



Radioelektronická měření (MREM)

# Vektorové obvodové analyzátořy

9. přednáška

Jiří Dřínovský

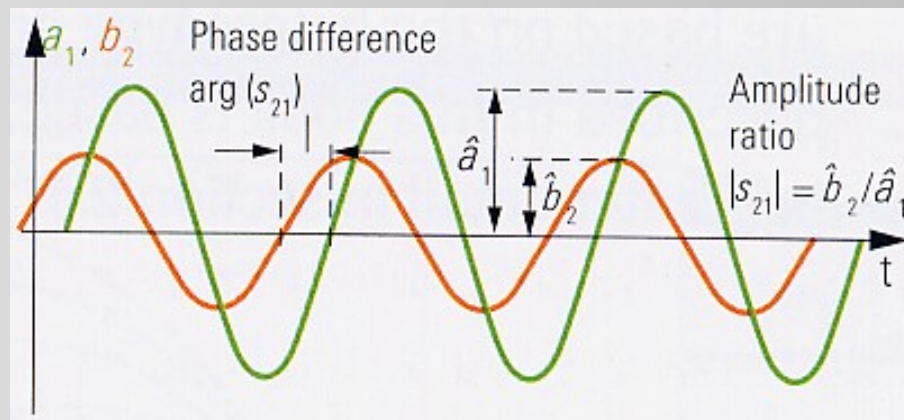
Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně

Jedním z nejběžnějších inženýrských problémů je měření parametrů obvodů v oblasti vysokých kmitočtů. Vektorový obvodový analyzátor je měřicí přístroj navržený pro přesné měření parametrů obvodů v oblasti vysokých kmitočtů. Rozsah použití vektorového obvodového analyzátoru je velmi široký a zahrnuje např. měření filtrů, zesilovačů, násobičů kmitočtu, komunikačních satelitů apod.

Z obecného pohledu je vektorový obvodový analyzátor všestranně použitelný univerzální měřicí přístroj v oblasti vysokých kmitočtů.

# Činitel odrazu a S-parametry

Pomocí činitele odrazu jsou v oblasti vysokých frekvencí nejčastěji charakterizovány VF obvody. Rozlišuje se mezi dopadající  $a$  a odraženou vlnou  $b$ . Dopadající vlna se šíří od obvodového analyzátoru k testovanému zařízení. Naopak odražená vlna se šíří opačným směrem od testovaného zařízení zpět k obvodovému analyzátoru.

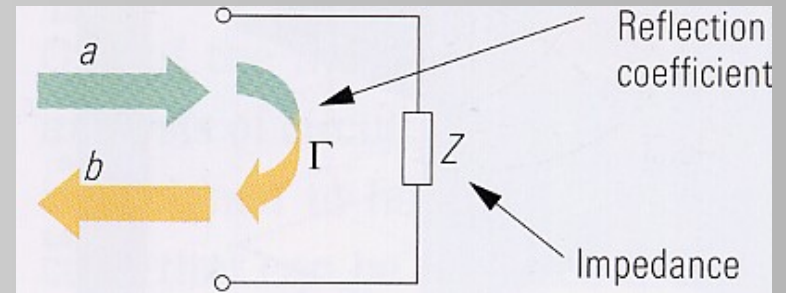


# Činitel odrazu a S-parametry

Činitel odrazu  $\Gamma$  je definován jako poměr odražené a dopadající vlny

$$\Gamma = \frac{b}{a}$$

Obecně je činitel odrazu komplexní hodnotou a může z něho být vypočtena komplexní impedance  $Z$ . Pomocí charakteristické impedance prostředí  $Z_0=50 \Omega$  může být vyjádřena normovaná impedance  $z = Z/Z_0$ .



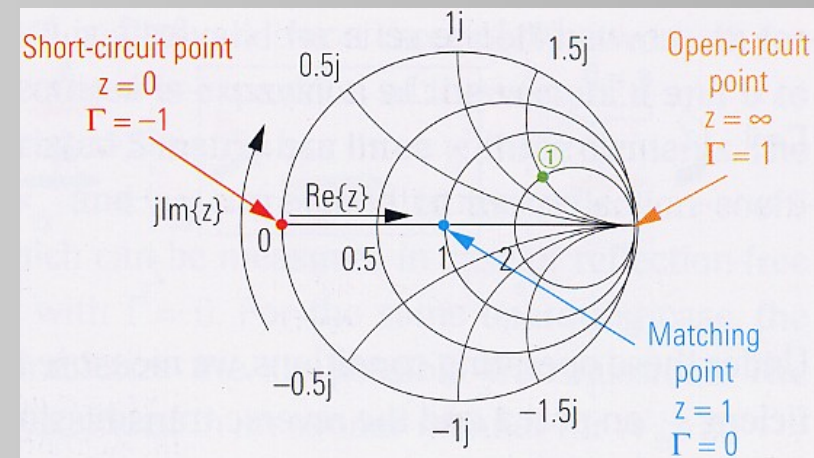
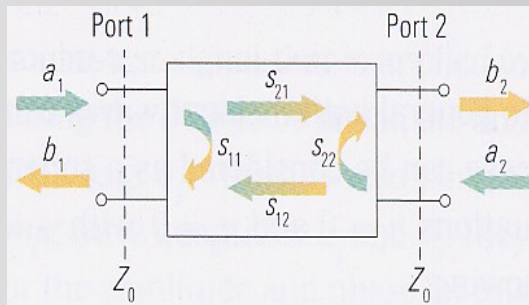
# Činitel odrazu a S-parametry

Pomocí této normované impedance lze také vyjádřit činitel odrazu:

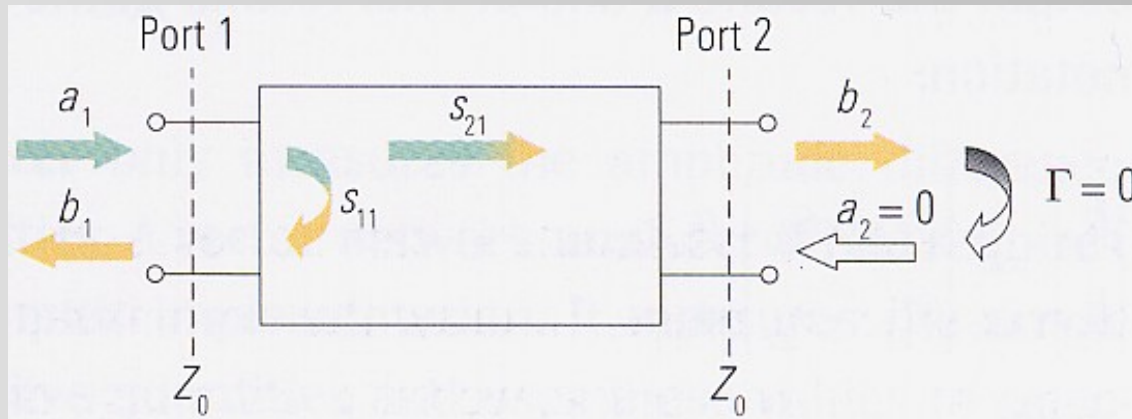
$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1}.$$

Činitel odrazu  $\Gamma$  může být zobrazen v komplexní rovině nebo např. v tzv. Smitově diagramu (Smith chart). Na obr. je např. zobrazena hodnota  $z = 2 + 1,5j$  jako bod 1. Dále jsou zde zobrazeny hodnoty odpovídající zkratu, nekonečné impedanci a charakteristické impedanci.

V dvojbranovém systému je možné vedle odrazů na obou branách měřit i přenos v přímém a opačném směru (obr. vlevo).



# Činitel odrazu a S-parametry



Pokud porovnáme činitele odrazu s rozptylovými S parametry  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{21}$  a  $s_{22}$ , které jsou definovány jako poměry příslušných vln při impedančně přizpůsobené bráně, která není použita při měření ( $\Gamma=0$ , brána 2  $\rightarrow a_2=0$ ). Při respektování této podmínky pak bude platit pro vstupní bránu následující

$$s_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} ; \quad s_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} .$$

# Činitel odrazu a S-parametry

V obecném případě nemusí být obě dvě dopadající vlny nulové ( $a_1 \neq 0$ ,  $a_2 \neq 0$ ). Tento fakt může být analyzován jako superpozice dvou měření jednoho s  $a_1=0$ ,  $a_2 \neq 0$  a druhého  $a_1 \neq 0$ ,  $a_2=0$ . Pomocí tohoto předpokladu můžeme definovat dvě následující rovnice:

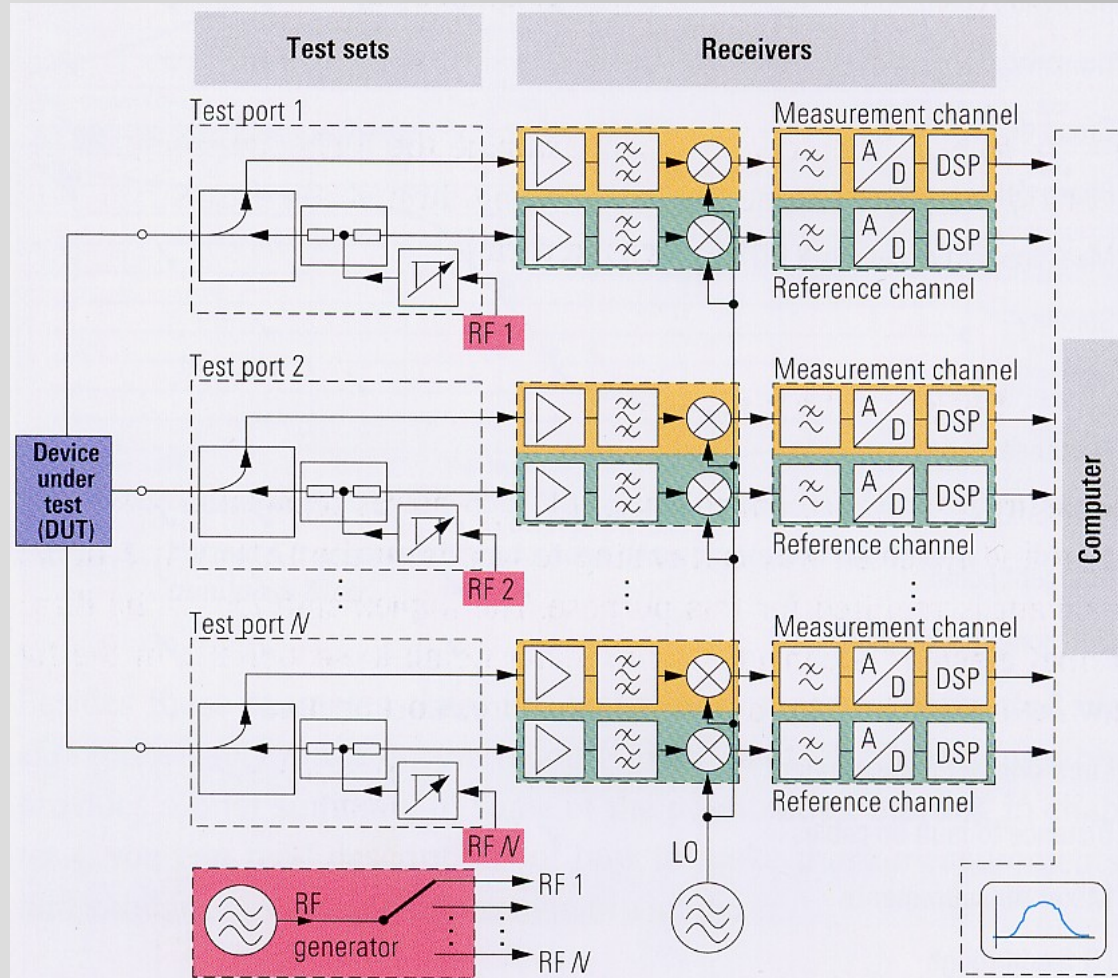
$$b_1 = s_{11} a_1 + s_{12} a_2,$$

$$b_2 = s_{21} a_1 + s_{22} a_2.$$

Pokud jednotlivé rozptylové parametry zahrneme do jedné sady dostaneme matici rozptylových parametrů, které jsou často označovány jako S parametry. S narůstajícím počtem bran roste i počet rozptylových parametrů.

# Vektorový obvodový analyzátor

## N-branový vektorový obvodový analyzátor



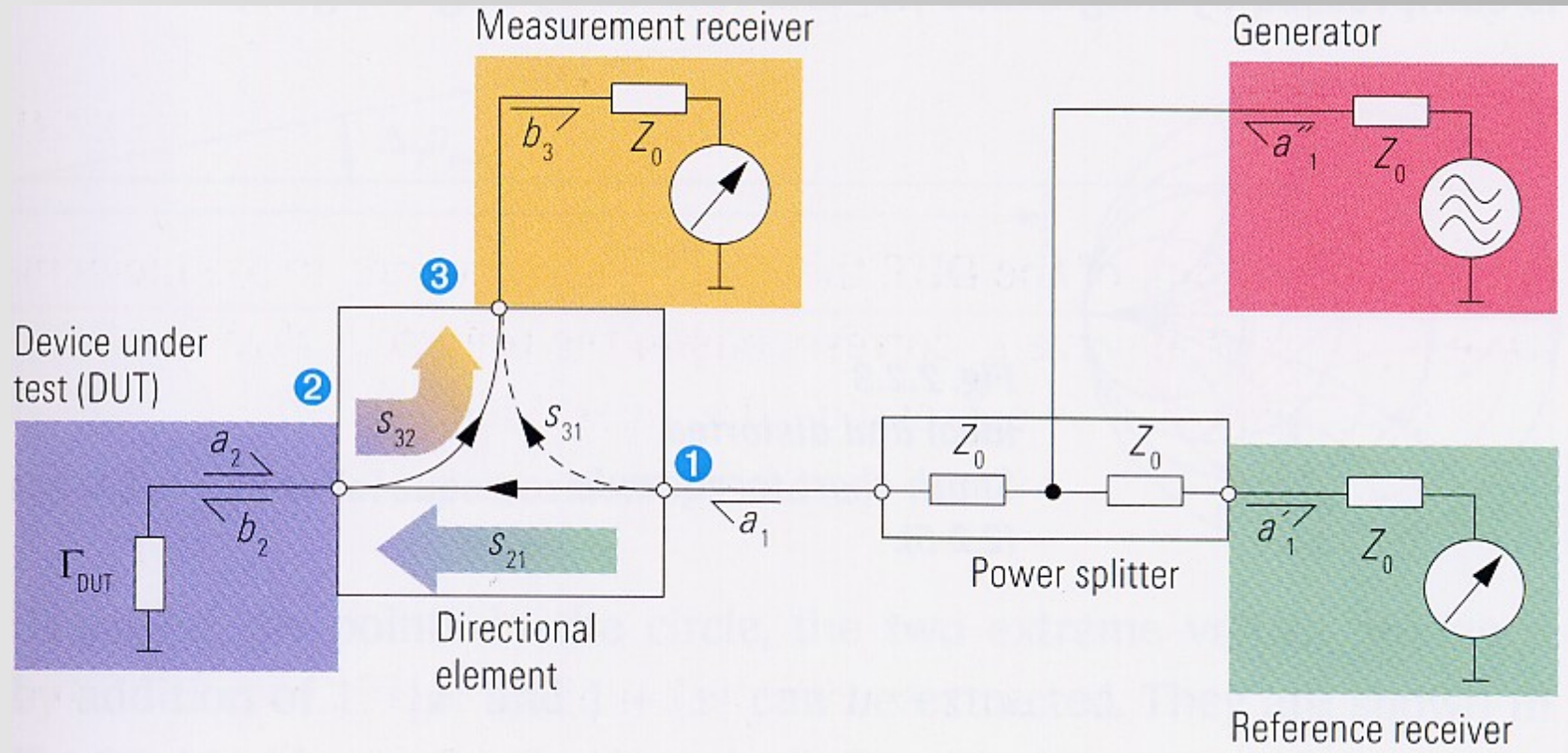


# Vektorový obvodový analyzátor

Vektorový obvodový analyzátor má 4 hlavní části:

- blok, který odděluje přímou a odraženou vlnu (směrová odbočnice) a zároveň rozděljuje přímou vlnu na dvě vlny, z nichž jedna je přijímána referenčním přijímačem a druhá je přivedena přes směrovou odbočnici k testovanému zařízení;
- generátor, který generuje signál (dopadající vlnění), na kterém chceme měřit. Obvykle je tento signál přepínán mezi jednotlivými branami (*test port*) vektorového obvodového analyzátoru (právě vybraná brána bývá označována jako aktivní (*active test port*));
- blok obsahující dva přijímače (pro každou bránu). Jeden z přijímačů měří vlastnosti dopadající vlny (referenční) a druhý měří vlnu odraženou. Zároveň je však nutné měřit i fázový posuv mezi těmito dvěma vlnami. Součástí každého přijímače je i převodník z analogového signálu na digitální;
- poslední částí je obvykle počítač, který se používá pro zpracování naměřených hodnot, korekci chyb a zobrazení naměřených výsledků.

# Vektorový obvodový analyzátor



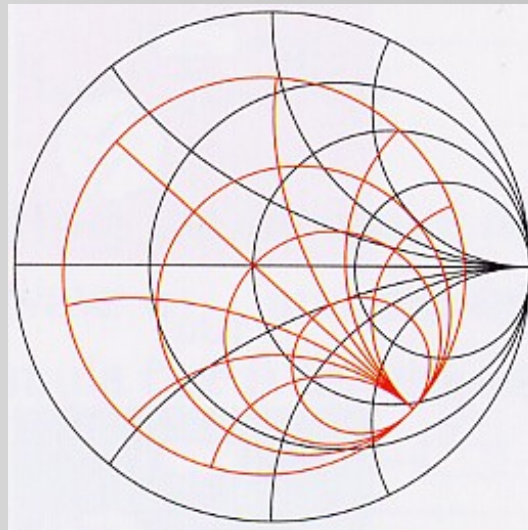
$$M = \frac{b_3}{a'_1}$$

# Vektorový obvodový analyzátor

Přenos vlastního signálu z generátoru přes směrovou odbočnici je ovlivněn parametrem  $s_{21}$  (představuje přenos směrové odbočnice mezi branami 1 a 2) a parametrem  $s_{32}$  jež má obdobný význam jako parametr  $s_{21}$ . Odražená vlna je tedy ovlivněna vlastnostmi směrové odbočnice, tento vliv je označován (*reflection tracking R*):

$$R = s_{21} s_{32}$$

Měřená hodnota  $M$  je pak dána vztahem  $M = R \Gamma_{\text{DUT}}$ .



# Vektorový obvodový analyzátor

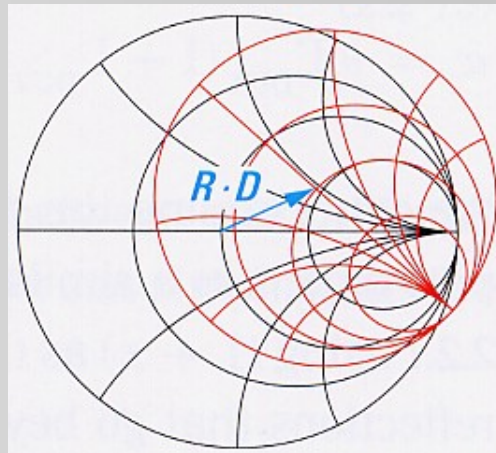
Další parametr směrové odbočnice, který zkresluje výsledky měření je její směrovost (*directivity D*), která vlastně reprezentuje nežádoucí přeslech z portu č. 1 do portu č. 3:

$$D = \frac{S_{31}}{R}.$$

Tento fakt se projeví na změřené hodnotě  $M$  následujícím způsobem:

$$M = R (\Gamma_{\text{DUT}} + D).$$

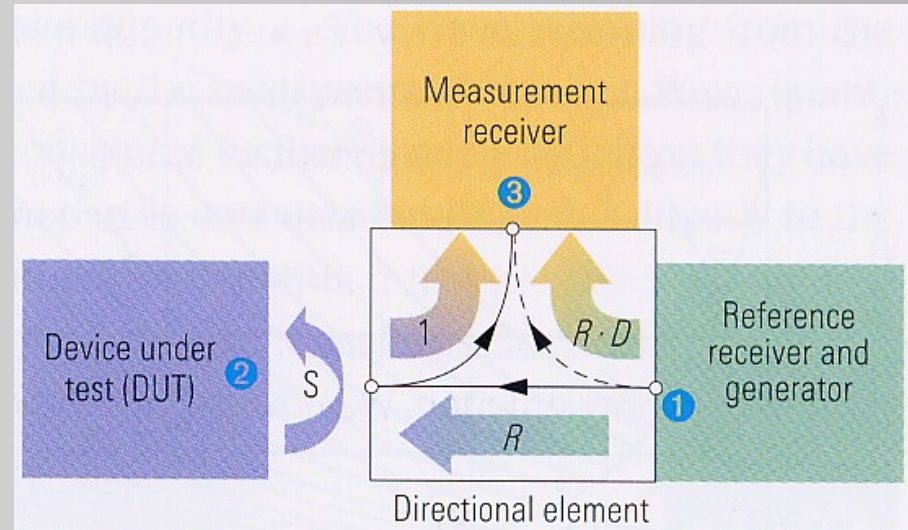
To se následně projeví na posunutí Smitova diagramu.



# Vektorový obvodový analyzátor

Přizpůsobení měřicího portu:

$$M = R \left( D + \frac{\Gamma_{\text{DUT}}}{1 - S\Gamma_{\text{DUT}}} \right).$$

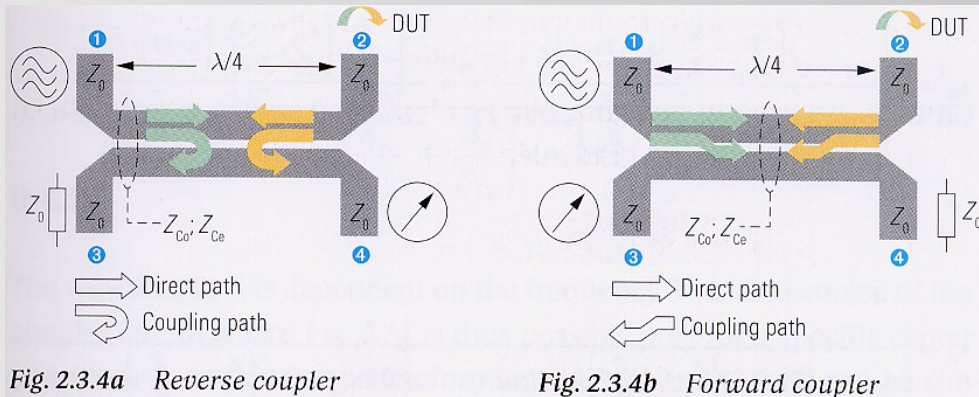


Faktory ovlivňující měření na vektorových obvodových analyzátoch:

- útlum měřeného signálu průchodem směrovou odbočnicí;
- směrovost použité směrové odbočnice;
- přizpůsobení měřicího portu;
- ... .

# Vektorový obvodový analyzátor

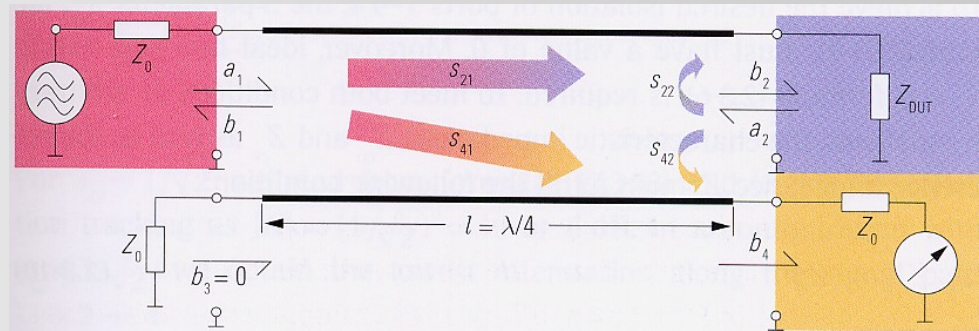
Směrové odbočnice (cca 1 ÷ 20 GHz):



**Fig. 2.3.7a** Graduated directional coupler

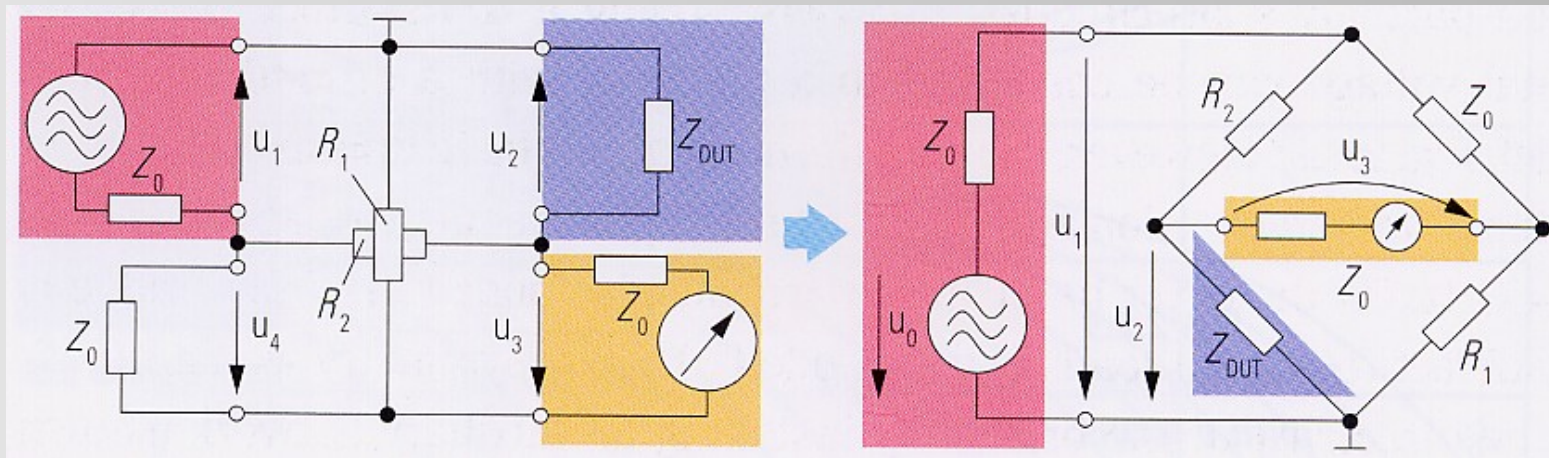


**Fig. 2.3.7b** Directional coupler with sliding, position-dependent coupling



# Vektorový obvodový analyzátor

Odporové můstky (*VSWR bridge*) (cca 40 kHz ÷ 4 GHz):



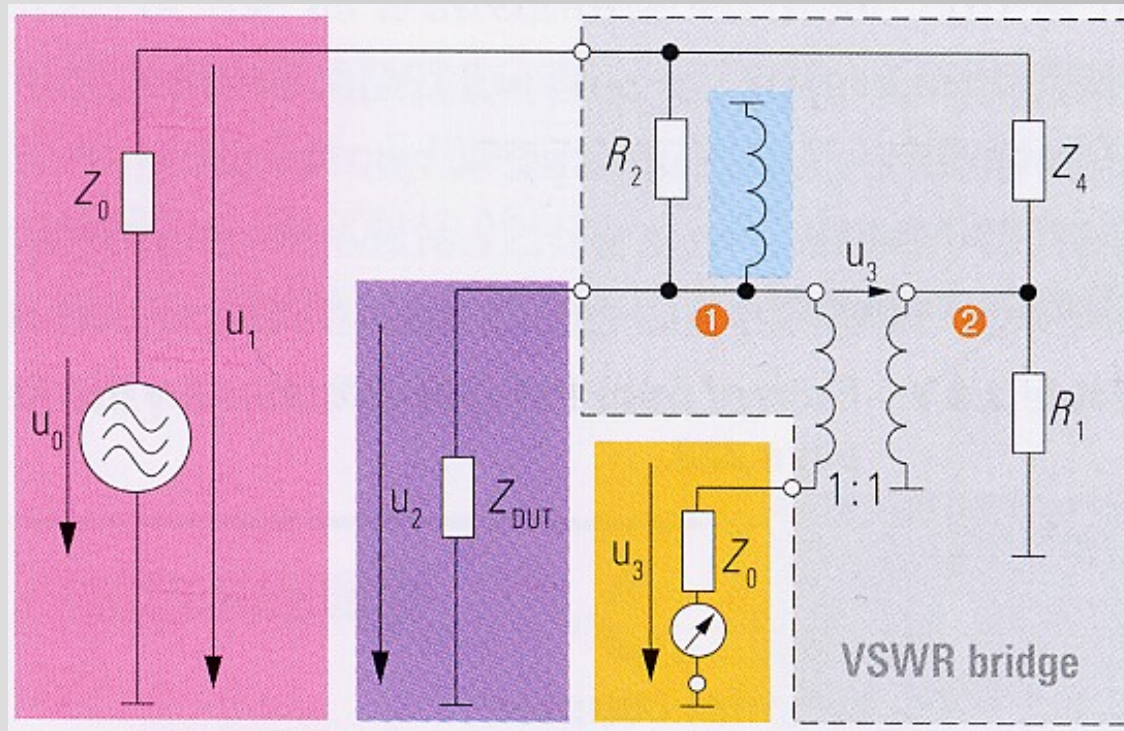
$$s_{22} = \frac{R_1 R_2 - Z_0^2}{2(R_1 + Z_0)(R_2 + Z_0)} \quad \text{po dosazení za } s_{22}=0 \text{ dostaneme } R_1 R_2 = Z_0^2.$$

po uplatnění této podmínky získáme

$$s_{21} = \frac{Z_0}{Z_0 + R_2} \quad s_{32} = \frac{R_2}{Z_0 + R_2} \quad s_{31} = 0.$$

# Vektorový obvodový analyzátor

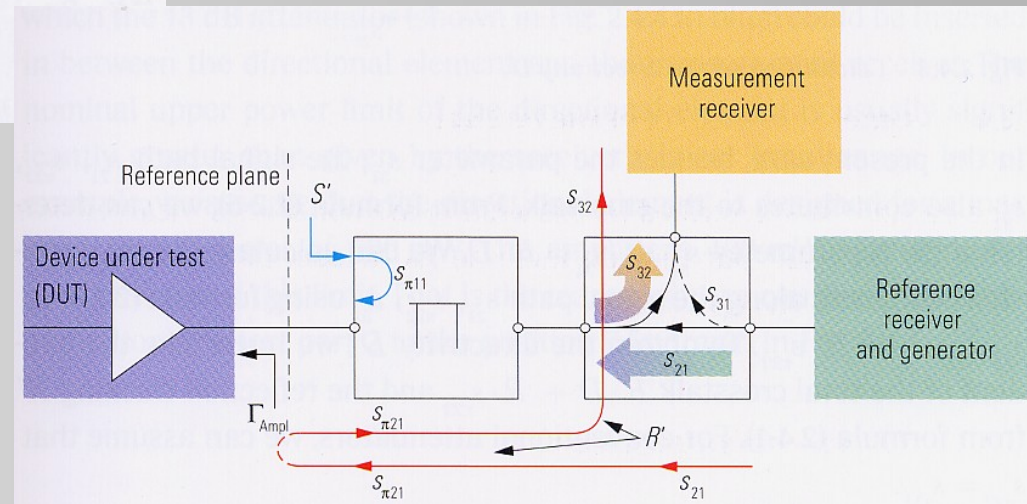
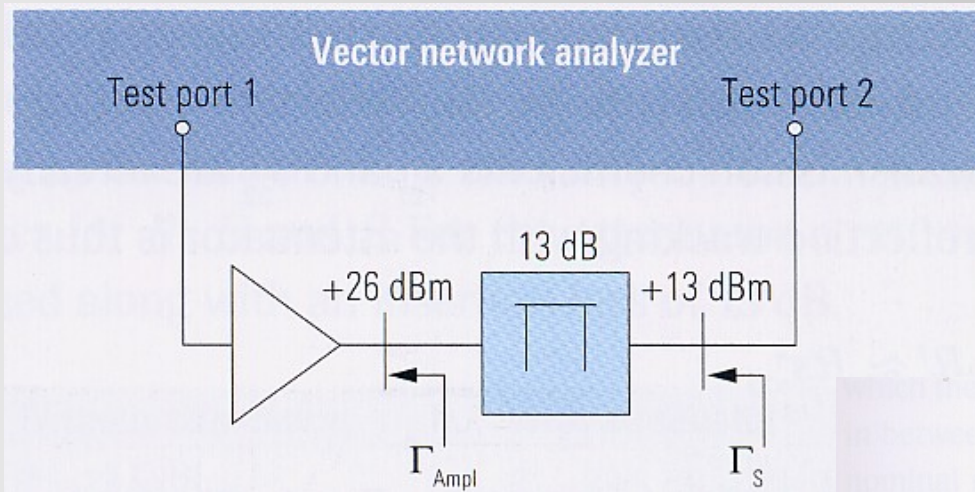
Odporové můstky (*VSWR bridge*) (cca 40 kHz ÷ 4 GHz):





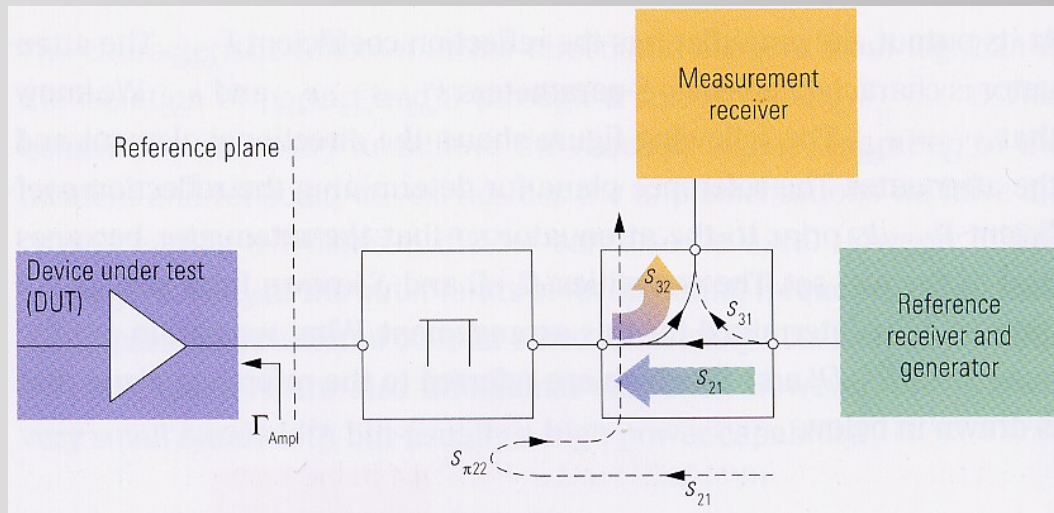
# Vektorový obvodový analyzátor

Zapojení atenuátoru:

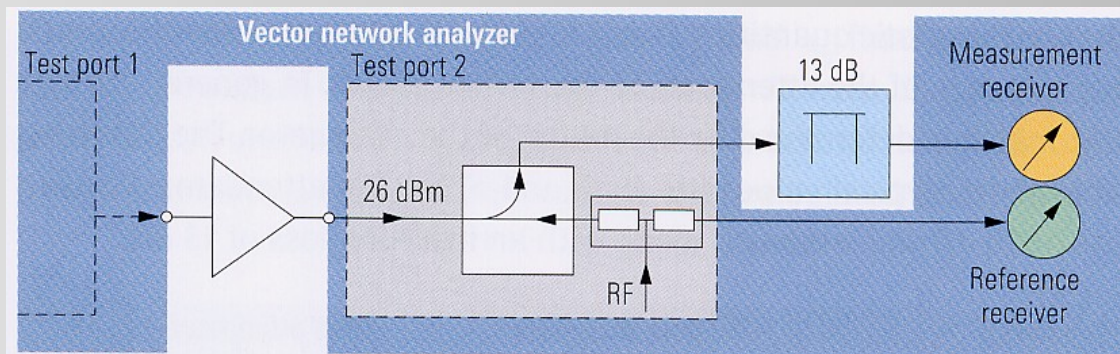


$$R' \approx R S_{\Pi 21}^2$$

# Vektorový obvodový analyzátor

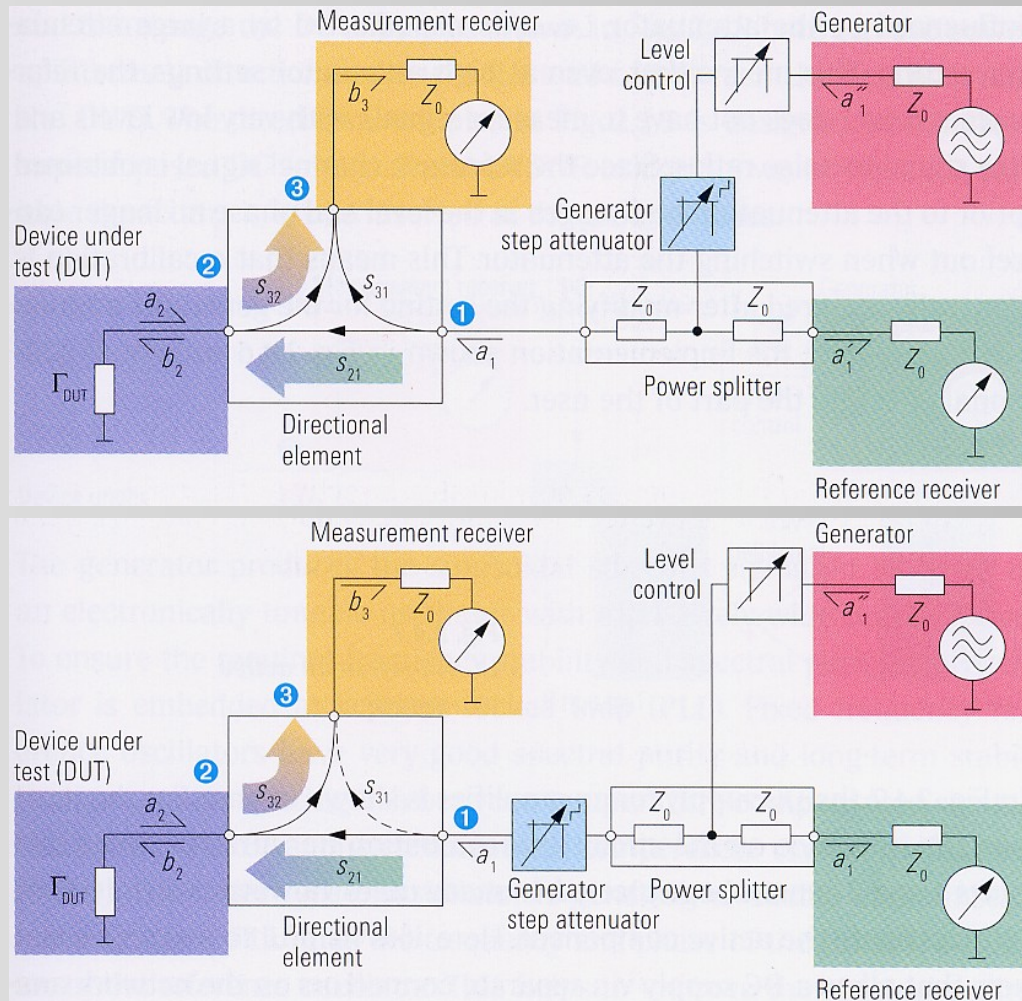


$$D' = \frac{RD + R S_{\Pi 11}}{R S_{\Pi 21}^2} = \frac{D + S_{\Pi 11}}{S_{\Pi 21}^2}$$



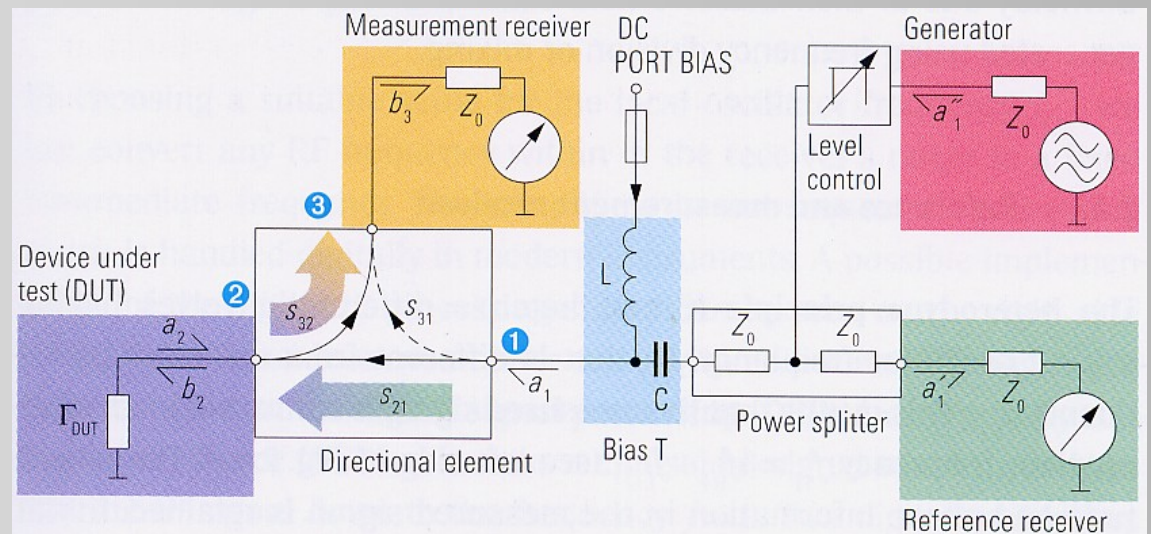
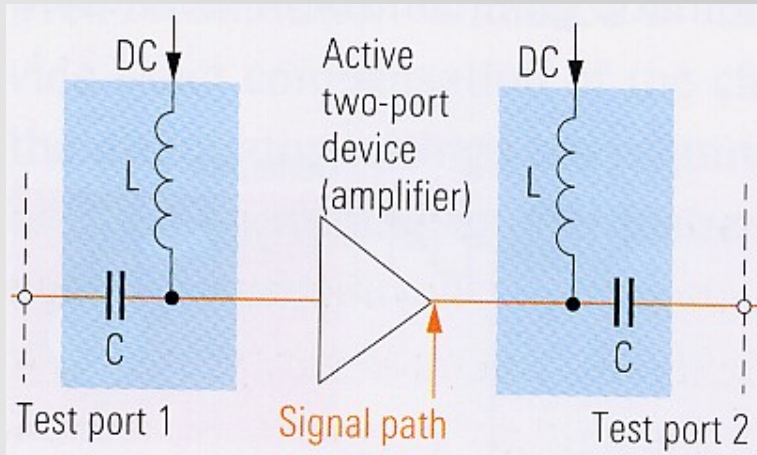
# Vektorový obvodový analyzátor

Atenuátoru pro změnu výkonu generátoru:



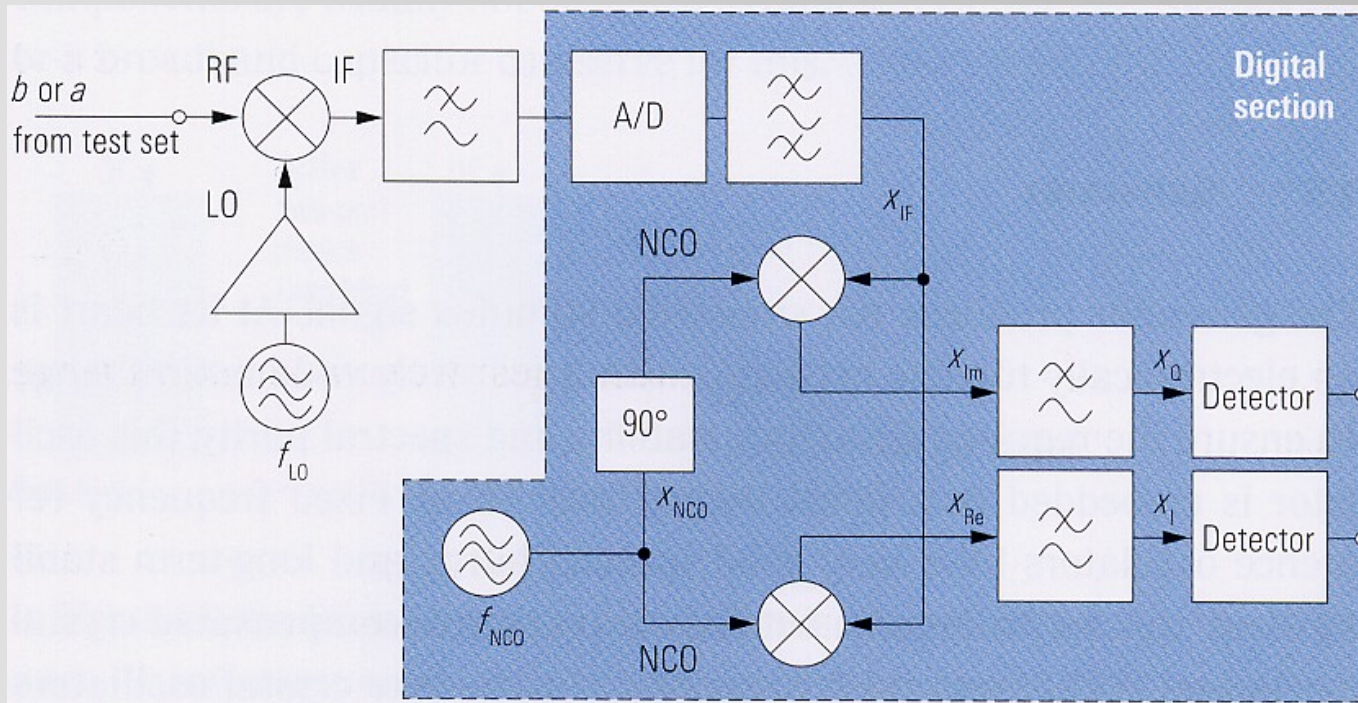
# Vektorový obvodový analyzátor

Připojení stejnosměrného napájecího signálu:



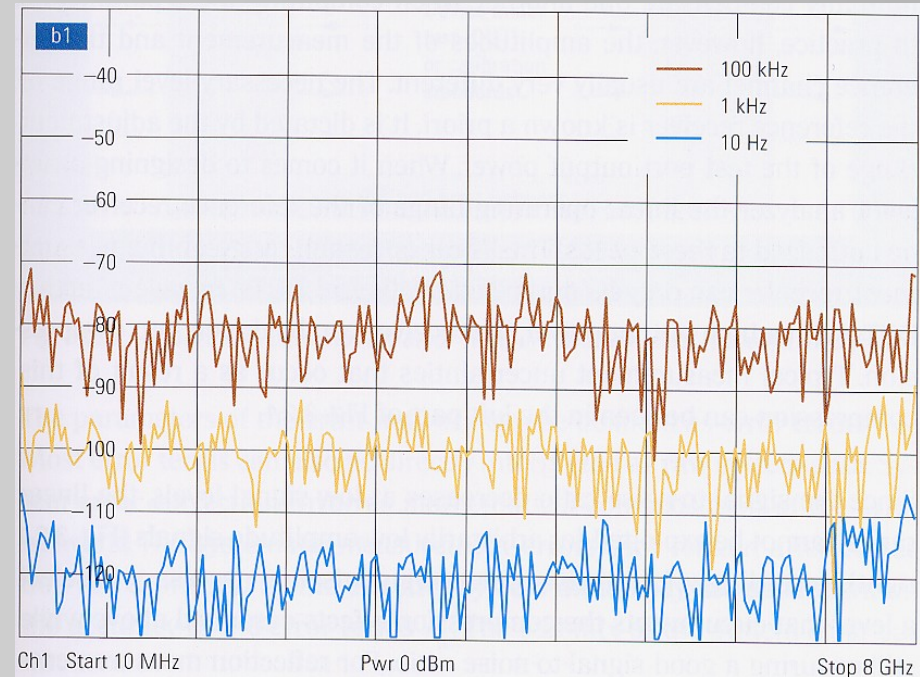
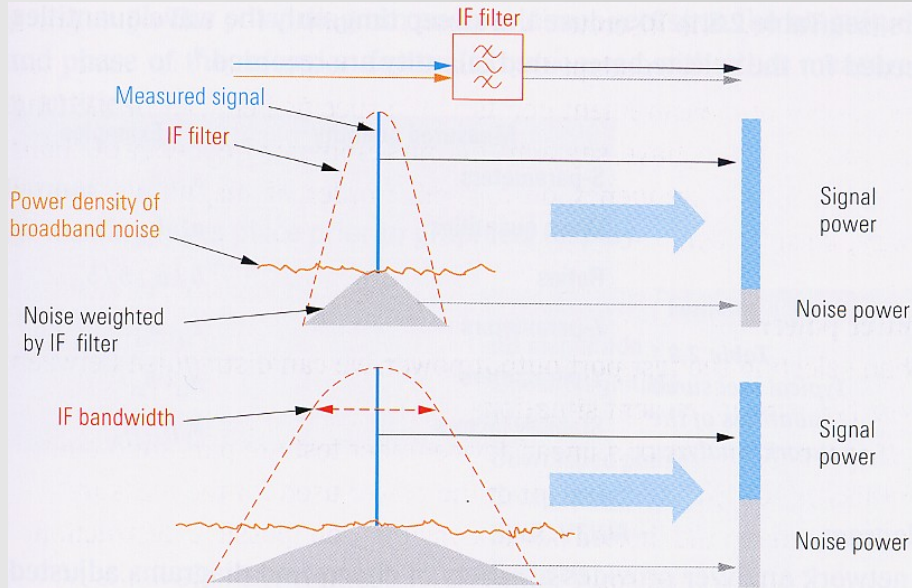
# Vektorový obvodový analyzátor

Přijímač měřených signálů:



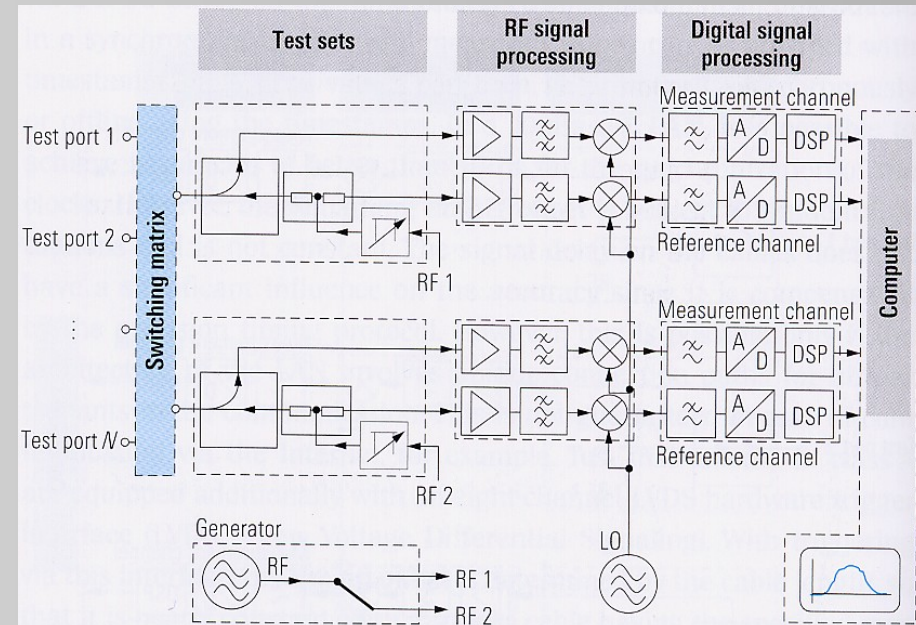
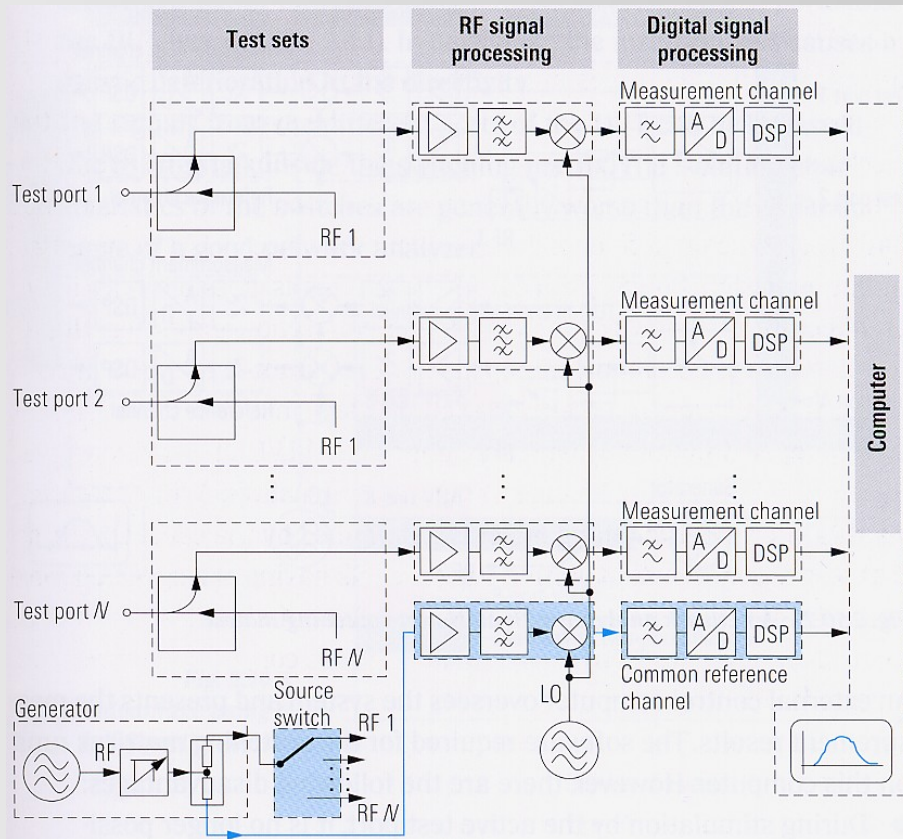
# Vektorový obvodový analyzátor

Vliv šířky pásma mezifrekvenčního filtru:



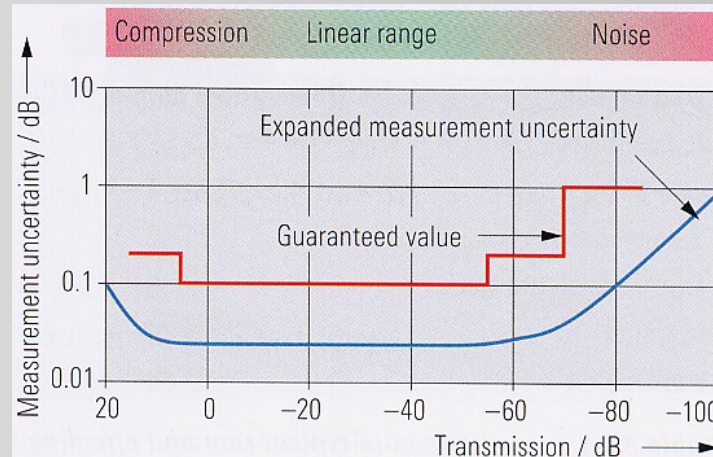
# Vektorový obvodový analyzátor

N+1 portový vektorový obvodový analyzátor:

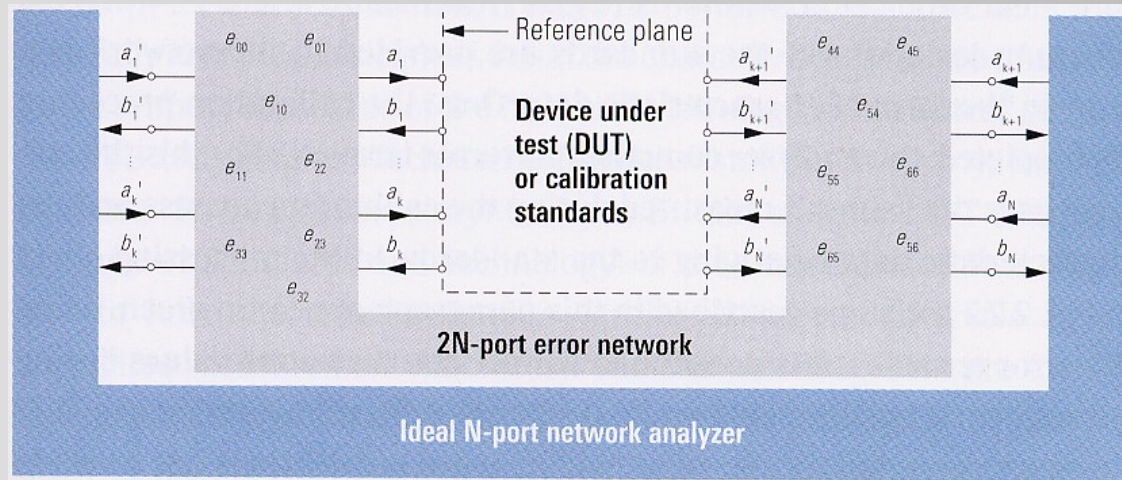


# Vektorový obvodový analyzátor

Nelineární vlivy



lineární vlivy

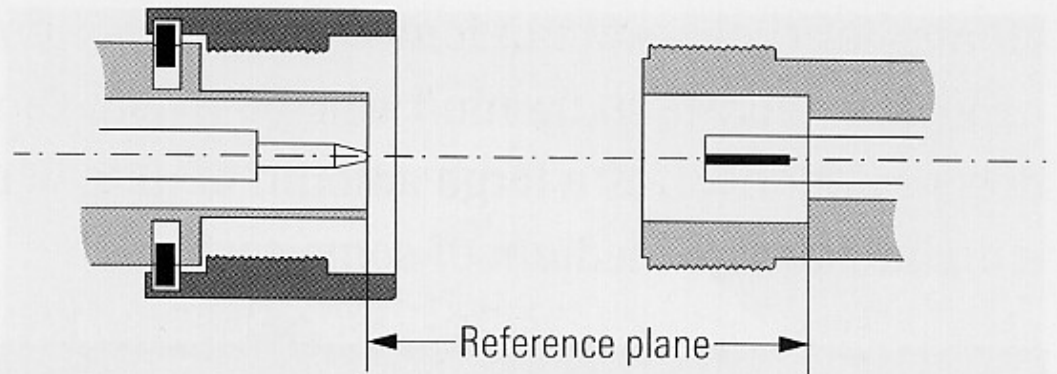




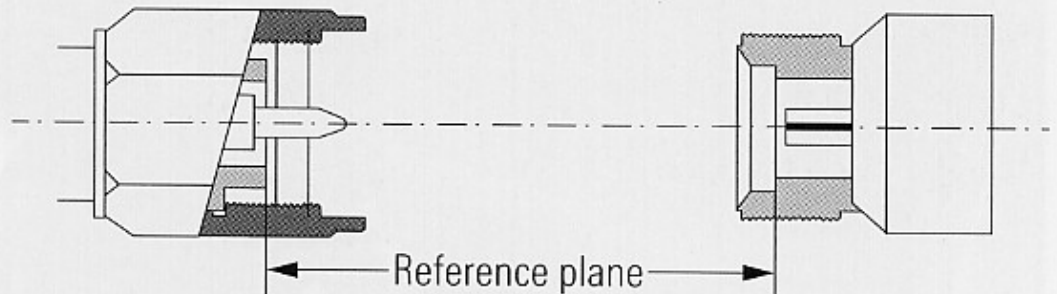
# Vektorový obvodový analyzátor

## Referenční rovina kalibrace

**Fig. 3.2.3**  
*Location of the reference plane in the N-type connector.*

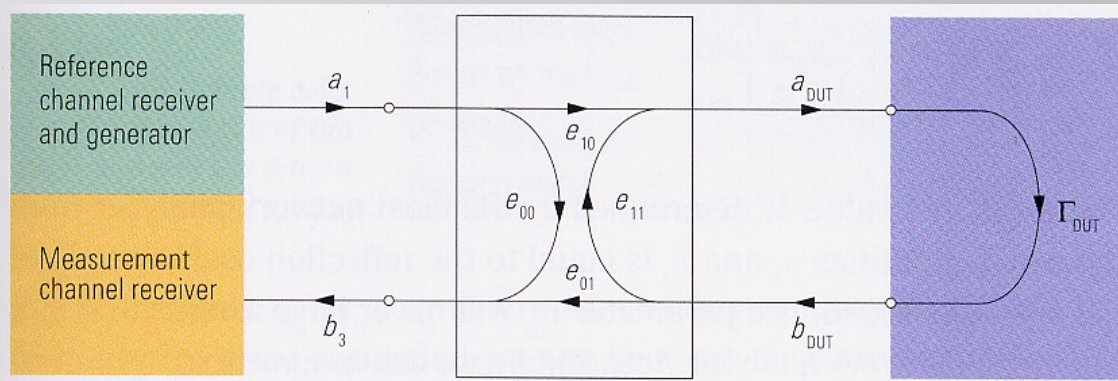


**Fig. 3.2.4**  
*Location of the reference plane in the connector types PC3.5, 2.4 mm and 1.85 mm.*



# Vektorový obvodový analyzátor

Tříbodová kalibrace: na zkrat, otevřený konec a přizpůsobenou zátěž  
(*OSM – open, short, match*)



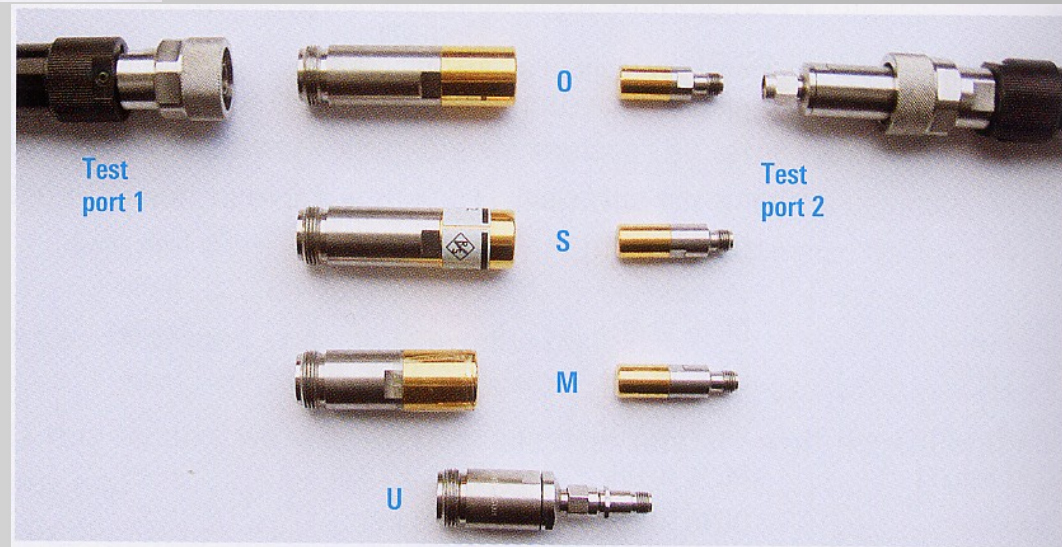
$$M = \frac{b_3}{a_1} = e_{00} + \frac{e_{01}e_{10}\Gamma_{DUT}}{1 - e_{11}\Gamma_{DUT}} \quad \text{zavedeme předpoklad, že } e_{01}=1 \text{ a jeho vliv zahrneme do } e_{10}$$

$$M_O = e_{00} + \frac{e_{10}\Gamma_O}{1 - e_{11}\Gamma_O}$$

$$M_S = e_{00} + \frac{e_{10}\Gamma_S}{1 - e_{11}\Gamma_S}$$

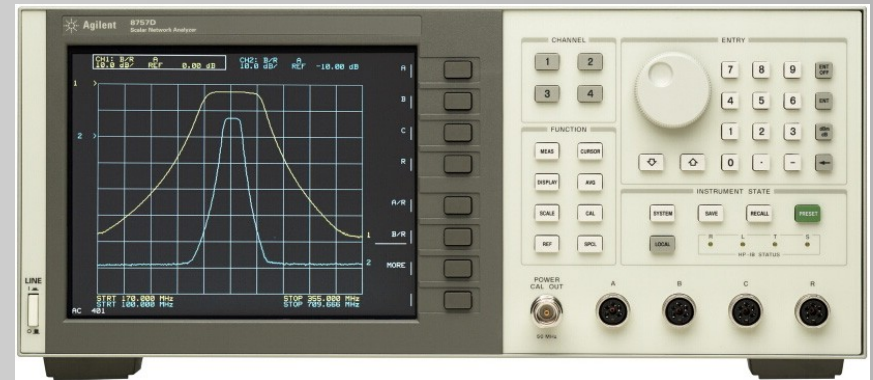
$$M_M = e_{00}$$

# Vektorový obvodový analyzátor



# Skalární obvodový analyzátor

Jedná se o levnější náhradu vektorového obvodového analyzátoru. Omezení použití je dáno nemožností měřit fázový posuv mezi dopadající a odraženou vlnou. Přístroj neobsahuje měřicí ani referenční přijímač. Přijímané signály jsou detekovány detekčními diodami. Z nízkofrekvenční odezvy měření na těchto diodových detektorech jsou následně kalkulována měřená data. Tyto přístroje jsou mnohem levnější než vektorové obvodové analyzátoři, ale mají také menší dynamický rozsah měření. Tyto analyzátoři se většinou kalibrují na zkrat a otevřený konec vedení.



# Literatura

- [1] HAASZ, V., ROZTOČIL, J., NOVÁK, J., *Číslicové měřicí systémy*. ČVUT, Praha 2000, ISBN 80-01-02219-6.
- [2] HAASZ, V. SEDLÁČEK, M., *Elektrická měření, Přístroje a metody*. ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-02731-7.
- [3] HIEBEL, M., *Fundamentals of Vector Network Analysis*. Rohde&Schwarz, Mnichov 2007, ISBN 978-3-939837-06-0.

## Úkol za extra 1 bod navíc (100+1):

Nalezněte pro měření činitele odrazu vhodný vektorový obvodový analyzátor s možností měření nad 45 GHz (Vámi navržený měřicí přístroj musí obsahovat komunikační port podporující protokol SCPI).

Své odpovědi zašlete spolu s uvedením zdrojem informace (nejlépe [www odkaz](#)) na níže uvedený email do **pá 11. 4. 2008 do 12:00**. První email, který bude vyhodnocen musí být zaslán nejdříve v **út 8. 4. 2008 ve 20:00**. Hodnoceno bude prvních **8 různých odpovědí !!!!**

Vaše odpověď musí obsahovat jiný přístroj, než který navrhují Vaši kolegové.



[drino@feec.vutbr.cz](mailto:drino@feec.vutbr.cz)