

Návrh a Konstrukce Antén

A0M17NKA

Elektricky malé antény II. Návrhové aspekty

Milan Polívka
ČVUT v Praze, FEL
B2: 639, I.2270
polivka@fel.cvut.cz

zima 2023/24



Osnova

- Principiální omezení malých antén - shrnutí
- Impedanční vlastnosti jednoduchých malých antén (dipól, smyčka)
- Techniky zvyšování zářivého odporu
- Základní techniky zmenšování rozměrů liniových a flíčkových antén
- Vliv externích přizpůsobovacích obvodů na BW
- Vliv zemní roviny na BW
- Příklady malých antén (mobilní telefony, SMT antény, ..)
- Praktická doporučení pro návrh malých antén (II.)

Elektricky malé antény

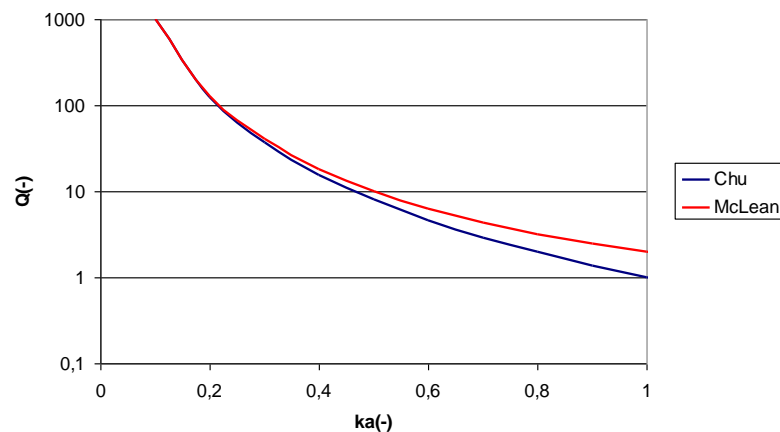
Elektricky malá anténa: **$ka < 0,5$**

Pro TM_{10} mód (dipól) – limitní vztah pro Q ($\sim 1/BW$)

$$Q_{\text{Chu-McLean}} = \frac{2\omega\tilde{W}_e}{P_{\text{zář}}} = \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}$$

$$Q_{\text{Thal}} \approx \frac{1.5}{(ka)^3} + \frac{0.6}{ka}$$

$$Q_{\text{Gustaffson}} = \frac{1,5}{(ka)^3 \gamma_{1,\text{norm}}}$$



Optimální tvar a proudová/nábojová hustota

Gustafsson a kol. (IEEE TAP, 2012)

- limit D/Q pro elektricky malé antény lze formulovat jako **variační problém**

$$\frac{D_e}{Q_e} \leq \max_{\rho} \frac{k^3}{4\pi} \frac{|\int \hat{e}^* \cdot \mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) dV|^2}{\int_V \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}_1) \rho^*(\mathbf{r}_2)}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} dV_1 dV_2}$$

$$\min_{\rho} \int_V \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}_1) \rho^*(\mathbf{r}_2)}{4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} dV_1 dV_2$$

Řešením pro kulovou geometrii je **několik optimálních rozložení proudových hustot**, které mají **identické**

rozložení **nábojové hustoty** ($\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega\rho$)

$$\rho(\vartheta, \varphi) = \rho_0 \cos \vartheta$$

poskytující minimální Q nebo optimální D/Q

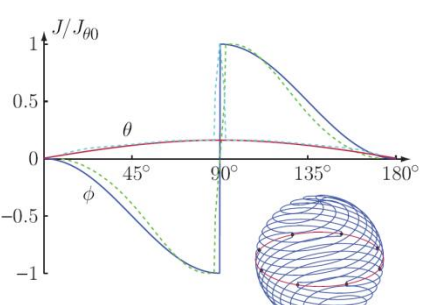
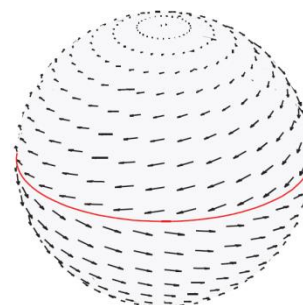
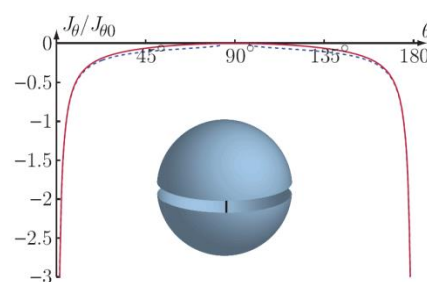
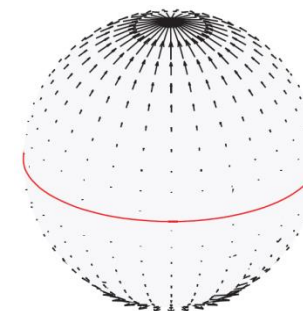
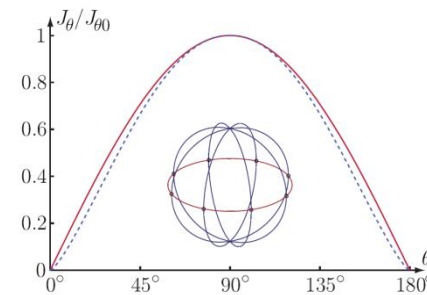
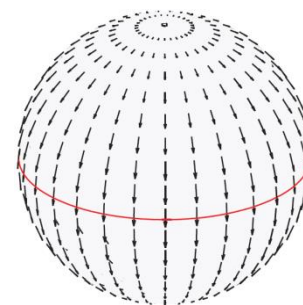
- skládaný kulový dipól $J_0 \sin \vartheta \hat{\vartheta}$

- kapacitně zatížený kulový dipól $J_0(\sin \vartheta - 1/\sin \vartheta) \hat{\vartheta}$

- skládaná kulová šroubovice (viz dále Best, 2004)

$$J_0(0,15 \sin \vartheta \hat{\vartheta} - \text{sign}(\cos \vartheta) \sin^2 \vartheta \hat{\varphi})$$

A co $Z_{in}(\Gamma)$?



Zářivý odpor

1. **Numericky**, z proudu určeného např. MoM a svork. napětí: $Z_{\text{vst}} = U_{\text{vst}}/I_{\text{vst}}$
2. **Analyticky**, z **komplexního Poyntingova teorému**, bezeztrátové prostředí:

$$P_{\text{vst}} = -\frac{1}{2} \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{s} = P_{\text{zář}} + j2\omega(\tilde{W}_m - \tilde{W}_e)$$

Na povrchu dokonalého vodiče lze nahradit \mathbf{H}^* proudovou hustotou \mathbf{J}^* ($\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_s = \mathbf{J}$); **anténu** považujeme za **obvod** s impedancí Z_{vst} protékaný na svorkách proudem I_{vst}

$$P_{\text{vst}} = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}^* dV = P_{\text{zář}} + j2\omega(\tilde{W}_m - \tilde{W}_e) = \frac{1}{2} U_{\text{vst}} I_{\text{vst}}^* = Z_{\text{vst}} \frac{|I_0|^2}{2}$$

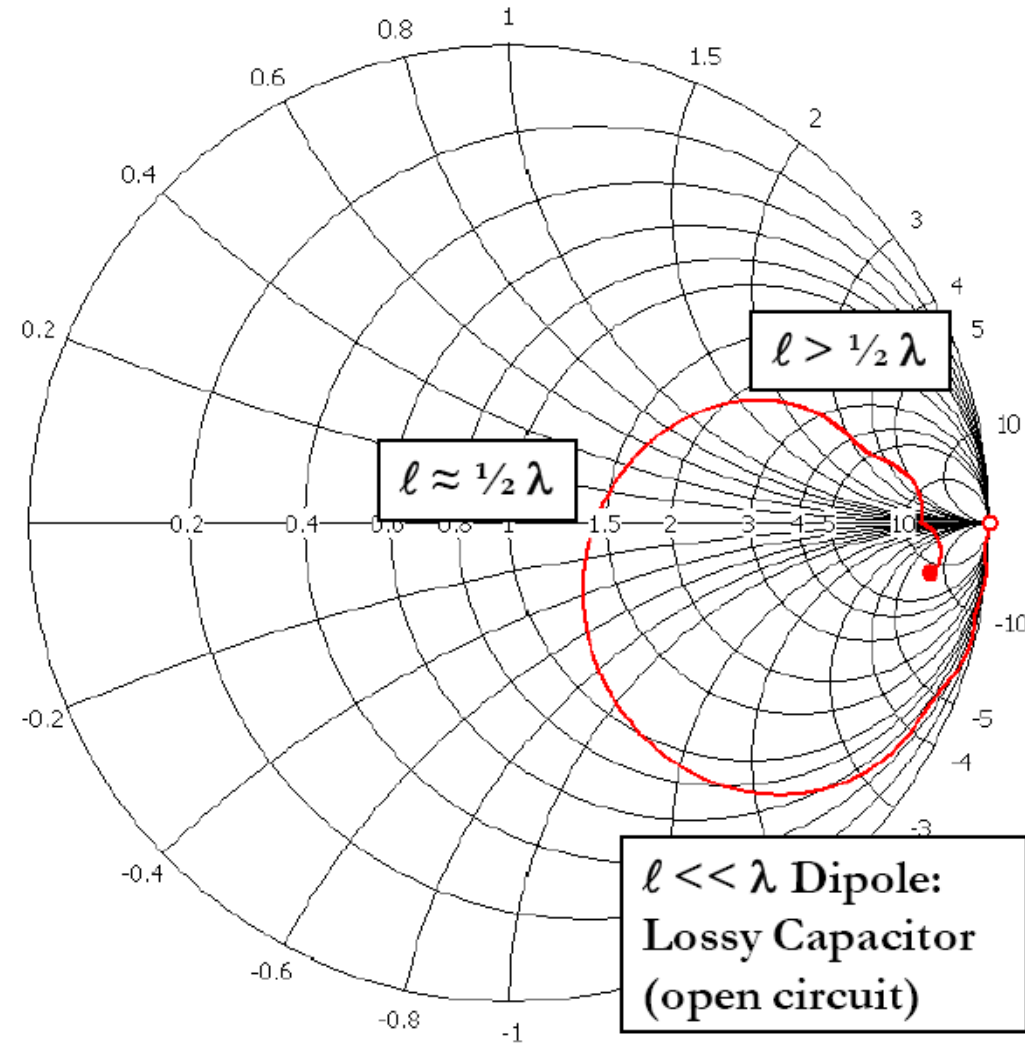
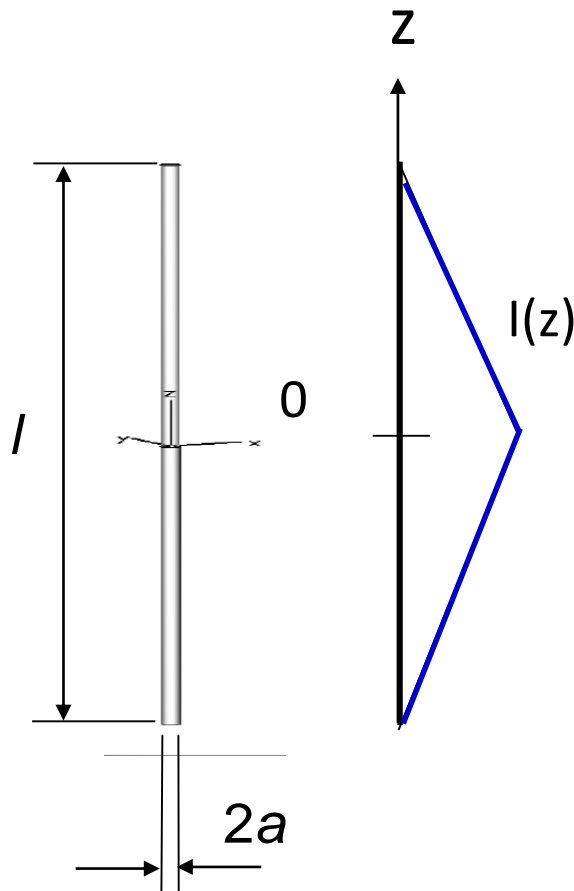
Komplexní výkon $P_{\text{zář}}$ pohybující se v radiálním směru od **infinitesimálního dipólu** délky $l \ll \lambda$ (prakticky $l < \lambda/50$) s **konst.** proudovou hustotou $I_0 = \text{konst.}$ určíme ze složek E_θ, H_ϕ^*

$$P_{\text{zář}} = \oint_S \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \dots = Z_0 \frac{\pi}{3} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[1 - j \frac{1}{(kr)^3} \right]$$

$$\text{Zářivý odpor } R_{\text{zář}} = \frac{2P_{\text{zář}}}{|I_0|^2} = Z_0 \frac{2\pi}{3} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 = 20(kl)^2$$

Vlastnosti elektricky krátkého dipólu

- Trojúhelníková aproximace rozložení proudové hustoty
(vhodná pro $\lambda/50 \leq l < \lambda/10$), $l = 2h$



Vlastnosti elektricky krátkého dipólu

- Zářivý (vyzařovací) odpor R_{rad} s trojúhelníkovou aproximací proudu

$$R_{rad} = 20 \left(\frac{\pi l}{\lambda} \right)^2 = 5(kl)^2 = 20(kh)^2$$

- Ztrátový odpor R_{loss}

$$R_{loss} = \frac{a}{2\delta} R_s \frac{l}{3}$$

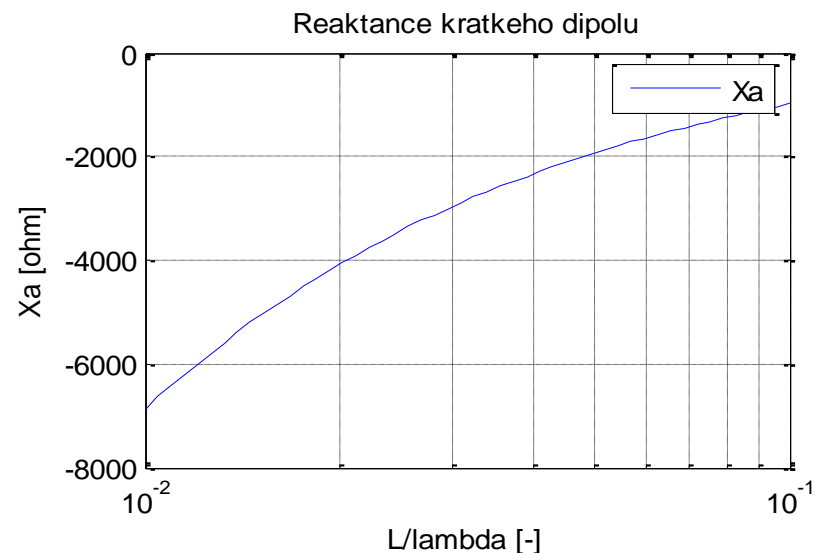
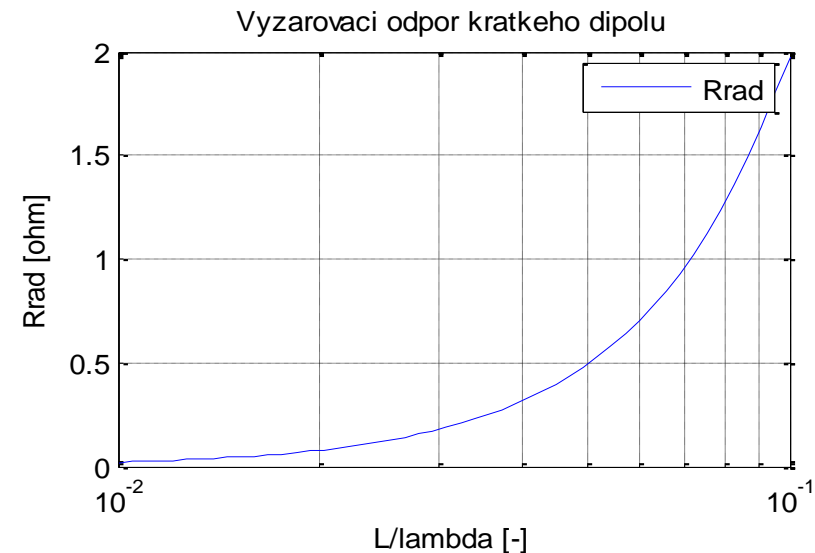
R_s je rezistivita [Ω/m], δ je hloubka vniku [m]

- Reaktance X_a

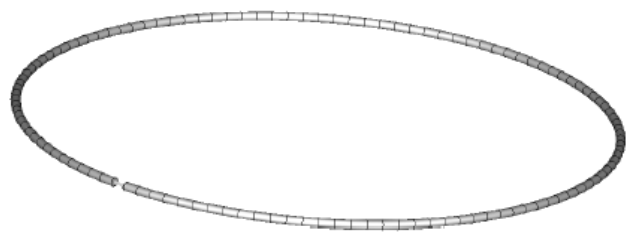
$$X_a = 120 \left(1 - \ln \frac{l}{a} \right) / \text{tg}(kl)$$

- Vyzařovací účinnost

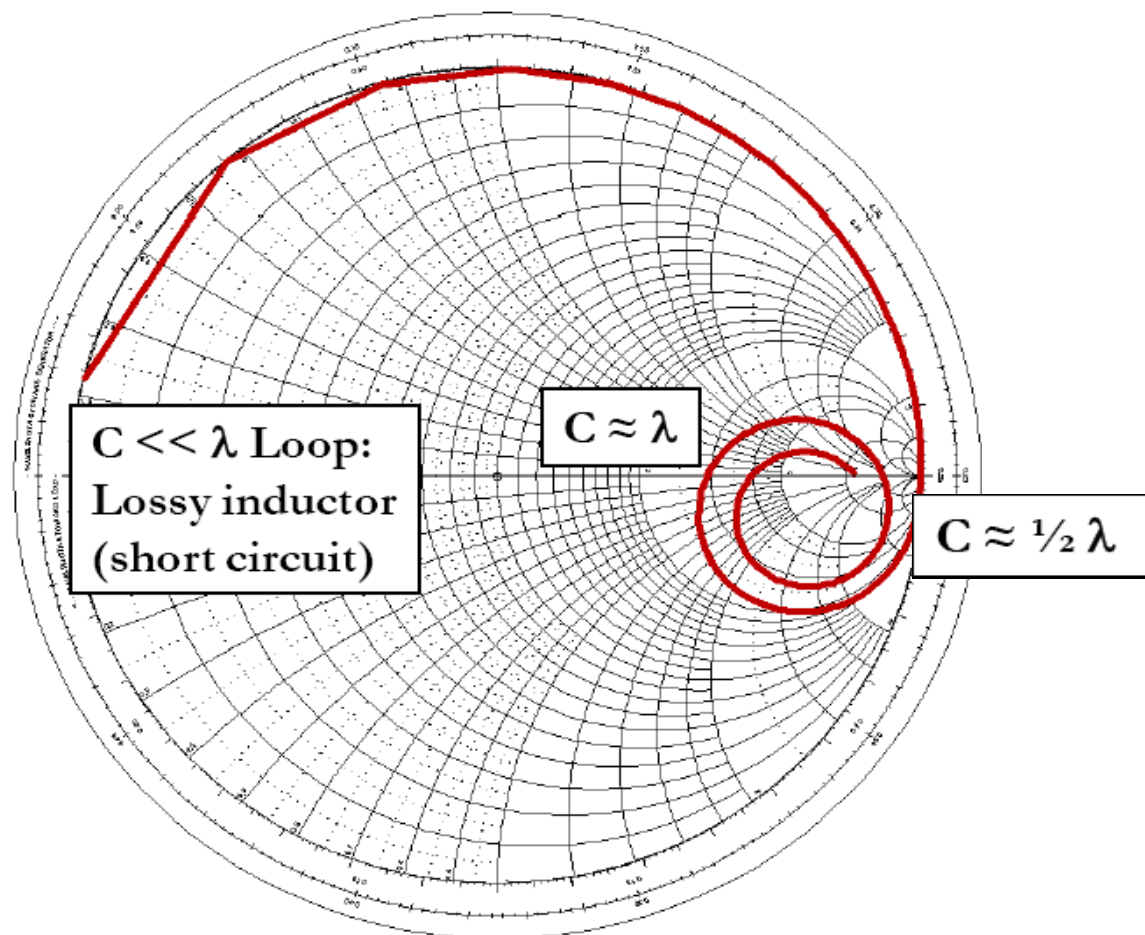
$$\eta = \frac{R_R}{R_R + R_L}$$



Vlastnosti elektricky malé smyčky



C - obvod smyčky
 D - průměr smyčky
 a - poloměr vodiče
 N – počet závitů (více)smyčky



Vlastnosti elektricky malé smyčky

- Zářivý odpor R_{rad}

$$R_{\text{rad}} = 20\pi^2 N^2 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4, \quad NC < \lambda / 10$$

- Ztrátový odpor R_{loss}

$$R_{\text{loss}} = \frac{R_s D}{2a} = \frac{D}{2a\sigma\delta}, \quad \text{kde}$$

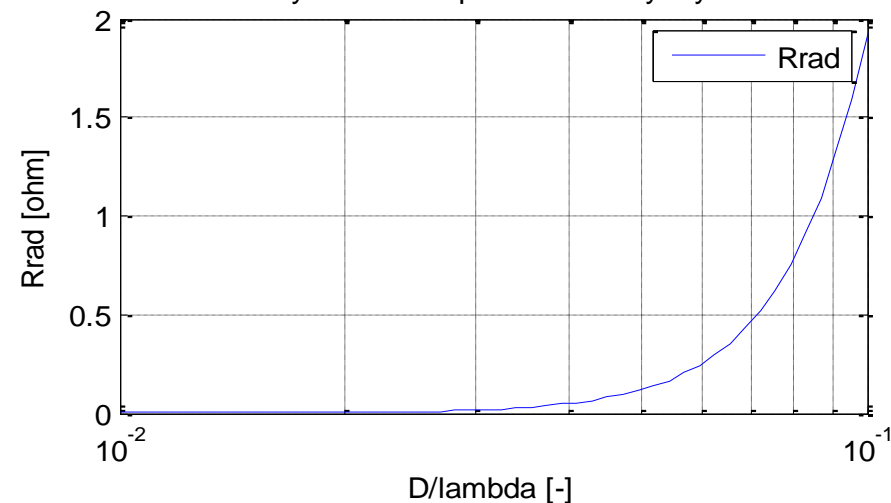
R_s je povrchová resistivita [Ω/m^2],

σ je vodivost [S/m], δ je hloubka vniku [m]

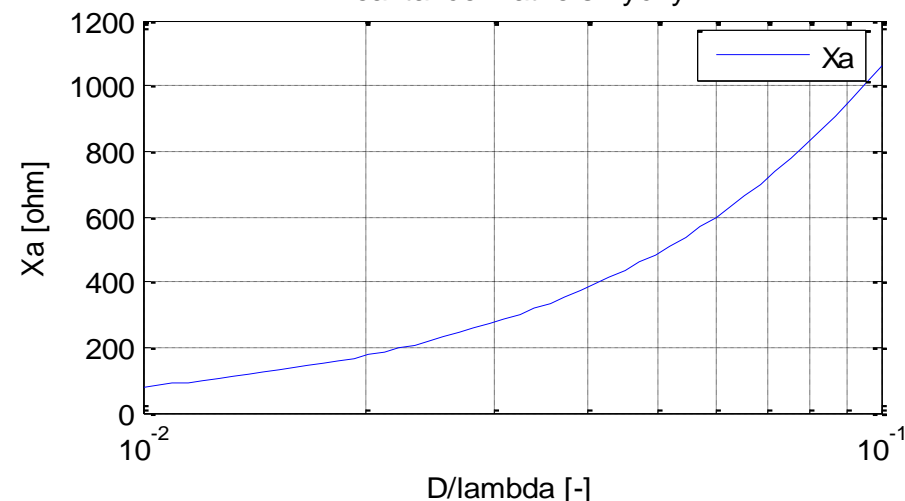
- Reaktance X_a

$$X_a = 60\pi k D \left(\ln \left(\frac{4D}{a} - 2 \right) \right), \quad D \gg a$$

Vyzařovací odpor kratke smyčky



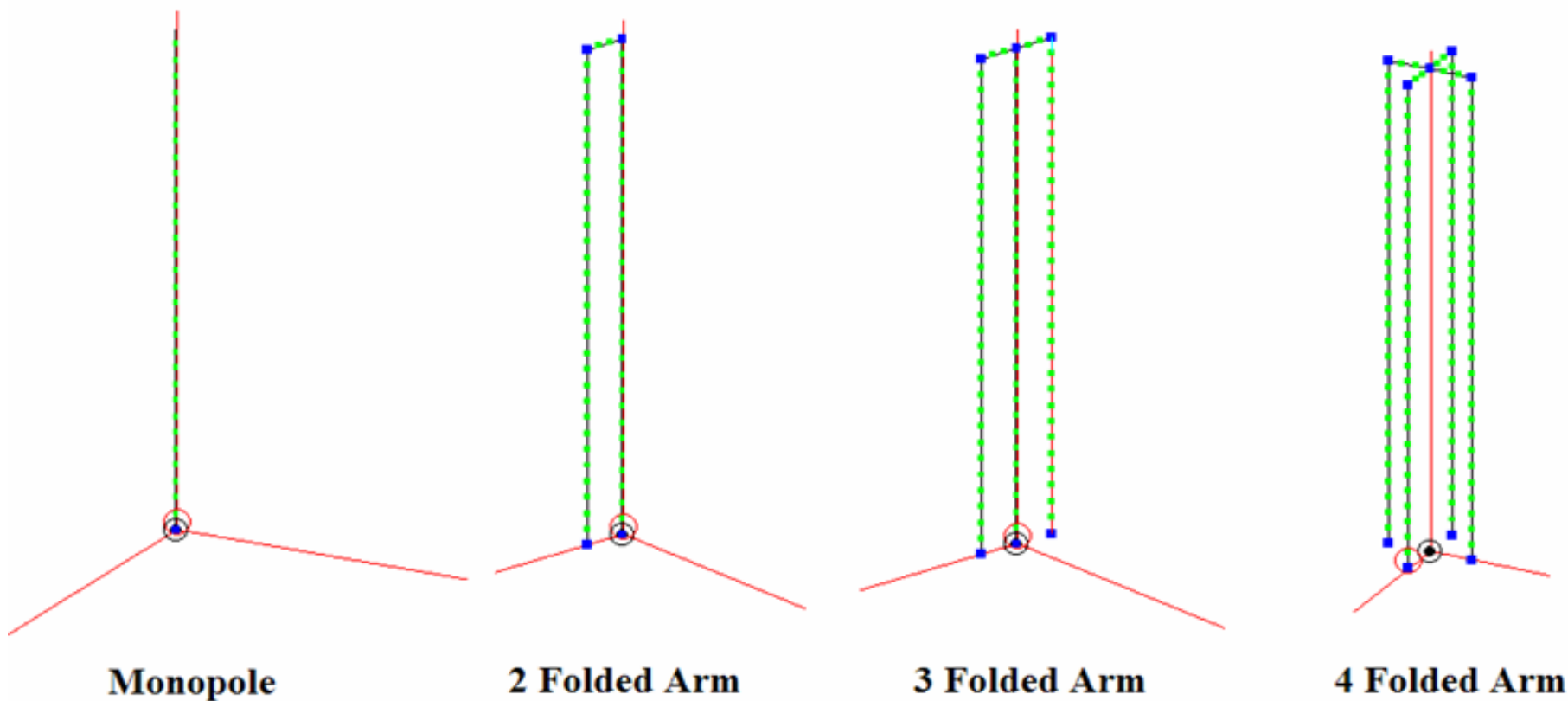
Reaktance kratke smyčky



Techniky zvětšení $R_{zář}$ – skládaný monopól

$$R_{zář_skládaný\ monopól} = N^2 R_{zář_monopól}$$

Balanis, C., Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley and Sons, 1997, p. 458-461



f_r [MHz]	1200	1139	1081	1072
$R_{zář}$ [Ω]	36	142	418	543

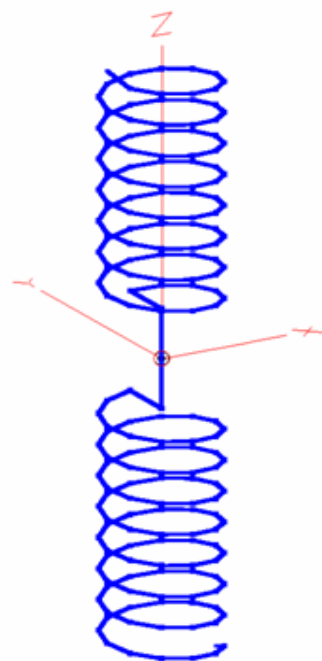
Techniky zvětšení $R_{zár}$

– sférická šroubovice (spherical helix)

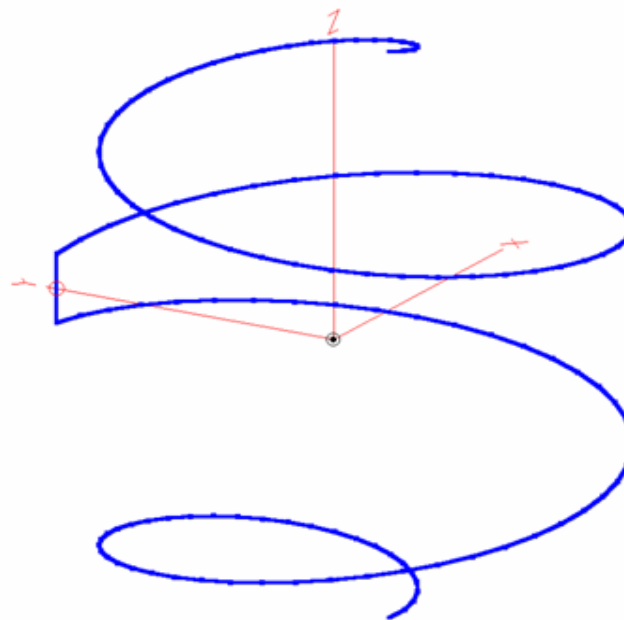
$$l = 8,36 \text{ cm}$$

$$ka = 0,263$$

$$Q_{lb} = 57,6$$



Normal Mode Helix



Spherical Helix

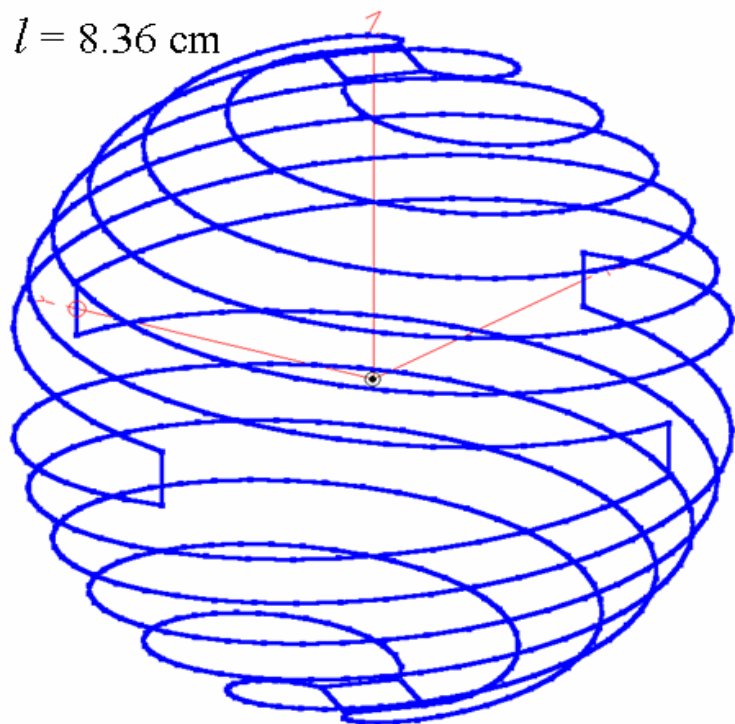
MNH: $f_r = 299,6 \text{ MHz}$, $R = 4,6 \Omega$, $\eta > 98 \%$, $Q = 216,6$

SH: $f_r = 300,2 \text{ MHz}$, $R = 2,2 \Omega$, $\eta > 98 \%$, $Q = 143,9$

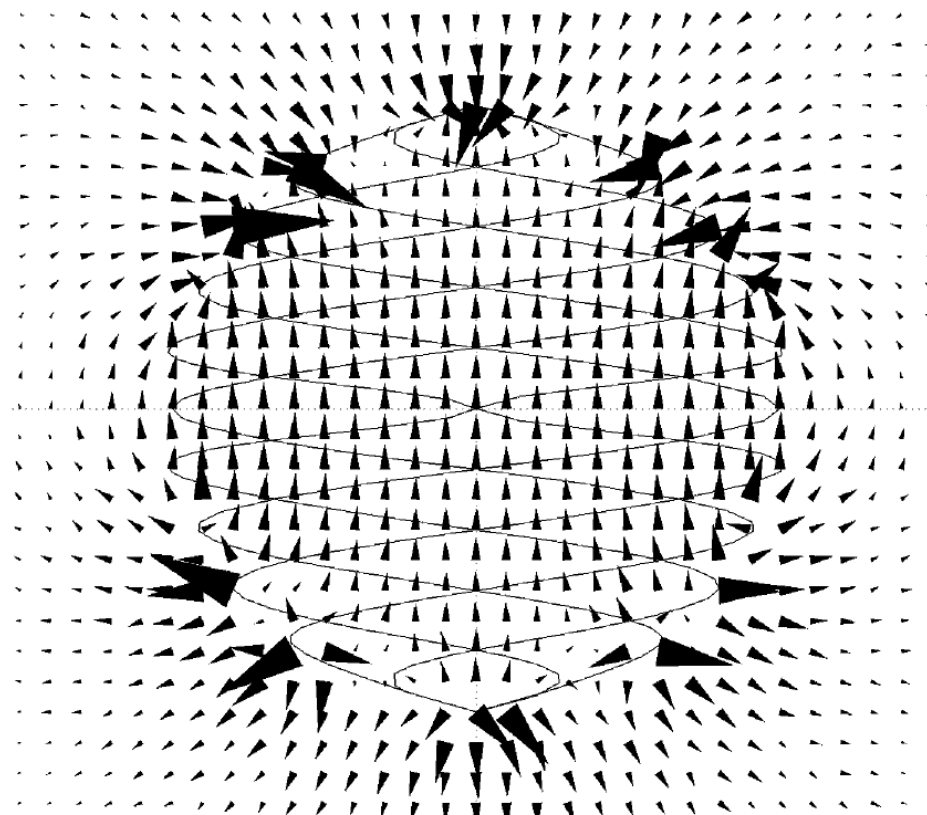
El. krátký dipól: $Z = 1,1 - j1015 \Omega$, $\eta > 98 \%$, $Q = 960$

Techniky zvětšení $R_{\text{zář}}$

– skládaná sférická šroubovice (folded spherical helix)



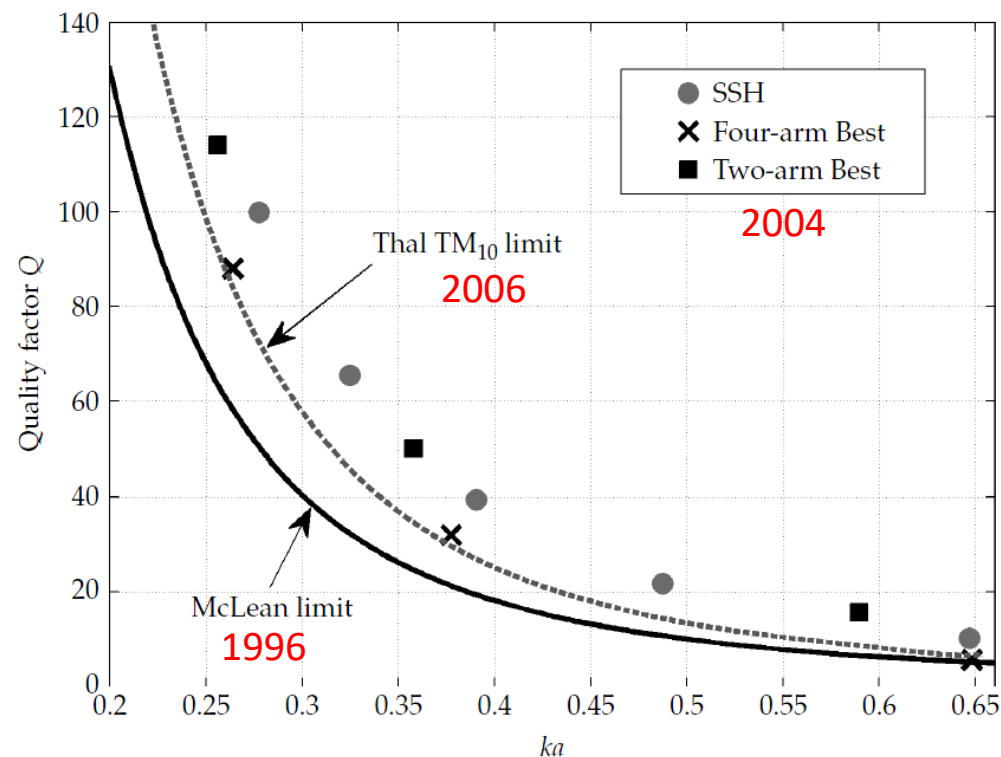
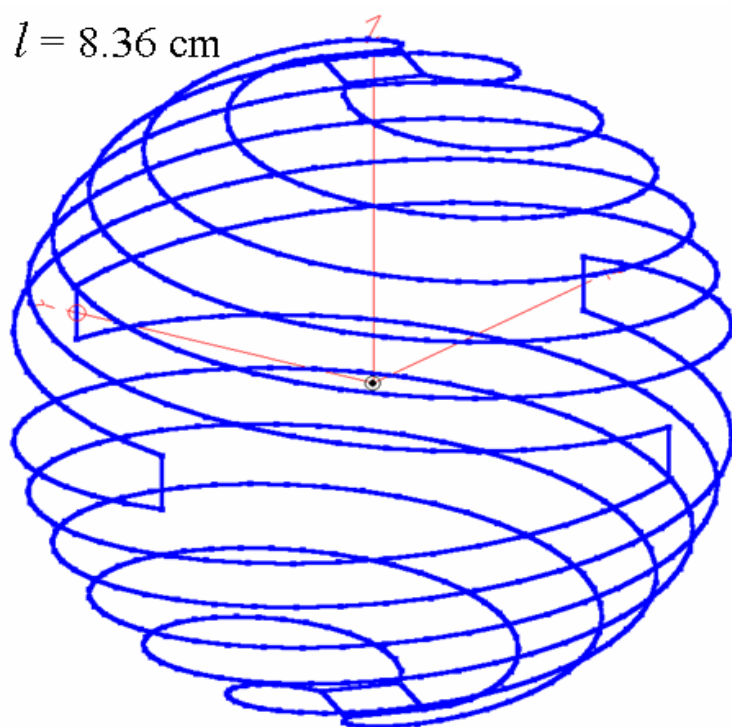
E-pole



4-ramenný FSH: $f_r = 299,9 \text{ MHz}$, $R = 57,8 \Omega$, $\eta = 97,4 \%$, $Q = 87,3$
 $Q/Q_{\text{min, Chu}} = 1,5$ (avšak $Q/Q_{\text{min, Thal}} \approx 1$) pro $ka = 0,263$

Techniky zvětšení $R_{zár}$

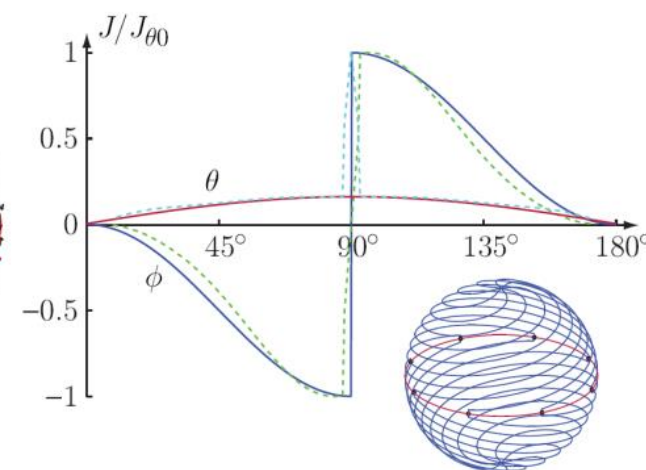
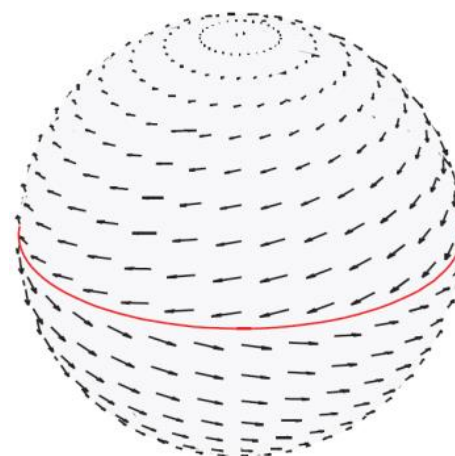
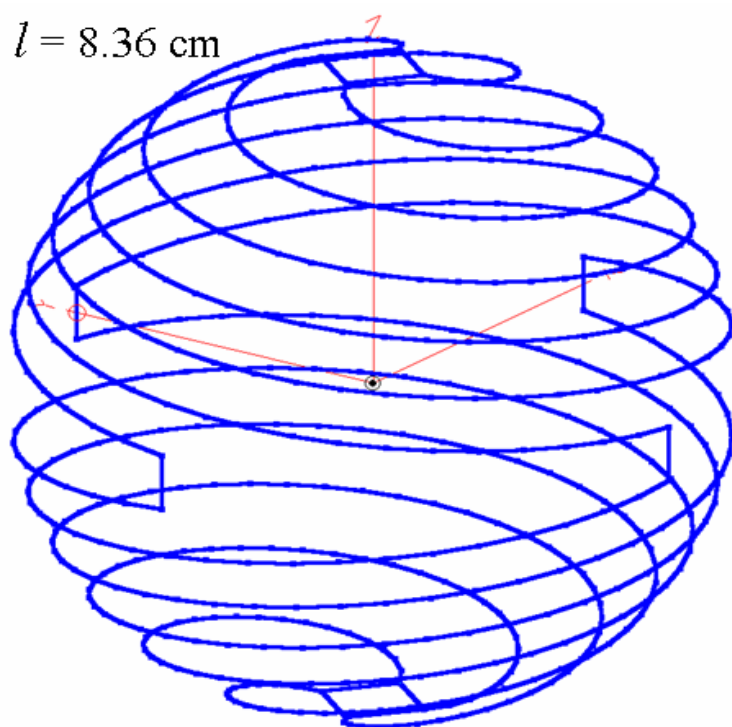
– skládaná sférická šroubovice (folded spherical helix)



4-ramenný FSH: $f_r = 299,9 \text{ MHz}$, $R = 57,8 \Omega$, $\eta = 97,4 \%$, $Q = 87,3$
 $Q/Q_{\min, \text{Chu}} = 1,5$ (avšak $Q/Q_{\min, \text{Thal}} \approx 1$) pro $ka = 0,263$

Techniky zvětšení $R_{\text{zář}}$

– skládaná sférická šroubovice (folded spherical helix)



$$J_0(0,15\sin\vartheta\hat{\vartheta} - \text{sign}(\cos\vartheta)\sin^2\vartheta\hat{\varphi})$$

Gustafsson a kol., *IEEE TAP*, 2012

4-ramenný FSH: $f_r = 299,9 \text{ MHz}$, $R = 57,8 \Omega$, $\eta = 97,4 \%$, $Q = 87,3$
 $Q/Q_{\text{min, Chu}} = 1,5$ (avšak $Q/Q_{\text{min, Thal}} \approx 1$) pro $ka = 0,263$

Techniky zvětšení $R_{zář}$

– vícezávitová šroubovice s feritovým jádrem

- Zářivý odpor $R_{zář}$

$$R_{rad} = 20\pi^2 N^2 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4 \mu_e^2, \quad NC < \lambda/10$$

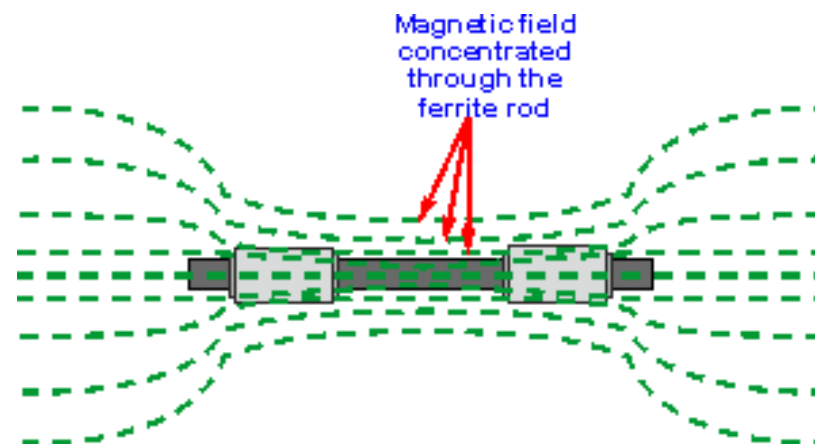
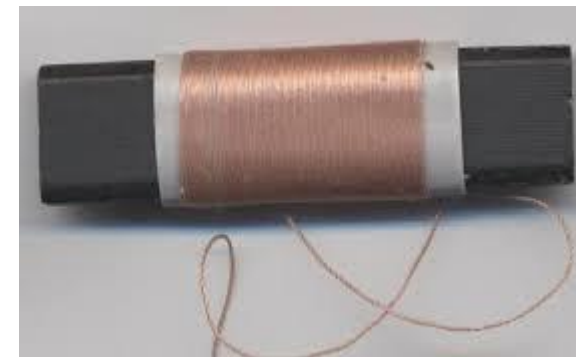
- Reaktance X_a

$$X_a = \frac{30\pi^2 N^2 k L \kappa \mu_e}{(L/2a)^2}$$

$\kappa = 1 - 0.8/(L/a)$ je Nagaokův koeficient

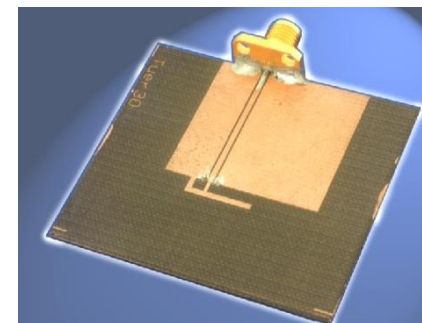
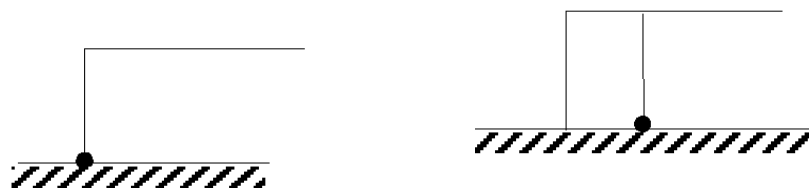
- Šířka pásma BW

$$BW\eta = \frac{k^3 L^3 \mu_e}{24(L/2a)^2}$$

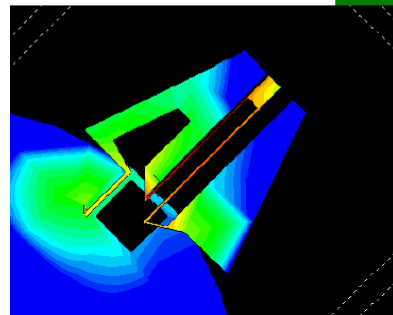
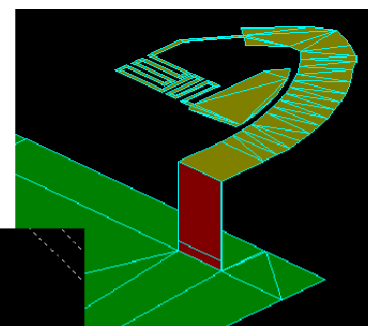
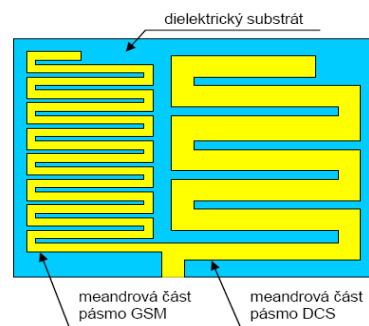
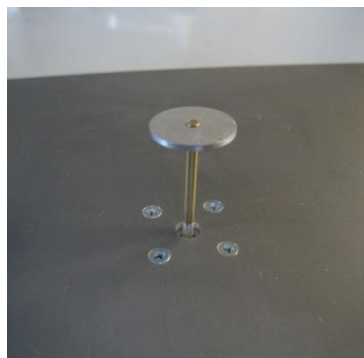


Základní techniky zmenšování liniových antén

- čtvrťvlnné provedení: dipól > monopól (L, F tvar)

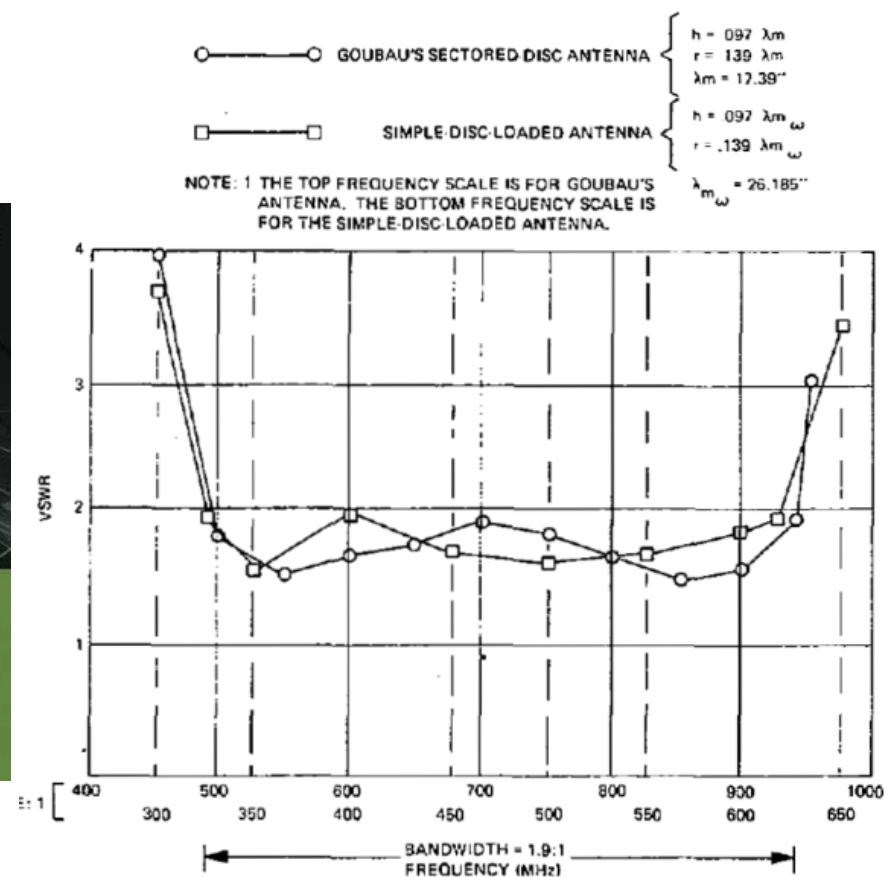
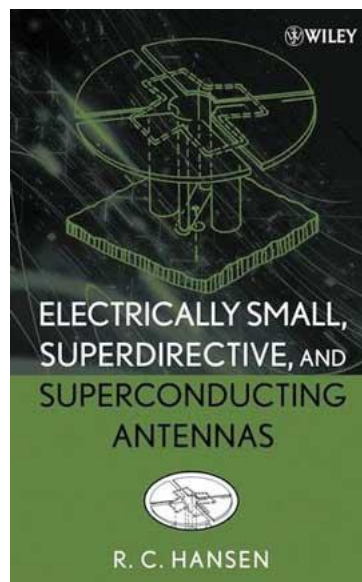
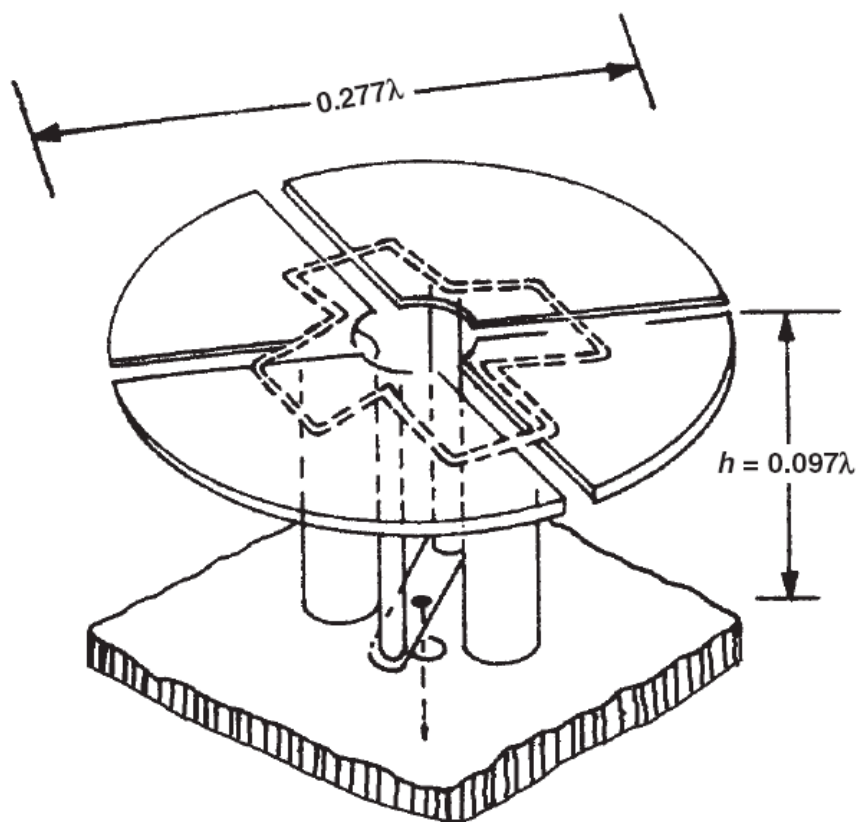


- Ladění malé antény do rezonance ($X_{ant} \rightarrow 0$, self-resonance):
kapacitní (disk) a induktivní (meandry) zátěž a/nebo jejich kombinace



Goubauova anténa (1976)

- Víceprvkový monopól zatížený kapacitním diskem
- Čtyři sloupky: dva s T-napájením, další dva spojeny se zemí, čtyři sekce disku
- Dle Hansena je $ka = 1,04$ s $BW = 2:1$
- Ve Smithově diagramu dvě superponované smyčky – vícemódové provedení

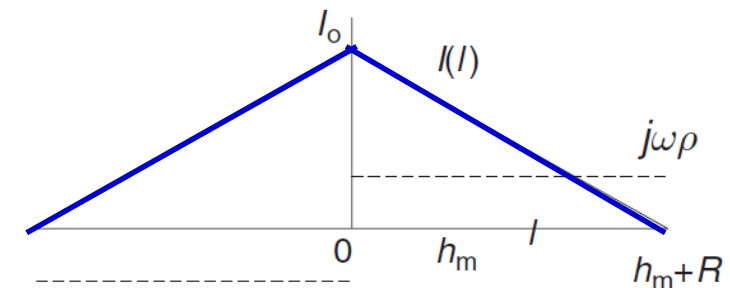
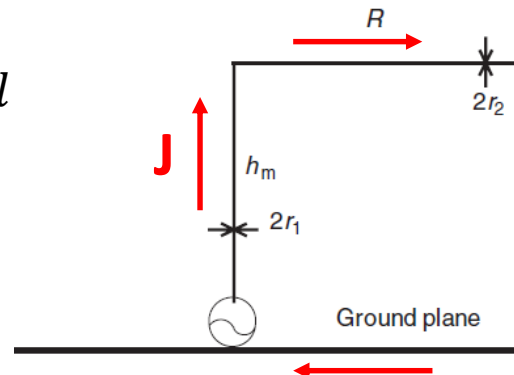


Monopóly – L anténa

Krátký invertovaný L-monopól, **trojúhelníkové** rozložení proudu, $h_m \ll h_m + R$

$$I(l) = I_0 - \frac{l}{h_m + R} I_0 = I_0 + ml$$

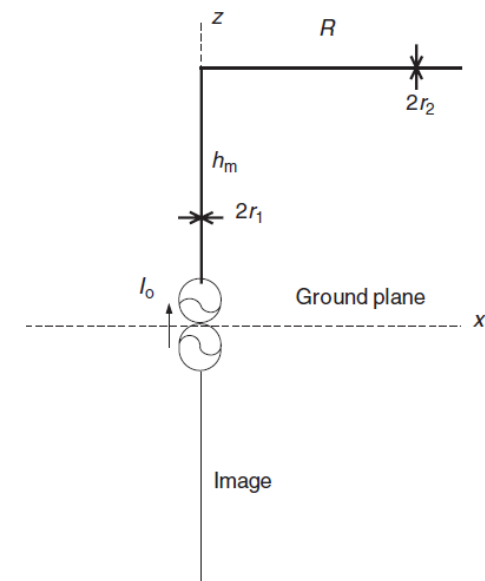
$$m = -I_0 / (h_m + R)$$



Střední hodnota proudu na **krátké vertikální** části považována za **konstantní** (pouze ta vyzařuje - zjednodušení)

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{h_m} \int_0^{h_m} (I_0 + mz) dz = \frac{1}{h_m} \left(I_0 h_m + m \frac{h_m^2}{2} \right) = I_0 \frac{R + h_m / 2}{R + h_m} = \alpha I_0$$

$$R_r = 160 \left(\frac{\pi h_m}{\lambda} \cdot \frac{R + h_m / 2}{R + h_m} \right)^2 = 40 \left(kh \frac{R + h_m / 2}{R + h_m} \right)^2$$



Monopóly – kapacitní zatížení

Krátký monopól se zakončený čtyřmi (n) radiálními vodiči, **trojúhelníkové** rozložení proudu

$$I_v(z) = I_o - m_z z, \quad 0 \leq z \leq h_m$$

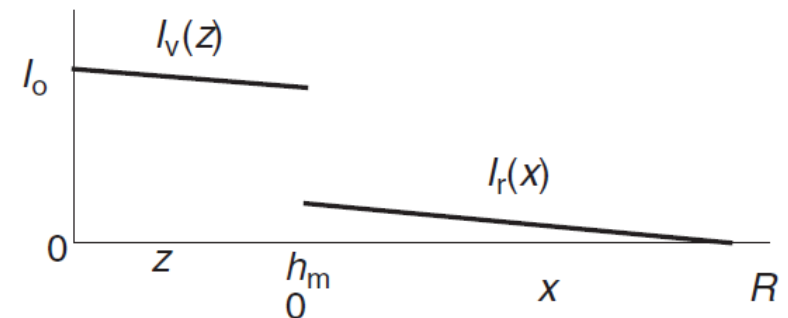
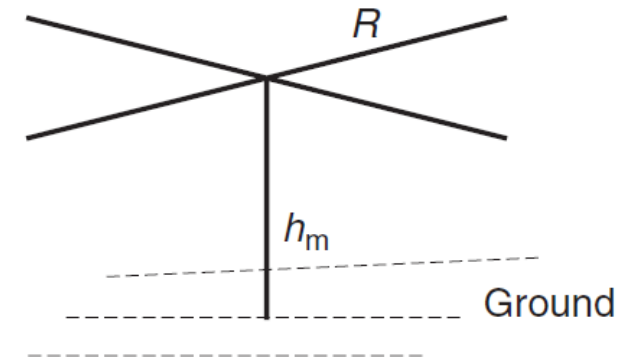
$$I_r(x) = I_{r0} - m_x x, \quad 0 \leq x \leq R$$

$$m_x = I_{r0}/R \quad (\text{jelikož } I_{r0}(R) = 0)$$

V místě spoje $I_v(h_m) = I_r(0)$, $m_x = m_z$

$$I_o - m_z h_m = n I_{r0} = n R m_z$$

$$m_z = I_o / (nR + h_m)$$



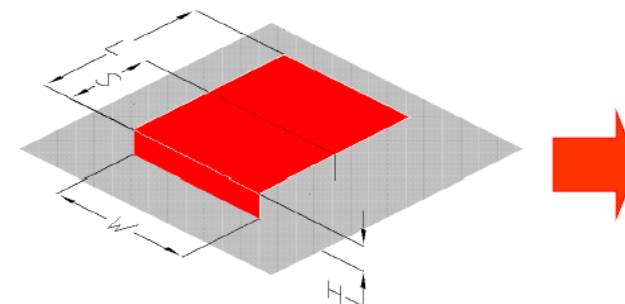
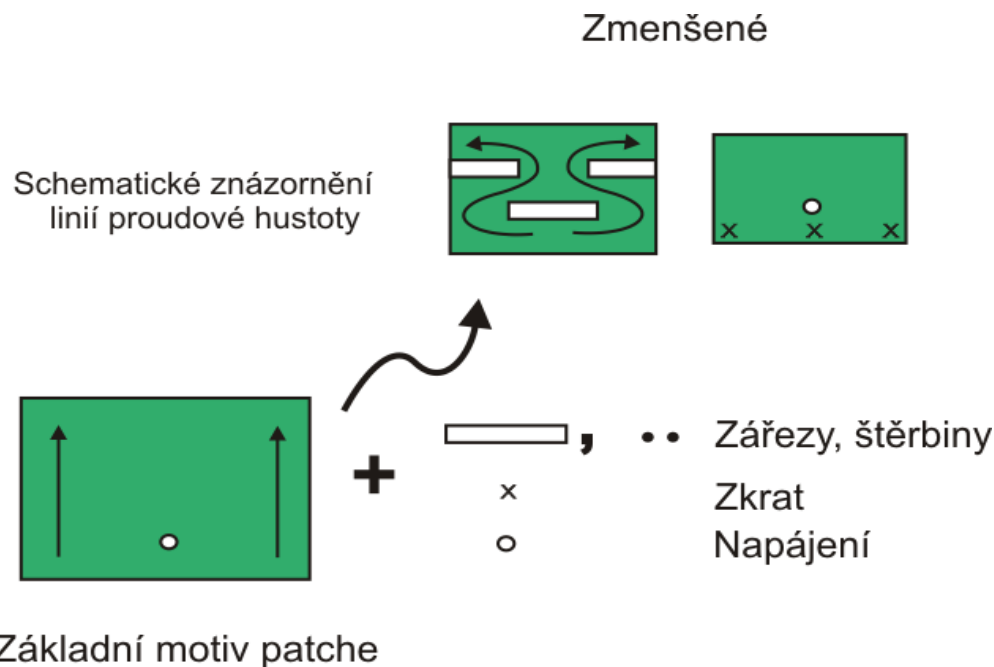
Analogicky pro **krátkou vertikální** část s **konstantním** rozložením proudu

$$R_{\text{rad}} = 160 \left(\frac{\pi h_m}{\lambda} \cdot \frac{nR + h_m/2}{nR + h_m} \right)^2$$

$$X = \frac{-30\lambda}{\pi(nR + h_m)^2} \left\{ h_m \left[\ln \left(\frac{h_m}{r_w} \right) - 1 \right] + nR \ln \left(\frac{2h_m}{r_w} \right) \right\}$$

Základní techniky zmenšování flíčkových antén

- Čtvrtvlnné provedení ($\lambda/2 > \lambda/4$)
- použití vyšší ϵ_r (λ_g)
- geometrické úpravy motivu zářiče => elektrické prodloužení linií proudu

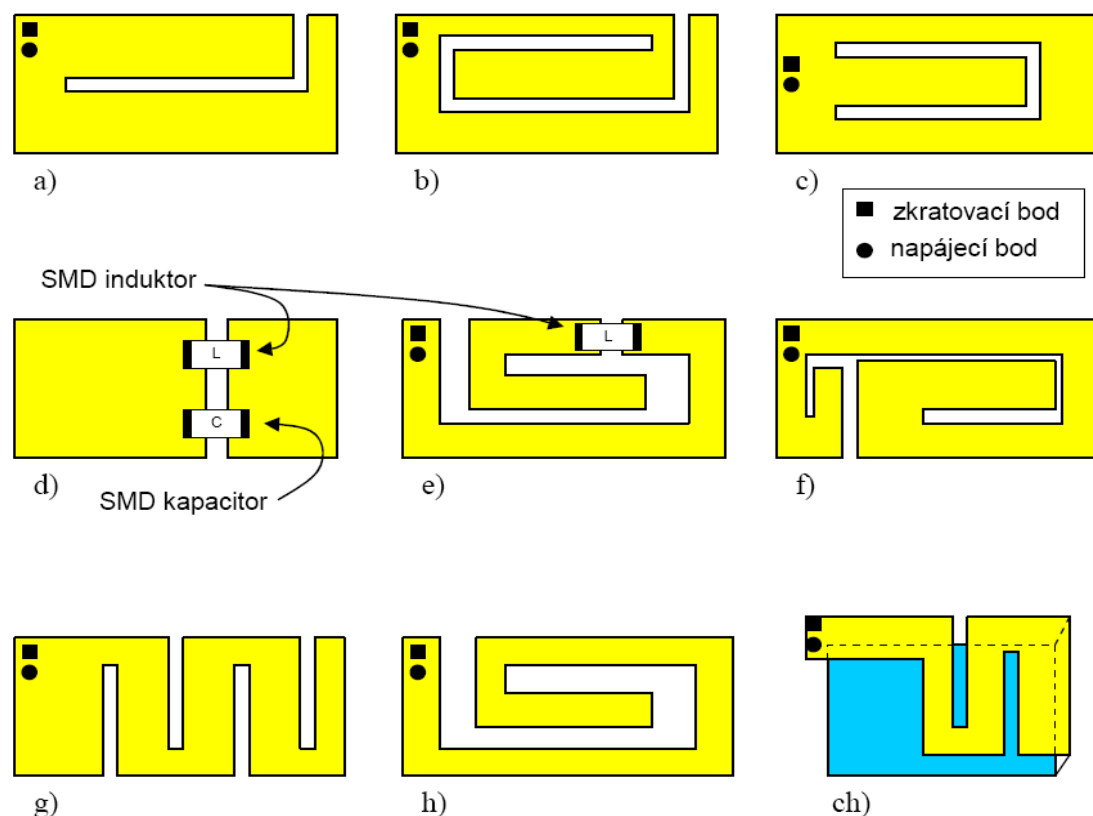
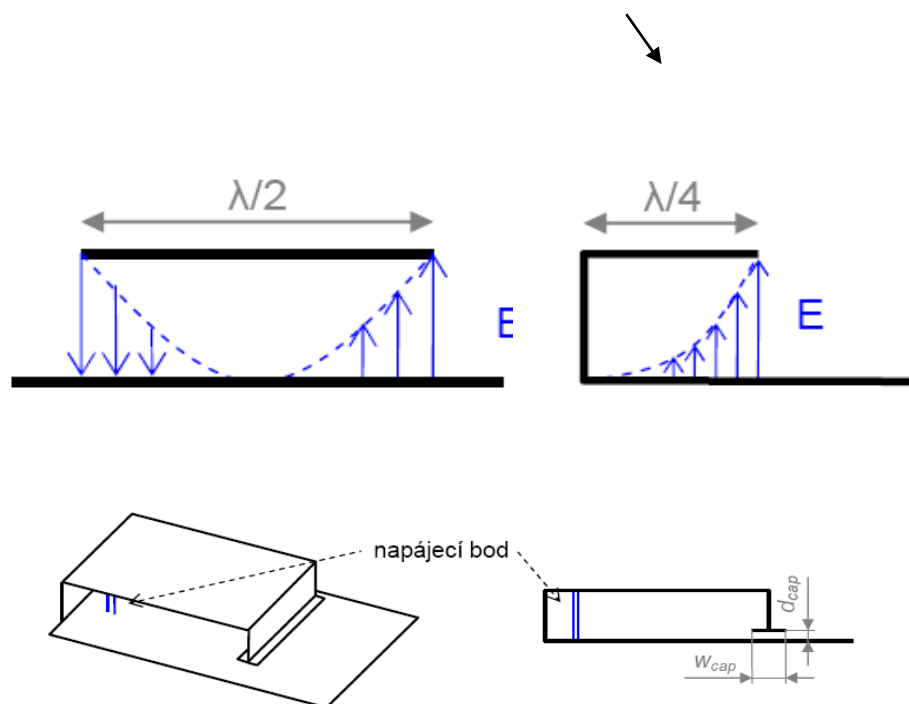


$L + H \approx \lambda_0 / 4$	Resonance frequency
$Z_{in} = f(S)$	Input Impedance
$BW = f^*(H, W)$	Bandwidth

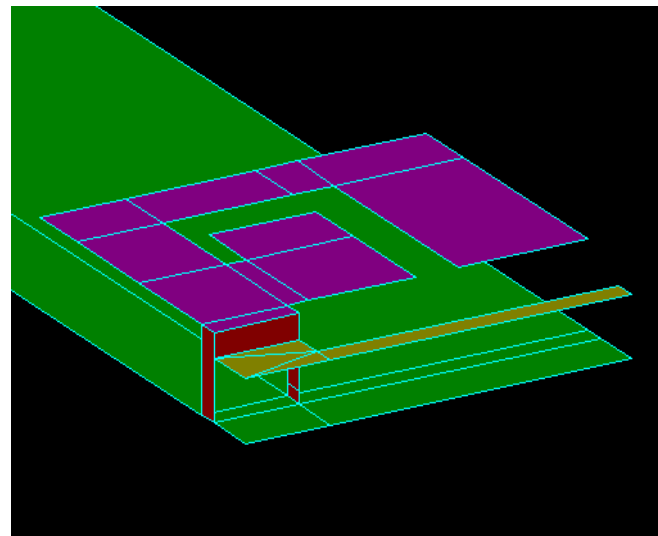
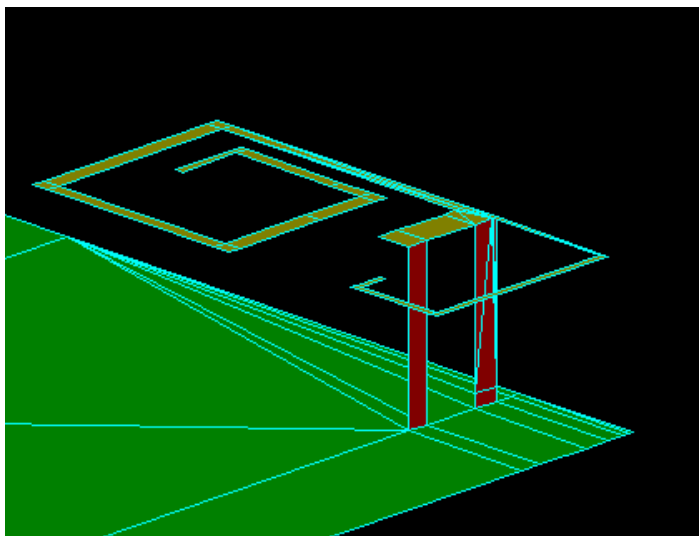


Základní techniky zmenšování antén

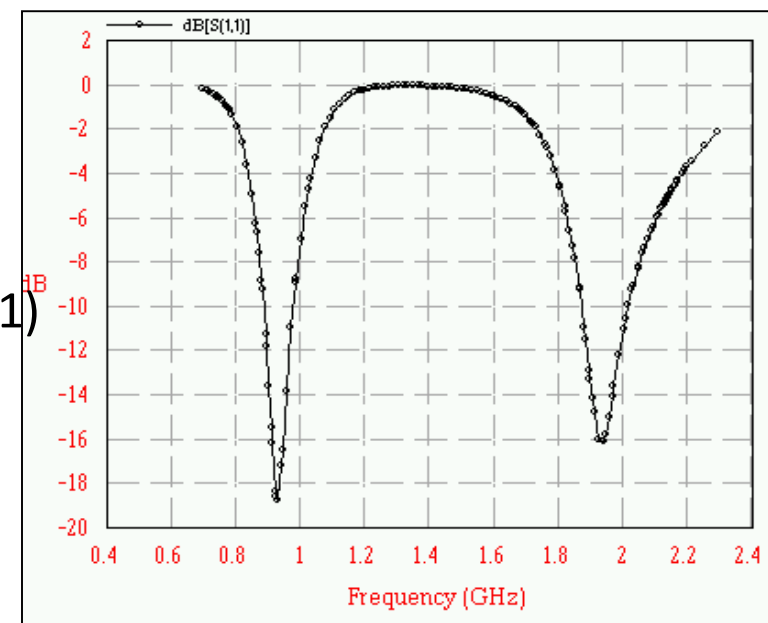
- Čtvrtvlnné provedení ($\lambda/2 > \lambda/4$)
- použití vyšší ϵ_r (λ_g)
- geometrické úpravy motivu zářiče => elektrické prodloužení linií proudu



Dvojitá spirálová dvoupásmová PIFA

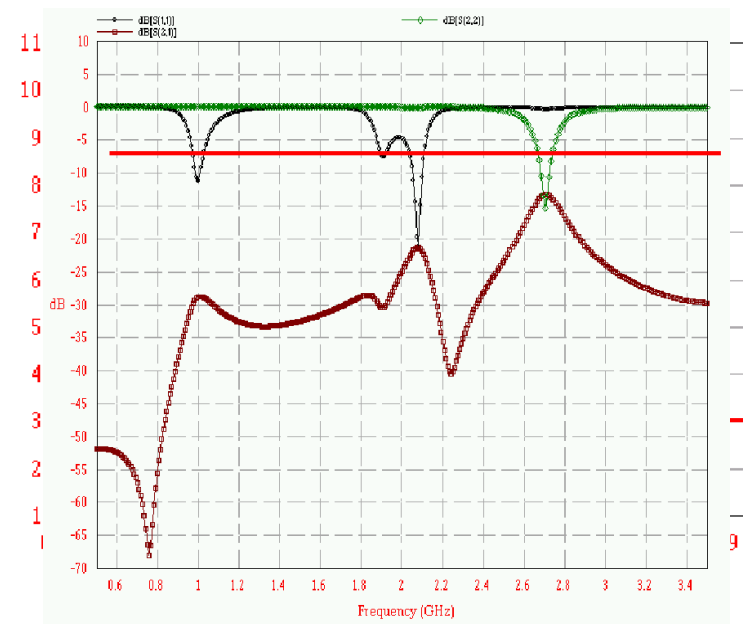
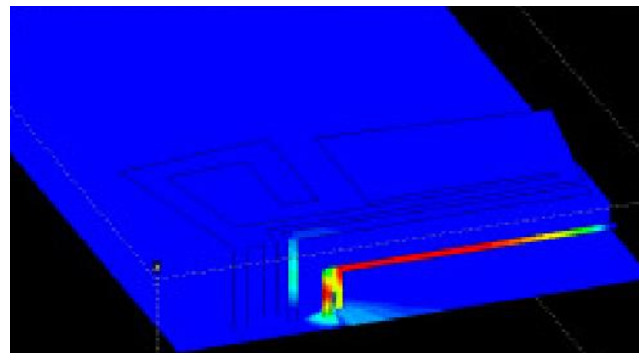
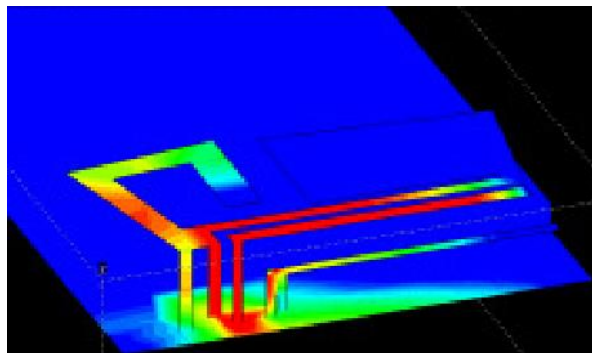
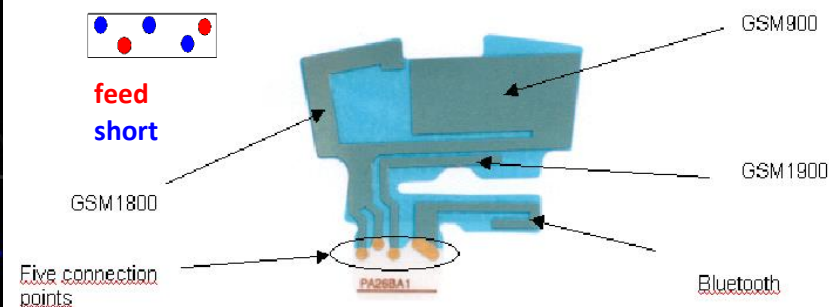
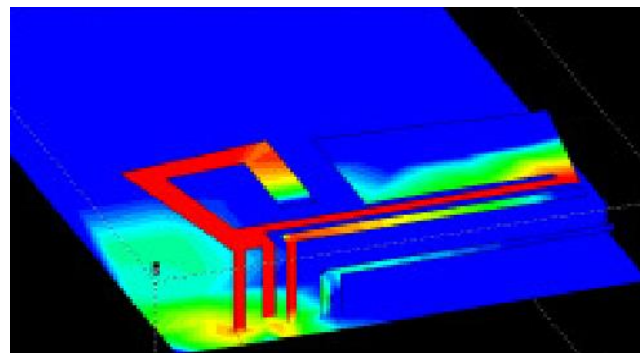
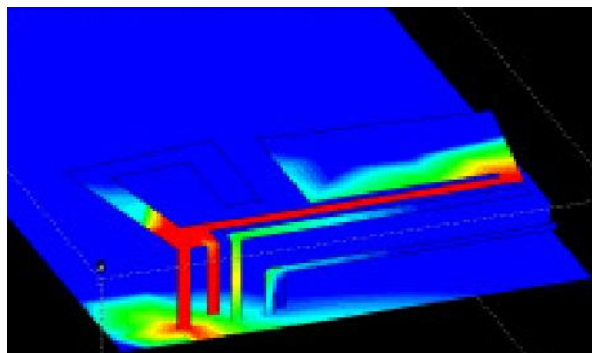


- První dvoupásmová interní dvojitě spirálová anténa, vyvinutá Z. Yingem (Ericsson, 1998, patent US 6166694), rozšířená na dvoupásmovou **planární invertovanou F-anténu (PIFA)** pro mobilní telefon (patent US 6343208B1)
- Podobné patenty získány různými společnostmi.
- Populární v telefonech Nokia, Siemens, Ericsson 90' let.



Vícepásmové patche: základní módy

Př. PIFA (Planar Inverted F-Antenna) mobilního telefonu kolem r. 2000
tvarovaný multirezonátor - (obvykle) základní vid rezonující na jednotlivých rezon. částech

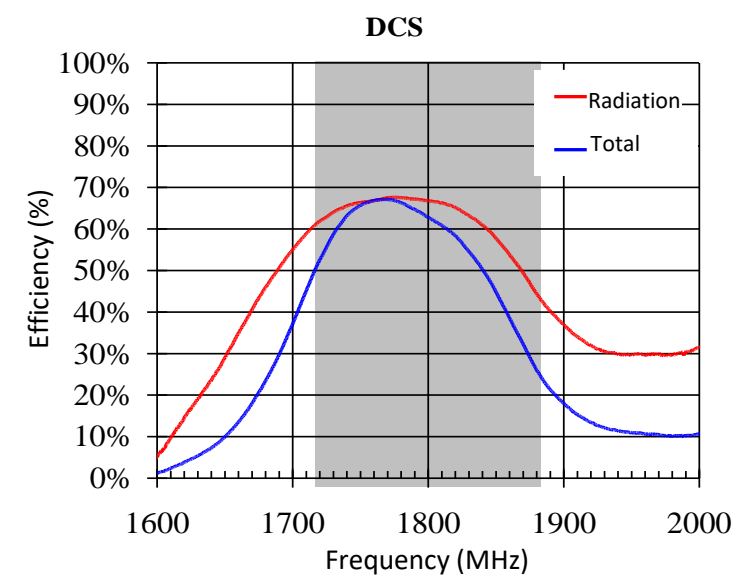
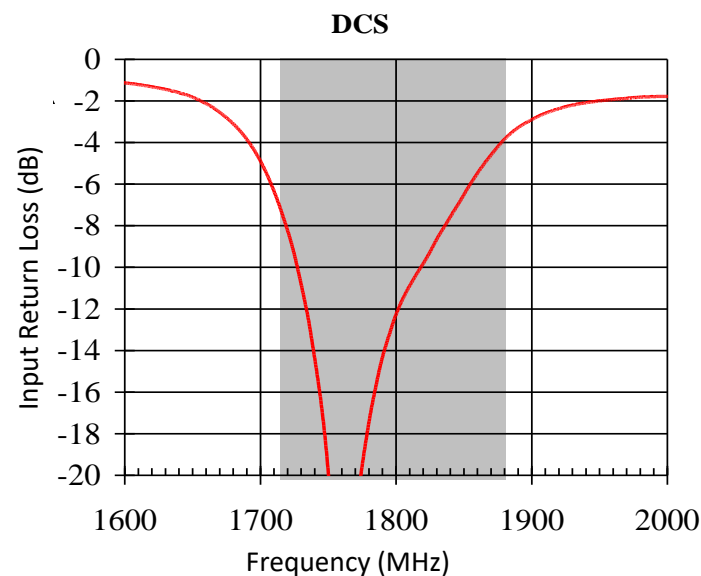
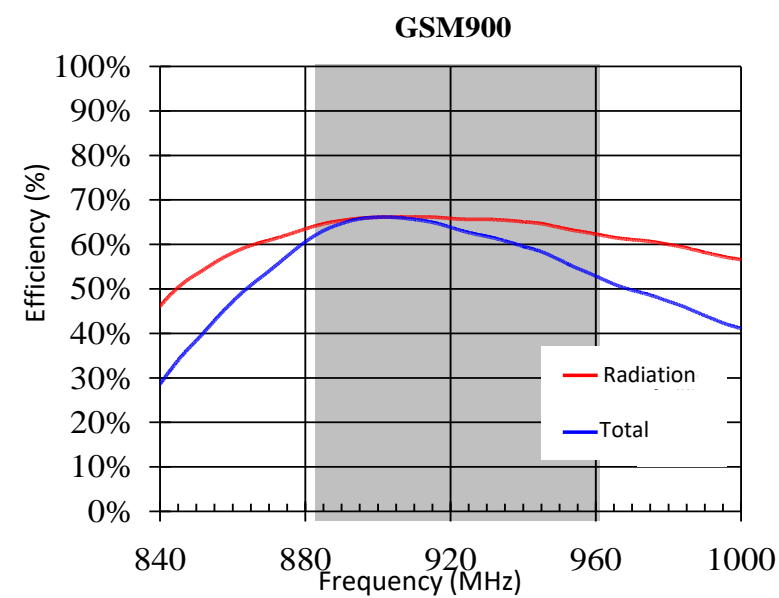
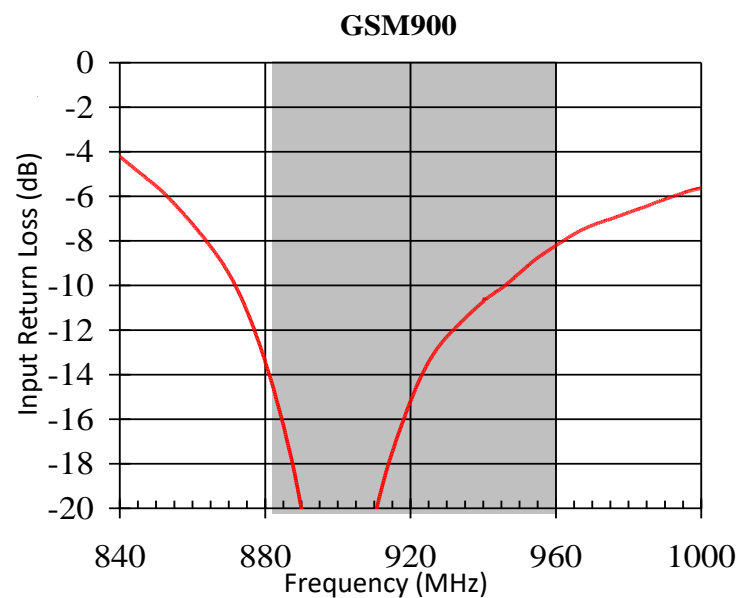


Z. Ying (Ericsson, 2000, patents no. US6452250, US6326921)

PSV = 2 ~ MS11= - 10 dB

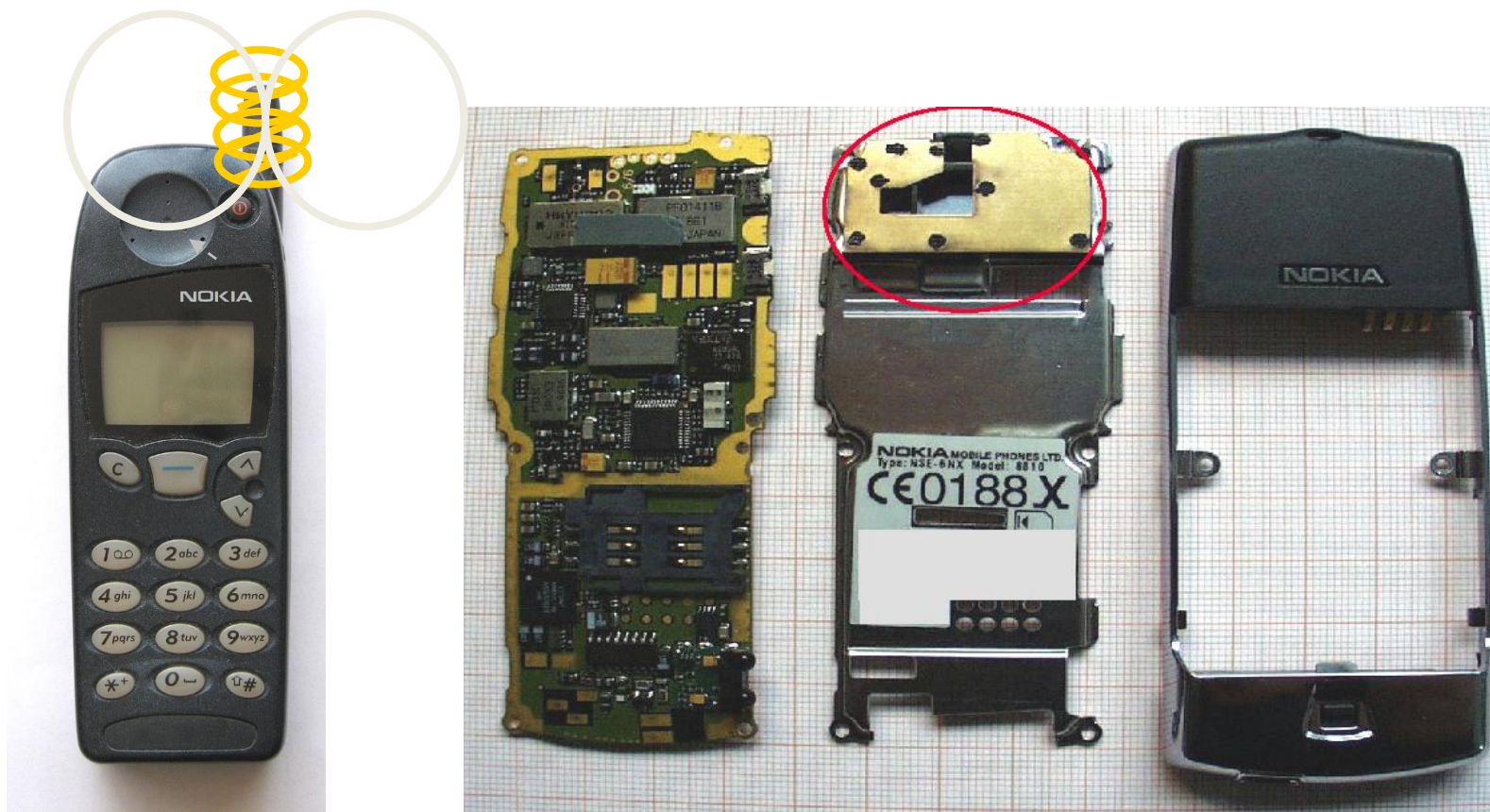
PSV = 3 ~ MS11= - 6 dB

Vícepásmové antény mobilních telefonů



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Nokia 5110 (1998) s malou šroubovicí a Nokia 8810 (1998) s PIFA



Nokia byla v letech 1998–2011 největším světovým výrobcem mobilních telefonů.^[1] Nedokázala však zareagovat na nástup nových chytrých telefonů a svou pozici vedoucího světového výrobce mobilních telefonů postupně zcela ztratila. V roce 2014 byla divize výroby mobilních telefonů (včetně značky) prodána společnosti Microsoft Mobile, dceřiné společnosti [Microsoftu](#).^[12] Divizi v roce 2016 odkoupila finská společnost [HMD Global](#).

^[1] <http://www.bbc.co.uk/news/business-17865117>

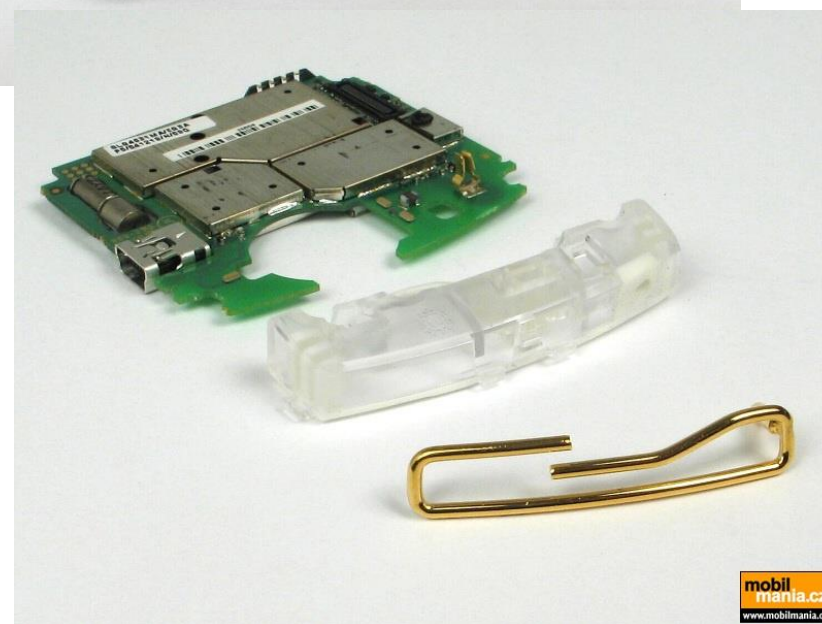
Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Nokia 3210 (1999) mobil „bez antény“



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

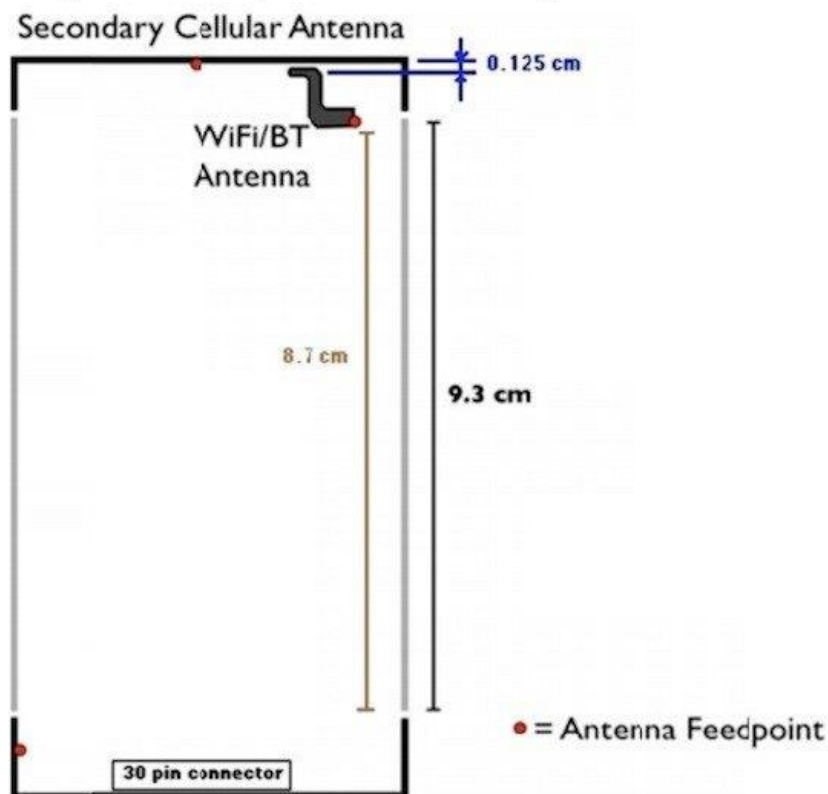
Motorola Razr V3 (2004)



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Apple iPhone 4/4S (2010)

The antenna locations are defined in the sketch below. The view of the phone is from the back side, with Primary Antenna and the 30-pin connector at the bottom of the phone.



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Samsung Galaxy S5 (2014)

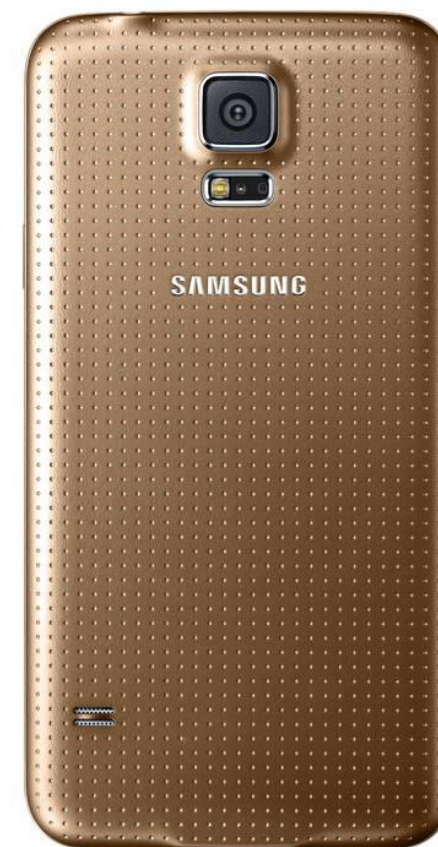
Pásmo:

GSM 850, 900, 1 800, 1 900 MHz

WCDMA (3G) 850, 900, 1 700, 1 900, 2 100 MHz

LTE (4G)

Wi-Fi 802.11 a/ac/b/g/n, Bluetooth 4.0, NFC



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Samsung Galaxy S8 (2017)

Pásmo:

GSM: 850, 900, 1800, 1900 MHz

W-CDMA (3G): 850, 900, 1900, 2100 MHz

LTE (4G): 700 / 800 / 850 / 900 / 1700 / 1800 / 1900 / 2100 / 2600 MHz

Data: Wi-Fi 802.11 a/ac/b/g/n, Bluetooth 5.0, NFC

Poloha:

GPS

GLONASS



Vícepásmové antény mobilních telefonů

Moderní technologie výroby

dříve – DPS

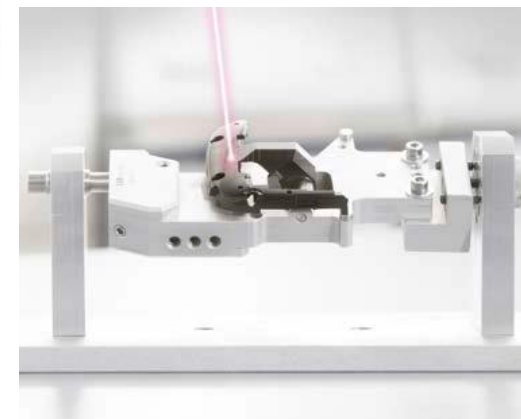
dněs – laserové strukturování



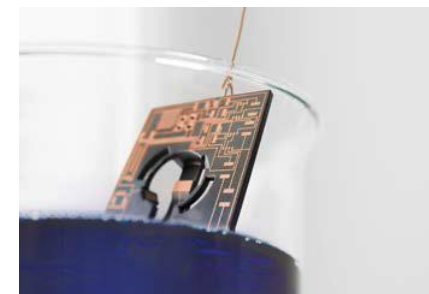
Vícepásmové antény mobilních telefonů

Moderní technologie výroby

- **Molded interconnect device (MID)** ¹⁾ – vstříkovaný tvarovaný termoplast s integrovanými elektronickými obvody



- **Laser Direct Structuring (LDS)** ²⁾ – přímé laserové strukturování vodivých tras, termoplast dotován vodivě-plastovými aditivami, které jsou aktivovány (slinovány) laserem, metalizace



Vícepásmové antény mobilních telefonů

Samsung Galaxy S10 (2019), S23 (2023)

Pásmo:

GSM: 850, 900, 1800, 1900 MHz

W-CDMA (3G): 850, 900, 1900, 2100 MHz

LTE (4G): 700 / 800 / 850 / 900 / 1700 / 1800 / 1900 / 2100 / 2600 MHz

5G: ne (S19) / ano (S23)

Data: Wi-Fi 802.11 a/ac/b/g/n, Bluetooth 5.0, NFC

Poloha:

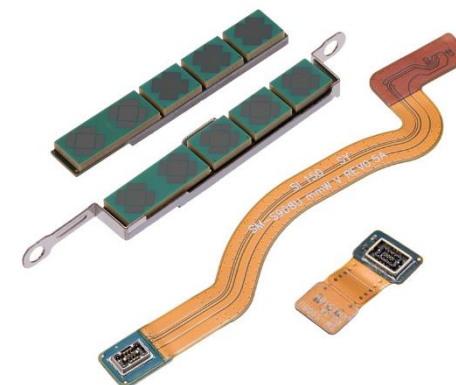
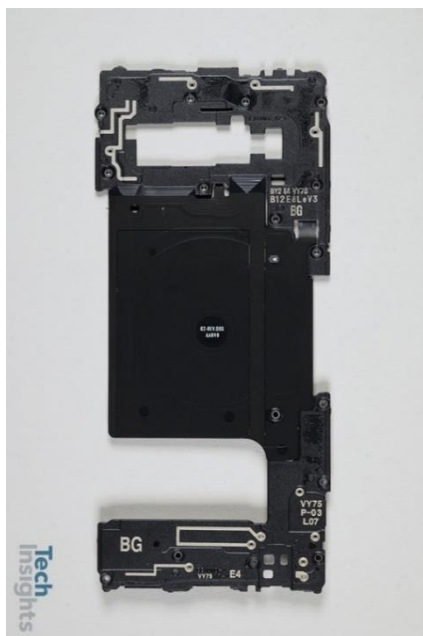
GPS

GLONASS

BEIDOU

GALILEO

Elektronický
kompas



Replacement 5G Antenna Flex Cable With Module Compatible For Samsung Galaxy S22 Ultra 5G (S908U) (4 Piece Set)

<https://mobilenet.cz/katalog/samsung-galaxy-s23/specifikace>

Vícepásmové antény mobilních telefonů

Apple iPhone 13 (2020), 14 (2022)

Pásmo:

GSM: 850, 900, 1800, 1900 MHz

W-CDMA (3G): 850, 900, 1900, 2100 MHz

LTE (4G): 700 / 800 / 850 / 900 / 1700 / 1800 / 1900 / 2100 / 2600 MHz

5G: ano

(28 GHz mmWave only serviced by Verizon in the US in limited areas)

Data: Wi-Fi 802.11 a/ac/b/g/n, Bluetooth 5.0, NFC

Poloha:

GPS,

Glonass,

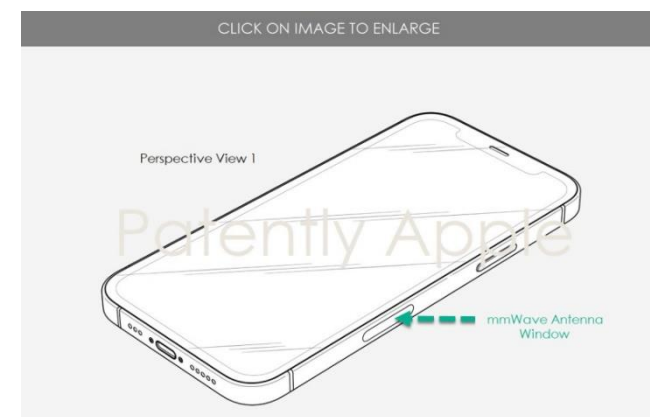
Beidou,

Galileo,

Elektronický

kompas,

UWB



<https://mobilenet.cz/katalog/apple-iphone-13/specifikace>

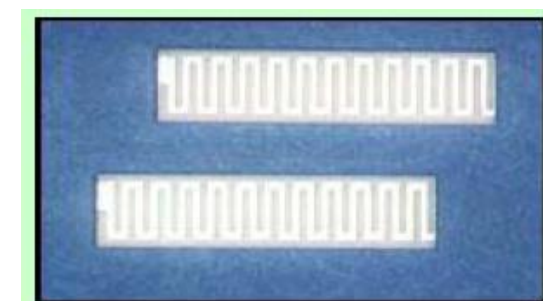
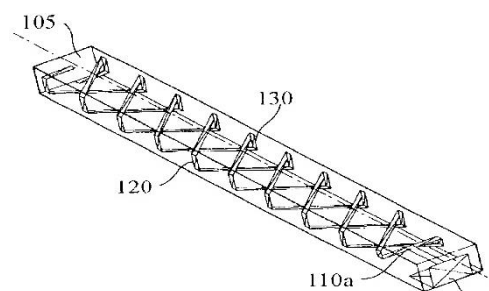
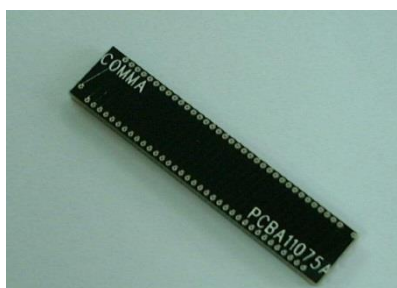
SMT a čipové antény

- Antény určené pro moderní malé elektronické přístroje - miniaturizované vůči vlnové délce
- Zapouzdřené do součástek pro povrchovou montáž (SMT)
- Čipová/SMT anténa - vlastní aktivní zářič, pro požadované impedanční a vyzařovací vlastnosti nutno
 - doplnit zemní rovinou (DPS)
 - realizovat impedanční přizpůsobení
- Parametry čipových antén kompromisem při požadavku na minimalizaci rozměru



SMT antény – struktura, provedení

- Způsoby miniaturizace
 - provedení šroubovice, meandrové složení dipólu, patch
 - umístění do dielektrického materiálu s velkou relativní permitivitou



CHIP SIZE : 12.0 x 2.5 x 0.7 mm

- Zapouzdřeny do tvaru SMT součástek



Figure 1: A trace solution for a 2.45 GHz antenna that uses an area of 29.90 x 5.20 mm. An equivalent ceramic chip antenna uses a ground clearance area of 6.25 x 4.24 mm. This equates to an 80% reduction in PCB space.

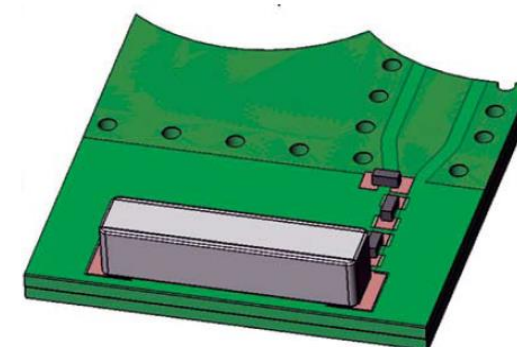
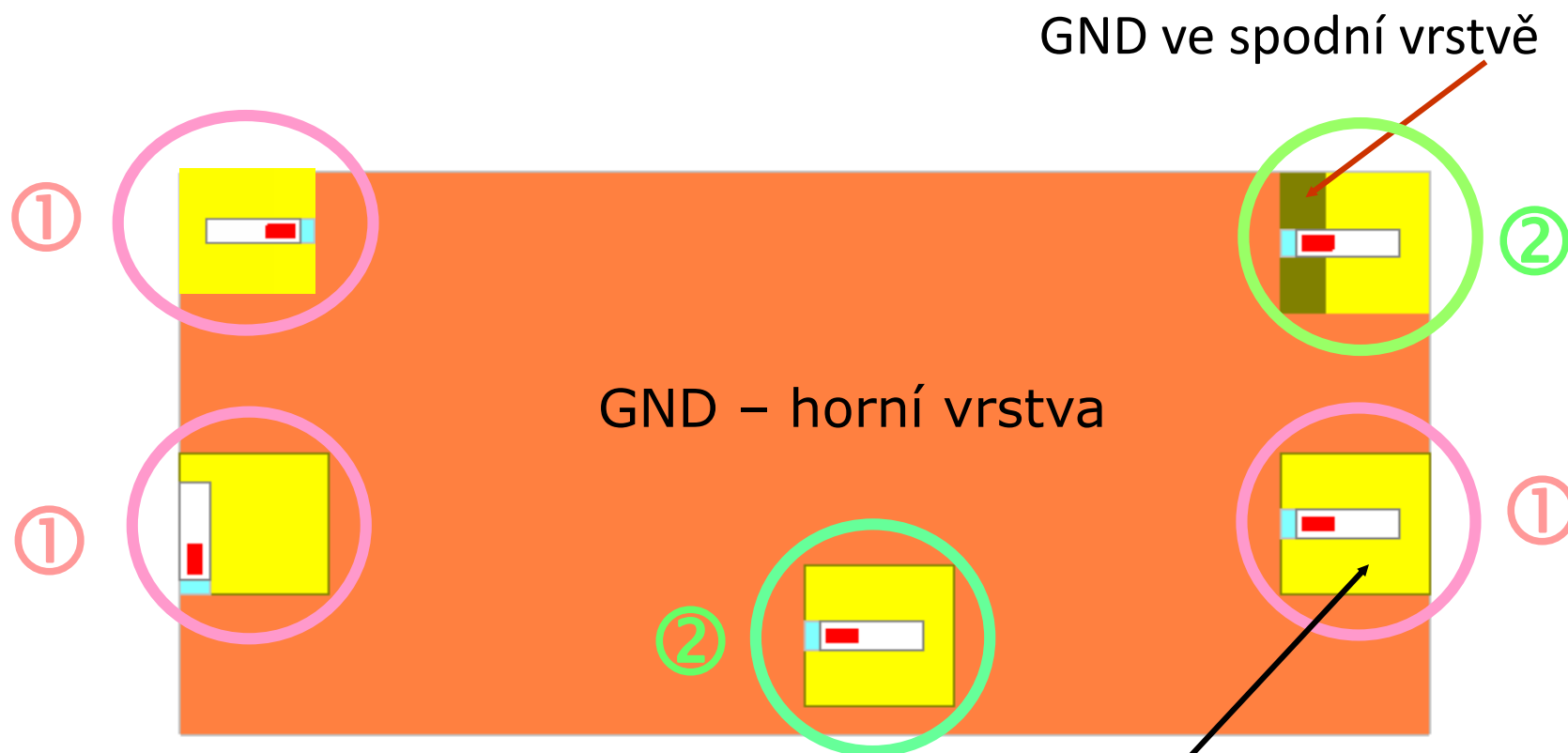


Figure 2: A layout and tuning for a monopole ceramic antenna which can be tuned to 2.4GHz or 866MHz and takes up an area of only 6 x 11mm².

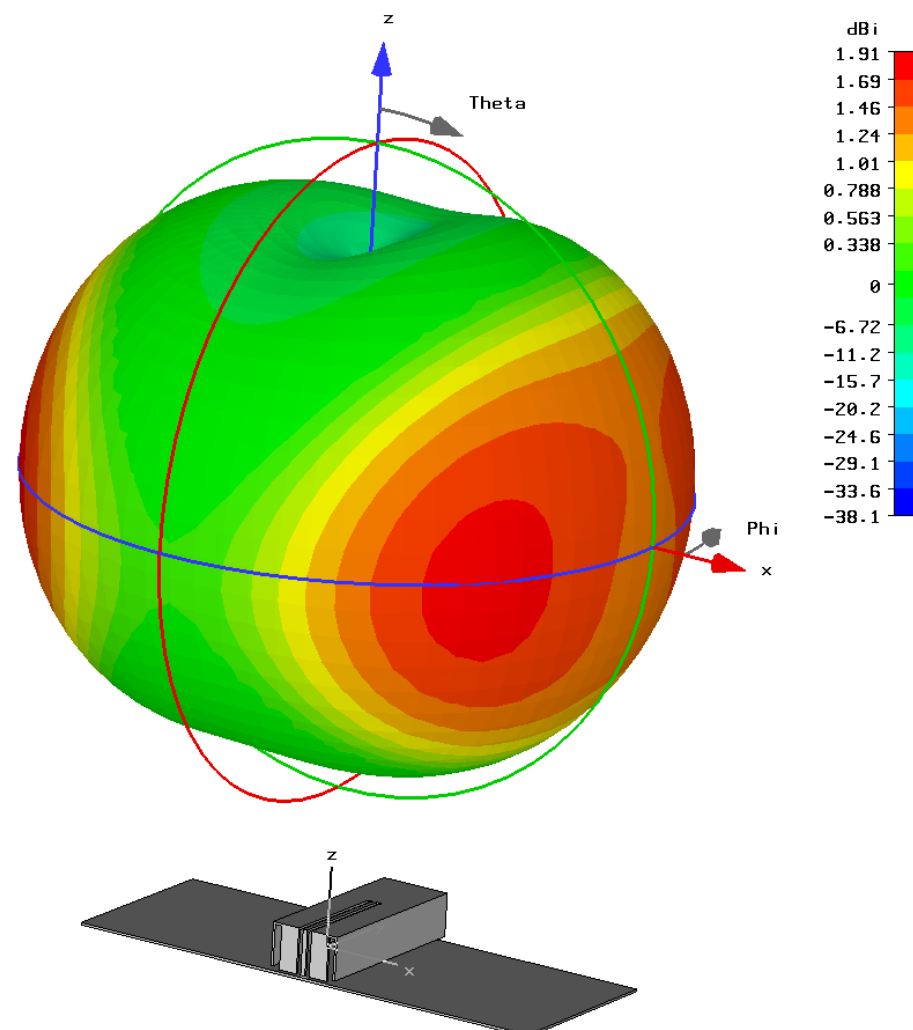
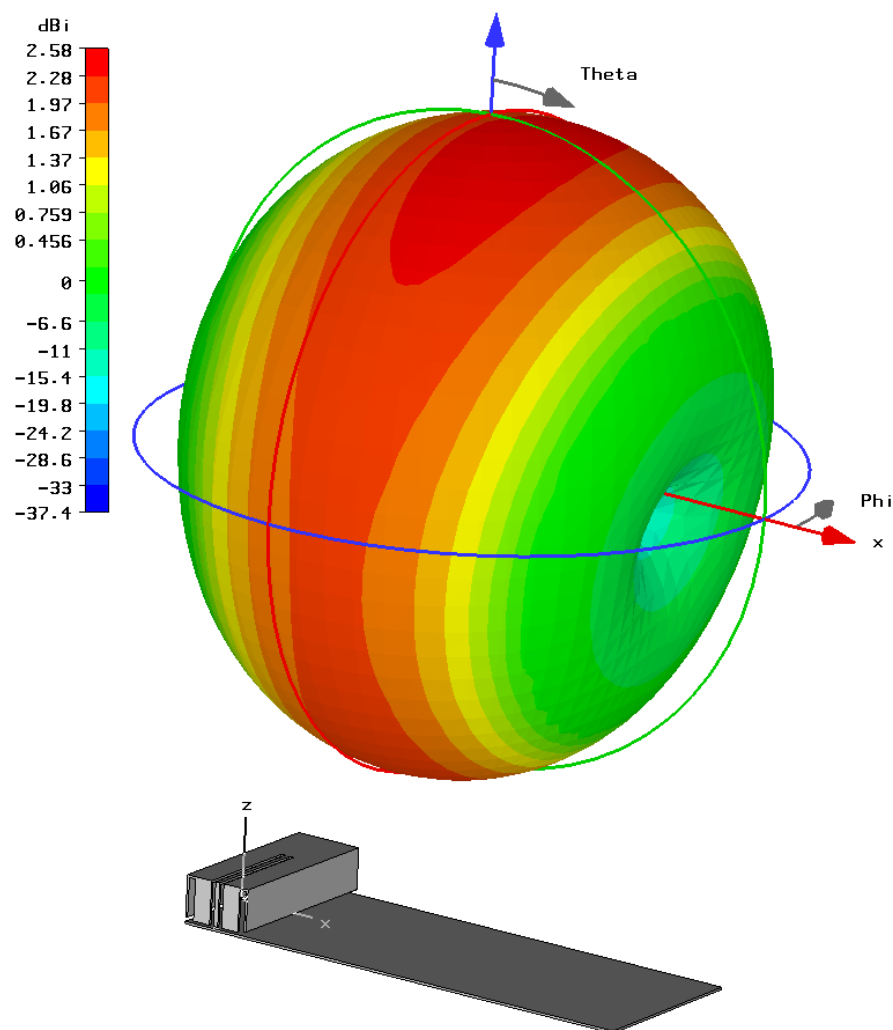
SMT antény – umístění na DPS

- Anténa na DPS (zemní rovina) do „volného prostoru“
- Baterie mimo prostor antény



- Vhodné umístění ①
- Nevhodné umístění ②

Vliv zemní desky



Vliv blízké zemní roviny na Q antény

Sten, Hujanen, Koivisto (2001) – vyšetřování Q_{\min} malých dipólových antén umístěných nad rozlehnou zemní rovinou (bez jejích vlastních rezonancí), analogický přístup jako McLean (1996).

- **Vertikální** dipól (je-li $p_x = 0$ nebo $d_x = 0$)

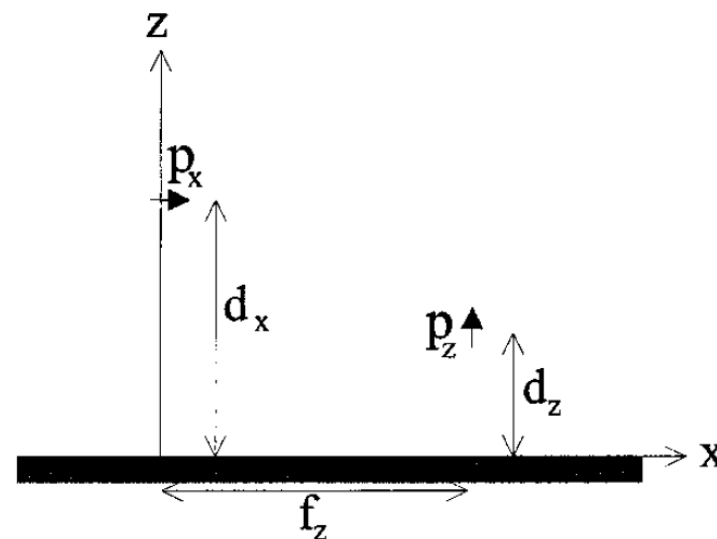
$$Q = \frac{10[1 + (ka)^2] + (f_z/a)^2 [27 + 9(ka)^2 + 7(ka)^4]}{2(ka)^3(2(kf_z)^2 + 5)}$$

- **Horizontální** dipól ($p_z = 0$ nebo $d_z = 0$)

$$Q = \frac{27 + 9(ka)^2 + 7(ka)^4}{4(ka)^5}$$

- **Magnetický** dipól (smyčka)

$$Q = \frac{18 + 6(ka)^2 + 3(ka)^4}{(ka)^5}, p_{mx} = 0$$



Vliv externích obvodů, Bode-Fanovo kritérium

Bode (1945) – **dosažitelná** šířka pásma **BW** pro obvod s daným Q a Γ využitím **nekonečného počtu** laděných LC obvodů

Fano (1950) - dosažitelná šířka pásma **BW** s počtem **n laděných** LC obvodů

- Pro paralelní rezonanční obvod RC s $Q = \omega_0 RC$

$$\int_0^\infty \ln \frac{1}{|\Gamma(\omega)|} d\omega \leq \frac{\pi}{RC}$$

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \ln \frac{1}{\Gamma_{max}} d\omega = \Delta\omega \ln \frac{1}{\Gamma_{max}} \leq \frac{\pi}{RC}$$

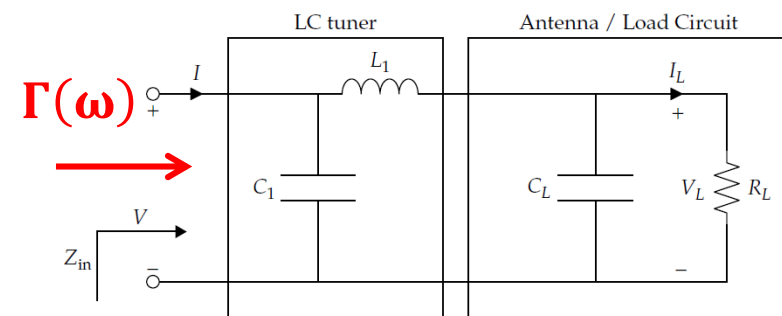
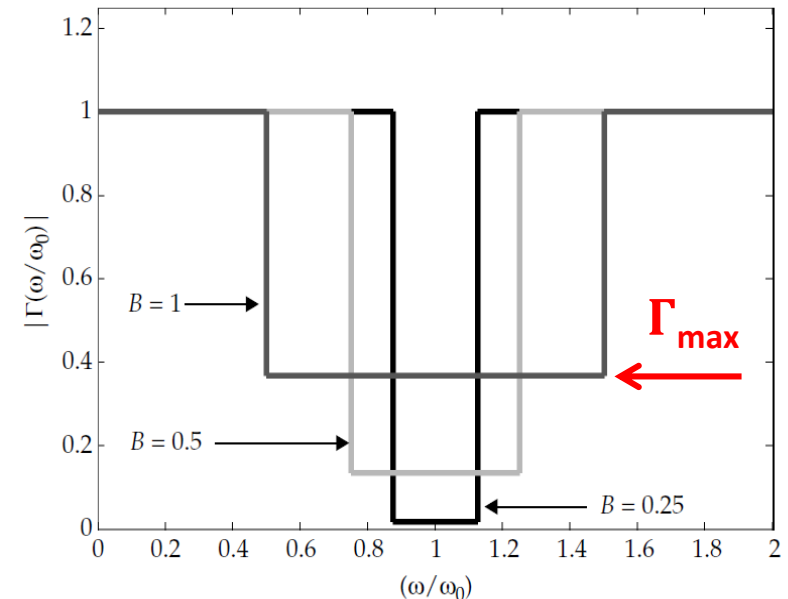
$$BW \leq \frac{1}{Q} \frac{\pi}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma}\right)}$$

BW – 3dB relativní šířka pásma ($\Delta\omega/\omega_0$)

Γ_{max} – max. dosažitelný koeficient odrazu v pásmu $\Delta\omega$

- Aplikace na princip. limit malých antén

$$BW \leq \frac{(ka)^3}{1 + (ka)^2} \frac{\pi}{\ln\left(\frac{PSV + 1}{PSV - 1}\right)}$$



Zatížený činitel jakosti

Vlastní činitel jakosti obvodu (zde antény)

$$Q_0 = \omega \frac{W_{ak}}{P_{z0}} = \omega \frac{W_e + W_m}{P_{z0}}$$

Externí (vnější) činitel jakosti např. přizpůsobovacího obvodu (PO)

$$Q_e = \omega \frac{W_{ak}}{P_{ze}}$$

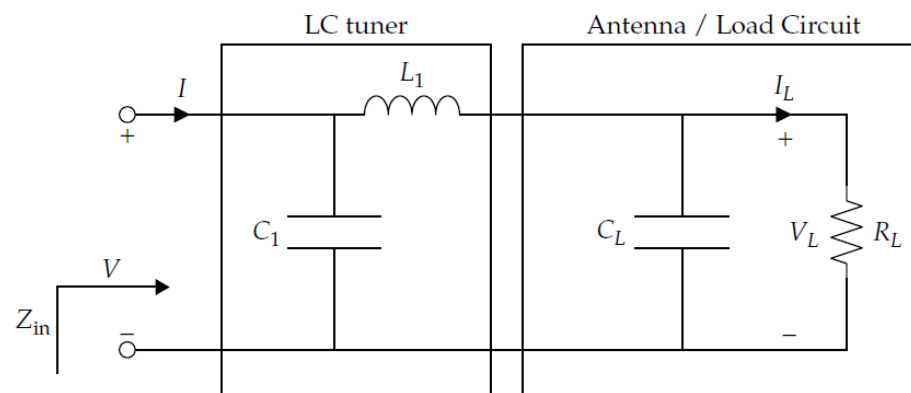
Zatížený činitel jakosti (antény a PO jako celku)

$$Q_z = \omega \frac{W_{ak}}{P_z}$$

$$\frac{1}{Q_z} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e}$$

$\alpha = \frac{Q_0}{Q_e}$ činitel vazby mezi anténou (rezonátorem) a navázaným obvodem (PO)

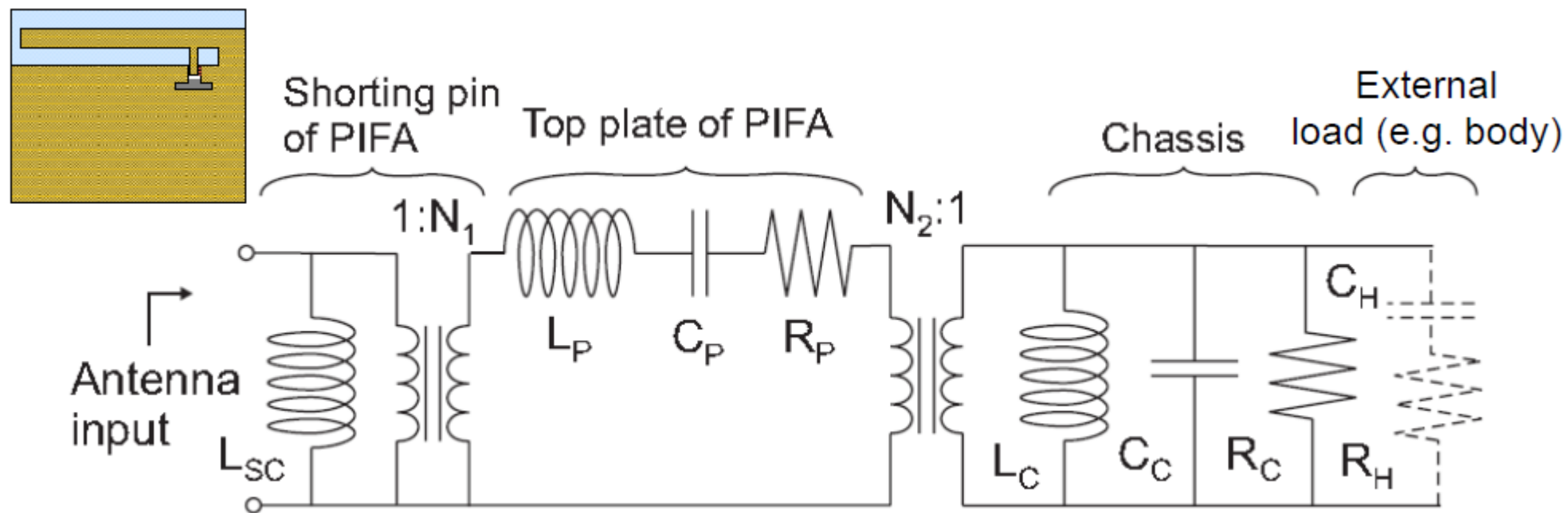
$$Q_z = \frac{Q_0}{1+\alpha}, \quad Q_z = \frac{f_r}{f_2+f_1} \quad f_1, f_2 \text{ odečtením z rezonanční křivky pro pokles o 3dB}$$



Vliv zemní desky na celkovou BW

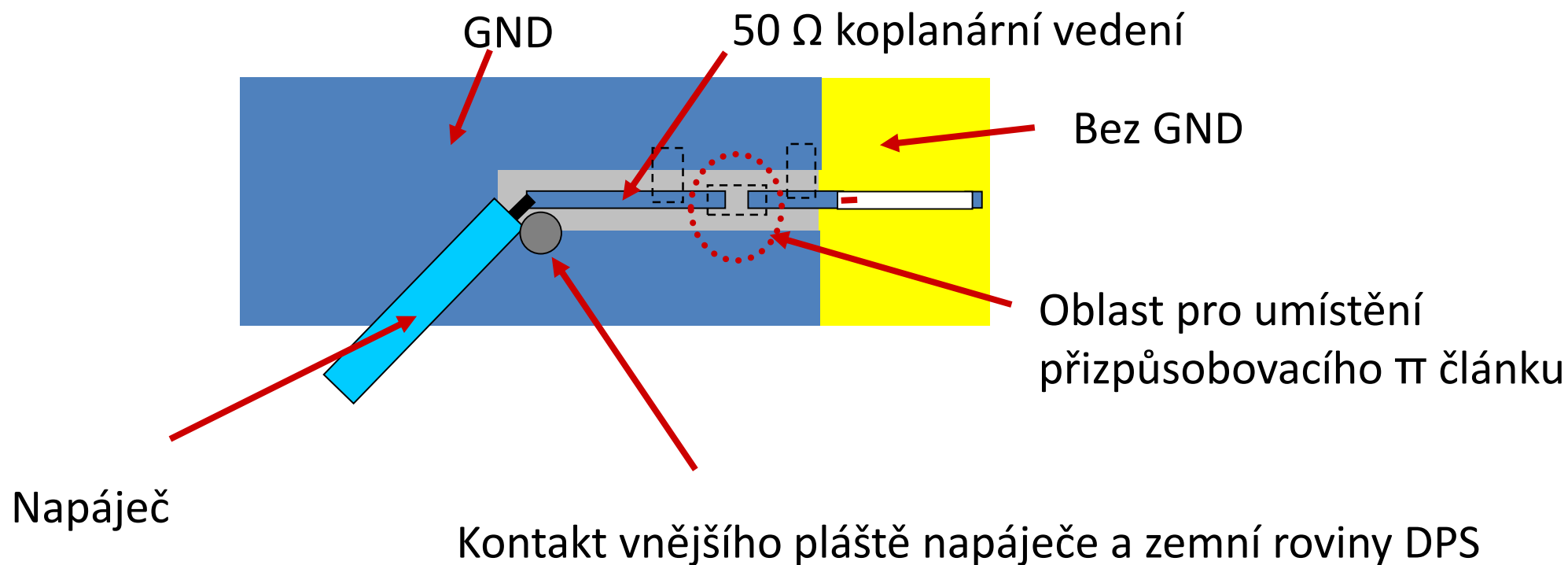
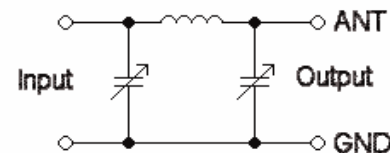
Obvodový model kombinace PIFA antény a zemní desky

Ohnutý monopól (F anténa) je modelovaný jako sériový rezonanční obvod



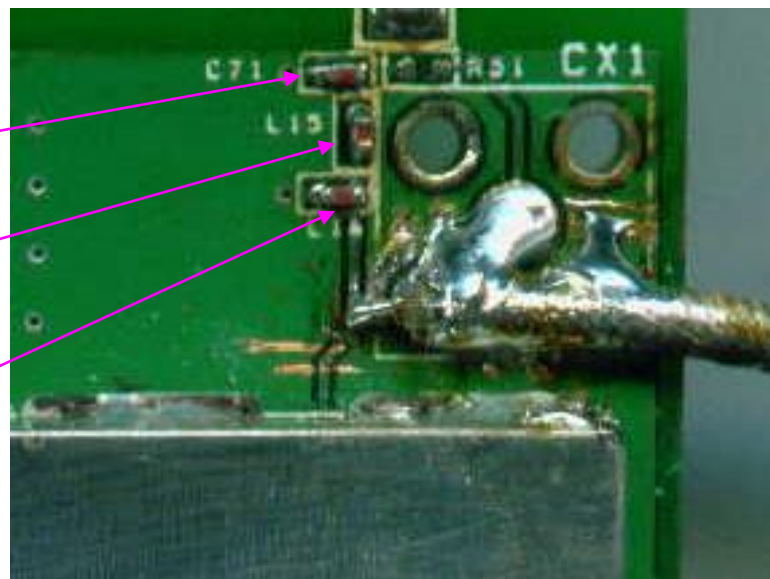
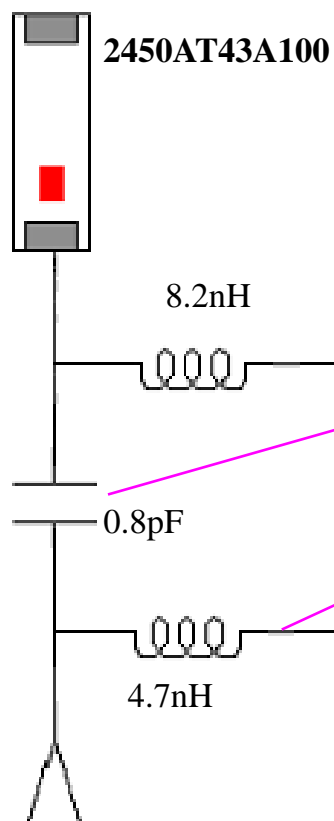
SMT antény - přizpůsobení

- Přizpůsobení (a naladění do rezonance)
 - LC prvky, Γ nebo π články



SMT antény - přizpůsobení

- Přizpůsobení (a naladění do rezonance)
- LC prvky, Γ nebo π články



SMT antény – příklad 1

UHF Chip Antenna, VJ 3505, Vishay Intertechnology, Inc.

- vícevrstvá keramická čipová anténa pro mobilní zařízení
- 35 x 5 x 1,2 mm (35 mm $\sim 1/10 \lambda_0$ @860 MHz)
- pásmo 470 – 860 MHz ($\sim 60\%$)
- všesměrová, lineární polarizace
- Aplikace: mobilní telefony, přenosná multimediální zařízení (Nintendo), notebooky, GPS zařízení, alarmy, RFID, lékařské monitorovací přístroje

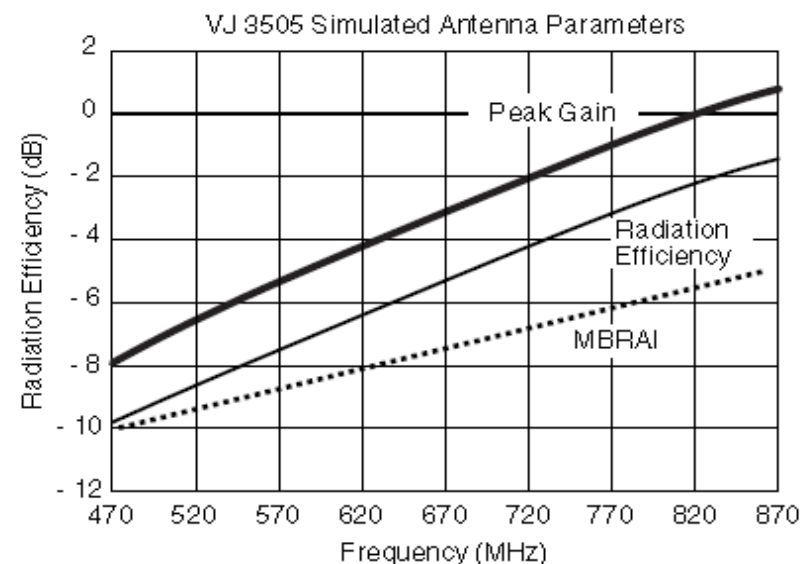


Fig. 1 - Peak Gain and Efficiency vs. Frequency

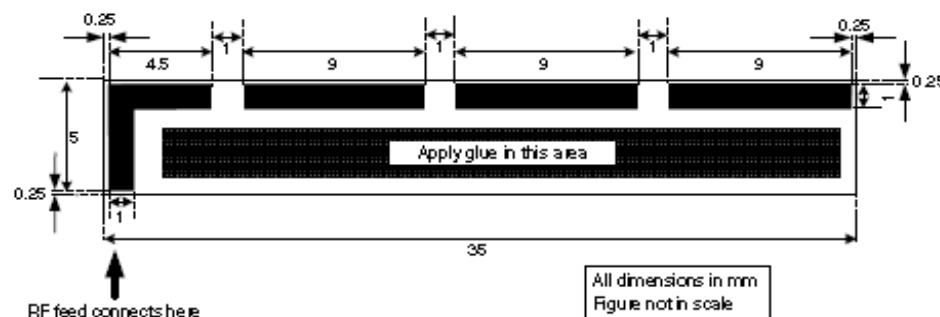


Fig. 4 - VJ 3505 Footprint

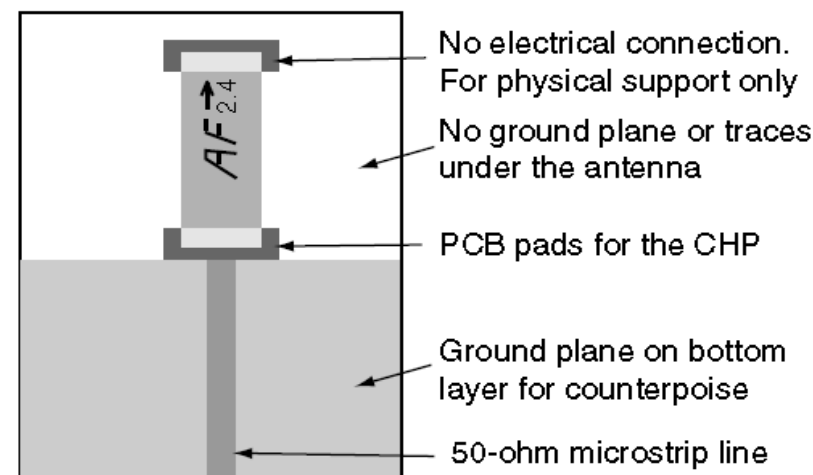
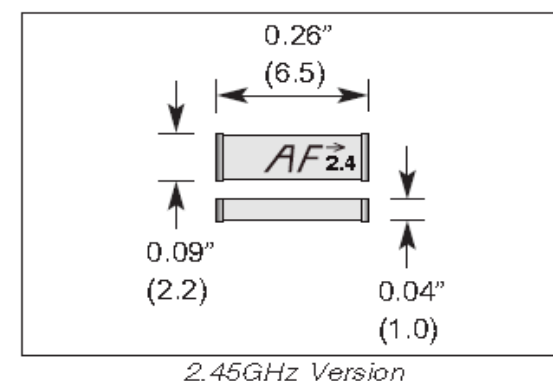
SMT antény – příklad 2

ANT-2.4-CHP-x, ANT-868-CHP-x, ANT-916-CHP-x, Antenna Factor, Inc.

- čipové antény z keramiky LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)
- 6,5 x 2,2 x 1,0 mm @ 2,45 GHz (6,5 mm $\sim 1/20 \lambda_0$ @ 2.45 GHz)
- “> unity gain”
- 50 Ω , nevyžaduje přizpůsobení

PHYSICAL SPECIFICATIONS			
	2.45GHz	868MHz	916MHz
Dimensions (mm)	6.5(L) x 2.2(W) x 1.0(H)	16.0(L) x 3.0(W) x 1.7(H)	16.0(L) x 3.0(W) x 1.7(H)
Operating/Storage Temp	-40 ~ +85°C	-40 ~ +85°C	-40 ~ +85°C
Construction	LTCC	LTCC	LTCC

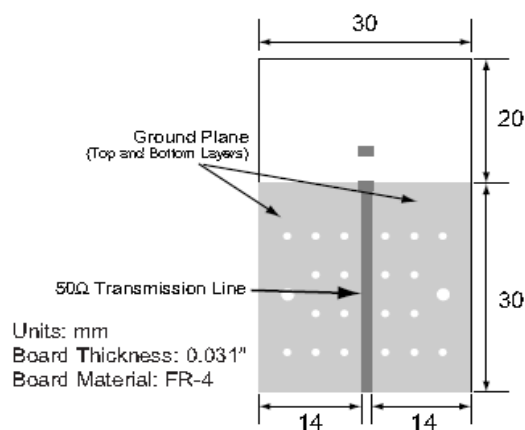
ELECTRICAL PERFORMANCE			
Center Frequency	2.45GHz	868MHz	916MHz
Bandwidth	180MHz	10MHz	10MHz
Wavelength	1/4-wave	1/4-wave	1/4-wave
Pattern	Omni-directional	Omni-directional	Omni-directional
Polarization	Linear	Linear	Linear
VSWR	≤ 2.0 (Max.)	≤ 2.0 (Max.)	≤ 2.0 (Max.)
Maximum Gain	+0.5dBi	+0.5dBi	+0.5dBi
Impedance	50 Ω	50 Ω	50 Ω
Power Handling	3W (Max.)	3W (Max.)	3W (Max.)



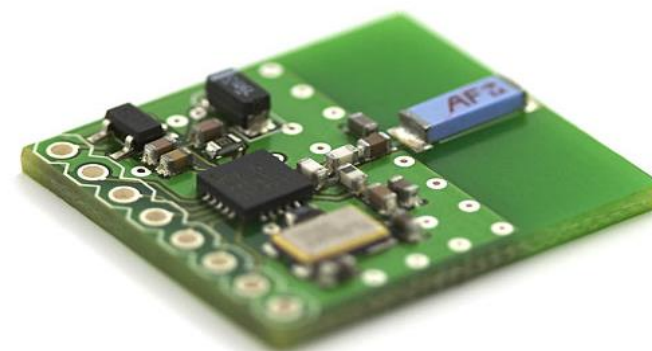
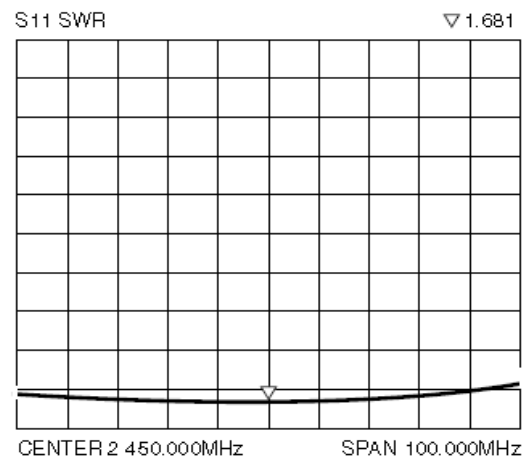
SMT antény – příklad 2

ANT-2.4-CHP-x, ANT-868-CHP-x, ANT-916-CHP-x, Antenna Factor, Inc.

2.4GHZ TEST BOARD

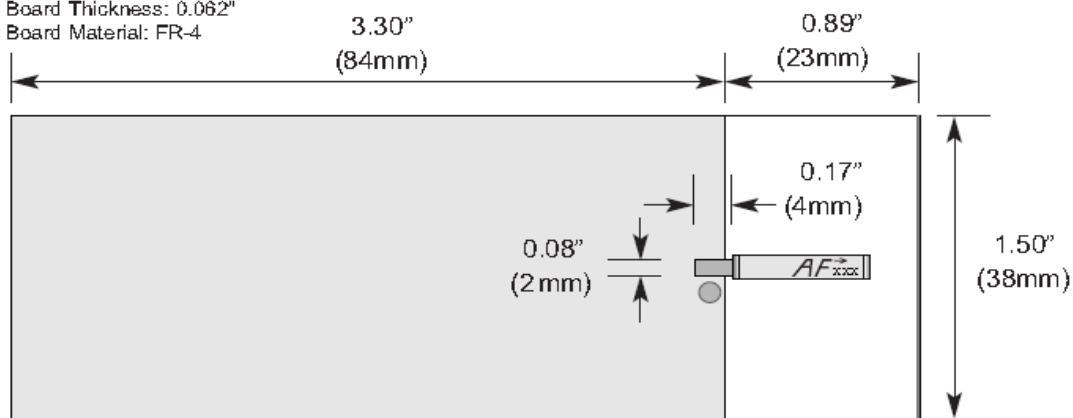


2.4GHz TYPICAL VSWR

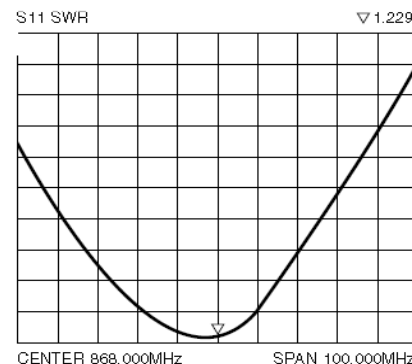


868 & 916MHz TEST BOARD

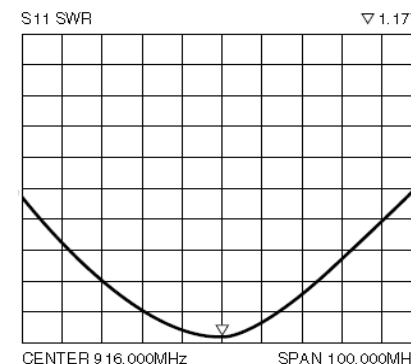
Board Thickness: 0.062"
Board Material: FR-4



868MHz TYPICAL VSWR



916MHz TYPICAL VSWR



Shrnutí (části II.)

Doporučení pro návrh vhodných impedančních vlastností (elektricky) malých antén:

- Pro naladění antény do **rezonance** (self-resonance) a nižší dosažitelný Q je vhodnější **kapacitní zatížení** (disk) než induktivní (meandry – proti směrné proudy zvyšují W_{ak})
- Krátkým dipólovým anténám zvýšíte R_{vyz} **víceprvkovým** uspořádáním
- Malým smyčkovým anténám zvýšíte R_{vyz} **vícezávitovým** provedením
- Další **zvýšení BW** lze dosáhnout **vytěsněním EM pole z „vnitřku“** geometrie **antény** pomocí **magnetických** materiálů (ferity) , viz např. FM antény.
- Pro větší BW lze vybudit **proudy** na **zemní desce**, malá anténa - vazební člen. Pozor na **správné umístění antény** na zemní desce.
- Jiný způsob **rozšíření BW** je **externími přizpůsobovacími LC obvody**. Omezení dosažitelné BW je pak dáno **Bode-Fanovým kritériem**.
- Pro **rozšíření šířky pásma** či **vícepásmovost** lze použít **více rezonancí** (např. Goubau 1976, Choo 2003, PIFA antény mobilních telefonů) příp. přizpůsobovacích obvodů.

Další literatura

- Hansen, R. C., *Electrically small, superdirective, and superconducting antennas*, Hoboken, N. J.: Wiley-Interscience, 2006.
- Miron, D., *Small antenna design*, Oxford: Elsevier, 2006
- Volakis, J. L., Chen, C. C., Fujimoto, K., *Small antennas: miniaturization techniques & applications*, New York: McGraw-Hill, 2010
- IEEEExplore – archív vědeckých článků