

# Návrh a Konstrukce Antén

A0M17NKA

## Širokopásmové antény: Spirálové antény a kuželové dipóly

**Milan Polívka**  
**ČVUT v Praze, FEL**  
B2: 639, I.2270  
[polivka@fel.cvut.cz](mailto:polivka@fel.cvut.cz)

**zima 2023/24**



# Osnova

## Spirálové antény (spiral antennas) – kmitočtově nezávislé antény (frequency independent / constant input impedance antennas)

- Matematický popis
- Typy spirál
- Impedanční a směrové vlastnosti
- Přizpůsobení, symetrizace
- Příklad - parametrické studie průběhů impedance, zisku, osového poměru, EM simulace vs. měření

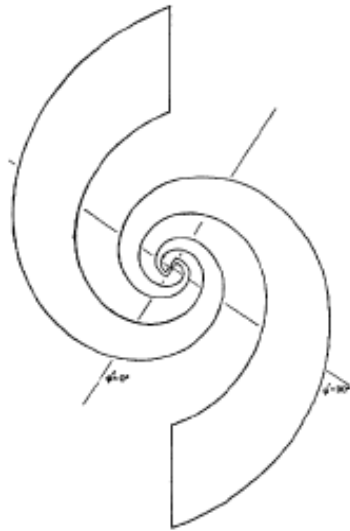
## Kuželové dipóly (biconical dipoles)

- Geometrie
- Princip činnosti
- Vstupní impedance
- Konstrukční uspořádání

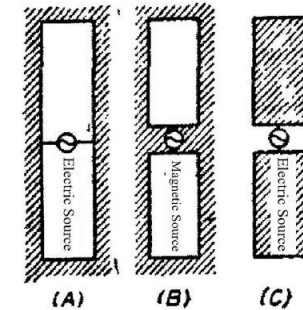
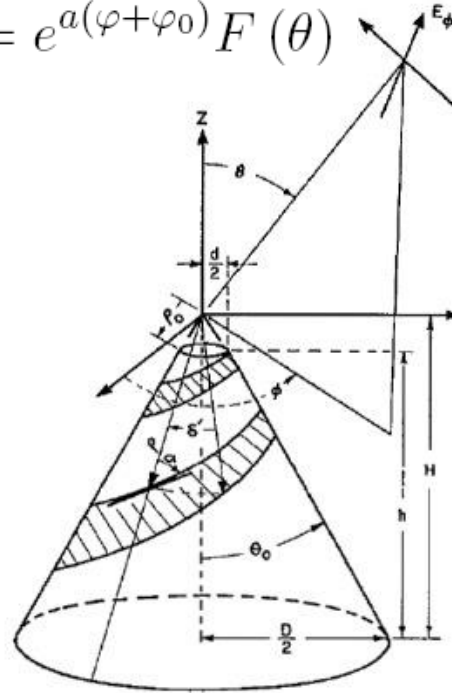
# Úvod do spirálových antén

- 1957 **Rumsey** [1] - odvození profilu frekvenčně nezávislých antén: plošných, i prostorově uspořádaných. Profil je popsán pouze úhly, je frekvenčně nezávislý.
- 1949 **Mushiake** [2] - impedance samokomplementárních struktur

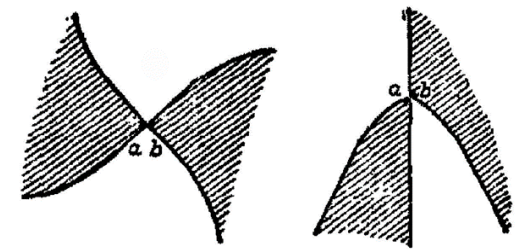
$$r(\varphi) = e^{a(\varphi+\varphi_0)}$$



$$r = e^{a(\varphi+\varphi_0)} F(\theta)$$



Relation between slit antenna and planar dipole antenna.



Planar structures whose impedances at terminals a and b are the same.

# Geometrie

- Hledáme **kmitočtově nezávislou** anténu - se změnou vlnové délky (resp. frekvence) změna rozměrů pouze v závislosti na změnách úhlů, tj. změna **délkových rozměrů** v důsledku **otočení** struktury o určitý **úhel**.
- Aktivní oblast** antény, související s poměrem rozměru ku vlnové délce, se podél struktury pohybuje zvětšováním středového úhlu v oblasti.
- Změna délky průvodiče otočením o úhel  $\Phi$  matematicky:

$$Kr(\varphi) = r(\varphi + \Phi) \quad (1)$$

$r(\varphi)$  - průvodič křivky

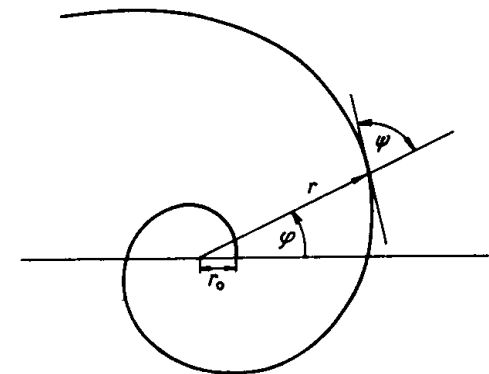
$K(\Phi)$  – změna délkového měřítka závisující na  $\Phi$ ,  $K$  ani  $\Phi$  nejsou funkcí  $\varphi$  či  $r$

$\Phi$  – úhel otočení příslušející délkové změně  $K$

- Derivujme rovnici (1) jednou podle  $\Phi$  a podruhé podle  $\varphi$ . Dostaneme

$$r(\varphi) \frac{dK}{d\Phi} = \frac{\partial r(\varphi + \Phi)}{\partial \Phi}$$

$$K \frac{dr(\varphi)}{d\varphi} = \frac{\partial r(\varphi + \Phi)}{\partial \varphi}$$



# Geometrie

- Z rovnosti pravých stran  $\Rightarrow$  rovnost levých stran

$$r(\varphi) \frac{dK}{d\Phi} = K \frac{dr(\varphi)}{d\varphi}$$

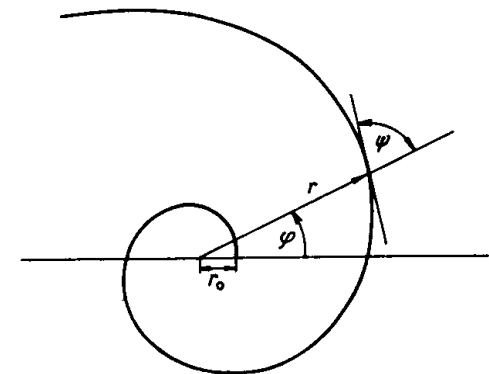
$$\frac{dr(\varphi)}{d\varphi} = \frac{1}{K} \frac{dK}{d\Phi} r(\varphi) = ar(\varphi), \text{ kde } a \text{ je konstanta nezávislá na } \varphi \quad (2)$$

- Rovnice (2) je **diferenciální rovnice** rovinné struktury jejímž **řešením** je funkce

$$r(\varphi) = r_0 e^{a\varphi}, \text{ kde } r_0 = e^{a\varphi_0} \text{ a } \varphi_0 \text{ je počáteční úhel.}$$

$$\text{Pak } r = e^{a(\varphi+\varphi_0)} \text{ resp. } \varphi + \varphi_0 = \frac{1}{a} \ln(r), \text{ což je rovnice spirály}$$

Lze též zapsat  $\varphi = \varphi_0 + (\operatorname{tg} \Psi) \ln(r)$ ,  
kde  $\Psi$  je úhel tečný ke křivce u odpovídajícího průvodiče.



# Typy spirál

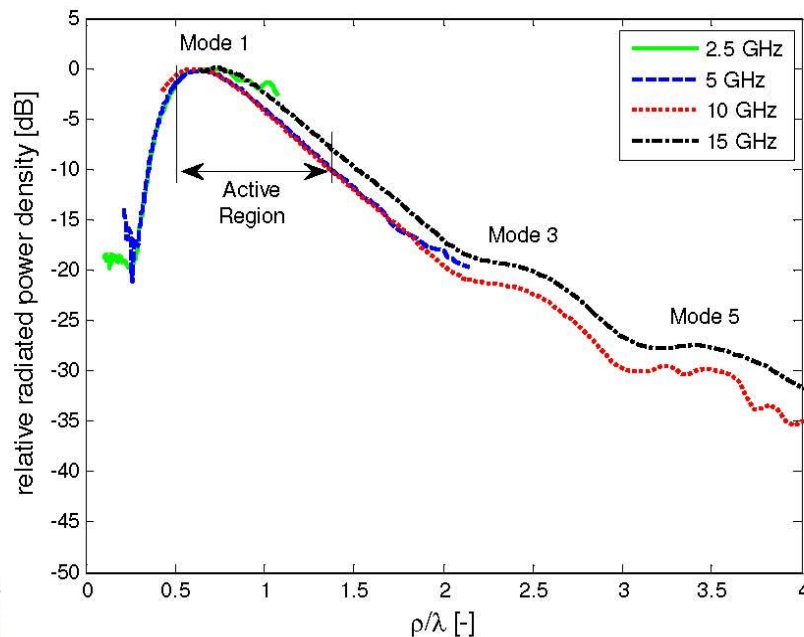
## Logaritmická spirála

- Hrana spirály v polárních souřadnicích

$$r(\varphi) = r_0 e^{a(\varphi + \varphi_0)},$$

kde  $\varphi_0$  je úhel mezi jednotlivými hranami spirály

- Hustota vyzařovaného výkonu v závislosti na poměru obvodu ku vlnové délce





# Typy spirál

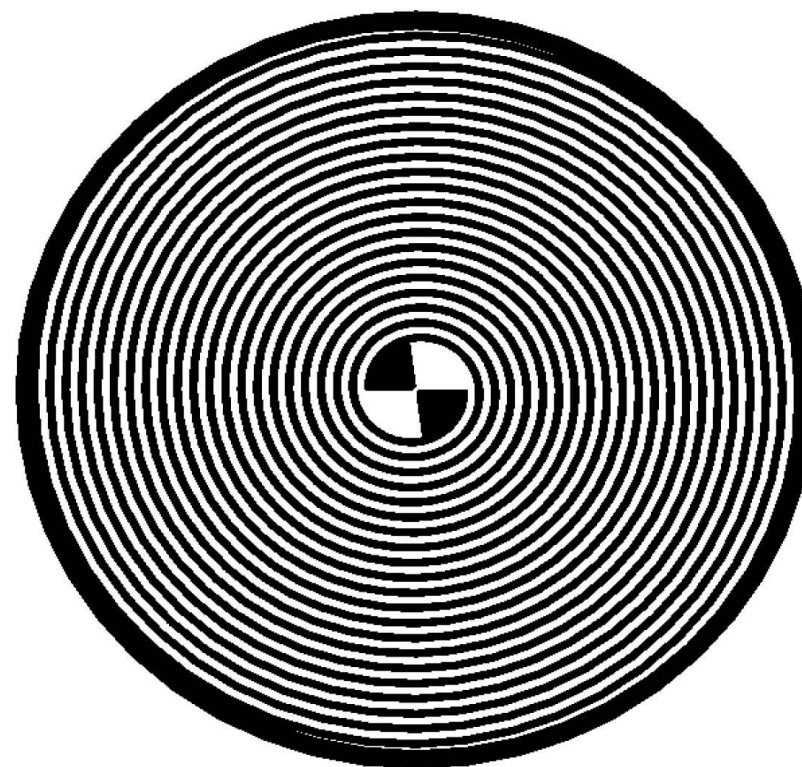
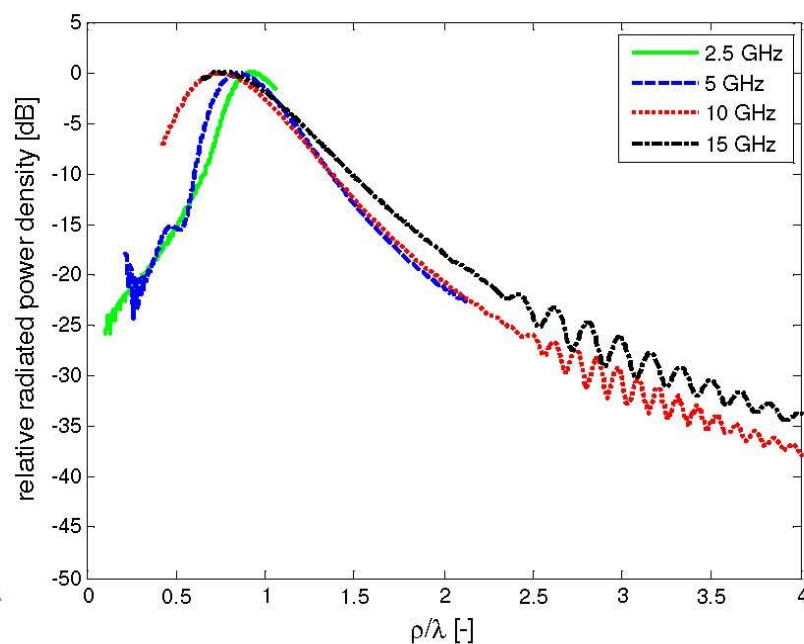
## Archimedova spirála

- Hrana spirály v polárních souřadnicích

$$r(\varphi) = r_0 + a(\varphi + \varphi_0),$$

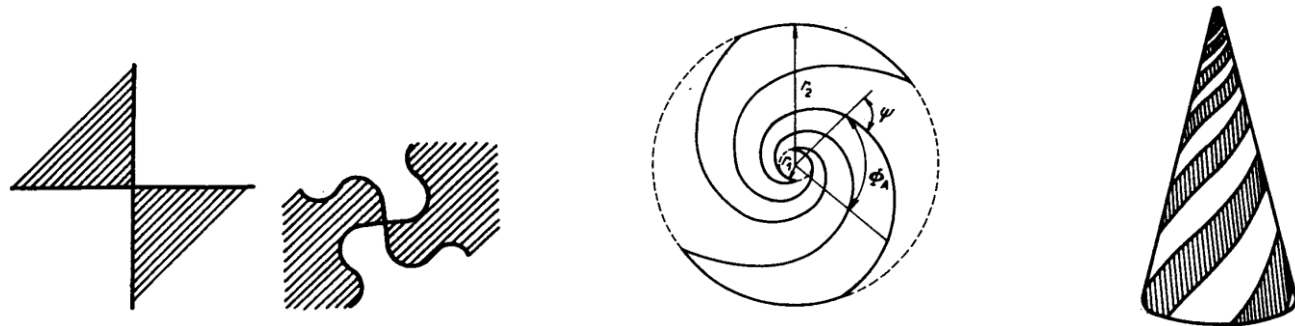
kde  $\varphi_0$  je úhel mezi jednotlivými hranami spirály

- Hustota vyzařovaného výkonu v závislosti na poměru obvodu ku vlnové délce



# Impedance

- Kmitočtově nezávislé (**konstantní**) musí být i **impedance**. Proto se spirálové antény realizují ve tvaru **samokomplementárních** struktur, u nichž lze impedanci odvodit následujícím způsobem.



- Mějme nekonečné vodivé **stínítko** se **štěrbinou**, na níž dopadá rovinná EM vlna o intenzitě  $E_0$ . Za stínítkem vytváří pole s intenzitou  $E_s$ . Mějme dále **dipól** shodného tvaru, na nějž dopadá stejná vlna. Za dipólem se vytvoří pole s intenzitou  $E_d$ . Lze ukázat, že

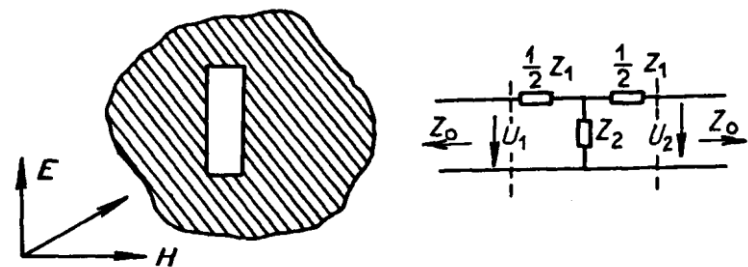
$$E_s + E_d = E_0 \quad (3)$$

- Činitel přenosu pole za překážku (stínítko)

$$\tau_s = \frac{E_s}{E_0}; \quad \tau_d = \frac{E_d}{E_0}$$

- Z náhradního schématu štěrby je přenos

$$\tau = \frac{U_2}{U_1} = \frac{2Z_2Z_0}{\left(\frac{Z_1}{2} + Z_0\right)\left(2Z_2 + \frac{Z_1}{2} + Z_0\right)}$$





# Impedance

- Pro ideálně tenké stínítko je  $Z_1 = 0$  a

$$\tau = \frac{2Z_2}{2Z_2 + Z_0}$$

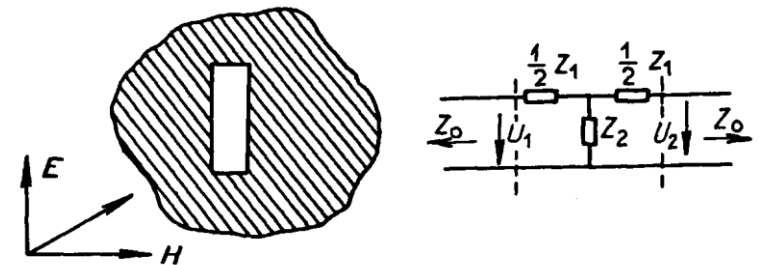
- Jednou je  $Z_2 = Z_s$ , podruhé  $Z_2 = Z_d$ . Dosazením do (3)

$$\frac{2Z_s}{2Z_s + Z_0} + \frac{2Z_d}{2Z_d + Z_0} = 1 \quad \text{nebo} \quad \boxed{Z_s Z_d = \frac{Z_0^2}{4} = (60\pi)^2} \quad (4)$$

Platí pro všechny komplementární útvary.

Př. Pro tenký dipól je  $Z_d \approx 73 \Omega$  a z (4) plyne impedance šterbiny  $Z_s = \frac{(60\pi)^2}{Z_d} = 487 \Omega$

- Pro samokomplementární útvary je  $Z_d = Z_s = 60\pi \approx 190 \Omega$  a impedance je **kmitočtově nezávislá (konstatní)**.



# Vlastnosti

## Impedanční

- frekvenčně nezávislá (konstatní)  $\sim 190 \Omega (60\pi)$
- nutnost impedančně přizpůsobit  
(při připojení na  $50 \Omega$  se odrazí 34 % výkonu, ztráta 1,8 dB)

## Vyzařovací

- kruhová polarizace - v jednom směru levotočivá, v opačném pravotočivá
- frekvenčně stálý fázový střed (u plošných spirálových antén)

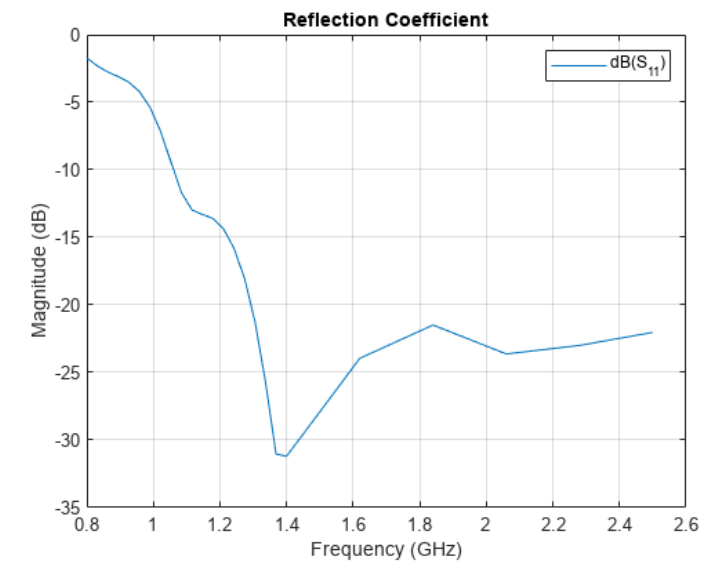
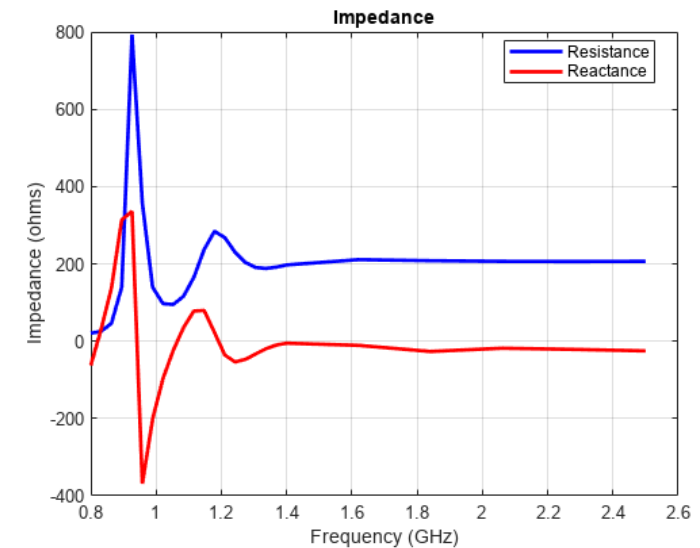
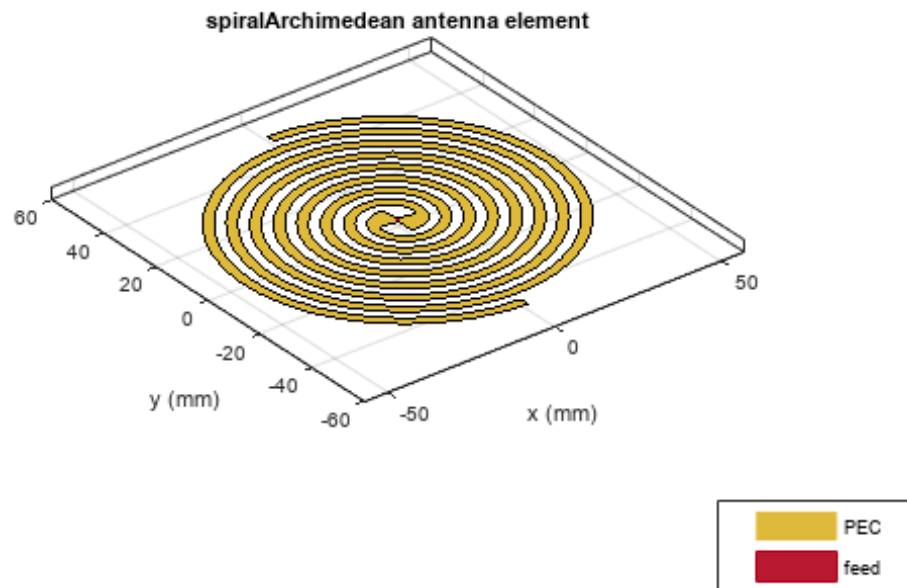
# EM model

## Př. Archimedean Spiral Design Investigation [3]

$R_o = 50e-3$ ;

$R_i = 5.5e-3$ ;

turns = 4;



[https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx\\_archimedean\\_spiral\\_design-3](https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx_archimedean_spiral_design-3)

[3] Hinostroza, Israel "Conception de reseaux large bande d'antennes spirales", Other, Supélec, 2013 , pp. 58-62. Online at:

[https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza\\_Israel\\_final\\_final\\_thesis\\_2013.pdf](https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza_Israel_final_final_thesis_2013.pdf)

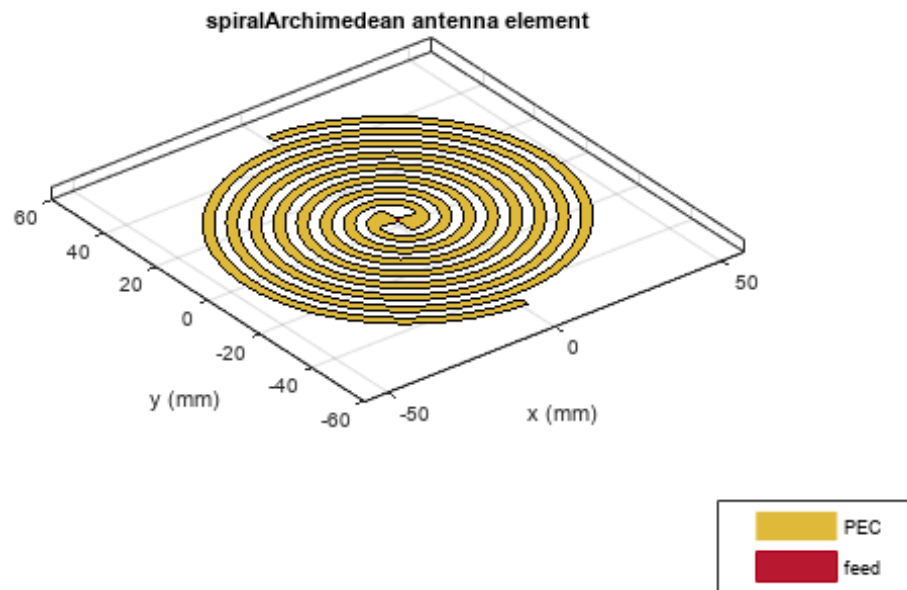
# EM model

## Př. Archimedean Spiral Design Investigation [3]

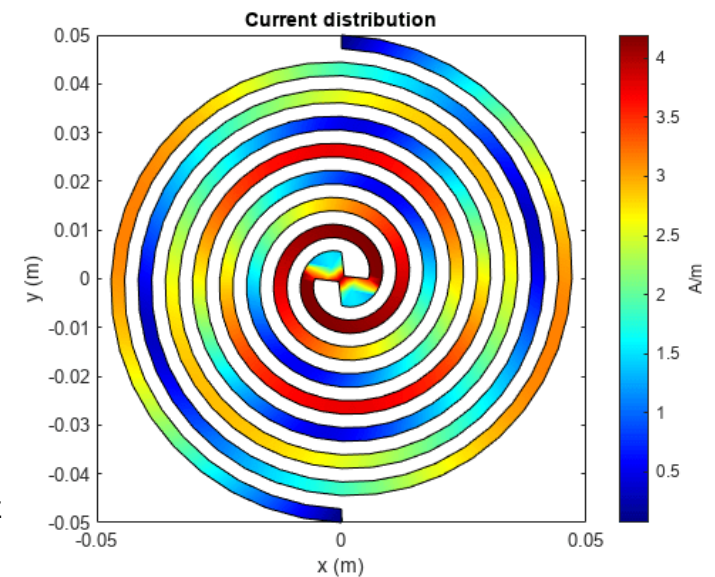
$R_o = 50\text{e-}3$ ;

$R_i = 5.5\text{e-}3$ ;

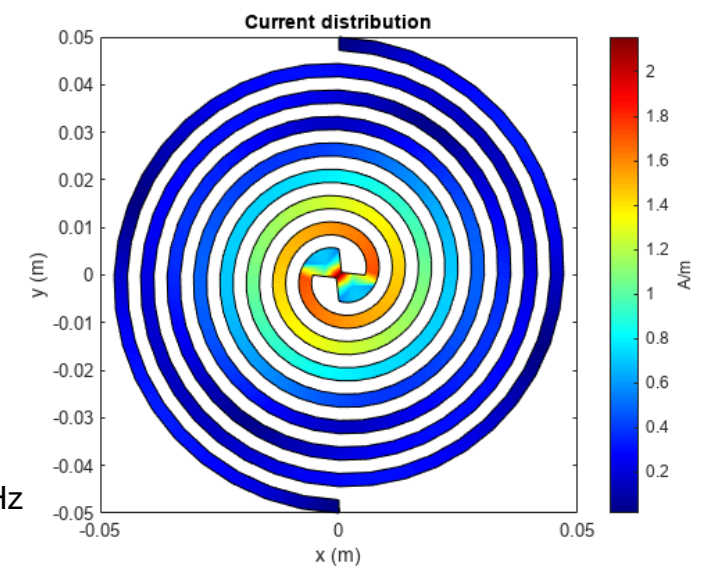
turns = 4;



$f = 0,85 \text{ GHz}$



$f = 1,9 \text{ GHz}$



[https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx\\_archimedean\\_spiral\\_design-3](https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx_archimedean_spiral_design-3)

[3] Hinostroza, Israel "Conception de reseaux large bande d'antennes spirales", Other, Supélec, 2013 , pp. 58-62. Online at:

[https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza\\_Israel\\_final\\_final\\_thesis\\_2013.pdf](https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza_Israel_final_final_thesis_2013.pdf)

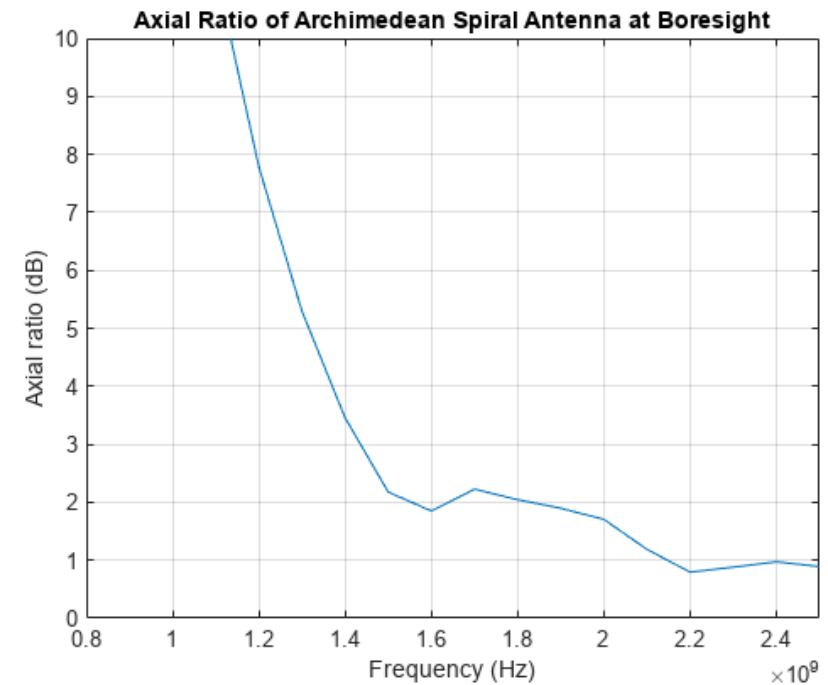
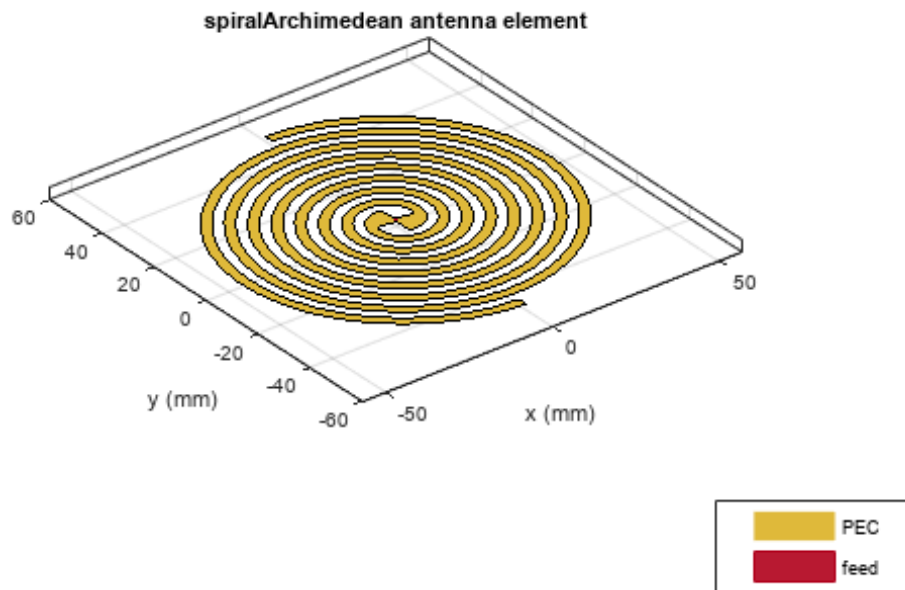
# EM model

## Př. Archimedean Spiral Design Investigation [3]

$R_o = 50\text{e-}3$ ;

$R_i = 5.5\text{e-}3$ ;

turns = 4;



[https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx\\_archimedean\\_spiral\\_design-3](https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/archimedean-spiral-design-investigation.html#atx_archimedean_spiral_design-3)

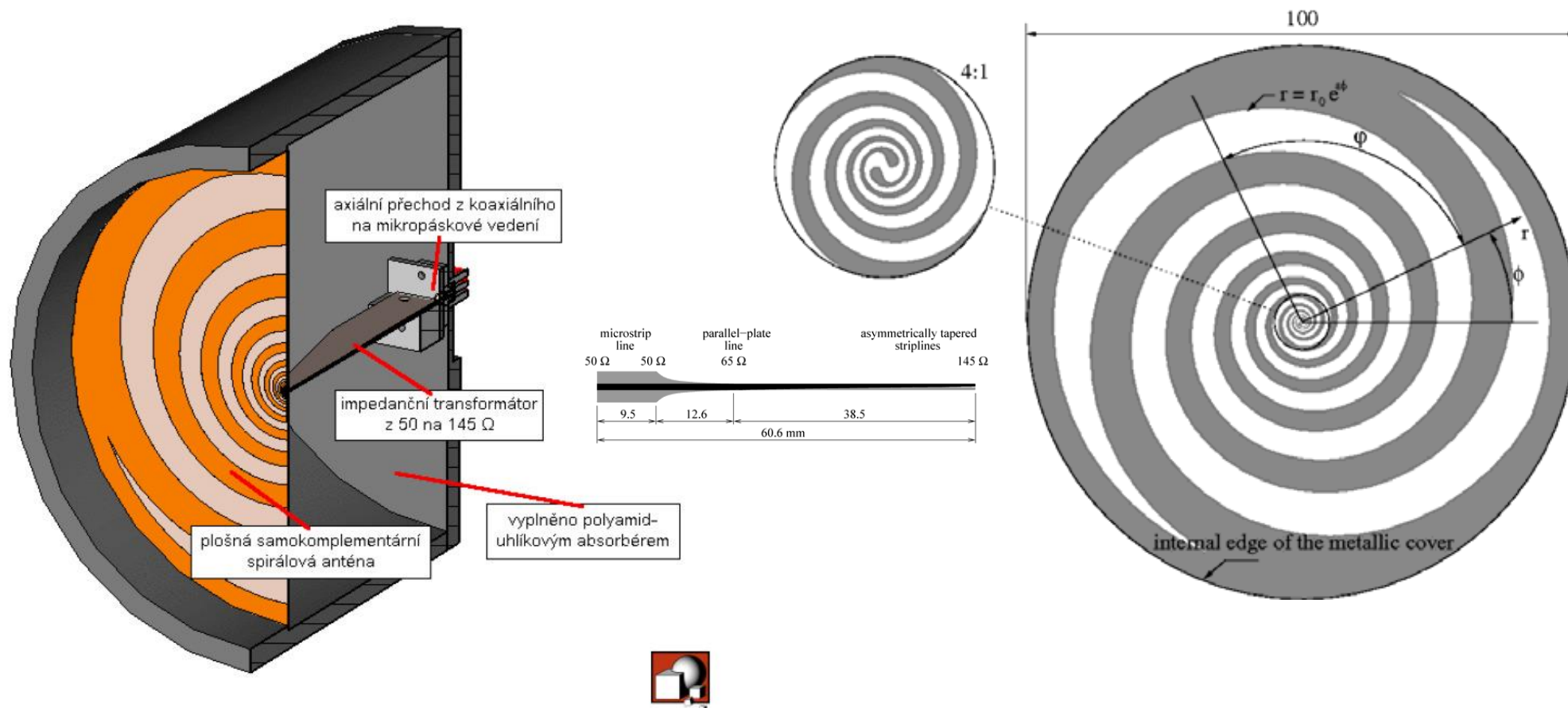
[3] Hinostroza, Israel "Conception de reseaux large bande d'antennes spirales", Other, Supélec, 2013, pp. 58-62. Online at:

[https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza\\_Israel\\_final\\_final\\_thesis\\_2013.pdf](https://theses.hal.science/file/index/docid/830469/filename/Hinostroza_Israel_final_final_thesis_2013.pdf)

# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

- **logaritmická** spirála:  $r(\varphi) = r_0 e^{a(\varphi+\phi)}$
- anténa včetně impedančního transformátoru, přechodů a symetrizace

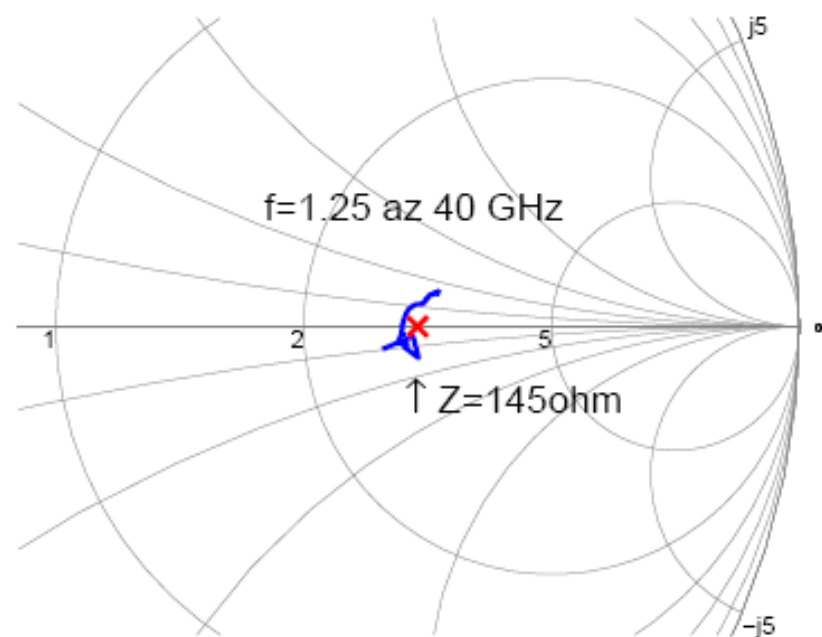
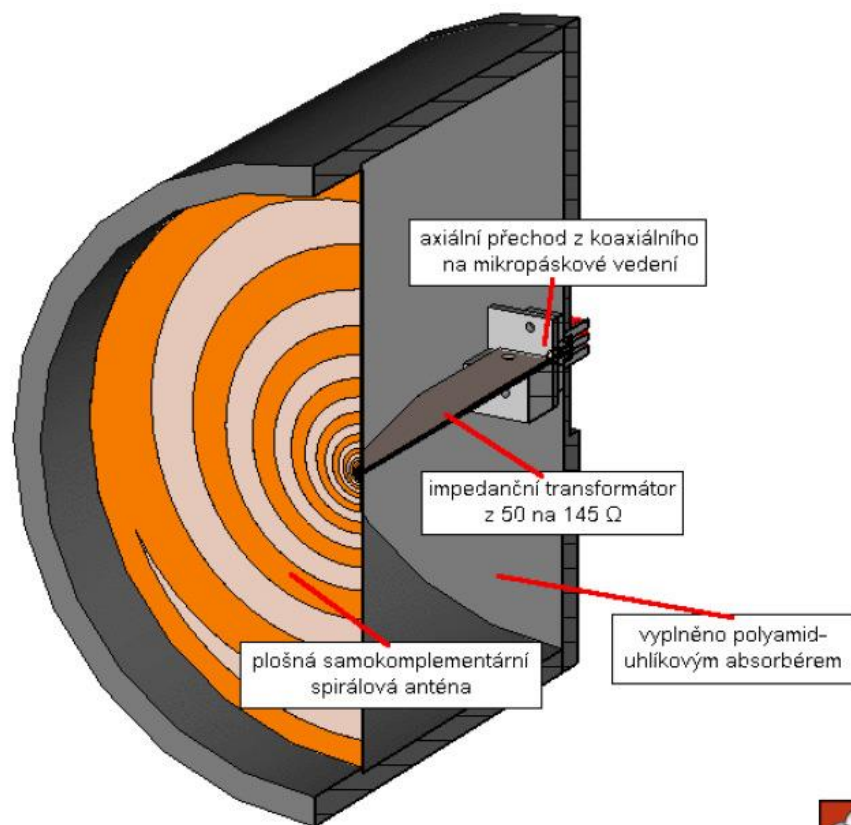




# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

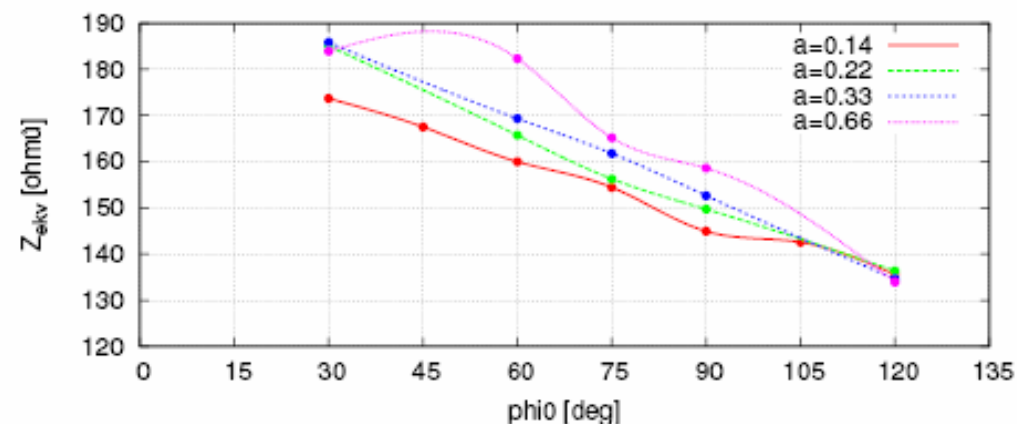
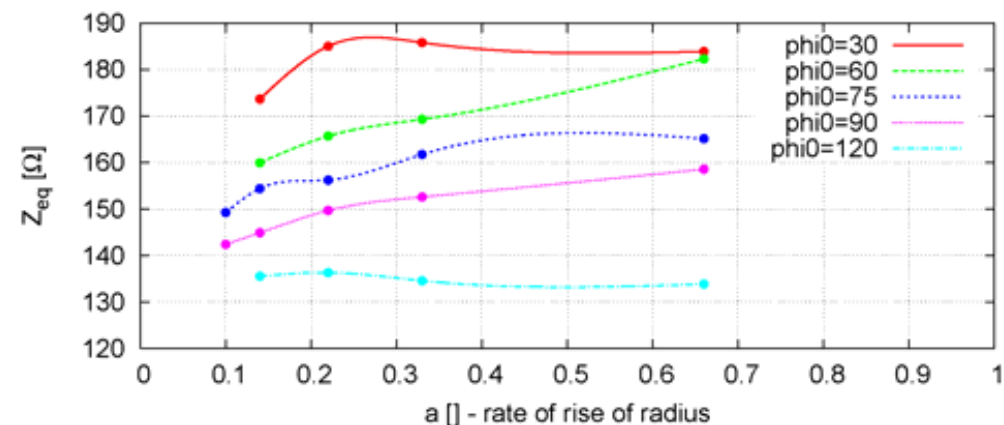
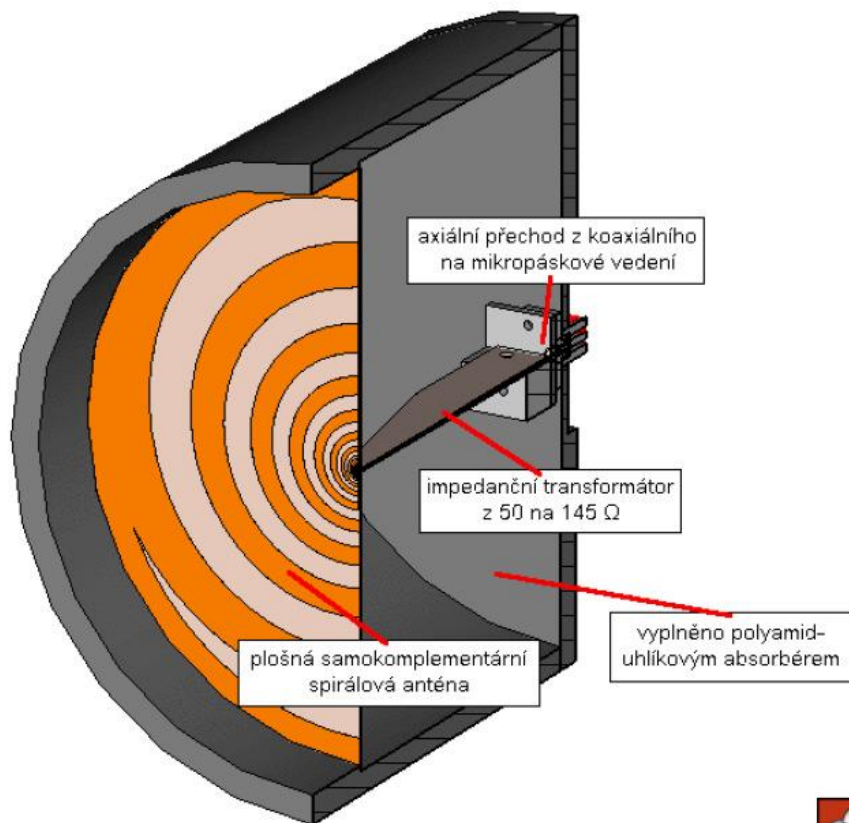
- impedance



# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

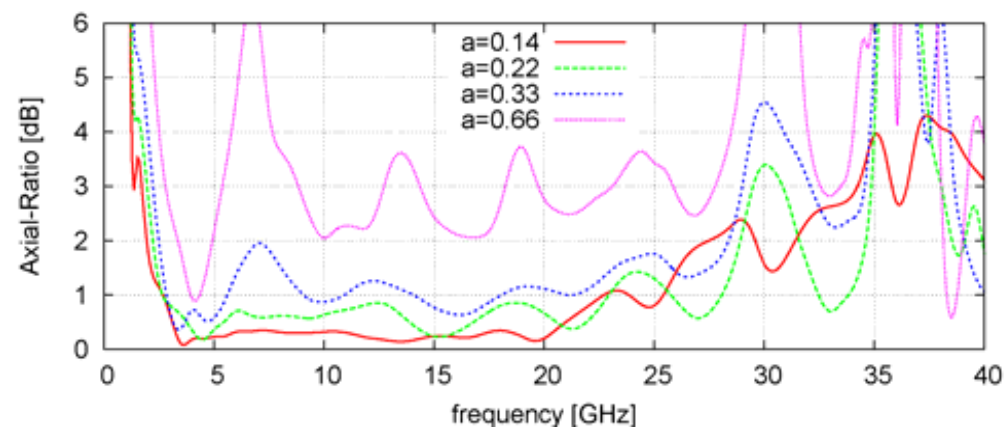
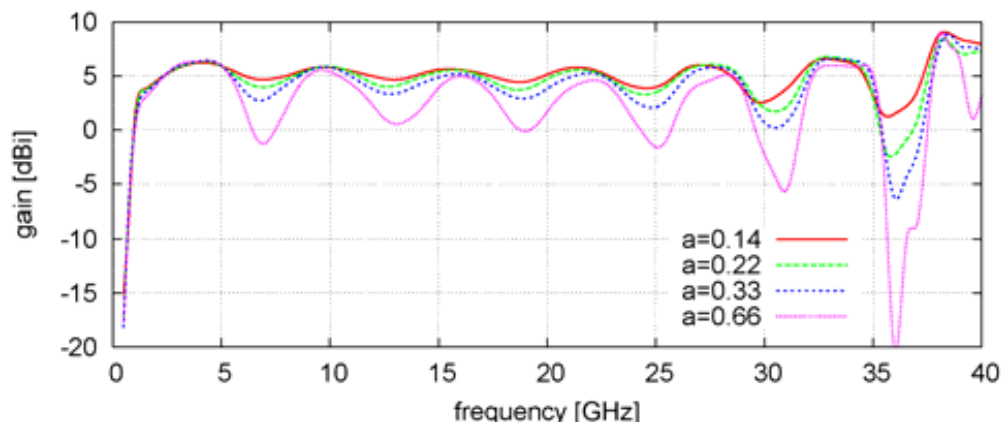
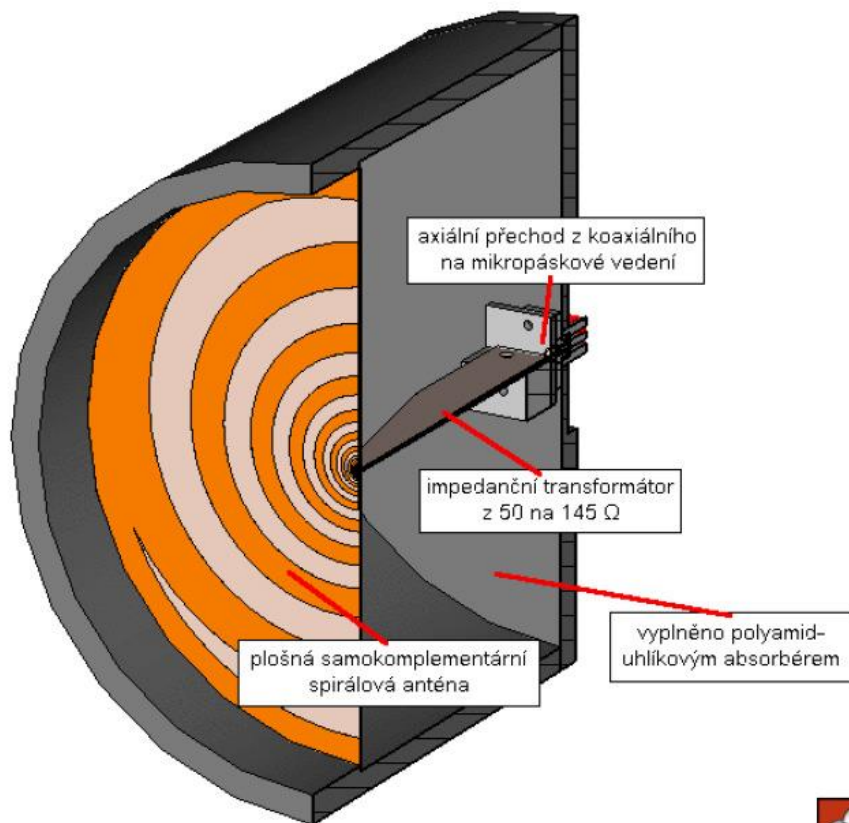
- impedance



# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

- zisk, osový poměr

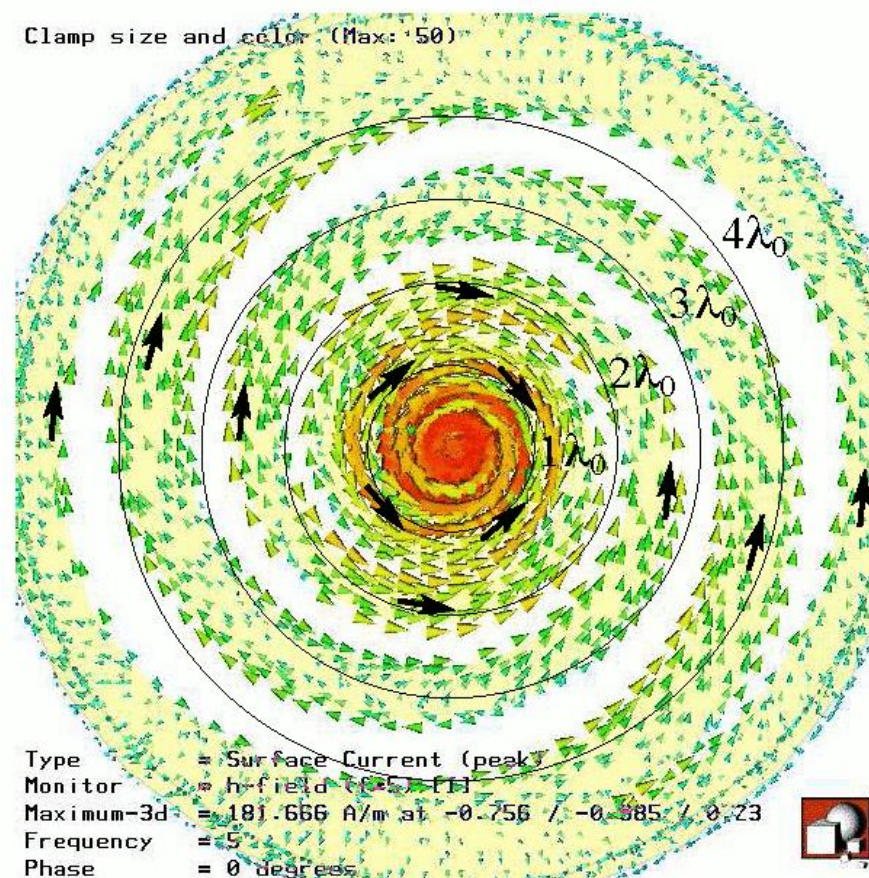
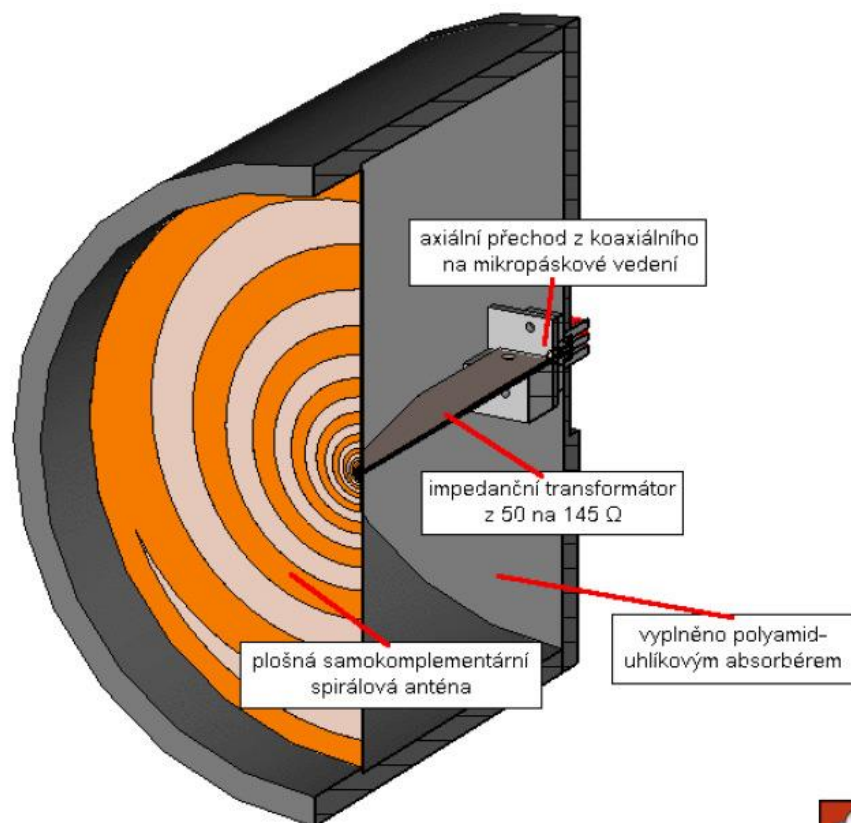




# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

- proudová hustota



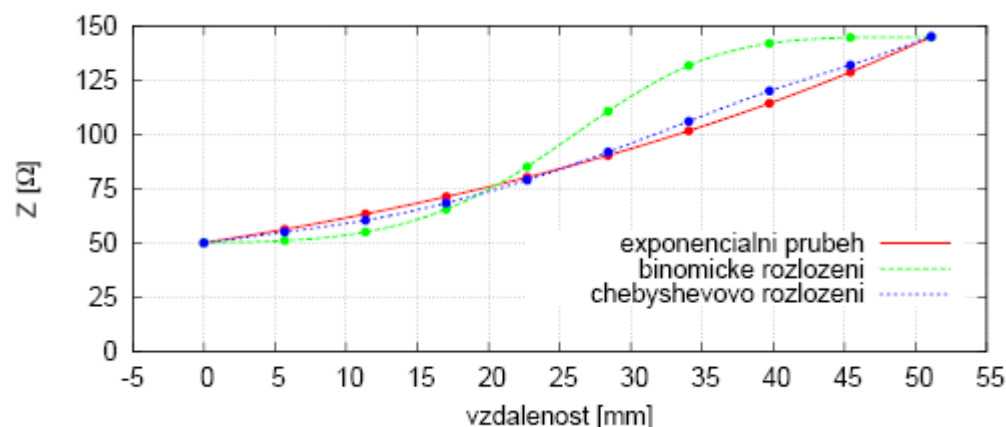
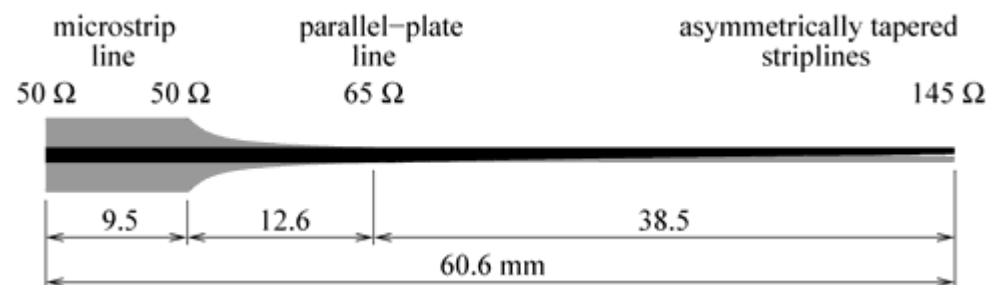
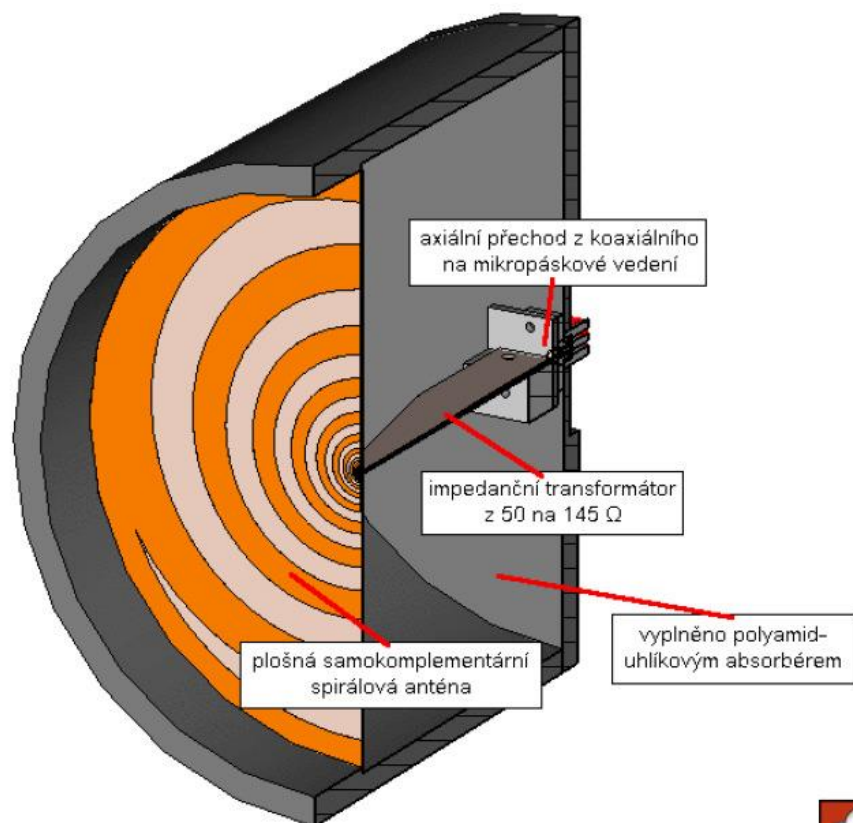
$f = 5$  GHz

[4] Piksa, P., Mazánek, M.: A Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna with Impedance Matching. *Radioengineering*, 2006

# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

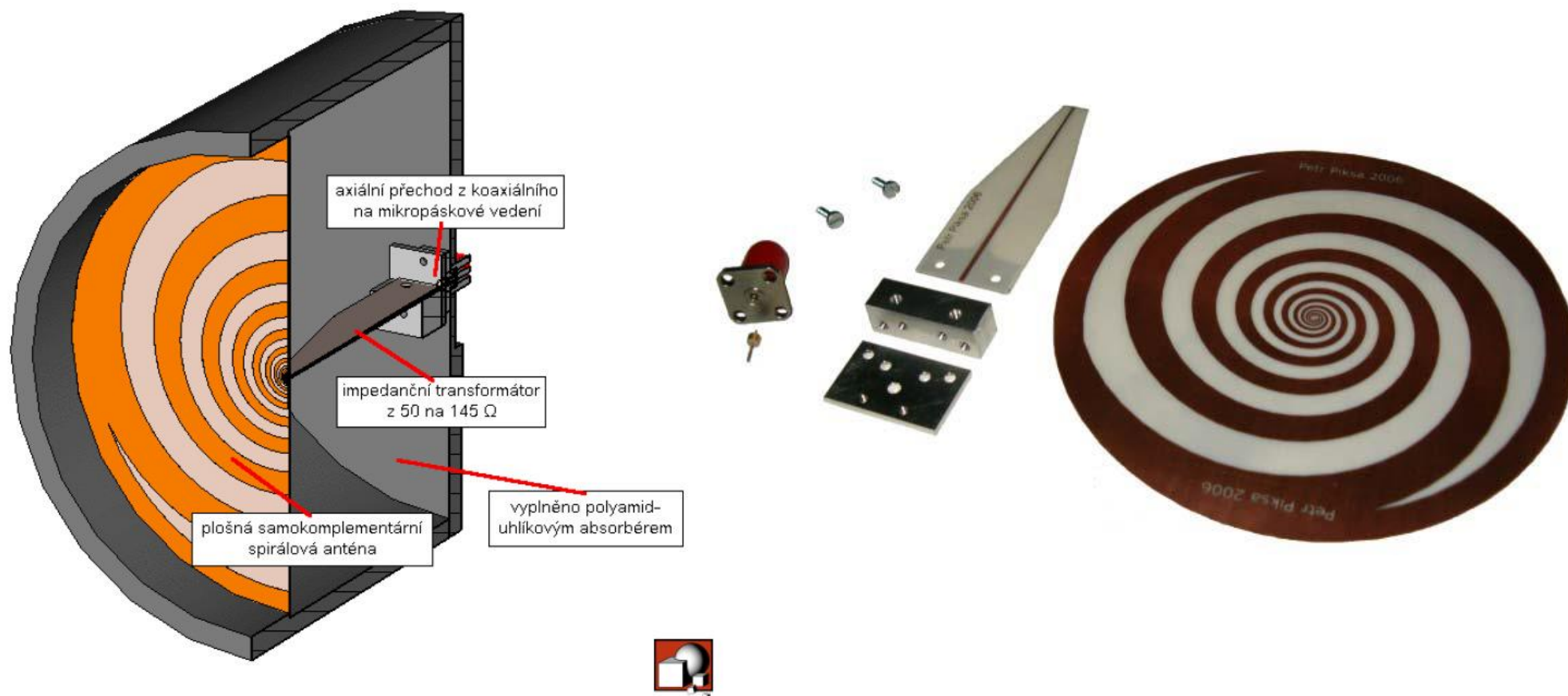
- Impedanční transformátor



# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

- realizace

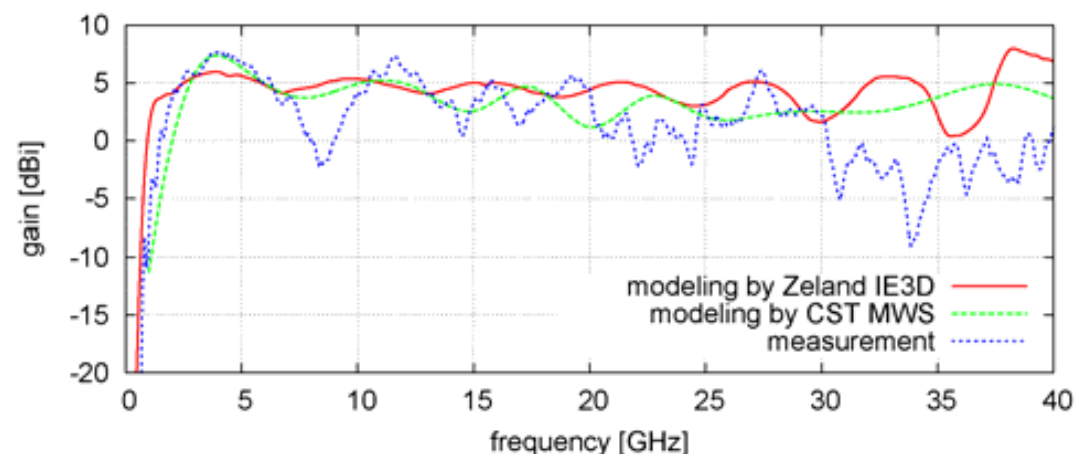
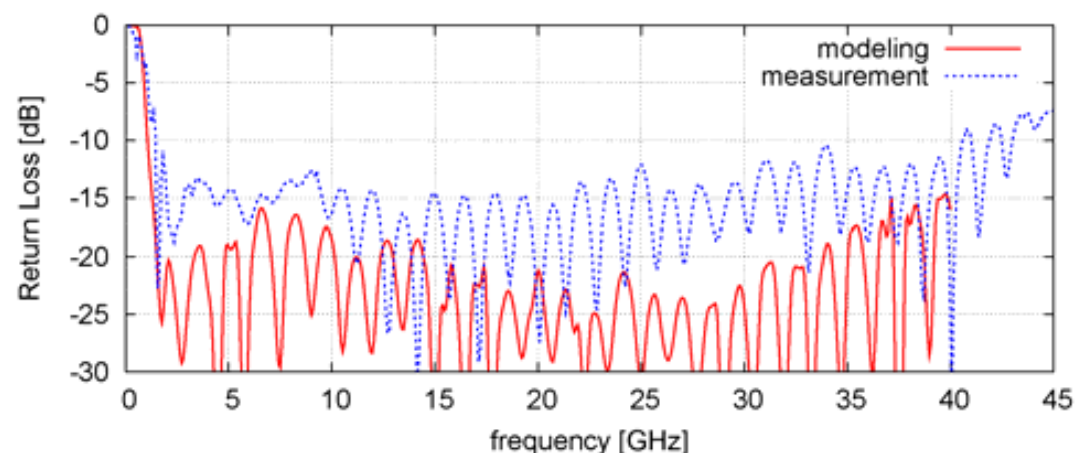
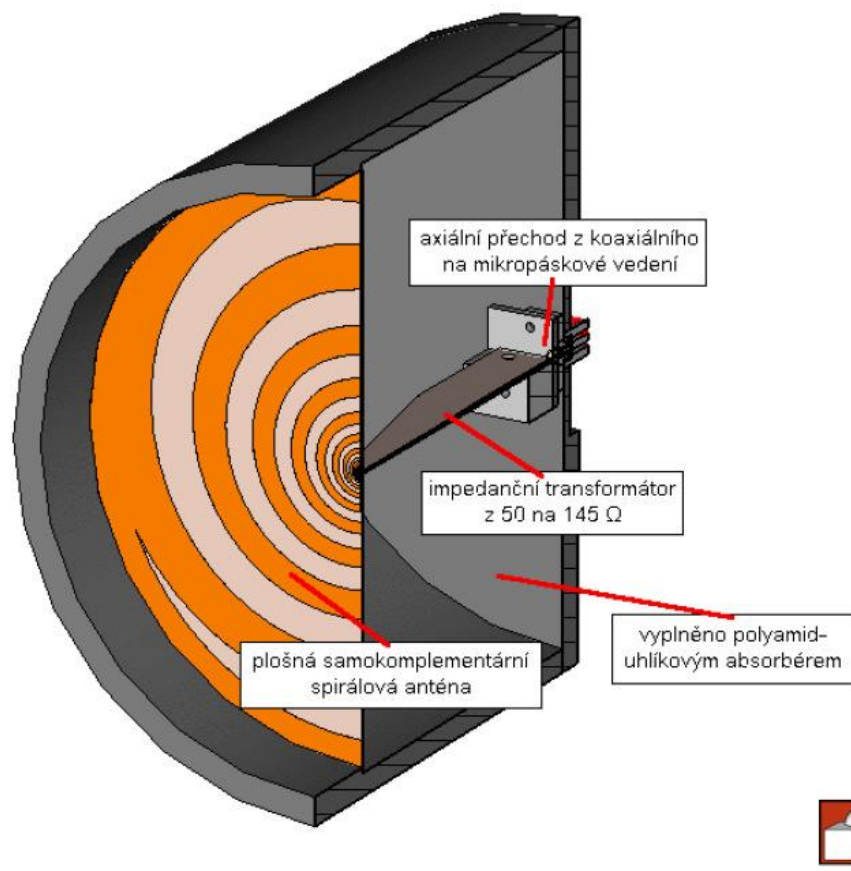




# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

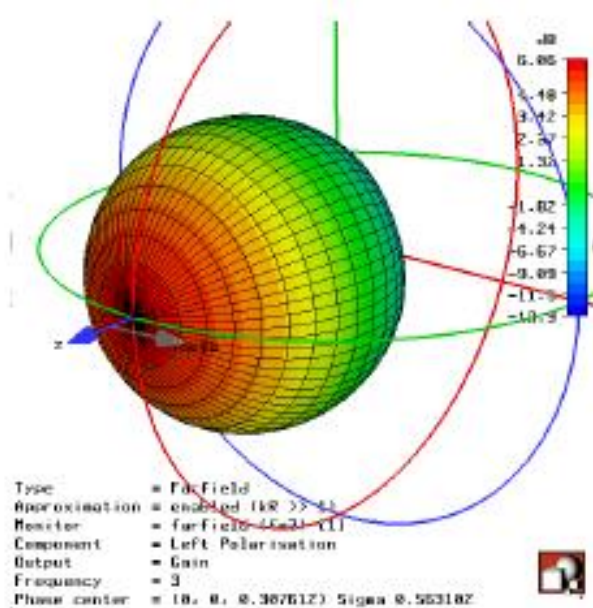
- koeficient odrazu, zisk



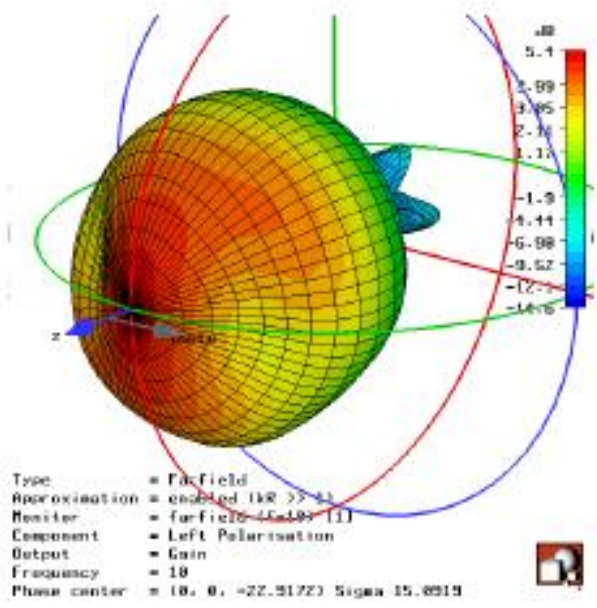
# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

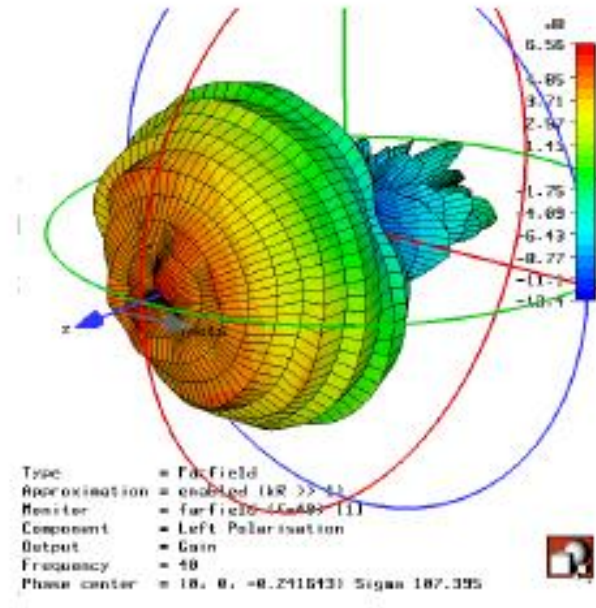
- téměř frekvenčně stálý tvar vyzařovacího diagram
- na vyšších frekvencích vznikají vyšší módy na struktuře, které „navlní“ vyzařovací diagram
- zisk 4 až 6 dBi



$f = 3 \text{ GHz}$



$f = 10 \text{ GHz}$

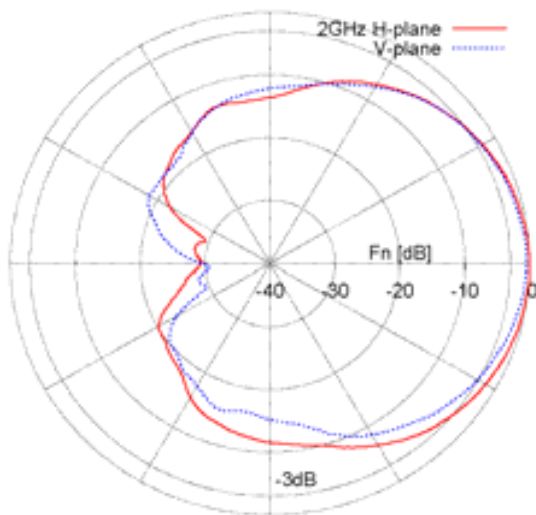


$f = 40 \text{ GHz}$

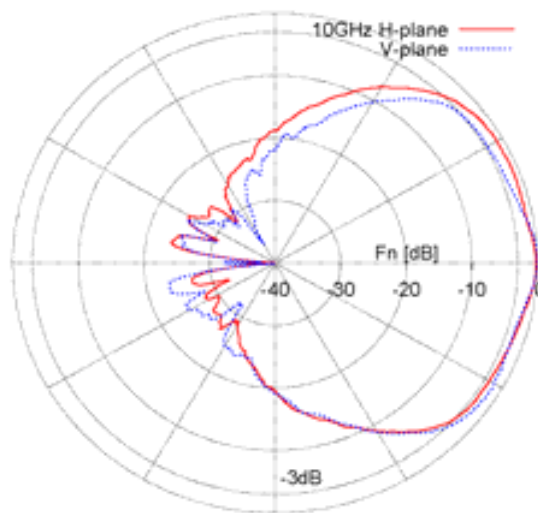
# EM model vs. měření

Př. Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna [4]

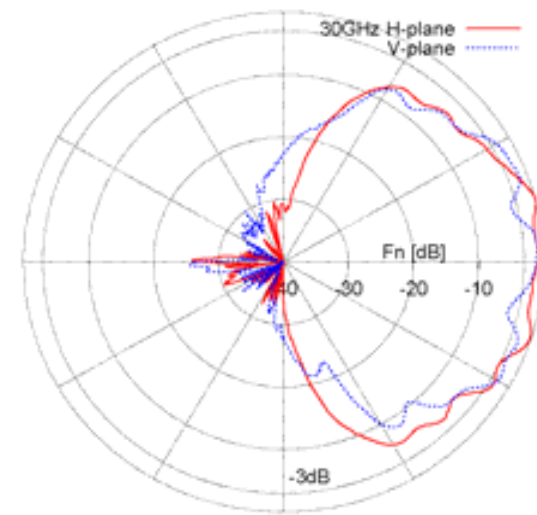
- téměř frekvenčně stálý tvar vyzařovacího diagram
- na vyšších frekvencích vznikají vyšší módy na struktuře, které „zvlní“ vyzařovací diagram
- zisk 4 až 6 dBi



$f = 2$  GHz



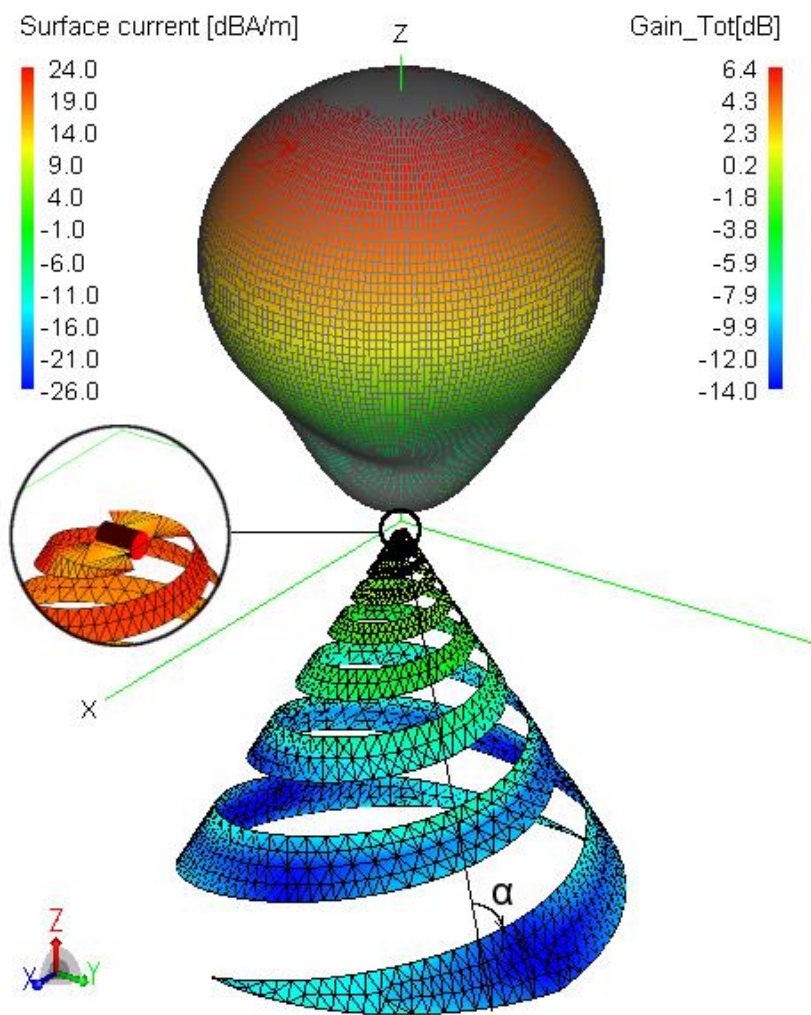
$f = 10$  GHz



$f = 30$  GHz

# EM model vs. měření

Př. Kónická struktura - model FEKO (Piksa)



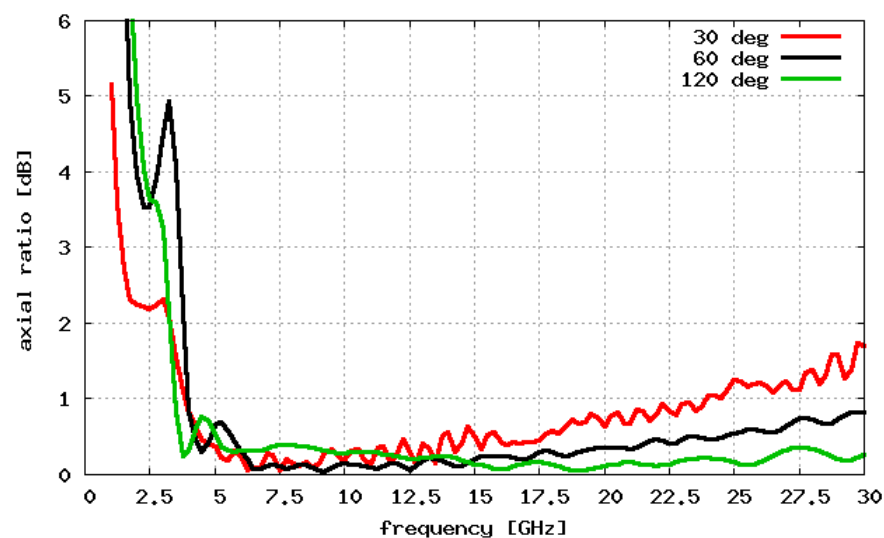
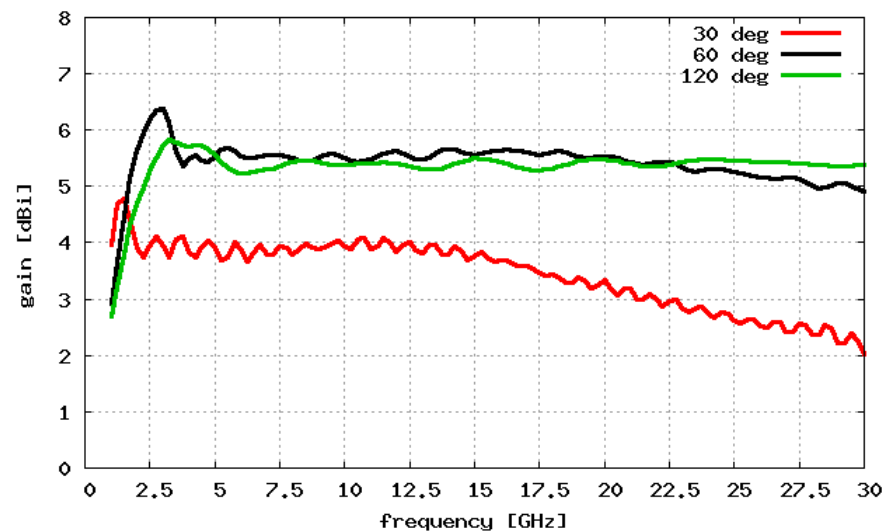
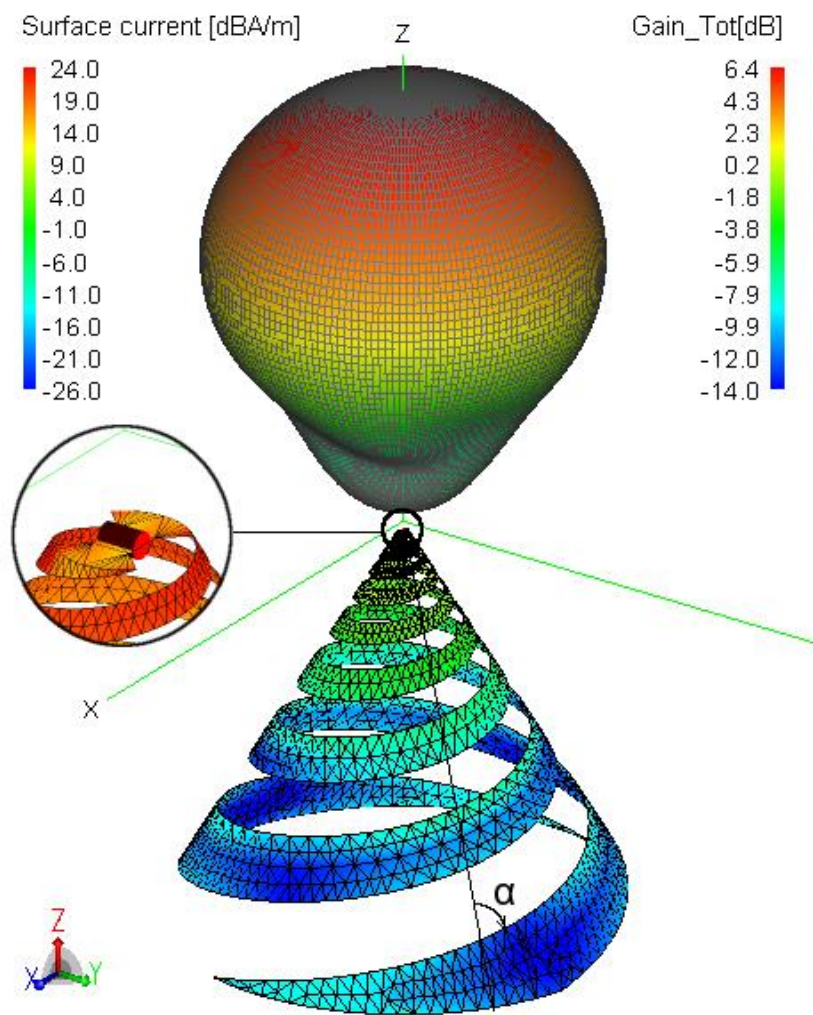
$$r(\varphi) = r_0 e^{b(\varphi+\varphi_0)} \quad , \text{ kde } \quad b = \frac{\sin \vartheta_0}{\tan \alpha} ,$$

$\vartheta_0$  ... polovina úhlu kónusu  
 $\alpha$  ... úhel strmosti spirály



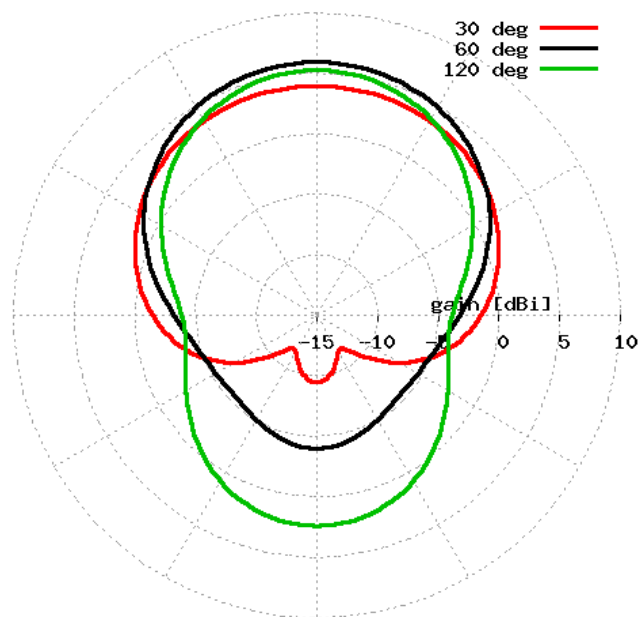
# EM model vs. měření

Př. Kónická struktura - model FEKO (Piksa)

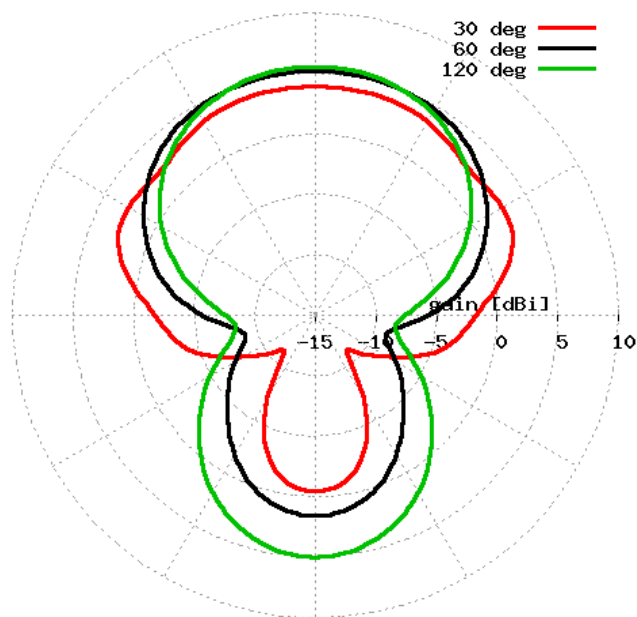


# EM model vs. měření

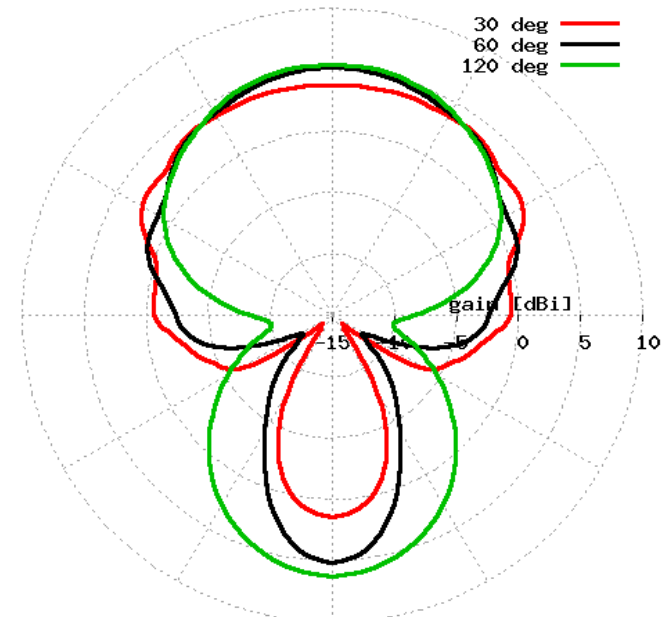
Př. Kónická struktura - model FEKO (Piksa)



$f = 2,5$  GHz



$f = 5$  GHz

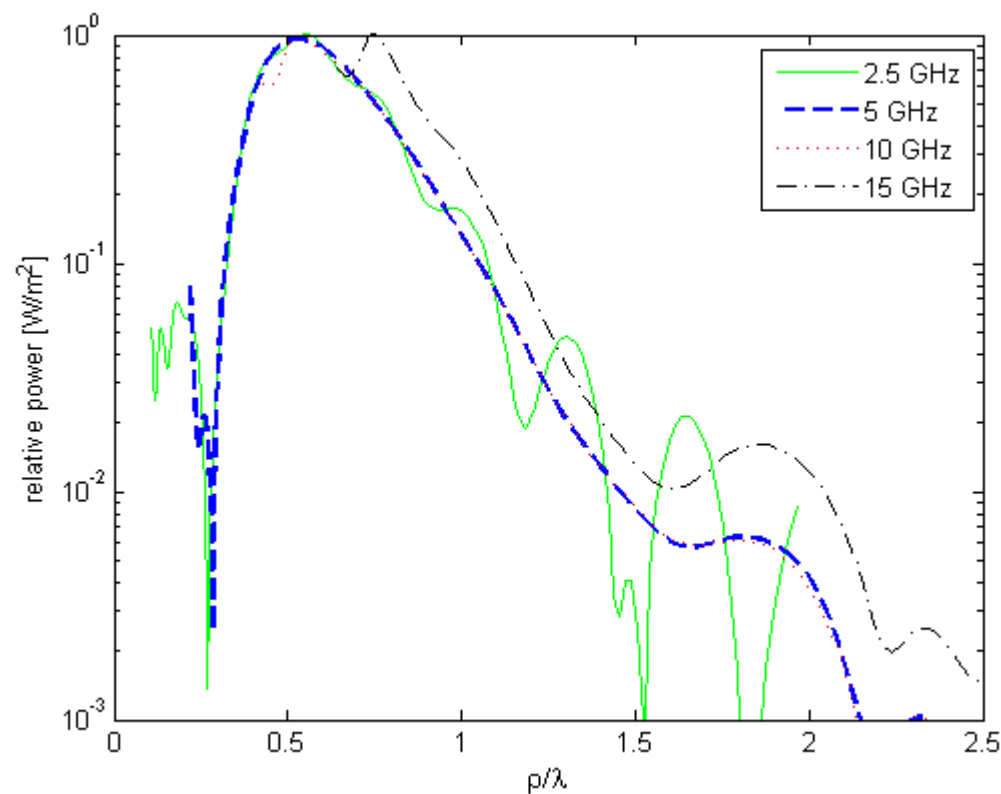
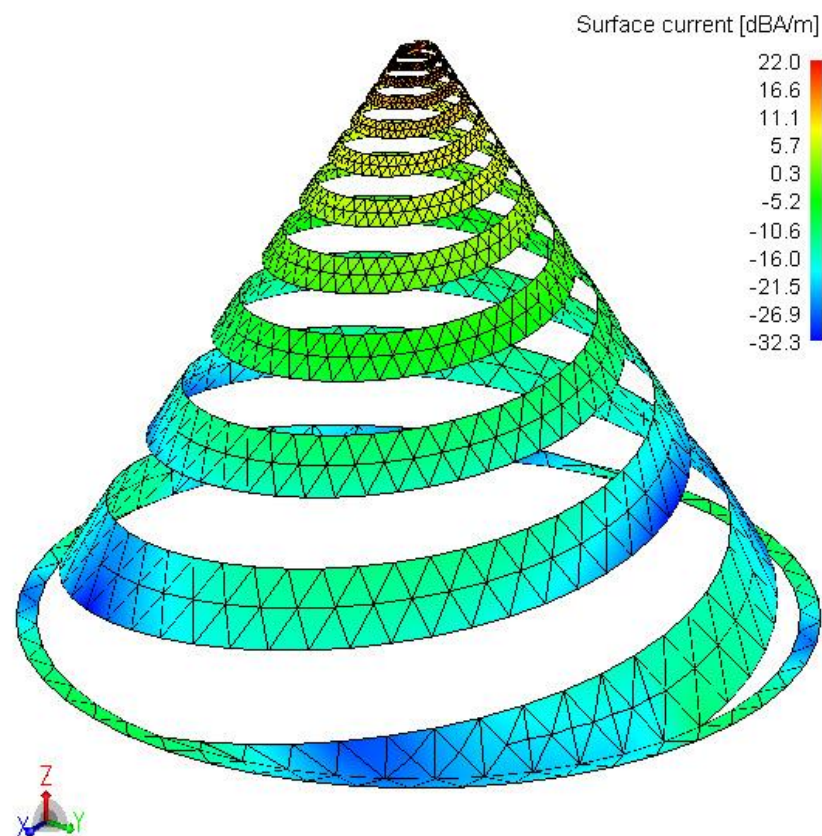


$f = 10$  GHz



# EM model vs. měření

Př. Kónická struktura - model FEKO (Piksa)



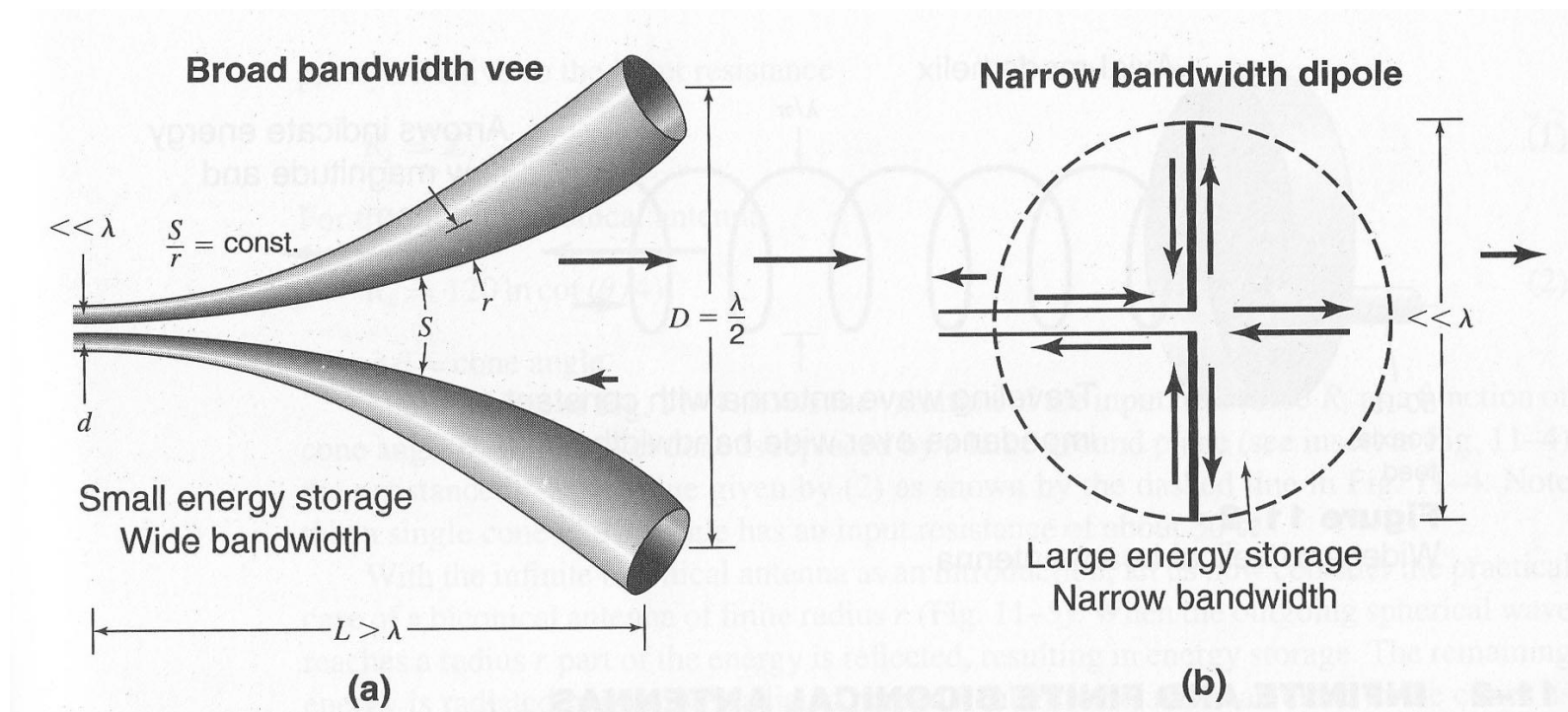
# Použití spirálových antén

- EMC (postačí napájení koaxiálním kabelem),
- širokopásmová měření v malých boxech, anténa málo ovlivnitelná
- širokopásmový ozařovač reflektorových antén



# Širokopásmové dipóly - základy

Širokopásmová x úzkopásmová anténa



## Kuželová dvouvodičová V-anténa

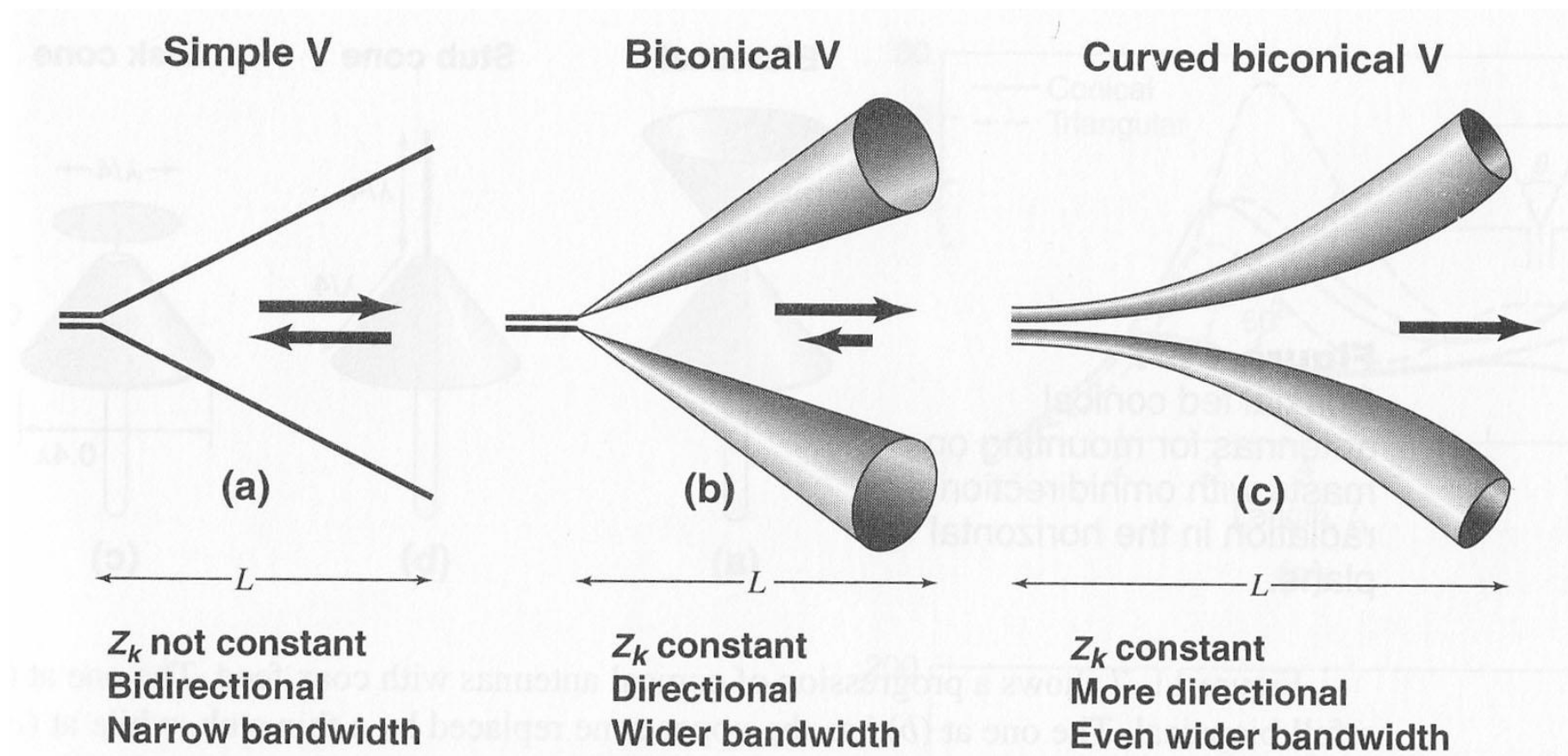
- s postupnou vlnou, malé  $Q$
- geometrie:  $L > \lambda, D = \lambda/2, d \ll \lambda$
- konst. charakt. impedance  $Z_c \sim S/r$
- $BW \sim D:d$

## Tenký (krátký) dipól

- stojatá vlna, velké  $Q$
- Impedance se rychle mění s  $f$
- $BW \sim \propto 1\%$



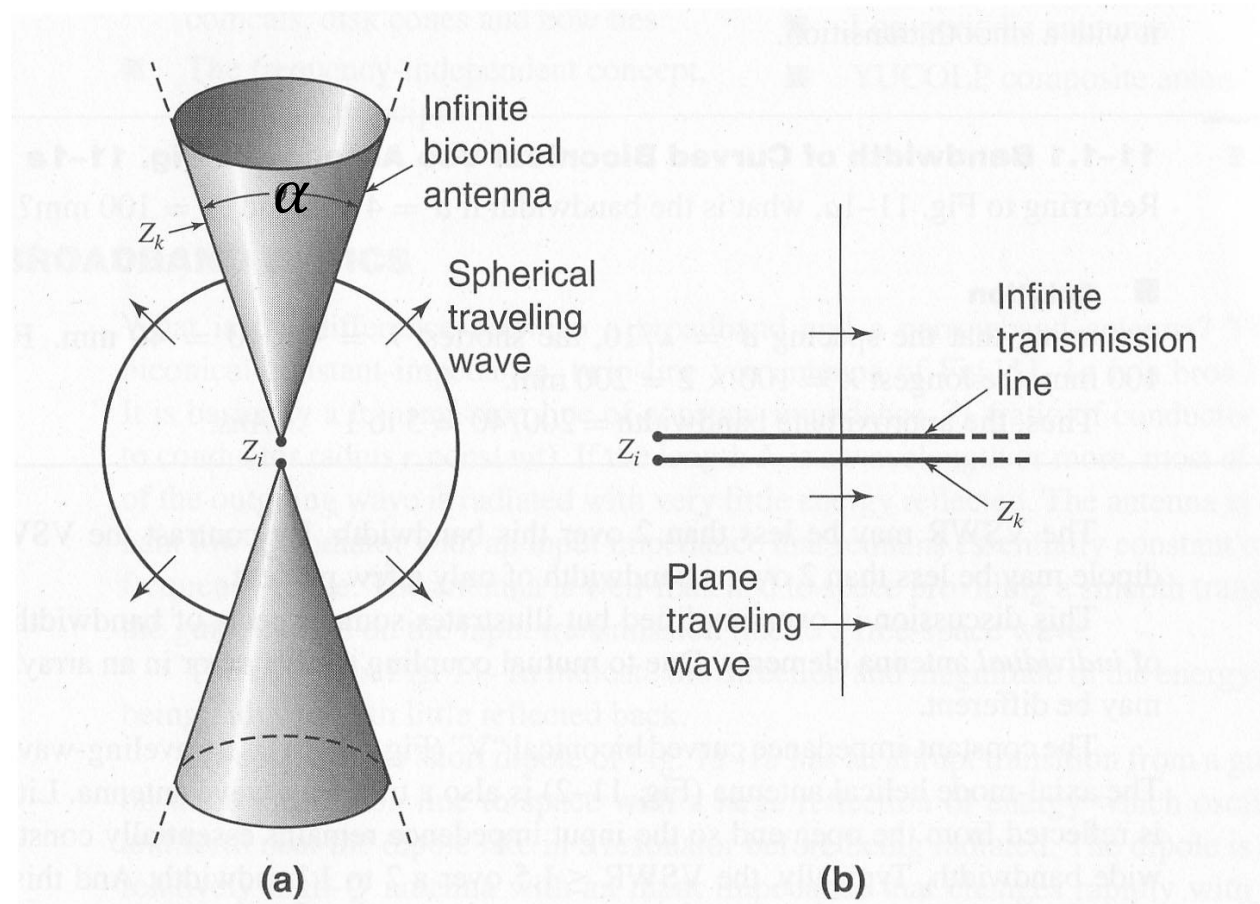
# Dvoukuželová dvouvodičová V-anténa



# Nekonečný kuželový dipól (biconical dipole)

Geometrie, princip činnosti

- vlnovod pro sférickou vlnu – analogie k rovinné vlně na vedení
- obě geometrie mají konstantní charakteristickou impedanci



# Nekonečný kuželový dipól

Vyzážené pole mezi kužely za předpokladu TEM vlny  
odvozením z 1. a 2. Maxwellovy rovnice ve sférickém souřadném systému

$$H_{\phi} = \frac{H_0}{\sin \theta} \frac{e^{-jkr}}{r},$$

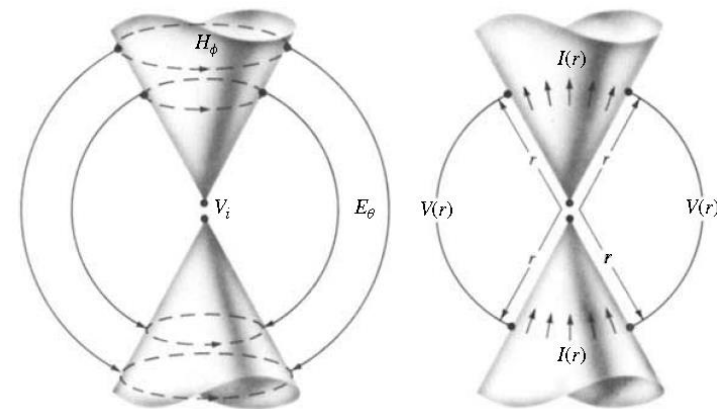
$$E_{\theta} = \eta H_{\phi} = \eta \frac{H_0}{\sin \theta} \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Napětí a proud na/mezi kužely ve vzdálenosti  $r$

$$U(r) = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = (r) = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} (\hat{\mathbf{a}}_{\theta} E_{\theta}) \cdot (\hat{\mathbf{a}}_{\theta} r d\theta) (r) = \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} E_{\theta} r d\theta =$$

$$= \eta H_0 e^{-jkr} \int_{\alpha/2}^{\pi-\alpha/2} \frac{d\theta}{\sin \theta} = \dots = 2\eta H_0 e^{-jkr} \ln \left( \cot g \left( \frac{\alpha}{4} \right) \right)$$

$$I(r) = \int_0^{2\pi} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_0^{2\pi} H_{\phi} r \sin \theta d\phi = H_0 e^{-jkr} \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi H_0 e^{-jkr}$$





# Nekonečný kuželový dipól

Vstupní impedance charakteristická impedance

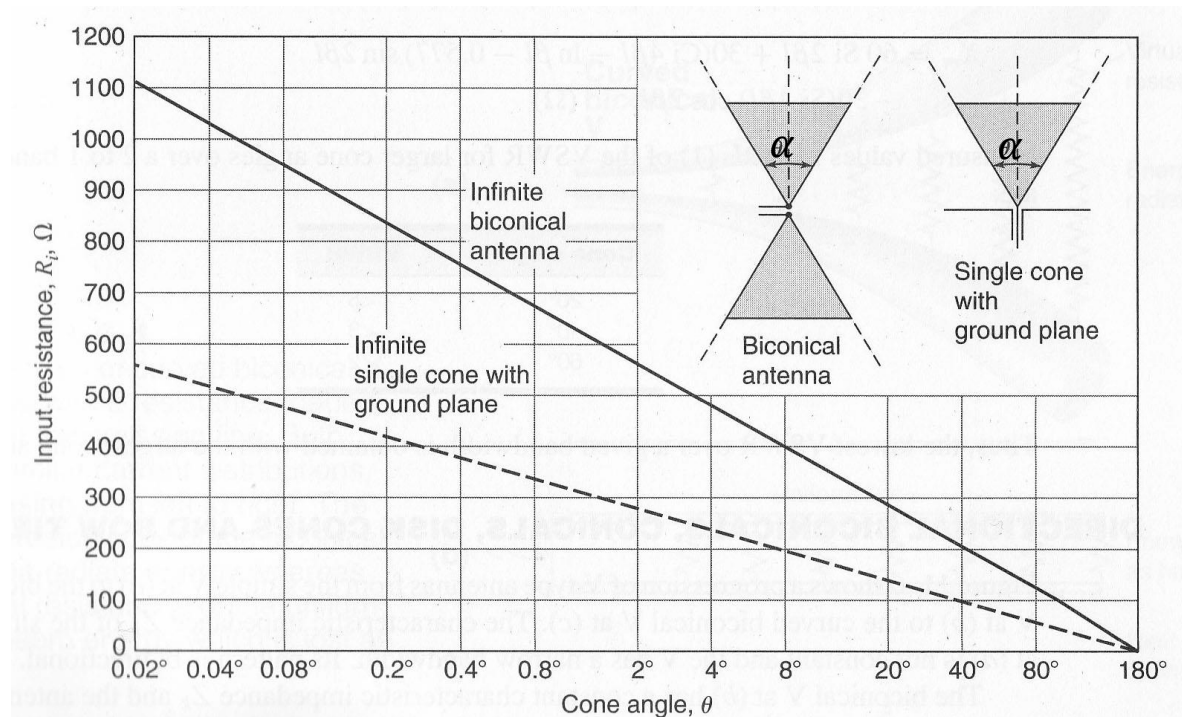
$$Z_c = \frac{U(r)}{I(r)} = \frac{\eta}{\pi} \ln \left( \cot g \left( \frac{\alpha}{4} \right) \right)$$

- vstupní impedance – není funkcí vzdálenosti  $r$

$$Z_{in} = Z_c = 120 \ln \left( \cot g \left( \frac{\alpha}{4} \right) \right)$$

Pro malé úhly  $\alpha$

$$Z_{in} = 120 \ln \left( \frac{4}{\alpha} \right)$$



# Konečný kuželový dipól

## Vstupní impedance

$$Z_{in} = Z_c \frac{Z_c + jZ_m \operatorname{tg}(\beta r)}{Z_m + jZ_c \operatorname{tg}(\beta r)}$$

where

$r$  = cone length,  $m$

$\beta = 2\pi/\lambda$

$Z_k = 120 \ln \cot(\theta/4)$

$Z_m = R_m + jX_m$

The  $R_m$  and  $X_m$  values are given by Schellkunoff (1) for thin cones ( $\theta < 5^\circ$ ) by

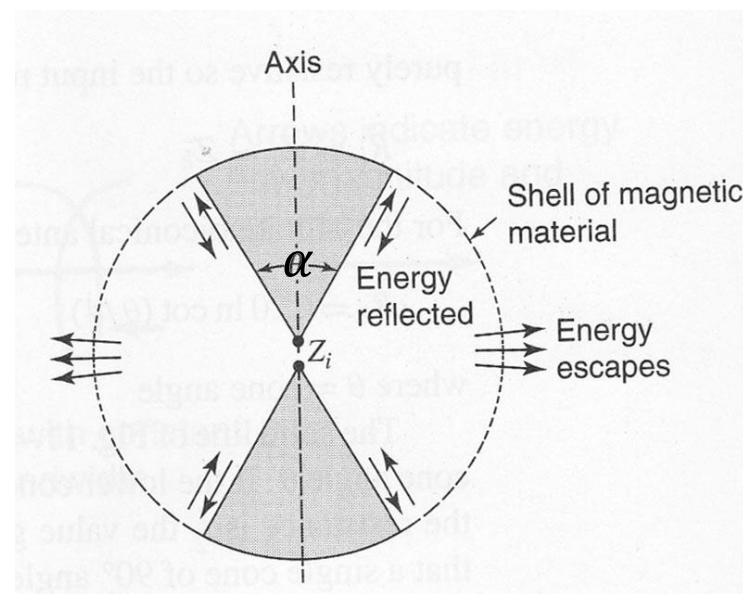
$$R_m = 60 \operatorname{Cin} 2\beta l + 30(0.577 + \ln \beta l - 2 \operatorname{Ci} 2\beta l + \operatorname{Ci} 4\beta l) \cos 2\beta l + 30(\operatorname{Si} 4\beta l - 2 \operatorname{Si} 2\beta l) \sin 2\beta l \quad (\Omega) \quad (4)$$

$$X_m = 60 \operatorname{Si} 2\beta l + 30(\operatorname{Ci} 4\beta l - \ln \beta l - 0.577) \sin 2\beta l - 30(\operatorname{Si} 4\beta l) \cos 2\beta l \quad (\Omega) \quad (5)$$

Measured values by RRL (1) of the VSWR for larger cone angles over a 2 to 1 bandwidth are:

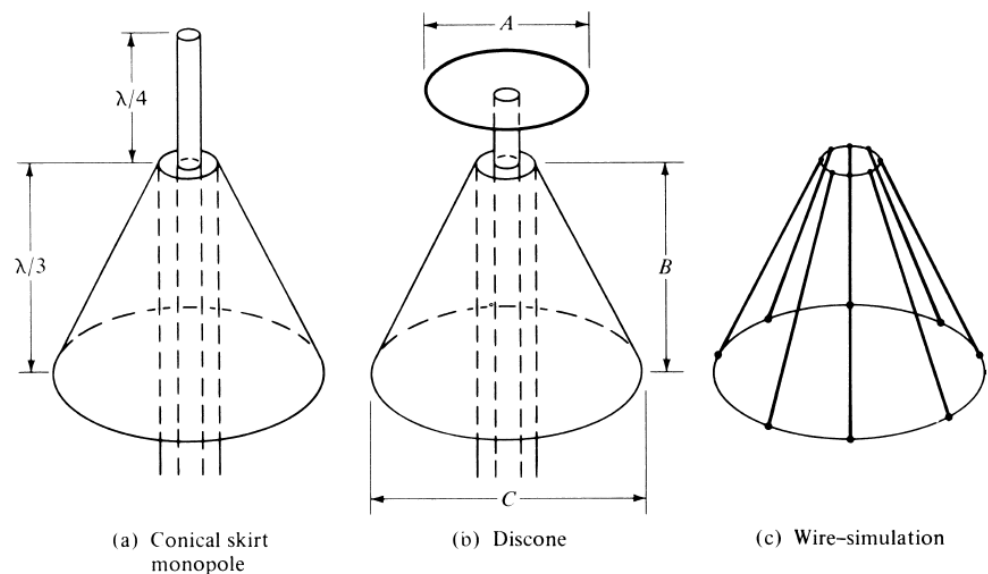
Cone angle	VSWR
20°	<5
40°	<3
60°	<2

Thus, the lowest VSWR over a given bandwidth is obtained with the largest cone angle.



# Diskónový dipól (Discone dipole)

- „Diskuželový“ dipól



**Figure 9.18** Conical skirt monopole, discone, and wire-simulated cone surface.





# Motýlkový dipól

