu. Sinogram vykresluje rozložení elektrického pole při natočení vozidla o  $360^\circ$  (Obr. 33). Hodnoty v sinogramu jsou normovány k maximální vypočítané hodnotě.



**Obr. 33 Rozložení elektrického pole v závislosti na úhlu natočení vozidla**

Hodnoty rozložení elektrického pole na povrchu vozidla lze také graficky vizualizovat. Z výsledného grafu je pak možno vyhodnotit, která místa nejvíce přispívají k odrazu signálu. Tato místa se nazývají hotspots (Obr. 34).

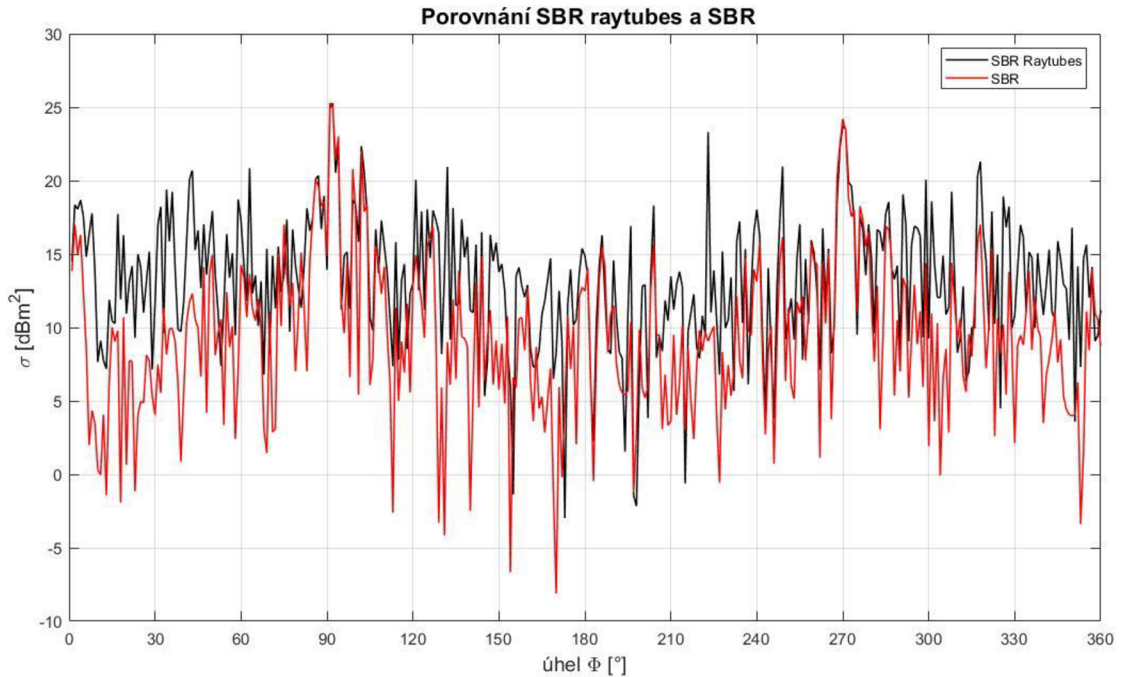


**Obr. 34 Zobrazení hotspotů na modelu vozidla**

### Porovnání nastavení parametrů CST na výsledky simulace

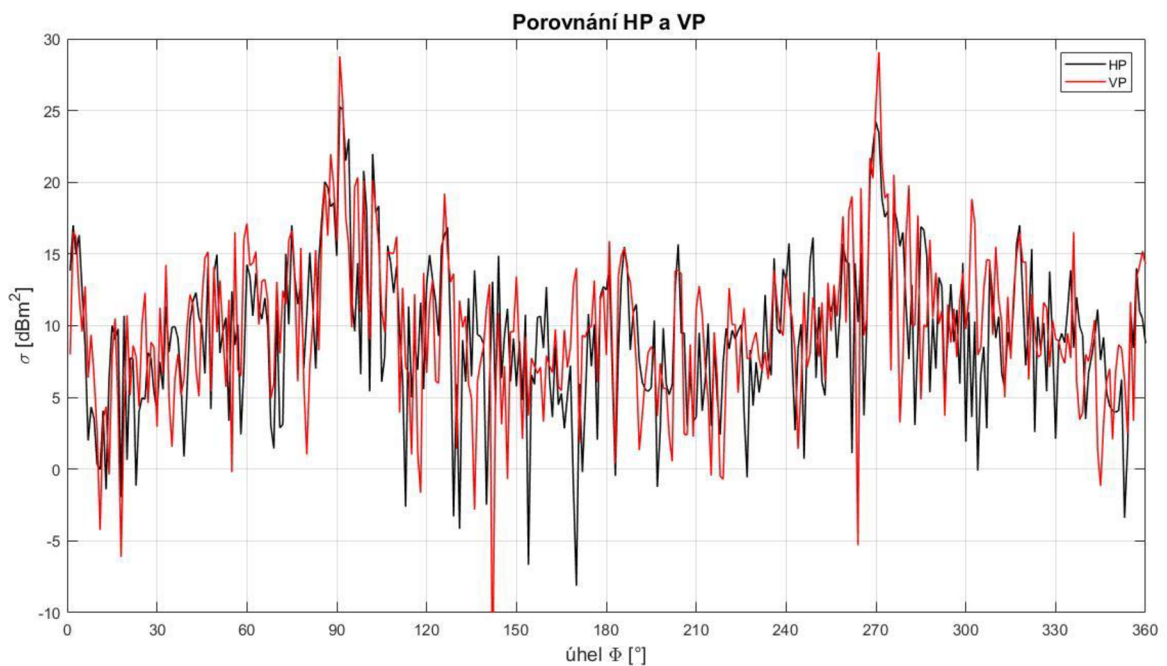
V následující části bude probrán vliv nastavení parametrů solveru na výsledky simulace. Níže uvedené simulace byly provedeny na frekvenci 33 GHz a v monostatickém režimu se změnou úhlu po  $1^\circ$ , pokud není uvedeno jinak. Hodnota 33 GHz odpovídá další pracovní frekvenci stacionárního radaru.

Nejdříve byl porovnán vliv typu paprskové metody na výsledek simulace. Konkrétně se jednalo o srovnání metody využívající paprsky ve svazcích (SBR Raytubes) a metody využívající volné paprsky nezávislé na sobě (SBR). Z výsledného grafu (Obr. 35) je patrné, že obě metody mají shodné maximum pro úhly  $90^\circ$ , resp.  $270^\circ$ , tedy pro pohledy z boku vozidla. Liší se ovšem v okolí  $30^\circ$  a  $150^\circ$  a to o 5 až 10 dB. Výsledek simulace s metodou SBR má větší rozdíly mezi hodnotami v maximech a hodnotami odpovídající ostatním úhlům oproti metodě SBR raytubes. Metoda SBR se tedy blíží více simulacím s použitím zjednodušeného modelu.



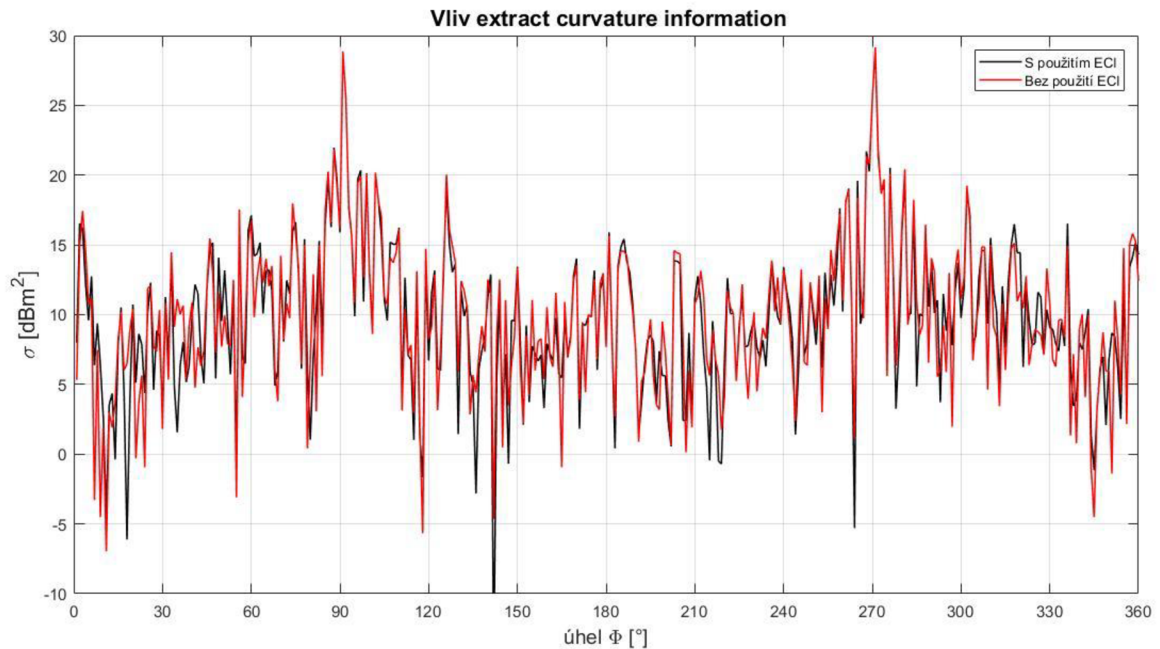
**Obr. 35 Porovnání paprskových metod SBR Raytubes a SBR**

Dále byl zkoumán vliv polarizace dopadající vlny na velikost odrazné plochy. Pro obě simulace bylo nastavení shodné, a to typ solveru SBR a použití Extract curvature information pro generaci meshovací sítě. V grafu níže (Obr. 36) jsou znázorněny rozdíly při změně polarizace rovinné vlny. Maximum pro horizontální polarizaci je 25,3 dBm<sup>2</sup>, maximum pro vertikální polarizaci je 29,1 dBm<sup>2</sup>. Až na lokální odchylky mají oba výsledky simulace podobný průběh.



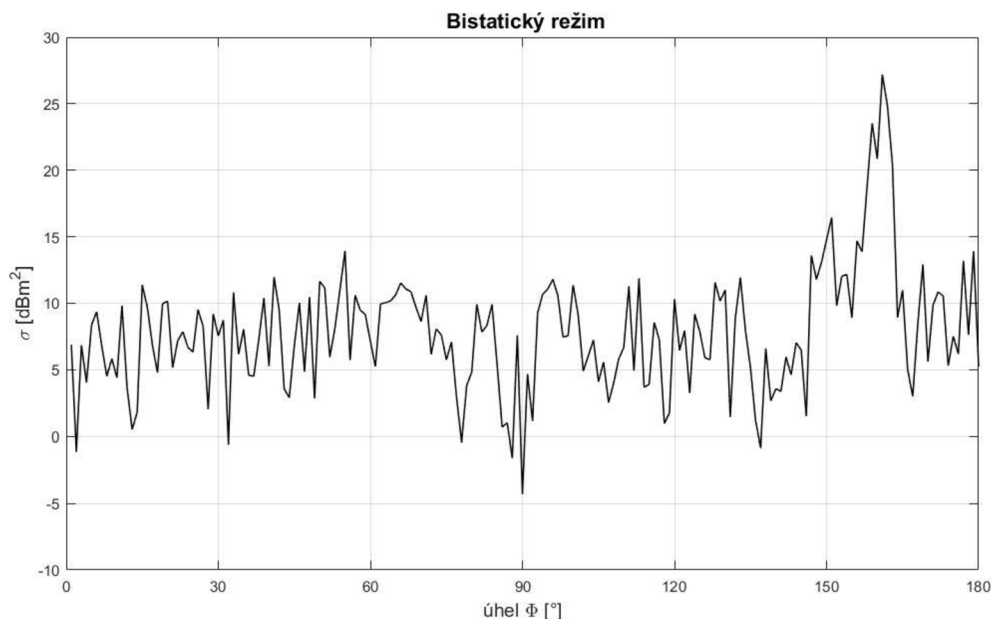
**Obr. 36 Porovnání horizontální a vertikální polarizace**

Při importu modelu ve formátu, který neobsahuje informace o zakřivení povrchu, je možné zvolit záložku pro odvození těchto informací o zakřivení (Extract curvature information, ECI). Vliv tohoto parametru lze pozorovat v grafu na Obr. 37. Rozdíly mezi oběma průběhy jsou jen nepatrné. Tento parametr je tedy vhodné použít při velmi členité struktuře objektu, nebo při potřebě dosáhnout maximální přesnosti simulace.



**Obr. 37 Vliv funkce Extract curvature information na přesnost simulace**

Druhým typem režimu, v němž může být simulace prováděna, je bistatický režim. Při tomto typu simulace zůstává úhel ozařování konstantní a mění se úhel pozorovací. Při simulaci byl zvolen úhel ozařování o velikosti 22°. Tento úhel odpovídá umístění stacionárního radaru vůči vozovce. Jak je patrné z grafu (Obr. 38), maximum se nachází v okolí úhlu 158°. Jelikož je možné boční stranu vozidla aproximovat rovnou plochou, uplatní se zde zákon odrazu. Maximum při úhlu 158° tedy odpovídá dopadajícímu úhlu 22°.

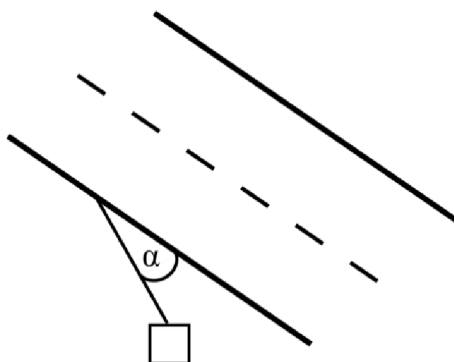


**Obr. 38 Průběh velikosti odrazné plochy pro bistatický režim**

### 4.3. Experiment

V rámci této práce bylo provedeno experimentální měření odrazné plochy automobilu. Experiment spočíval v průjezdu vozidla po vozovce, vedle níž byl umístěn stacionární radar na měření rychlosti. Ten byl umístěn pod úhlem  $22^\circ$  vůči vozovce (Obr. 39). Toto uspořádání odpovídá typickému využití tohoto radaru.

Prováděný experiment byl navržen společností zabývající se výrobou radaru na měření rychlosti. Experiment byl realizován v prostorech této společnosti, v uzavřeném areálu.



**Obr. 39 Umístění radaru vůči silnici**

Měřicí stanoviště bylo tvořeno testovacím radarem a osciloskopem. Osciloskop byl řízen optickou bránou. Co se týče radaru, byl při experimentu použit radar pro měření rychlosti pracující na frekvenci 33 GHz. Experiment spočíval v průjezdu vozidla měřicím polem radaru, přičemž záznam dat byl spouštěn pomocí optické brány, která tento spustila při průjezdu testovacího automobilu (Obr. 40).

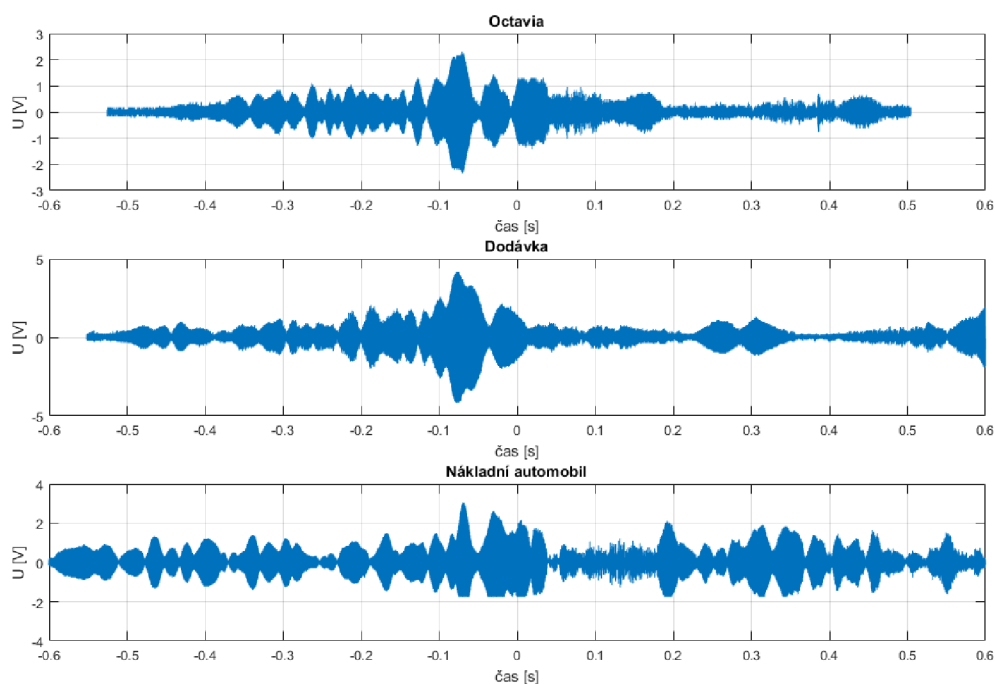


**Obr. 40 Fotografie měřicího stanoviště při provádění experimentu**

Naměřená data byla v průběhu experimentu průběžně ukládána na flash disk pro následné zpracování. Výsledkem experimentu jsou naměřené hodnoty časového průběhu odraženého signálu přijímaného radarem.

Experiment, jak byl navržen, neobsahoval měření referenčního objektu o známé velikosti odrazné plochy. Naměřené hodnoty tak nemohly být následně porovnány se známou hodnotou. Na grafu níže (Obr. 41) je zaznamenán časový průběh z průjezdů vozidel v pracovní oblasti radaru. Jednalo se o vozidla Škoda Octavia, dodávka typu Ford Transit a nákladní vozidlo neznámé značky s rozměry většími než dodávka. Na grafu je znázorněn časový průběh z radaru, který je umístěn pod úhlem  $22^\circ$  vůči vozovce. Vozidla se pohybovala směrem k radaru a při průjezdu optickou bránou došlo k vyslání řídicího impulsu, který spustil záznam dat a to 2,5 vteřiny před a po průjezdu vozidla.

### Časový průběh signálu z radaru při průjezdu vozidla



Obr. 41 Časový průběh signálu z radaru při průjezdu vozidla

#### 4.4. Výsledky a závěr experimentu

Výsledkem experimentu jsou časové průběhy průjezdu vozidel v pracovní oblasti radaru. Získaná data obsahují informaci o velikosti signálu odraženého od vozidla vzhledem k poloze vozidla v měřené oblasti. Data však neobsahují informaci o absolutní velikosti odraženého signálu. Z naměřených dat z toho důvodu nelze získat hodnotu odrazné plochy automobilu.

Aby bylo možno porovnat měření s daty získanými ze simulací, je třeba nejprve vhodně upravit naměřená data. K tomu by byly třeba údaje z měření referenčního objektu o známých vlastnostech, známé odrazné ploše. Takovýmto ideálním objektem je kovová koule pro svou všesměrovou charakteristiku. Následně by pro získání absolutní hodnoty odrazné plochy měřeného vozidla bylo třeba porovnat data známého objektu (koule) s naměřenými daty průjezdu vozidla.

Pro porovnání měření a simulace je třeba nejdříve zvolit vhodný program, například Matlab. Do tohoto programu se naměřená data nahrají a z těchto se vybere časový vzorek odpovídající průjezdu automobilu. Dále je data třeba upravit tak, aby naměřená data odpovídající napětí na osciloskopu odpovídala výkonu naměřenému radarem. To bez známých údajů o velikosti výstupního signálu radaru a útlumu kabelů (zisky antén, ztráty šířením, zisky předzesilovačů) není možno. Tyto neznámé však není třeba určovat, pokud jsou k dispozici data z měření referenčního objektu, neboť se velikost signálu následně normuje vůči známé teoretické hodnotě. S využitím těchto údajů tedy lze vypočítat absolutní hodnotu odrazné plochy automobilu.



## 5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prostudovat možné přístupy k počítačové simulaci odrazné plochy osobních automobilů a tyto vzájemně porovnat. Jednotlivé vlastnosti přístupů následně byly ověřeny na poskytnutém elektromagnetickém modelu odrazné plochy osobního automobilu Škoda Octavia.

Součástí diplomové práce byl také experiment pro ověření provedených simulací reálnými daty.

V úvodní kapitole byla problematika odrazné plochy osobních automobilů obecně rozebrána. Nejprve byla popsána odrazná plocha základních tvarů, dále pak způsoby měření odrazné plochy v bezodrazové komoře i na venkovních pracovištích. V této kapitole byly také rozebrány přístupy k počítačové simulaci odrazné plochy. Na základě této kapitoly byly následně vybrány programy pro další použití v této práci.

V další části práce byly vybrané numerické přístupy prostřednictvím simulací ověřeny. Nejprve byly simulovány jednoduché tvary. Správnost výpočtů byla ověřena srovnáním se známými hodnotami z dostupné literatury, a to na modelu NASA Almond a na modelu koule.

Jednotlivé numerické přístupy byly mezi sebou porovnány a z těchto byl z důvodu výpočetní a časové náročnosti vybrán jako nejvhodnější program CST Studio Suite a v něm obsažený Asymptotic solver.

Ve zvoleném programu byl následně porovnáván vliv tvaru a velikosti zkoumaného automobilu. Při zkoumání tvaru automobilu byl tento nahrazen tvarem elipsoidu. Výsledky simulací byly porovnány mezi sebou. Byla pozorována shoda mezi náhradním modelem elipsoidu a detailním modelem vozidla. Vliv na výsledek simulace měla také hrubost zvoleného modelu, kdy při kmitočtu 33 GHz mají i mírné detaily karoserie výrazný vliv na velikost odrazné plochy pro daný úhel natočení vozidla. V kapitole 4 byl rovněž porovnán vliv velikosti modelu na odraznou plochu, kdy bylo zjištěno, že při zachování stejné frekvence se zvětšujícím se modelem roste také velikost odrazné plochy.

Kapitola 5 se věnovala simulaci poskytnutého modelu vozu Škoda Octavia, a to na frekvencích 1 GHz, 24,125 GHz a 33 GHz. Součástí této kapitoly jsou mimo jiné grafy odrazné plochy vozidla při změně natočení vůči dopadající vlně o 360°. Z těchto bylo mimo jiné zjištěno, že největší hodnota odrazné plochy vozidla je při bočním pohledu na vozidlo, kdy toto maximum činí přibližně 25 dBm<sup>2</sup>.

V rámci této diplomové práce byl proveden také experiment, který měl za úkol ověřit simulovaná data, výsledky. Tento spočíval v průjezdu vozidla kolem stacionárního radaru, z něhož byly naměřeny údaje o odrazných vlastnostech projíždějícího vozidla. Vzhledem k tomu, že do experimentu nebylo zahrnuto měření referenčního objektu, nemohla být z naměřených hodnot získána hodnota odrazné plochy.

V práci jsou uvedeny výsledky simulací odrazné plochy osobního automobilu a jeho zjednodušených tvarů. Z průběhu dosažených simulací lze vypočítat značnou kolísavost odrazné plochy pro úhly natočení neodpovídající kolmému pohledu na osobní vozidlo, a to především na frekvencích řádově v desítkách gigahertzů. Bylo zjištěno, že k velikosti odrazné plochy přispívají rovněž drobné detaily karoserie vozidla, především detaily mající ostrý úhel. Při použití aproximace tvaru vozidla je dle zjištěného možno dosáhnout podobného průběhu odrazné plochy, ovšem bez vlivu detailů vyplývajících z konkrétního tvaru automobilu.

V rámci další práce by bylo třeba zopakovat měření i za použití referenčního objektu. Jako vhodný referenční objekt se pro svou všesměrovou charakteristiku jeví kovová

koule. Následně by tak bylo možno porovnat známé hodnoty odrazné plochy referenčního objektu s naměřenými hodnotami vozidla a získat tak přesnou hodnotu odrazné plochy vozidla.

## 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.
- [10] Echomax Trihedral Corner Reflector [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.datrex.com/product/echomax-trihedral-corner-reflector/>
- [11] KAMEL, E. Bel, PEDEN, A., PAJUSCO, P.; RCS modeling and measurements for automotive radar applications in the W band," *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, 2017, pp. 2445-2449
- [12] LONNQVIST, A., MALLAT, J., RAISANEN, A., V.; "Phase-hologram-based compact RCS test range at 310 GHz for scale models," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 6, pp. 2391-2397, June 2006
- [13] POfacets 4.3 [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50602-pofacets4-3>

- [14] SIMPSON, ROBERT & LIU, ZHAOWEI & Vazquez, RÁFAEL & EVANS, J. (2017). An isogeometric boundary element method for electromagnetic scattering with compatible B-spline discretizations. *Journal of Computational Physics*.
- [15] SINGH, S., CHAKRABORTY, A., MITRA, A., GHOSH, S., RAHA, S., SURANA, V. (2014). Outdoor RCS Measurement Techniques Revisited: A Precise Method for Unknown Target RCS Calibration and Pulsed Radar Implementation for Efficient Clutter Rejection at Shyamnagar (22.84° N, 88.39° E), India.