

# Technika bezdrátové komunikace

## B2B17TBK

### Část 7 - VF a mikrovlnná měření

Přemysl Hudec

**ČVUT-FEL katedra elektromagnetického pole**

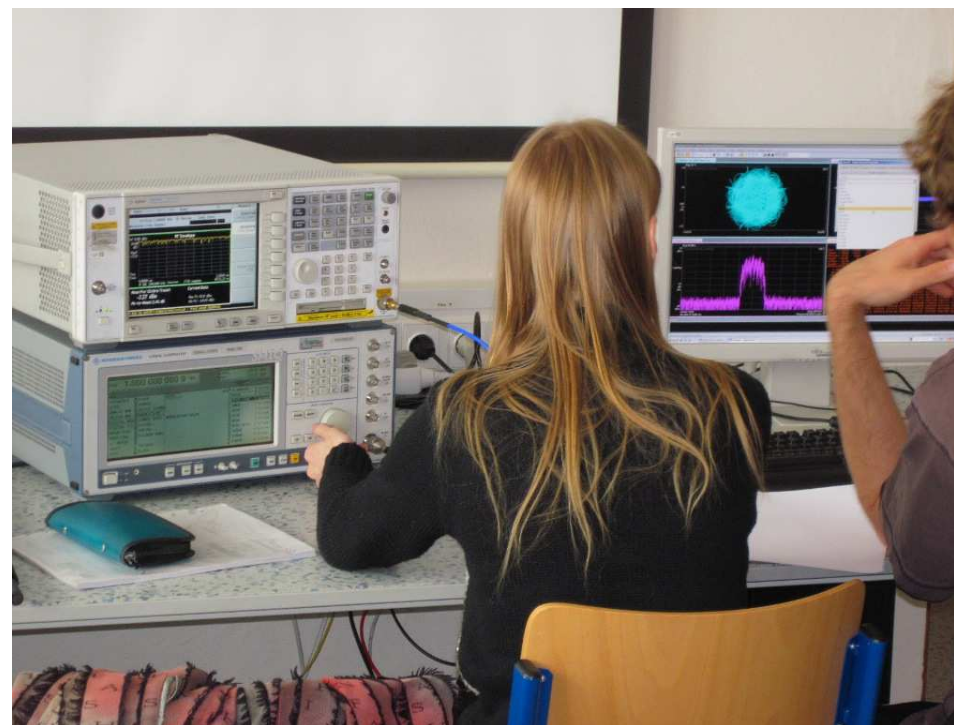
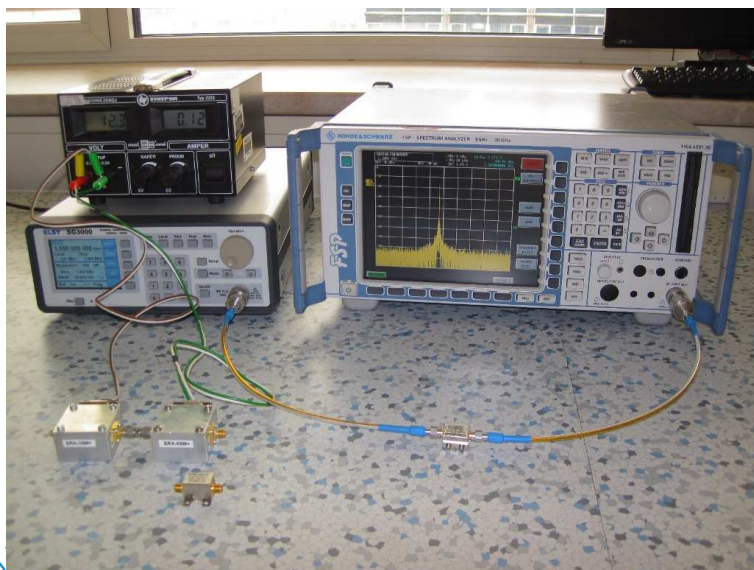
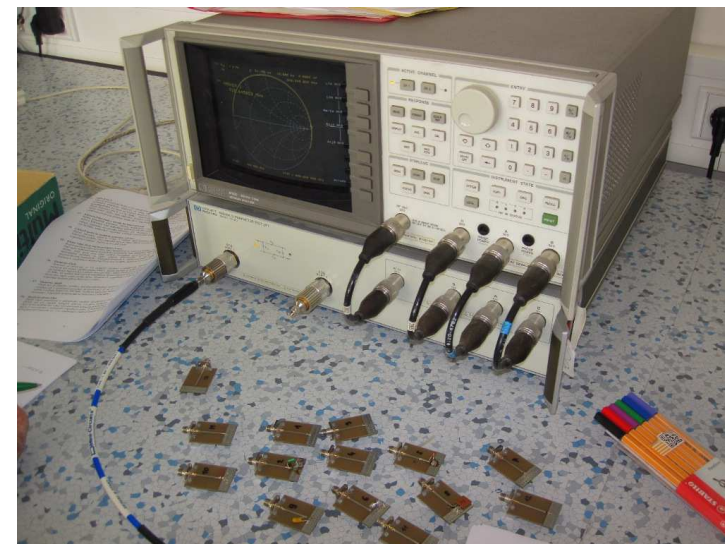
[hudecp@fel.cvut.cz](mailto:hudecp@fel.cvut.cz)

verze 2022



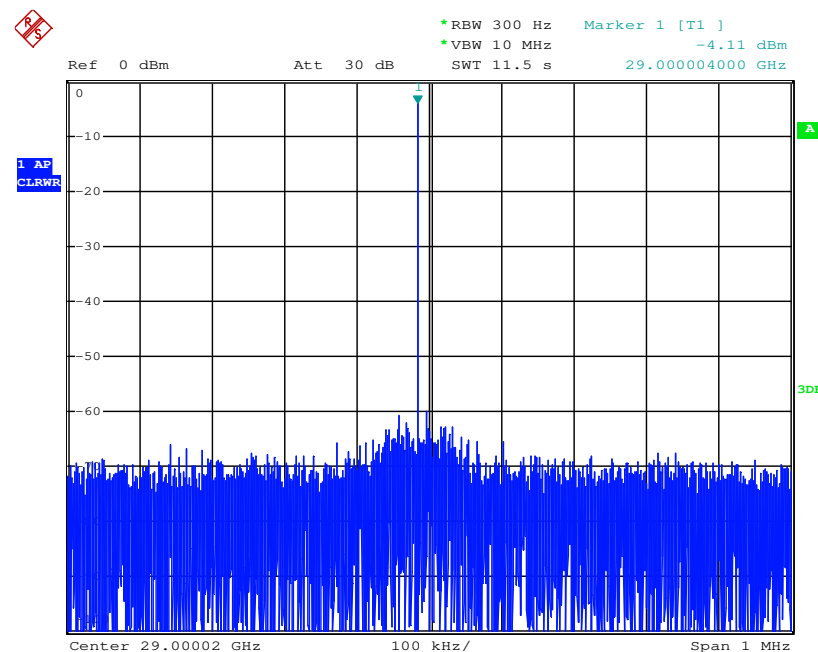
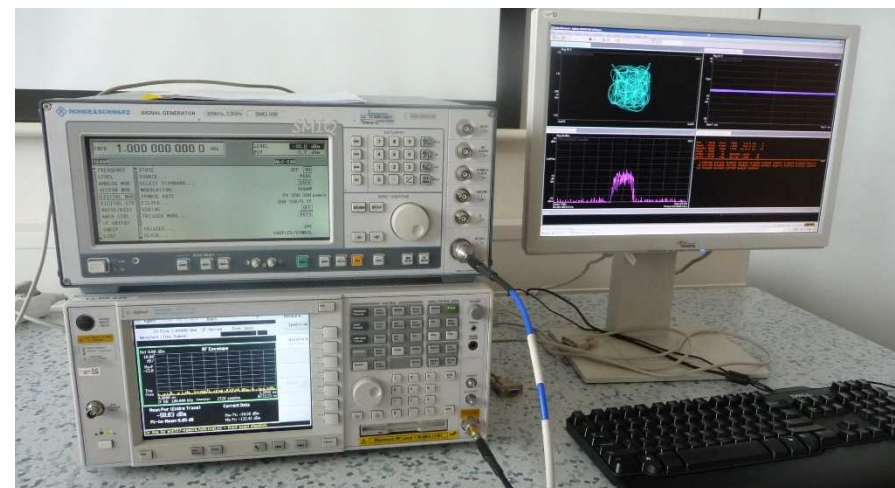
# Obsah

- VF generátory
- Detektory, směrové vazby
- Skalární měření přenosu a odrazů
- Vektorový analyzátor obvodů
- Spektrální analyzátor



# VF a mikrovlnná měření

- Důležitá součást VF, mikrovlnné a komunikační techniky
- Nezbytné pro:
  - Vývoj a výzkum
  - Výrobu
  - Nastavení a servis komunikačních (radiových i metalických) tras
- Měřicí přístroje:
  - Některé jsou velmi složité
  - Drahé
  - Málo výrobců
  - **50Ω vstupy / výstupy**
  - Laboratorní / přenosné
  - **Běžně pro frekvenční pásmo od MHz do 100GHz**





# VF generátory

- Zdroj signálu  $u_{vf} = A \cos \omega t$
- Široce přeladitelné
- Frekvence MHz až desítky GHz
- Výstupní výkon obvykle do +10dBm (10mW)
- Jednoduché modulace AM, FM, PM
- **Vektorové generátory** = i velmi složité modulace x-QAM, OFDM, .. (viz. přednášky)
- Součásti sestav pro měření přenosu, odrazů, antén, ...
- Nezbytné součásti všech laboratoří
- Často součásti složitějších přístrojů jako jsou VNA



- **Příklad SMF100A**
- Rozsah 1GHz až 43,5GHz
- Krok nastavení frekvence 1Hz
- Výstupní výkon -100 až +10dBm
- **Příklad SG2000**
- Rozsah 1MHz až 2000MHz
- Výkon -120 až +10dBm

# Detektory

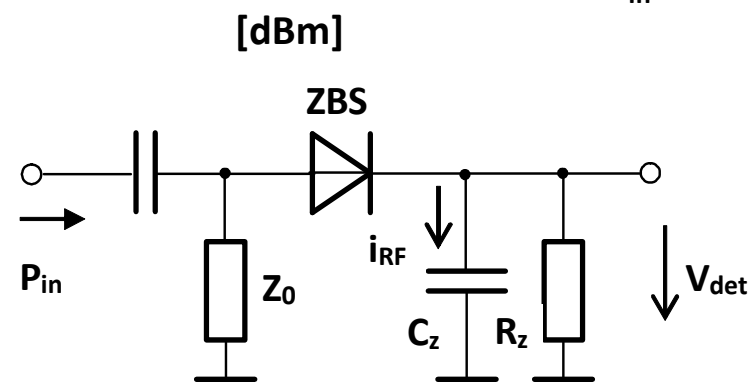
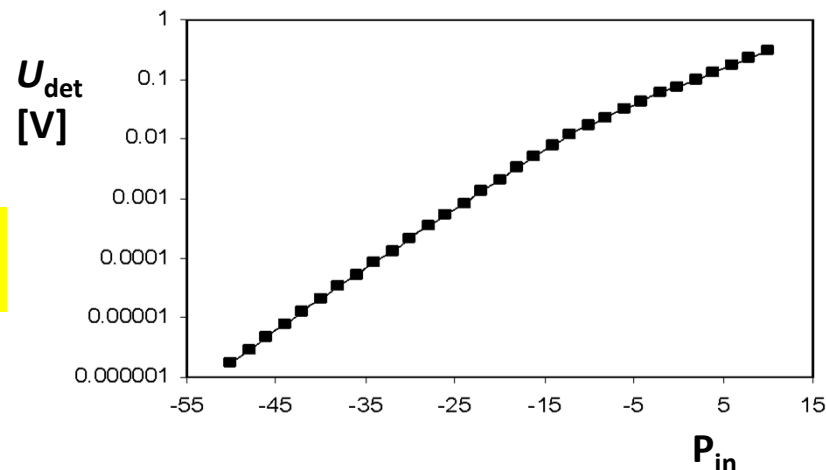
- Senzory pro měření výkonu
- Používají se pro měření přenosu  $G = P_{out} / P_{in}$
- Také jako AM demodulátory
- Součást SpA, ...

- **VF detektory = převodníky**  $V_{det} = f(P_{in})$

- Založeny na diodách ZBS → nízké „koleno“
- Vstupní přizpůsobení  $Z_0 = 50\Omega$
- $C_z = 10\text{nF}$  = zkrat  $< 1\Omega$  od 16MHz
- $R_z$  = zatěžovací odpor, typ. 100k $\Omega$
- Funguje typ. od -50 do +20dBm

$$i_d = k_2 V_{RF}^2 = \frac{1}{2} k_2 V_{RF}^2 (1 + \cos(2\omega t + 2\phi))$$

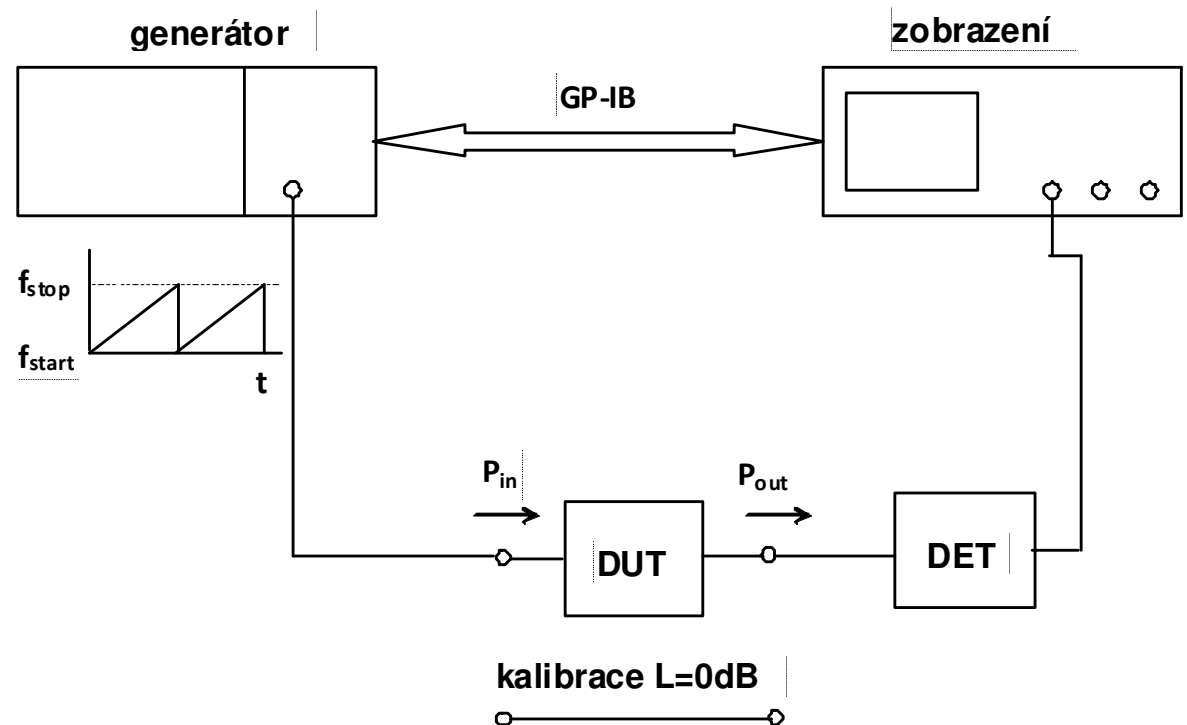
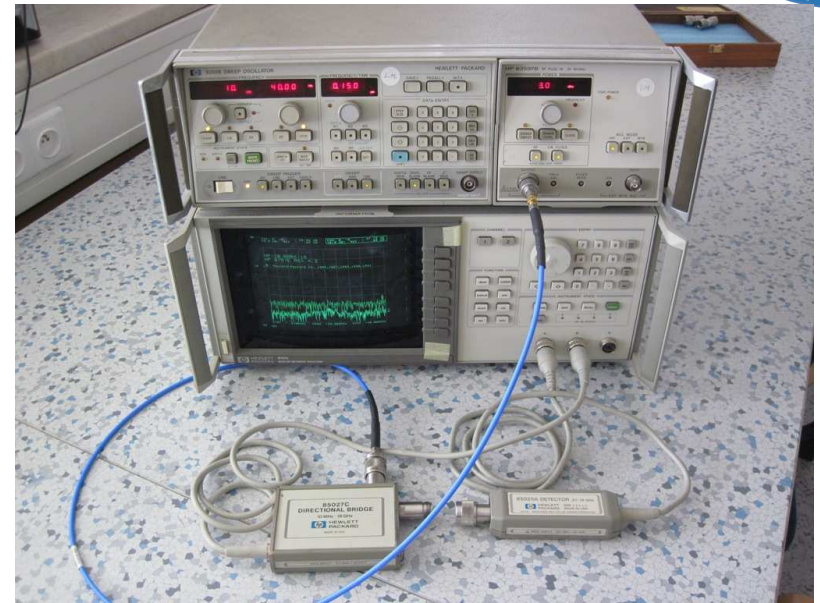
$$\text{za } C_z \quad V_{det} = \frac{1}{2} R_z k_2 V_{RF}^2 = \frac{1}{2} R_z k_2 P_{in} Z_0$$



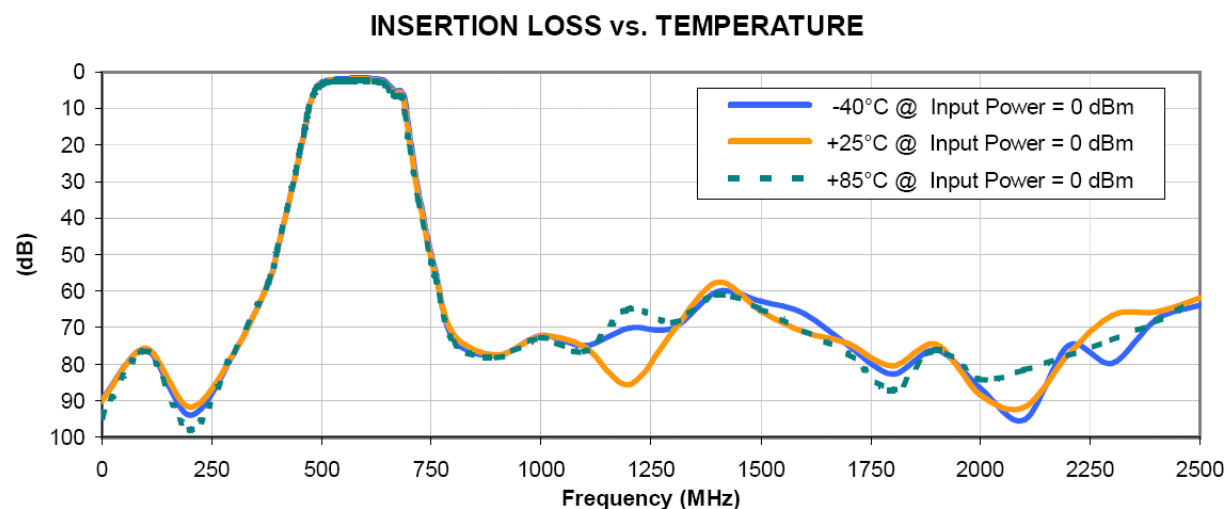
# Měření zisku - skalární

- **Skalární** = měří jen amplitudy – ne fáze
- Vložný výkonový zisk
- Měří se v širokém rozsahu frekvencí = frekvenční charakteristiky
- Při měření DET měří  $P_{out}$
- **Při kalibraci měří detektor na všech frekvencích  $P_{in}$  a hodnoty ukládá do paměti**
- Potřebný kalibr  $\rightarrow L=0$
- **Při  $L=0$  platí  $P_{out}=P_{in}$**
- V praxi krátká propojka
- Dynamický rozsah DET typ. 60dB
- Při použití SpA jako měřiče výkonu = dynamika až 140dB

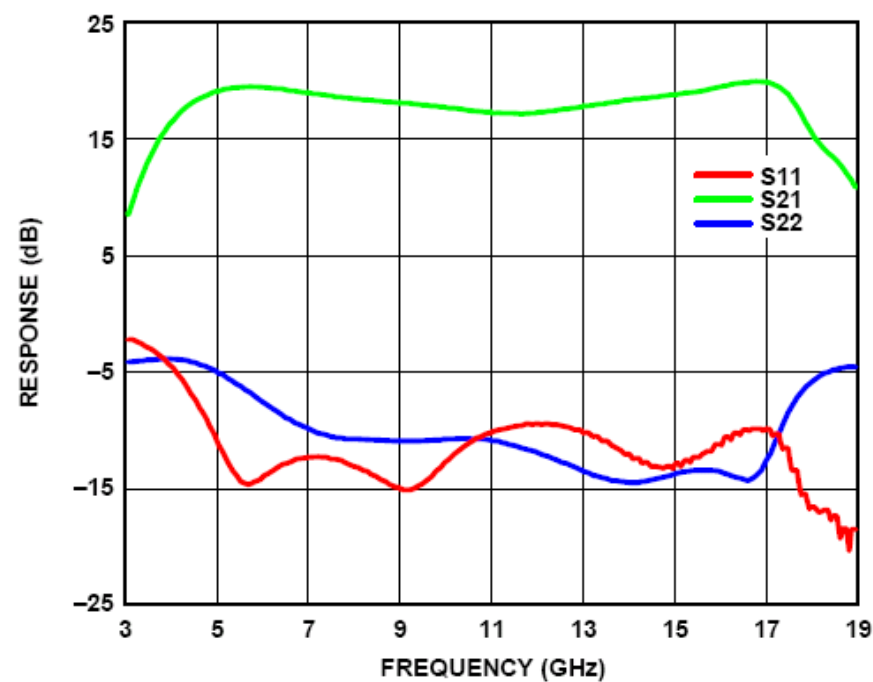
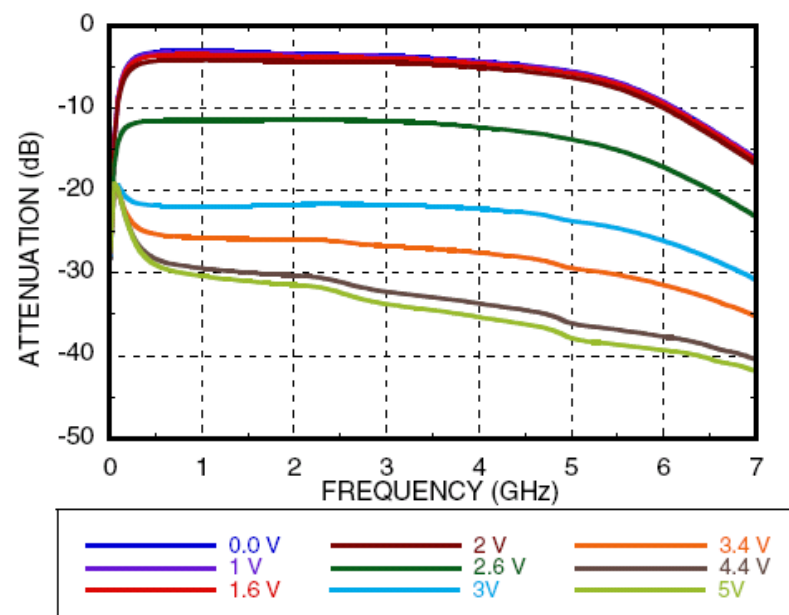
$$G = P_{out} / P_{in}$$



# Příklady frekvenčních charakteristik $G(f)$



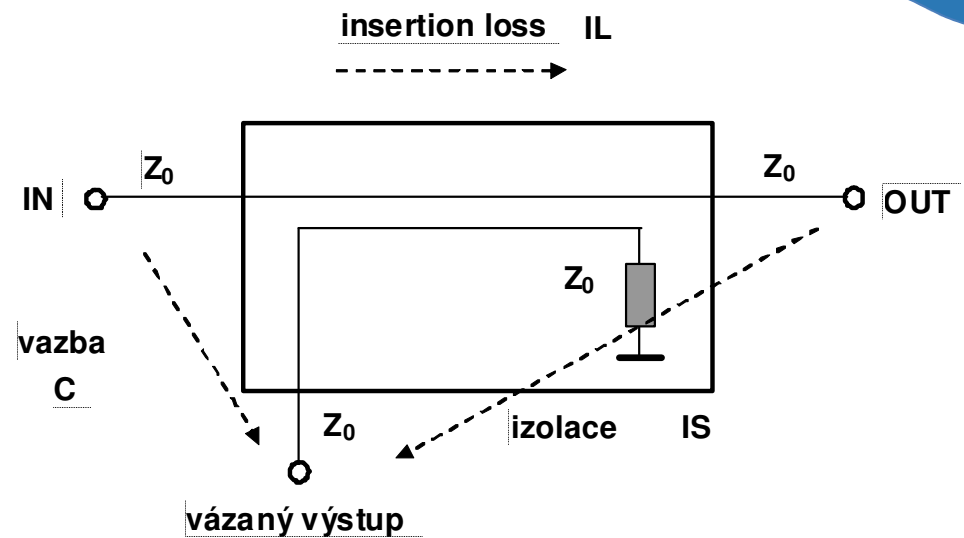
**Attenuation vs.  
Frequency Over  $V_{ctrl}$  @  $V_{DD}=5\text{ V}$**





# Směrová vazba

- Speciální VF komponenta
- Dvě úzce vázaná  $\lambda/4$  vedení
- Koaxiální, mikropásková
- 1 brána obvykle bezodrazově zakončena  $Z_0=50\Omega$
- Nesymetrický dělič výkonu
  - Typ. -1dB průchod IN-OUT
  - Typ. -10dB vazba IN-C
  - Typ. -40dB izolace OUT-C
  - Na výstupu C je (s jistým zjednodušením) jen vzorek vlny šířící se do IN
  - Vlna vstupující do OUT se na C (skoro) neváže (je pohlcena v  $50\Omega$  zátěži)



CASE STYLE: LL561



# Měření odrazů pomocí směrové vazby

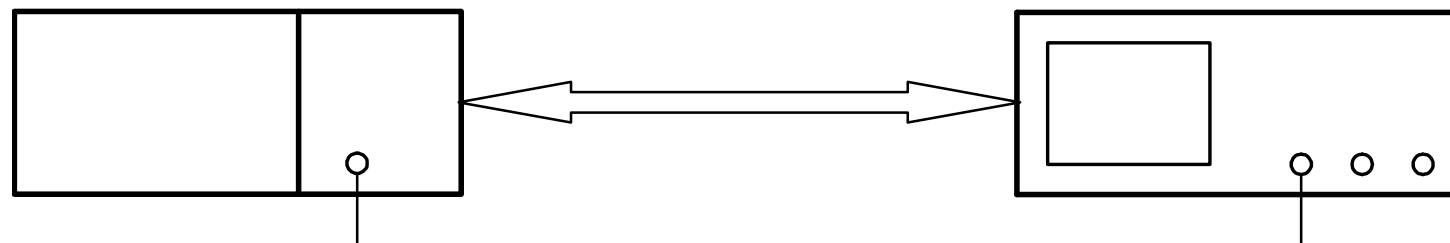
- Směrová vazba (SV) = 3-bran schopný oddělit dopadající a odraženou vlnu**

- Parametry SV:

- $C$  = "coupling loss" (vazba) typ. 10dB
- $IL$  = "insertion loss" (vložený útlum) typ. 1dB
- $IS$  = "isolation (izolace)" typ. 40dB

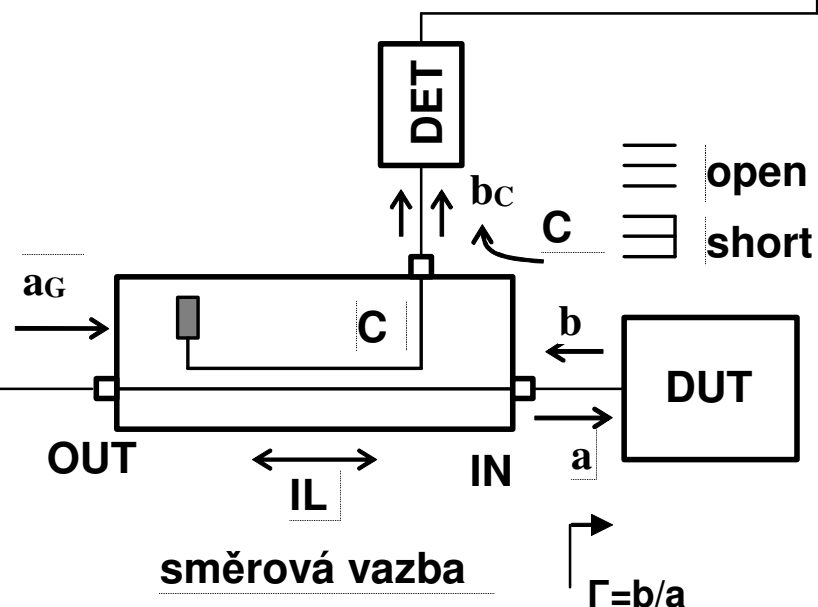
generátor

zobrazení



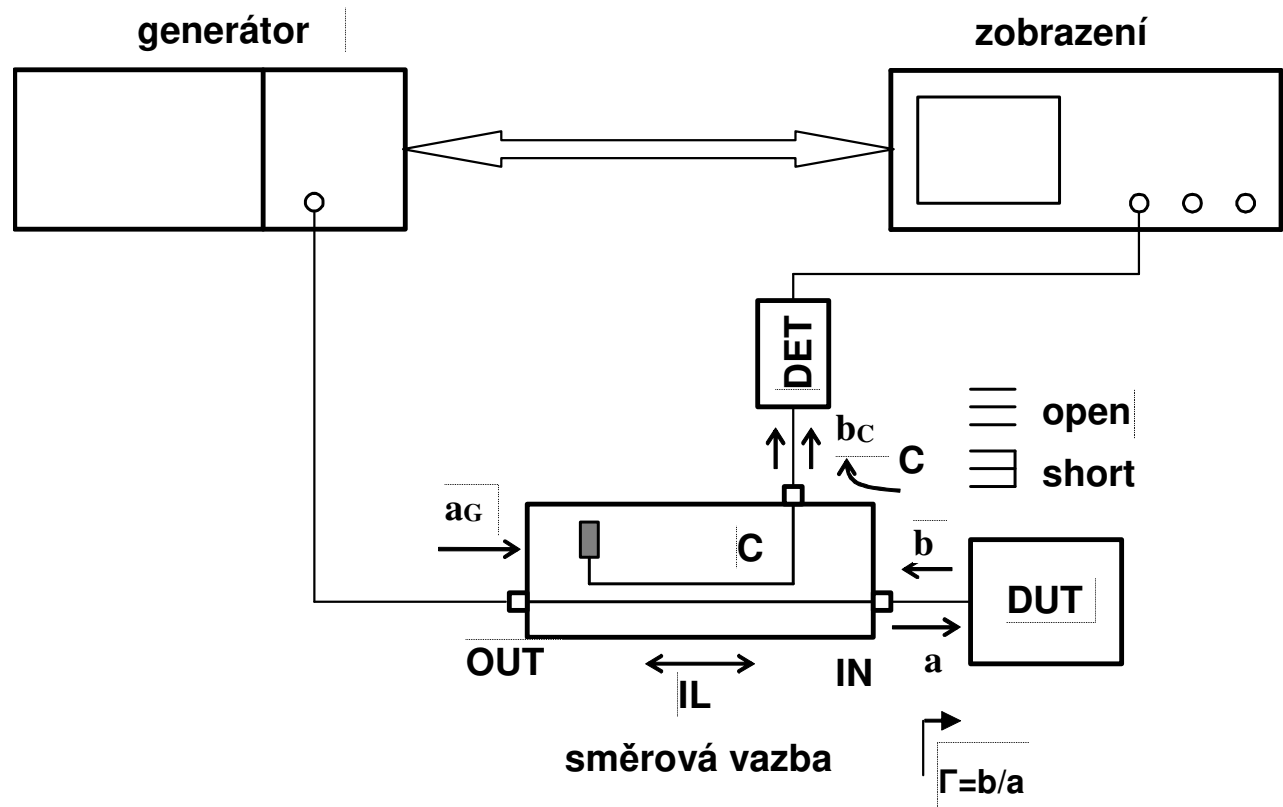
- Měřicí sestava:

- Generátor je zapojen na přímý výstup OUT
- DUT je zapojen na vstup IN
- Přijímač nebo detektor = měřič výkonu je zapojen na vázaný výstup C



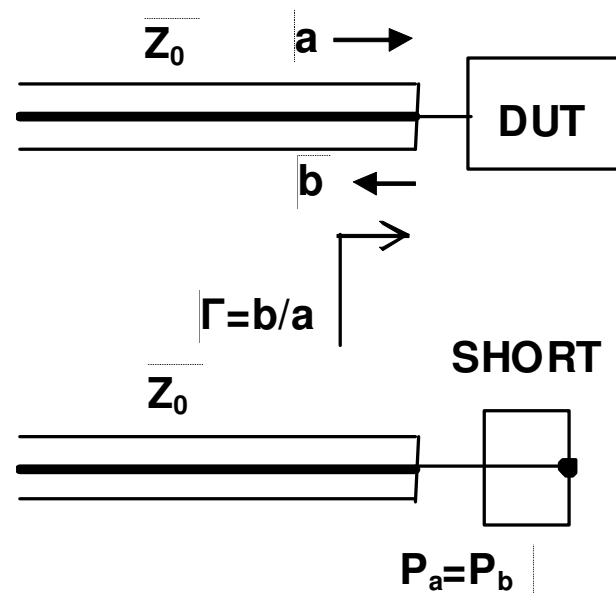
# Měření odrazů pomocí směrové vazby

- Generátor budí postupující napěťovou vlnu  $a_G$
- Vlna  $a_G$  projde SV a na bráně IN=TEST vytváří dopadající vlnu  $a$
- Díky směrovosti se  $a_G$  na C neváže
- Vzorek odražené vlny  $b$  se jako  $b_c$  váže na C a je měřen DET
- Koeficient odrazu je definován jako  $\Gamma = b/a$
- Měření:
  - Detektor měří  $b$
  - Koeficient odrazu  $\Gamma = b/a$  je dán poměrem
  - Předem je tedy nutné změřit  $a$  a uložit do paměti
  - To se provádí v procesu KALIBRACE
- Kalibrace se provádí pomocí kalibrů  $|\Gamma| = 1$



# Kalibrace při skalárním měření odrazů

- Pro změření ***a*** je nutné provést kalibraci
- Vhodné kalibry  $\rightarrow |\Gamma| = 1$  (SHORT, OPEN)
- **Pro  $|\Gamma| = 1$  platí  $b=a$**
- Při kalibraci se tedy měří amplituda ***a***
- a uloží se do paměti
- Měření:
  - Detektor měří ***b***
  - ***a*** je v paměti
  - Počítač vyhodnocuje a zobrazuje  **$\Gamma = b/a$**
  - Při skalárních měřeních nejčastěji jako ***RL***

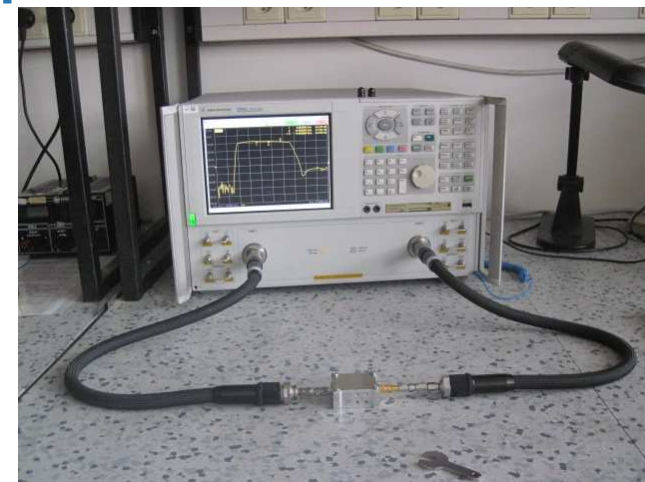


$$RL = -10\log(P_b / P_a) = -(P_{bdBm} - P_{adBm})$$

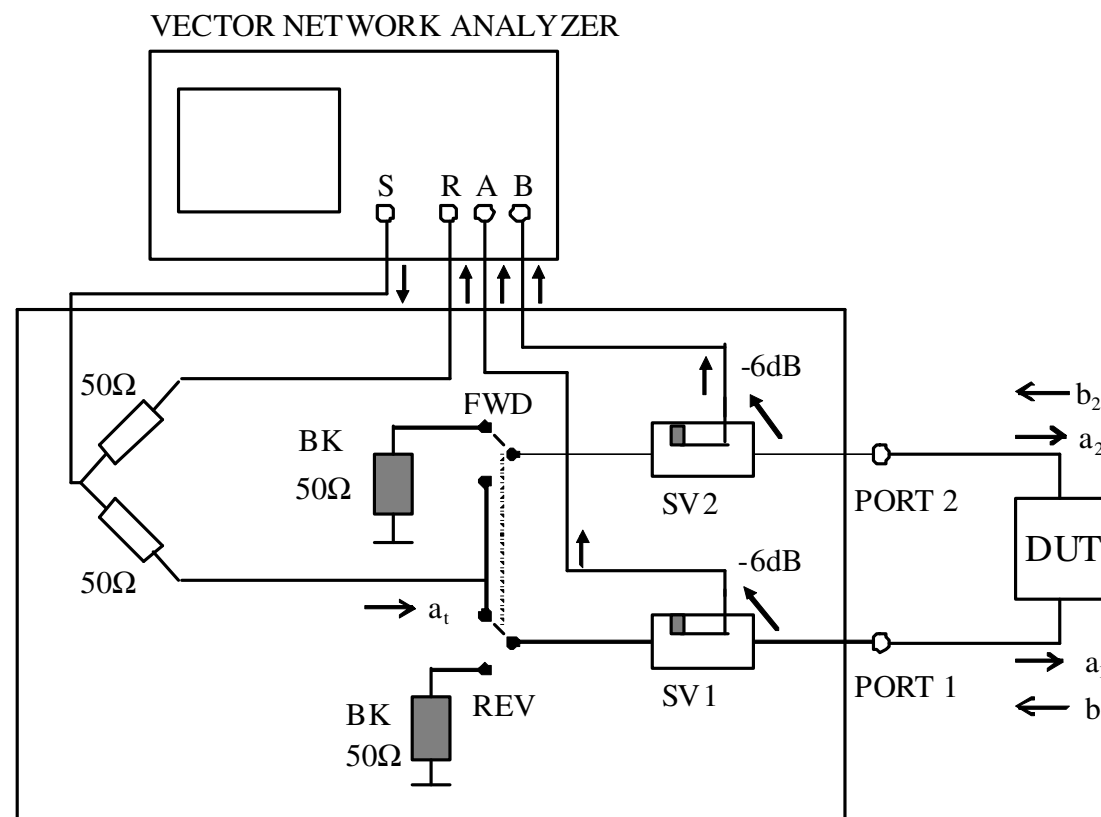


# VNA = "Vector Network Analyzer"

- Umožňuje:
  - **Měření s-parametrů = koeficientů přenosu a odrazu včetně fází**
  - **Velmi efektivní korekci vlivu všech komponent v měřicí trase (parazitní útlumy i koeficienty odrazu)**
  - Vysoký dynamický rozsah >100dB
  - Nezbytný pro CAD, výzkum, ...



- ALE:
  - Obvykle velmi složité přístroje
  - Drahé (66 GHz VNA ~400000 USD)
  - Náročná kalibrace
  - Velmi drahé kalibry (SMA 3,5 mm ~ 5000 USD),
  - Příklad: VNA E8364 (Keysight) 45MHz až 50GHz





# VNA - měření $s_{11}$ a $s_{21}$

- **VNA má jeden výstup S = „Source“ = generátor a 3 vstupy (velmi citlivé přijímače typu superhet, měří výkony i  $<-100\text{dBm}$ ):**
  - R = referenční přijímač, měří dopadající vlnu  $a_1$  nebo  $a_2$
  - A, B = měřicí přijímače, měří  $b_1$  nebo  $b_2$
  - Přijímače R, A, B pracují s frekvenční konverzí na nízkou IF (typ. stovky kHz)
  - Na této IF se po digitalizaci provádí porovnání amplitud i fází signálů A/R a B/R
- **VNA je přepnut na měření  $s_{11}$  a  $s_{21}$ :**

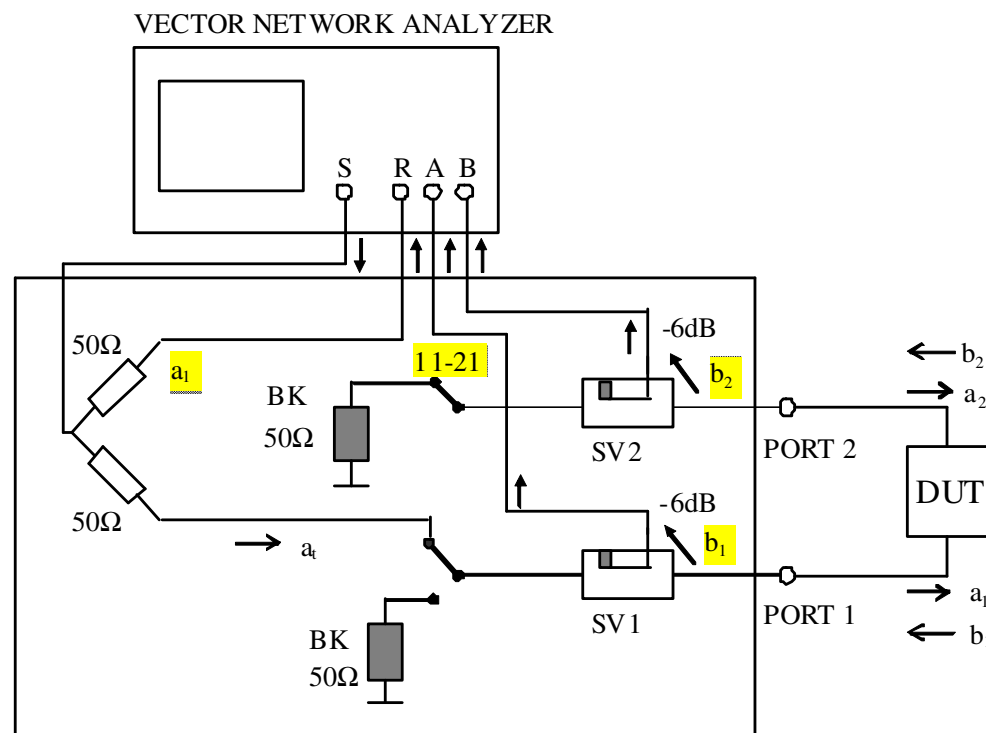
- Signál z výstupu S je rozdělen do větve R a do větve PORT1
- Přijímač R měří dopadající vlnu  $a_1$
- Směrová vazba SV1 odbočuje -6dB vzorek vlny  $b_1$  na vstup přijímače A
- Směrová vazba SV2 odbočuje -6dB vzorek vlny  $b_2$  na vstup přijímače B

- **DSP vyhodnocuje  $s_{11}$  a  $s_{21}$**



$$s_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

$$s_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$



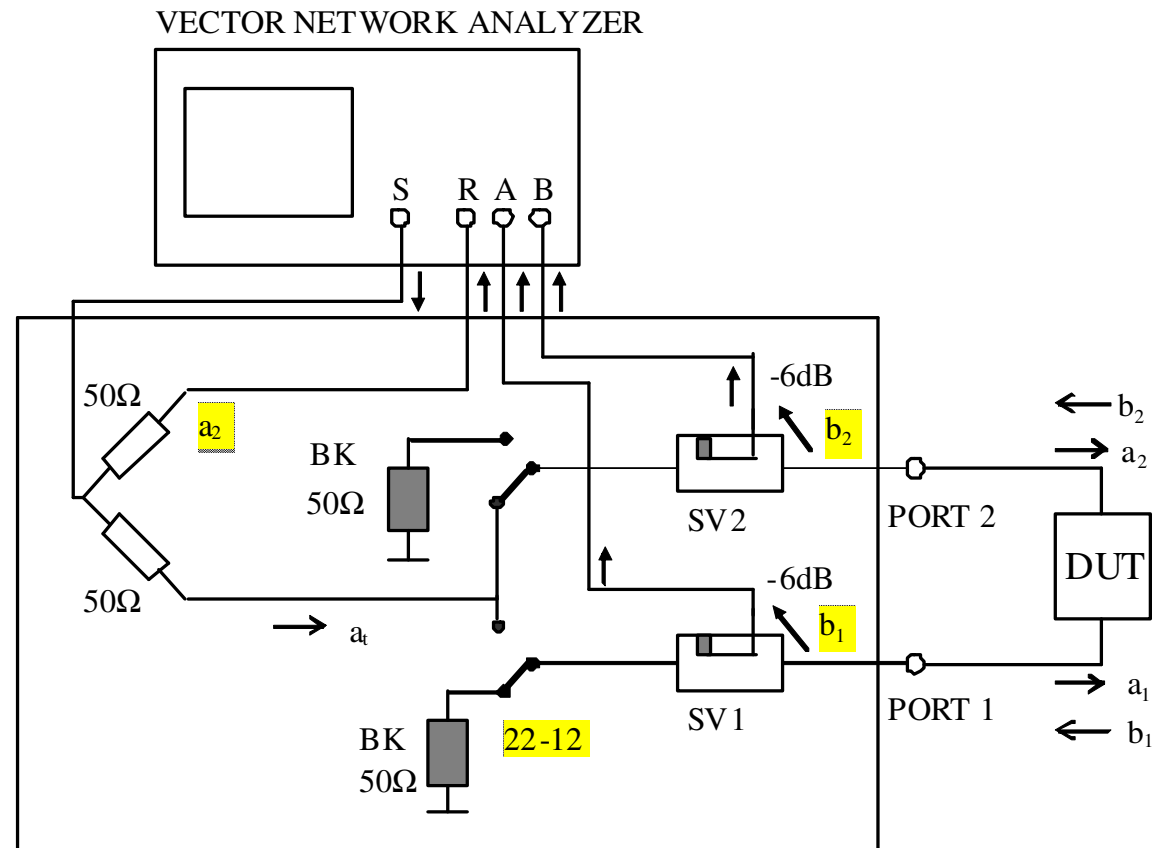
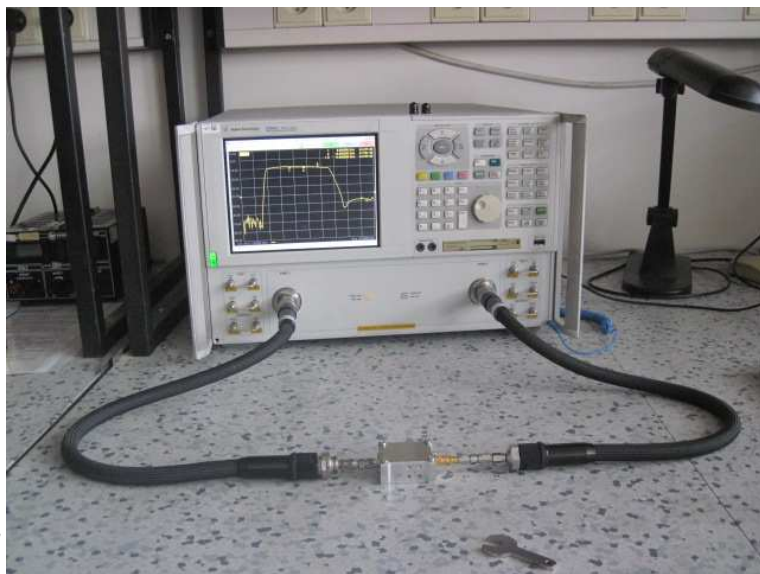
# VNA - měření $s_{22}$ a $s_{12}$

- VNA je přepnut na měření  $s_{22}$  a  $s_{12}$ :

- Přijímač R měří dopadající vlnu  $a_2$
- Směrová vazba SV1 odbočuje -6dB vzorek vlny  $b_1$  na vstup přijímače A
- Směrová vazba SV2 odbočuje -6dB vzorek vlny  $b_2$  na vstup přijímače B
- **DSP vyhodnocuje  $s_{22}$  a  $s_{12}$**

$$s_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

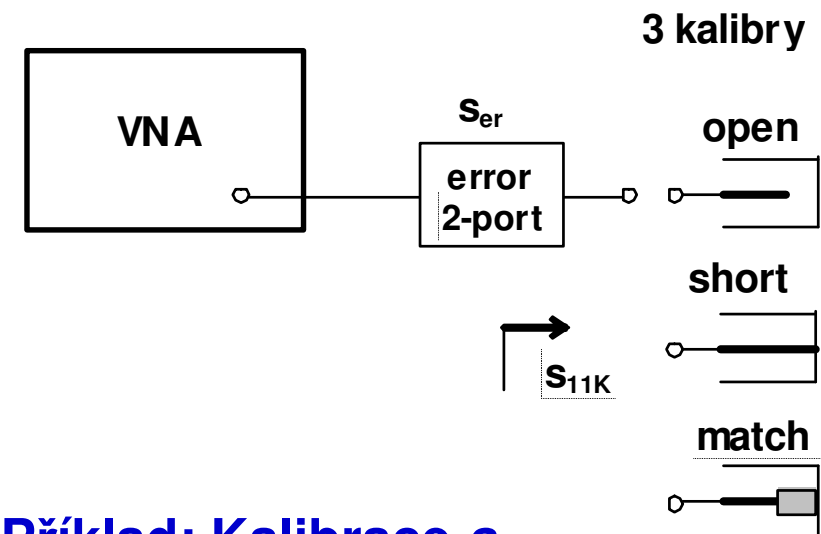
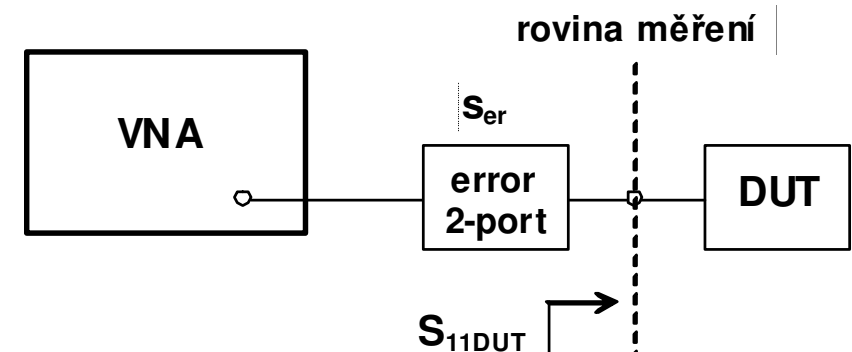
$$s_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$



# Kalibrace - korekce

- Významná SW funkce každého VNA
- **Odstranění vlivu komponent měřicí sestavy:**
  - Propojovacích kabelů, adaptérů, atenuátorů, zesilovačů, ...
  - Potlačuje vliv útlumu/ zisku i odrazů
  - Vztahuje měření k definiční rovině
- Mnoho různých metod - TRL, SOLT,...
- SW je vždy součástí každého VNA
- Potlačení vlivu měřicí sestavy může být téměř ideální
- Bez alespoň základní kalibrace nemá cenu VNA používat

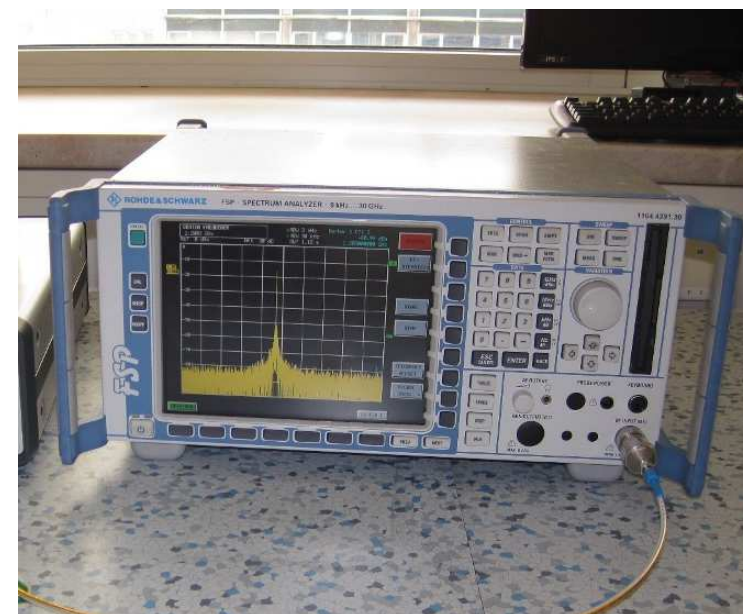
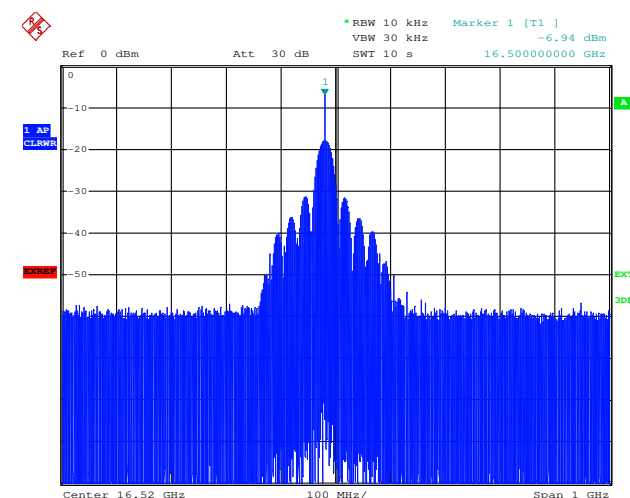
$$S_{11VNA} = S_{11er} + \frac{S_{12er} S_{21er} S_{11DUT}}{1 - S_{22er} S_{11DUT}}$$



- **Příklad: Kalibrace  $s_{11}$** 
  - Měření 1-branu
  - **Vyžaduje 3 komplexní kalibry**
  - Nejčastěji OPEN, SHORT, MATCH
  - Z měření kalibrů lze určit s-parametry chybového 2-branu  $s_{er}$
  - A výpočetně provést úplnou korekci

# Spektrální analyzátor

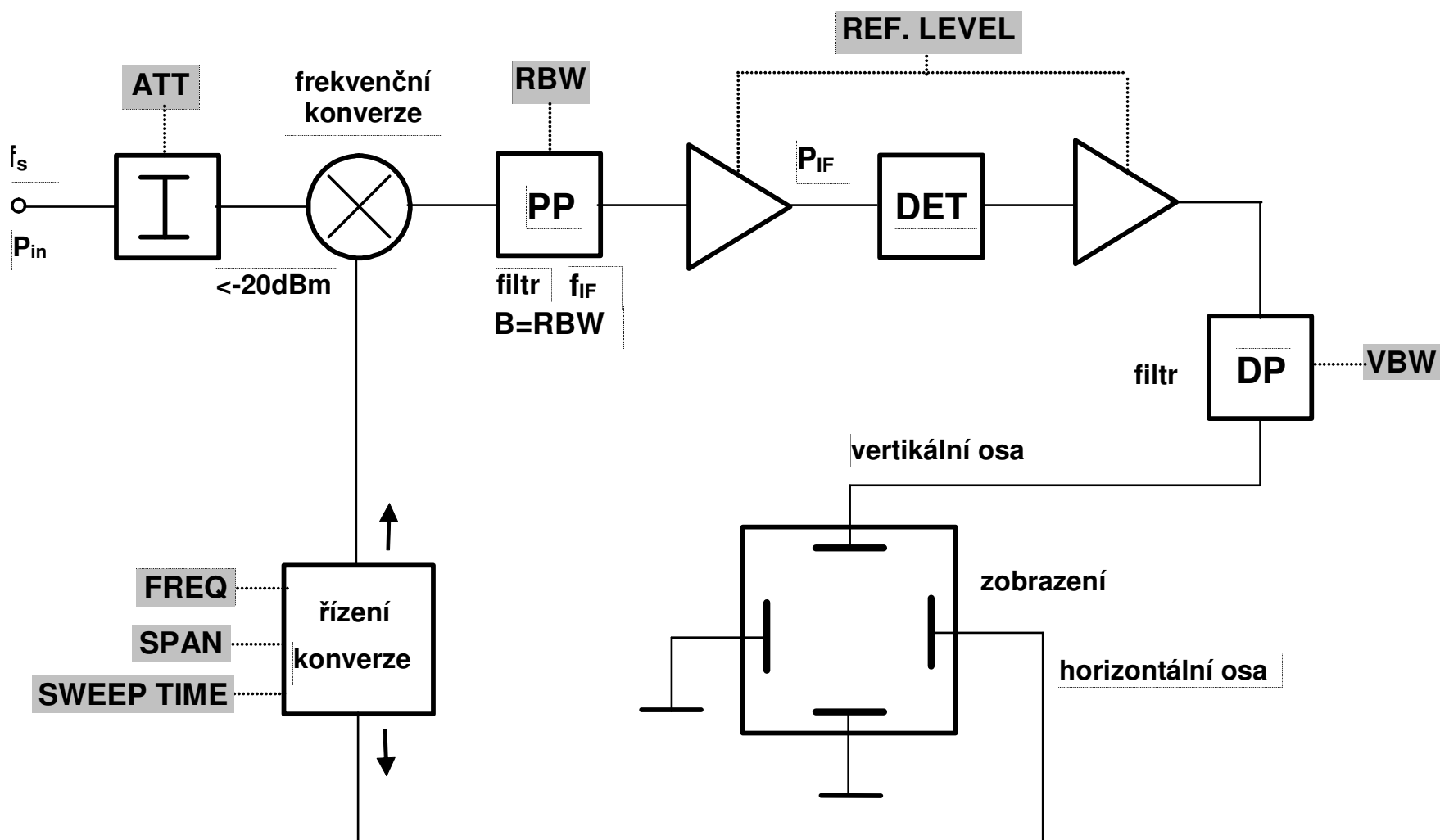
- **Jeden z nejdůležitějších a nejpoužívanějších VF a mikrovlnných měřicích přístrojů**
- Patří mezi základní vybavení každé VF a mikrovlnné laboratoře:
  - Měří autonomní obvody (např. oscilátory)
  - Provádí spektrální analýzu = měření výkonu definovaným úzkým frekvenčním oknem
  - Vykazují velmi vysoký dynamický rozsah → typ. 150 (i více) dB
  - Umožňují selektivní měření VF výkonu a frekvence při přítomnosti i většího počtu různých signálů
  - Umožňují měření spektrální výkonové hustoty (PSD) signálů
  - Umožňují měření šumových parametrů (SpA = velmi citlivý přijímač)
  - Nezastupitelné při měření nelineárních parametrů
- Důležitá součást mnoha měřicích sestav





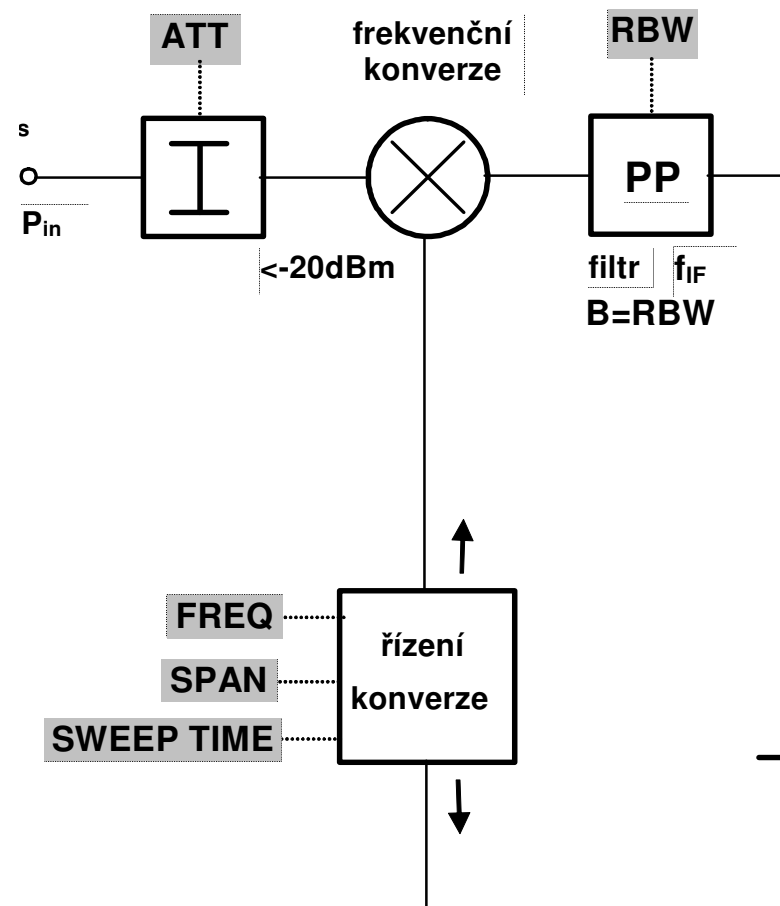
# Zjednodušené blokové schéma

- Měřicí přijímač typu superhet s širokým frekvenčním a dynamickým rozsahem



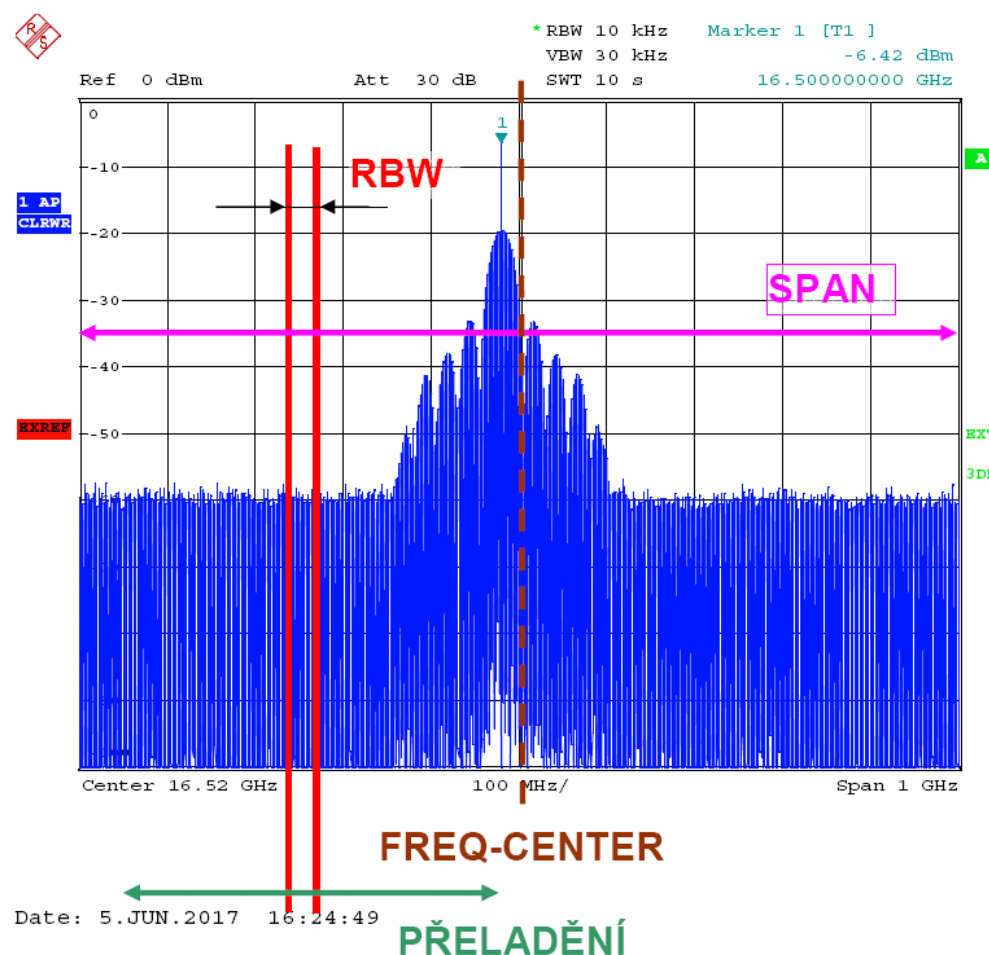
# Vstupní obvody

- Vstupní atenuátor **ATT** zajišťuje dostatečně nízký (typ.  $\leq -20\text{dBm}$ ) výkon na vstupu konvertoru  $\rightarrow$  nízké vnitřní nelineární produkty SpA
- Pro  $P_{inmax}$  typ.  $30\text{dBm}$   $\rightarrow$  je nutný atenuátor  $0 - 50\text{dB}$  (krok  $10\text{dB}$ )
- Konvertor  $\rightarrow$  konvertuje vstupní signál s frekvencí  $f_s$  (přeladění je široké **SPAN**) do pevného IF filtru na frekvenci  $f_{IF}$  (typ.  $10\text{MHz}$ ), šířka IF filtru je  $B=\text{RBW}$
- Filtr **RBW** definuje měřicí okno SpA
- Filtr RBW je pevný a může být ideálně úzký (máme RBW  $1\text{Hz}$ )
- Obvod řízení konverze se nastavuje **FREQ** a **SPAN** a **SWEEP TIME**
- To patří mezi základní nastavovací prvky každého SpA
  - **FREQ CENTER** = střední frekvence zobrazení
  - **SPAN** = frekvenční šířka zobrazení
  - **SWEEP TIME** = rychlost měření spektra



# Měření spektra

- SpA přejíždí frekvenční pásmo **SPAN** měřícím oknem širokým **RBW**. V každém frekvenčním bodu zobrazení (celkem typ.  $N=400$  bodů) přístroj měří výkon v okně širokém **RBW** a zobrazí hodnotu na displeji.
- Měřené frekvenční pásmo je určeno nastavením **FREQ-CENTER** a **SPAN**
- **FREQ-CENTER** → frekvence odpovídající středu zobrazení
- **RBW** ("resolution bandwidth")  
→ šířka frekvenčního okna  $B$
- Sada pevných filtrů na stejné  $f_{IF}=10\text{MHz}$  s přepínatelnými hodnotami  $B=\text{RBW}$
- Typicky filtry s šířkou pásma 10Hz, 30Hz, 100Hz, 300Hz, 1kHz, 3kHz, 10kHz, 30kHz, 100kHz, 300kHz, 1MHz, 5MHz
- Existují i SpA s **RBW**=1Hz



# Šumový práh SpA

- Nutné řešit při měření slabých signálů
- Šumový práh = citlivost
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (J/K)
- $T_{SpA}$  (K)
- $B = \text{RBW}$  (Hz)

$$N = kT_{SpA} B = kT_{SpA} RBW$$

ekvivalentní šumová teplota (vnitřní šumy) SpA  
šumová šířka pásma

- **Nastavitelné hodnoty  $T_{SpA}$ :**

$$T_{SpA} \cong 10.290 \cdot ATT$$

- Dominantně určeny aktuální hodnotou ATT
- **Každý dB vstupního atenuátoru zvyšuje šumový práh o 1dB**
- Maximální vstupní útlum ATT = 50dB zvyšuje šumový práh o 50dB !!!
- **Pro měření slabých signálů → ATT=0 dB !!!**

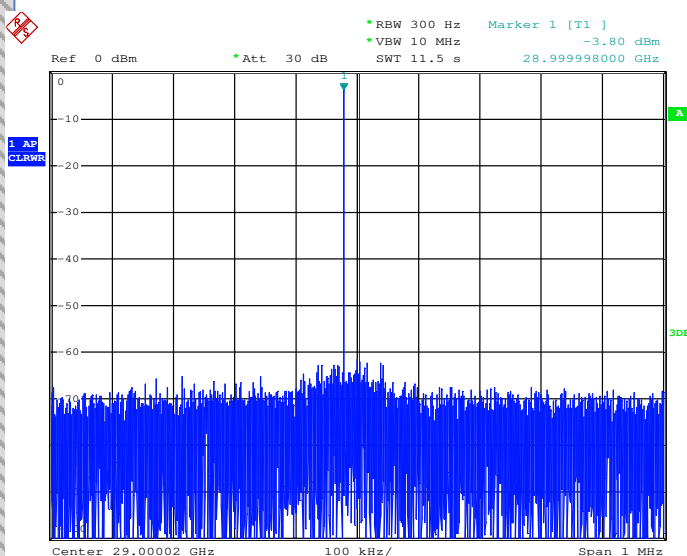
- **Nastavitelné hodnoty  $RBW$ :**

- Typ. 5MHz, 1MHz, 300kHz, 100kHz, 30kHz, 10kHz, 3kHz, 1kHz, 300Hz, 100Hz, 30Hz, 10Hz
- **Při zúžení RBW 10x se šumový práh sníží o 10dB !!!**
- **Hlavní způsob snížení šumového prahu SpA**

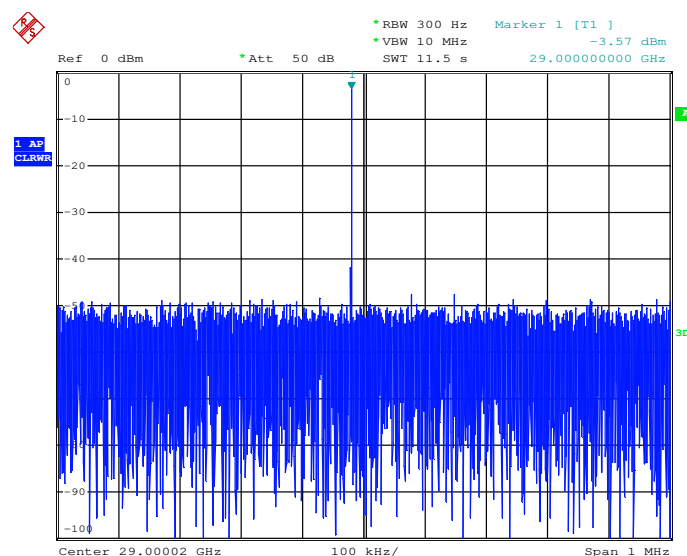


# Příklad ATT = 30, 50, 70dB

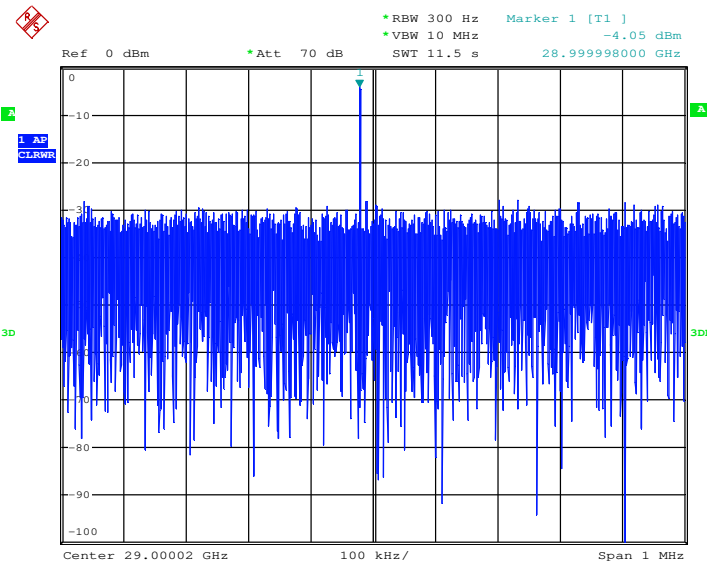
- Při přepínání ATT = 30 – 50 – 70dB roste šumový práh
- Přepínání = většinou automatické s **REFERENCE LEVEL**



Date: 1.JAN.2003 00:07:22



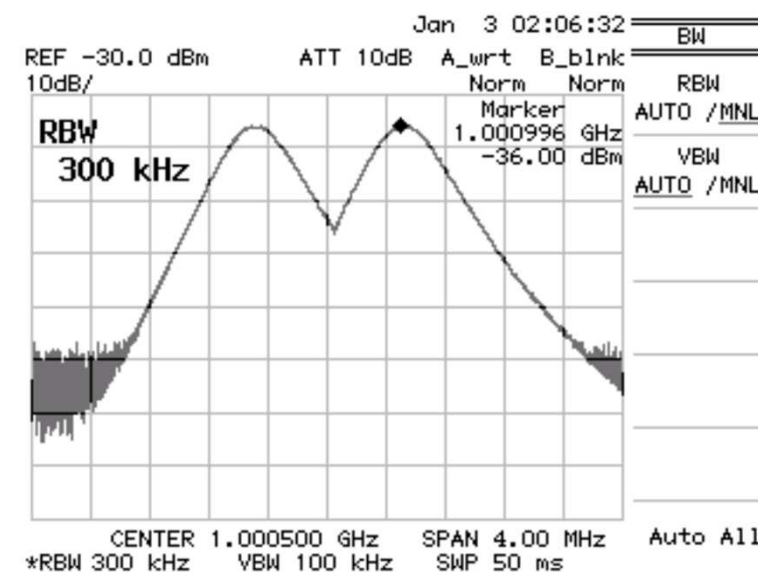
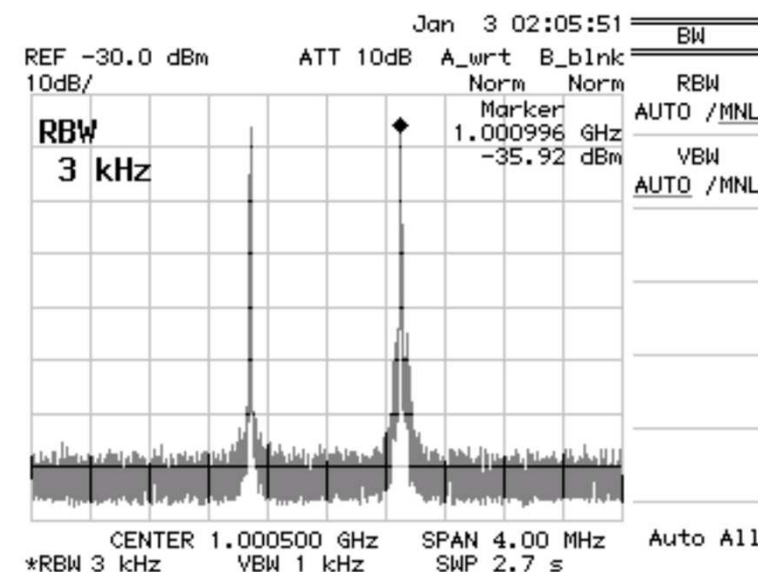
Date: 1.JAN.2003 00:09:14



Date: 1.JAN.2003 00:08:27

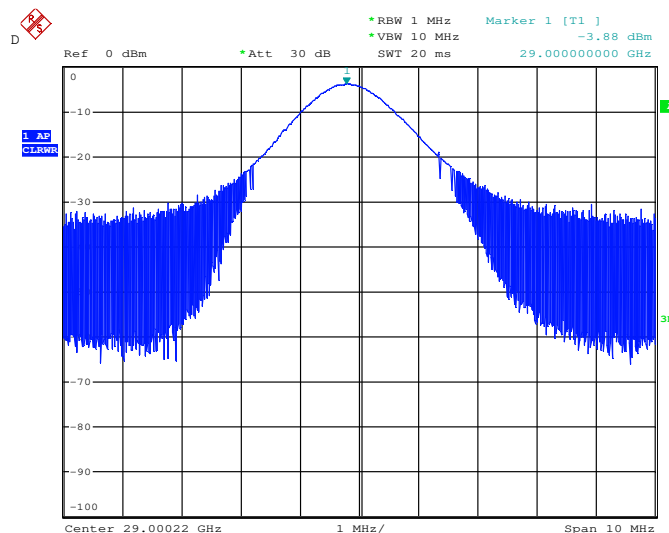
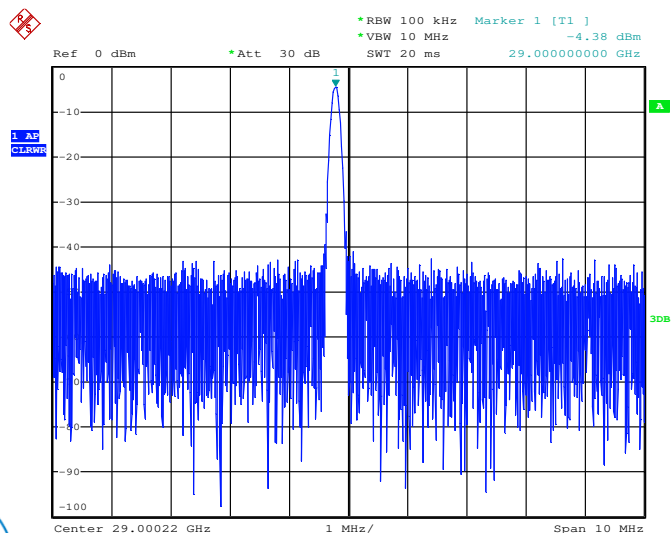
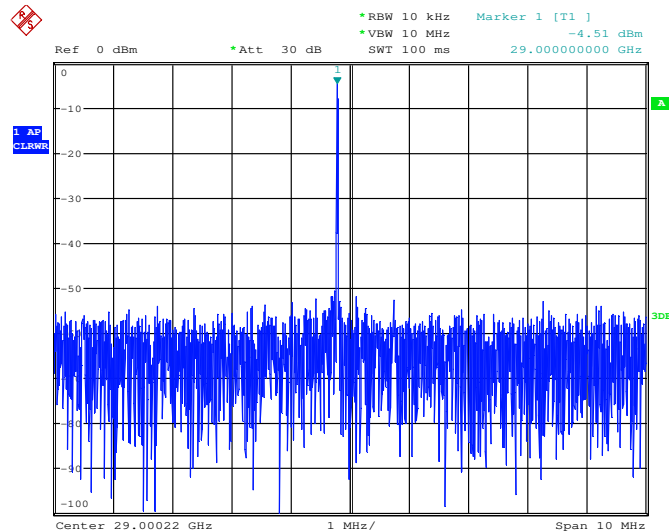
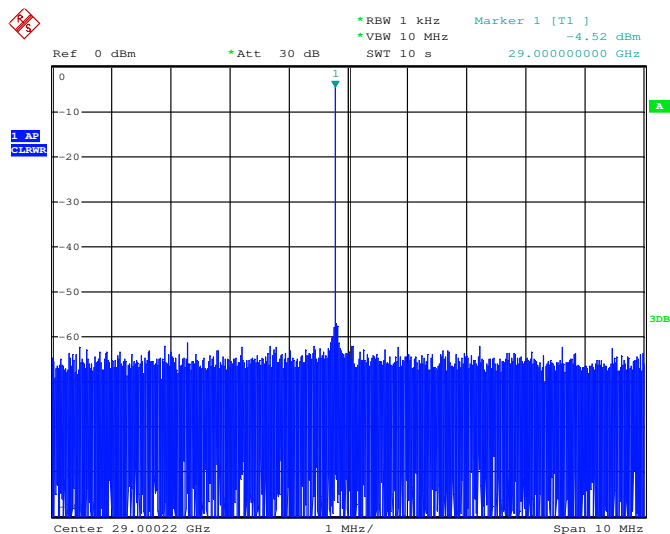
# Nastavení RBW

- Uživatelské nastavení  $B=$ **RBW**:
  - Je nutné zvolit 1 filtr ze sady filtrů (typ. 10Hz, ...10MHz)
  - Nižší hodnoty  $B=$ **RBW** snižují šumový práh
  - **Snížení RBW 10-krát → sníží šumový práh o 10dB!!!**
  - Také významně zlepšují rozlišení ve frekvenci
  - To je dáno konvolucí měřeného signálu a okna **RBW**
- Problém:
  - Použití nízkých hodnot **RBW** často vede na dlouhé (někdy velmi dlouhé) doby **SWEEP TIME**
  - Jinak → UNCALIBRATED
  - Řešení → úzký **SPAN**
  - Použití **RBW** ≤ 100Hz je proto obvykle schůdné jen pro **SPAN** < 1MHz
  - Pro měření větších pásem **SPAN** → lze doporučit **RBW** typ. 30kHz



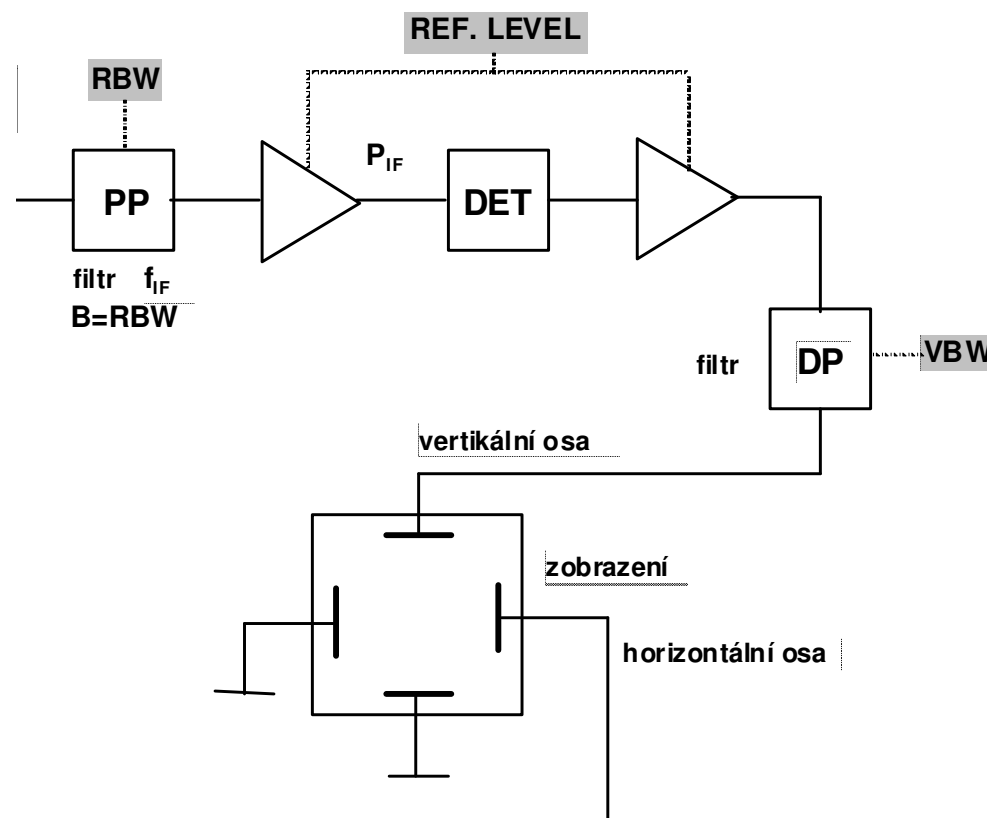
# Příklad RBW = 1- 10 – 100kHz - 1MHz

- Roste šumový práh a šířka spektra:



# Měření amplitudy = výkonu

- Měřený VF signál je zeslaben (pokud je to potřeba) atenuátorem **ATT** a zesílen několika vnitřními zesilovacími stupni
- VF výkon je v okně širokém **RBW** měřen detektorem DET
- Celkový přenos SpA určuje **REFERENCE LEVEL** = výkon odpovídající horní vodorovné ose zobrazení
- **REFERENCE LEVEL** → lze nastavit typ. +30dB až -60dBm
- Display → 10 dílků horizontálně a 10 dílků vertikálně
- Při 10dB/div je k dispozici dynamický rozsah 100dB
- Video filtr = nastavitelná DP za detektorem
- **VBW** = -3dB mezní frekvence DP
- Snižuje šp-šp amplitudu šumu
- Nemění šumový práh





# Základní měřicí funkce SpA

- **FREQ-CENTER**
- **SPAN**
- **REF LEVEL**
- **SWEEP TIME**
- **RBW**
- **VBW**
- **ATT**

nastavení střední frekvence zobrazení (střední svislá osa)

nastavení frekvenčního rozsahu zobrazení

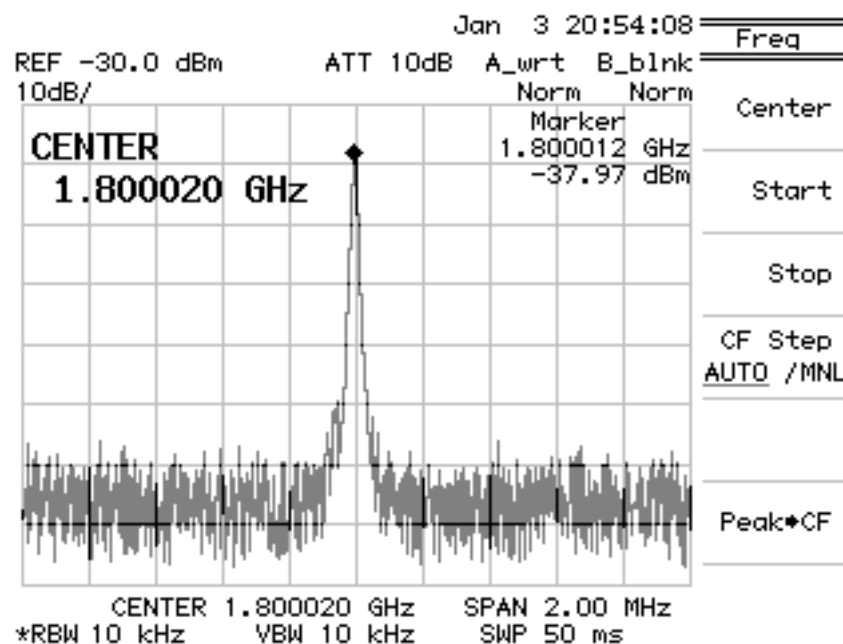
vstupní VF výkon odpovídající horní vodorovné ose

doba 1 zobrazení, doporučený režim AUTO, závisí na RBW, SPAN

nastavení šířky měřicího okna

nastavení šířky DP za detektorem

vstupní atenuátor, většinou AUTO



# Shrnutí - VF a mikrovlnná měření

- **Měřicí přístroje:**

- 50Ω vstupy / výstupy
- Často velmi drahé

- **Často používaná zařízení:**

- Měřiče výkonu
- Čítače = měřiče frekvence
- Skalární analyzátory
- VNA
- Spektrální analyzátory
- Analyzátory signálů = modulací
- Analyzátory šumu