

Radar Cross Section (RCS)

Václav Kabourek



Úvod

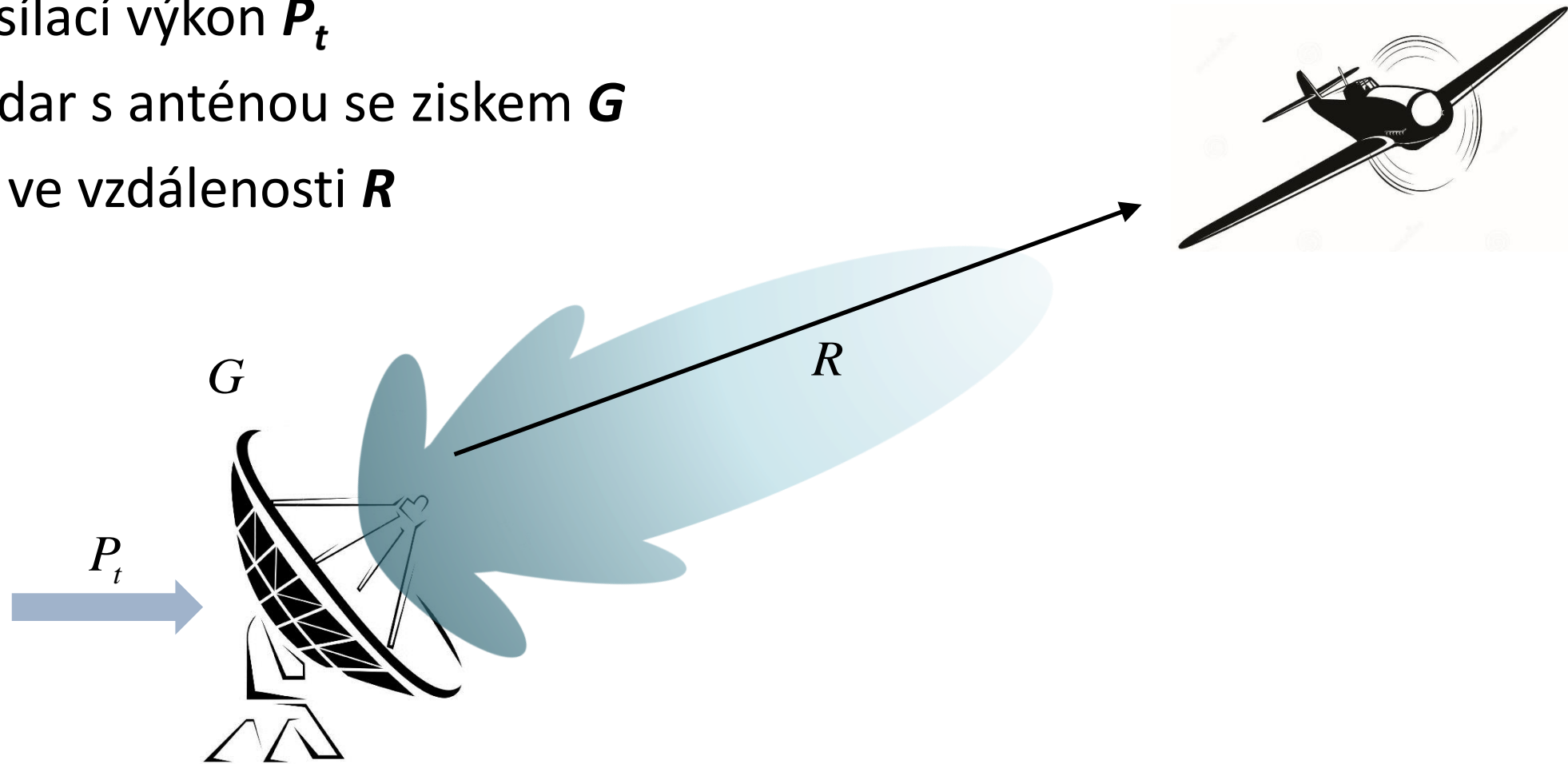
- Historie
- Radarová rovnice, definice efektivní odrazné plochy (RCS)
- Geometrická vs. efektivní radarová odrazná plocha
- Faktory ovlivňující RCS
- Rozptylové mechanismy
- RCS základních objektů
- Určování RCS - měření, predikce pomocí simulace

Historie

- Rozptylové vlastnosti elektromagnetického pole různých objektů – důležité po vynalezení radaru v po r. 1940
- 1900 – N. Tesla navrhl, že pomocí odrazu elmag. vln by bylo možné detekovat metalické objekty
- 1908 – G. Mie publikoval výpočet rozptylu světla na malých kulových částicích pomocí teorie elektromag. pole
- 1922 – Náhodná detekce prvního “cíle” – A. H. Taylor a L. C. Young (Naval Research Lab. – USA) – interference CW spoje dřevěnou lodí
- 1950' – členové britské Britain's Royal Aircraft Establishment experimentují s tzv. “radar echoing area”

Radarová rovnice – odvození RCS

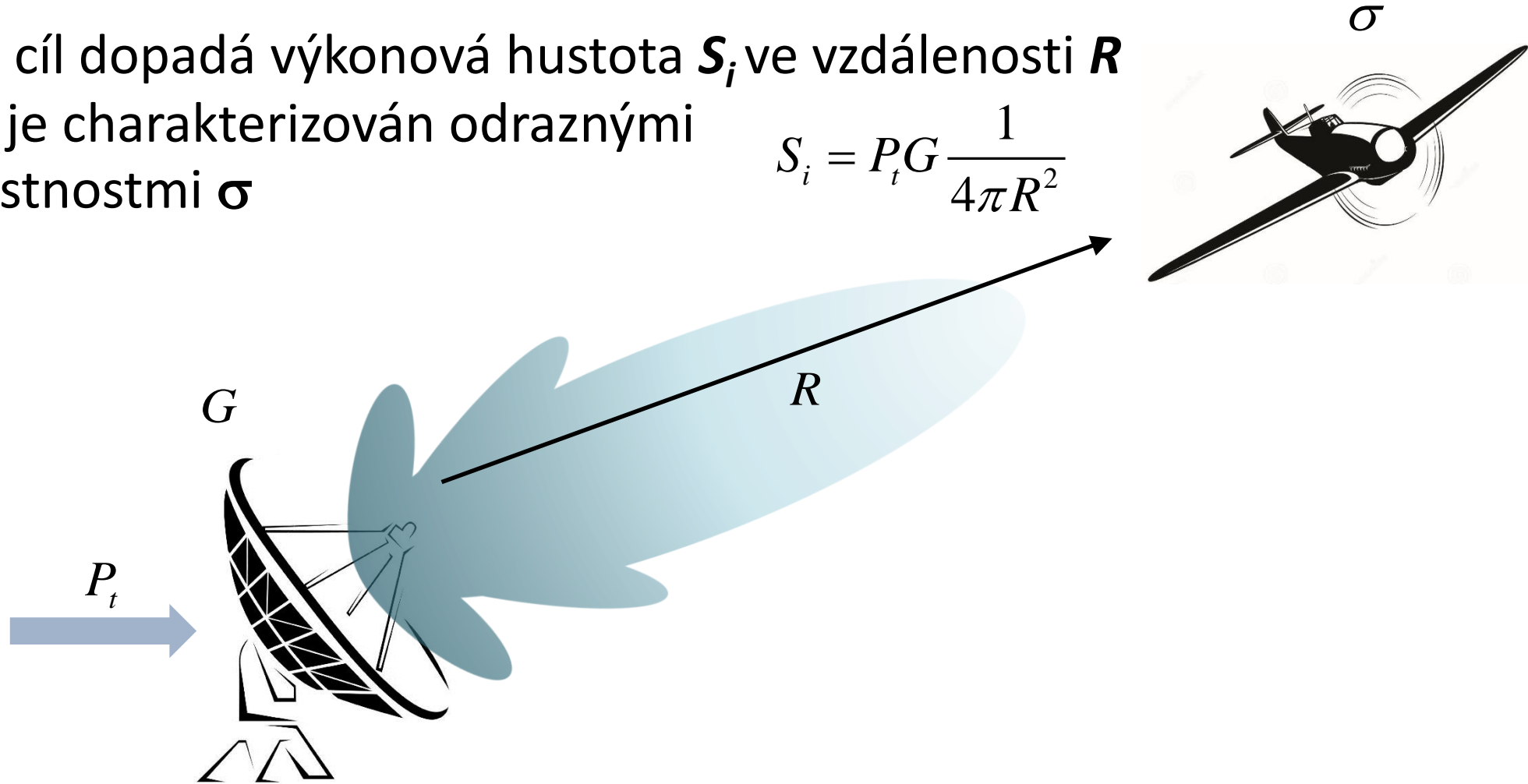
- Vysílací výkon P_t
- Radar s anténou se ziskem G
- Cíl ve vzdálenosti R



Radarová rovnice – odvození RCS

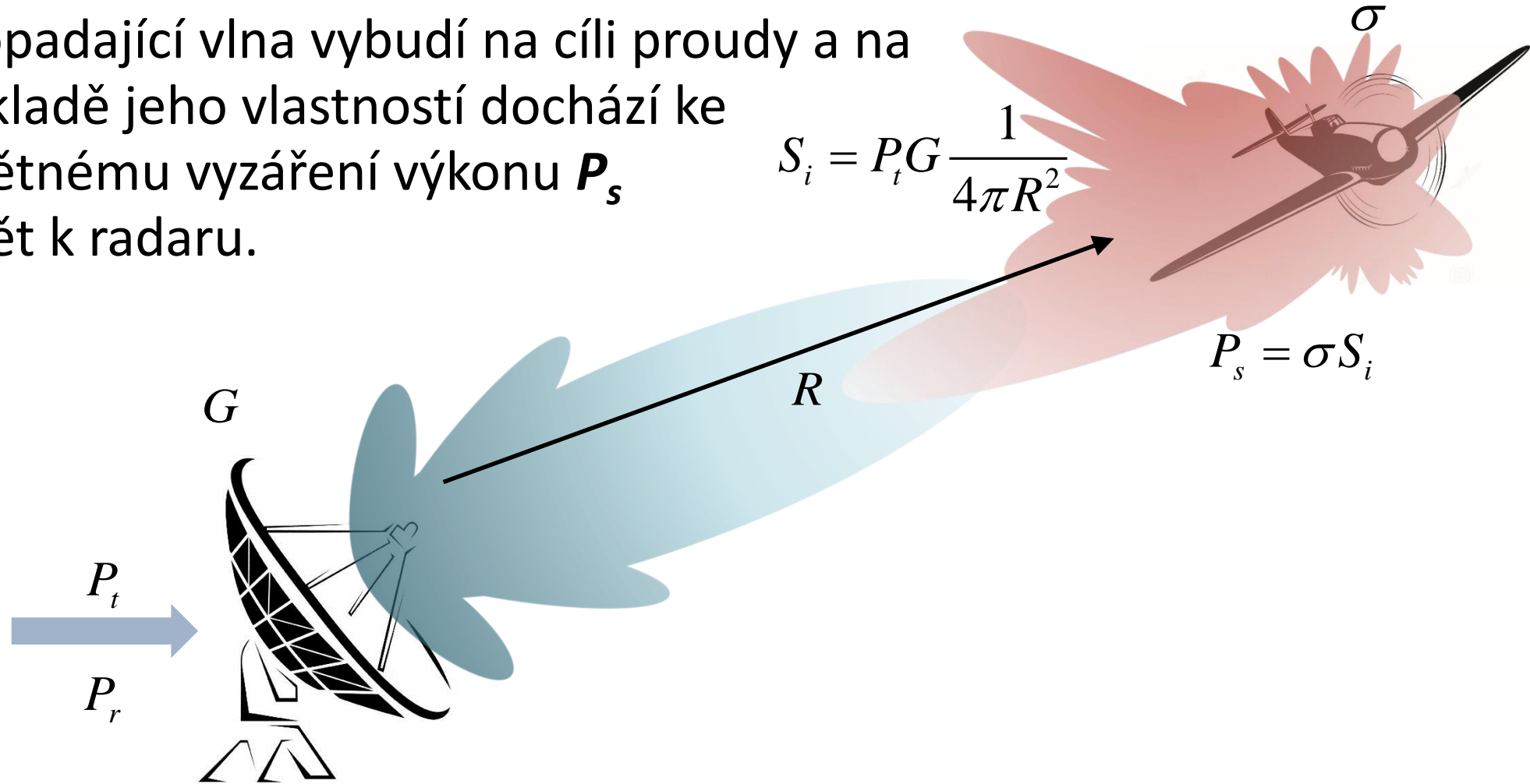
- Na cíl dopadá výkonová hustota S_i ve vzdálenosti R
- Cíl je charakterizován odraznými vlastnostmi σ

$$S_i = P_t G \frac{1}{4\pi R^2}$$



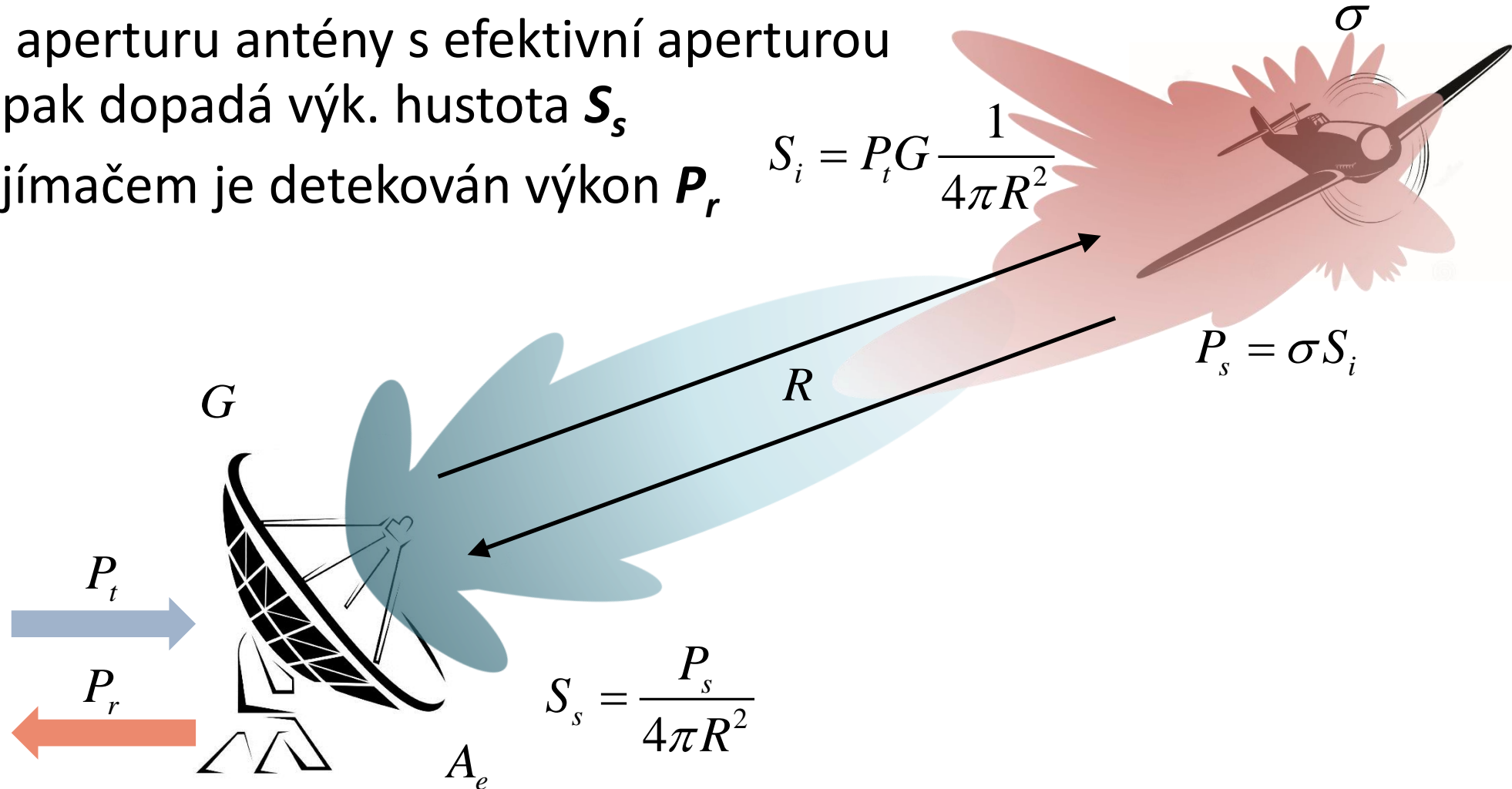
Radarová rovnice – odvození RCS

- Dopadající vlna vybudí na cíli proudy a na základě jeho vlastností dochází ke zpětnému vyzáření výkonu P_s zpět k radaru.



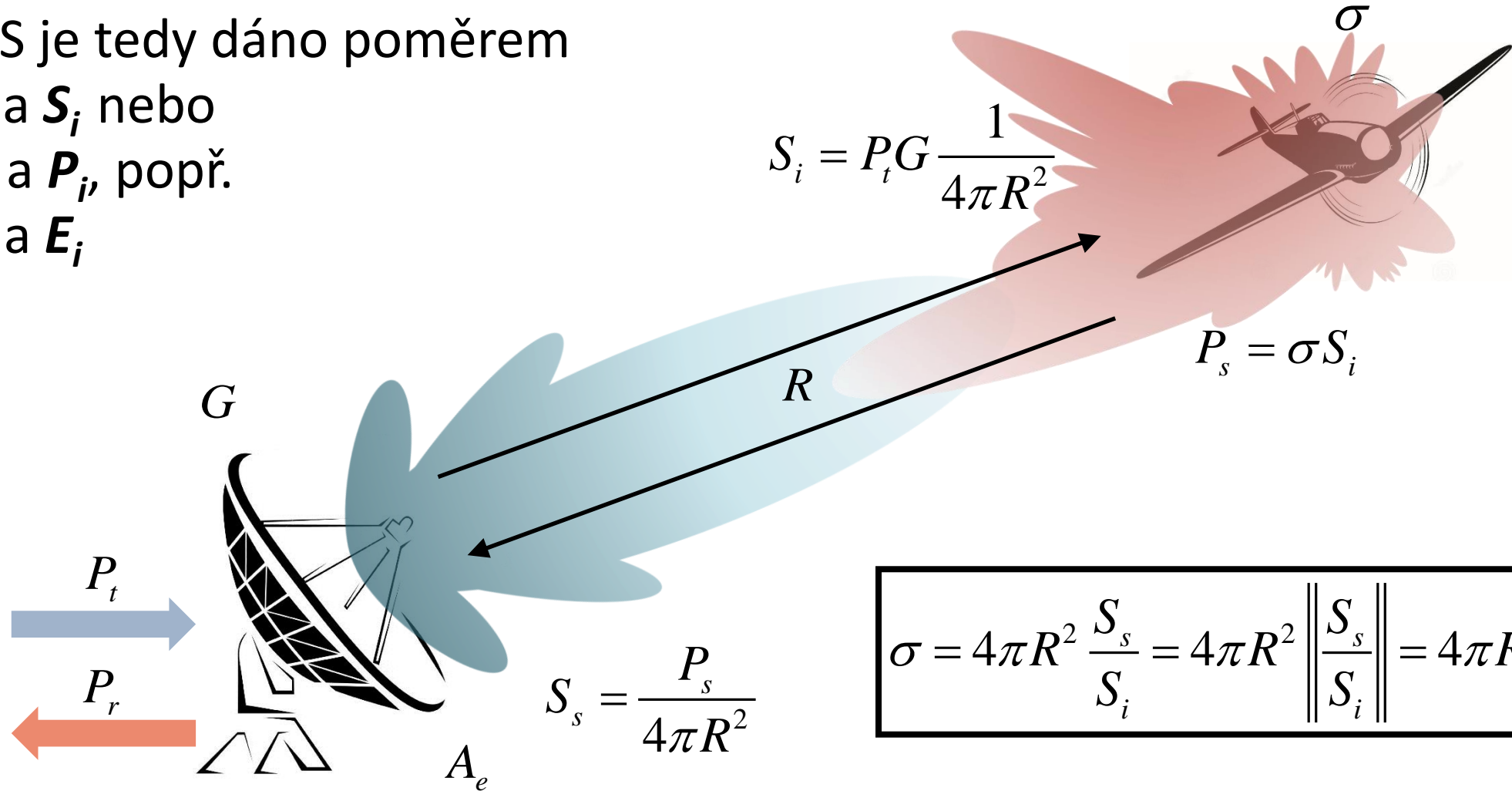
Radarová rovnice – odvození RCS

- Na aperturu antény s efektivní aperturou A_e pak dopadá výk. hustota S_s
- Přijímačem je detekován výkon P_r



Radarová rovnice – odvození RCS

- RCS je tedy dáno poměrem
 S_s a S_i nebo
 P_s a P_i , popř.
 E_s a E_i



Co ovlivňuje RCS objektu?

- RCS objektu **není** funkcí vlastností přenosového řetězce **od radaru k cíli a zpět**

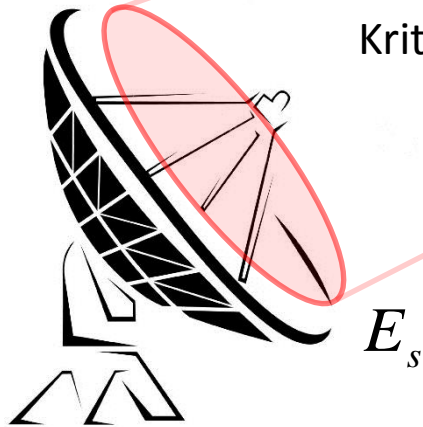
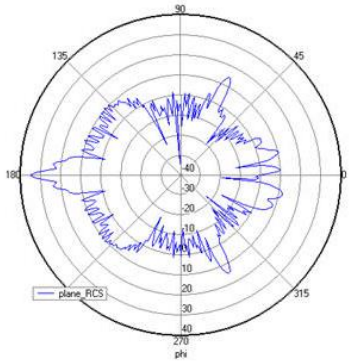
$$P_t \cdot G \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot A_e = P_r$$

- Velikost RCS **je** dána **vlastnostmi cíle** – materiálovými a tvarovými a mění se s frekvencí (λ vs. velikost cíle).
- RCS cíle se tedy liší v závislosti na jeho natočení (azimut, elevace) směrem k anténě radaru a je možné ho tedy napsat jako

$$\sigma_{scat}(f, \vartheta, \varphi)$$

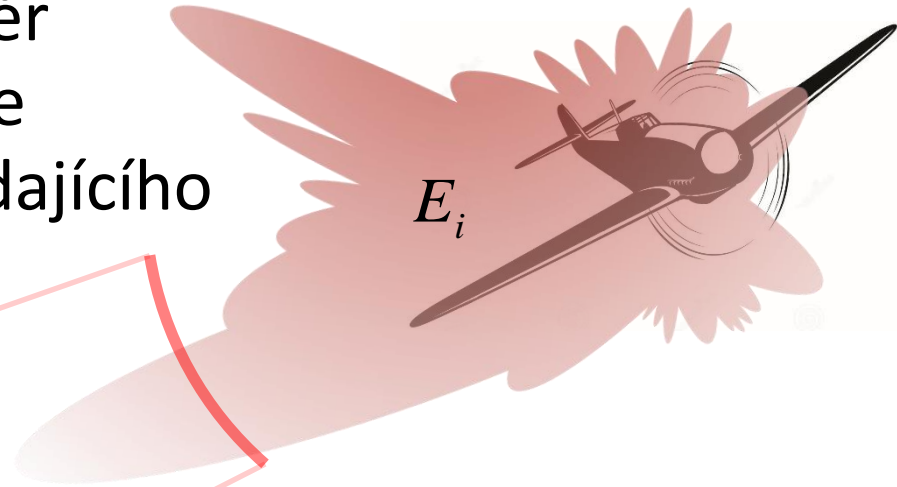
Efektivní odrazná plocha - definice

- RCS je formálně definováno jako poměr intenzity el. pole E_s odraženého od cíle na aperture antény a el. pole E_i dopadajícího na cíl.
- Jednotky: m², dBm², dBsm



$$R > \frac{2D^2}{\lambda}$$

Kritérium rovinné vlny *

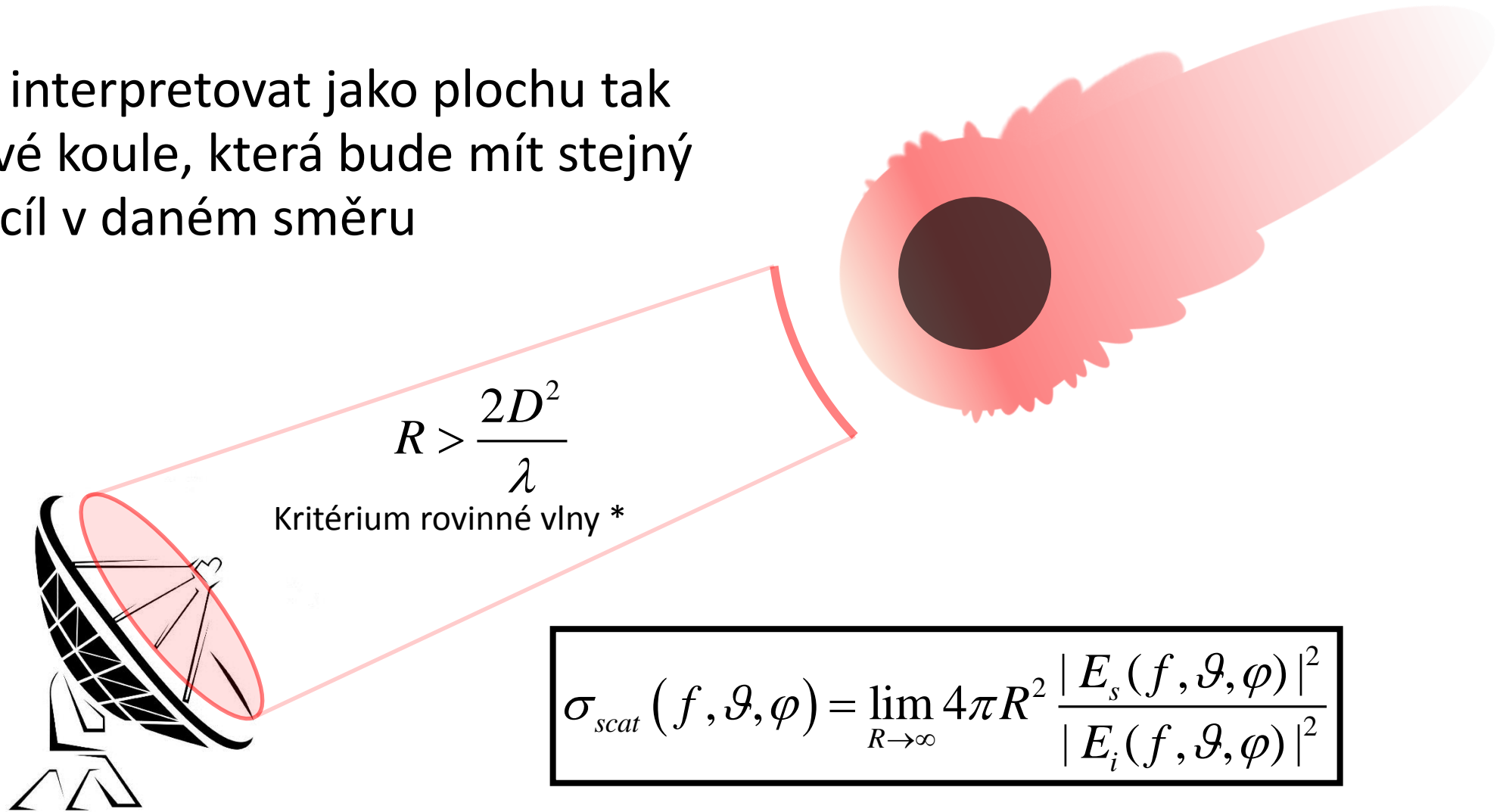


$$\sigma_{scat}(f, \vartheta, \varphi) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s(f, \vartheta, \varphi)|^2}{|E_i(f, \vartheta, \varphi)|^2}$$

*D = největší rozměr cíle! (pokud není větší než rozměr aperture radarové antény, řady)

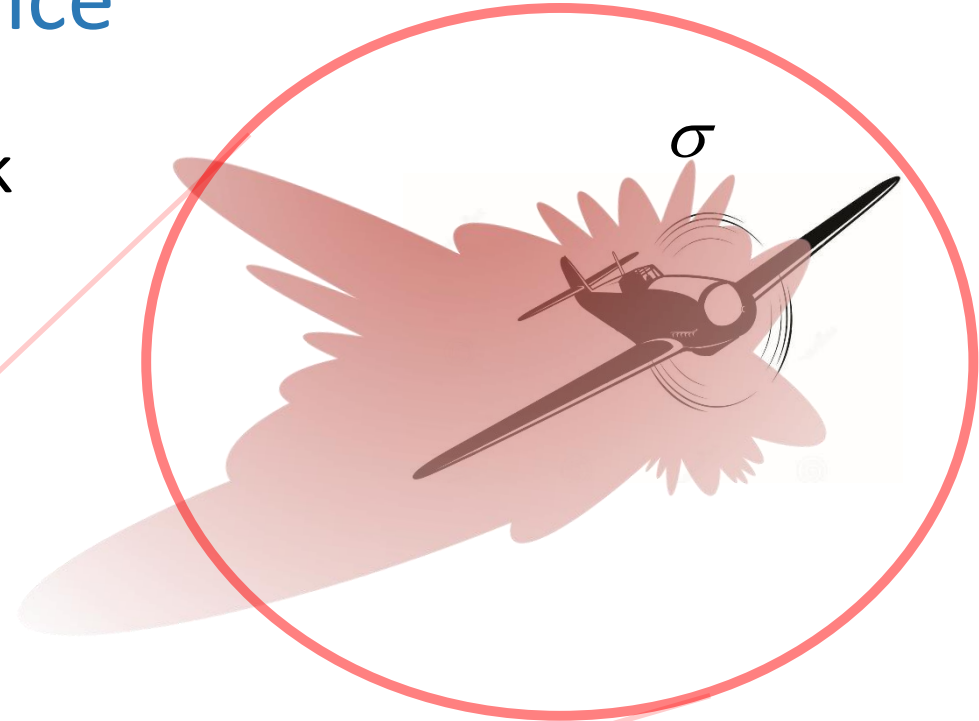
Efektivní odrazná plocha - definice

- RCS lze též interpretovat jako plochu tak velké kovové koule, která bude mít stejný odraz jako cíl v daném směru



Efektivní odrazná plocha - definice

- Totální efektivní odrazná plocha je pak dána jako integrál dílčích RCS přes celkovou plochu cíle.



E_s

$$\sigma_{tot}(f, \vartheta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \sigma(f, \vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi$$

Geometrická vs. efektivní radarová odrazná plocha

GCS

RCS

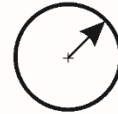
GCS

RCS

$R = 0.56 \text{ m}$



$R = 0.56 \text{ m}$

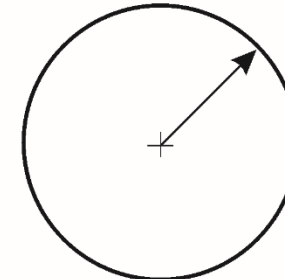


$\sigma = 1 \text{ m}^2$



25 m^2

$R = 11.3 \text{ m}$

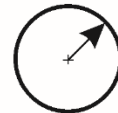


$\sigma = 400 \text{ m}^2$

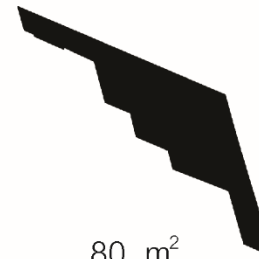
$a = 0.1 \text{ m}$



$R = 0.56 \text{ m}$

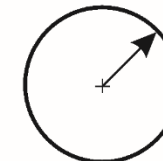


$\sigma = 1 \text{ m}^2$



80 m^2

$R = 1.7 \text{ m}$



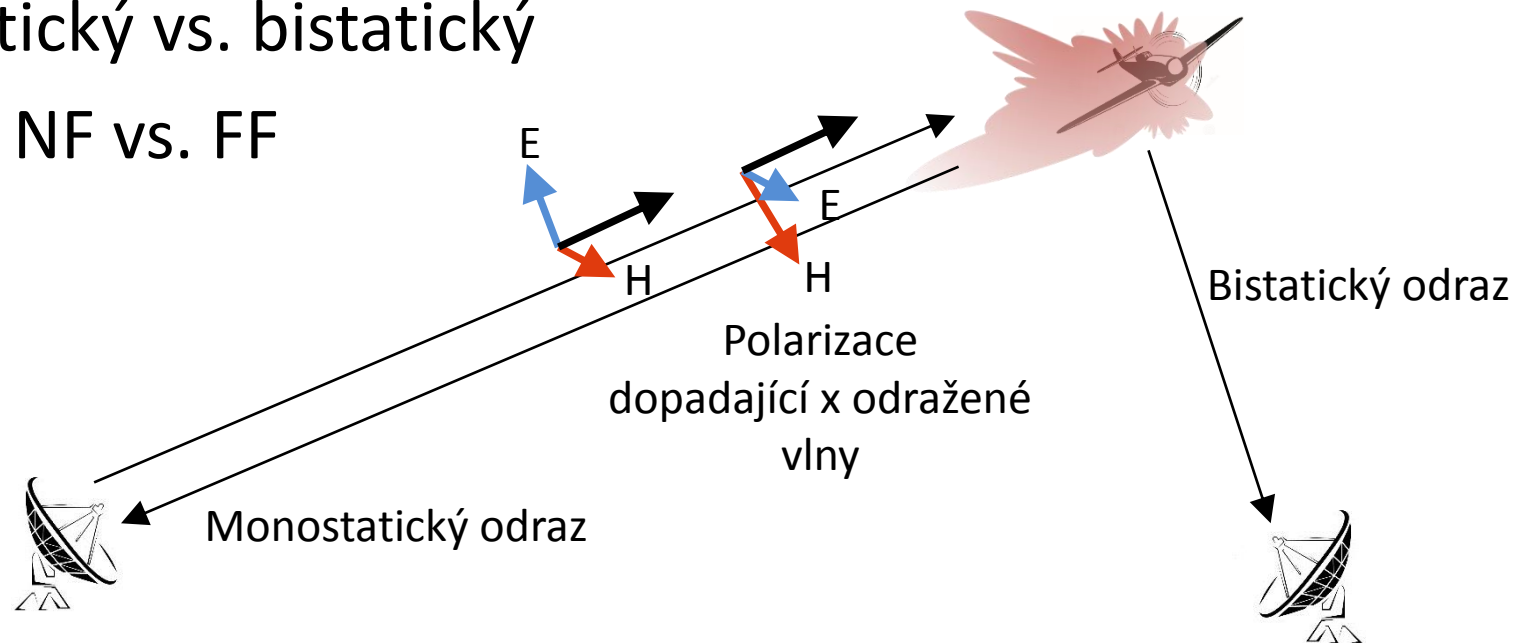
$\sigma = 9 \text{ m}^2$

RCS vybraných objektů

Objekt	RCS [m ²]	RCS [dBsm]
Auto	100	20
B-52	100	20
B-1	10	10
Malé letadlo	10	10
F-16	5	7
Mig-21	3	4.8
Člověk	1	0
F-18	1	0
Typhoon	0.5	-3
Tomahawk SLCM	0.05	-13
Pták	0.01	-20
F-117 Nighthawk	0.003	-25
Hmyz	0.001	-30
B-2	0.0001	-40

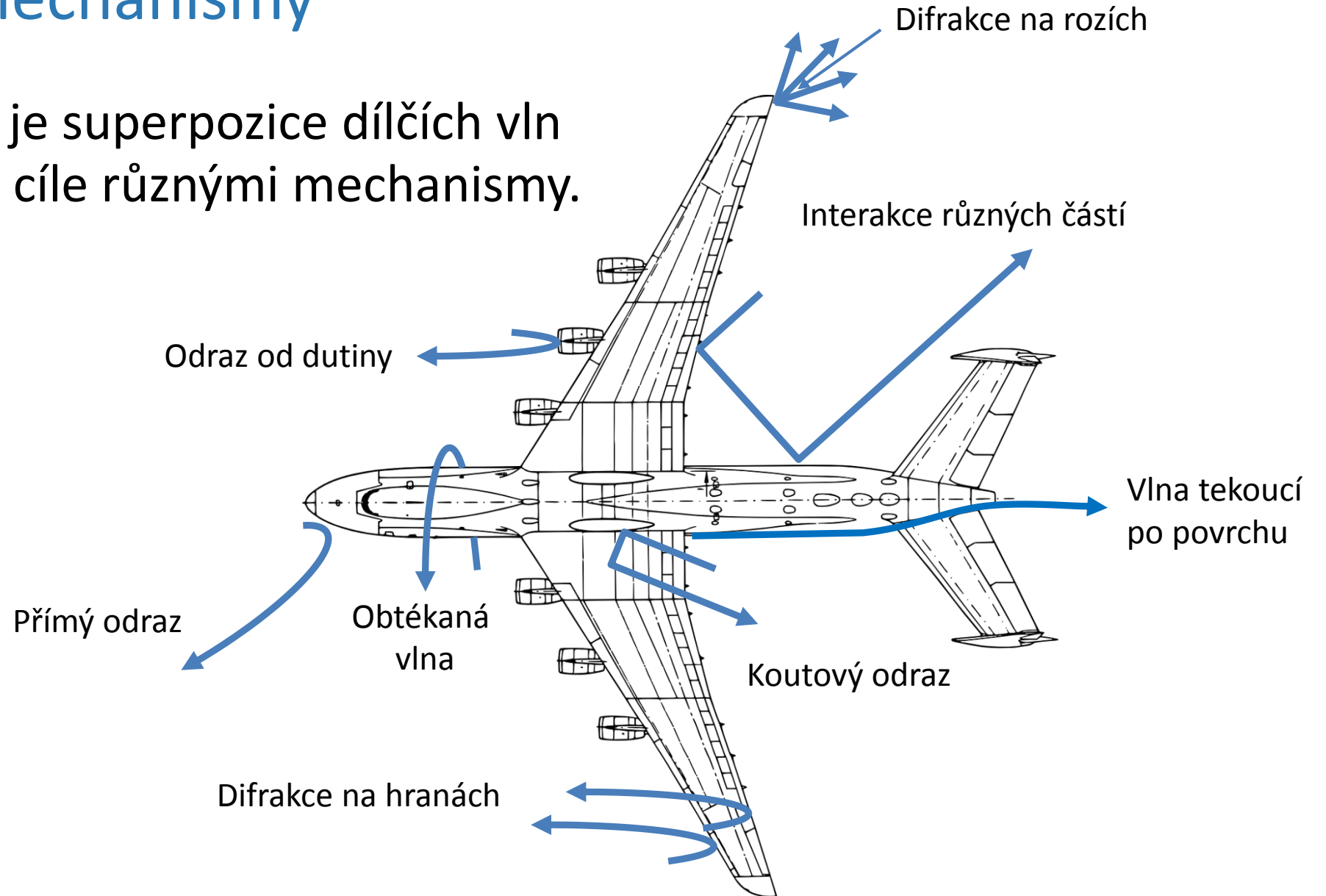
Faktory ovlivňující RCS

- Frekvence – vlnová délka vs. velikost objektu, jednotlivých částí
- Polarizace vlny
- Vlastnosti cíle – tvar a materiál
- Způsob detekce: monostatický vs. bistatický
- Vzdálenost cíle od radaru: NF vs. FF



Rozptylové mechanismy

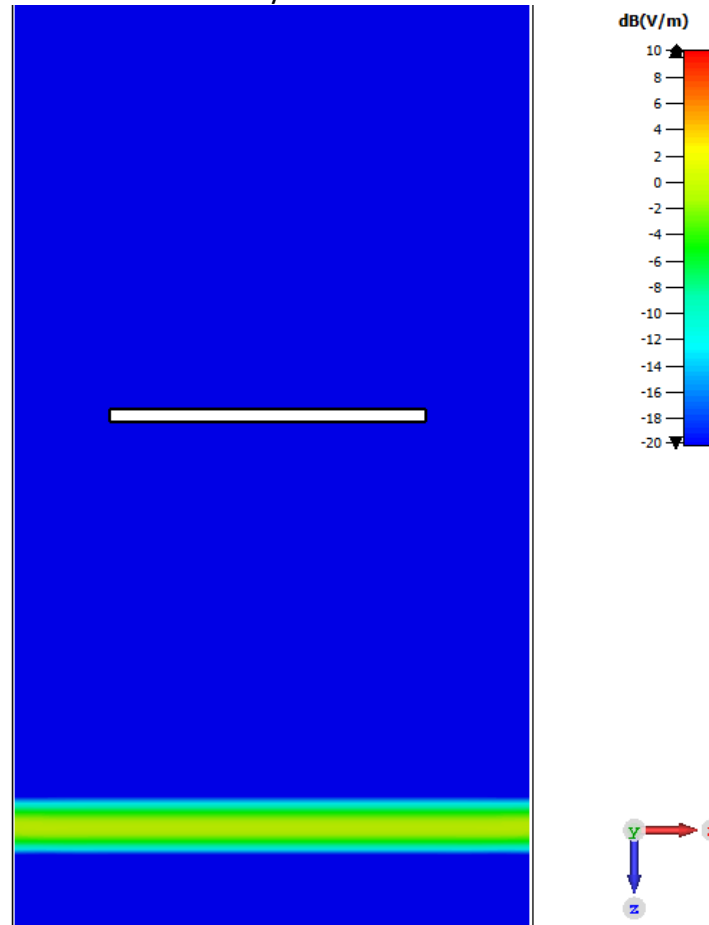
- Odražená vlna je superpozice dílčích vln odražených od cíle různými mechanismy.



Rozptylové mechanismy – přímý odraz

Přímý odraz od ploché desky

E_y, H_x



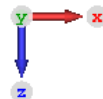
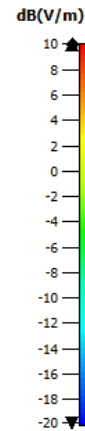
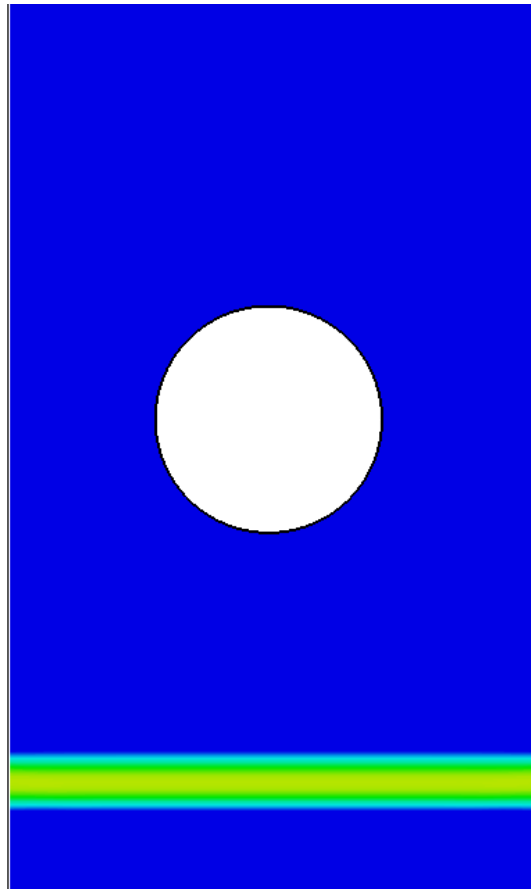
e-field (t=0.2..1.2(0.005)) [pw]

Component	Abs
Sample	1/201
Time	0.2 ns
Cross section	C
Cutplane at Y	0.000 mm
Maximum (Plane)	0.00710435 dB(V/m)
Maximum	15.5749 dB(V/m)

Rozptylové mechanismy – přímý odraz vs. obtékající vlna

Přímý odraz od válce

E_y, H_x

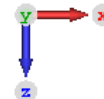
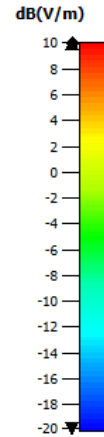
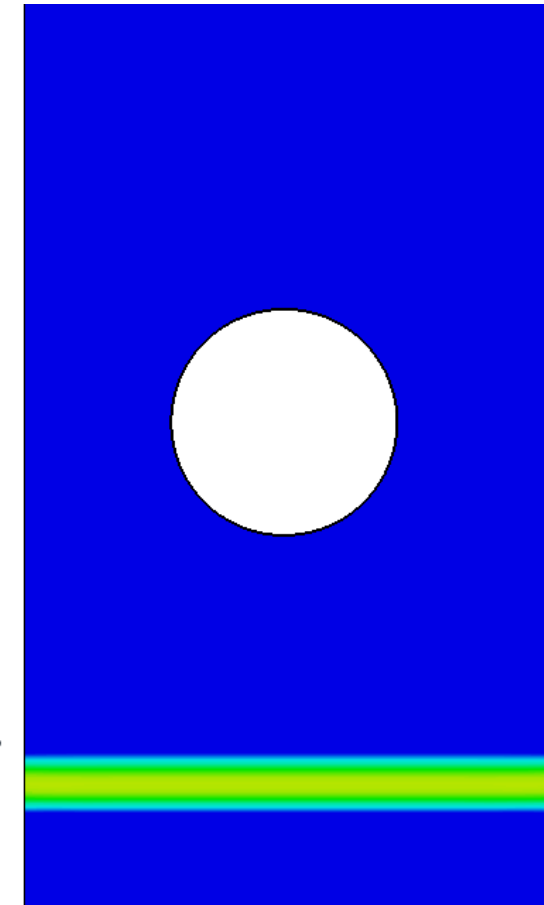


e-field (t=0.2..1.2(0.005)) [pw]

Component Abs
Sample 1/201
Time 0.2 ns
Cross section C
Cutplane at Y 0.000 mm
Maximum (Plane) 0.00413145 dB(V/m)
Maximum 15.0038 dB(V/m)

Přímý odraz od válce + obtékající vlna

E_x, H_y



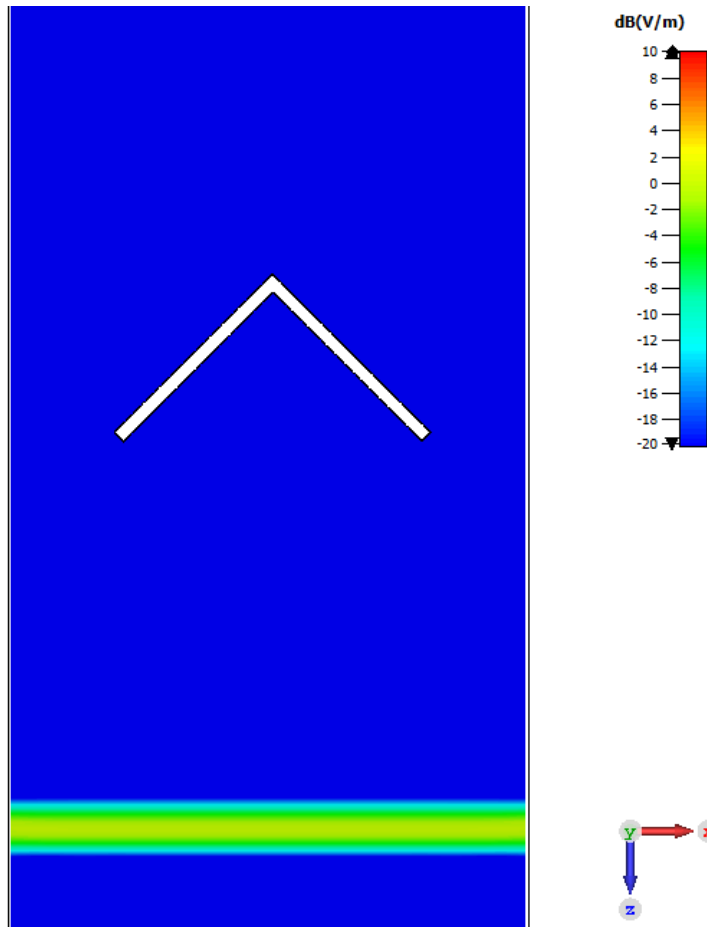
e-field (t=0.2..1.2(0.005)) [pw]

Component Abs
Sample 1/201
Time 0.2 ns
Cross section C
Cutplane at Y 0.000 mm
Maximum (Plane) -0.00356439 dB(V/m)
Maximum 17.3612 dB(V/m)

Rozptylové mechanismy – koutový odraz, difrakce

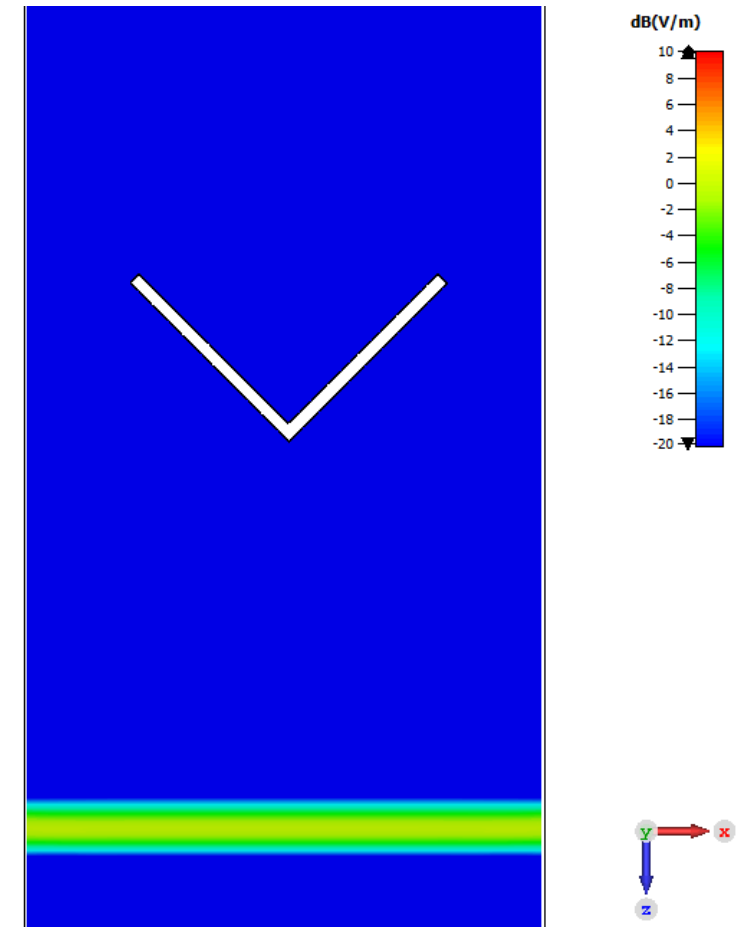
Odraz od koutového odražece, difrakce na hranách

E_y, H_x



Odraz od hrany, difrakce na hranách

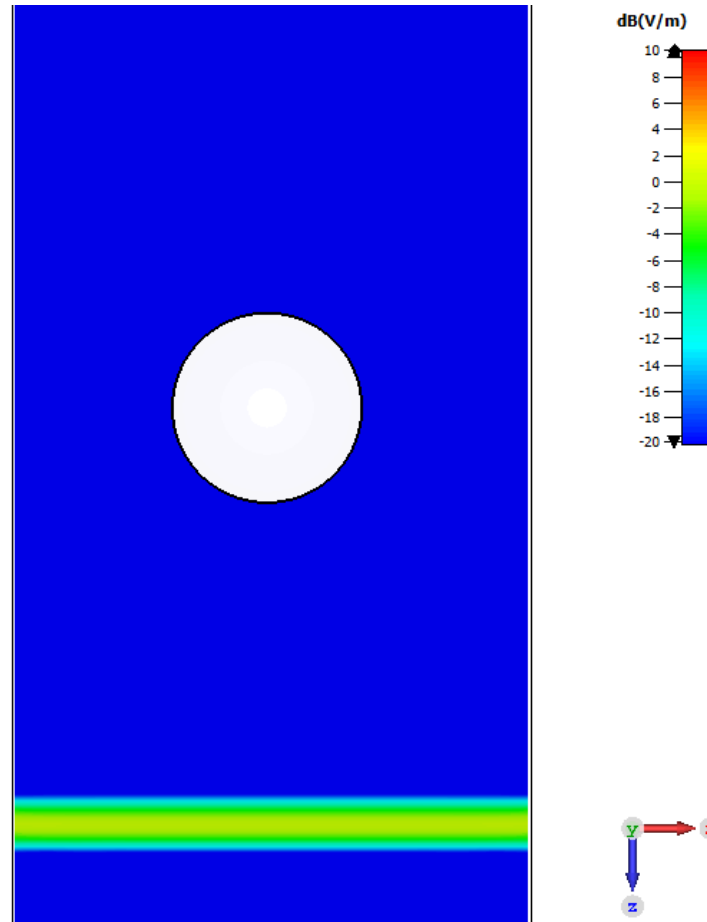
E_y, H_x



Rozptylové mechanismy – odraz od koule

Odraz od koule

E_y, H_x



e-field (t=0.2..1.2(0.005)) [pw]

Component	Abs
Sample	1/200
Time	0.2 ns
Cross section	C
Cutplane at Y	0.000 mm
Maximum (Plane)	0.0338198 dB(V/m)
Maximum	16.5462 dB(V/m)

RCS základních objektů

- Základní geometrické útvary – plochá deska, kvádr, válec, kužel, koule, koutový odražeč
- Jejich RCS lze vypočítat analyticky (aproximativně, PO)

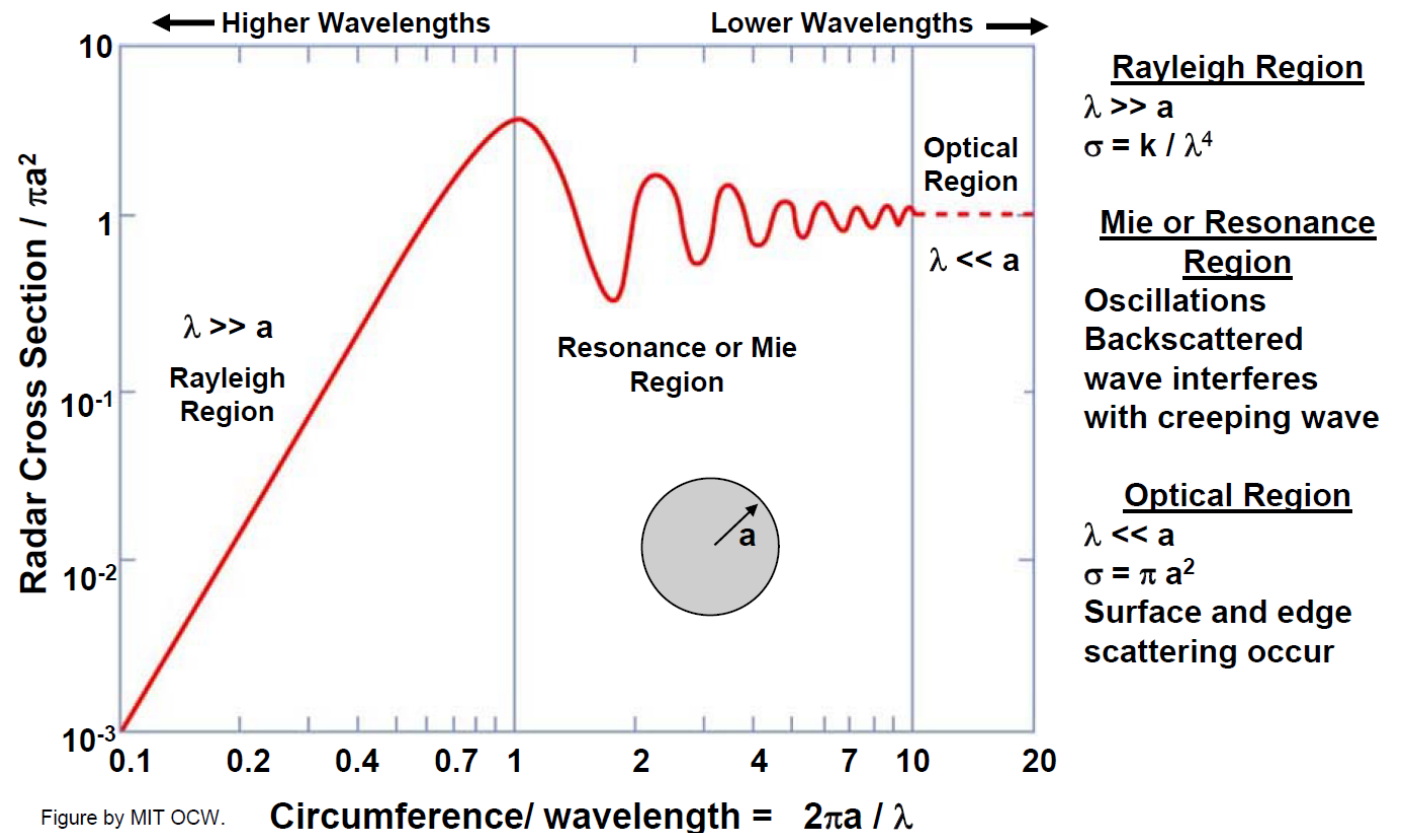
Objekt	Max. RCS	Pozn.
Plochá deska	$\sigma_{\max} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2}$	a, b – rozměry desky
Koule	$\sigma_{\max} = \pi r^2$	r – poloměr
Válec	$\sigma_{\max} = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}$	r – poloměr h – výška válce
Koutový odražeč	$\sigma_{\max} = \frac{4\pi A_{\text{eff}}^2}{\lambda^2}$	A _{eff} – efektivní plocha (ozářená)

RCS základních objektů – zobrazení

- Mono-statické RCS
 - RCS vs. úhel natočení objektu
 - RCS vs. frekvence
- Bi-statické RCS
 - RCS vs. úhel natočení objektu
 - RCS vs. bi-statický úhel
 - RCS vs. frekvence

RCS základních objektů – koule

- Zobrazení RCS vs. frekvence – 3 základní region
- Rayleighův region
- Mie (rezonanční) region
- **Optický region**



Rayleigh Region

$$\lambda \gg a$$
$$\sigma = k / \lambda^4$$

Mie or Resonance Region

Oscillations
Backscattered
wave interferes
with creeping wave

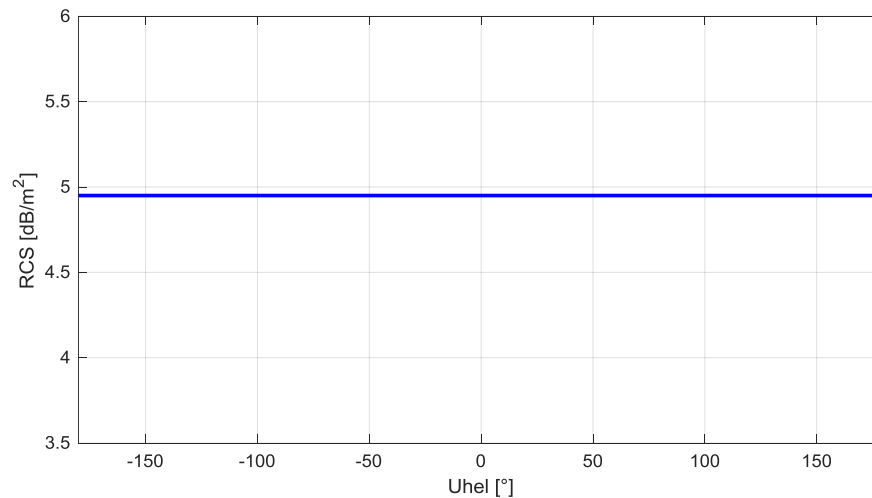
Optical Region

$\lambda \ll a$
 $\sigma = \pi a^2$
Surface and edge
scattering occur

RCS základních objektů – koule

- Bi-statické vs. monostatické zobrazení

Mono-statické zobrazení vs. monostat. úhel

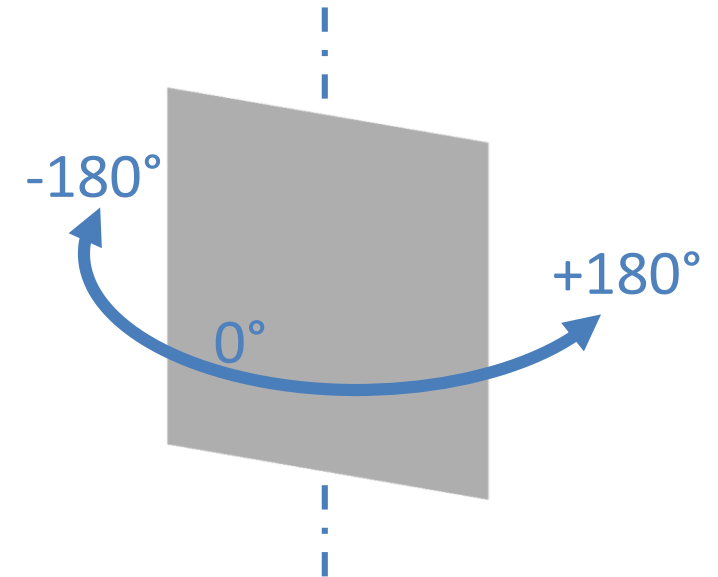
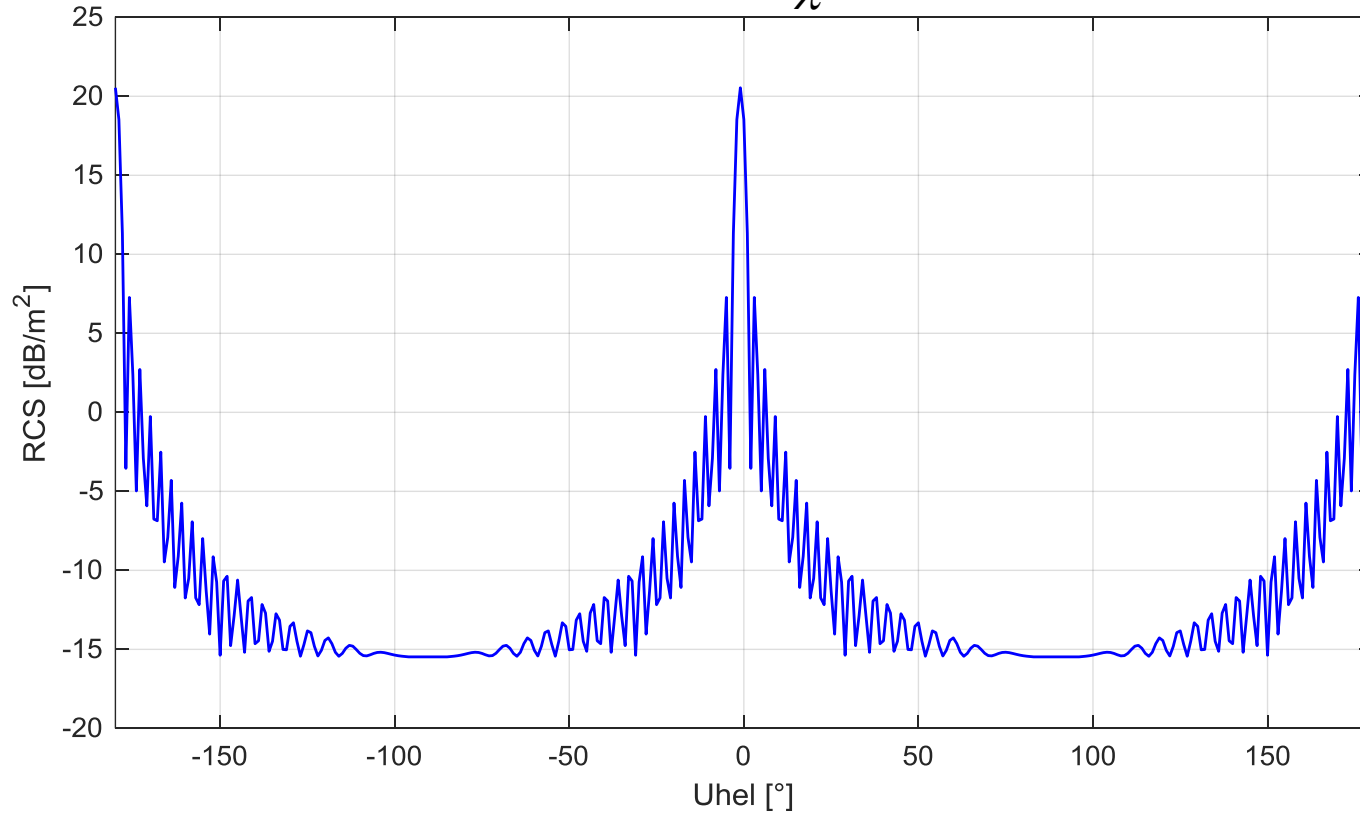


Bi-statické zobrazení vs. bistat. úhel



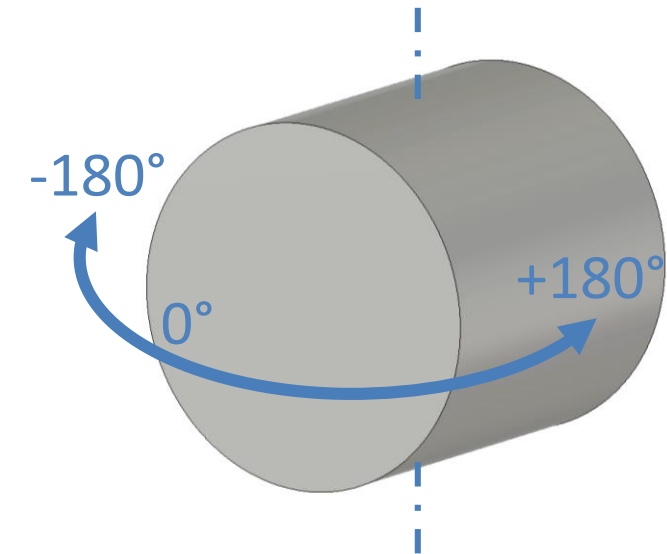
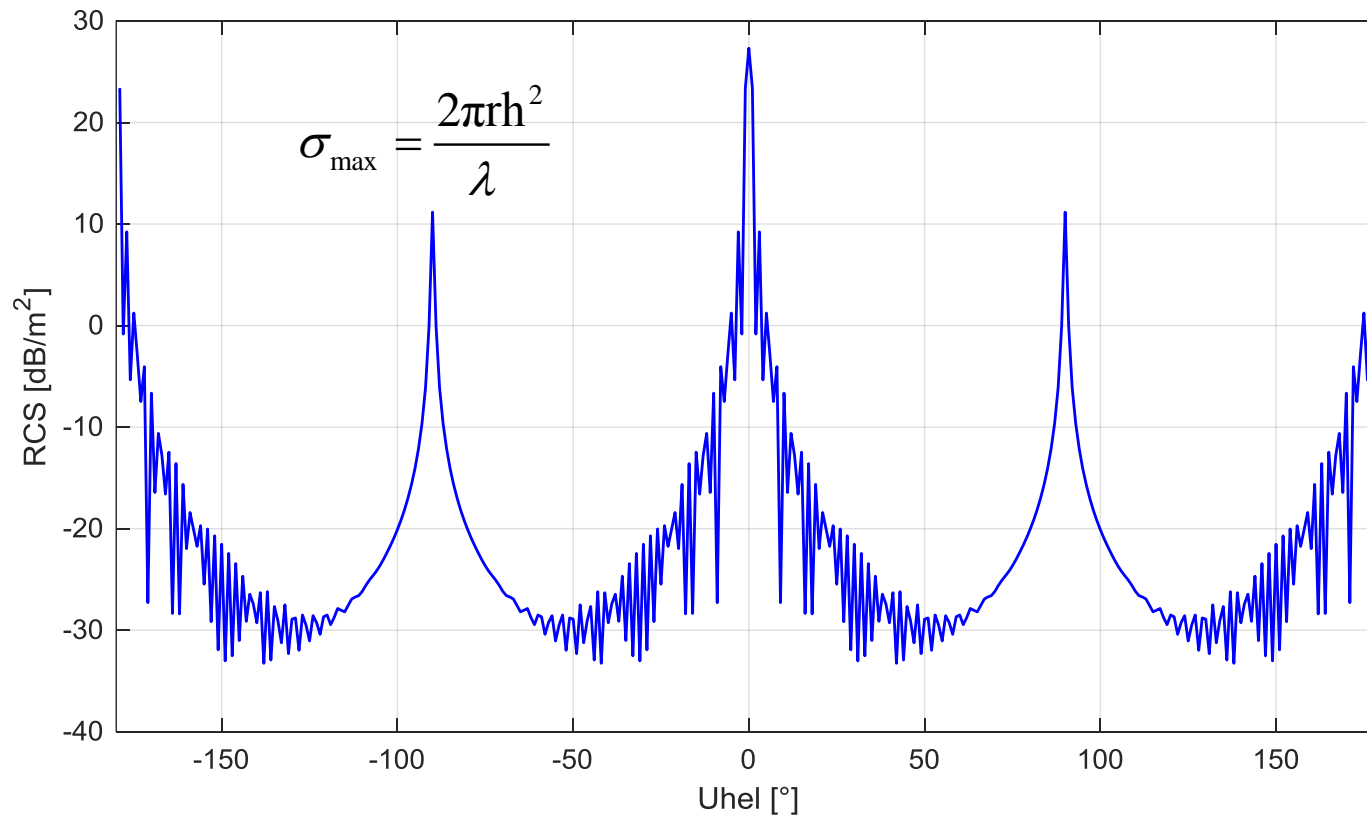
RCS základních objektů – deska

$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2}$$



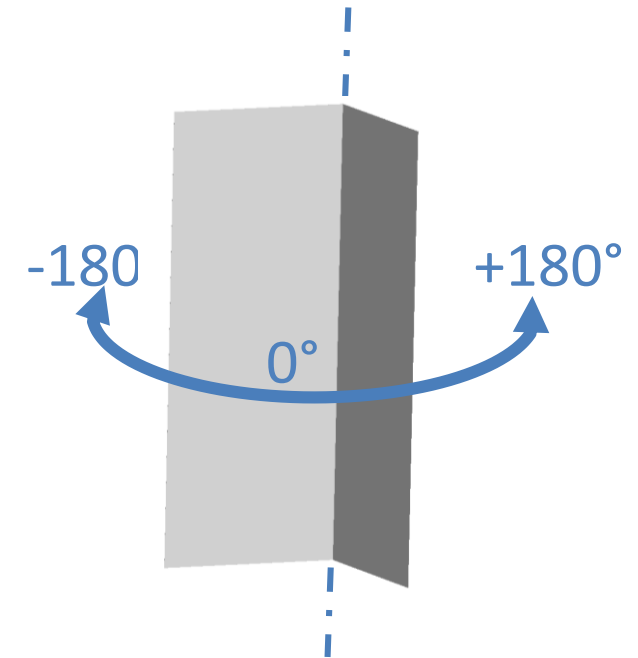
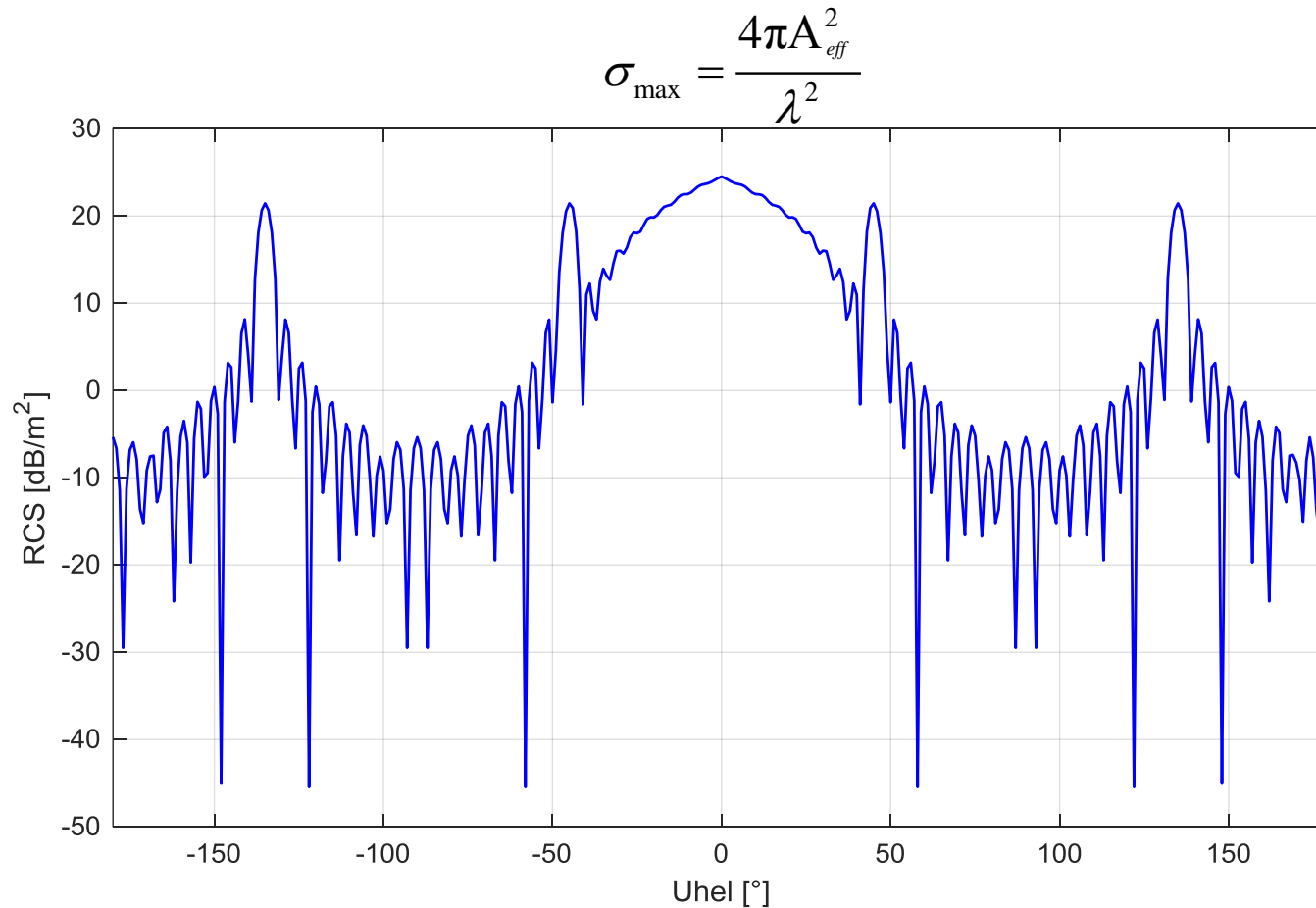
$a = b = 0.3 \text{ m}$
 $f = 10 \text{ GHz}$

RCS základních objektů – válec



$r = 0.25 \text{ m}$
 $h = 0.5 \text{ m}$
 $f = 10 \text{ GHz}$

RCS základních objektů – koutový odražeč



$a = b = 0.2 \text{ m}$

$h = 0.5 \text{ m}$

$f = 10 \text{ GHz}$

Určování RCS

Měření

- reálné objekty (full-scale měření) ve vzdálené zóně (FF)
- reálné objekty v blízké zóně (NF) s přepočtem do FF
- zmenšené modely

Simulace

- predikce RCS různých objektů
- aproximativní přístup vs. exaktní výpočetní metody

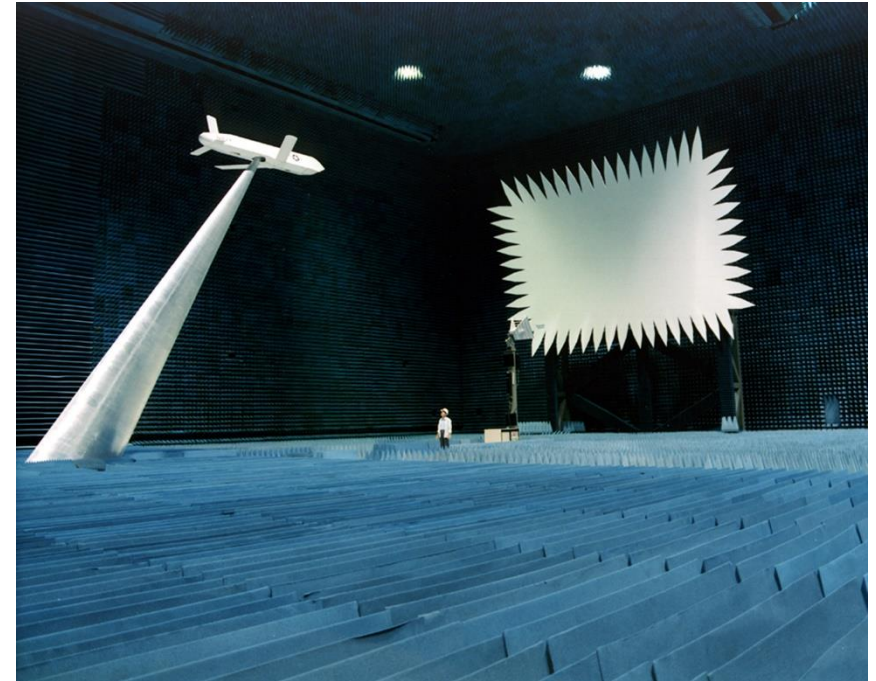
Určování RCS - měření

Full-scale měření

- Měření skutečných objektů od 1' MHz do 100' GHz
- Měření jak ve FF tak i v NF s přepočtem do FF
- Indoor i outdoor testovací polygony
- Možnost bi-statického i mono-statického uspořádání



Komora pro měření
v NF (0.2 – 18 GHz),
The Howland
Company



FF testovací komora (100 MHz – 100 GHz),
NAVAIR, Point Mugu, California
- compact range
- bistatické měření

Určování RCS - měření

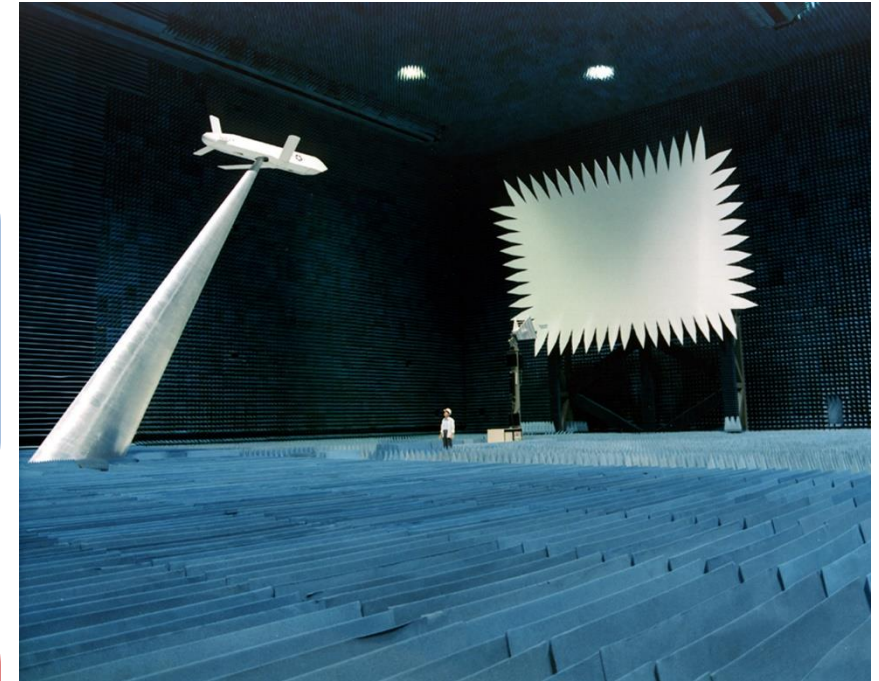
Full-scale měření

Pro

- reálné měření
- Není nutné vyrábět modely objektů

Proti

- nutnost velice rozlehlého testovacího prostoru
- mechanicky velký otočný pylon
- množství parazitních odrazů, signálů



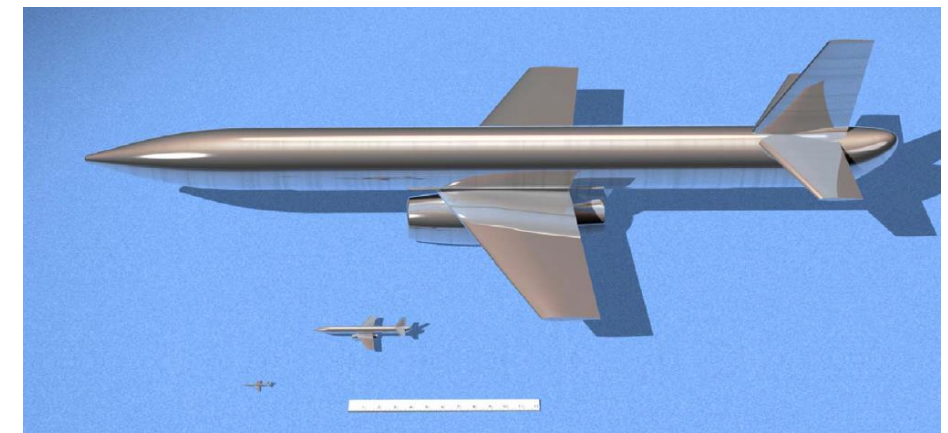
FF testovací komora (100 MHz – 100 GHz),
NAVAIR, Point Mugu, California
- compact range
- bistatické měření

Určování RCS - měření

Měření zmenšených objektů

- Měření modelů reálných objektů v různých měřítcích
- Měření jak ve FF tak i v NF s přepočtem do FF
- Indoor i outdoor testovací polygony
- Možnost bi-statického i mono-statického uspořádání
- Nutnost měření na ekvivalentních vlnových délkách

Veličina	1:1	1:x
Velikost	L	$L' = L/S$
Čas	t	$t' = t/S$
Frekvence	f	$f' = f*S$
Vlnová délka	λ	$\lambda' = \lambda/S$
RCS	σ	$\sigma' = \sigma/S^2$



Určování RCS - měření

Měření zmenšených objektů

Pro

- není potřeba velkých testovacích polygonů
- snadná manipulace s objekty, menší požadavky na otočný systém

Proti

- se zmenšujícím se měřítkem modelu se musí zmenšovat i vlnová délka měř. signálu – u malých modelů je nutné měřit na vysokých f
- zjednodušení modelu – nelze podchytit všechny odražeče a mechanismy zpětného rozptylu

Určování RCS - simulace

- Simulace libovolných objektů pomocí aproximativních i exaktních přístupů
- Mono/bi-statické RCS
- Částečně odpadá nutnost měření na velkých měřících polygonech, drahých měřících systémech.

Určování RCS - simulace

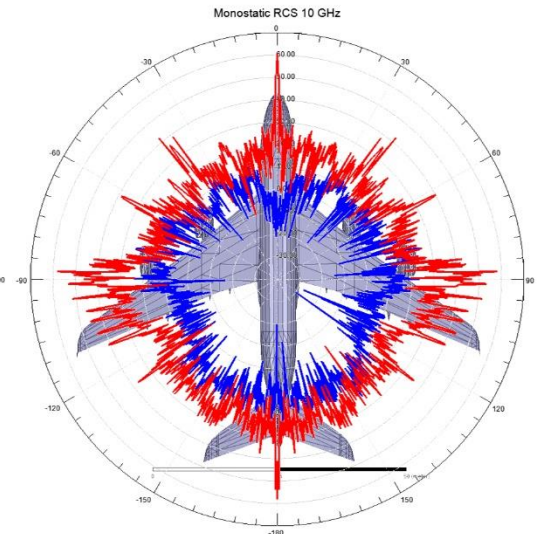
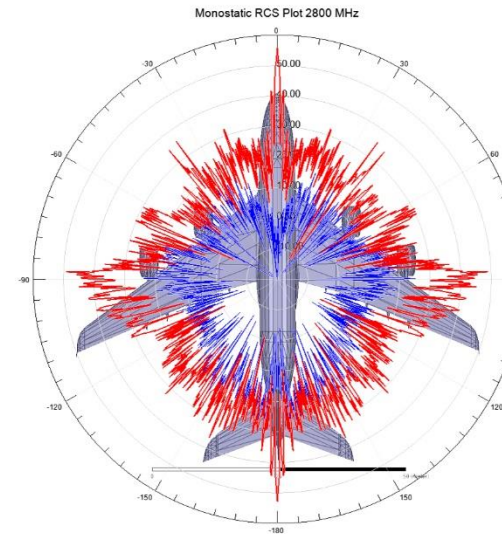
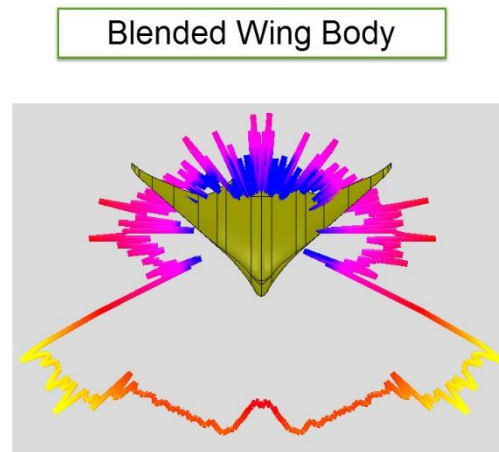
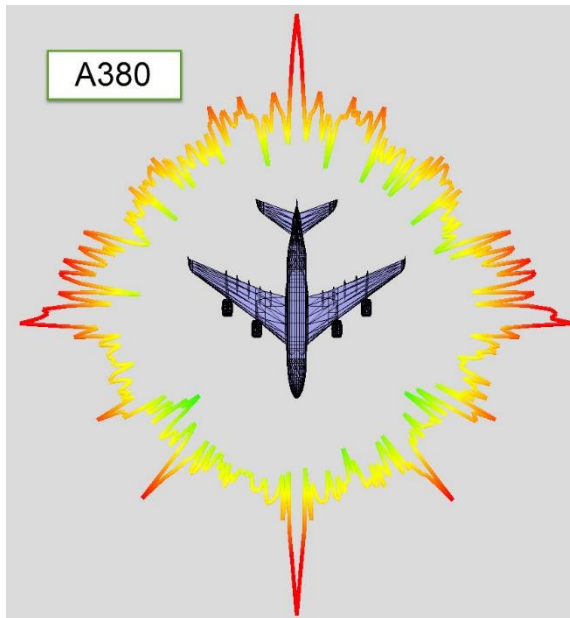
- Exaktní přístupy – simulace rozptylových vlastností modelů na základě full-wave simulátorů – metoda momentů (MoM), multilevel fast multipole method (MLFMM), metoda konečných prvků (FEM), metoda konečných diferencí (FDTD – Finite-difference time-domain)
 - exaktní formulace řešeného problému
 - lze simulovat velké množství rozptylových mechanismů
 - modelování detailů
 - velká numerická náročnost
 - vhodné pro menší objekty

Určování RCS - simulace

- Aproximativní přístupy – aproximace modelů, aprox. výpočetní metody, např. na základě Ray-Tracingu – metoda fyzikální optiky (PO – Physical Optics), geometrická optika (GO), geometrická/fyzikální teorie difrakce (GTD)
 - aproximativní řešení
 - modelování velkých objektů
 - značné zjednodušení modelovaných struktur
 - snížení výpočetní náročnosti
 - zanedbání některých rozptylových mechanismů (difrakce na hranách, tekoucí vlny apod.)

Určování RCS - simulace

- Ansys HFSS
- CST Microwave Studio
- FEKO





Děkuji za pozornost!