3. Směrové vazební členy (odbočnice)

3.1. Ideální směrová odbočnice

Věta o existenci ideální směrové odbočnice, viz např. [45]:
"Reciproký bezeztrátový a totálně přizpůsobený čtyřbran je ideální směrová odvočnice."

Může existovat takový čtyřbran, který je:

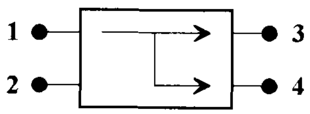
- přizpůsobený
- výkon vstupující do jedné brány vystupuje pouze dalšími dvěma bránami, ze zbývající brány žádný výkon nevystupuje
- součet vystupujících výkonů se rovná vstupujícímu výkonu

Odpovídající rozptylová matice (S) má vlastnosti:

- symetrická, tj. $S_{ij} = S_{ji} \Rightarrow$reciprocita
- diagonální prvky jsou nulové, tj. $S_{ii} = 0 \Rightarrow$ přizpůsobení
- unitární, tj. $(S^*)^T.(S) = (1) \Rightarrow$ bezeztrátovost
- kromě 0 na diagonále je v každém řádku a sloupci ještě jeden prvek nulový, tj. neexistuje vazba mezi příslušnými dvěma branami

Tři druhy směrovosti

- směrovost 1. druhu

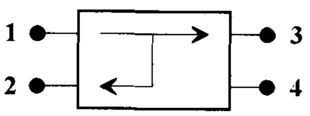


Obr. 3.1.1

$$(S)_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{24} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$
$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = 0 \qquad (3.1.1)$$

- směrovost 2. druhu

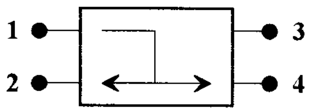


Obr. 3.1.2.

$$(S)_2 = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$
$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = 0 \qquad (3.1.2)$$

- směrovost 3. druhu



Obr. 3.1.3.

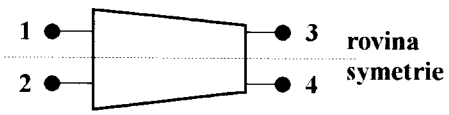
$$(S)_{3.} = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & 0 & S_{34} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0 \\ S_{13} &= S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0 \end{aligned} \qquad (3.1.3)$$

3.2. Reálná odbočnice

Žádný prvek v rozptylové matici není nulový! Pro úplný popis vlastností odbočnice nutných 10 komplexních parametrů.

a) **Odbočnice s jednou rovinou symetrie**



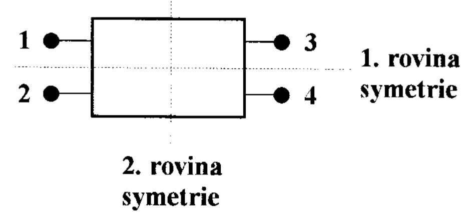
Obr. 3.2.1.

$$(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{13} & S_{34} & S_{33} \end{pmatrix} \qquad (3.2.1)$$

Vzhledem k symetrii platí:
$S_{11} = S_{22}$, $S_{33} = S_{44}$, $S_{13} = S_{24}$, $S_{14} = S_{23}$
Z důvodů reciprocity je $S_{ij} = S_{ji}$.

Pro úplný popis vlastností odbočnice tedy stačí 6 komplexních parametrů:
S_{11}, S_{33}, S_{13}, S_{14}, S_{12}, S_{34}.

b) **Odbočnice se dvěma rovinami symetrie**



Obr. 3.2.2.

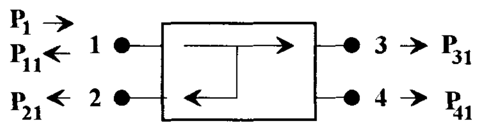
$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix} \qquad (3.2.2)$$

Vzhledem k symetrii platí:
$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}$, $S_{12} = S_{34}$, $S_{13} = S_{24}$, $S_{14} = S_{23}$
Z důvodů reciprocity je $S_{ij} = S_{ji}$.

Pro úplný popis vlastností odbočnice tedy stačí pouze 4 komplexní parametry:
S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}.

Pozn.
Ideální směrová odbočnice se dvěma kolmými rovinami symetrie je tzv. kvadraturní člen, jehož výstupní signály jsou vzájemně fázově posunuty o $\pi/2$.

Příklad ideální směrové odbočnice se dvěma kolmými rovinami symetrie a směrovostí 2. druhu.



$$(S)=\begin{pmatrix} 0 & jk & \sqrt{1-k^2} & 0 \\ jk & 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & 0 & jk \\ 0 & \sqrt{1-k^2} & jk & 0 \end{pmatrix}$$

Obr. 3.2.3. (3.2.3)

$k=|S_{12}|$ je napěťový koeficient přenosu do vazebního ramene.

Reálná odbočnice má rozptylovou matici podle (3.2.2).

c) **Technické parametry reálné odbočnice**

1. Vložný útlum (insertion loss).

$$IL = 10\log\frac{P_1}{P_{31}} = 20\log\frac{1}{|S_{31}|} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.2.4)$$

2. Vazební útlum (coupling).

$$C = 10\log\frac{P_1}{P_{21}} = 20\log\frac{1}{|S_{21}|} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.2.5)$$

3.Izolace (isolation).

$$I = 10\log\frac{P_1}{P_{41}} = 20\log\frac{1}{|S_{41}|} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.2.6)$$

4. Směrovost (directivity).

$$D = 10\log\frac{P_{21}}{P_{41}} = 20\log\frac{|S_{21}|}{|S_{41}|} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.2.7)$$

$$I = C + D \qquad (3.2.8)$$

5. Zpětný útlum, odrazné ztráty (return loss).

$$RL = 10\log\frac{P_1}{P_{11}} = 20\log\frac{1}{|S_{11}|} \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.2.9)$$

6. Vstupní PSV (VSWR).

$$PSV = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \qquad (3.2.10)$$

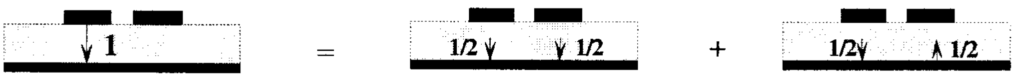
3.3. Směrová odbočnice z vázaných vedení

a) Princip činnosti směrové odbočnice a odvození S-parametrů

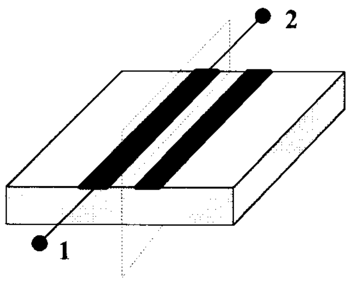
Směrové účinky vznikají v důsledku superpozice dvou vidů elektromagnetického pole vybuzených ve struktuře. Fázové poměry ve struktuře jsou navrženy tak, že v některém výstupním ramenu se dílčí příspěvky sčítají v jiném izolujícím ramenu odčítají. Bez újmy na obecnosti metody bude odvození provedeno pro mikropáskovou odbočnici se dvěma kolmými rovinami symetrie.

Obr. 3.3.1. a) sudé buzení do obou pásků - vybudí se pouze sudý vid
b) liché buzení do obou pásků - vybudí se pouze lichý vid

V případě nesymetrického buzení pouze do jedné brány se vybudí oba vidy, ale s poloviční amplitudou, [56], [57], [58], vycházející z [55].



Obr. 3.3.2. Nesymetrické buzení v jedné bráně odbočnice.



Obr. 3.3.3. Dvoubran tvořený jedním páskem.

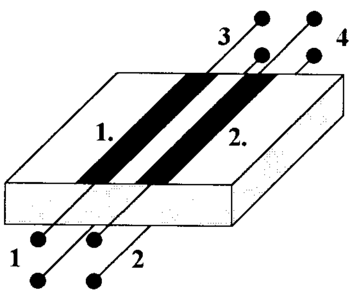
Každý z dvojice pásků je dvoubran s vlastní (S) maticí pro každý vid.
Matice nechť $\left(S^{++}\right)$ odpovídá sudému vidu.
Matice nechť $\left(S^{+-}\right)$ odpovídá lichému vidu.

$$\left(S^{++}\right)=\begin{pmatrix} S_{11}^{++} & S_{12}^{++} \\ S_{21}^{++} & S_{22}^{++} \end{pmatrix} \tag{3.3.1}$$

$$\left(S^{+-}\right)=\begin{pmatrix} S_{11}^{+-} & S_{12}^{+-} \\ S_{21}^{+-} & S_{22}^{+-} \end{pmatrix} \tag{3.3.2}$$

Tyto matice jsou reciproké, tj. $S_{12}^{++}=S_{21}^{++}$ a $S_{12}^{+-}=S_{21}^{+-}$.

Výsledné elmg. pole celé odbočnice je dány superpozicí dílčích polí obou vidů.



Obr. 3.3.4. Směrová odbočnice.

Při buzení směrové odbočnice do brány 1 podle obr. 3.3.2. budou celkové S-parametry odbočnice z obr. 3.3.4. určeny vztahy:

$$S_{11} = \frac{1}{2}\left(S_{11}^{++} + S_{11}^{+-}\right)$$ sčítají se **souhlasně** buzená pole na 1. pásku (3.3.3)

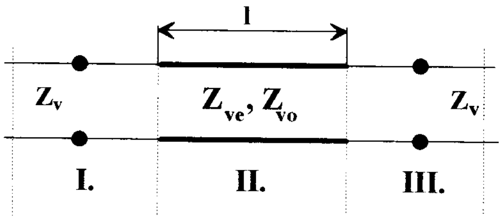
$$S_{12} = \frac{1}{2}\left(S_{11}^{++} - S_{11}^{+-}\right)$$ sčítají se **opačně** buzená pole na 2. pásku (3.3.4)

$$S_{13} = \frac{1}{2}\left(S_{12}^{++} + S_{12}^{+-}\right)$$ sčítají se **souhlasně** buzená pole na 1. pásku (3.3.5)

$$S_{14} = \frac{1}{2}\left(S_{12}^{++} - S_{12}^{+-}\right)$$ sčítají se **opačně** buzená pole na 2. pásku (3.3.6)

Určení $\left(S^{++}\right)$ a $\left(S^{+-}\right)$ matic dvoubranů samostatných pásků

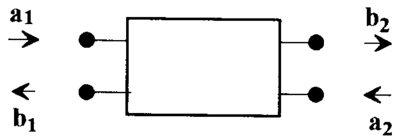
Každý ze samostatných pásků představuje kaskádní spojení 3 dvoubranů.



Obr. 3.3.5. Model dvoubranu jednoho pásku.

Výslednou (S) matici kaskády lze získat pomocí vlnové přenosové matice.

Vztah rozptylové a vlnové přenosové matice.



$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ a_2 \end{pmatrix} \qquad (3.3.7)$$

$$(S) = \frac{1}{t_{11}} \cdot \begin{pmatrix} t_{21} & \det(t) \\ 1 & -t_{12} \end{pmatrix} \qquad (t) = \frac{1}{S_{21}} \begin{pmatrix} 1 & -S_{22} \\ S_{11} & -\det(S) \end{pmatrix} \tag{3.3.8}$$

Výsledná vlnová přenosová matice kaskádně spojených dvoubranů je rovna součinu dílčích vlnových přenosových matic.

Podle obr. 3.3.5. platí:

$$(te,o)_{I.} = \frac{1}{2\sqrt{r_{e,o}}} \cdot \begin{pmatrix} re,o+1 & re,o-1 \\ re,o-1 & re,o+1 \end{pmatrix} \tag{3.3.9}$$

kde

$$re = \frac{Z_{ve}}{Z_v} \text{ a } ro = \frac{Z_{vo}}{Z_v} \tag{3.3.10}$$

$$(te,o)_{II.} = \begin{pmatrix} e^{j\vartheta_{e,o}} & 0 \\ 0 & e^{-j\vartheta_{e,o}} \end{pmatrix} \tag{3.3.11}$$

kde

$$\vartheta e = \left(-j\beta e + \frac{2\pi}{\lambda_{ge}}\right).l, \quad \vartheta o = \left(-j\beta o + \frac{2\pi}{\lambda_{go}}\right).l \tag{3.3.12}$$

$$(te,o)_{III.} = \frac{1}{2\sqrt{r_{e,o}}} \cdot \begin{pmatrix} re,o+1 & -(re,o-1) \\ -(re,o-1) & re,o+1 \end{pmatrix} \tag{3.3.13}$$

Neboť pro dvoubran napájený z opačné strany je:

$$(t)_{\leftarrow} = \frac{1}{\det(t)} \cdot \begin{pmatrix} t_{11} & -t_{21} \\ -t_{12} & t_{22} \end{pmatrix} \tag{3.3.14}$$

Pro celkovou vlnovou přenosovou matici pak platí pro oba vidy:

$$(te,o) = (te,o)_{I.} \cdot (te,o)_{II.} \cdot (te,o)_{III.} \tag{3.3.15}$$

Výsledné t-parametry této matice se při použití (3.3.8) dosadí do (3.3.3) až (3.3.6).

Určení výsledných S-parmetrů celé odbočnice

$$S_{11} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{11}^{++} + S_{11}^{+-}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{++}} + \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.16a}$$

$$S_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{11}^{++} - S_{11}^{+-}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{+-}} - \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.16b}$$

$$S_{13} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{12}^{++} + S_{12}^{+-}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{11}^{++}} + \frac{1}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.17a}$$

$$S_{14} = \frac{1}{2}\cdot\left(S_{12}^{++} - S_{12}^{+-}\right) = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{1}{t_{11}^{++}} - \frac{1}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.17b}$$

$$S_{33} = \frac{1}{2}\left(S_{22}^{++} + S_{22}^{+-}\right) = \frac{-1}{2}\left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{++}} + \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.18a}$$

$$S_{34} = \frac{1}{2}\left(S_{22}^{++} - S_{22}^{+-}\right) = \frac{-1}{2}\left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{++}} - \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}}\right) \tag{3.3.18b}$$

Vzhledem k symetrii platí: $S_{33} = S_{11}$ a $S_{34} = S_{12}$. (3.3.19)

Po dosazení:

$$S_{\substack{11\\12}} = \frac{R_e}{2}\cdot\left(1 - \frac{1-R_e^2}{\exp(2\beta_e.l)\exp(j2\alpha_e.l)-R_e^2}\right) \pm \frac{R_o}{2}\cdot\left(1 - \frac{1-R_o^2}{\exp(2\beta_o.l)\exp(j2\alpha_o.l)-R_o^2}\right) \tag{3.3.20}$$

$$S_{\substack{13\\14}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{(1-R_e^2).\exp(\beta_e.l)\exp(j\alpha_e.l)}{\exp(j2\beta_e.l)\exp(j2\alpha_e.l)-R_e^2} \pm \frac{1}{2}\cdot\frac{(1-R_o^2)\exp(\beta_o.l)\exp(j\alpha_o.l)}{\exp(j2\beta_o.l)\exp(j2\alpha_o.l)-R_o^2} \tag{3.3.21}$$

kde

$$Re = \frac{Z_{ve}-Z_v}{Z_{ve}+Z_v}, \quad Ro = \frac{Z_{vo}-Z_v}{Z_{vo}+Z_v} \tag{3.3.22}$$

Ideální směrová odbočnice má

$$S_{11} = 0 \text{ a } S_{14} = 0 \tag{3.3.23}$$

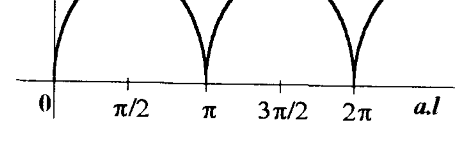
Tyto podmínky lze splnit pro $\alpha_e = \alpha_o$ a $R_e = -R_o$ při $\beta = 0$.

U reálné směrové odbočnice je $\beta \neq 0$. Dále: $\alpha_e = \alpha_o$ platí např. u vázaného symetrického páskového vedení, ne však u vázaného mikropáskového vedení.
Podmínku $R_e = -R_o$ však splnit lze i u reálné odbočnice. Při použití (3.3.22) pak platí:

$$Zv = \sqrt{Zve.Zvo} \tag{3.3.24}$$

Vliv délky úseku vázaného vedení na vlastnosti odbočnice

Podle (3.3.20) lze odvodit závislost:



Obr. 3.3.6. Závislost modulu vazby na délce vázaného vedení.

Nejmenší frekvenční závislost vazby $|S_{12}|$ je při $l = \frac{\lambda_g}{4}$.

Při $\alpha_e = \alpha_o$ lze zvolit přesně $l = \lambda_g/4$.

Je-li $\alpha_e \neq \alpha_o$ je nutno volit průměrné $\alpha = \frac{\alpha_e+\alpha_o}{2}$ a určit:

$$\frac{\alpha_e+\alpha_o}{2}.l = \frac{\pi}{2} \Rightarrow l = \frac{\pi}{\alpha_e+\alpha_o} = \frac{\lambda_{gs}}{4}; \quad \frac{1}{\lambda_{gs}} = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_{ge}} + \frac{1}{\lambda_{go}}\right) \tag{3.3.25}$$

Klesá - šířka použitelného frekvenčního pásma
- směrovost

Pro $\alpha_e = \alpha_o$, $\beta_{e,o} = 0$ a $l = \lambda_g/4$ je:

$$S_{12} = \frac{Z_{ve}-Z_{vo}}{Z_{ve}+Z_{vo}}, \; S_{13} = -j\frac{2R_o}{1+R_o^2} = -j\frac{2R_e}{1+R_e^2}, \; S_{11} = S_{14} = 0 \tag{3.3.26}$$

Jak určit Z_{ve} a Z_{vo} pro požadovanou vazbu C?

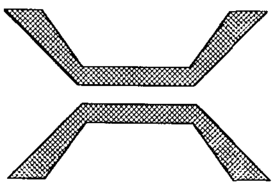
Z rovnic (3.3.20), (3.3.24) a (3.2.5) lze odvodit:

$$Z_{ve} = Z_v.\sqrt{\frac{1+10^{-C/20}}{1-10^{-C/20}}} \quad \text{a} \quad Z_{vo} = Z_v.\sqrt{\frac{1-10^{-C/20}}{1+10^{-C/20}}} \tag{3.3.27}$$

Různé konstrukční úpravy zlepšující parametry odbočnice

1) Vazba musí být pouze na úseku $l = \lambda_g/4$. Přívodní vedení se nesmí vzájemně ovlivňovat. Odkloňují se proto o 45°.

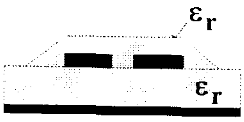
2) Zmenšení impedančního skoku na vstupu a výstupu vázaných vedení pomocí lineárního impedančního transformátoru. Jeho délka se obvykle volí $\approx 4w$.



Obr. 3.3.7. Úprava připojení úseku vázaného vedení pro zmenšení impedančního skoku a potlačení vazby mezi přívodními pásky.

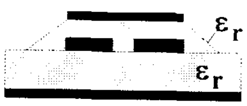
3) Metody vyrovnávající fázové rychlosti sudého a lichého vidu

3a) Přídavná dielektrická vrstva se stejnou permitivitou jako základní substrát



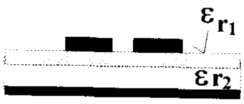
Obr. 3.3.8.

3b) Případ a) doplněný vodivou deskou



Obr. 3.3.9.

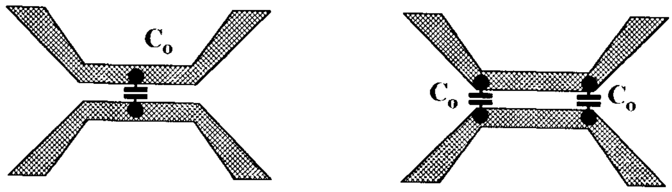
3c) Zmenšení ε_{efe} pomocí vrstveného substrátu



Obr. 3.3.10.

$\varepsilon_{r2} << \varepsilon_{r1}$

3d) Přídavnou kapacitou C_o mezi pásky se zmenší rychlost lichého vidu

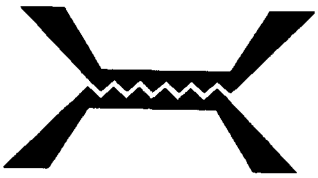


Obr. 3.3.11.

$$v_{fo} = \frac{1}{\sqrt{L(C+C_o)}}$$

Realizace interdigitálním kapacitorem.

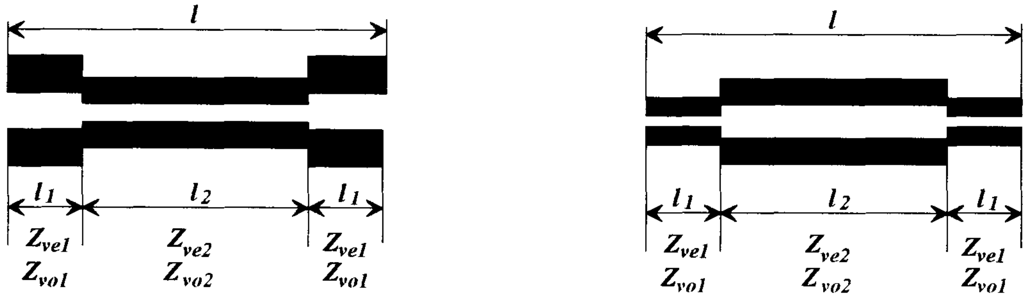
3e) Prodloužení délky vazební štěrbiny


Obr. 3.3.12.

Prodlouží se dráha lichého vidu - proud se koncentruje u vnitřního okraje pásků.

3f) Použití kompenzačních vazebních sekcí

Rehnmark [46] navrhl realizaci odbočnice ze tří sekcí o dvěma různými vazbami.
$l \approx \lambda g/4$



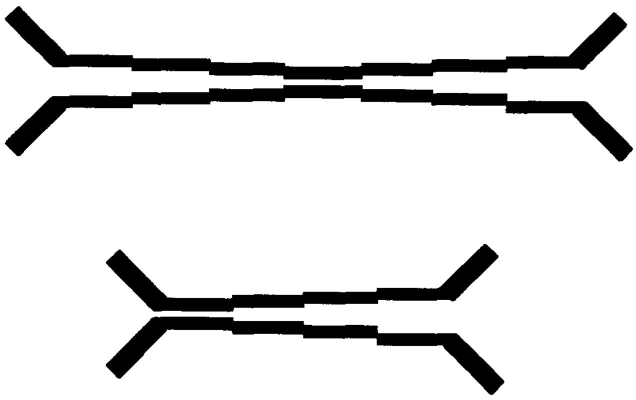
A B

Obr. 3.3.13.

Vhodnou volbou délek úseků vedení a vlnových odporů lze zvýšit směrovost v širším kmitočtovém pásmu. U varianty B lze dosáhnout až D>35 dB v pásmu 2,3:1.

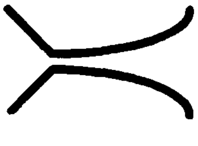
3g) Širokopásmové směrové odbočnice

Vícestupňové odbočnice s různým stupněm vazby v jednotlivých stupních. Elektrická délka stupňů je stejná $\left(\alpha_{ei} + \alpha_{oi}\right)/2 = \pi/2$. S rostoucím počtem sekcí roste šířka pásma, [52], [53], [54].



Obr. 3.3.14. Symetrické a asymetrické širokopásmové směrové odbočnice.

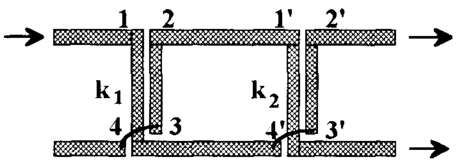
3h) Směrové odbočnice se spojitou změnou vazby - limitní případ vícestupňové odbočnice



Obr. 3.3.15.

3i) Zvětšení vazby kaskádním spojením více odbočnic

Možnost dosáhnout těsnější vazby pomocí odbočnic s realizovatelnou volnější vazbou [47], [7], [51].



Obr. 3.3.16.

Platí:

$$S_{12'} = k_1 . k_2 - \sqrt{\left(1 - k_1^2\right).\left(1 - k_2^2\right)}$$

$$S_{13'} = -j.\left(k_1 . \sqrt{\left(1 - k_2^2\right)} + k_2 . \sqrt{\left(1 - k_1^2\right)}\right) \qquad (3.3.28)$$

kde sčítanci odpovídají přenosům přez vazbu a přímým propojením

Pro stejné odbočnice je $k_1 = k_2 = k$ a (3.3.28) lze upravit na:

$$S_{12'} = 2k^2 - 1$$

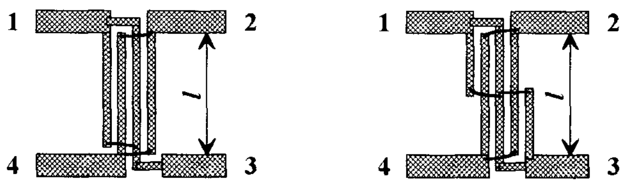
$$S_{13'} = -j2k.\sqrt{1 - k^2} \qquad (3.3.29)$$

Pro dosažení celkové vazby 3 dB je $|S_{12'}| = |S_{13'}| = 1/\sqrt{2}.$ Potom:

$$k = \sqrt{\frac{\sqrt{2} - 1}{2.\sqrt{2}}} = 0,38268 \sim 8,34 \quad [\mathrm{dB}] \qquad (3.3.30)$$

g) **Interdigitální (Langeho) odbočnice**

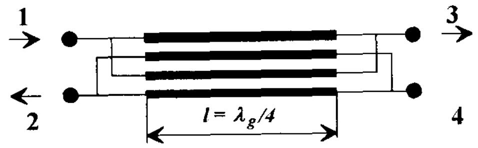
Zvětšením počtu vázaných pásků lze zvýšit vazbu při technologicky přijatelné šířce štěrbin, strukturu navrhl Lange, [48].



A B

Obr. 3.3.17.

Náhradní obvod.



Obr. 3.3.18.

Zjednodušenou analýzu struktury při uvažování pouze vazby mezi sousedními pásky navrhl Ou, [49]. Analýza je odvozena na základě vlnových admitancí sudého a lichého vidu. Po přepočtu na odpovídající impedance lze konstatovat:
Pro dobré přizpůsobení a izolaci, $S_{11} = 0$, $S_{14} = 0$, musí být splněno:

$$Z_v^2 = \frac{Z_{ve}.Z_{vo}.(Z_{ve} + Z_{vo})^2}{[Z_{ve} + (n-1).Z_{vo}].[Z_{vo} + (n-1).Z_{ve}]} \tag{3.3.31}$$

kde Z_{ve} , Z_{vo} odpovídají samostatné dvojici pásků, Z_v je vlnový odpor napájecích vedení a n je vždy sudý počet vazebních pásků (obvykle stačí 4).

Pro koeficient vazby pak platí:

$$k = |S_{12}| = (n-1).\frac{Z_{ve}^2 - Z_{vo}^2}{2Z_{ve}.Z_{vo} + (n-1)(Z_{ve}^2 + Z_{vo}^2)} \tag{3.3.32}$$

$$C = 20.\log\frac{1}{k} = 20.\log\frac{1}{|S_{12}|} \tag{3.3.33}$$

V degenerovaném případě $n = 2$:

$$Z_v^2 = Z_{ve}.Z_{vo} \tag{3.3.34}$$

$$k = \frac{Z_{ve} - Z_{vo}}{Z_{ve} + Z_{vo}} \tag{3.3.35}$$

Syntézu struktury popisuje Osmani v [50].

$$Z_{vo} = Z_v.\sqrt{\frac{1-k}{1+k}}.\frac{(n-1).(1+q)}{(k+q)+(n-1).(1-k)} \tag{3.3.36}$$

$$Z_{ve} = Z_{vo}.\frac{(k+q)}{(n-1).(1-k)} \tag{3.3.37}$$

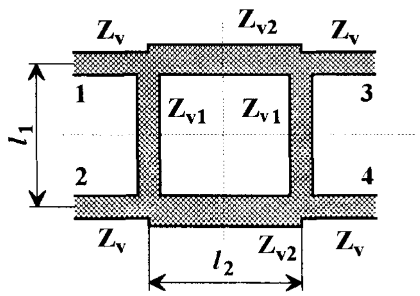
kde

$$q = \sqrt{k^2 + (n-1)^2.(1-k^2)} \tag{3.3.38}$$

3.4. Příčkové vazební členy (Branch Line Couplers).

a) **Dvoupříčkový vazební člen**.

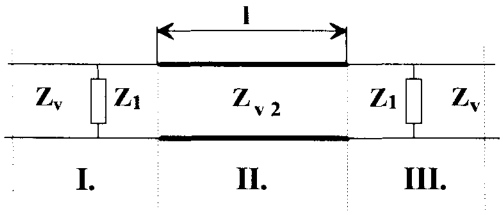
Odvození S-parametrů.



Obr. 3.4.1.

Čtyřbran se směrovostí 1. druhu. Symetrie podle dvou kolmých rovin. K popisu tedy stačí 4 parametry $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$.
Strukturu lze analyzovat stejnou metodou jako u směrového vazebního členu z vázaných vedení, [55], [56], [57], [58].

Při soufázovém napájení + + mají příčná vedení v rovině symetrie otevřený konec
Při protifázovém napájení + - mají příčná vedení v rovině symetrie zkrat



Obr. 3.4.2. Náhradní obvod 1/2 struktury.

$Z_{1e,o}$ je vstupní impedance $l_1/2$ dlouhého úseku vedení zakončeného v rovině symetrie:
naprázdno při soufázovém napájení + +
nakrátko při protifázovém napájení + -

$$(te,o)_{I.} = \frac{1}{2\sqrt{r}} \cdot \begin{pmatrix} r.(1+ye,o)+1; & r(1+ye,o)-1 \\ r(1-ye,o)-1; & r(1-ye,o)+1 \end{pmatrix} \tag{3.4.1}$$

kde

$$r = \frac{Z_{v2}}{Z_v}, \; ye,o = \frac{Z_v}{Z_{1e,o}}$$

$$(te,o)_{II.} = \begin{pmatrix} e^{j\vartheta_{e,o}} & 0 \\ 0 & e^{-j\vartheta_{e,o}} \end{pmatrix} \tag{3.4.2}$$

kde

$$\vartheta e,o = \left(-j\beta e,o + \frac{2\pi}{\lambda_{ge,o}}\right).l_2$$

$$(te,o)_{III.} = \frac{1}{\det(t)_{I.}} \cdot \begin{pmatrix} t^{I.}_{11e,o} & -t^{I.}_{21e,o} \\ -t^{I.}_{12e,o} & t^{I.}_{22e,o} \end{pmatrix} \tag{3.4.3}$$

Pro celkovou vlnovou přenosovou matici 1/2 struktury pak platí:

$$(te,o) = (te,o)_{I.} \cdot (te,o)_{II.} \cdot (te,o)_{III.} \tag{3.4.4}$$

Srovnej s (3.3.9) až (3.3.15).

S-parametry celé struktury jsou pak určeny vztahy (3.3.16) až (3.3.19), tj.

$$S_{11} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{11}^{++} + S_{11}^{+-} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{++}} + \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}} \right) \tag{3.4.5}$$

$$S_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{11}^{++} - S_{11}^{+-} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{21}^{++}}{t_{11}^{+-}} - \frac{t_{21}^{+-}}{t_{11}^{+-}} \right) \tag{3.4.6}$$

$$S_{13} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{12}^{++} + S_{12}^{+-} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{11}^{++}} + \frac{1}{t_{11}^{+-}} \right) \tag{3.4.7}$$

$$S_{14} = \frac{1}{2} \cdot \left(S_{12}^{++} - S_{12}^{+-} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{11}^{++}} - \frac{1}{t_{11}^{+-}} \right), \tag{3.4.8}$$

do kterých se dosadí z (3.4.4) příslušné prvky výsledné (t) matice při sudém a lichém buzení. Zanedbají-li se ztráty a zvolí se $l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4}$ a $l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4}$, lze pro výsledné S-parametry získat vztahy:

$$S_{11} = \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{Z_{v2}}{Z_v} \right)^2 \cdot \left\{ 1 - \left[\left(\frac{Z_v}{Z_{v2}} \right)^2 - \left(\frac{Z_v}{Z_{v1}} \right)^2 \right]^2 \right\} \tag{3.4.9}$$

$$S_{12} = j \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{Z_{v2}^2}{Z_{v1} . Z_v} \left[\left(\frac{Z_v}{Z_{v2}} \right)^2 - \left(\frac{Z_v}{Z_{v1}} \right)^2 - 1 \right] \tag{3.4.10}$$

$$S_{13} = -j \cdot \frac{2}{D} \cdot \frac{Z_{v2}}{Z_v} \cdot \left[\left(\frac{Z_v}{Z_{v2}} \right)^2 - \left(\frac{Z_v}{Z_{v1}} \right)^2 + 1 \right] \tag{3.4.11}$$

$$S_{14} = -\frac{4}{D} \cdot \frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \tag{3.4.12}$$

kde

$$D = 4. \left(\frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \right)^2 + \left(\frac{Z_{v2}}{Z_v} \right)^2 \left[\left(\frac{Z_v}{Z_{v2}} \right)^2 - \left(\frac{Z_v}{Z_{v1}} \right)^2 + 1 \right]^2 \tag{3.4.13}$$

Ideální směrová odbočnice

Z požadavku $S_{11} = 0$ a vztahu (3.4.9) lze získat:

$$\left(\frac{Z_v}{Z_{v2}}\right)^2 - \left(\frac{Z_v}{Z_{v1}}\right)^2 = 1, \qquad (3.4.14)$$

pak i, podle vztahu (3.4.10), $S_{12} = 0$. Ze vztahů (3.4.12), (3.4.13) a (3.4.13) pak pro vazbu lze odvodit.

$$C = 20.\log\frac{1}{|S_{14}|} = 20.\log\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{Z_{v2}}{Z_v}\right)^2}} \qquad (3.4.15)$$

Průchozí útlum je pak dán vztahem :

$$IL = 20.\log\frac{1}{|S_{13}|} = 20.\log\frac{Z_v}{Z_{v2}} \qquad (3.4.16)$$

Syntéza dvoupříčkového vazebního členu

1. C, $Z_v \rightarrow Z_{v2}$, podle (3.4.15)

2. Impedanční přizpůsobení $\rightarrow Z_{v1}$, podle (3.4.14)

3. Z_v, Z_{v1}, Z_{v2}, použitý substrát $\rightarrow$ šířky pásků

4. $l_1 = \lambda_{g1}/4$, $l_2 = \lambda_{g2}/4$

5. Korekce na diskontinuity

Příklad 3 dB odbočnice - hybridního členu $C = IL = 3dB$ potom:

$$Z_{v2} = \frac{Z_v}{\sqrt{2}} \quad \text{a} \quad Z_{v1} = Z_v \qquad (3.4.17)$$

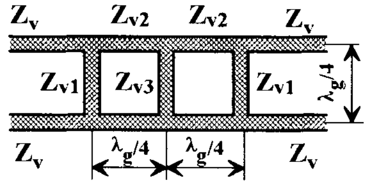
Konstrukční úpravy zlepšující parametry odbočnice

1. Tvarové úpravy
- ramena ve tvaru meandrových vedení pro zmenšení plochy
- struktura ve tvaru kruhu

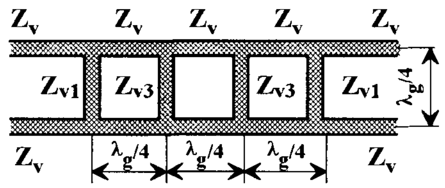
2. Přizpůsobovací pahýly ve vzdálenosti cca $\lambda_g/4$ od výstupu čtverce pro zvětšení šířky pásma

b) **Vícepříčkové vazební členy**.

Reed a Wheeler analyzovali strukturu složenou z více příčkových vazebních členů spojených do kaskády, [55].



Obr. 3.4.3. Třípříčkový vazební člen.



Obr. 3.4.4. Čtyřpříčkový vazební člen.

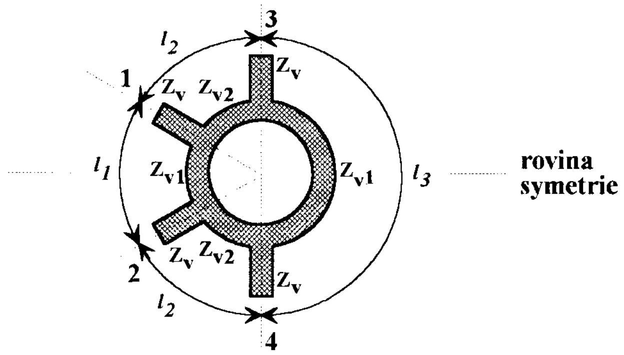
Pro 3 dB verzi třípříčkové odbočnice platí:

$$Z_{v1} = \frac{Z_v}{\sqrt{2}-1}, \qquad Z_{v2} = Z_{v3} = \frac{Z_v}{\sqrt{2}} \tag{3.4.18}$$

Pro 3 dB čtyřpříčkovou odbočnici platí:

$$Z_{v1} = \frac{Z_v}{0{,}2346}, \qquad Z_{v3} = \frac{Z_v}{0{,}5412} \tag{3.4.19}$$

3.5. Kruhový vazební člen (Magic Tee Coupler, Rat-Race Coupler).



Obr. 3.5.1.

Směrová odbočnice s jednou rovinou symetrie. Směrovost 2. druhu.
Obdobně jako u příčkového vazebního členu lze odvodit obecné vztahy pro S-parametry.

Zjednodušené vztahy pro S-parametry.

Při zanedbání ztrát a volbě

$$l_1 = \lambda_{g1}/4,\ l_2 = \lambda_{g2}/4,\ l_3 = 3\lambda_{g1}/4 \tag{3.5.1}$$

je celková délka prstence $3\lambda_g/2$.

Potom:
Při buzení do brány 1 resp. (2) jsou výstupní signály v branách 2 a 3 resp. (1 a 4) ve fázi.
Při buzení do brány 3 resp. (4) jsou výstupní signály v branách 1 a 4 resp. (2 a 3) v protifázi.

Rozptylová matice struktury je tedy:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & S11 & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & S_{13} & S_{34} & S_{33} \end{pmatrix} \tag{3.5.2}$$

Obecné vztahy pro S-parametry struktury odvozené v [59] pro obecné délky úseků vedení lze při podmínce (3.5.1) zjednodušit, [59], [7], na:

$$S_{11} = S_{33} = \frac{(Z_{v1}Z_{v2})^2-(Z_{v1}Z_v)^2-(Z_{v2}Z_v)^2}{(Z_{v1}Z_{v2})^2+(Z_{v1}Z_v)^2+(Z_{v2}Z_v)^2} \tag{3.5.3}$$

$$S_{12} = -S_{34} = -j.\frac{2Z_{v1}.Z_{v2}^2.Z_v}{(Z_{v1}Z_{v2})^2+(Z_{v1}Z_v)^2+(Z_{v2}Z_v)^2} \tag{3.5.4}$$

$$S_{13} = -j.\frac{2.Z_{v1}^2.Z_{v2}.Z_v}{(Z_{v1}Z_{v2})^2+(Z_{v1}Z_v)^2+(Z_{v2}Z_v)^2} \tag{3.5.5}$$

$$S_{14} = 0 \tag{3.5.6}$$

Ideální směrová odbočnice

Při požadovaných $S_{11} = S_{33} = 0$ lze z (3.5.3) až (3.5.5) odvodit:

Impedanční přizpůsobení.

$$\left(\frac{Z_v}{Z_{v1}}\right)^2 + \left(\frac{Z_v}{Z_{v2}}\right)^2 = 1 \tag{3.5.7}$$

Vazba.

$$C = 20\log\frac{1}{|S_{12}|} = 20\log\frac{1}{|S_{34}|} = 20\log\frac{Z_{v1}}{Z_v} \tag{3.5.8}$$

Průchozí útlum.

$$IL = 20\log\frac{1}{|S_{13}|} = 20\log\frac{Z_{v2}}{Z_v} \tag{3.5.9}$$

Syntéza kruhového hybridního členu

1. $C,\ Z_v \rightarrow Z_{v1}$ podle (3.5.8)

2. Impedanční přizpůsobení $\rightarrow Z_{v2}$ podle (3.5.7)

3. Zv, Z_{v1}, Z_{v2}, použitý substrát $\rightarrow$ šířky pásků

4. $l_1 = \lambda_{g1}/4$, $l_2 = \lambda_{g2}/4$, $l_3 = 3.\lambda_{g1}/4$

5. Korekce na diskontinuity

Příklad 3 dB odbočnice (hybridního členu).

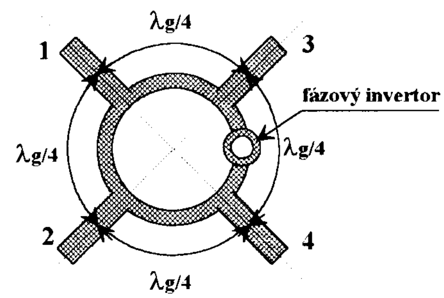
$$C = IL = 3dB \rightarrow Z_{v1} = Z_{v2} = \sqrt{2}.Zv \text{ a také } \lambda_{g1} = \lambda_{g2} \tag{3.5.10}$$

Konstrukční úpravy

1. Na nízkých kmitočtech lze pro zmenšení roplochy zabírané strukturou realizovat úseky vedení pomocí meandrového vedení.

2. Na vysokých kmitočtech mohou vycházet $\lambda_g/4$ úseky konstrukčně příliš krátké. Lze pak realizovat odbočnici ze tří úseků $3\lambda_g/4$ a jednoho úseku $5\lambda_g/4$.

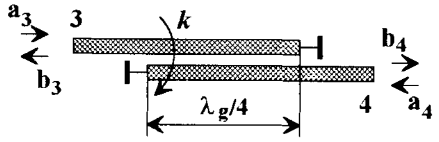
3. Použitelné kmitočtové pásmo lze výrazně zvýšit náhradou $3\lambda_g/4$ dlouhého úseku vedení úsekem vedení délky $\lambda_g/4$ a fázovým invertorem.



Obr. 3.5.2.

Realizace fázového invertoru:

- pomocí **vázaných vedení**



Obr. 3.5.3.

Platí:

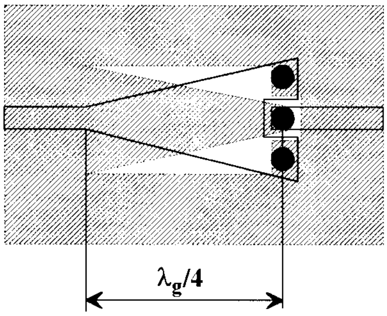
$$\frac{b_4}{a_3} = j.2k\sqrt{1-k^2}$$

$$\frac{b_3}{a_3} = \frac{b_4}{a_4} = 1 - 2k^2 \tag{3.5.11}$$

Fázový posuv úseku vedení mezi bránami odbočnice 3 a 4 je nyní pouze 90°

Pro 3 dB vazbu je $k = \frac{1}{\sqrt{2}}$ a $\frac{b_4}{a_3} = j;\ \frac{b_3}{a_3} = \frac{b_4}{a_4} = 0$

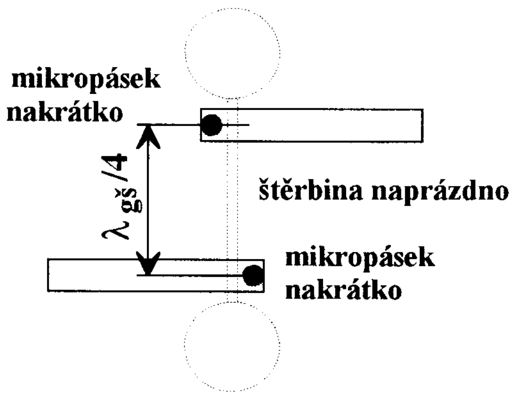
- pomocí **"překřížených" mikropásků**



Obr. 3.5.4.

Překřížení a délka vedení $\lambda_g/4$ umožňují fázový posun 90°.

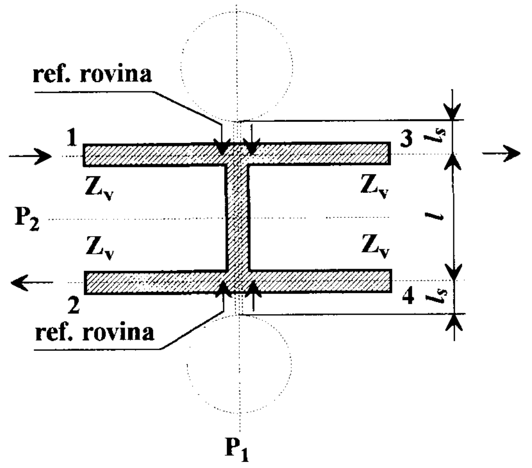
- kombinací mikropáskového a štěrbinového vedení



Obr. 3.5.5.

Dvojnásobný přechod (mikropásek - štěrbina, štěrbina - mikropásek) realizuje otočení fáze, štěrbina dlouhá $\lambda_g/4$ pak potřebný fázový posun.

3.6. Kombinovaný hybridní člen (de Ronde Coupler)



Obr. 3.6.1

Kombinace mikropáskového a štěrbinového vedení. Strukturu navrhl de Ronde [60]. Směrovost 2. druhu.

Princip činnosti

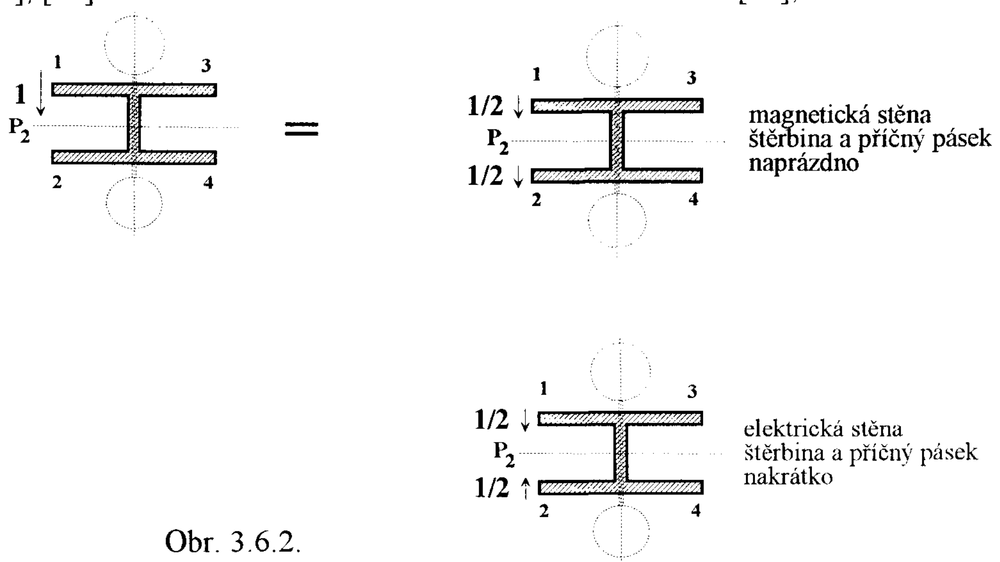
Při buzení do brány 1 vlna prochází do brány 3. Do sousedního vedení 2 - 4 se vlna dostává dvěma cestami.

1. přes příčný mikropásek - vlny v ramenech 2 a 4 se šíří v opačných směrech se stejnou fází
2. přes příčnou štěrbinu - vlny v v ramenech 2 a 4 se šíří s **opačnou** fází (dvojnásobný přechod mikropásek štěrbina vytváří fázový invertor)

V rameni 2 se vlny setkávají ve stejné fázi a sčítají se. V rameni 4 se vlny setkávají v opačné fázi a ruší se. Rameno 4 je tedy od ramene 1 izolováno.

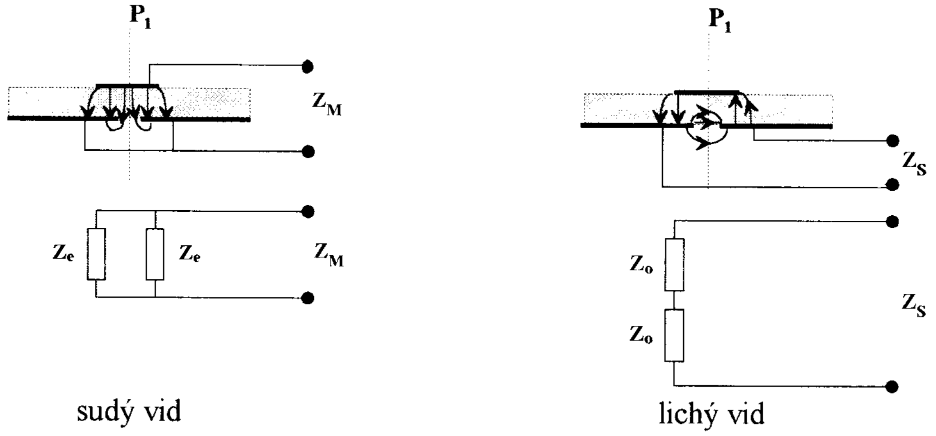
Odvození S-parametrů

Přibližnou analýzu navrhl Schienk, [61], [62]. Nejúplnější analýzu provedl Hoffmann a Siegel, [63], [64]. Použili metodu navrženou Reedem a Wheelerem [55], viz obr. 3.3.2.



Obr. 3.6.2.

Na vazební sekci se mohou šířit 2 vidy.



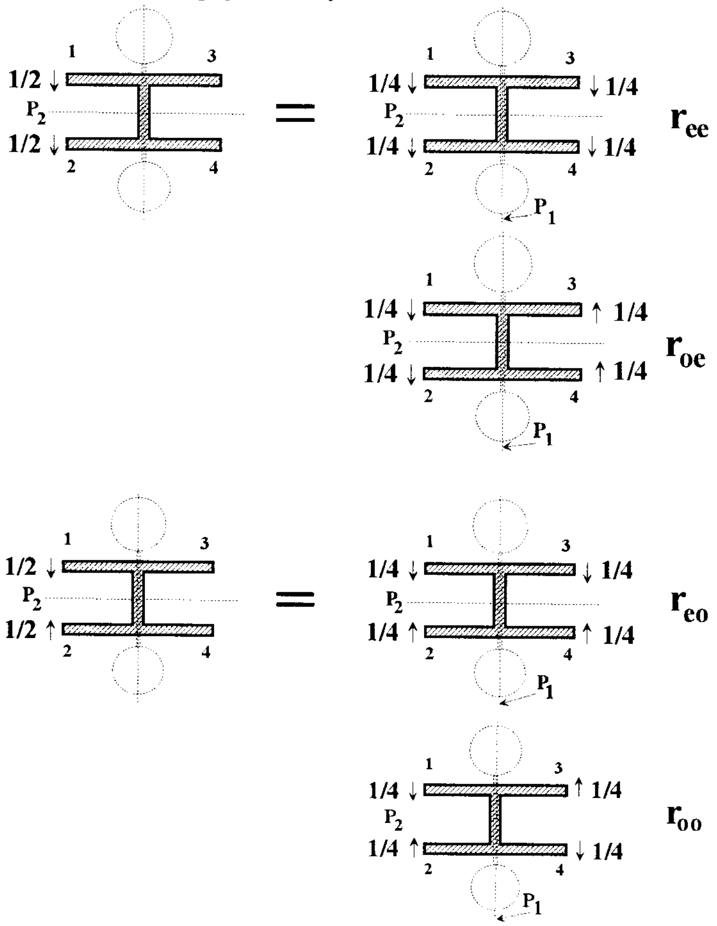
Obr. 3.6.3.

Vlnový odpor: sudého vidu Z_M $\qquad Z_e = 2Z_M$

lichého vidu Z_S $\qquad Z_o = \dfrac{Z_S}{2} \qquad (3.6.1)$

Kde Z_e je vlnový odpor 1/2 vazební sekce při sudém napájení a Z_o je vlnový odpor 1/2 vazební sekce při lichém napájení

Při nesymetrickém buzení vazební sekce (z levé strany) se vybudí oba vidy. Výsledné pole na vazební sekci lze chápat opět jako superpozici 2 dílčích polí vzniklých soufázovým a protifázovým napájením čtyř bran vzhledem k rovině P1 s amplitudou 1/4.



Obr. 3.6.4.

Pro výsledné S-parametry v referenčních rovinách vyznačených na obr. 3.6.1. šipkami pak platí vzhledem k superpozici 4 dílčích polí:

$$S_{11} = (r_{ee} + r_{eo} + r_{oe} + r_{oo})/4 \qquad (3.6.2)$$

$$S_{21} = (r_{ee} - r_{eo} + r_{oe} - r_{oo})/4 \qquad (3.6.3)$$

$$S_{31} = (r_{ee} + r_{eo} - r_{oe} - r_{oo})/4 \qquad (3.6.4)$$

$$S_{41} = (r_{ee} - r_{eo} - r_{oe} + r_{oo})/4 \qquad (3.6.5)$$

Parametry r_{ee}, r_{eo}, r_{oe}, r_{oo} představují vstupní koeficienty odrazu vedení dlouhých $l/2$ odpovídajících 1/2 šířky vazební sekce a vztažených k vlnovému odporu Z_v.

Například.

r_{ee} - koeficient odrazu 1/2 vazební sekce při sudém vybuzení podle roviny P1. Vazební sekce je zakončená otevřeným koncem v 1/2 délky l (to odpovídá sudému vybuzení podle roviny P2).

r_{oe} - koeficient odrazu 1/2 vazební sekce při lichém vybuzení podle roviny P1. Vazební sekce je zakončená otevřeným koncem v 1/2 délky (to odpovídá sudému vybuzení podle roviny P2).

Určení r_{ij}.

Vstupní impedance vedení zakončeného:

nakrátko - $Z_k = jZx.\mathrm{tg}\alpha l_x$ (3.6.6)

naprázdno - $Z_k = -jZ_x.\,\mathrm{cotg}\alpha l_x$ (3.6.7)

odpovídající koeficient odrazu - $\rho = \dfrac{Z - Z_v}{Z + Z_v}$ (3.6.8)

Nechť $\alpha l_x \sim \dfrac{\vartheta_e}{2} = \dfrac{2\pi}{\lambda_{ge}} \cdot \dfrac{l}{2}$, resp. $\alpha l_x \sim \dfrac{\vartheta_o}{2} = \dfrac{2\pi}{\lambda_{go}} \cdot \dfrac{l}{2}$, (3.6.9)

potom:

$$r_{ee} = \frac{-j2Z_M.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right) - Z_v}{-j.2Z_M.\mathrm{cotg}(\vartheta_{e2}) + Z_v} = |1|.\frac{\exp\left[j.\mathrm{arctg}\left(\frac{-Z_v}{2Z_M.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right)}\right)\right]}{\exp\left[j.\mathrm{arctg}\left(\frac{+Z_v}{2Z_M.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right)}\right)\right]} = e^{-j.2\mathrm{arctg}\left[\frac{Z_v}{2Z_M.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right)}\right]} \qquad (3.6.10)$$

Obdobně

$$r_{eo} = \frac{j2Z_M.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right) - Z_v}{j2Z_M.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right) + Z_v} = e^{+j.2\mathrm{arctg}\left[\frac{Z_v}{2Z_M.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right)}\right]} \qquad (3.6.11)$$

$$r_{oe} = \frac{-j\frac{Z_S}{2}.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) - Z_v}{-j\frac{Z_S}{2}.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) + Z_v} = e^{-j.2\mathrm{arctg}\left[\frac{2Z_V}{Z_S.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_O}{2}\right)}\right]} \tag{3.6.12}$$

$$r_{oo} = \frac{j\frac{Z_S}{2}.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) - Z_v}{j\frac{Z_S}{2}.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) + Z_v} = e^{j.2\mathrm{arctg}\left[\frac{2Z_V}{Z_S.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_O}{2}\right)}\right]} \tag{3.6.12}$$

U směrového vazebního členu by mělo být $S_{11} = 0$ a $S_{41} = 0$. Při uplatnění těchto podmínek v (3.6.2) a (3.6.5) lze získat:

$$\begin{aligned} r_{ee} &= -r_{oo} \\ r_{eo} &= -r_{oe} \end{aligned} \tag{3.6.13}$$

To po dosazení za r_{ee}, r_{eo}, r_{oe}, r_{oo} (3.5.10) až (3.5.12) poskytne rovnici:

$$\frac{-j2Z_M\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right) - Z_v}{-j2Z_M.\mathrm{cotg}\left(\frac{\vartheta_e}{2}\right) + Z_v} = -\frac{j.\frac{1}{2}.Z_S.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) - Z_v}{j.\frac{1}{2}.Z_S.\mathrm{tg}\left(\frac{\vartheta_o}{2}\right) + Z_v}, \tag{3.6.14}$$

která má řešení:

$$\vartheta_e = \vartheta_o \Rightarrow v_{fe} = v_{fo} \tag{3.6.15}$$

a současně

$$Z_v = \sqrt{Z_M.Z_S} \tag{3.6.16}$$

Vztah (3.6.16) lze splnit u reálné odbočnice, podmínce (3.6.15) se lze u reálné odbočnice pouze přiblížit.

Ideální směrová odbočnice

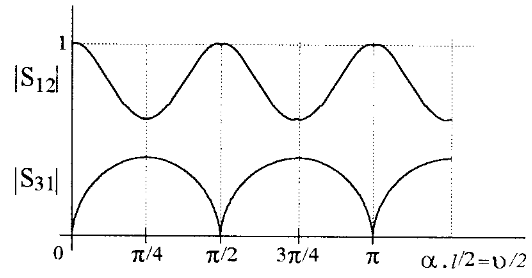
V ideálním případě za předpokladu $\vartheta_e = \vartheta_o = \vartheta$ by platilo:

$$S_{21} = \frac{\sqrt{1-k^2}}{\sqrt{1-k^2}\cos\vartheta + j\sin\vartheta} \tag{3.6.17}$$

$$S_{31} = \frac{jk\sin\vartheta}{\sqrt{1-k^2}\cos\vartheta + j\sin\vartheta} \tag{3.6.18}$$

kde

$$k = \frac{Z_e - Z_o}{Z_e + Z_o} = \frac{4Z_M - Z_S}{4Z_M + Z_S} \tag{3.6.19}$$



Obr. 3.6.5. Závislost S-parametrů odbočnice na délce vazebního úseku.

Nejmenší kmitočtová závislost S_{12} a S_{21}

$$\alpha.\frac{l}{2}=\frac{\pi}{4} \Rightarrow l=\frac{\lambda_g}{4} \tag{3.6.20}$$

Na střední frekvenci:

$$S_{21}=-j.\sqrt{1-k^2} \tag{3.6.21}$$

$$S_{31}=k \tag{3.6.22}$$

Příklad 3 dB odbočnice:

$$20.\log\frac{1}{|S_{21}|}=3\text{dB} \Rightarrow |S_{21}|=0,707$$

$$20\log\frac{1}{|S_{31}|}=3\text{ dB} \Rightarrow |S_{31}|=0,707=k \tag{3.6.23}$$

Pro $Z_V=50\Omega$, při platnosti (3.6.16) a (3.6.19)

$$Z_M=60,35\Omega$$

$$Z_S=41,40\Omega \tag{3.6.24}$$

Konstrukční úpravy

Jak se přiblížit podmínce (3.6.15), tj. $v_{fe}=v_{fo}$?

- na konci štěrbiny se připojují kapacity realizované úsekem štěrbinového vedení délky l_S, viz obr.3.6.1.

- ze spodní strany např vodivým diskem zvýšena kapacita napříč štěrbiny