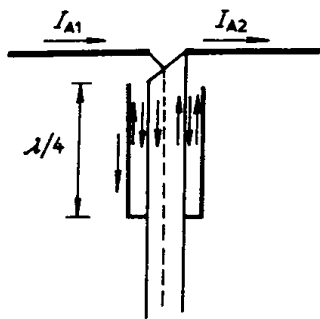


Návrh a Konstrukce Antén

A0M17NKA

Symetrizační a transformační obvody



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



zima 2022/23



Osnova

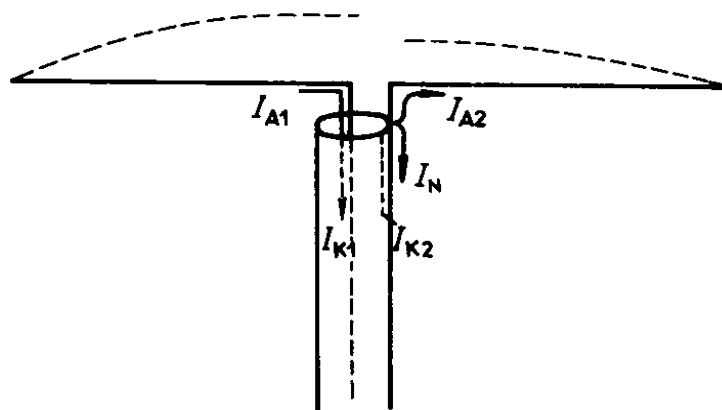
- Motivace
- Anténní napáječe
- Symetrizace
- Symetrizační/transformační obvody
- Příklady realizací
- Měření impedance symetrických antén

Motivace

Velmi často je v praxi anténa v jiném místě (např. na stožáru) než vysílač nebo přijímač. V takovém případě je anténa připojena pomocí **napáječe** (přenosového vedení).

Kromě vlastního napáječe mohou být na koncích ještě **symetrizační** a **transformační** obvody (**baluns**, **balanced-unbalanced**), které mají za úkol:

- přizpůsobit impedanci generátoru k impedanci napáječe,
- přizpůsobit impedanci napáječe k vlastní anténě,
- transformovat symetrickou na nesymetrickou impedanci a tím odstranit nežádoucí vliv tzv. **nesouměrného** (asymetrického) **proudu I_N** (common-mode current).



Anténní napáječe

Požadavky na anténní napáječe:

- přenášet elektromagnetickou energii s nejmenšími ztrátami
- být schopné přenášet potřebný výkon (průraz, ..)
- nemají samy vyzařovat
- odolné proti vf rušení

Typy napáječů/vedení

- otevřené (typ. dvouvodičové)
- stíněné (typ. koaxiální)

Charakteristická impedance

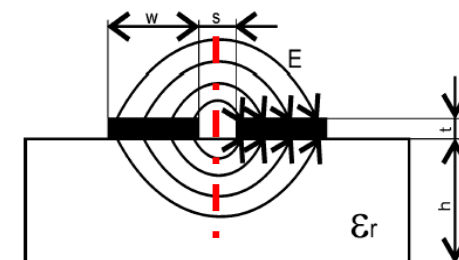
$$Z_V = \sqrt{L/C}$$

| Řez napáječem | Charakteristická impedance |
|---------------|--|
| | $Z_c = 138 \log \frac{2h}{a}$ |
| | $Z_c = 276 \log \frac{d}{a}$ |
| | $Z_c = 138 \log \frac{\sqrt{(2)} d}{2a}$ |
| | $Z_c = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{2a}$ |
| | $Z_c = \frac{276}{\xi} \log \frac{d(D^2 - d^2)}{2a(D^2 + d^2)}$ |
| | $Z_c = 276 \log \frac{2h}{a \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{d}\right)^2}}$ |

Anténní napáječe

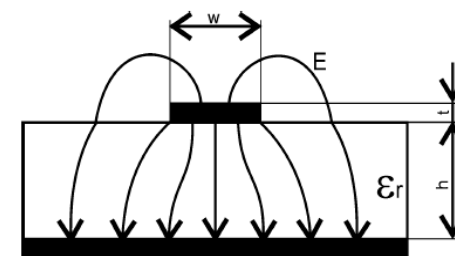
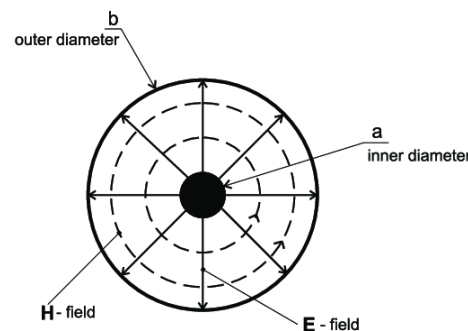
Symetrické/souměrné vedení (**balanced**)

- **má** mezi vodiči elektrickou/geometrickou **osu symetrie** (virtuální zem)
- vodiči tečou **shodné opačně** orientované proudy
- př. dvouvodičové, symetrické mikropáskové, dvouvodičové koplanární, ..
- negativní vliv blízkých vodivých předmětů (zasahují do elmag. pole vedení) a vliv ohybu vodičů na jejich Z_v



Nesymetrické/nesouměrné vedení (**unbalanced**)

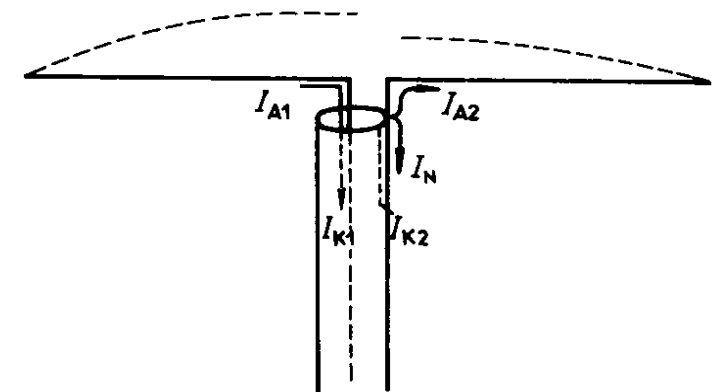
- **nemá** mezi vodiči elektrickou/geometrickou **osu symetrie**
- př. koaxiální, mikropáskové, ..



Symetrizace

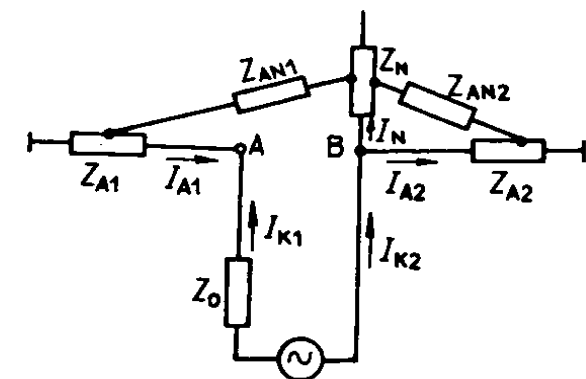
Spojení nesymetrického napáječe a symetrické antény

- vznik **nesouměrných** proudů I_N (**common-mode** currents) tekoucích po vnějším plášti vedení
- charakter stojatého vlnění
- vyzařují, deformují směrovou charakteristiku antény
- ovlivňují impedanční přizpůsobení
- nutnost jejich eliminace



Symetrizační obvody („**BALUN**“ – **BAL**anced to **UN**balanced convertor)

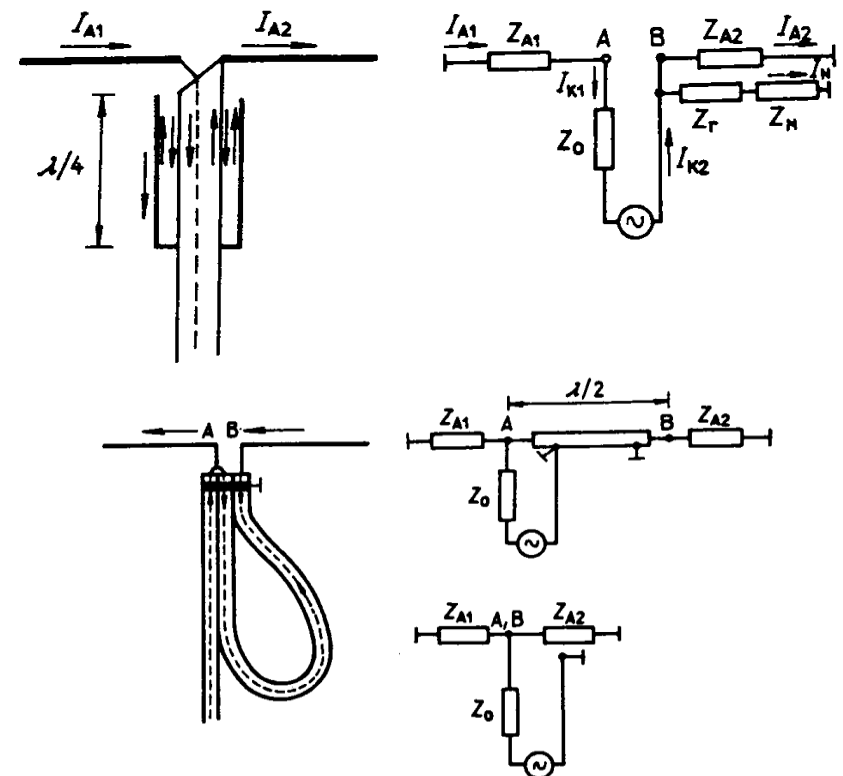
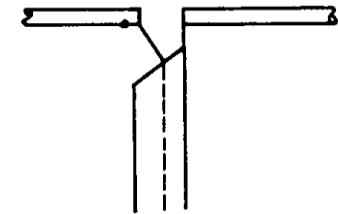
- úzkopásmové/širokopásmové
- rezonanční/útlumové
- bez/s transformací impedance



Symetrizační členy

Úzkopásmové

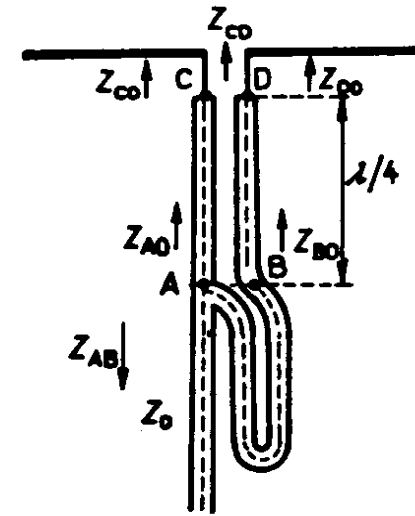
- symetrizace **seříznutím pláště** koaxiálního kabelu a vyhnutím střed. vodiče, zmenšuje pouze proudy vzniklé v důsledku vzájemné impedance Z_{AN}
- symetrizace **rukávovým vedením** ($\lambda/4$ rukávem),
 $BW \sim \pm 5 \%$
- symetrizace **půlvlnným úsekem**, vedení s **transformací impedance 4:1**, otočení fáze v „B“ vzhledem k „A“ o 180°
 $BW \sim \pm 10 \%$



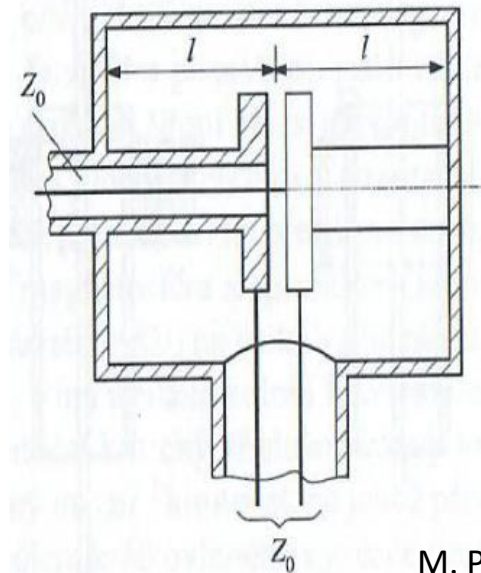
Symetrizační členy

Úzkopásmové

- symetrizace **půlvlnným úsekem s $\lambda/4$ transformátorem**
bez transformace impedance (1:1)
frekvenčně závislé
- symetrizace se **dvěma úseky vedení $\lambda/4$**
($l < \lambda/4$ v důsledku kapacitních kruhových terčů) **v rezonátoru**/dutině částečně
odstraňuje kmitočtovou závislost
vhodný obvod pro UKV pásmo



Prokop, Vokurka, Šíření elektromagnetických vln antény

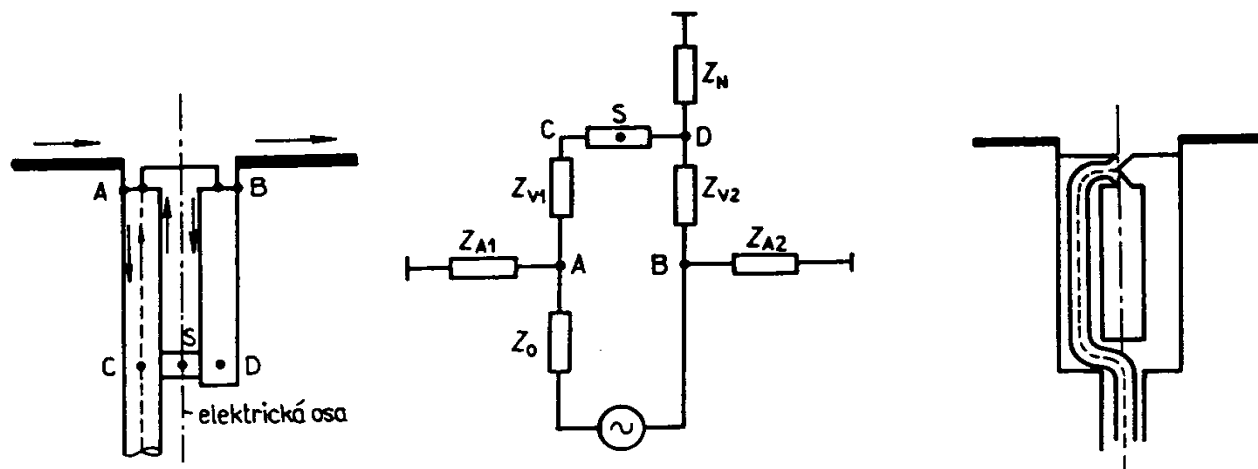


M. Procházka, Antény, 2005

Symetrizační členy

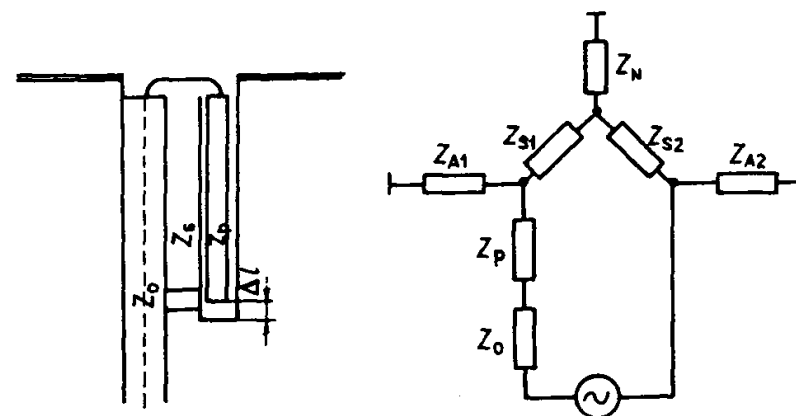
Širokopásmové

- symetrizace **paralelním vedením**, úprava pro vysoké kmitočty (vpravo) stejně velké protifázové proudy se rozloží na dvě symetrické impedance – anténu a vedení, symetrii narušuje spojka AB (až $0,05\lambda$) – větší fázový posuv než 180° , $BW \sim \pm 20\%$



- širokopásmové provedení **paralelního vedení**, proměnná reaktance symetrizačního vedení kompenzována **seriově zapojeným úsekem** $\lambda/4$ vedení na konci otevřeného o Z_p , $BW \sim \pm 50\%$

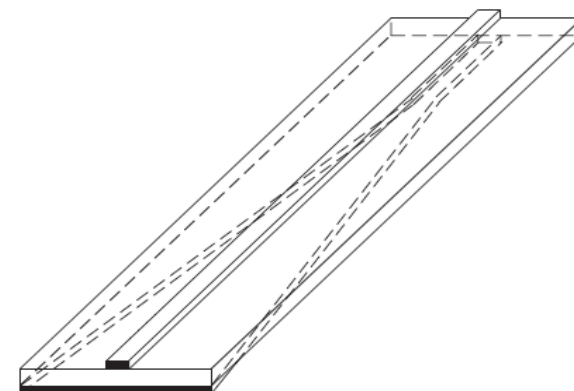
$$Z_p = \frac{Z_0^2}{Z_s} \quad Z_0 \ll Z_s$$



Symetrizační členy

Širokopásmové

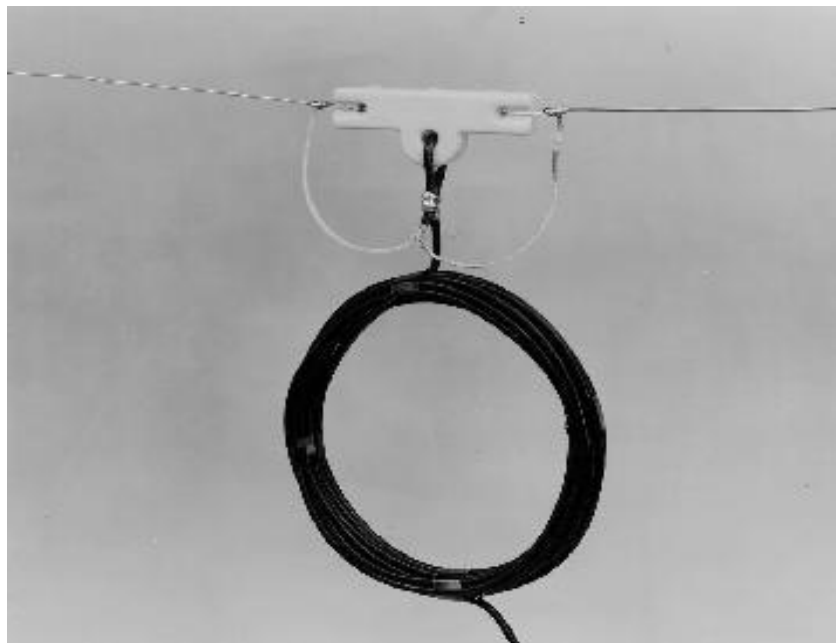
- symetrizace **pozvolným přechodem** mezi geometriemi napaječů
(*cutaway balun*)
- koaxiální, páskové provedení
- transformační poměr impedancí $\sim 1,5:1 \div 5:1$
- $l/\lambda \geq 0,5$ na f_d
- BW až **100:1**
- reálně je f_h omezen vybuzením vyšších módů daného vedení
- symetrizace **feritovými prstenci**, útlumový typ
př. 50 FB73-2401 jader na koaxu RG 303 *)
1.8 to 30 MHz (jádro 73)
30 to 250 MHz (jádro 43)



Symetrizační členy

Širokopásmové

- symetrizace pomocí **vzduchové cívky** (*choke* - tlumivka), její rozměr malý vzhledem k vlnové délce
- použití: $1 \div n \cdot 100$ MHz



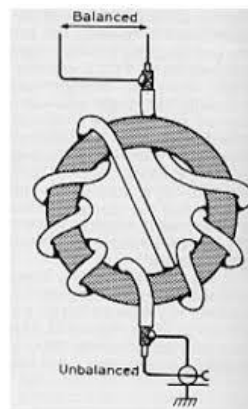
Symetrizační členy

Širokopásmové

- symetrizace pomocí **cívek** na **toroidních** nebo **tyčových** **feritových** jádrech
- induktivní **reaktance** cívek ($X_L > 10 \cdot Z_L$) brání vzniku nesymetrických proudů
- použití $n \cdot 1 \div 1000$ MHz
- **BW** ovlivněna typem jádra (ztrátami v něm, růst teploty)



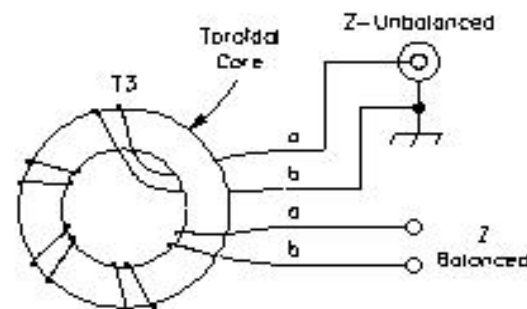
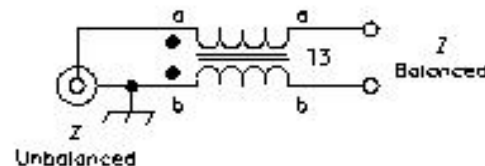
balun 1:1, 1,5 – 35 MHz, 3 kW



<http://www.qsl.net/va3iul/>

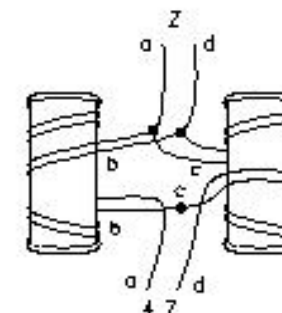
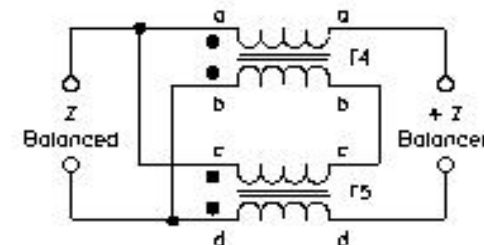
Transformace impedance

1:1



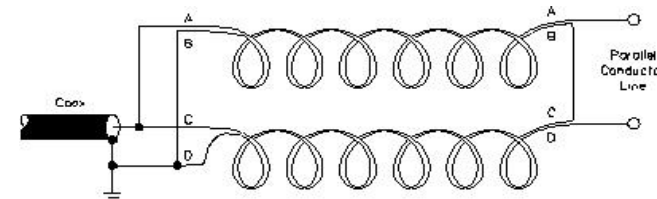
1:1 Balanced to Unbalanced Current Balun

4:1



4:1 Balanced to Balanced Transformer

(C)



(D)

proudové baluny

(výstupní proudy shodné, opačně orientované, souměrné vzhledem k virtuální zemi)

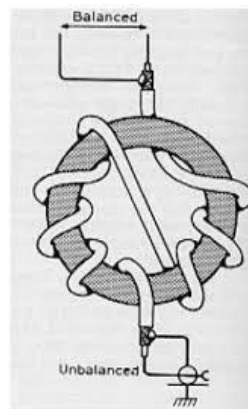
Symetrizační členy

Širokopásmové

- symetrizace pomocí **cívek** na **toroidních** nebo **tyčových feritových jádrech**
- induktivní **reaktance** cívek ($X_L > 10 \cdot Z_L$) brání vzniku nesymetrických proudů
- použití $n \cdot 1 \div 1000$ MHz
- **BW** ovlivněna typem jádra (ztrátami v něm, růst teploty)



balun 1:1, 1,5 – 35 MHz, 3 kW

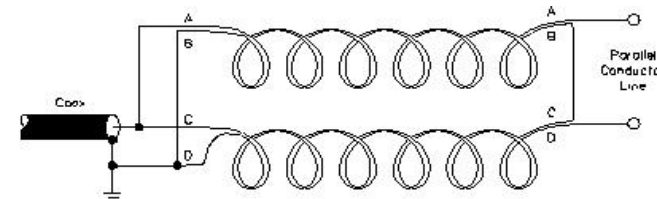
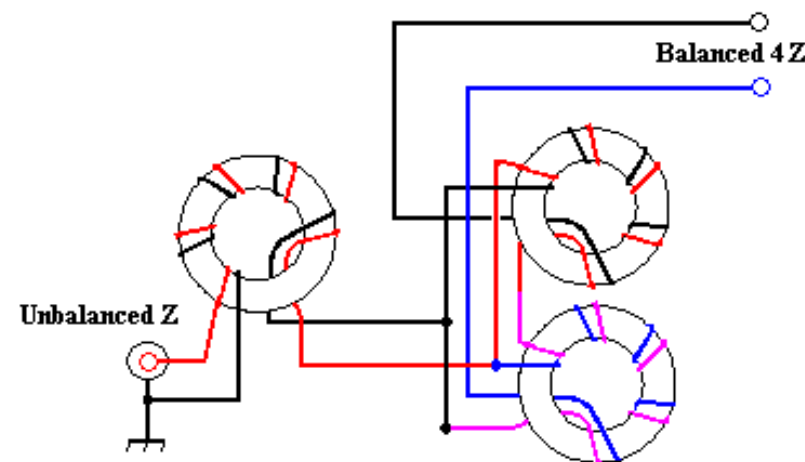
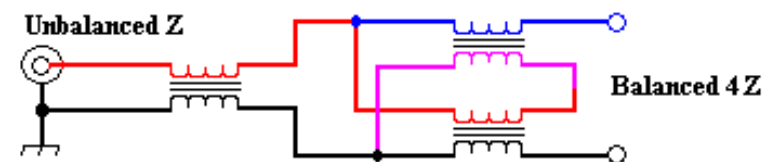


<http://www.qsl.net/va3iul/>

Transformace impedance

1:1

4:1



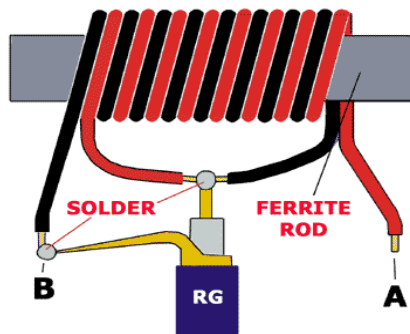
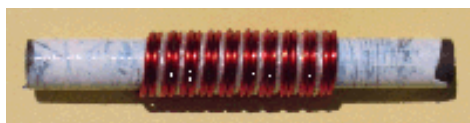
proudové baluny

(výstupní proudy shodné, opačně orientované, souměrné vzhledem k virtuální zemi)

Symetrizační členy

Širokopásmové

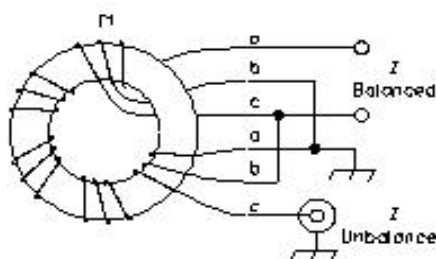
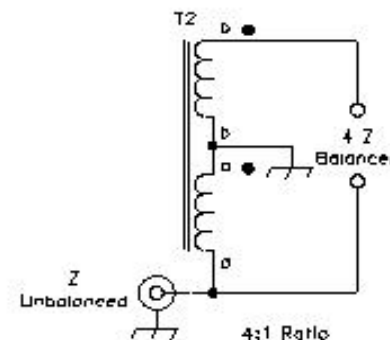
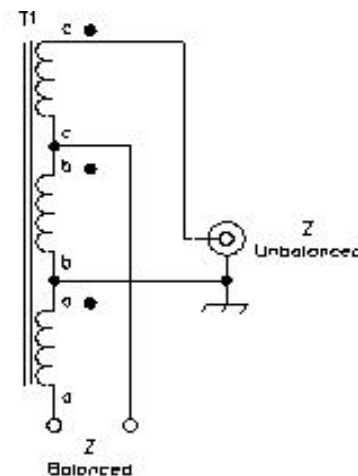
- symetrizace pomocí **cívek** na **toroidních** nebo **tyčových** **feritových** jádrech
- 1:1 – 3 cívky spojeny sériově, proud tekoucí dolní cívkou indukuje shodné, opačně orientované napětí v horní cívce
- $X_L > 4Z_a$ na f_d ,
 $X_C > 4Z_a$ na f_h (mezizávit. kapac.)
- použití $n \cdot 1 \div 1000$ MHz



Transformace impedance

1:1

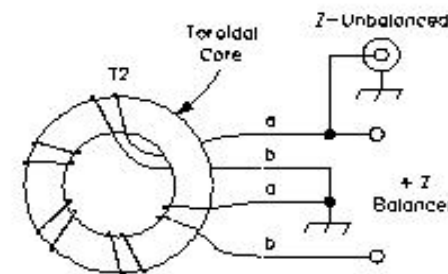
4:1



1:1 Balanced to Unbalanced Voltage Balun

(A)

$$Z_U(N/M)^2 = Z_B$$



1:4 Balanced to Unbalanced Voltage Balun

(B)

$$Z_U(N/2M)^2 = 1/4 Z_B$$

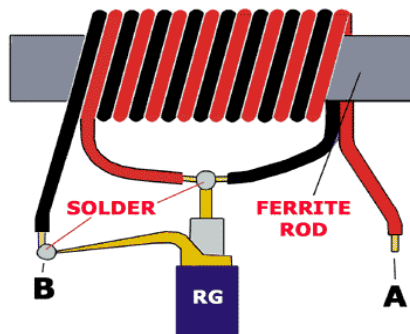
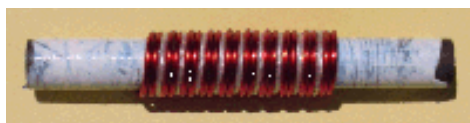
napěťové baluny

(výstupní napětí shodné, opačně orientované, souměrné vzhledem k virtuální zemi)

Symetrizační členy

Širokopásmové

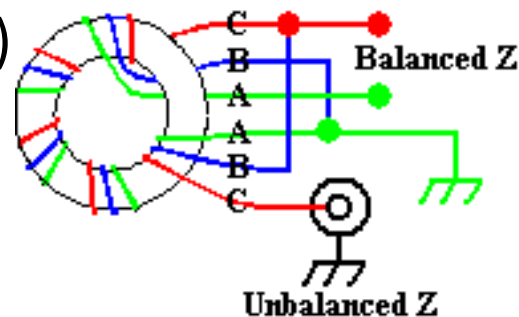
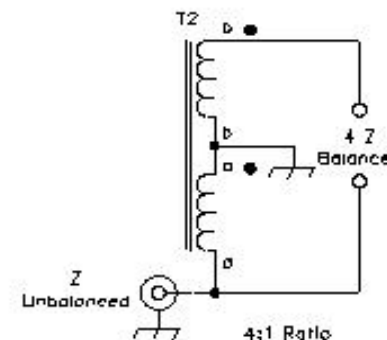
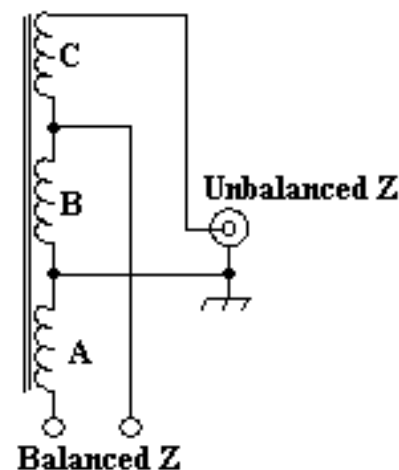
- symetrizace pomocí **cívek** na **toroidních** nebo **tyčových feritových jádrech**
 - 1:1 – 3 cívky spojeny sériově, proud tekoucí dolní cívkou indukuje shodné, opačně orientované napětí v horní cívce
- $X_L > 4Z_a$ na f_d ,
 $X_C > 4Z_a$ na f_h (mezizávit. kapac.)
- použití $n \cdot 1 \div 1000$ MHz



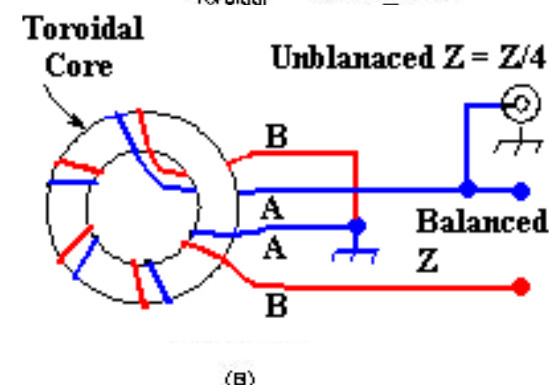
Transformace impedance

1:1

4:1



$$Z_U(N/N)^2 = Z_B$$



$$Z_U(N/2N)^2 = 1/4 Z_B$$

napětové baluny

(výstupní napětí shodné, opačně orientované, souměrné vzhledem k virtuální zemi)

Symetrizační členy

Širokopásmové

Mini-Circuits, TC1-1-13MG2+

dvouotvorové feritové jádro

$BW \sim 4,5 \div 3000 \text{ MHz}$,

imped. poměr 1:1

$A \times B = 3,8 \times 3,8 \text{ mm}$



Surface Mount RF Transformer

TC1-1-13MG2+

50Ω 4.5 to 3000 MHz

Maximum Ratings
Operating Temperature: -40°C to 80°C
Storage Temperature: -55°C to 100°C
RF Power: 0.25W
DC Current: 10mA

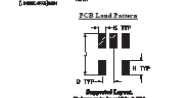
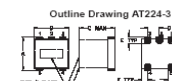
Pin Connections
PRIMARY: 1, 2
SECONDARY: 3, 4
NOT USED: 5, 6

Features
• suitable for through and RoHS solder systems
• wideband, 4.5 to 3000 MHz
• balanced transmission line
• good return loss
• excellent amplitude unbalance, 0.5 dB typ and phase unbalance, 2 deg typ in 1 dB bandwidth
• superior reliability

Applications
• balanced to unbalanced transformation
• push-pull amplifiers
• PCDs
• MMDS

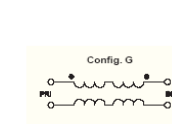
CASE STYLE: AT 224-3
PRICE: \$1.19 ea. QTY 1000

RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC)
This RoHS has been added in order to comply with the RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.



Outline Dimensions (mm)

| A | B | C | D | E | F |
|------|------|------|------|------|------|
| 1.62 | 1.62 | 1.62 | 0.92 | 0.92 | 0.28 |
| 3.81 | 3.81 | 3.81 | 1.27 | 0.76 | 0.64 |
| G | H | J | K | WT | |
| 0.71 | 1.65 | 4.83 | 0.76 | 0.10 | |



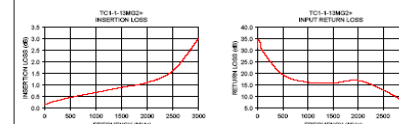
Transformer Electrical Specifications

| RATIO | FREQUENCY (MHz) | INSERTION LOSS* (dB) | PHASE UNBALANCE (Deg.) Typ. | AMPLITUDE UNBALANCE (dB) Typ. |
|-------|-----------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4.5-3000 | 3 dB MHz | 2 dB MHz | 1 dB bandwidth |
| 2 | 2000-3000 | 1000-2000 | 4.5-1000 | 0.5 |

*Insertion Loss is referenced to 50 ohm load, 0.5 dB typ.

Typical Performance Data

| FREQUENCY (MHz) | INSERTION LOSS (dB) | INPUT R. LOSS (dB) | AMPLITUDE UNBALANCE (dB) | PHASE UNBALANCE (Deg.) |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 4.50 | 0.18 | 31.52 | 0.69 | 3.81 |
| 10.00 | 0.18 | 34.60 | 0.56 | 1.78 |
| 50.00 | 0.19 | 33.50 | 0.55 | 0.11 |
| 100.00 | 0.24 | 29.68 | 0.55 | 0.19 |
| 500.00 | 0.46 | 19.52 | 0.45 | 0.81 |
| 1000.00 | 0.68 | 16.22 | 0.14 | 1.59 |
| 1500.00 | 0.90 | 15.89 | 0.29 | 0.89 |
| 2000.00 | 1.11 | 16.97 | 0.71 | 1.28 |
| 2500.00 | 1.62 | 12.88 | 0.78 | 5.79 |
| 3000.00 | 3.02 | 6.79 | 0.49 | 12.32 |



Mini-Circuits®
P.O. Box 35046, Brooklyn, New York 11235-0046 (718) 339-4000 Fax (718) 339-4001 The detailed performance specs & shipping info are Mini-Circuits web site
The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Potentially From MINI-CIRCUITS AT: www.minicircuits.com
RoHS COMPLIANT COMPONENTS

| RATIO | FREQUENCY (MHz) | INSERTION LOSS* | | | PHASE UNBALANCE (Deg.) Typ. | | AMPLITUDE UNBALANCE (dB) Typ. | |
|-------|-----------------|-----------------|-----------|----------|-----------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| | | 3 dB MHz | 2 dB MHz | 1 dB MHz | 1 dB bandwidth | 2 dB bandwidth | 1 dB bandwidth | 2 dB bandwidth |
| 1 | 4.5-3000 | 2000-3000 | 1000-2000 | 4.5-1000 | 2 | 3 | 0.5 | 0.5 |

Typical Performance Data

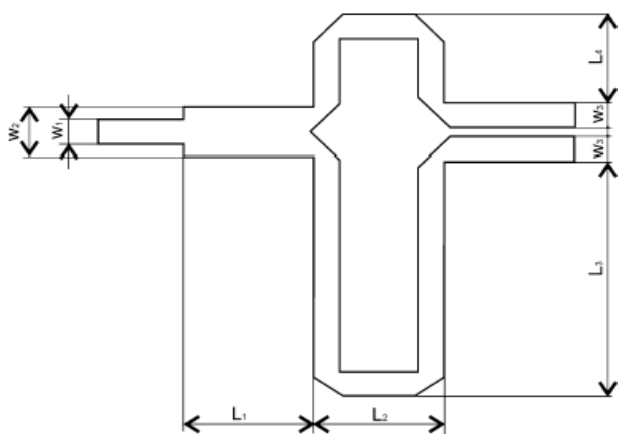
| FREQUENCY (MHz) | INSERTION LOSS (dB) | INPUT R. LOSS (dB) | AMPLITUDE UNBALANCE (dB) | PHASE UNBALANCE (Deg.) |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| 4.50 | 0.18 | 31.52 | 0.69 | 3.81 |
| 10.00 | 0.18 | 34.60 | 0.56 | 1.78 |
| 50.00 | 0.19 | 33.50 | 0.56 | 0.11 |
| 100.00 | 0.24 | 29.68 | 0.55 | 0.19 |
| 500.00 | 0.46 | 19.52 | 0.45 | 0.81 |
| 1000.00 | 0.68 | 16.22 | 0.14 | 1.59 |
| 1500.00 | 0.90 | 15.89 | 0.29 | 0.89 |
| 2000.00 | 1.11 | 16.97 | 0.71 | 1.28 |
| 2500.00 | 1.62 | 12.88 | 0.78 | 5.79 |
| 3000.00 | 3.02 | 6.79 | 0.49 | 12.32 |

Příklady realizací

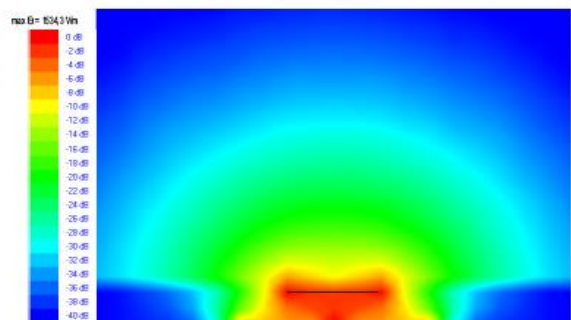
5ti-prvková Yagi-Uda anténa s planárním symetrizačním členem

T. Kořínek, DP 2005

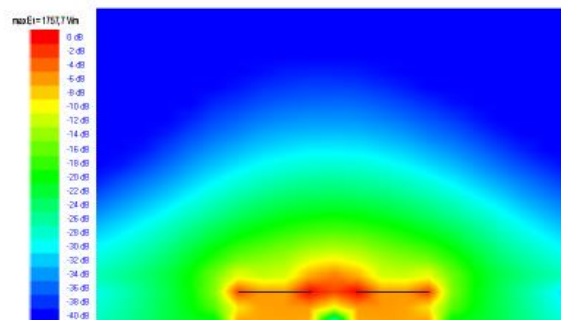
- substrát GML 1000: $\epsilon_r = 3,05$



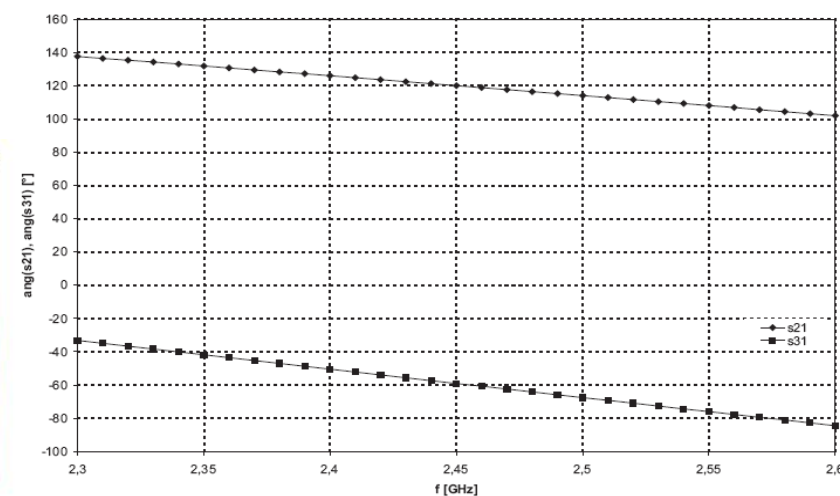
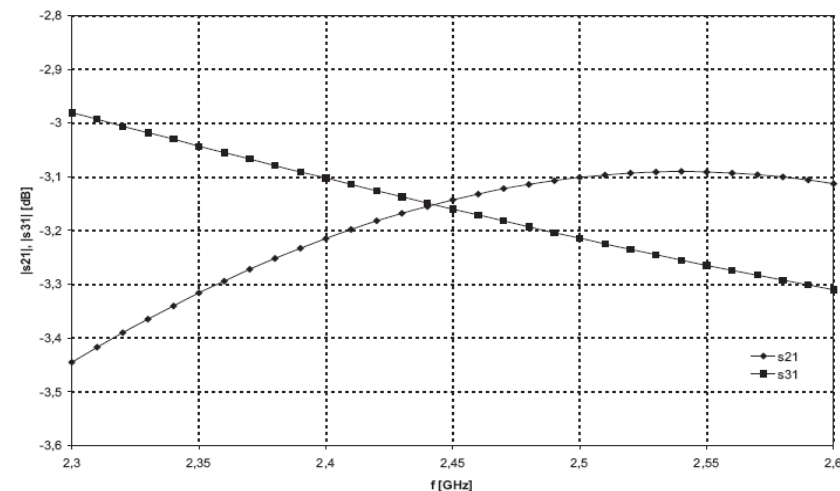
- rozložení intenzity el. E pole v řezu



(a)



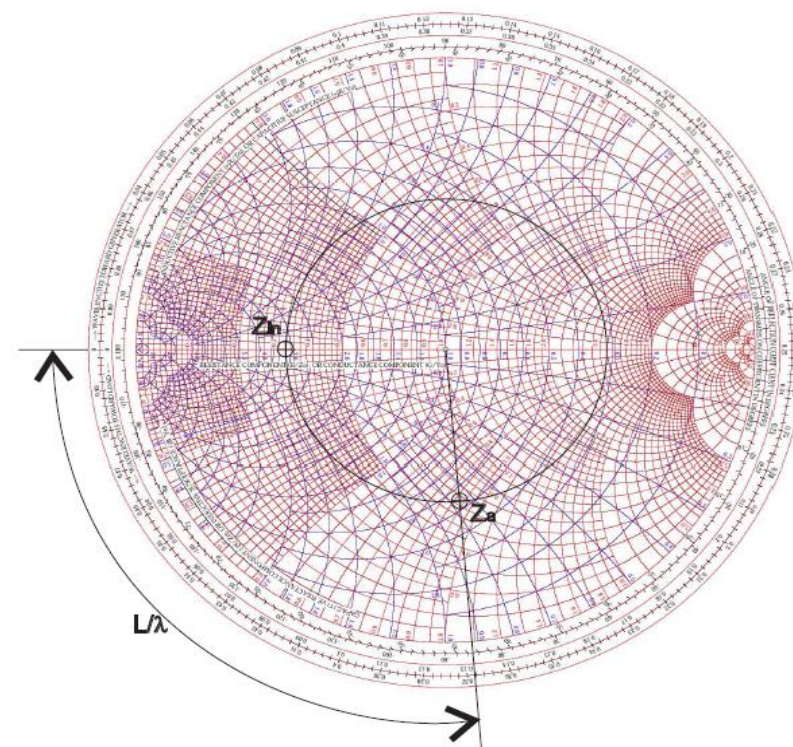
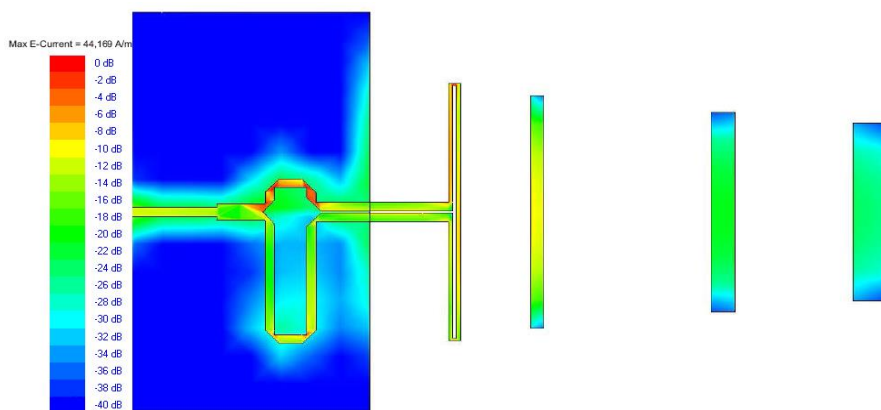
(b)



Příklady realizací

5ti-prvková Yagi-Uda anténa s planárním symetrizačním členem

$$Z_{\text{ant}} = 81,3 - j114,4 \, \Omega$$

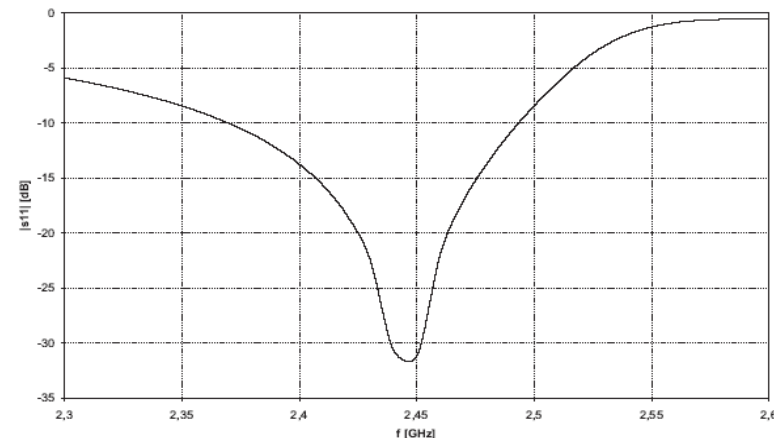


Příklady realizací

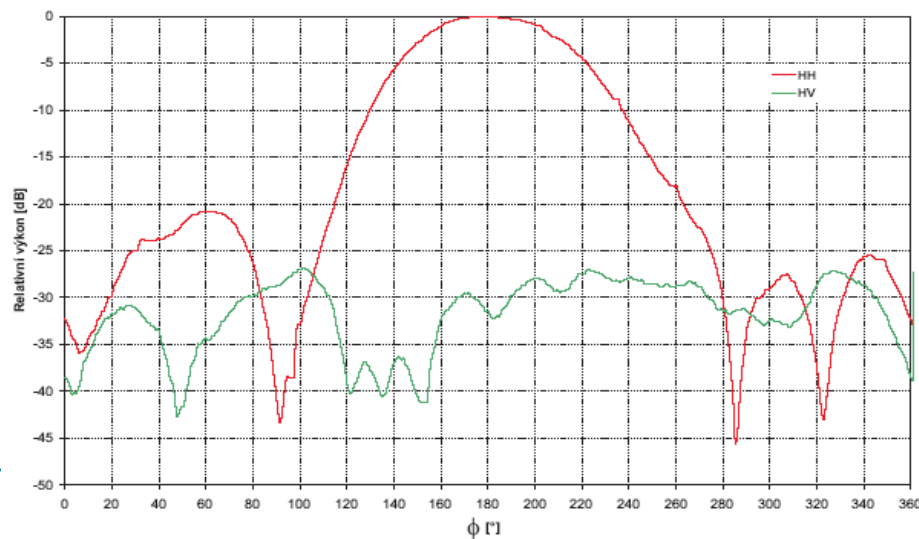
5ti-prvková Yagi-Uda anténa s planárním symetrizačním členem
simulace, IE3D

| f [GHz] | $ s_{11} $ [dB] | D_{max} [dBi] | FBR [dB] | G [dB] | η [%] | η_{vyz} [%] | Šířka svazku [°] | B [MHz] | B_{rel} [%] |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------|------------------|
| 2,45 | -31,18 | 9,94 | 29,11 | 9,68 | 94,25 | 94,32 | (E)56,14/(H)71,95 | 125 | 5,1 |

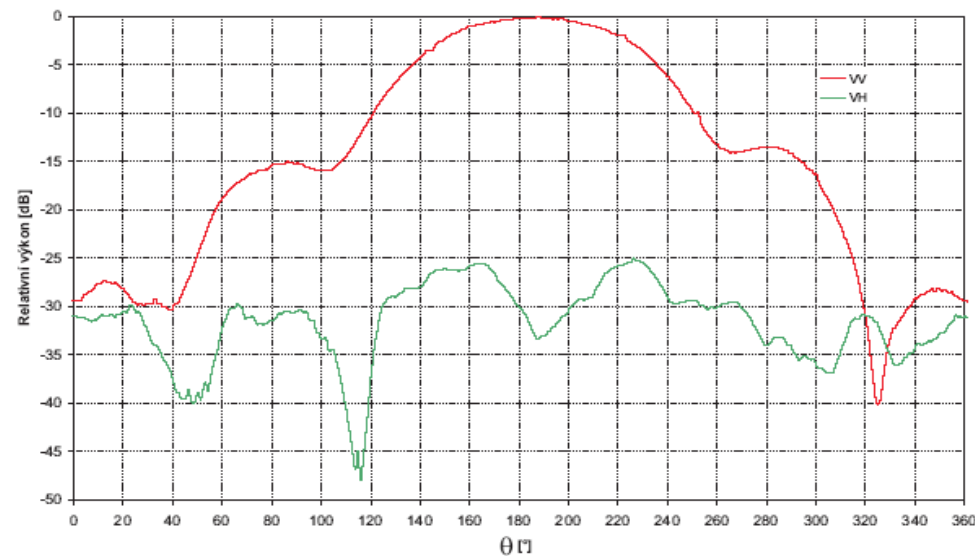
Gměř = 9,3 dBi



E-rovina



H-rovina



Příklady realizací

Širokopásmová symetrizace samokomplementární spirálové antény pro $1,2 \div 40$ GHz

P. Piksa, PhD práce 2007

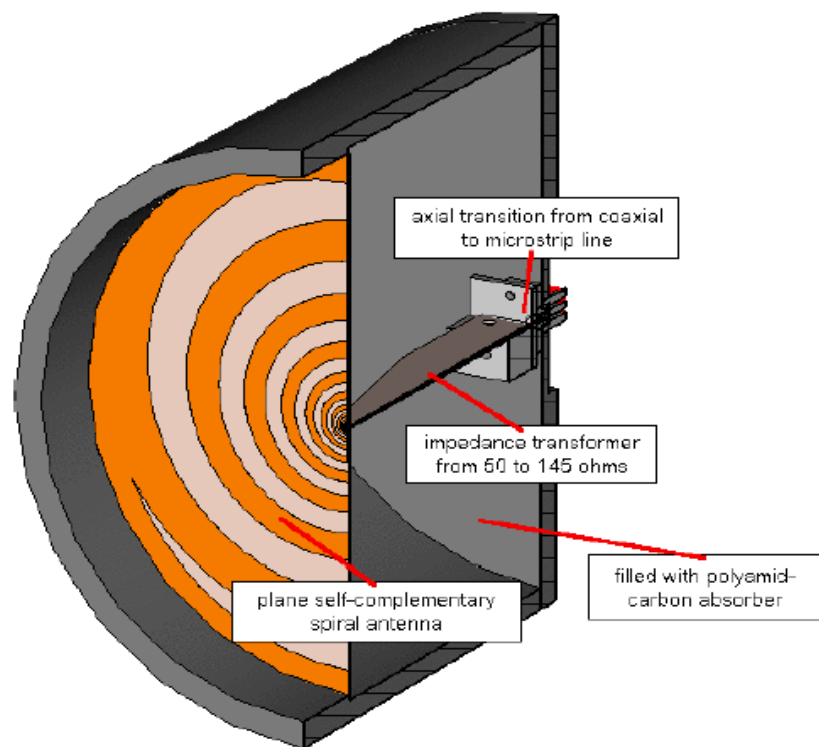


Fig. 1. Self-Complementary Spiral Antenna (SCSA)

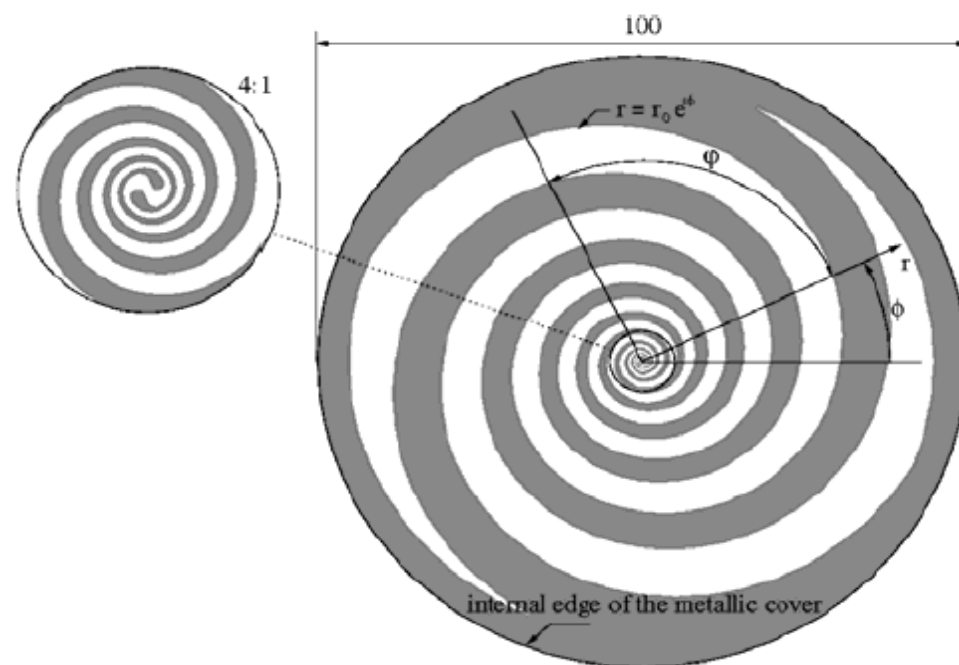


Fig. 2. The geometry of the plane self-complementary spiral antenna with detail of feeding.

Příklady realizací

Širokopásmová symetrizace samokomplementární spirálové antény pro $1,2 \div 40$ GHz

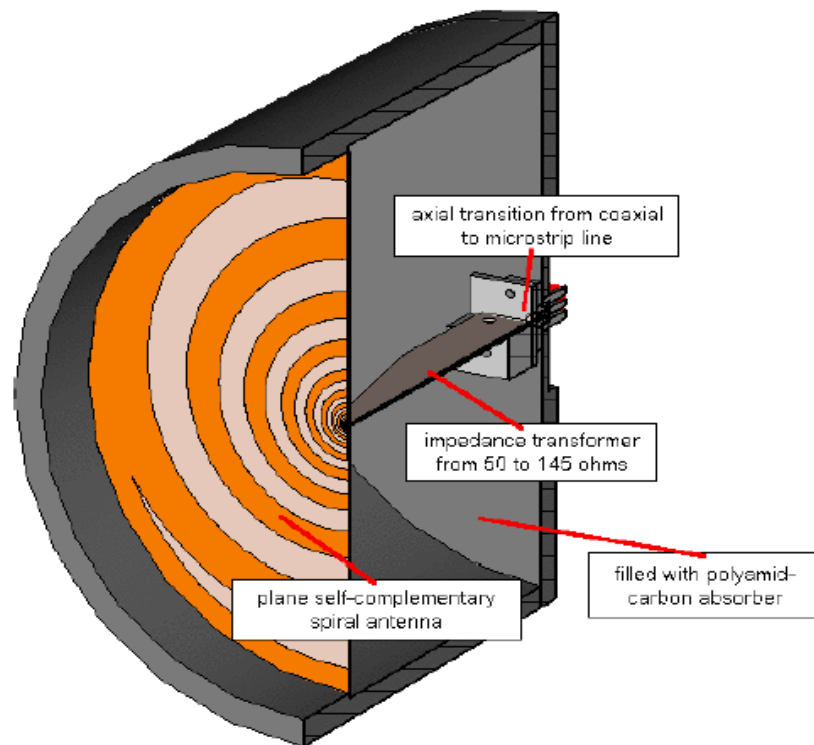


Fig. 1. Self-Complementary Spiral Antenna (SCSA)

substrát Rogers RO 4003:
 $\epsilon_r = 3,38$; $h = 0,508$ mm

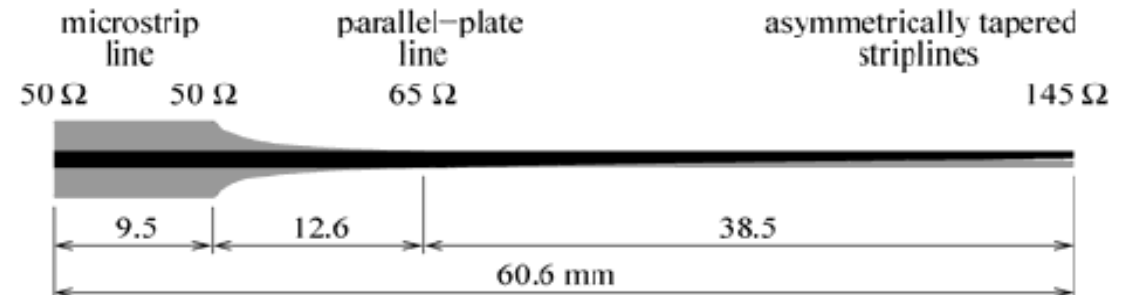


Fig. 3. The geometry of the planar impedance transformer from 50 Ω of microstrip line to 145 Ω of asymmetrically tapered striplines.

Příklady realizací

Širokopásmová symetrizace samokomplementární spirálové antény pro $1,2 \div 40$ GHz

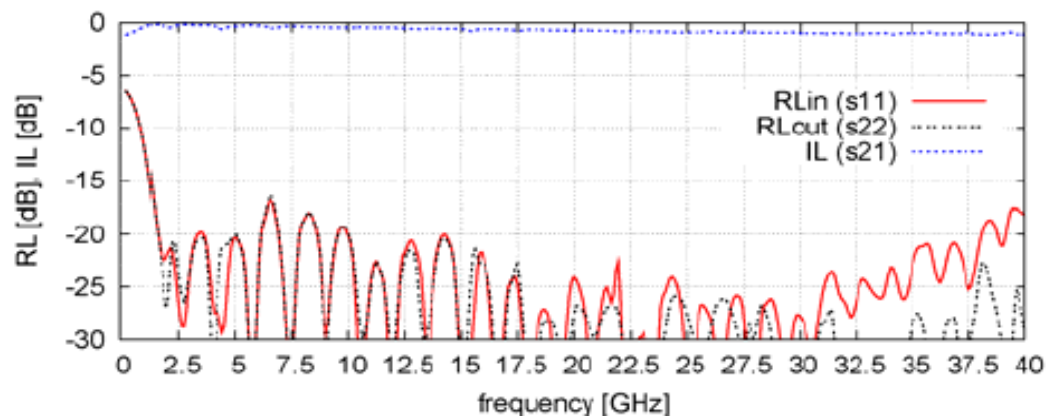


Fig. 13. Impedance matching and insertion loss of the impedance transformer

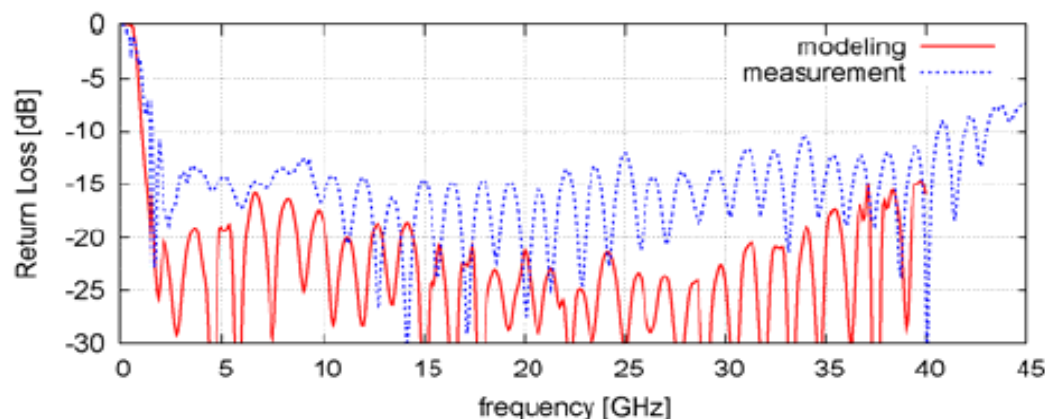


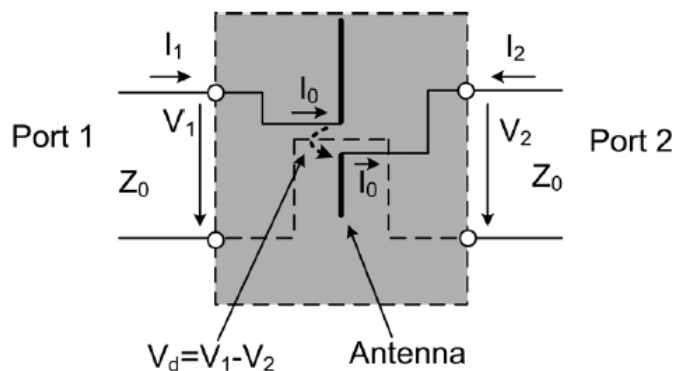
Fig. 14. Impedance matching of the Self-Complementary Spiral Antenna with impedance transformer

Měření souměrných impedancí

Asymetrický (asymmetrical balanced) dipól

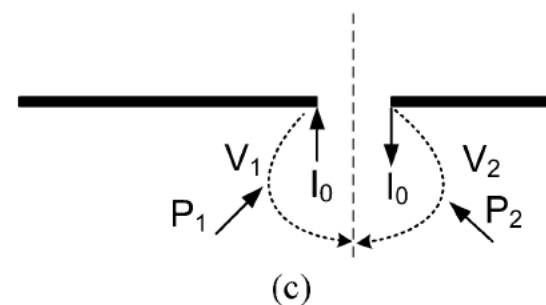
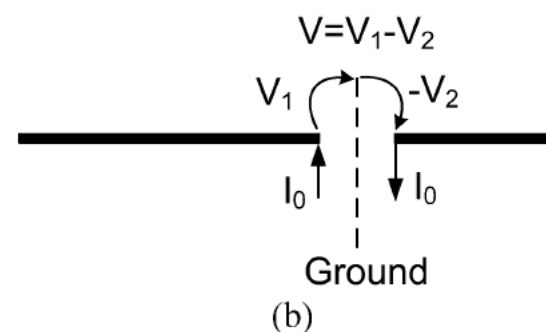
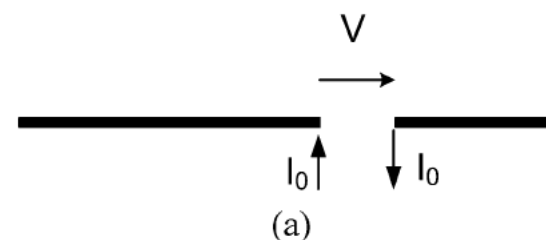
- a) Buzení
- b) Virtuální zem
- c) Definice bran

Obvodová reprezentace



Impedance dipólu

$$Z_d = \frac{V_d}{I_0} = \frac{V_1 - V_2}{I_0}$$



Měření souměrných impedancí

Proudy a napětí bran z definice Z-parametrů

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

Uvažujme $I_1 = I_0$ a $I_2 = -I_0$, pak rozdílové napětí

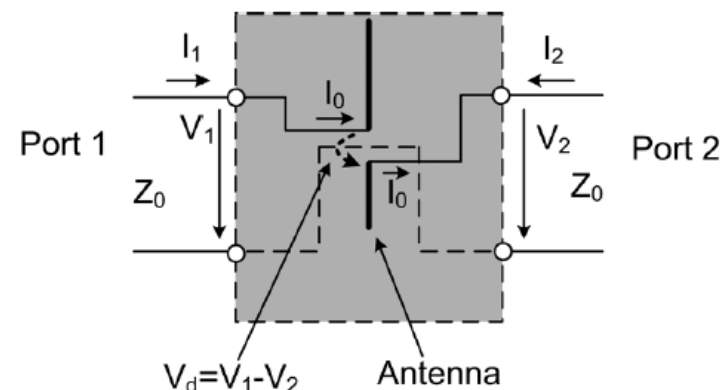
$$V_d = V_1 - V_2 = (Z_{11} - Z_{21} - Z_{12} + Z_{22})I_0$$

Impedance dipólu

$$Z_d = \frac{V_d}{I_0} = \frac{V_1 - V_2}{I_0} = Z_{11} - Z_{21} - Z_{12} + Z_{22}$$

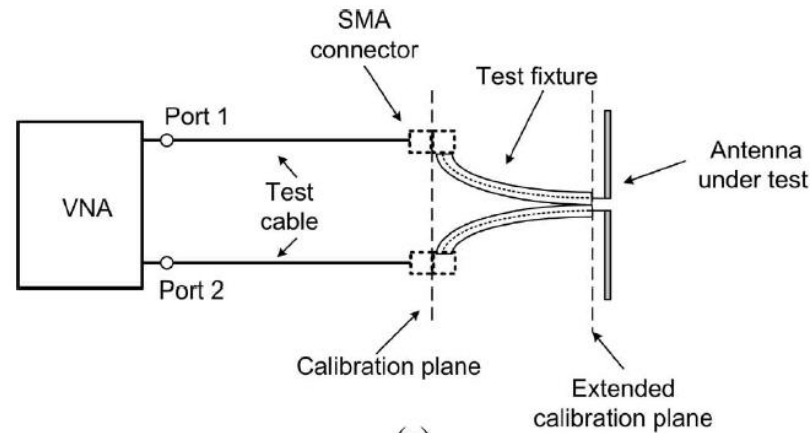
Konverze Z-parametrů na S-parametry

$$Z_d = \frac{2Z_0(1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21} - S_{12}S_{21})}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{21}S_{12}}$$



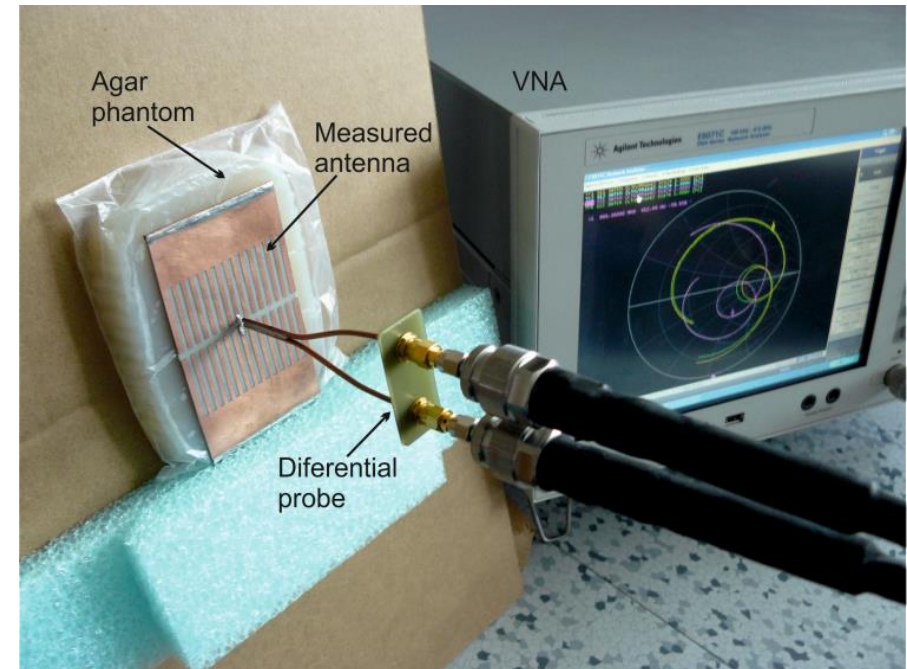
Měření souměrných impedancí

Měřicí uspořádání



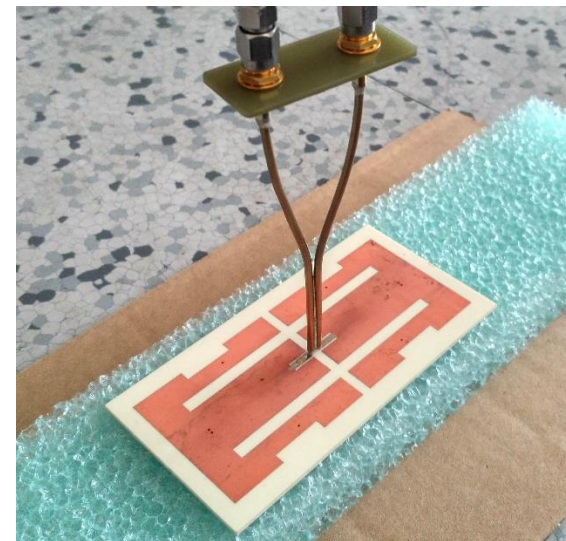
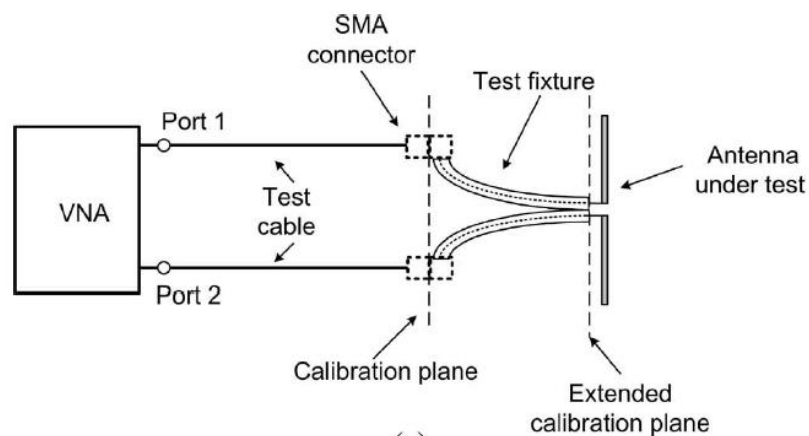
Postup měření

- Dvoubranová kalibrace VNA
- Posun referenční roviny na hroty sondy
- Měření dvoubranových s-parametrů
- Výpočet Z_d



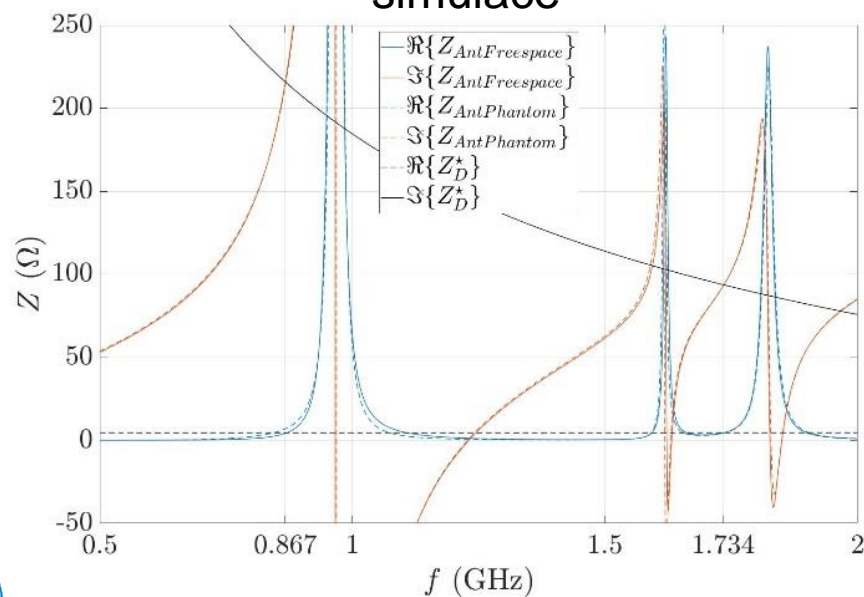
Omezení: nehomogenita koax. vedení sondy, vyzařování hrotů

Měření souměrných impedancí

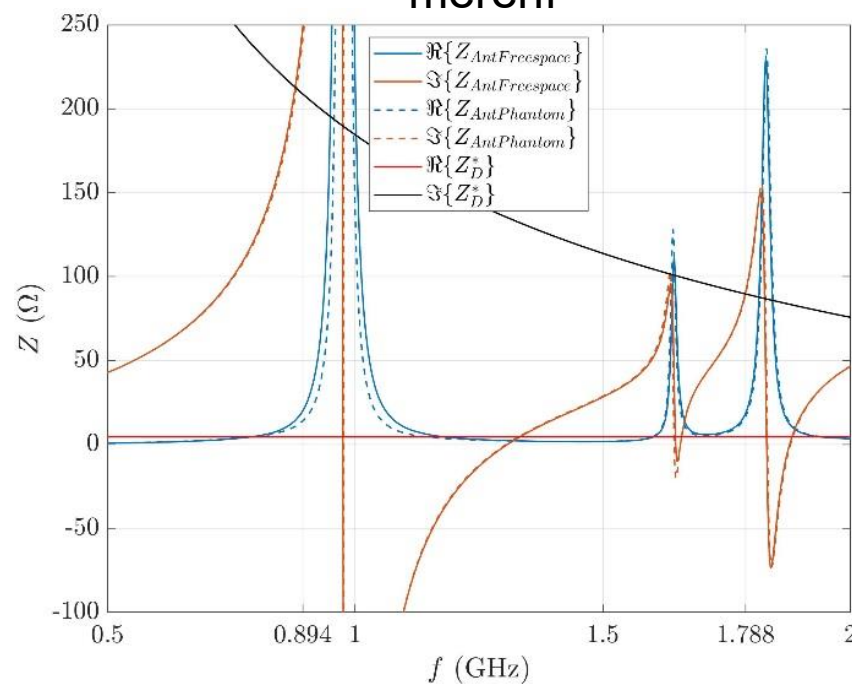


Polívka, Hubata-Vacek, Švanda, IEEE IoT Journal, 2020, submitted

simulace



měření



Reference

1. Prokop, Vokurka, *Šíření elektromagnetických vln a antény*, SNTL/ALFA, 1982
2. Procházka, *Antény: Encyklopedická příručka*, BEN, 2000
3. Kraus, Marhefka, *Antennas: for all Applications*, McGraw-Hill, 2002
4. AR, *Feromagnetické materiály ve vf obvodech*, 2005
5. Kořínek, T., *Pětiprvková Yagi-Uda anténa, diplomová práce*, ČVUT FEL, 2005
6. Piksa, P., Mazánek, M., *A Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna with Impedance Matching*, *Radioengineering*, September 2006, p. 15-19