

Návrh a Konstrukce Antén

B0M17NKA

Úvodní informace

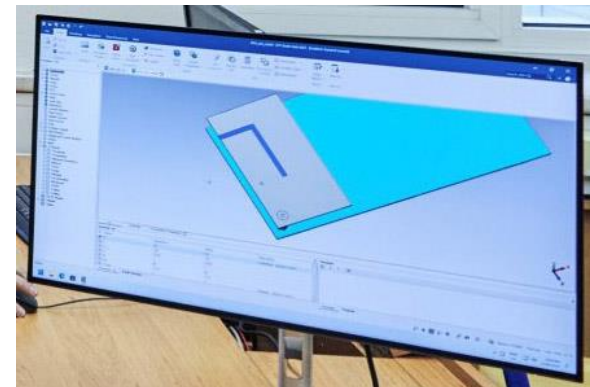
Milan Polívka a kol.
ČVUT v Praze, FEL
B2-639, I. 2270, 5801
polivka@fel.cvut.cz

zima 2023/24



Podmínky zápočtu

- **Rozsah: 2 + 2, z, zk, 6 kr.**
- **Podmínky zápočtu:**
 1. **vypracování 4 projektových úloh**
(2 početní: návrh patche a reflektorové antény,
2 návrhově-realizační: antény mobil. telefonu)
- protokoly elektronicky, odevzdání průběžné,
nejpozději do **10.1.2022 (14. týden)**
 2. **účast na cvičení, přednášky velmi doporučené**
- doplňkový obsah,
- obsahují vše nezbytné k úspěšnému
zvládnutí zkoušky,
- max. omluvené 3 absence.
- **Zkouška:**
písemný test (10 otázek),
výsledná známka tvořena



Náplň předmětu

Přednáška - **středa, 9:15**, místn. č. B2-621

cvičení - **středa, 11:00**, místn. č. B2-621

týden	datum př./cv.	přednáška (st)	cvičení (st)	projekt	kdo (př., cv.)
1.	27.9.	Mikropáskové antény	Výpočet Zvst (Matlab)	1. Patchová anténa	Polívka, Švanda
2.	4.10.	Malé antény I. - principiální limity	EM modelování (MWS)		Polívka, Švanda
3.	11.10.	Malé antény II. - návrhové aspekty	Řešení projektů (MWS)	2.-3. Vícepásmová anténa mobilního telefonu, více variant	Polívka, Švanda
4.	18.10.	Symetrizační a transformační členy v anténní technice	Řešení projektů (MWS)		Polívka, Švanda
5.	25.10.	Antény pro RFID a nositelné antény	Řešení projektů (MWS)		Švanda, Švanda
6.	1.11.	Antény automobilové a antény pro automobilové radarové senzory	Realizace a měření Zvst antén projektové úlohy		Švanda, Švanda
7.	8.11.	Reflektorové antény	projektové příklady	4. Reflektorová anténa	Mazánek, Mazánek
8.	15.11.	Šroubovicové antény	projektové příklady		Mazánek, Mazánek
9.	22.11.	Elektromagnetické modelování vyzařujících struktur	EM modelování (MWS)		Hazdra, Hazdra
10.	29.11.	Teorie charakt. módů, činitel jakosti antén	Matlab, modely		Hazdra, Hazdra
11.	6.12.	Anténní systémy pro síť 5G	Diferenční měření, Matlab		Polívka, Švanda
12.	13.12.	Bezdrátové napájení a "vytěžování" energie	Demonstrace bezdrátového napájení		Švanda, Švanda
13.	20.12.	Širokopásmové antény - spirálové, kuželové dipóly	MWS/Matlab		Polívka, Švanda
14.	10.1.	Širokopásmové trychtýřové antény	Přednáška protažená		Hradecký, Hradecký ^{*)}

Návrh a Konstrukce Antén

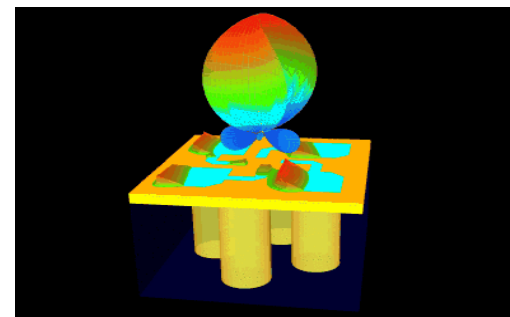
A0M17NKA

Mikropáskové antény



Milan Polívka
ČVUT v Praze, FEL
B2-639, I. 2270, 5801
polivka@fel.cvut.cz

zima 2023/24



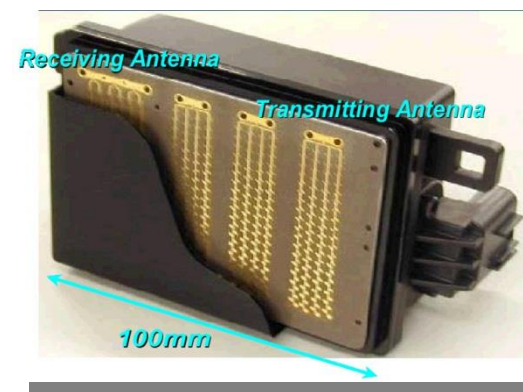
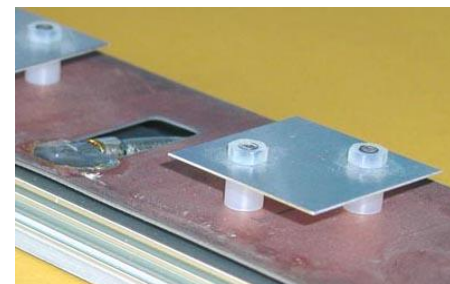
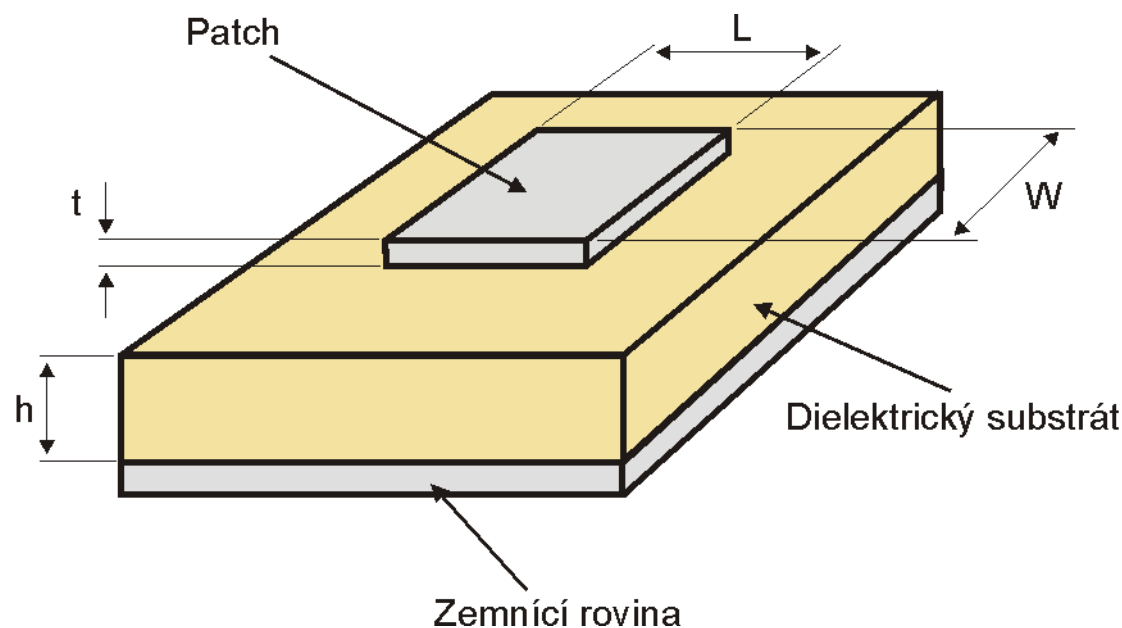
Osnova – co se dozvíte?

- Mikropáskové antény (microstrip antennas, MA)
 - klasifikace, původ a vývoj, vlastnosti, způsoby napájení, použití
- Metody analýzy a návrhu
 - model vedení, dutinový model, numer. metody ...
 - návrhové vztahy, způsoby napájení, šířka pásma, směrové diagramy, ..
- Metody vylepšování vlastností
 - zvětšení šířka pásma,
 - vícepásmovost,
 - miniaturizace,
 - kruhová polarizace,
 - zvýšení zisku, řady.

Mikropásková patchová/flíčková anténa (MPA)

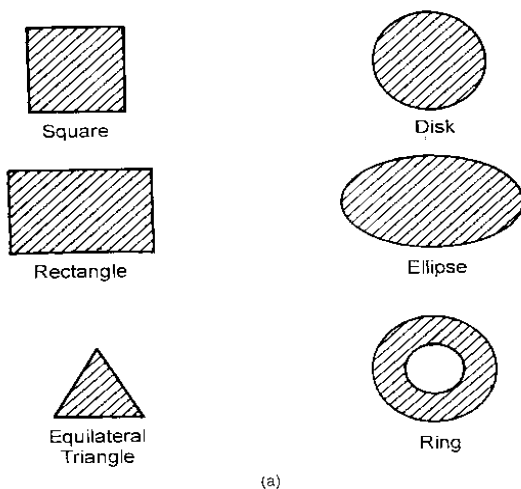
Planární vyzařující rezonátor (ploška, dipól, šterbina)

- vodivý motiv nad zemní rovinou
- dielektrický nebo vzduchový substrát
- napájení – mikropáskové, koaxiální, vazební šterbinou, kapacitní vazbou, ...



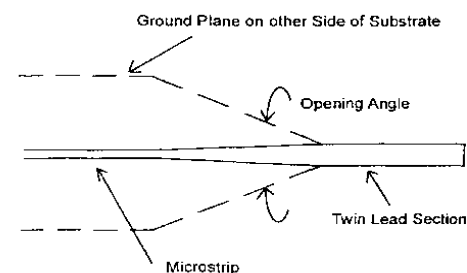
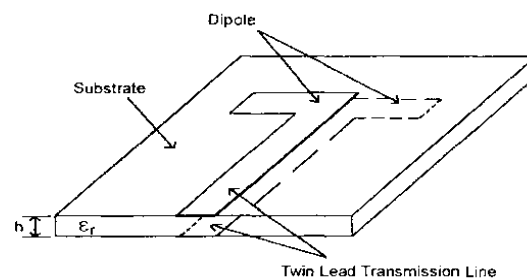
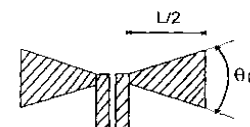
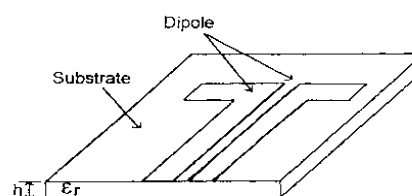
Klasifikace mikropáskových antén

Patchové (flíčkové) antény

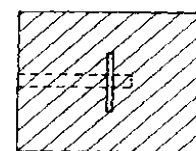
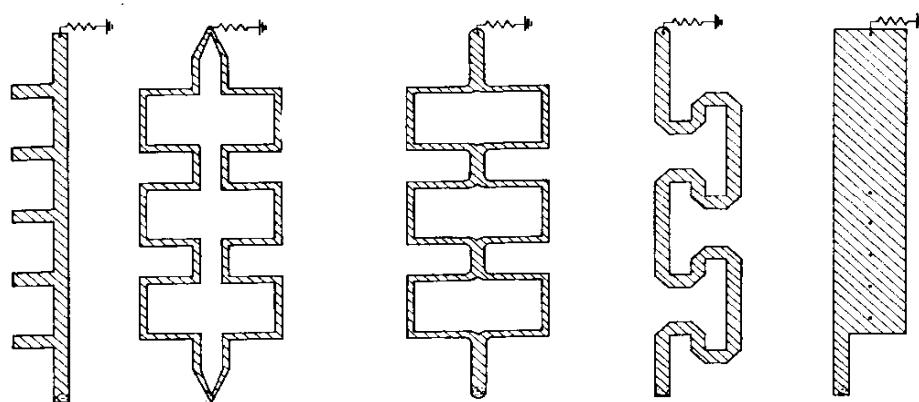


(a)

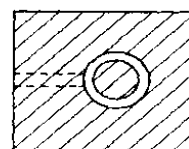
Planární dipóly a štěrby



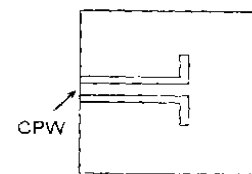
Antény s postupnou vlnou



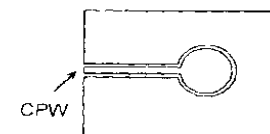
Rectangular Slot with Microstrip Feed



Annular Slot with Microstrip Feed



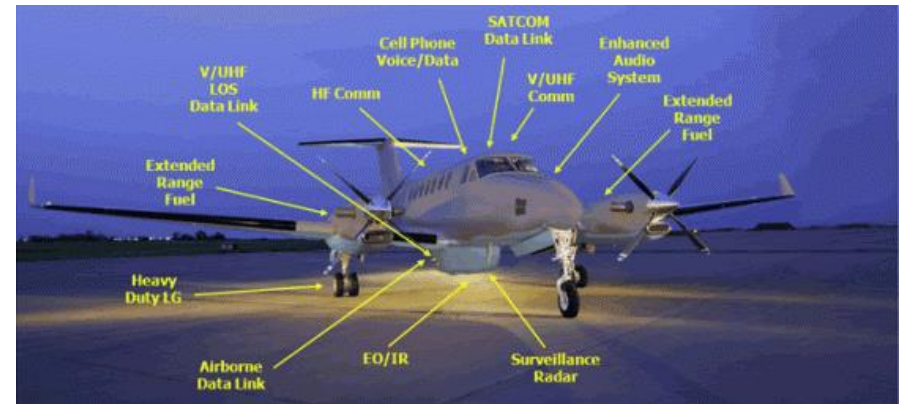
Rectangular Slot with CPW Feed



Annular Slot with CPW Feed

Původ a vývoj MA

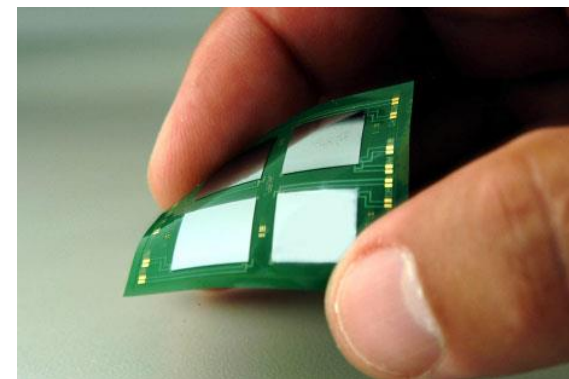
- 1950-60 - nová **technologie páskových vedení** (filtry, koncept MPA)
- 1953 - návrh **první MPA** (Munson)
- 1970-80 - MA se stávají populárními (**nízkoztrátové materiály**,
vývoj **metod analýzy**,
specializované knihy, ...),
vhodné jako antény pro letadla, rakety, ...
- 1990-2000 - vývoj **EM simulátorů** pro analýzu MA, miniaturizační a
vícepásmové techniky (s rozvojem mobilních komunikací)
- 2000 - použití **uměle vytvářených EM materiálů** pro **vylepšování vlastností**
MA, MPA (potlačení povrchových vln, fokusaci energie, ..)
- 2010 – **pokročilá miniaturizace**, principiální limity/dosažitelné parametry



Vlastnosti MPA

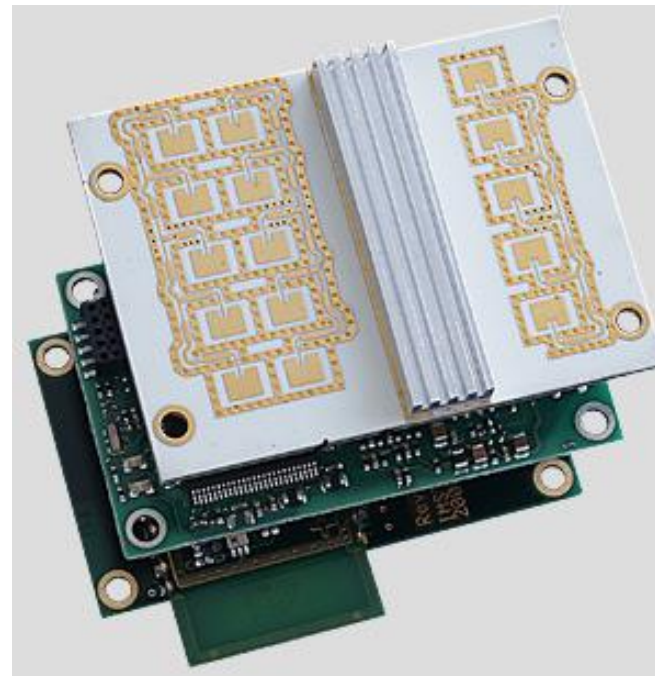
Výhodné

- malá hmotnost, nízký profil, konformní tvar
- integrovatelné na DPS s aktivními prvky (on-chip antennas and flexible antennas)
- lineární i kruhová polarizace
- elektricky zmenšené a vícepásmové
- nízké výrobní náklady



Nevýhodné

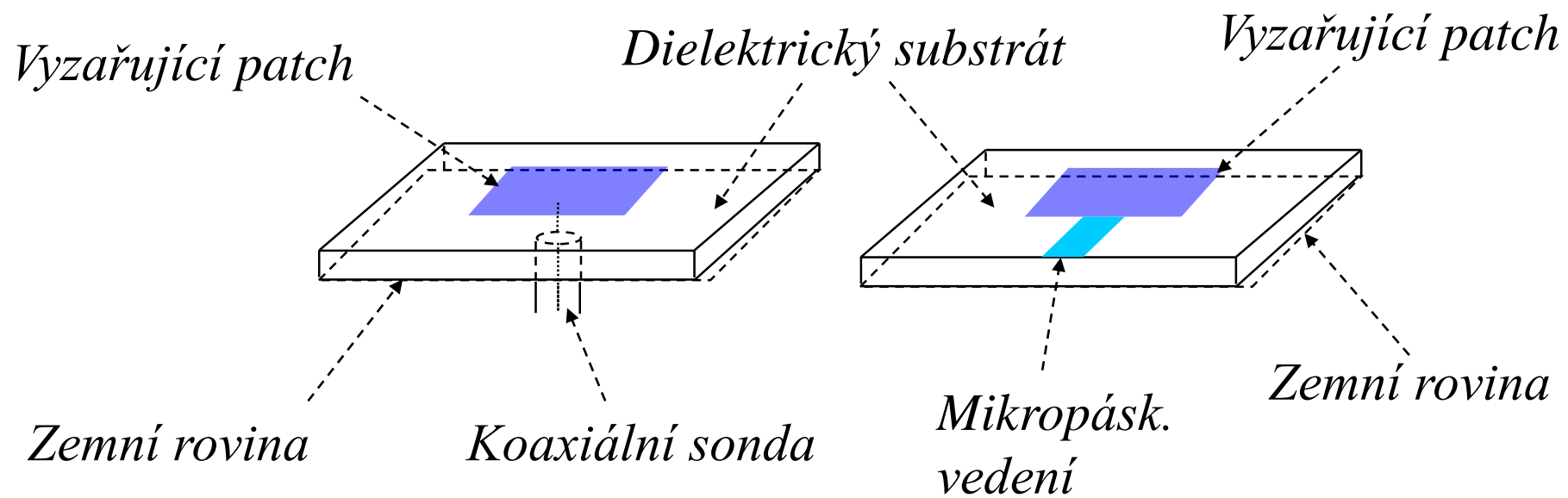
- nižší účinnost
- nižší výkonová zatížitelnost
- úzká šířka pásma (vyšší Q)
- horší polarizační čistota



Napájení

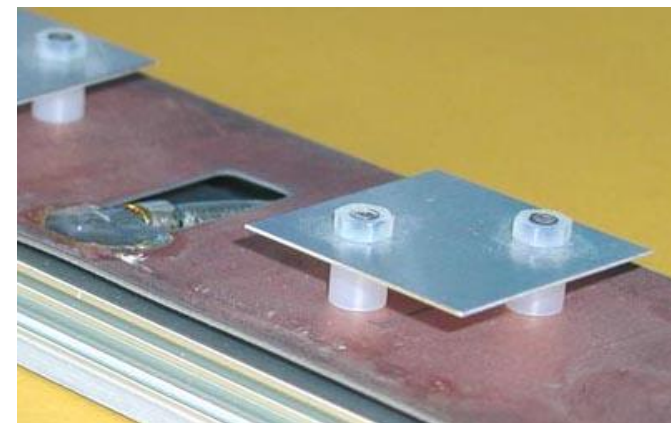
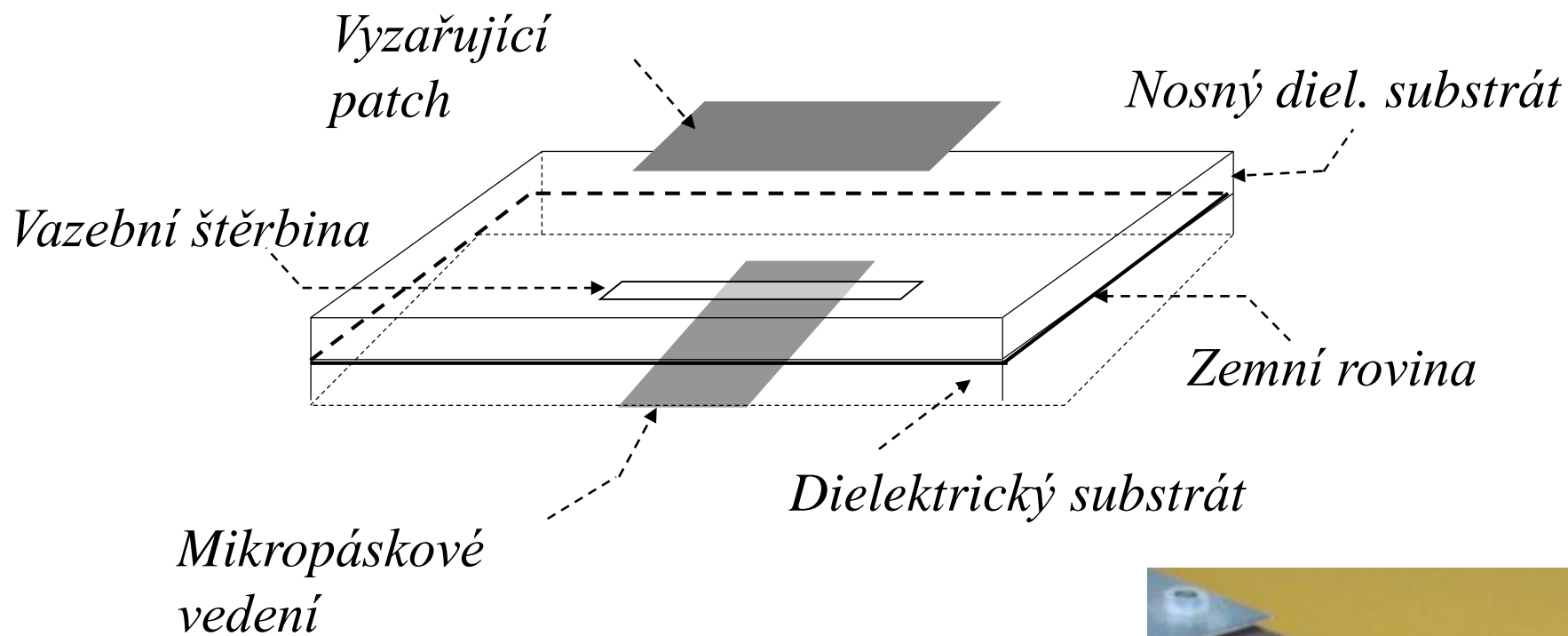
koaxiální

mikropáskové



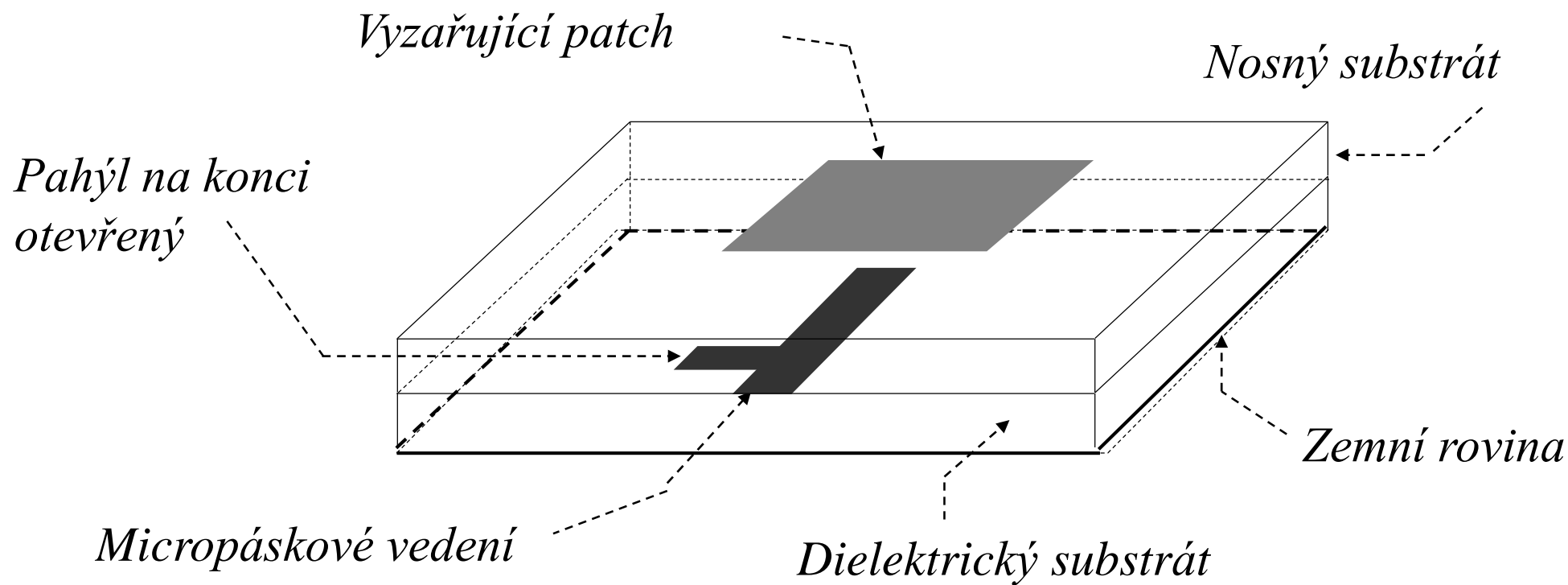
Napájení

vazební štěrbinou (Pozar, 1985)



Napájení

kapacitní vazbou (1987)



Metody analýzy

Analytické:

- **Model vedení** – MPA jako **úsek vedení s vyzařujícími štěrbinami**, jednoduchý, méně přesný, dobrý fyzikální náhled na princip činnosti
- **Dutinový model** – MPA jako **dutina**, složitější, přesnější

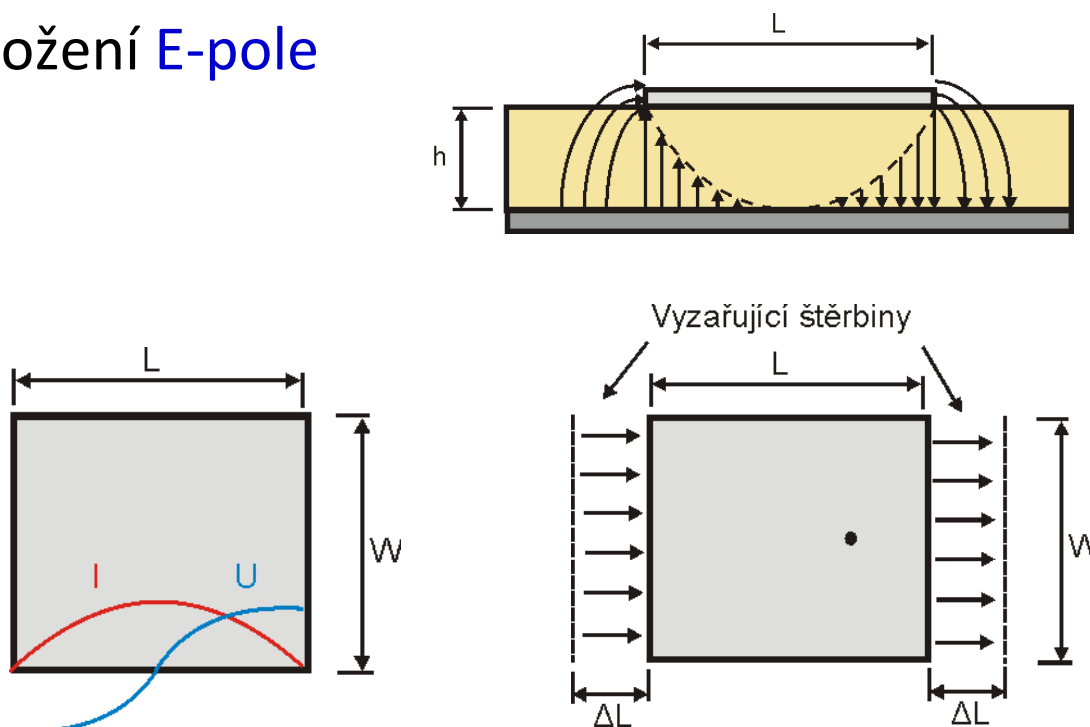
Numerické:

- **Vlnová analýza (full-wave)** – **proudy/intenzity polí** na/kolem na MPA, přesná, nutnost implementovat numerické řešení integrálních nebo diferenciálních rovnic (MoM, FDTD, FEM, hybridní metody), komerční simulátory pole (FEKO, CST MWS, Zeland IE3D, Ansoft HFSS, WIPL, ...)

Model vedení (Transmission line model, TLM)

MPA může být modelována jako **dvojice vyzařujících štěrbin** spojených širokým úsekem mikropáskového vedení délky $L \sim \lambda_g/2$

- Rozložení E-pole



Rozměry, návrhové vztahy

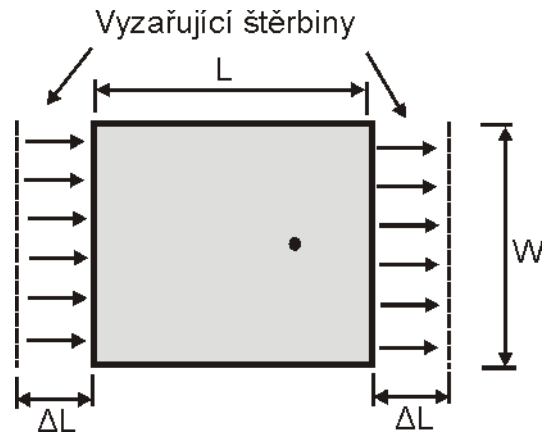
$$L + 2dl = \lambda_g / 2$$

$$L = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{ef}} f_r} - 2dl$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Model vedení (TLM)

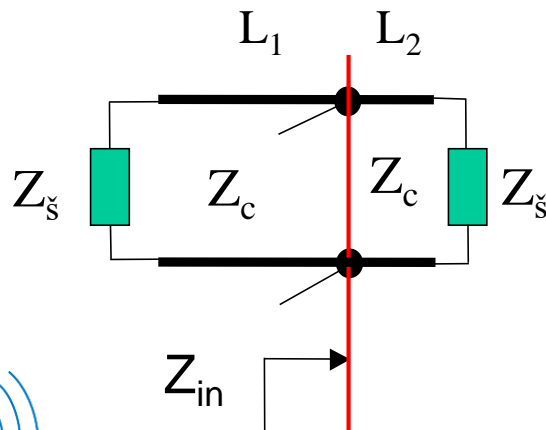
MPA může být modelována jako **dvojice vyzařujících štěrbin** spojených širokým úsekem mikropáskového vedení délky $L \sim \lambda_g/2$



Vstupní impedance -

transformací impedancí $Z_{\check{s}}$ obou štěrbin podél úseků vedení L_1 a L_2 do napájecího bodu

$$\Rightarrow Z_{in} = 1 / (1 / Z_1 + 1 / Z_2)$$



$$Z_1 = Z_c \frac{Z_{\check{s}} + jZ_c \tan \beta L_1}{Z_c + jZ_{\check{s}} \tan \beta L_1}$$

$$Z_2 = Z_c \frac{Z_{\check{s}} + jZ_c \tan \beta L_2}{Z_c + jZ_{\check{s}} \tan \beta L_2}$$

$$\beta = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_{re}}}{\lambda_o}$$

Model vedení (TLM)

Charakteristická admitance mikropáskového vedení

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right] & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]} & \frac{W}{h} > 1 \end{cases}$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-1/2} \quad \frac{d\ell}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813 \right)}$$

Model vedení (TLM)

Vyzařující štěrbina je reprezentována **admitancí** $Y_{\text{ř}} = 1/Z_{\text{ř}} = G + jB$

kde G - vyzařovací ztráty

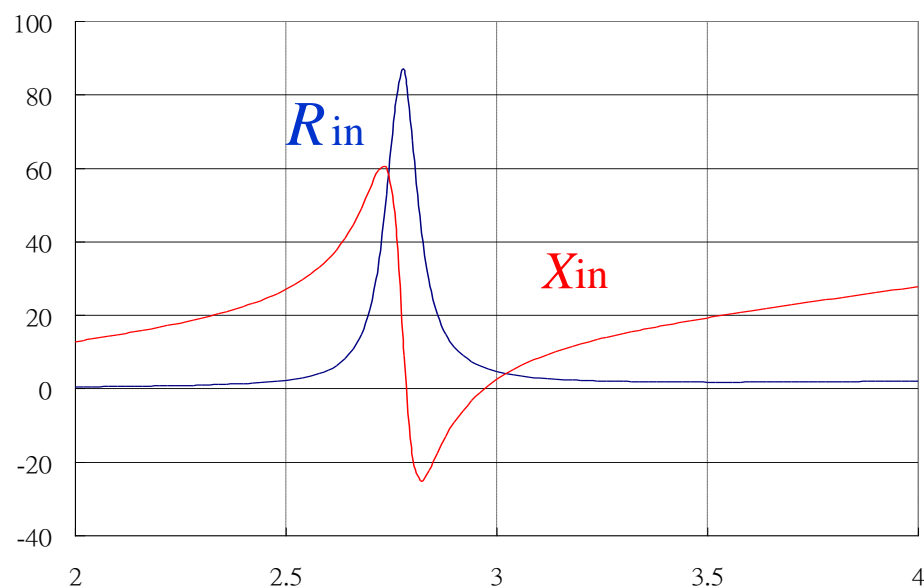
B - energie akumulovaná v rozptylovém poli, též kapacitní prodloužení rezonanční délky

Empirické vztahy pro G, B ¹⁾

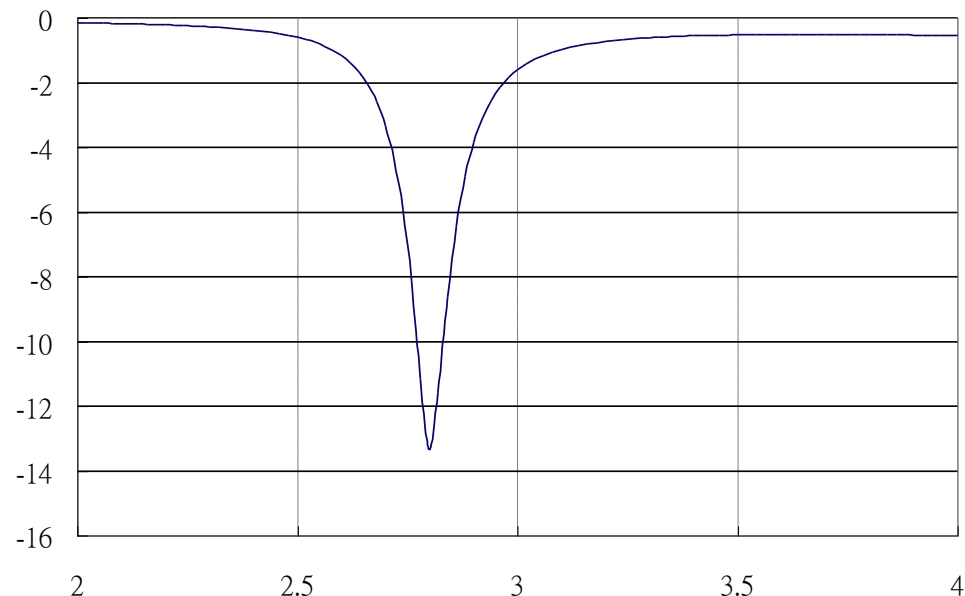
$$G = G_1 = G_2 = \frac{W}{120\lambda_o} \left[1 - \frac{1}{24} (k_o h)^2 \right] \quad h/\lambda_o < 1/10$$
$$B = B_1 = B_2 = \frac{W}{120\lambda_o} [1 - 0.636 \ln(k_o h)] \quad 0,35 < W/\lambda_o < 2$$

Vstupní impedance (TLM)

Typický průběh Z_{vst} a koeficientu odrazu



Vstupní impedance vs. frekvence

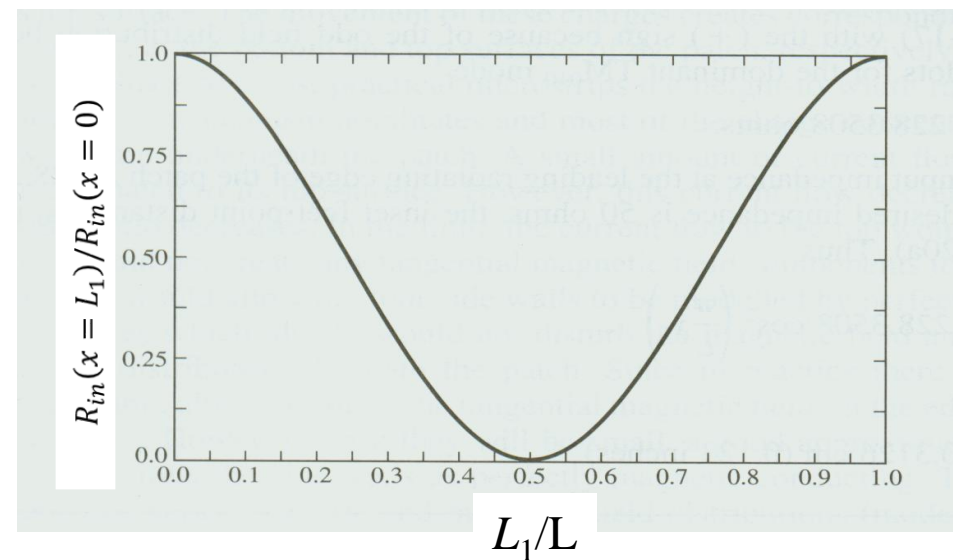
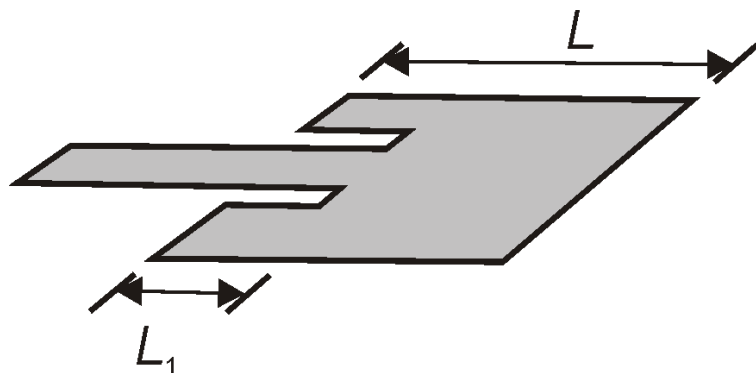


MS_{11} vs. frekvence

Vstupní impedance (TLM)

V rezonanci je $Z_{in} = R_{in}$

$$R_{in}(x = L_1) = R_{in}(x = 0) \cos^2\left(\frac{\pi L_1}{L}\right) = \frac{1}{2G_1} \cos^2\left(\frac{\pi L_1}{L}\right)$$



Typické hodnoty $R_{in}(L_1 = 0) \sim 100$ až 300Ω dle W, h, \dots

Dutinový model MPA

Výška substrátu h malá ($h \ll \lambda$, $h \ll W$, L)

E pole se nemění s výškou $h \Rightarrow$

$$E = E_z(x, y), H = H_{xy}(x, y) - \text{TM}_{nm} \text{ módy}$$

Hraniční podmínky:

$$\text{shora, zdola (PEC)} \quad E_t = 0 \quad H_n = 0$$

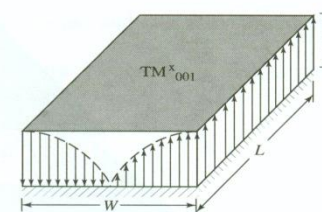
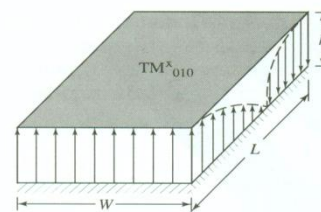
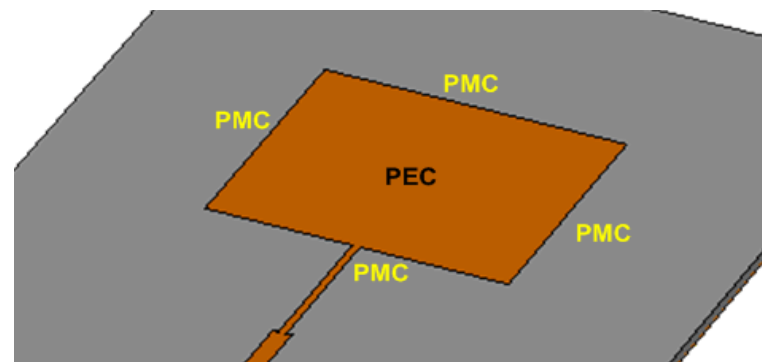
$$\text{boční stěny (PMC)} \quad H_t = 0 \quad E_n = 0$$

Z vlnové rovnice pro E rozložení pole v dutině

$$E_z(x, y) = \frac{j\omega\mu_0 I_0}{L \cdot W} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{m\pi x_0}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi y_0}{W}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{W}\right)}{k_0^2 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta_{\text{eff}}) - k_{mn}^2}$$

$$k_{mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2$$

$$\text{Rezonanční frekvence} \quad f_{R,mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2}$$



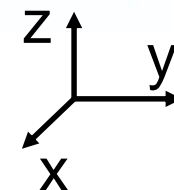
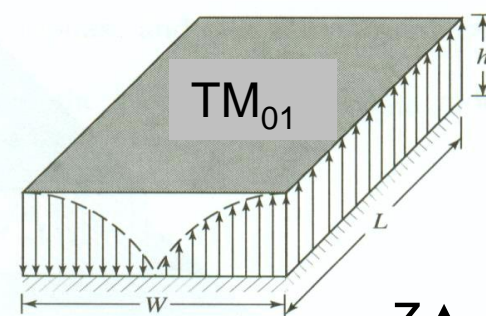
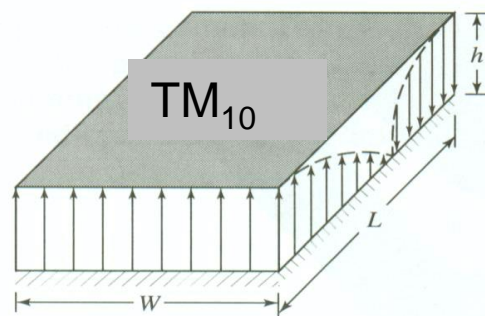
Zohlednění rozptylového pole efektivními rozměry: W_{ef} , L_{ef} místo W , L

Dominantní módy

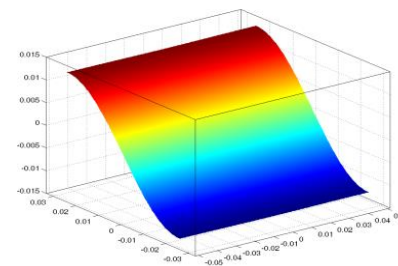
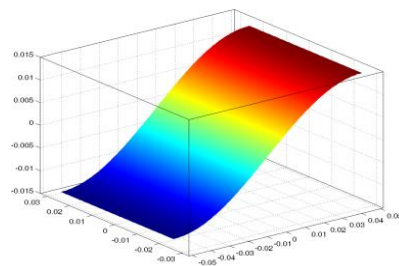
Dva módy s nejnižší rezonanční frekvencí - **dominantní módy**

$$\text{TM}_{10} \quad (f_r)_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

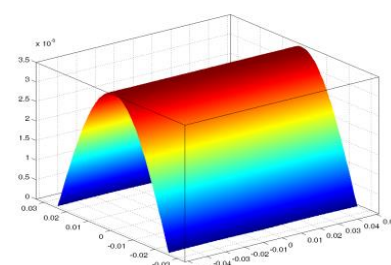
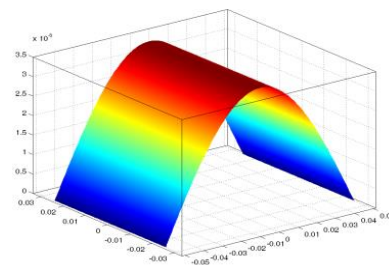
$$\text{TM}_{01} \quad (f_r)_{01} = \frac{c}{2W\sqrt{\epsilon_r}}$$



Intenzita elektrického pole E



Proudová hustota J

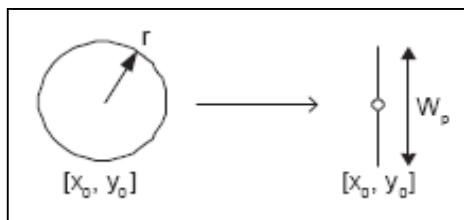


Dutinový model MPA

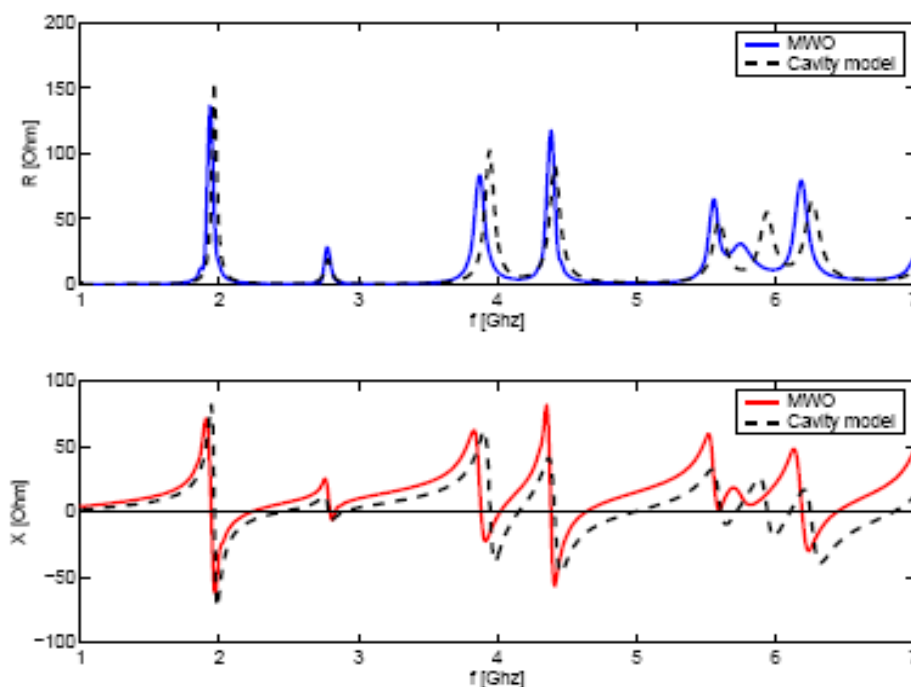
Vstupní impedance - dutinový model (40 módů) a komerční MoM simulátor

$$Z_{in}(x_0, y_0) = -j\omega\mu_0 h \sum_m \sum_n \frac{\langle E_{z,n}(x, y), J_z(x_0, y_0) \rangle^2}{\langle E_{z,n}(x, y), E_{z,n}(x, y) \rangle} \frac{1}{(k_0^2 \epsilon_r (1 - j \tan \delta_{eff}) - k_n^2)} =$$

$$= -\frac{j\omega\mu_0 h}{L \cdot W} \sum_m \sum_n \frac{\cos^2\left(\frac{m\pi x_0}{L}\right) \cos^2\left(\frac{n\pi y_0}{W}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{n\pi W_p}{2}\right) \kappa_m \kappa_n}{(k_0^2 \epsilon_r (1 - j \tan \delta_{eff}) - k_n^2)}$$



$$W_p = r e^{3/2}$$

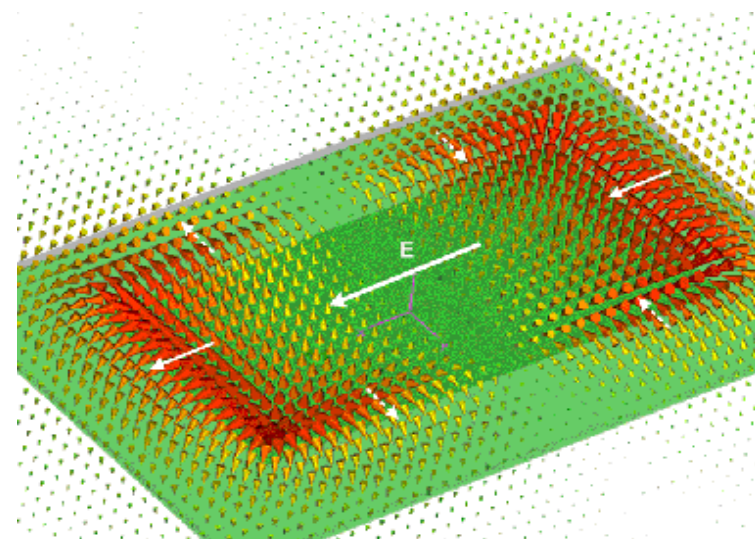
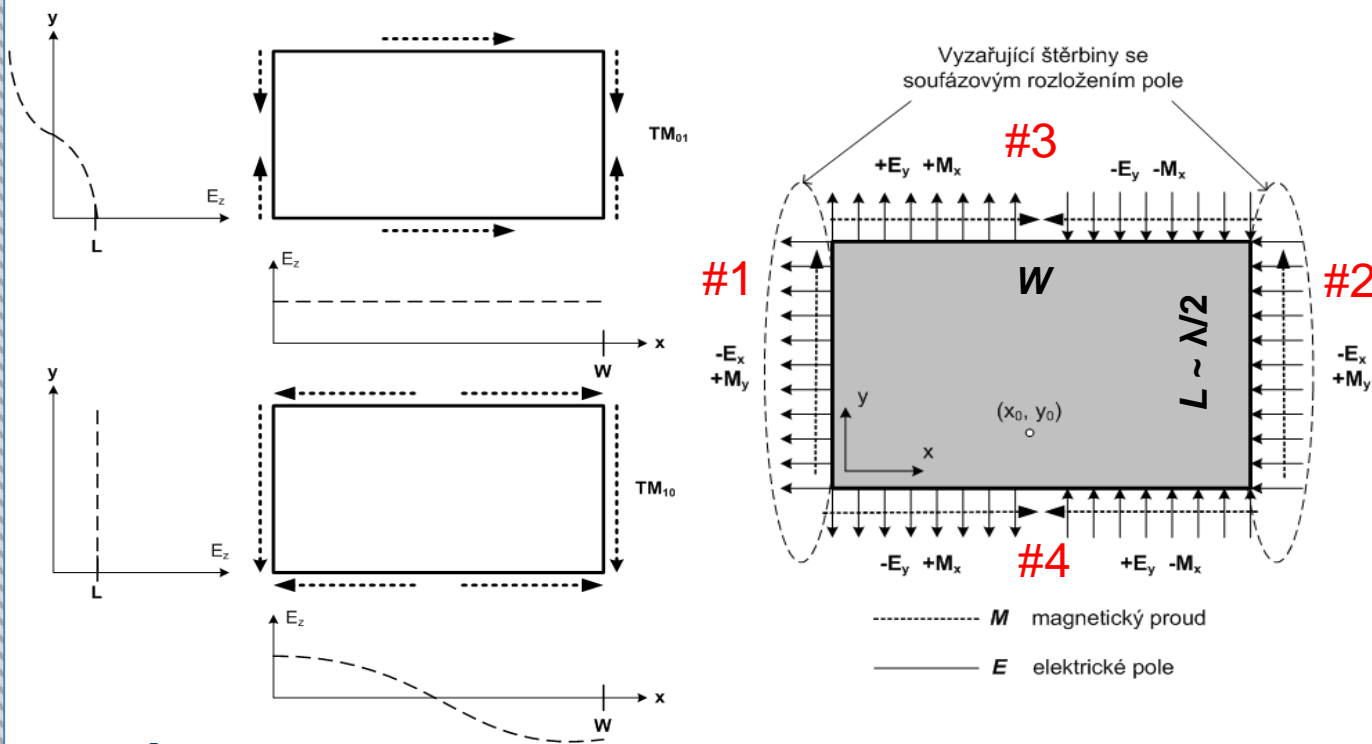


Vyzařování z aperturové teorie

Zdrojové oblasti vyzařování – štěrby s el. polem

- štěrby #1, #2 – hlavní zdroj vyzařování (ekviv. mag. proud. hustota \mathbf{M})
- štěrby #3, #4 – vyzařování lze zanedbat, \mathbf{M} v protifázi
- dvojice zářičů (štěrbín) vzdálených $\sim \lambda_g/2$
- maximum vyzařování ve směru normály k ploše

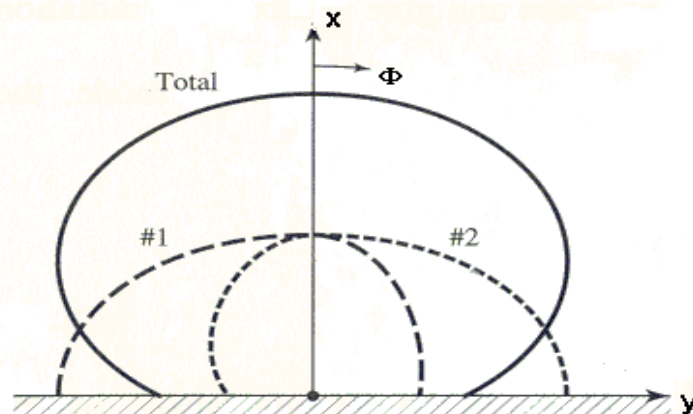
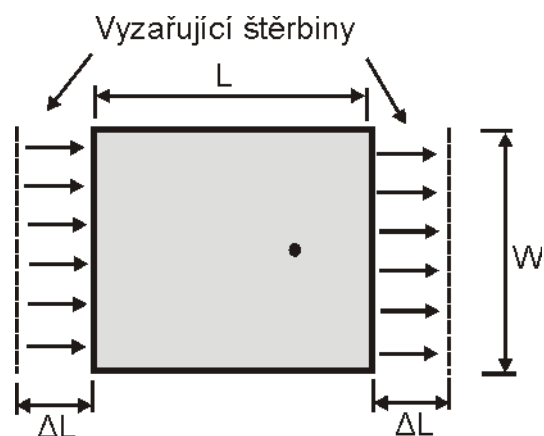
$$\mathbf{M} = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}$$



Vzdálené pole, směrová charakteristika

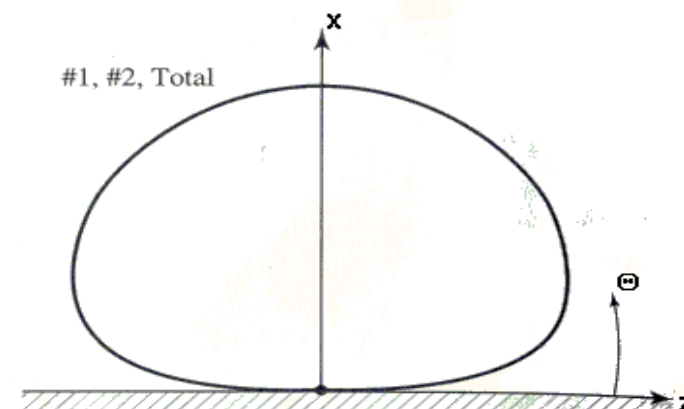
- El. pole ve vzdálené oblasti

$$E_{\phi} = +j \frac{V_0 \cdot e^{-jk_0 r}}{\pi r} \underbrace{\left(\sin \theta \cdot \frac{\sin \left(\frac{k_0 \cdot W}{2} \cdot \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right)}_{\text{štěrbina}} \cdot \underbrace{2 \cos \left(\frac{k_0 \cdot L}{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \right)}_{\text{dvojice}}$$



(a) E-plane

E-rovina, xy



(b) H-plane

H-rovina, xz

Směrové diagramy

Příklad měřených charakteristik patche

Parametry:

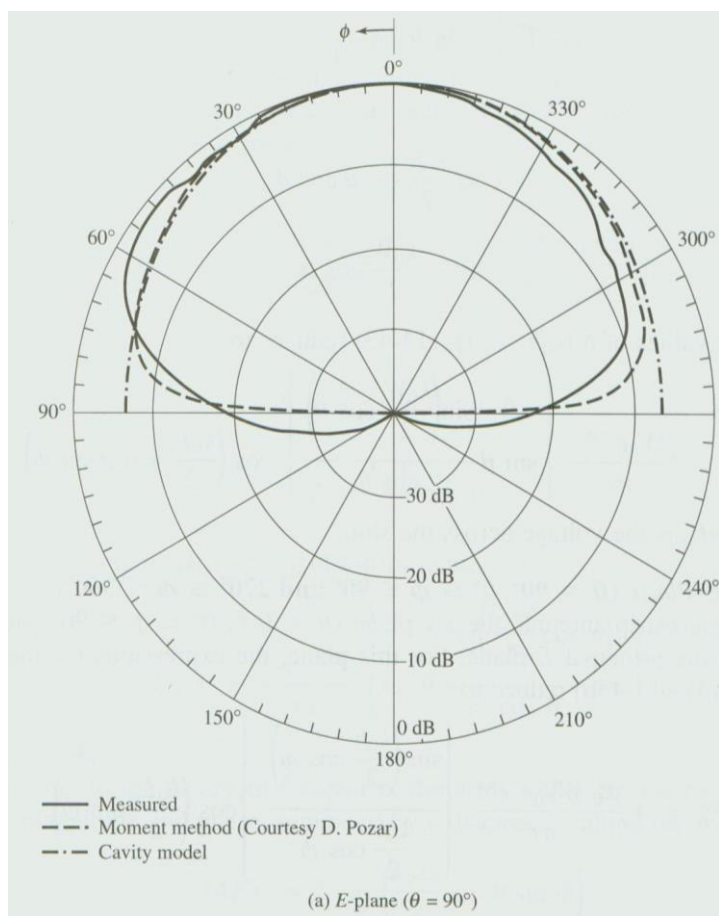
$$f_0 = 10 \text{ GHz}$$

$$\epsilon_r = 2,2$$

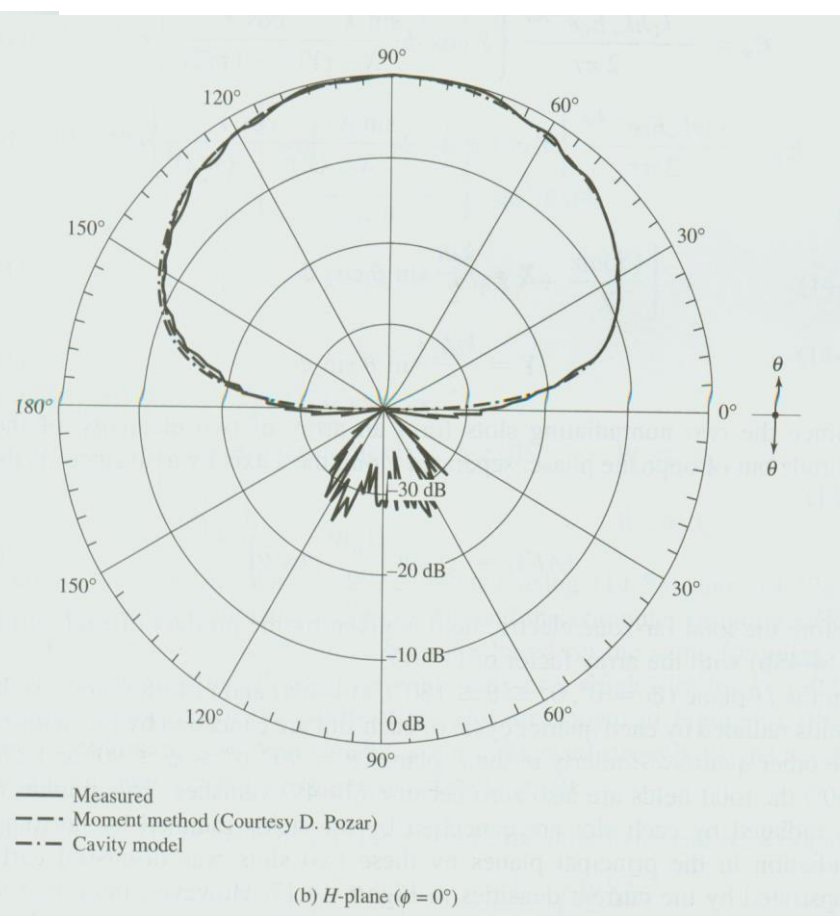
$$h = 1,6 \text{ mm}$$

$$L = 9,06 \text{ mm}$$

$$W = 10,68 \text{ mm}$$



E-rovina



H-rovina

Šířka pásma

Impedanční šířka pásma (BW) je **frekvenční rozsah**, ve kterém je poměr stojatých vln **PSV** na vstupní bráně **lepší** než zvolená **hodnota** dané **veličiny**. (typ. **PSV** ≤ 2, u precizních měřících antén zpravidla $PSV \leq 1,5$ event. 1,2; v mobilních komunikacích naopak i horší $PSV \leq 3$)

$$BW = \frac{PSV - 1}{Q_T \sqrt{PSV}} \cdot 100 \quad [\%], \quad \text{pro } PSV = 2 \text{ je } BW = \frac{1}{\sqrt{2} Q_T} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$Q_T = \frac{\omega \cdot W_T}{P_T} = 1 / \left(\frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \right) = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_{ef}}$$

$$Q_d = \frac{\omega \cdot W_T}{P_d} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}$$

$$Q_c = \frac{\omega \cdot W_T}{P_c} = \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma t}$$

Typická $BW \approx 1$ až 3 % pro $h \approx 0,02 \lambda_0$,
s výškou lineárně roste.

Dominantní vliv má Q_r – je nejnižší.

$$Q_r = \frac{\omega \cdot W_T}{P_r} = c \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{4 f h}$$

Metody rozšíření šířky pásma

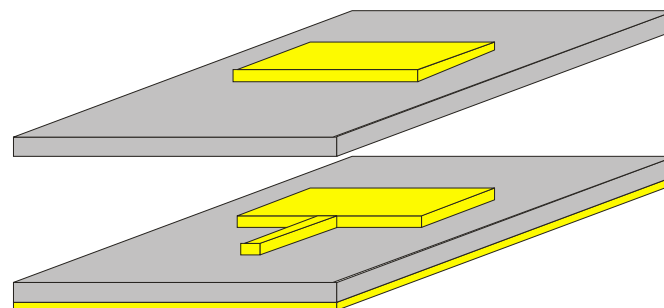
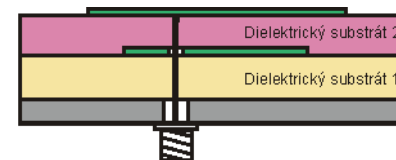
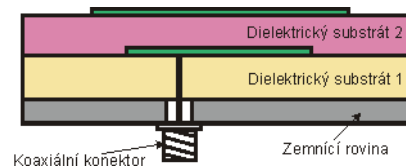
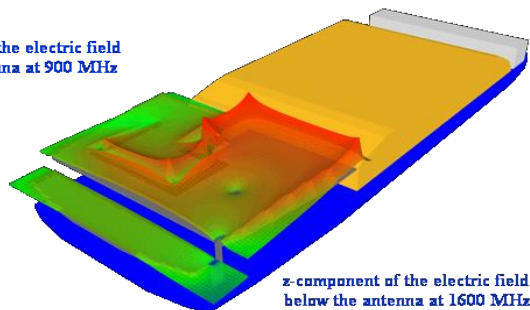
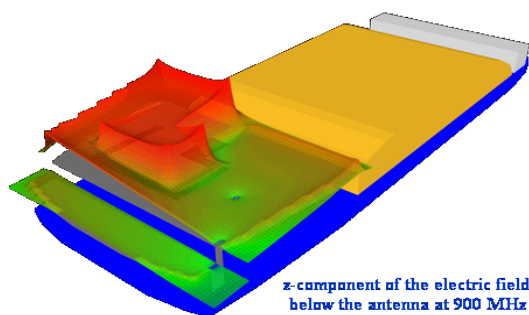
1. Snížením činitele jakosti Q

- použití **malé** ϵ_r , vzduchový substrát ($BW < 10\%$)
- **zvýšením výšky** h substrátu (L-napájecí sonda, $BW = 35 \sim 50\%$)

$$BW \sim 1/Q_T \quad Q_r = \frac{\omega \cdot W_T}{P_r} = c \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{4f h}$$

2. Vícenásobnými blízkými rezonancemi

- **multimódový provoz** patchů ($BW = 20 \sim 30\%$)
- **parazitní prvky** kapacitně vázané k patchi (koplanární, vrstvené)



Směrovost, účinnost

- Lineární polarizace
- Směrovost $\approx 6 - 10$ dBi
- Účinnost:

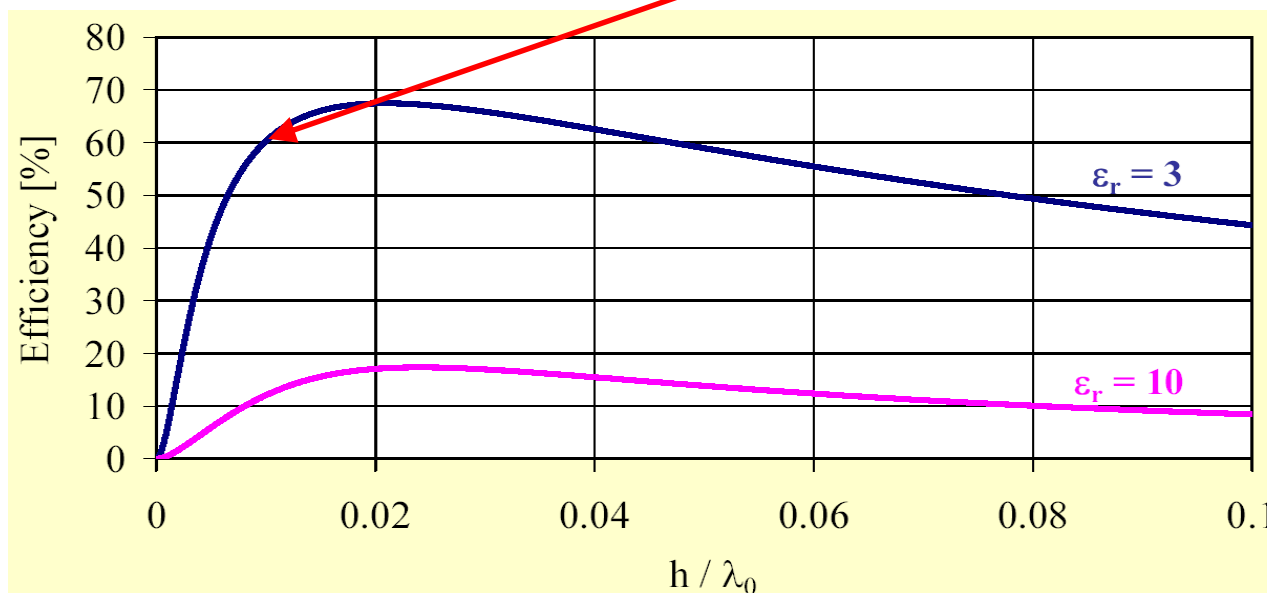
$$\eta = \frac{P_{\text{vyz}}}{P_{\text{vyz}} + P_{\text{vod}} + P_{\text{diel}} + P_{\text{povrch}}}$$



141,0 x 61,5 x 3,0 mm,
 $\epsilon_r = 3,05$, $\text{tg} \delta = 0,003$
 $h/\lambda_0 \sim 0,009$,
 $\eta \sim 60 \%$

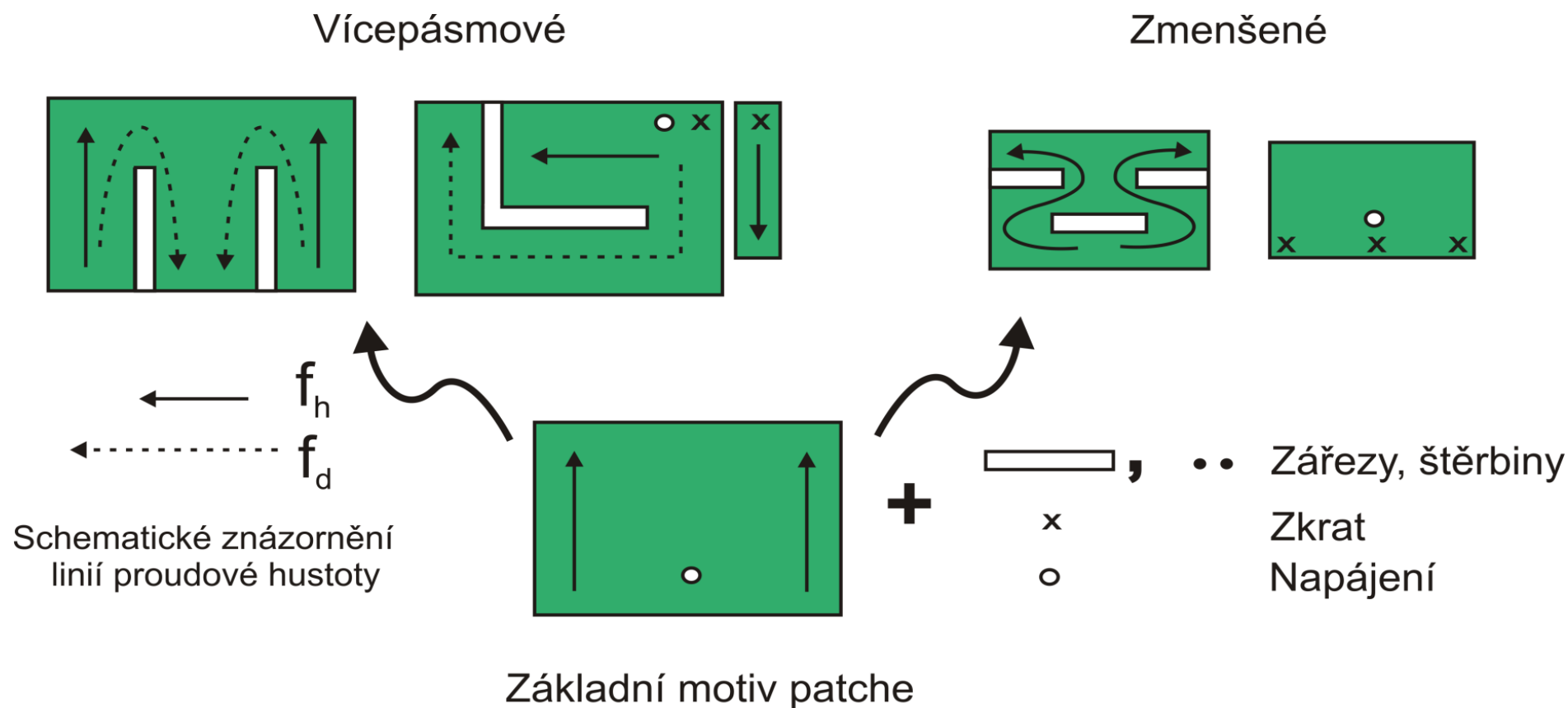
- Pokles účinnosti pro velmi nízké h/λ_0 ($< 0,01$)
- Ztráty

- vyzařovací
- vodivostní
- dielektrické
- povrchovými vlnami



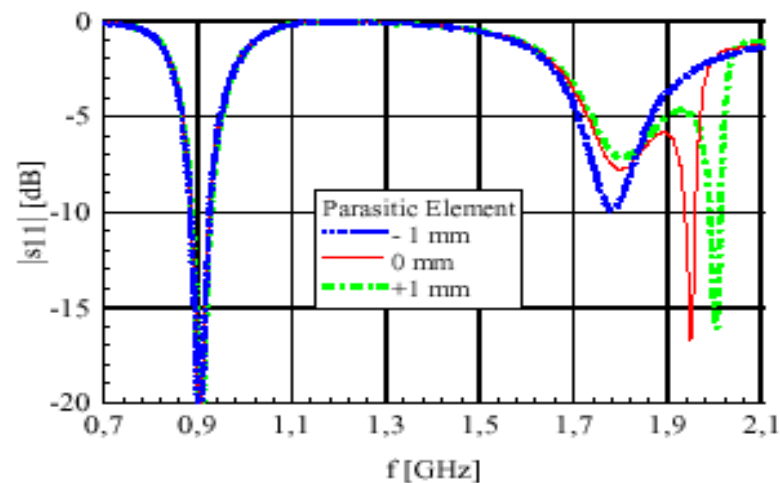
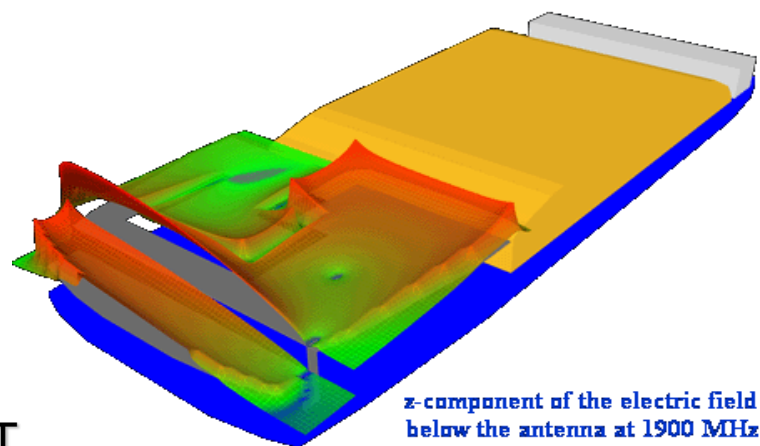
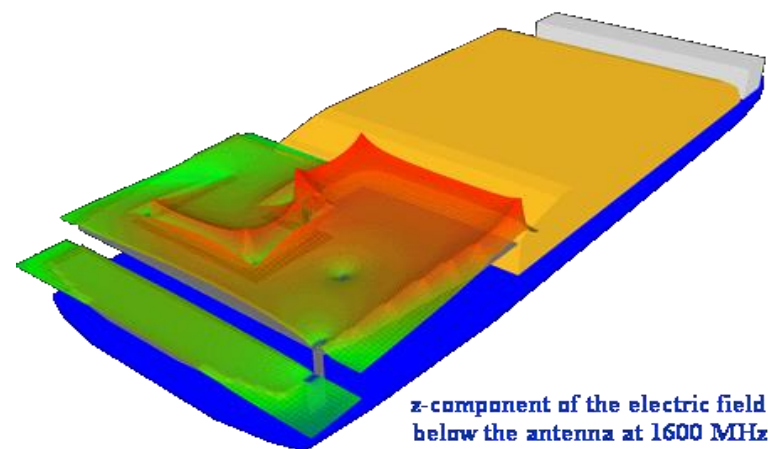
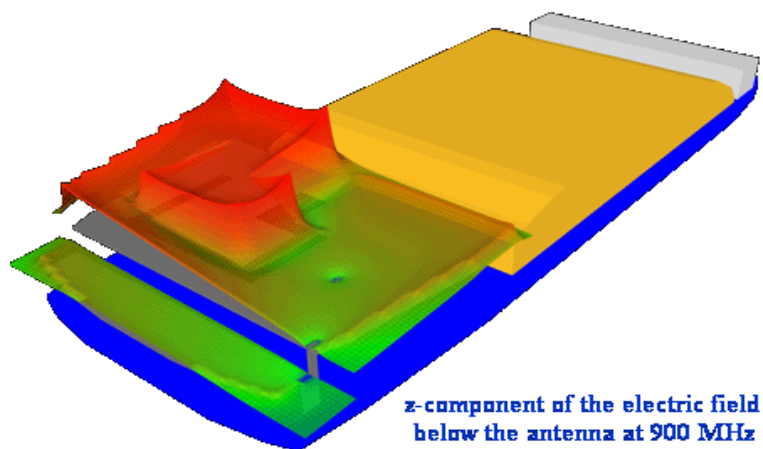
Techniky zmenšování a vícepásmového provedení

- Tvarovou úpravou motivů zkratováním a použitím zářezů a štěrbin



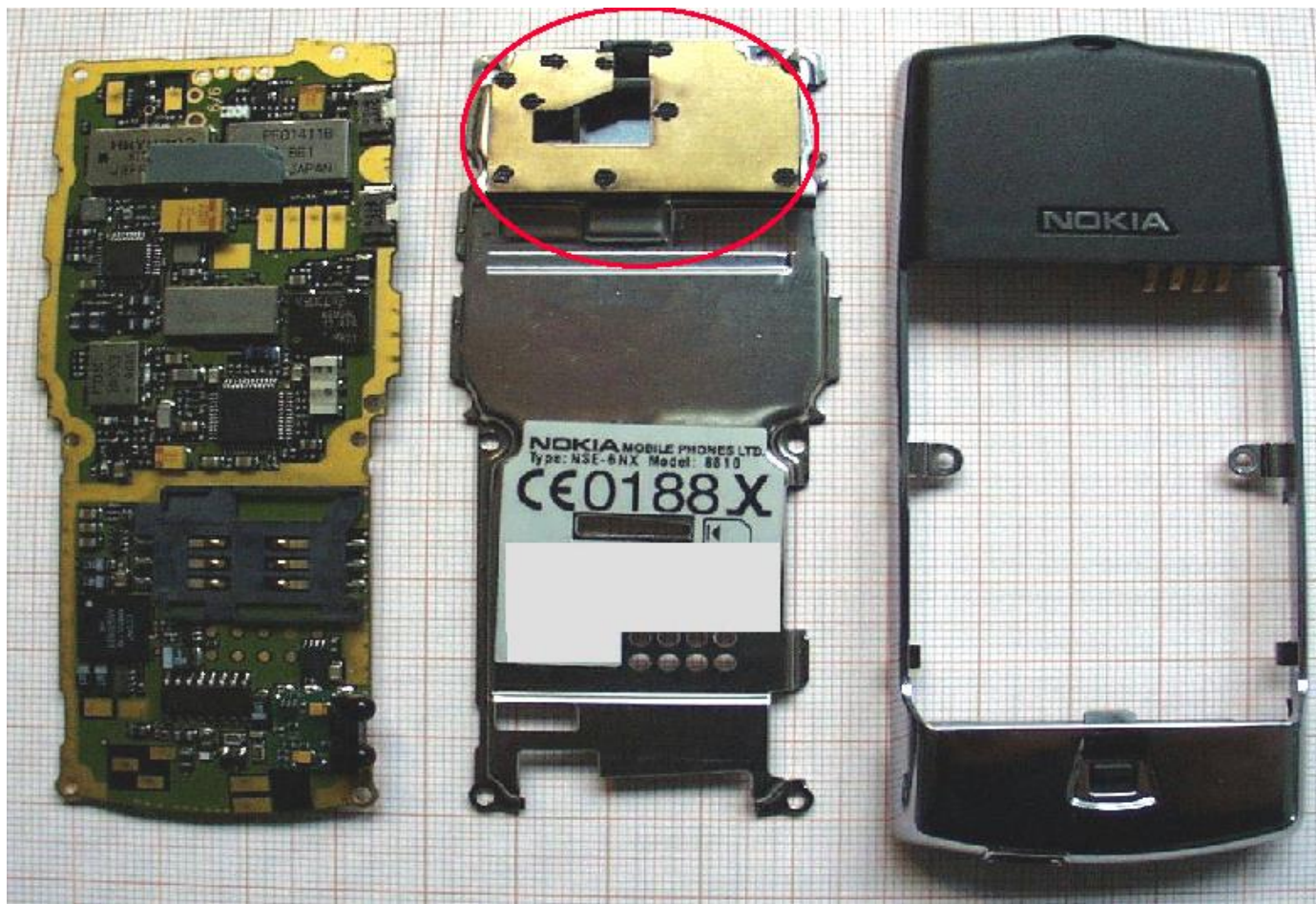
Vícepásmové MPA

- PIFA (Planar Inverted F Antenna) mobilního telefonu tvarovaný multirezonátor – znázornění intenzity elektrického pole



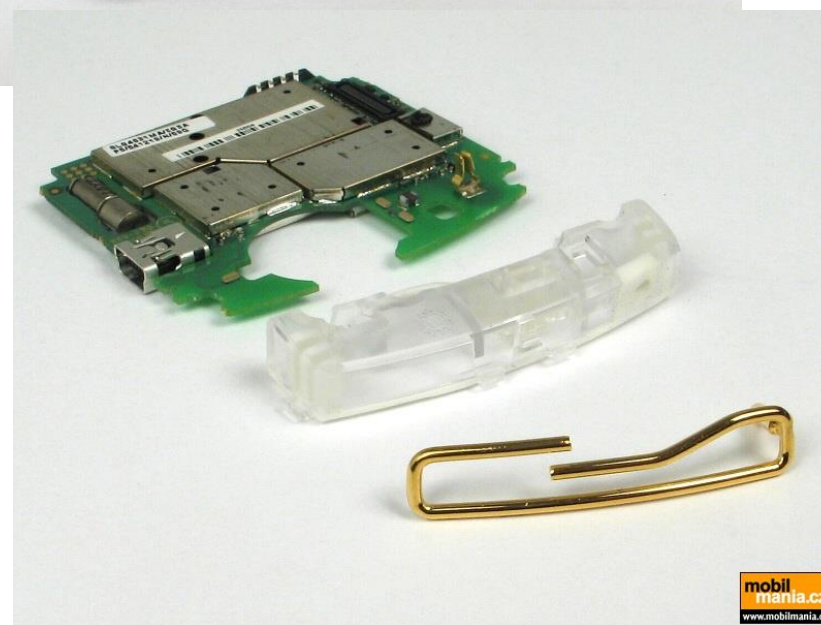
Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Nokia 8810 (1998) a 3210 (1999)



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

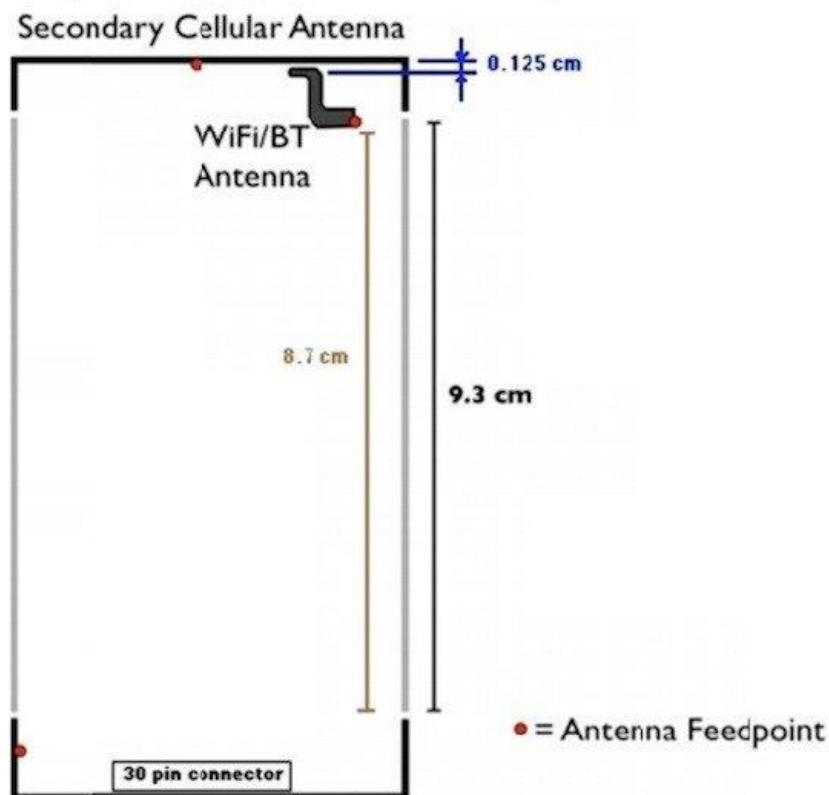
Motorola Razr V3 (2004)



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.



iPhone 4



iPhone 4S

Vícepásmové antény MT - historický vývoj

Samsung Galaxy S5 (2014)

Pásmo:

GSM 850, 900, 1 800, 1 900 MHz

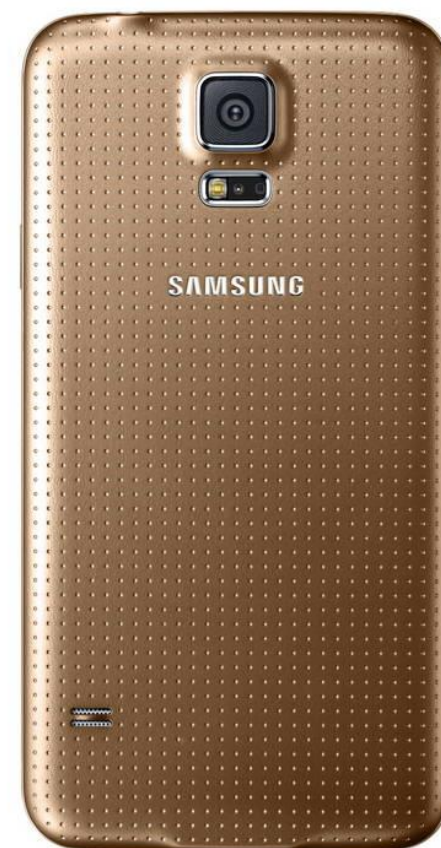
WCDMA (3G) 850, 900, 1 700, 1 900, 2 100 MHz

LTE (4G)

Wi-Fi 802.11 a/ac/b/g/n

Bluetooth 4.0

NFC



Vícepásmové MPA – technologie výroby

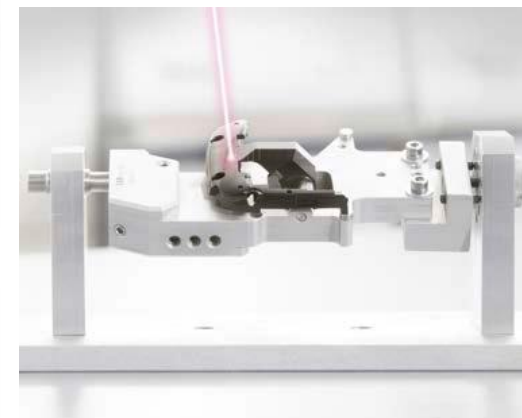
Dříve – DPS

Dnes – laserové přímé strukturování (Laser direct structuring, LDS),
vodivý povrch slinován laserem (či ohřevem) na termoplastický substrát

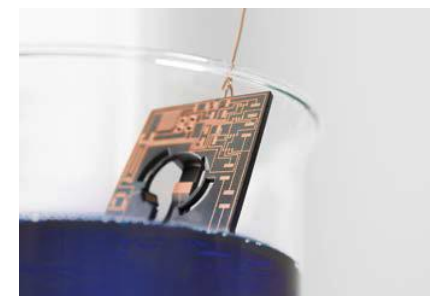


Vícepásmové antény MT - technologie

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



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



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



<https://mobilenet.cz/katalog/samsung-galaxy-s8/specifikace>

Vícepásmové antény MT - historický vývoj

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** (S10) / **ano** (S23)

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

Poloha:

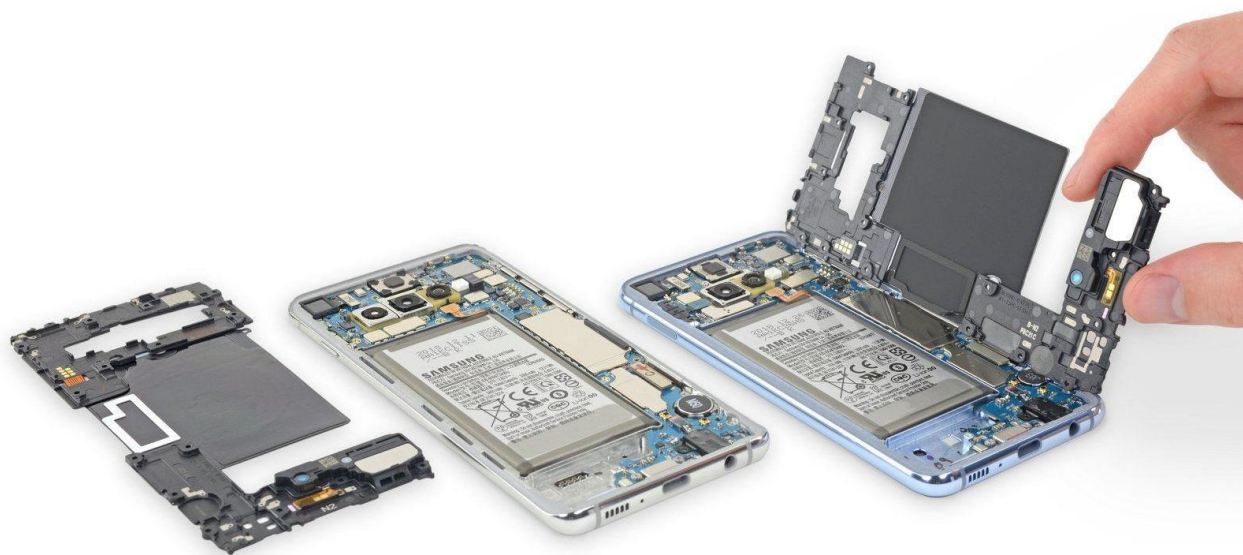
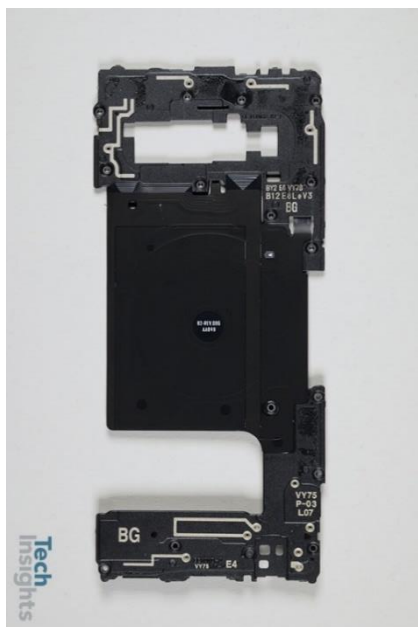
GPS

GLONASS

BEIDOU

GALILEO

Elektronický
kompas



Vícepásmové antény MT - historický vývoj

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,

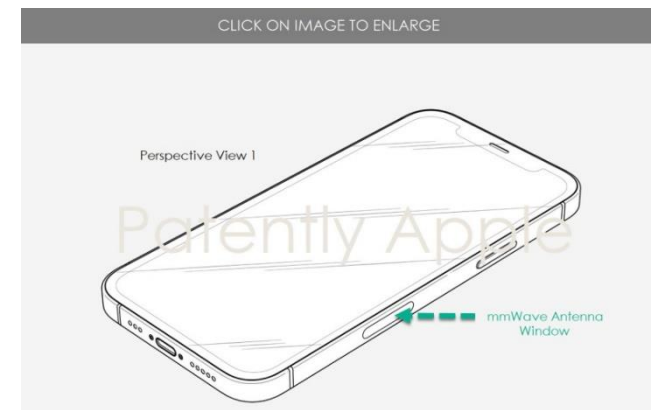
Beidou,

Galileo,

Elektronický

kompas,

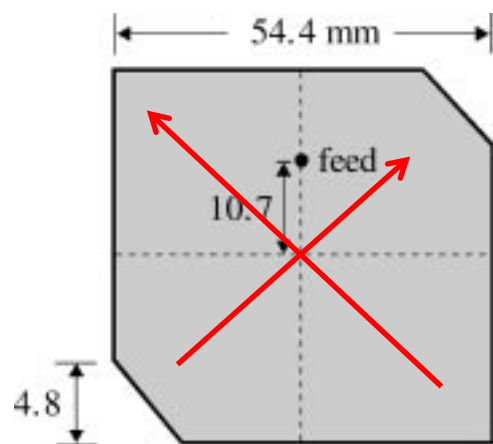
UWB



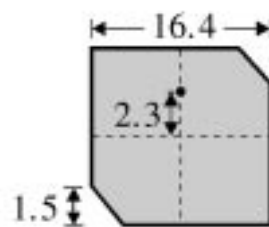
<https://mobilenet.cz/katalog/apple-iphone-13/specifikace>

Kruhově polarizované MPA

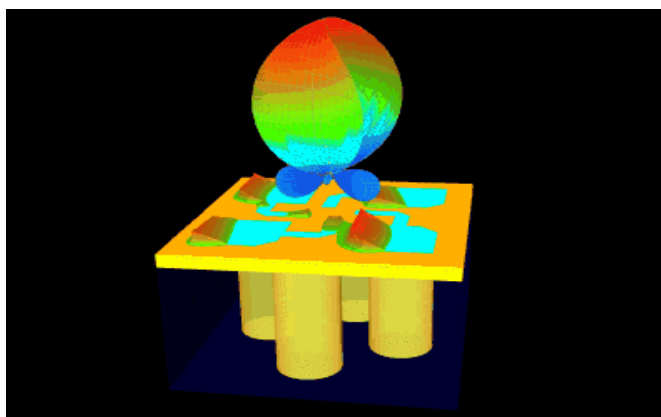
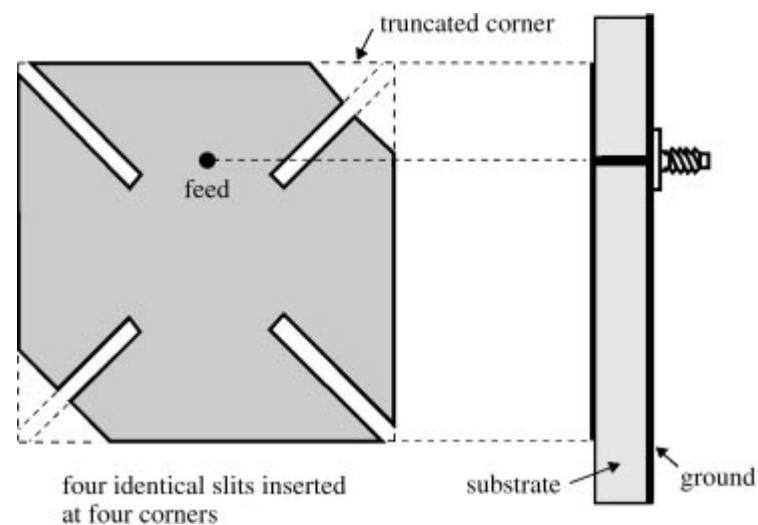
- Vybuzení dvou kolmých módů s fází posunutou o 90°



(a)

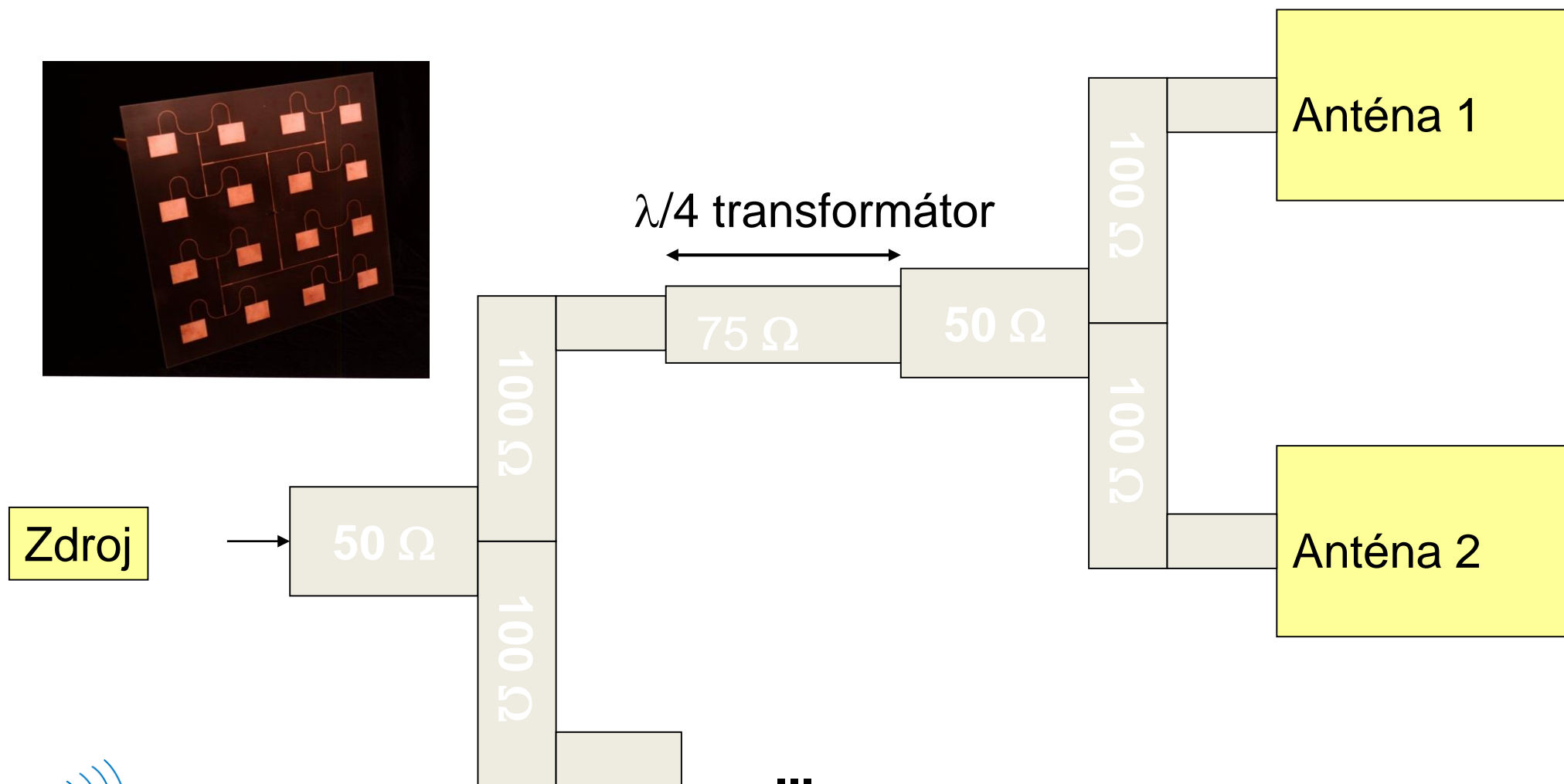
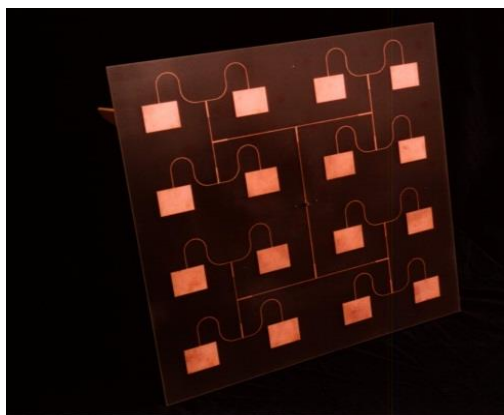


(b)



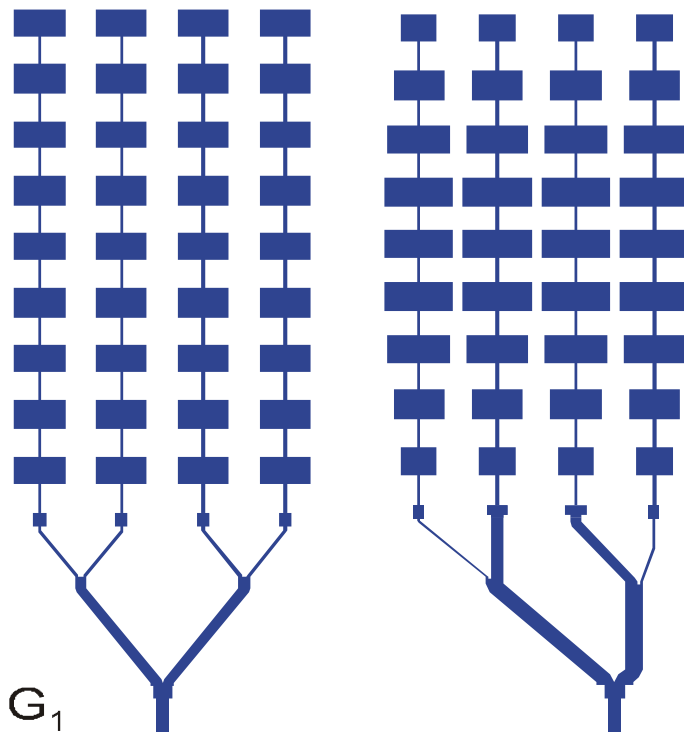
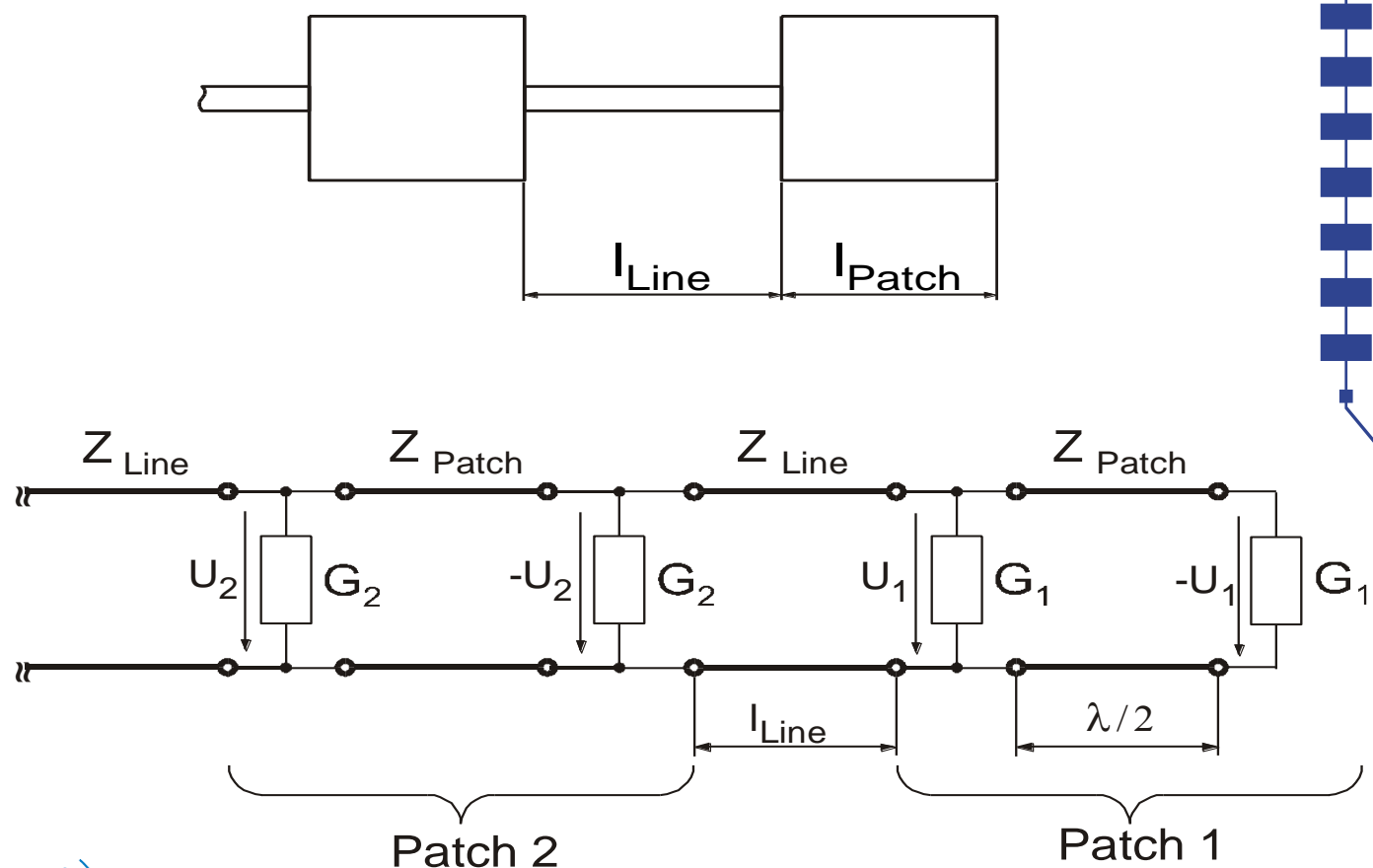
Zvýšení zisku – anténní řadou

- Paralelní uspořádání zářičů



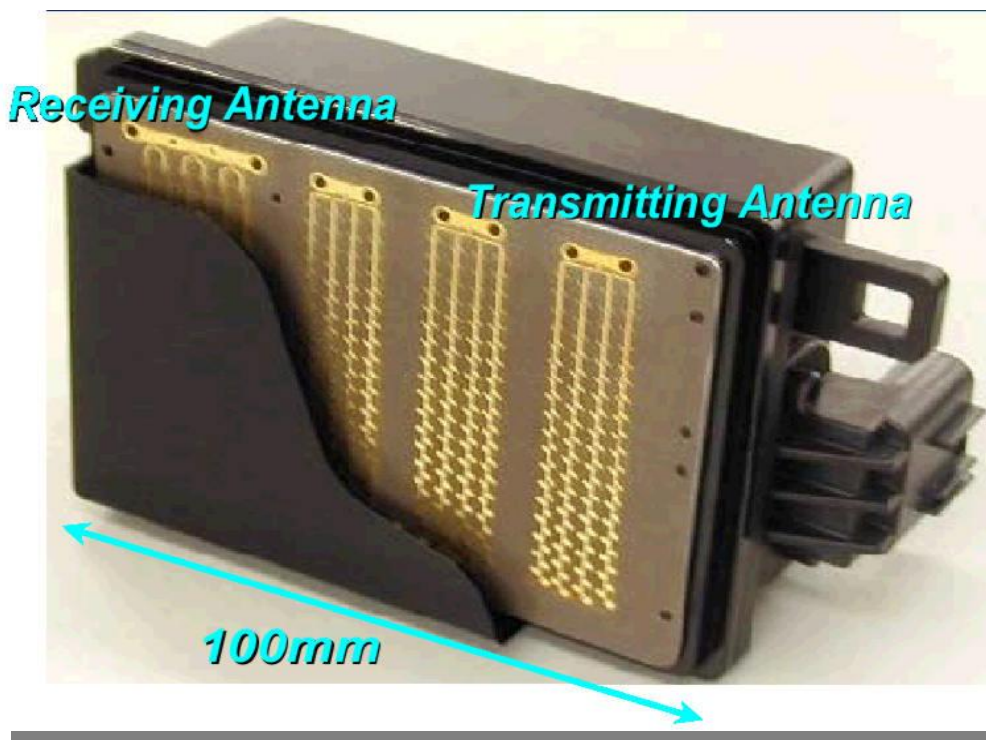
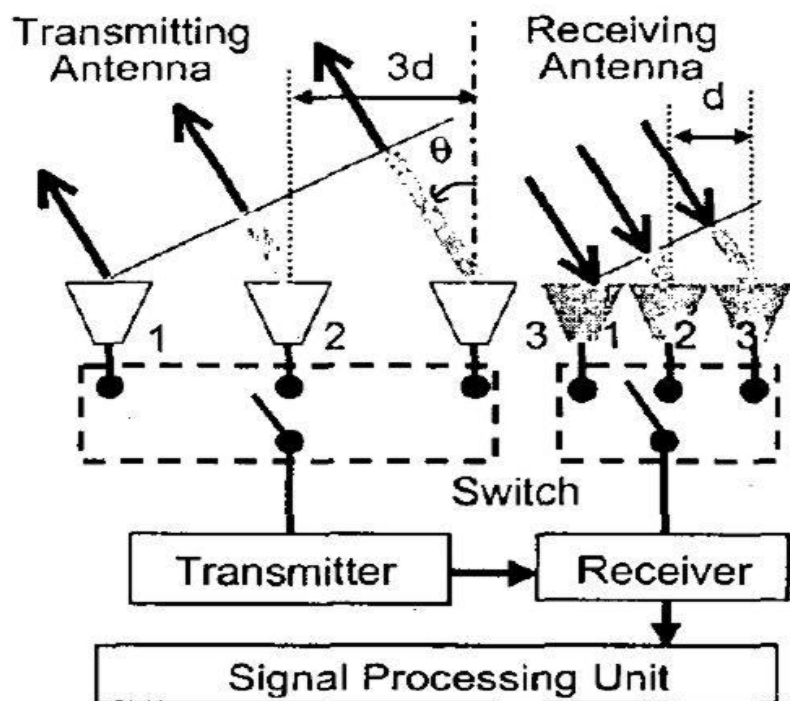
Zvýšení zisku – anténní řadou

- Seriové uspořádání zářičů



Anténní řada radarového senzoru

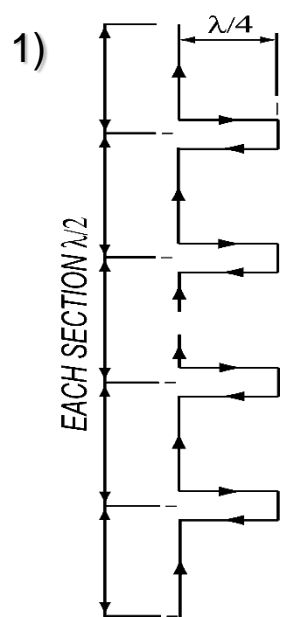
- Velká anténní řada s tvarovaným svazkem (Toyota)



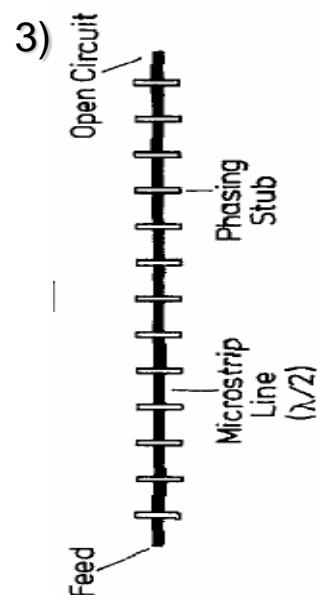
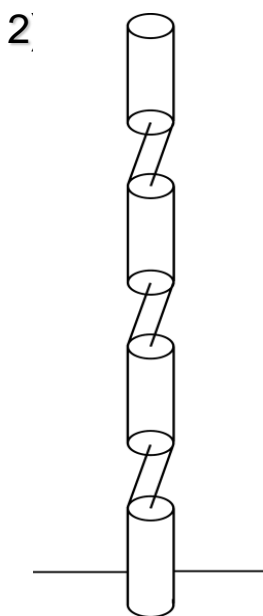
Signal processing in baseband (ESPRIT etc...)

Zvýšení zisku - kolineární MPA

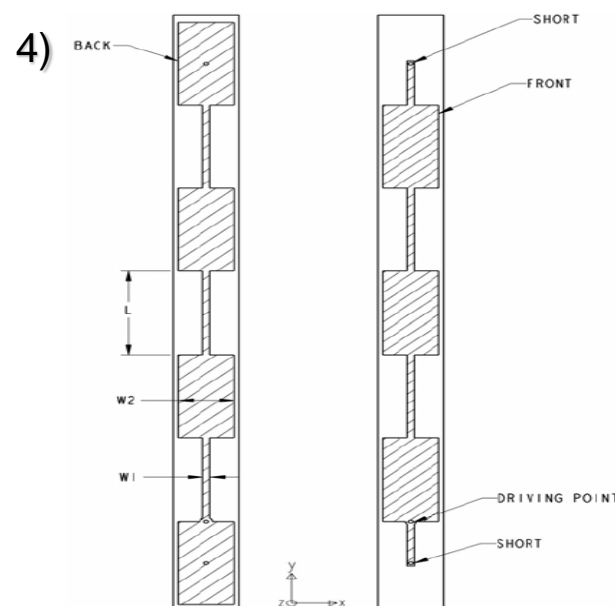
- Původní nápad - Franklin, 1924 ¹⁾
- Soufázové buzení vyzařovacích elementů
- Implementace v koaxiálním ²⁾, mikropáskovém ^{3,4)} vedení a
- ve struktuře patchové antény ⁵⁾



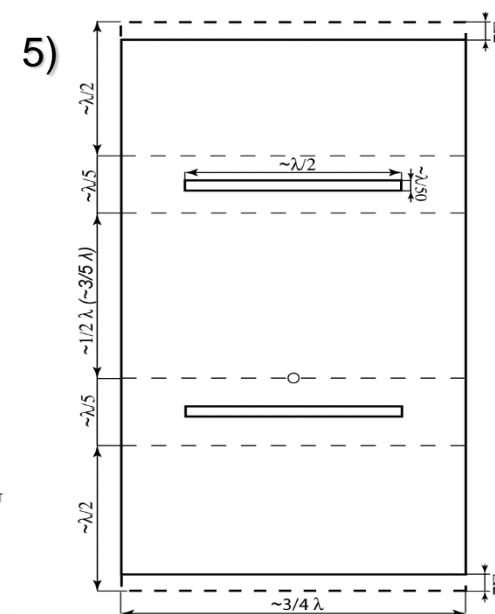
Franklin 1924,
British patent 242342-1924



Solbach 1982



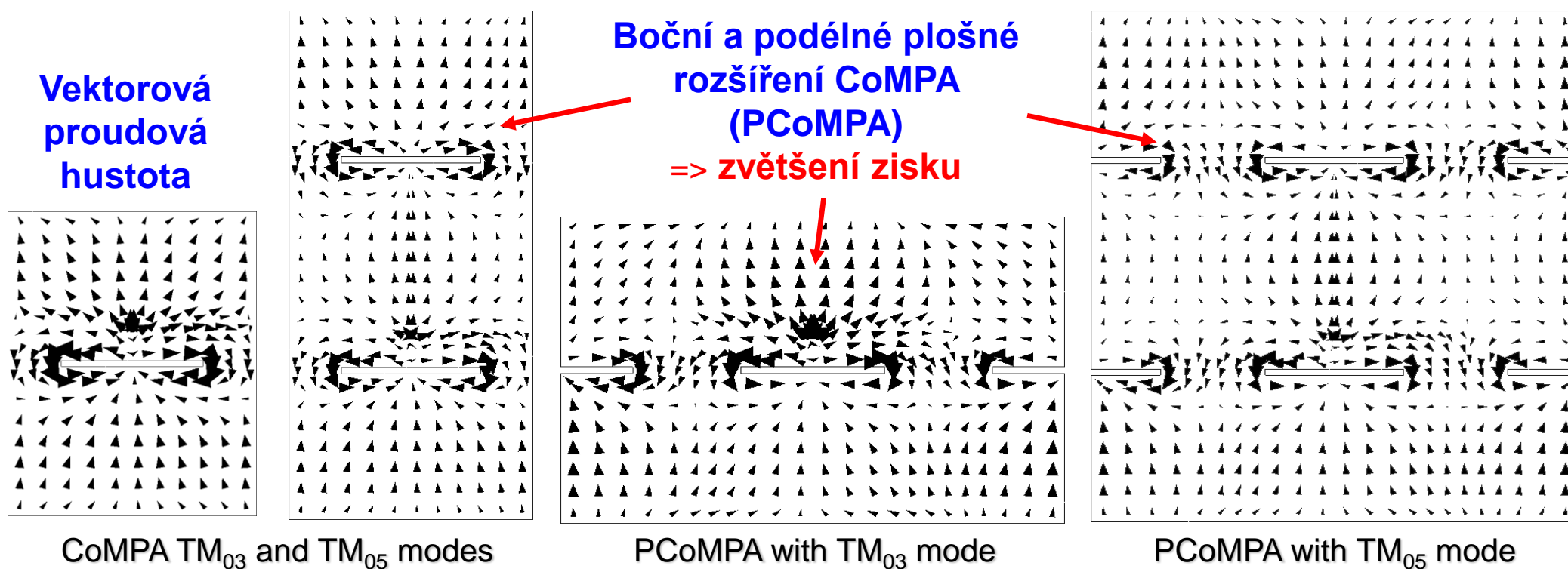
Bancroft, Bateman 2003,
US patent application 60/461 689



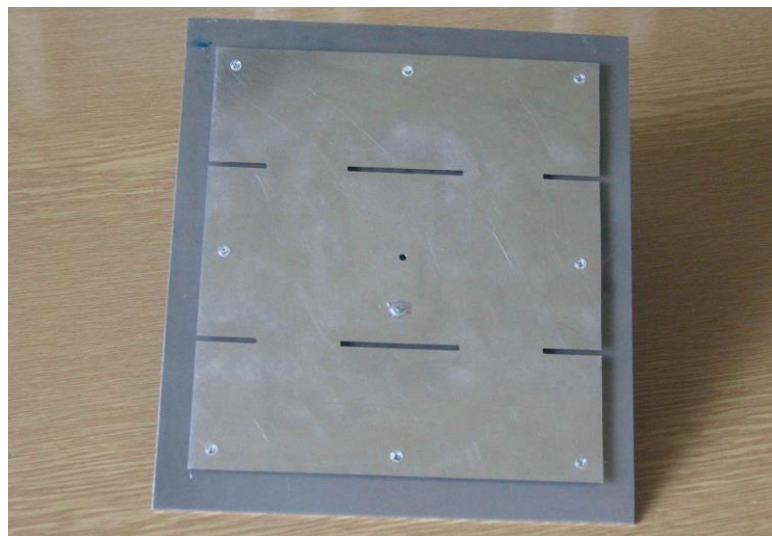
Polívka, Holub 2006,
CZ patent no. 296985

Kolineární MPA

- MPA pracující na vyšších módech
- Použití poruchových prvků (PP) ve formě $\lambda_g/2$ štěrbin
- PP eliminují vyzařování z nefázových zdrojových proudů (sudých půlvln)



Kolineární MPA



Rozměry:
patch 189 x 222 mm,
štěrbiny 56 mm,
zářezy 28 mm,
zemní rovina 240 x 260 mm,
výška substrátu 5 mm,
koaxiální napájení

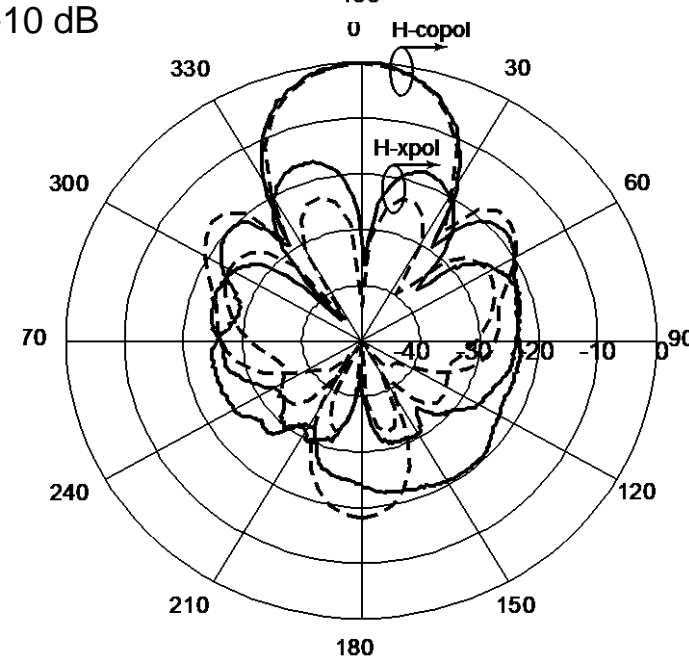
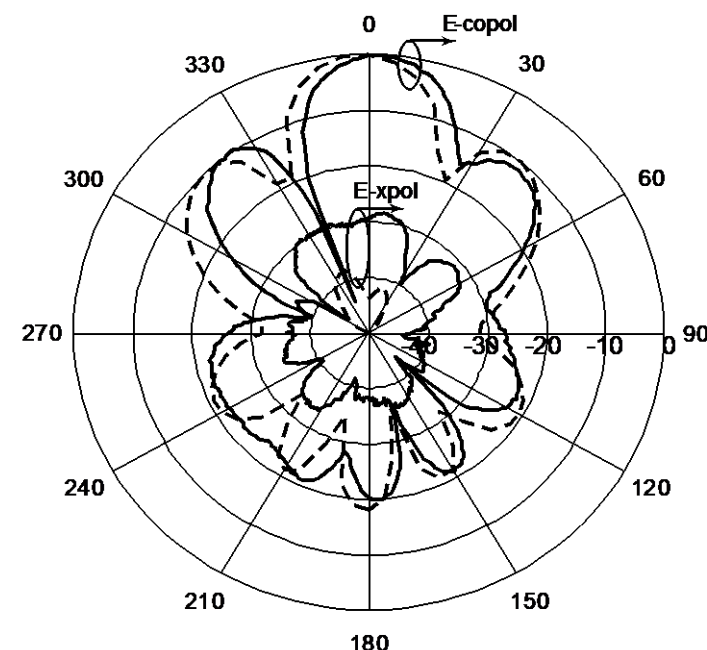
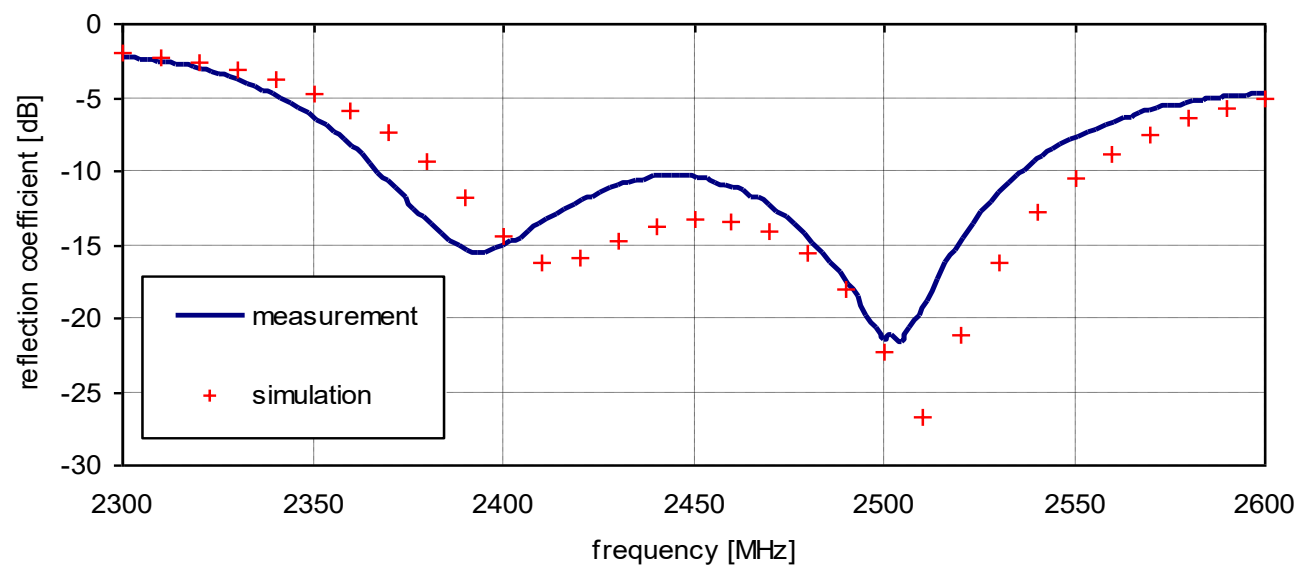
$G_{\text{sim}} \sim 15.4 \text{ dBi}$,

$G_{\text{meas}} \sim 14.6 \text{ dBi}$

BW $\sim 7.1 \%$

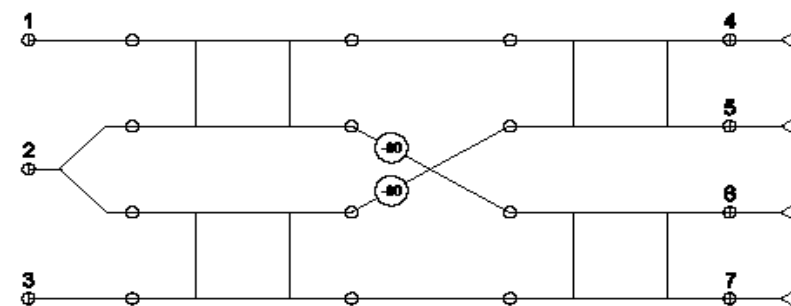
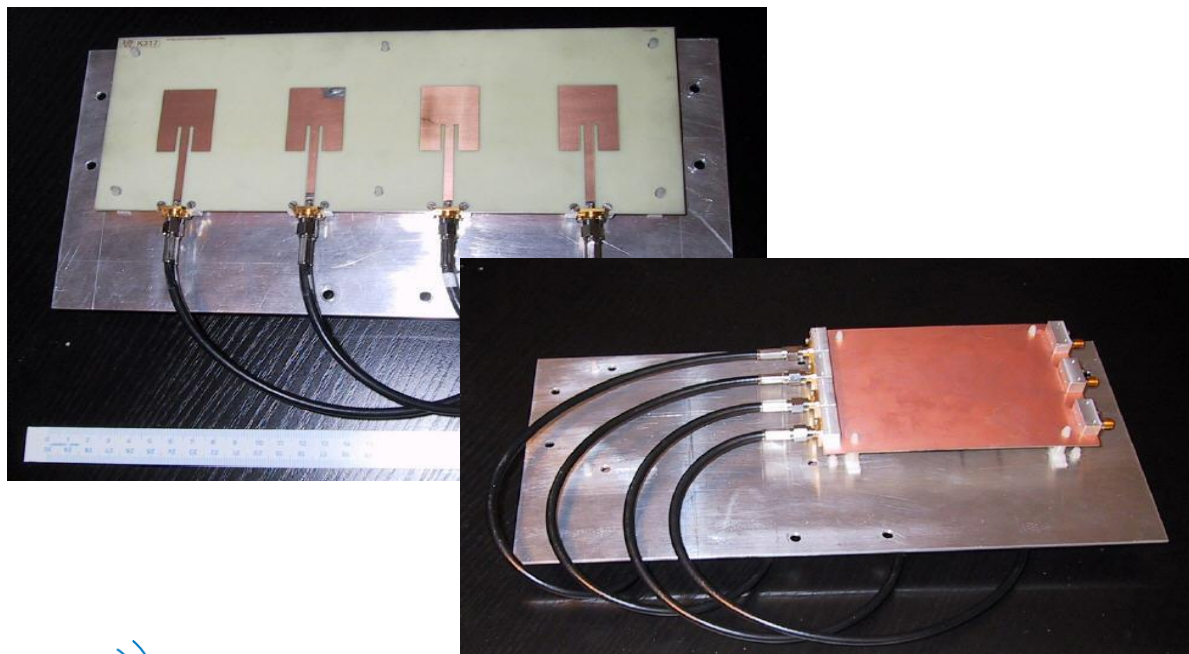
Úroveň postranních smyček cca -10 dB

PZ poměr cca -20 dB



Anténní řada MPA s vychylovaným svazkem

- Plošná třísektorová anténa – Závodný, V. (DIP 2002)
 - **Cíl:** plošná anténa se skloněným maximem směrové charakteristiky do tří sektorů podle volby vstupního konektoru (3 vstupy)
 - **Metoda:**
 - použití 4-prvkové uniformně buzené anténní řady patchových zářičů
 - realizace **fázového posunu** napájecích proudů pomocí **Butlerovy matice**



Obr. 4.16: Upravená napájecí síť

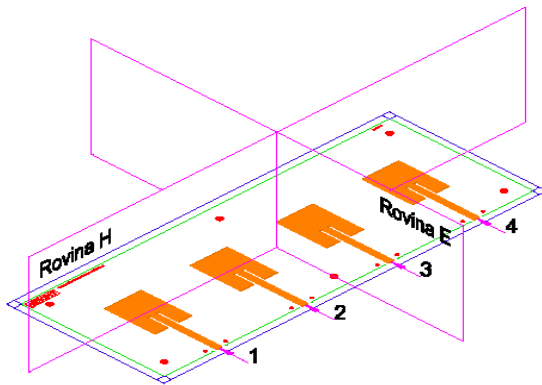
$I_n(-)$	$Out_5(^{\circ})$	$Out_6(^{\circ})$	$Out_7(^{\circ})$	$Out_8(^{\circ})$	$\theta_0(^{\circ})$
1	0	90	180	270	-30
2	0	0	0	0	0
3	270	180	90	0	30

Tab. 4.5: Fázové posuvy upravené Butlerovy matice

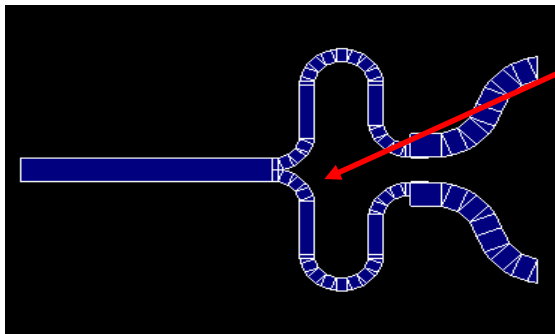
Plošná třísektorová anténa

- Návrh dílčích komponent antény

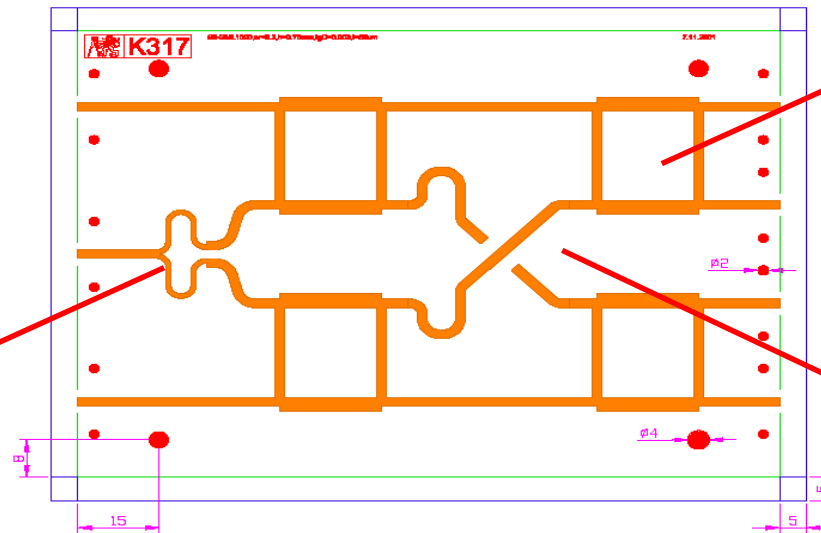
4-prvková řada patchů



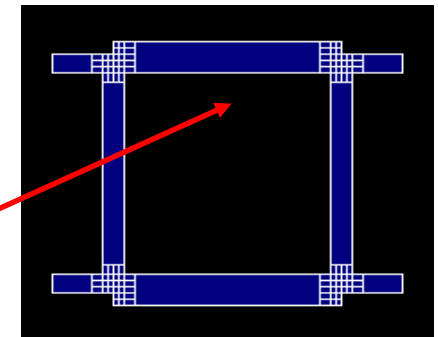
3dB dělič – Wilkinsonův



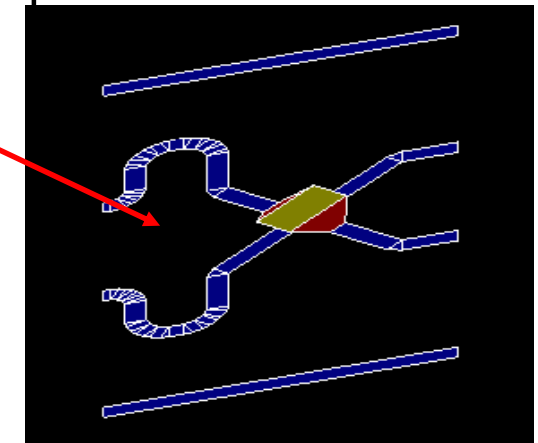
Butlerova matice



3 dB příčkový dělič

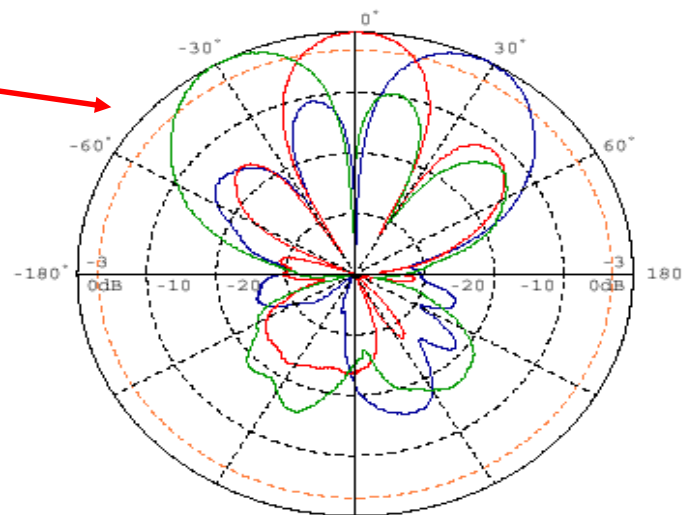
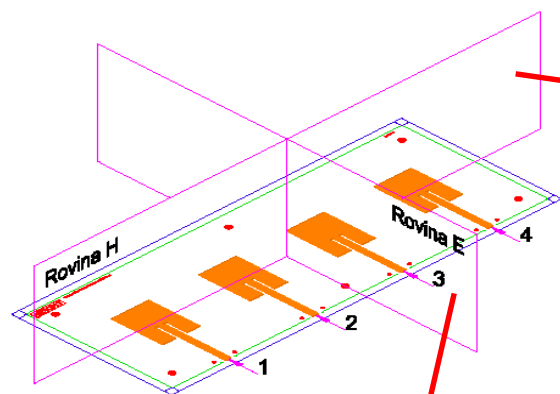


posouvač fáze

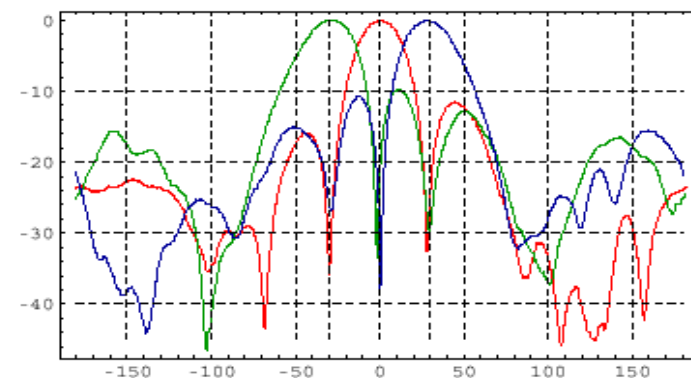


Plošná třísektorová anténa

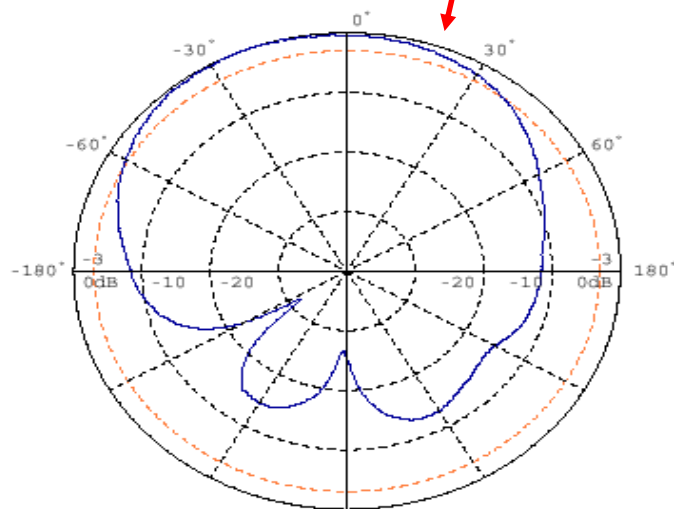
- Směrové charakteristiky



a) Měřeno na portu In1, In2, In3



b) Měřeno na portu In1, In2, In3



a) Měřeno na portu In2

Obr. 7.10: Srovnání všech charakteristik v rovině H