

Technika bezdrátové komunikace

B2B17TBK

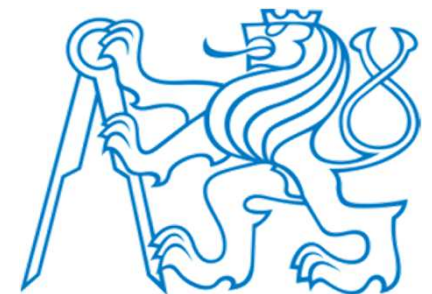
Část 4 - Komponenty VF a mikrovlnných radiových systémů

Přemysl Hudec

ČVUT-FEL katedra elektromagnetického pole

hudecp@fel.cvut.cz

verze 2025



Obsah

- Přenosová vedení
- Konektory, adaptéry
- Bezodrazové koncovky, atenuátory
- Filtry, duplexery
- Děliče výkonu / slučovače
- Zesilovače
- Směšovače
- Oscilátory
- Násobiče frekvence
- VF přepínače

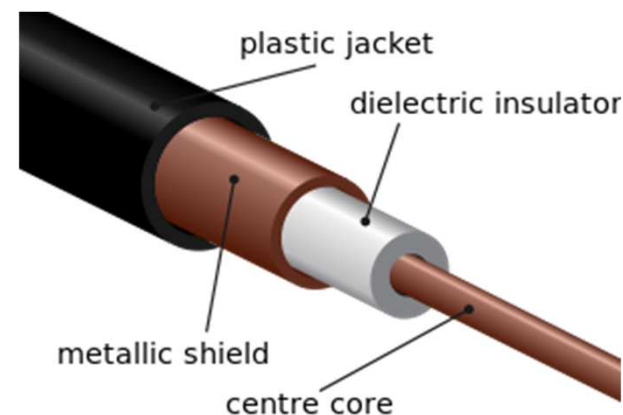


Leads

CASE STYLE: AT1029

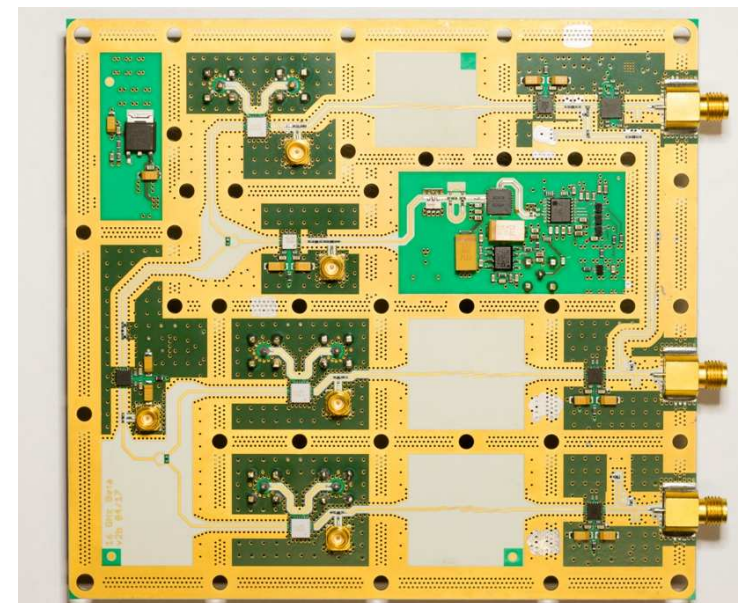


CASE STYLE: FF658



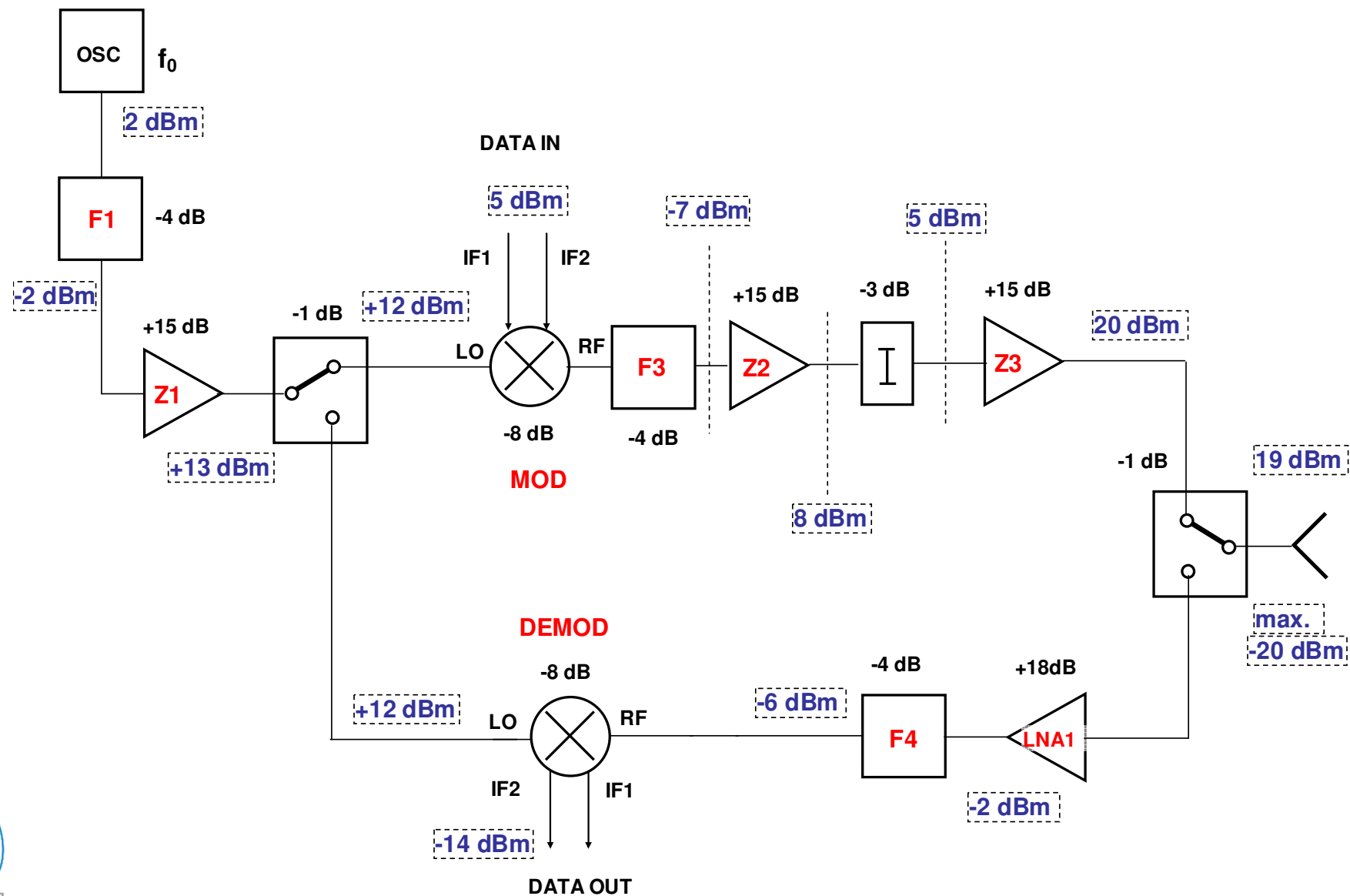
VF a mikrovlnné systémy

- Bezdrátové komunikační zařízení a systémy, radary, RFID, měřicí systémy, ...
- Skládají se ze standardních komponent:
 - Oscilátory
 - Zesilovače
 - Filtry
 - Směšovače, modulátory, demodulátory
 - Přepínače
 - Násobiče frekvence
 - Atenuátory, bezodrazové koncovky
 - Děliče výkonu
 - Antény - podrobnosti dále v kurzu
 -
- Komponenty a obvody jsou vždy propojovány pomocí definovaných přenosových vedení (TL)



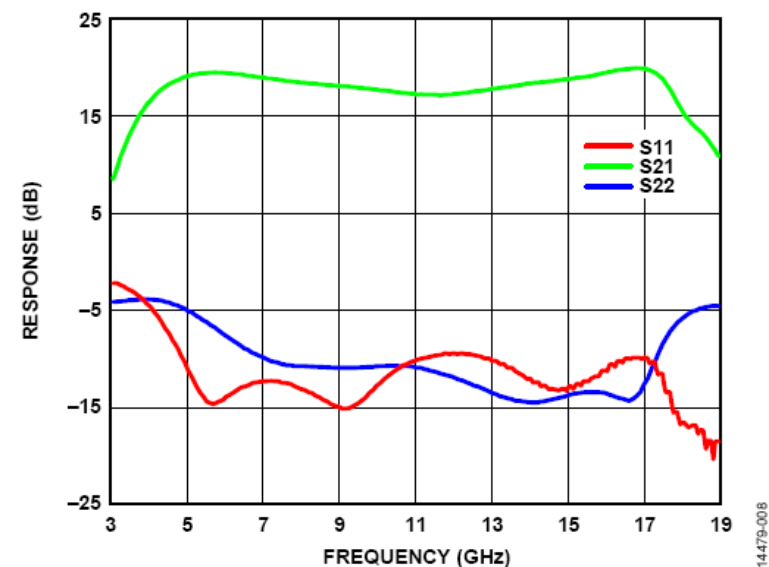
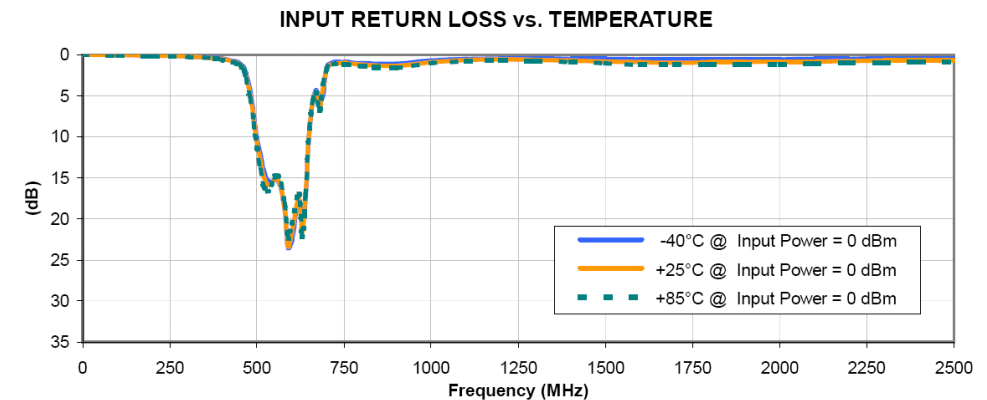
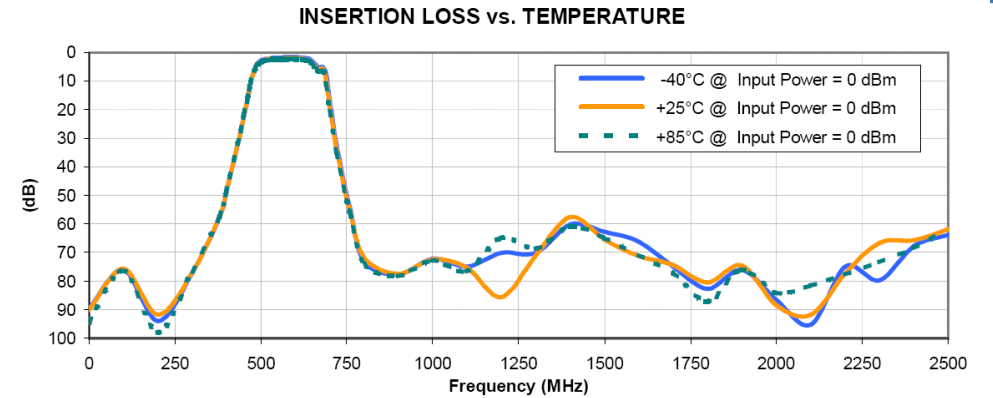
Příklad: Transceiver TDMA

- Blokové schéma:



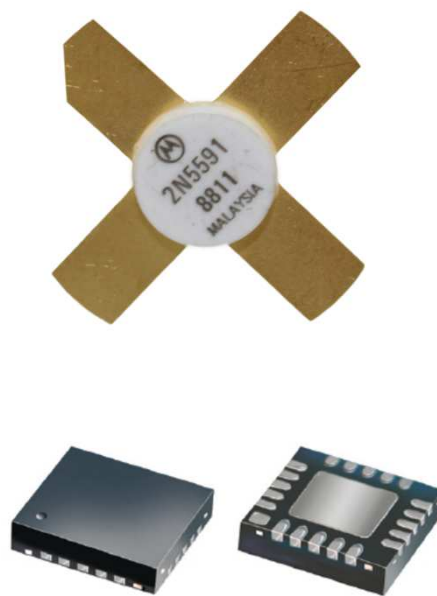
Důležité parametry

- **Přenosové parametry** → výkonový zisk G , vložný útlum IL (v AWR = dBs_{21})
- Také F , $IP2$, $IP3$, L_c , ...
- **Impedanční přizpůsobení** - v propojovacích rovinách (např. na konektorech) musí všechny VF obvody vykazovat impedanci blízkou $Z_0=50\Omega$
- Tato podmínka se často vyhodnocuje pomocí RL (v AWR = dBs_{11} , dBs_{22}) nebo SWR
- **Impedanční přizpůsobení** → podmínka $RL > 10\text{dB}$ (lépe $> 20\text{dB}$)
- Méně jen ve výjimečných případech

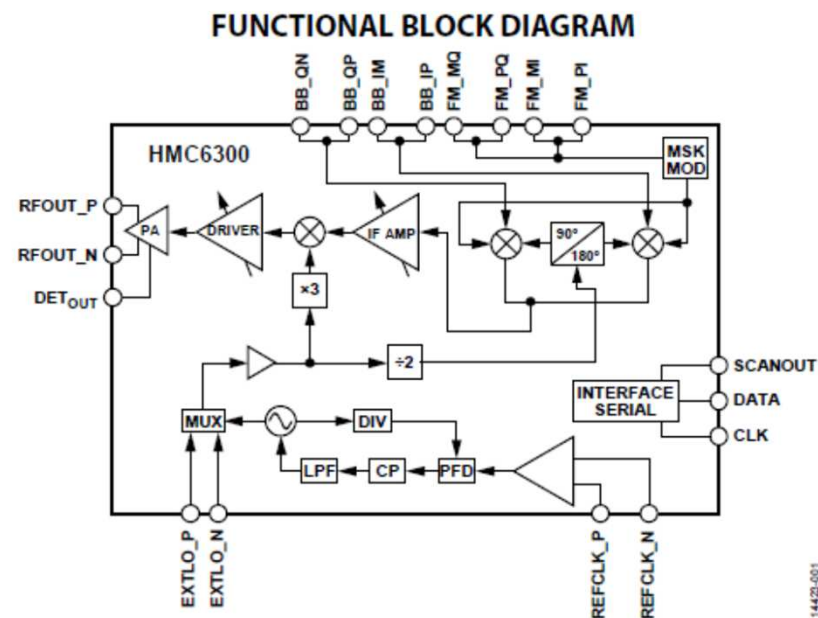


Diskrétní x integrované

- VF a mikrovlnné obvody:
 - Skládají se z **diskrétních SMD prvků** - R, L, C, tranzistory, diody, ...
 - Mohou být integrované → více prvků skládajících složitější obvod nebo subsystém – systém na 1 čipu nebo v 1 modulu
 - **Mikrovlnné monolitické integrované obvody (MMIC)** - od relativně jednoduchého zesilovače až po celé VF transceivery nebo radary
 - Moderní VF obvody - velmi vysoká integrace, např. **všechny VF části mobilního TF jsou v 1-2 MMIC, automobilový radar = 1 MMIC**



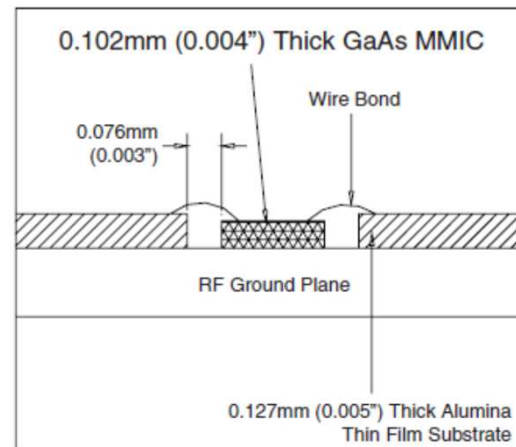
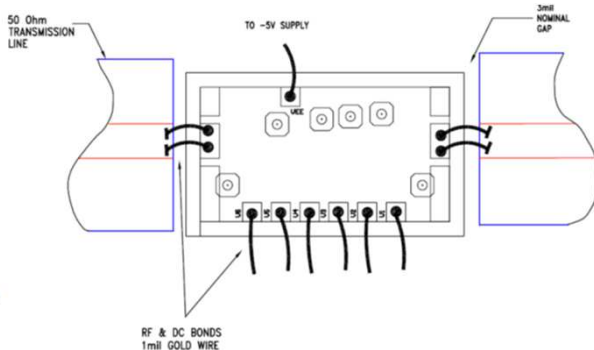
CASE STYLE: DG983-2



Pouzdra

- Mnoho různých možností:
 - **Obvody v krabičkách** se vstupními/výstupními Z_0 konektory
 - **Moduly** se vstupními/výstupními Z_0 přenosovými vedeními
 - **MMIC** → **čipy nebo pouzdřené**:
 - Materiály Si, GaAs, InP, GaN
 - Z_0 vstupy/výstupy, přizpůsobovací obvody na čipu
 - Samotné čipy nebo QFN pouzdra
 - **Nyní většina moderních VF obvodů = MMIC**

- Např.: www.analog.com, www.qorvo.com, www.minicircuits.com



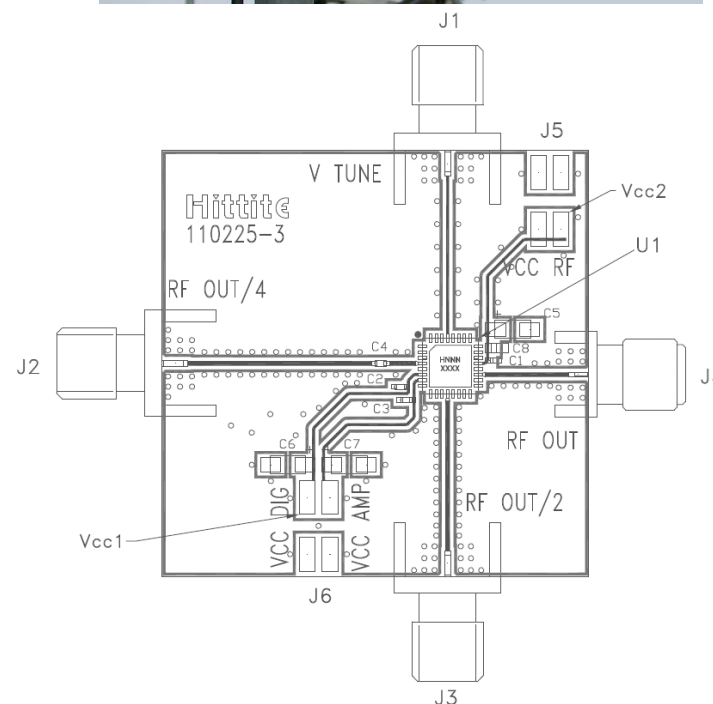
CASE STYLE: HU1186



CASE STYLE: DG983-2

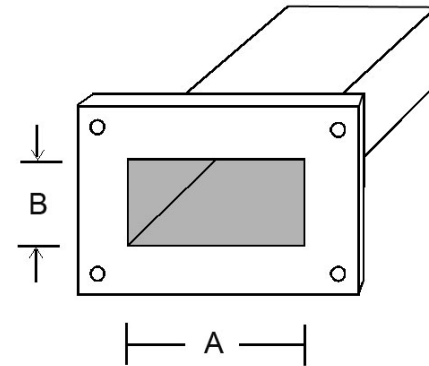
Přenosová vedení TL

- 3 základní typy / aplikace:
 - Propojovací vedení** → propojení obvodů a subsystémů (např. anténa + RX, ...)
 - Planární TL** → potřebné pro konstrukci miniaturních VF obvodů využívajících SMD komponenty → tranzistory, MMIC, ...
 - Konektory**
- TL jsou nepostradatelné součásti všech radiových systémů
- Jsou na MMIC čípech, v mobilních TF, v základnových stanicích (BS), WiFi routerech, automobilových radarech, ...
- V současné době je důraz kladen na miniaturizaci – kde to jde, tak se používají planární TL



Propojovací TL - vlnovody

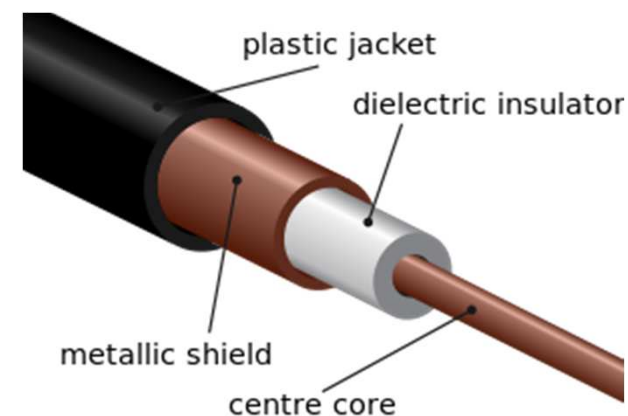
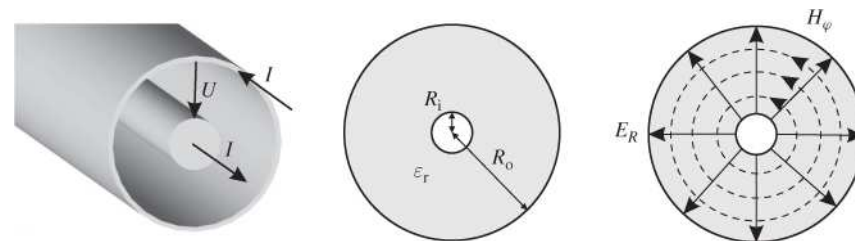
- Propojovací TL = koaxiální vedení, vlnovody
- **Vlnovody:**
 - Fungují v nich složitější vidy TE_{xx} , TM_{xx}
 - Vykazují **dolní mezní ("cut-off") frekvenci** a **horní frekvenci dominantního vidu**
 - Příklad: vlnovod R100 má vnitřní rozměry 20,86x10,16mm → cut-off frekvence = 6,557GHz, horní frekvence dominantního vidu TE_{10} = 13,114GHz
 - Mechanicky rozměrné, dosti drahé
 - **ALE - velmi nízké útlumy, vysoké výkony**
 - Aplikace:
 - Systémy s velmi vysokými výkony (radary, vysoušení, ...)
 - Systémy pracující na velmi vysokých GHz frekvencích >30GHz (mm-pásmo) - např. www.erevant.com
- Pro ostatní aplikace jsou preferována koaxiální vedení → širokopásmovější, menší, ohebná, levnější
- **ALE - vlnovody se stále vyrábějí a používají**



Propojovací TL - koaxiální kabely

• Koaxiální kabely:

- Nejpoužívanější TL
- Vid TEM, ale vykazují horní frekvenci použití
- **Standardní charakteristické impedance:**
 - $50\Omega \rightarrow$ radiové komunikace, radary, ...
 - $75\Omega \rightarrow$ TV aplikace
- Mnoho výrobců, mnoho různých typů, struktur, materiálů
- Malé průměry (<5mm):
 - Ohebné, vyšší mezní frekvence
 - ALE vysoký útlum
- Velké průměry (až třeba ~30mm):
 - Tuhé, nízké horní frekvence
 - ALE malý vložný útlum

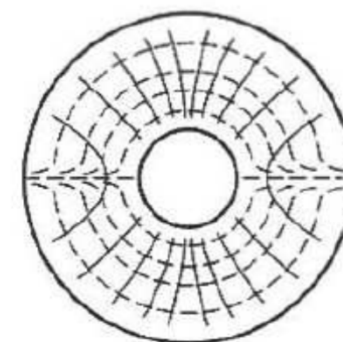


• Horní frekvence:

- **Objevuje se vlnododový vid**

$$f_{\max} = \frac{c}{\pi(R_o + R_i)\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Úplně jiné rozložení pole, impedance, fázová konstanta, ...



Field lines for TE₁₁ mode of a

Příklady: Koaxiální kabely

- LMR-100A** = tenký VF koaxiální kabel

- www.timesmicrowave.com
- $D_i=0,46$ mm, $D_o=1,65$ mm, vnější průměr 2,8 mm
- $C/l=101,1$ pF/m $L/l=0,25$ μH/m
- PE dielektrikum $\epsilon_r = 2,3$

$$\hat{Z}_0 = \sqrt{\frac{L/l}{C/l}} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10^{-6}}{101,1 \cdot 10^{-12}}} = 49,73 \Omega$$

| f [MHz] | 30 | 150 | 450 | 900 | 1800 | 2500 | 5800 |
|----------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| $L/100$ m [dB] | 12,9 | 29,4 | 51,9 | 74,9 | 109,0 | 130,6 | 210,3 |



- LMR-400A** = střední průměr

- $D_i=2,74$ mm, $D_o=7,4$ mm, vnější průměr 10,3 mm
- $C/l=78,4$ pF/m $L/l=0,2$ μH/m
- Pěnové PE dielektrikum $\epsilon_r = 1,38$

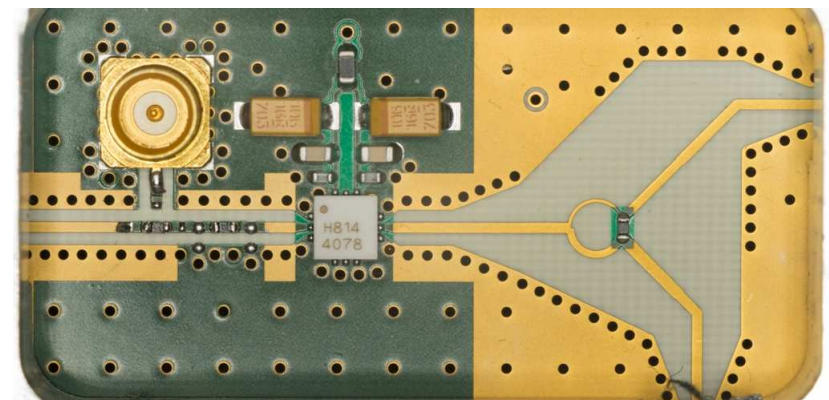
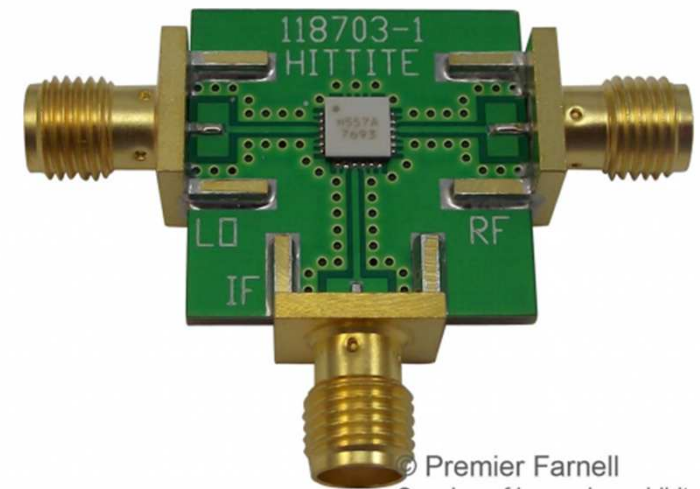
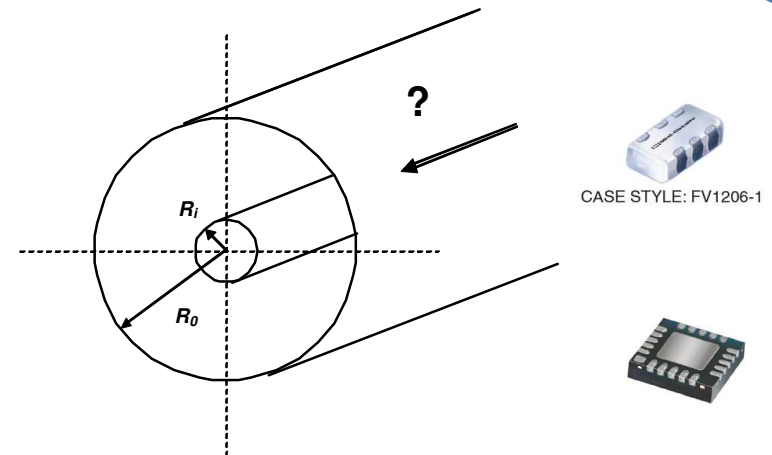
$$\hat{Z}_0 = \sqrt{\frac{L/l}{C/l}} = \sqrt{\frac{0,2 \cdot 10^{-6}}{78,4 \cdot 10^{-12}}} = 50,51 \Omega$$

| f [MHz] | 30 | 150 | 450 | 900 | 1800 | 2500 | 5800 |
|----------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| $L/100$ m [dB] | 2,2 | 5,0 | 8,9 | 12,8 | 18,6 | 22,2 | 35,5 |



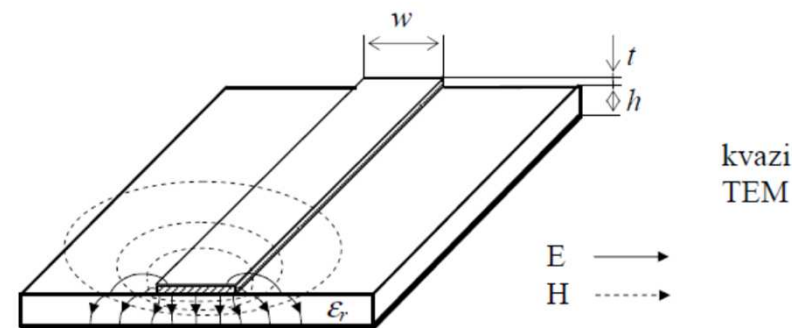
Planární TL

- Koaxiální kabely nejsou vhodné pro konstrukci moderních VF obvodů
- Například je velmi složité zapojit jakékoliv SMD komponenty
- Proto byly vyvinuty jiné vhodnější struktury → **planární TL:**
 - Obdobné jako PCB
 - Podobná výroba a osazování
 - ALE pro výrobu VF substrátů se používají kvalitnější dielektrické materiály
- **Dielektrické materiály:**
 - Na VF velmi nízké ztráty
 - Homogenní
 - Příklady: www.rogerscorporation.com



Mikropáskové TL

- Pásky šířky W na substrátech s výškou h , relativní permitivitou ϵ_r a ztrátovým činitelem $\text{tg}\delta$
- Vid = přibližně (kvazi) TEM
- V jednoduchých případech lze použít standardní laminát FR4 ($\epsilon_r=4$, $\text{tg}\delta=0,01$)
- Profesionální VF substráty - nižší ztráty ($\text{tg}\delta\sim 0,001$) lepší homogenita, drahé
- Příklad výpočetního vztahu pro Z_0 :



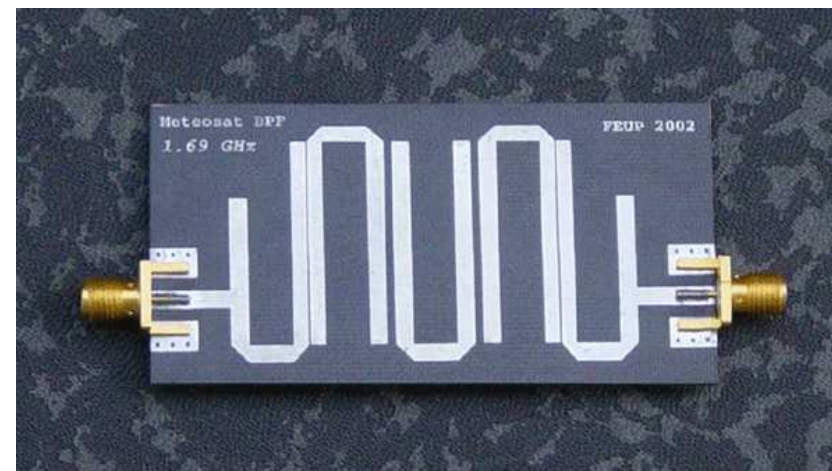
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \left[\ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) - \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right]$$

- **Výhody:**

- Standardní PCB výroba = fotorezist, maskování, leptání
- Standardní osazování - zejména SMD komponent

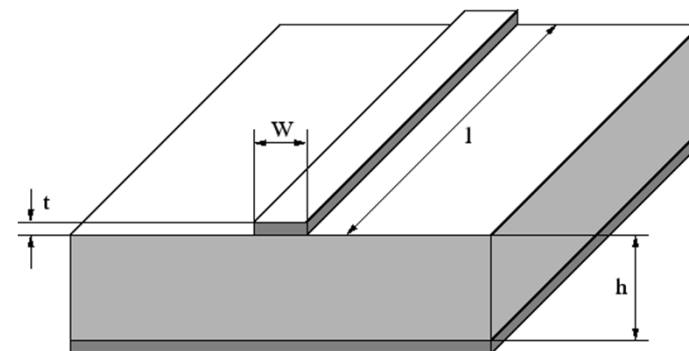
- **Nevýhody:**

- Otevřená struktura - musí být ve stíněných boxech
- Zemnění - musí být vytvořeny prokovky (via-holes)
- Vyšší průchozí útlum IL



Příklad: Mikropáskové TL

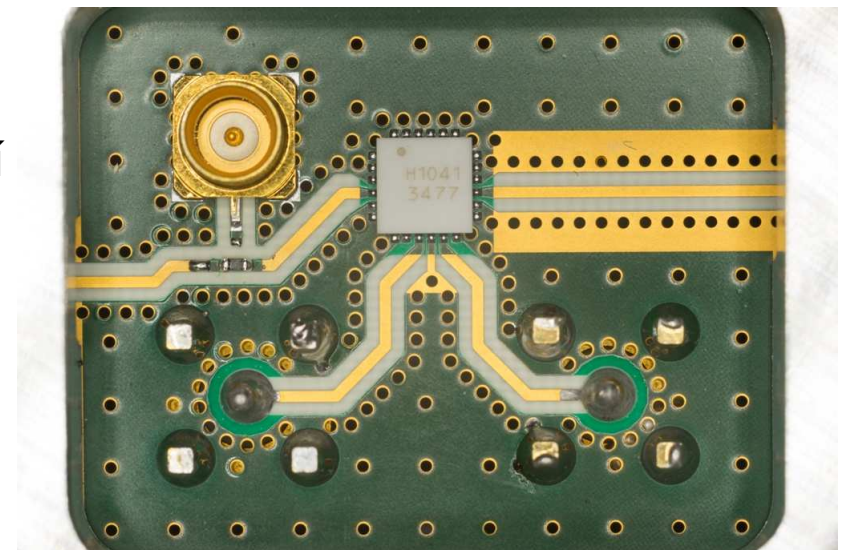
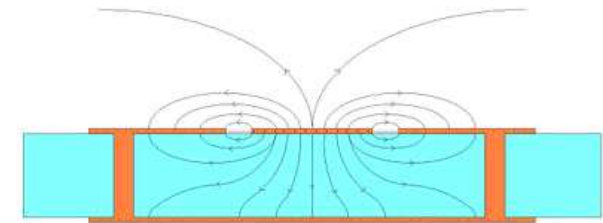
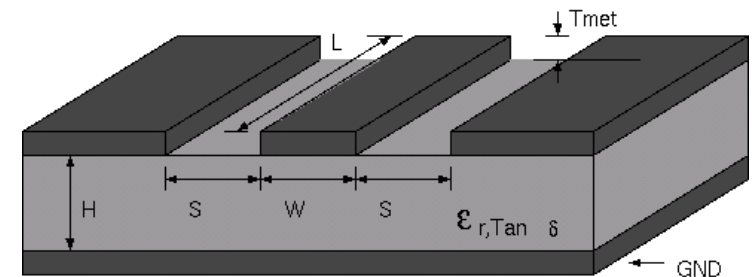
- Praktické výpočty: AWR TXLINE
- Realizovatelné hodnoty Z_0 - od cca 30 do 110Ω
- Omezení $W > 0,1\text{mm}$ a $W < \lambda/4$
- Příklad: S použitím materiálu ROGERS RO4350B (www.rogerscorporation.com)
 $h = 0,504\text{mm}$, $\epsilon_r = 3.66$, $\text{tg}\delta = 0.0036$ navrhnete na frekvenci $f = 10\text{GHz}$ **mikropásková vedení s impedancemi Z_0 od 20 do 110Ω**
- Výsledky \rightarrow v připojené tabulce



| $Z_0 [\Omega]$ | 20 | 30 | 50 | 70 | 90 | 110 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| $W [\text{mm}]$ | 3,87 | 2,28 | 1,06 | 0,56 | 0,31 | 0,16 |
| $L [\text{dB/m}]$ | 7,7 | 7,4 | 7,2 | 7,1 | 7,3 | 7,7 |
| $\epsilon_{eff} [-]$ | 3,2 | 3,1 | 2,8 | 2,7 | 2,6 | 2,4 |

Koplanární vedení (CPW)

- Jak střední pásek, tak i zemní plochy jsou na jedné straně PCB
- E se uzavírá mezi středním vodičem a zemními plochami
- Nejčastěji - zemněný ("grounded") GCPW
- **DŮLEŽITÉ - všechny země musí být na stejném potenciálu → nutné je použití mnoha prokovek ("via-holes")**
- Výhody GCPW:
 - Velmi dobrá zem na horní straně PCB
 - Lze současně měnit W a S a udržet Z_0 konstantní
 - Velmi vhodné pro napojení MMIC
- Pravděpodobně nejvíce používané TL pro konstrukci moderních miniaturních VF zařízení (mobilní TF, Wi-Fi modemy, ...)
- ALE - hůře se realizují filtry, děliče výkonu, ...



VF konektory

- Pro rozebíratelné spojení VF obvodů a subsystémů
- **Nejdůležitější parametry:**
 - Impedance - co nejpřesněji Z_0
 - Perfektní stínění
 - Vysoká opakovatelnost spojení
- Instalují se na kabely, mikropásková i koplanární vedení
- Impedance: 50Ω nebo 75Ω
- Typy → standardizované: BNC, N, SMA, 3.5mm, 2.9mm, 2.4mm, 1.8mm, 1mm
- **Vykazují horní frekvenci použití (TEM)**
- Miniaturní konektory:
 - Nižší VF výkon
 - Vyšší horní frekvence



- Robustnější typy:
 - Vyšší VF výkon
 - Ale nižší horní frekvence
- Pohlaví:
 - Male
 - Female

Standardní 50Ω konektory

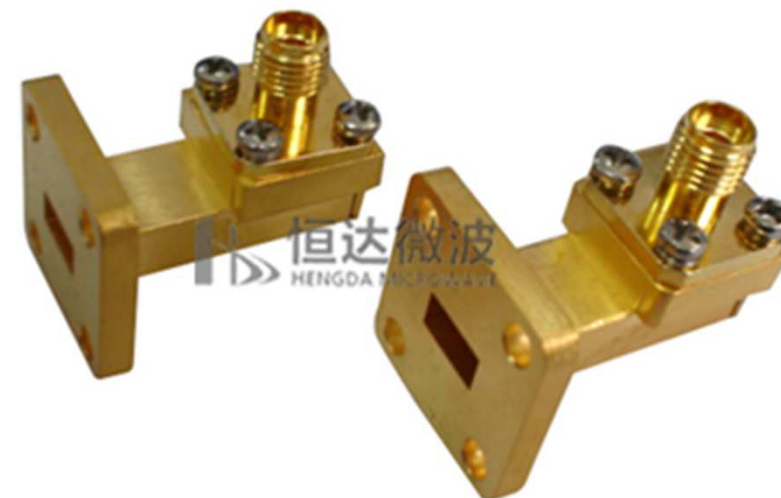
- N $R_o=7\text{mm}$, robustní, <18GHz
- BNC horší zem, <4GHz
- SMA nejpoužívanější, <24GHz
- 3.5mm $R_o=3.5\text{mm}$, <33GHz
- 2.9mm $R_o=2.9\text{mm}$, <40GHz
- 2.4mm $R_o=2.4\text{mm}$, <50GHz
- 1.8mm $R_o=1.8\text{mm}$, <66GHz
- 1.0mm $R_o=1.0\text{mm}$, <110GHz
- Konektory < 3.5mm, $f>33\text{GHz}$, zvenku stejné (podobné), liší se vnitřními průměry
- Při záměně je lze snadno zničit
- Další používané typy:
 - SMB, SMC, SMP, U-FL, ... (příklady na www.farnell.com, www.mouser.com, ...)
 - Horní frekvence - odpovídají rozměrům





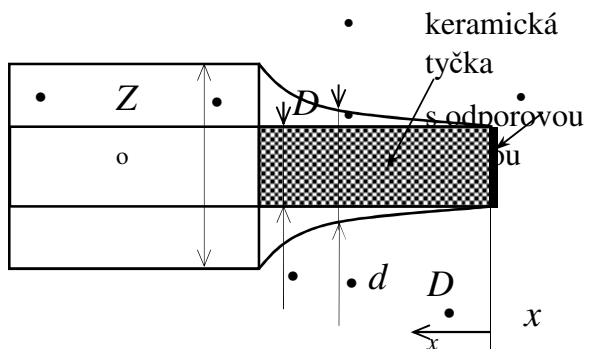
Adaptéry

- Nepostradatelné vybavení každé VF a mikrovlnné laboratoře
- **Vyrábějí se kombinace téměř všech typů a pohlaví, například:**
 - N-male SMA-male
 - N-male SMA-female
 - N-female SMA-male
 - N-female SMA-female
 -
- Mohou být velmi drahé - obzvláště typy <2,4mm pro vysoká GHz pásma
- Vyrábí se také všechny potřebné přechody **koaxiál-vlnovod**



Bezodrazové koncovky

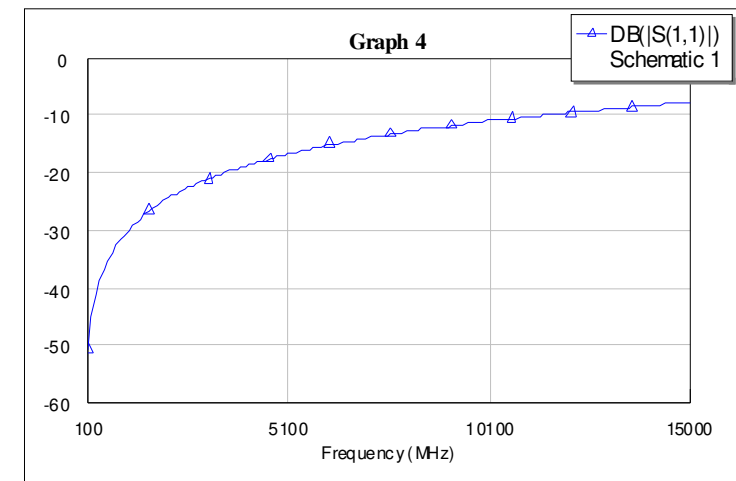
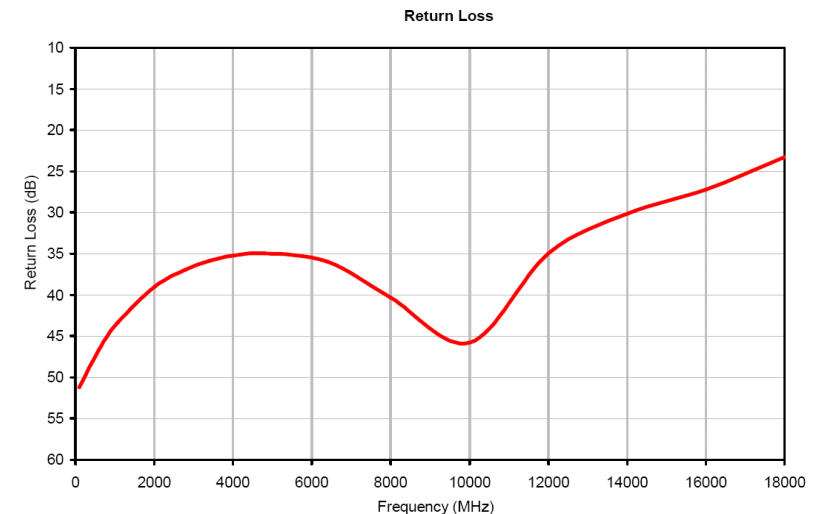
- **Perfektní impedanční zakončení Z_0 , neodráží se skoro žádný VF výkon**
- Velmi vysoké $RL > 25$ dB → "black body"
- Širokopásmové → např. 0-18GHz
- **Příklad:** ANNE-50+ (www.minicircuits.com)
 - 0-18GHz, konektor SMA, $RL > 23$ dB



- Realizace SMD odporem - funkce omezená parazitními C a L
- **Příklad:** Rezistor 50Ω velikosti 0402 na konci mikropásku
- Použitelné do ~ 7 GHz, $RL > 15$ dB



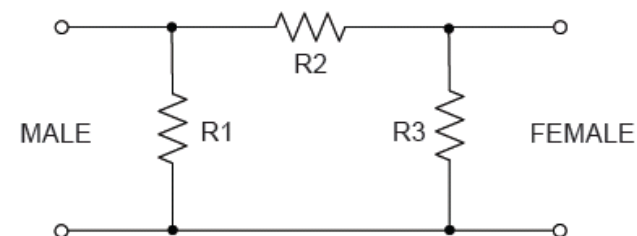
CASE STYLE: LL561



Atenuátory

- Snižují VF výkon $L = P_{in} / P_{out}$
- Důležitý parametr → vysoké RL
- Použití: Nastavení VF zesilovačů, nastavení výstupního výkonu TX, měření, ...
- 3 základní typy:
 - **Pevné**
 - **Proměnné - analogové**
 - **Proměnné - digitální**
- Pevné atenuátory
 - 3 odpory
 - T nebo Π články
 - 2 rovnice pro 2 neznámé – parametry L , Z_0
- Realizace:
 - Koaxiální s konektory
 - MMIC
 - Ze 3 SMD odporů

Electrical Schematic



CASE STYLE: FF658



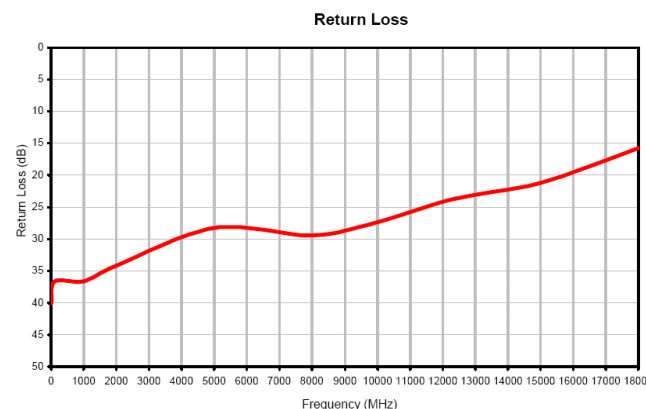
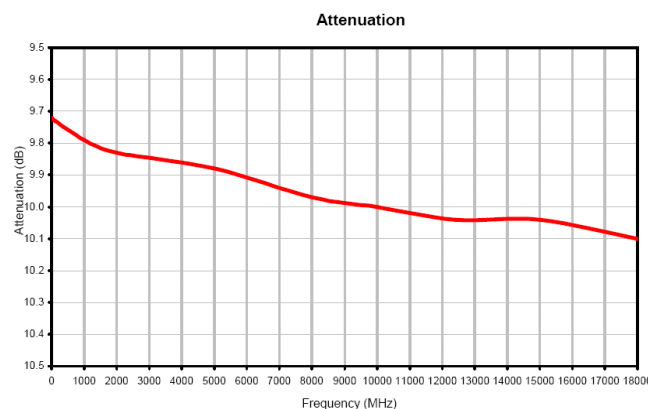
CASE STYLE: MC1630

Příklady: Pevné atenuátory

- Koaxiální: BW-SxxW2 series (minicircuits.com)
 - xx = útlum v dB, 1...50dB
 - 0 - 18GHz, $RL > 15\text{dB}$



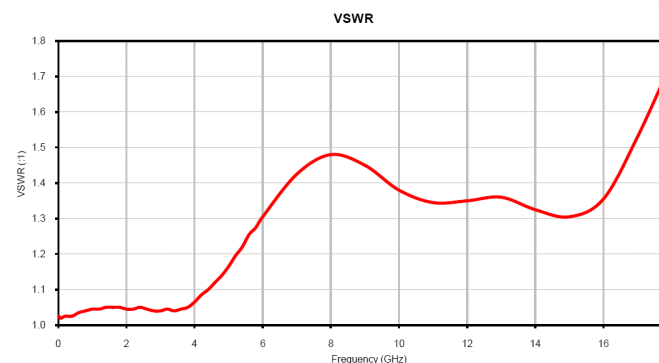
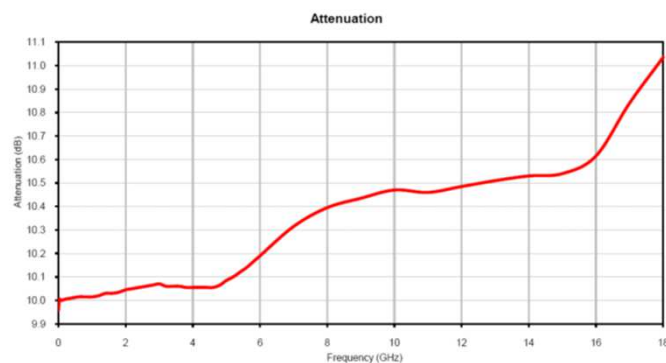
CASE STYLE: FF658



- MMIC: YAT-xx series (minicircuits.com)
 - xx = útlum v dB, 0 ...30dB
 - Pouzdro 2x2mm, 0-18GHz, $SWR < 1,75$ $RL > 11,3\text{dB}$



CASE STYLE: MC1630

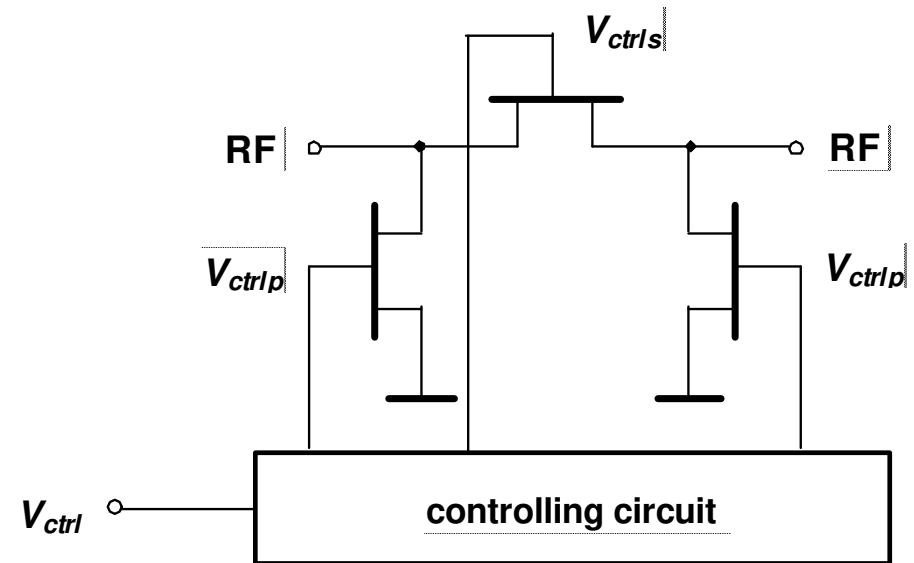
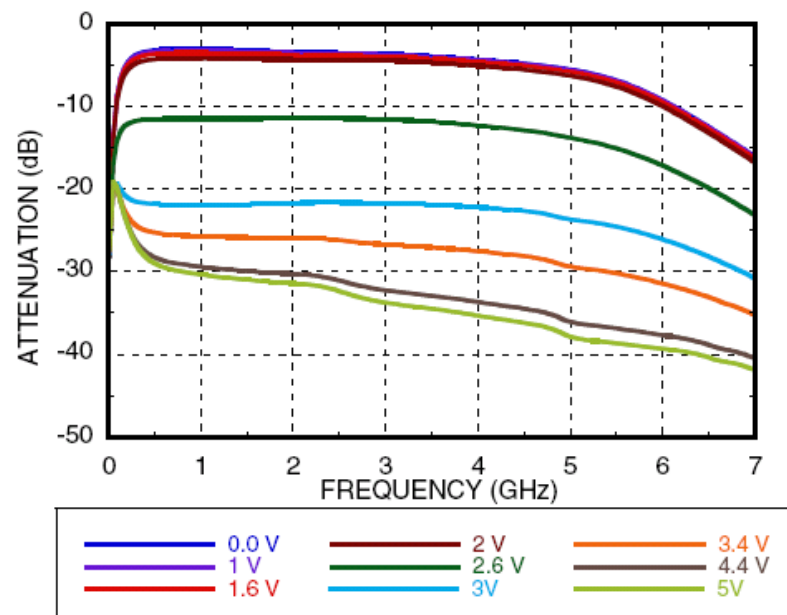


$$|\hat{\Gamma}| = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

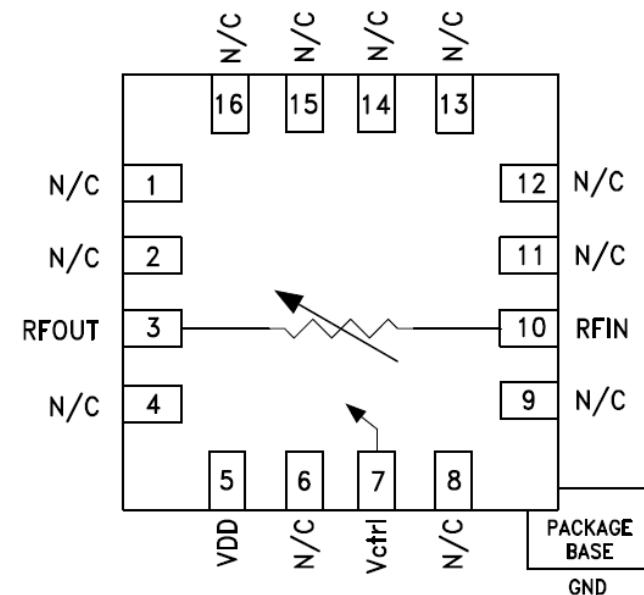
Proměnné atenuátory - analogové

- 3 FETy místo odporů
- 1 až 2 řídící napětí
- Příklad: HMC973A (www.analog.com)
 - 0,5 - 5 GHz, 3 - 30dB
 - Řídící napětí od 0 do +5V
 - MMIC pouzdro 3x3mm

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



Functional Diagram

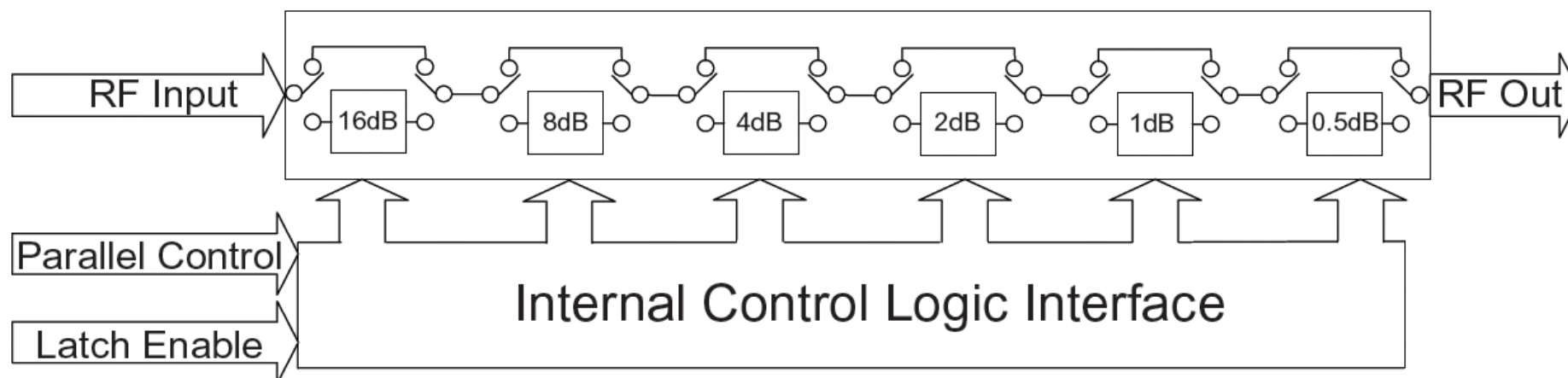


Proměnné atenuátory - digitální

- Kaskáda pevných atenuátorů a přepínačů
- Přepínací doby $\sim 10^1$ ns
- Příklad: DAT-31R5A-PN+ (www.minicircuits.com)
 - 0 - 4 GHz
 - 6-bitů \rightarrow změna 1 - 32,5dB, krok 0,5dB
 - MMIC pouzdro 4x4mm



CASE STYLE: DG983-2



Filtry

- Základní komponenty všech VF a mikrovlnných systémů → **aplikace například:**
 - Potlačení sousedních radiových kanálů = selektivita
 - Potlačení interferencí
 - Potlačení šumu
 - EMI / EMC
 - **Parametry:**
 - Nízký IL a vysoké RL v propustném pásmu
 - Vysoký IL a $RL \rightarrow 0$ v zádržném pásmu
 - Návrh \rightarrow v B2M17MIO
- **Realizace:**
 - Koaxiální
 - Planární
 - SMD moduly
 - Keramické LTCC
 - SAW, BAW



CASE STYLE: FF1118



CASE STYLE: HQ1157



CASE STYLE: FV1206-1

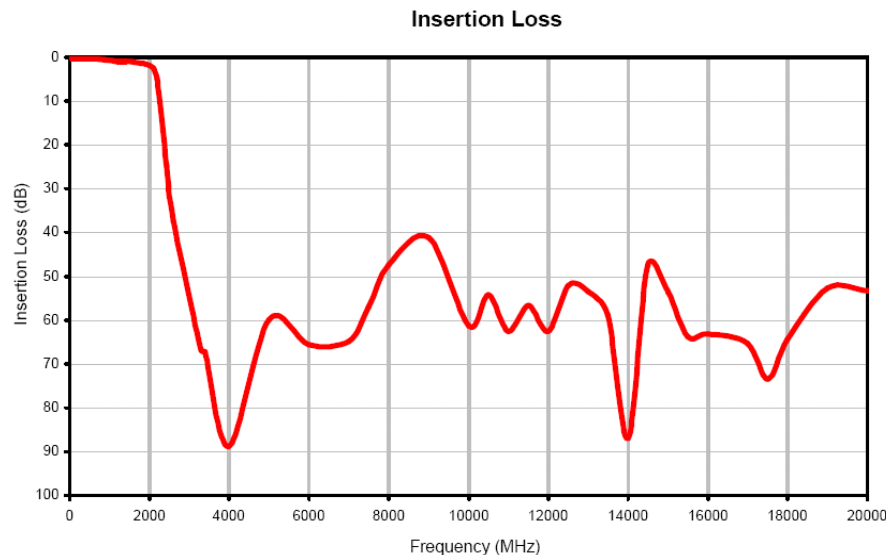
- Frekvenční závislosti:
 - **Dolní propust (DP)**
 - **Horní propust (HP)**
 - **Pásmová propust (PP)**
 - **Pásmová zádrž (PZ)**

Příklad: Filtr DP

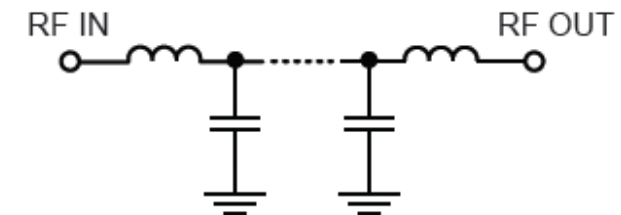
- VLFX-1350+, filtr DP, koaxiální LC (www.minicircuits.com)



CASE STYLE: FF1118



Functional Schematic

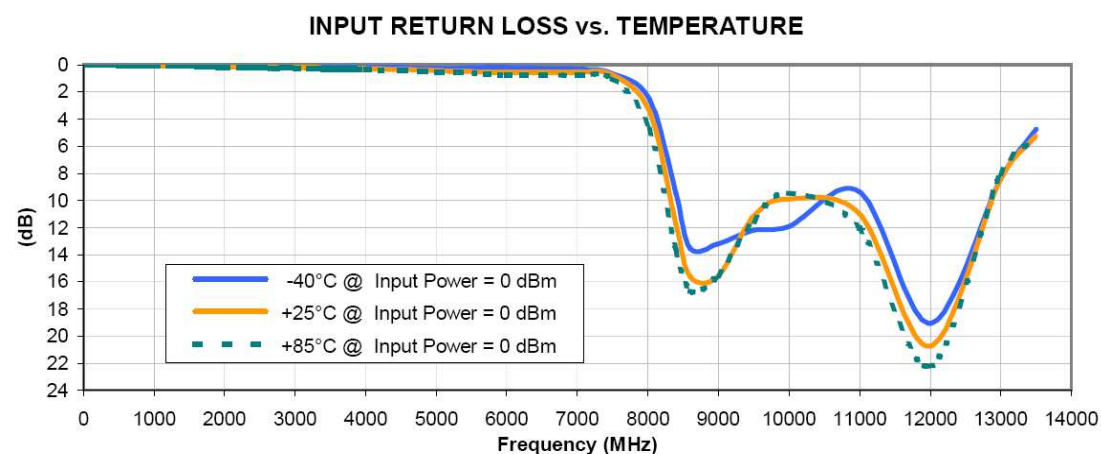
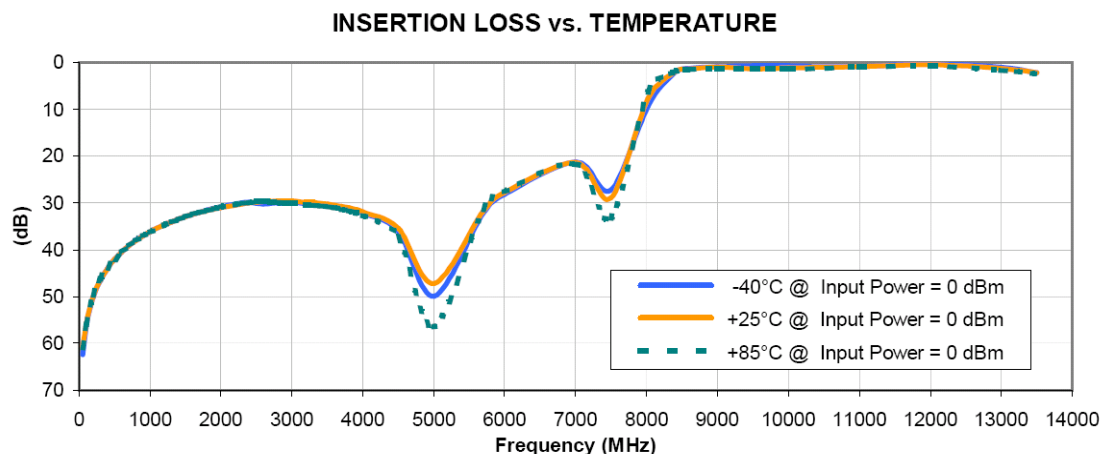


Příklad: Filtr HP

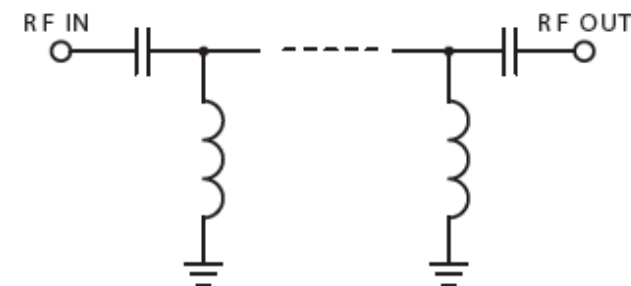
- HFCN-8400, filtr HP, keramický LTCC
- 3,2 x 1,6 x 0,89mm (www.minicircuits.com)



CASE STYLE: FV1206-1



electrical schematic

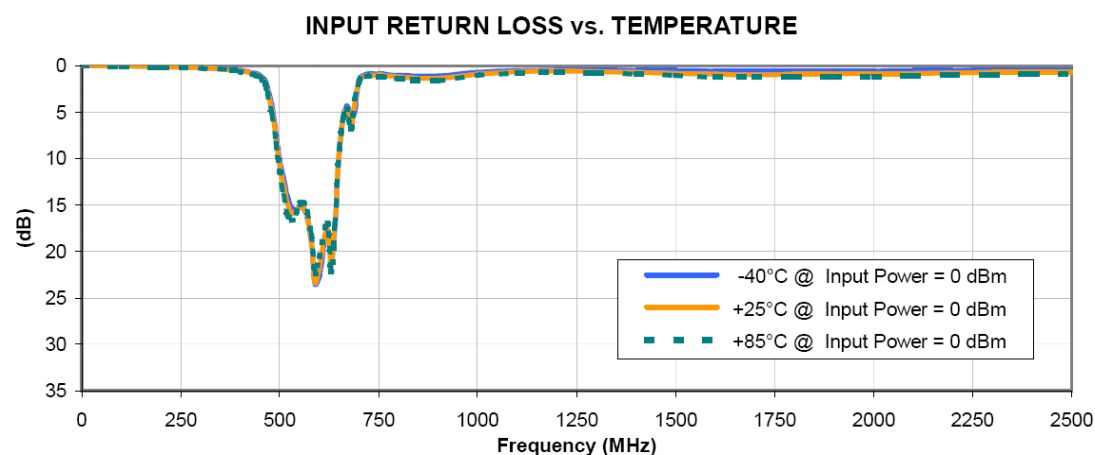
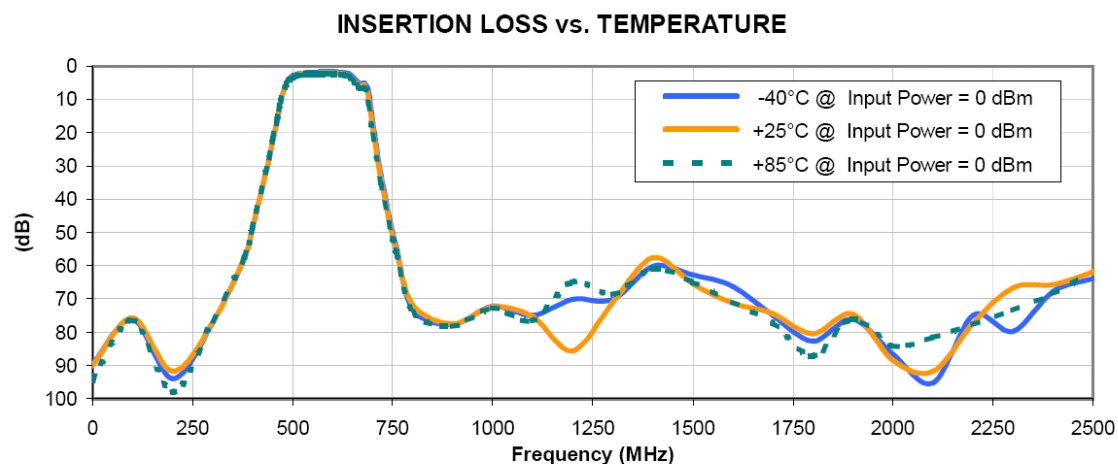


Příklad: Filtr PP

- BPF-A580+ filtr PP, provedení modul LC
- modul 9,3 x 34,5 x 8,9mm (minicircuits.com)

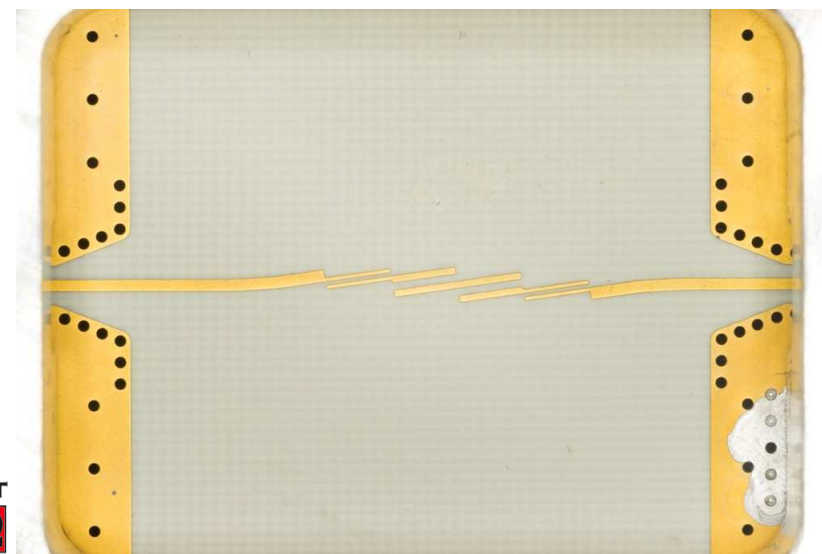
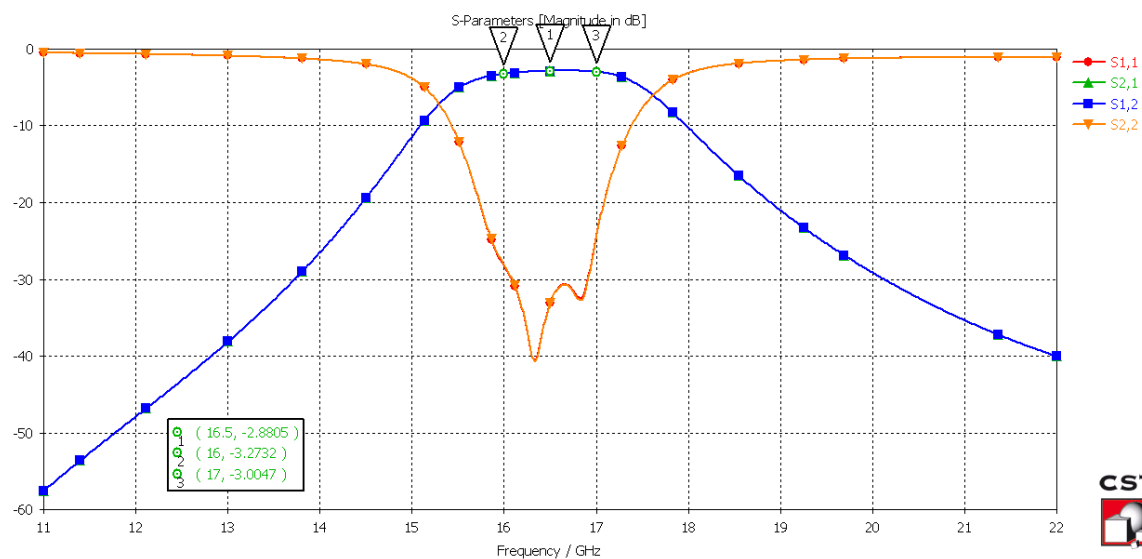
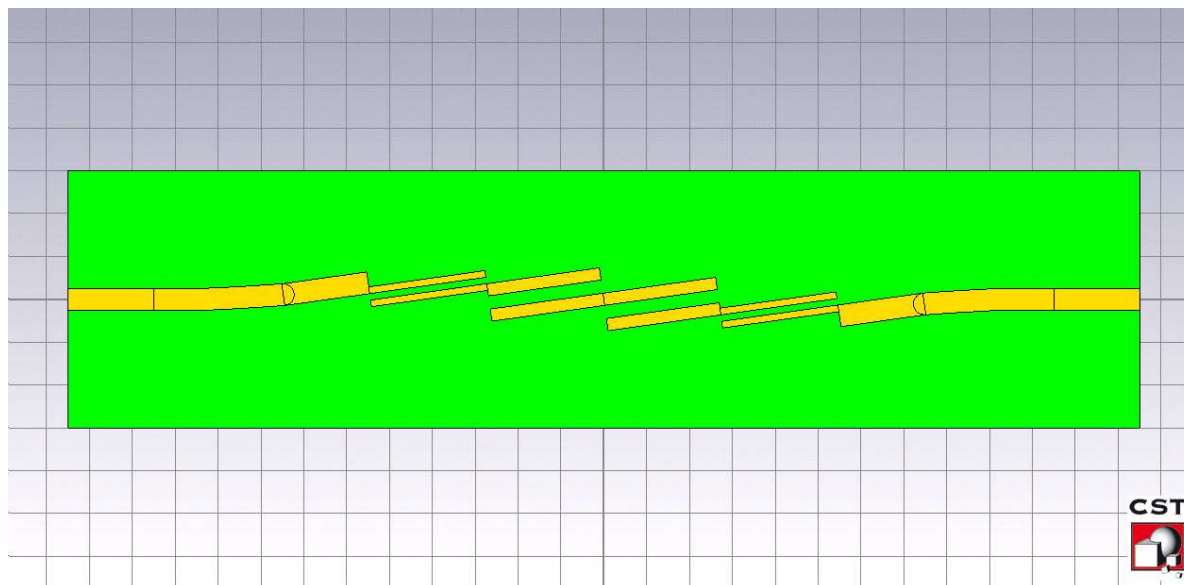


CASE STYLE: HQ1157



Příklad: Filtr PP - planární

- Mikropásková PP
 - Vázané $\lambda/2$ rezonátory
 - Analýza – úloha AWR2
 - Návrh v B2M17MIO

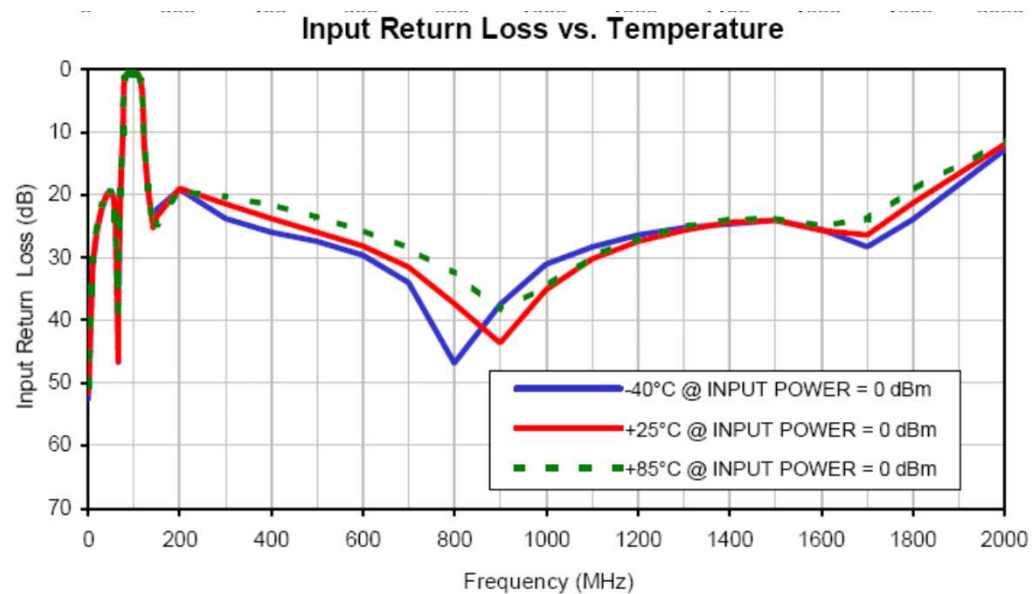
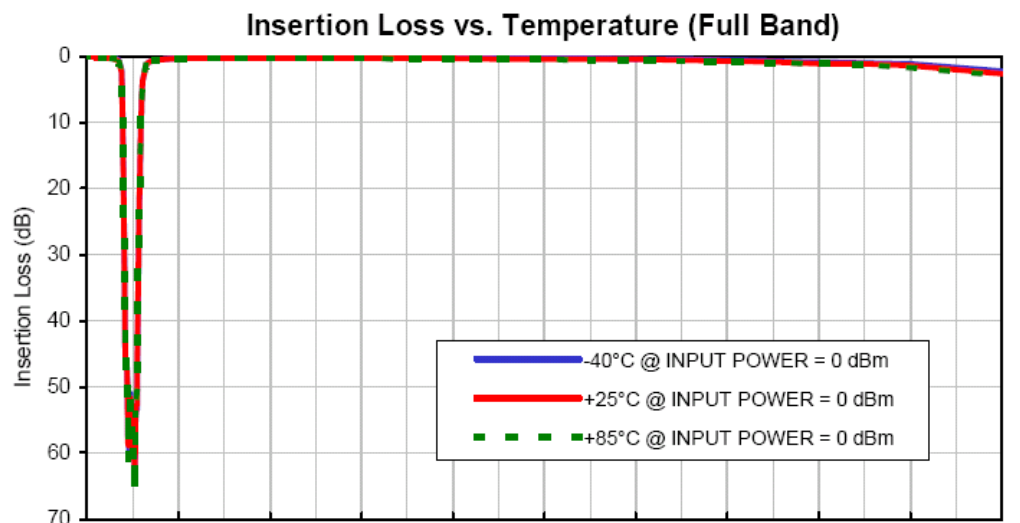


Příklad: Filtr PZ

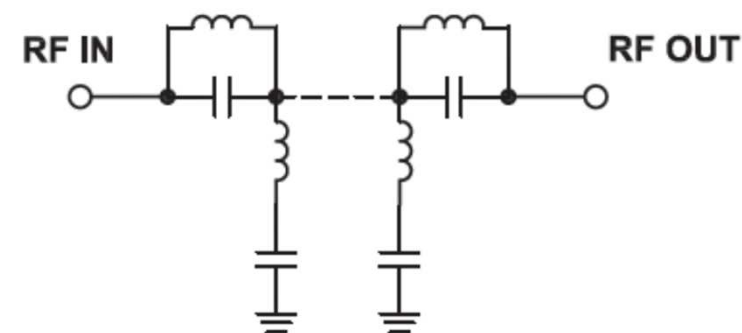
- BSF-C88108+, filtr PZ, provedení modul LC
- Modul 22,1 x 20,3 x 6,3mm (minicircuits.com)



CASE STYLE: HU1186

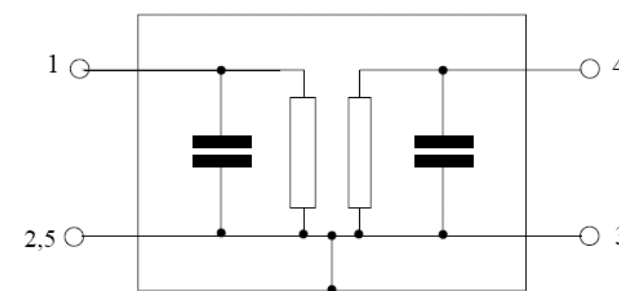
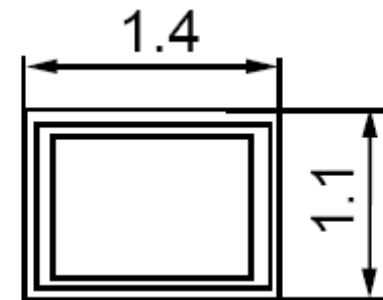


Functional Schematic

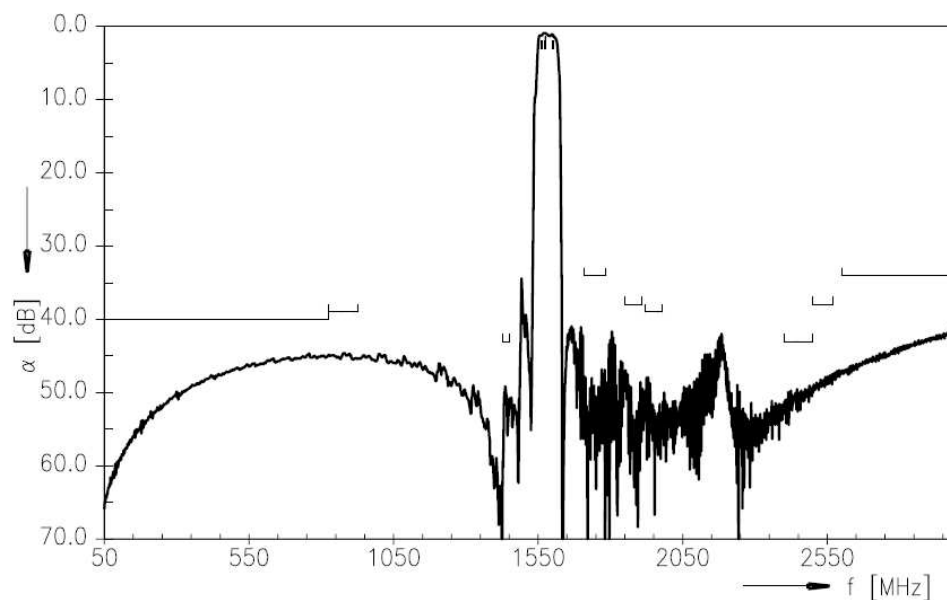


Filtry SAW, BAW

- **"Surface / Bulk Acoustic-Wave" filtry**
- Založeny na piezo-elektrickém jevu
- **Miniaturní filtry s vysokou selektivitou**
- Nepostradatelné součásti všech mobilních TF, ...
- Příklad: B4327 BPF (Qualcomm)
 - 1550 - 1605 MHz (GPS, GALILEO)
 - 1,4 x 1.1 x 0,4 mm



Transfer function (wideband)



Diplexery

- Speciální filtry určené pro **sloučení TX a RX do 1 antény** v FDMA radiových transceivrech

- Velmi nízký slučovací útlum
- Ale TX a RX musí pracovat na různých frekvencích

- Vykazují mrtvé pásmo ("dead band")

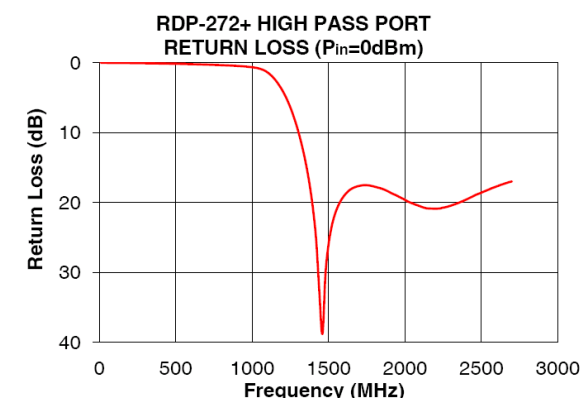
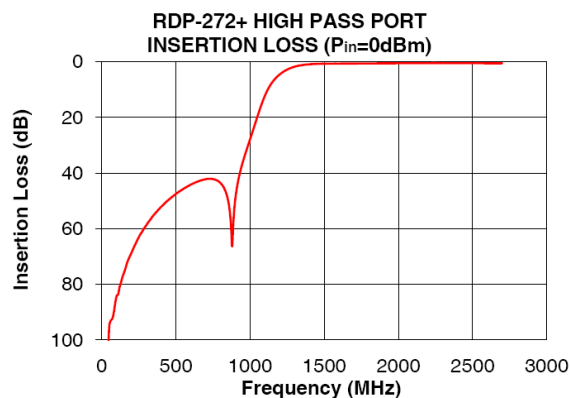
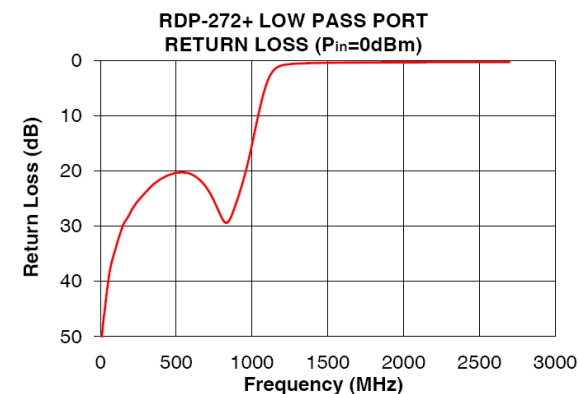
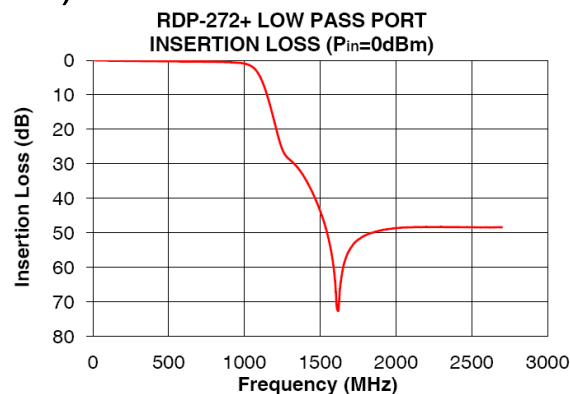
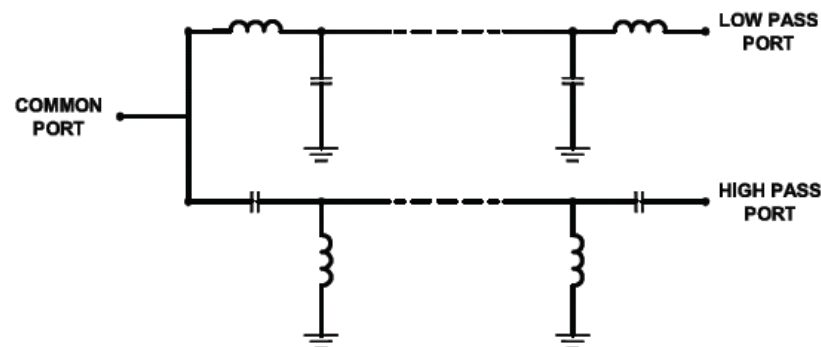
- Příklad: RDP-272+ diplexer

- minicircuits.com
- Pásmo 1: DC-950 MHz
- $IL < 0,7\text{dB}$
- Pásmo 2: 1700-2700 MHz
- $IL < 0,7\text{dB}$
- Modul 12,7 x 12,7 x 4,6mm



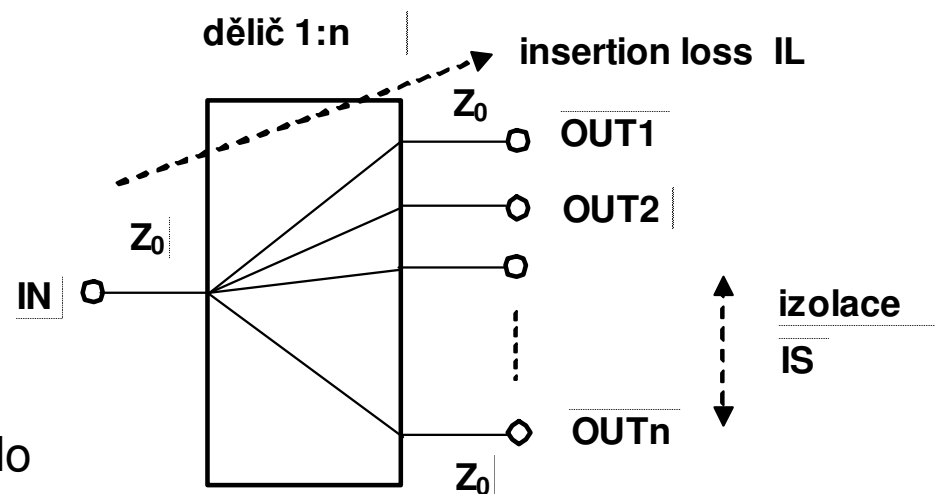
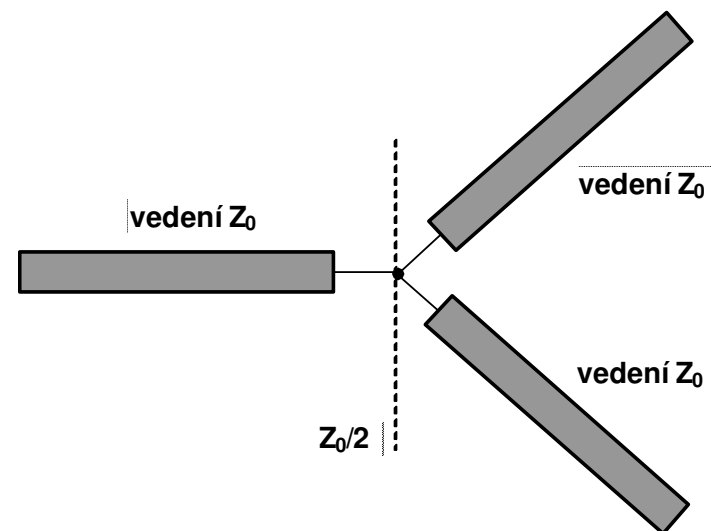
CASE STYLE: CK605

Functional Schematic



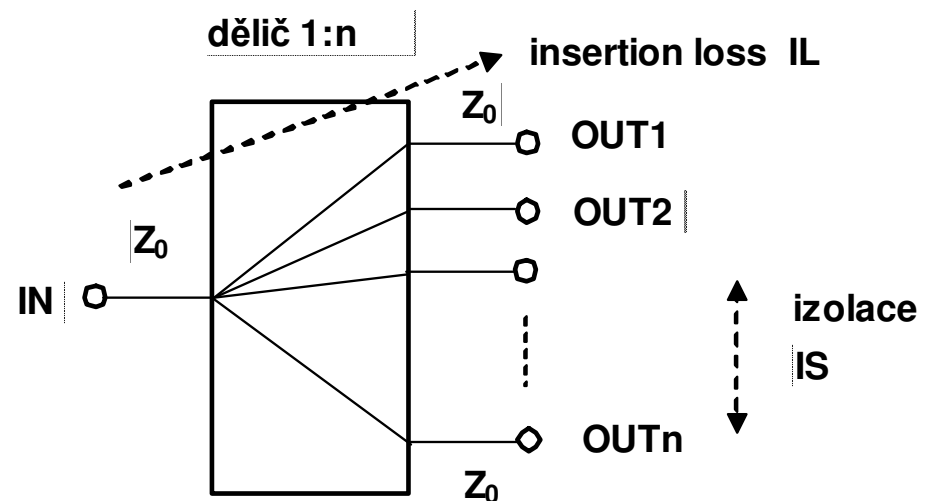
Děliče výkonu / slučovače

- Ve VF a mikrovlnném oboru **není možné sloučit nebo rozdělit signály přímým spojením "drátů"**
- Paralelní spojení snižuje impedanci a porušuje impedanční přizpůsobení
- Nutné jsou **speciální komponenty = děliče výkonu**:
 - 2 až n výstupů
 - **Vysoké hodnoty RL na všech branách**
 - **Vysoká izolace IS mezi výstupy**
 - Stejnou strukturu lze použít jako dělič i slučovač
- 2 základní typy:
 - **Děliče** = mají (přibližně) stejný dělicí útlum do všech výstupů



Děliče ("Splitters")

- **Stejné dělicí útlumy do všech výstupů**
- 1:2 → fázové rozdíly typ. 0°, 90°, 180°
- n - výstupů
- Vysoké RL na všech branách
- **IL se skládá z:**
 - Rozdělení výkonu do více výstupů
 - Přídavné vnitřní ztráty
- **Izolace mezi výstupy:**
 - Důležitý parametr
 - Typ. hodnota $IS > 20\text{dB}$ → redukuje vzájemné ovlivňování připojených obvodů
- Základní typy:

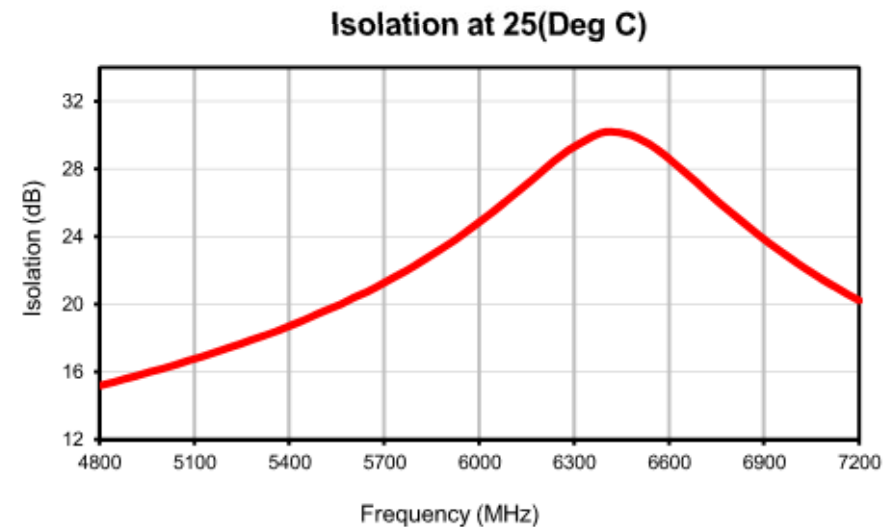
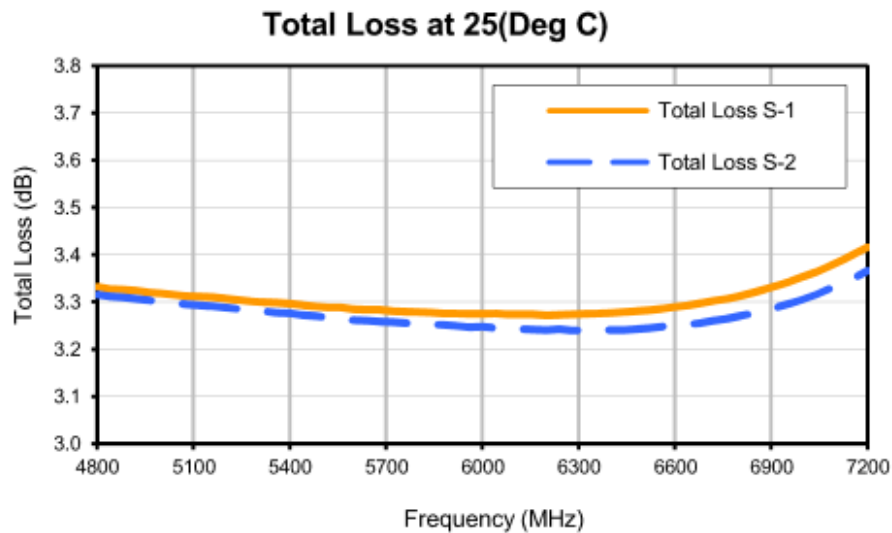


$$L_d = 10 \log n$$

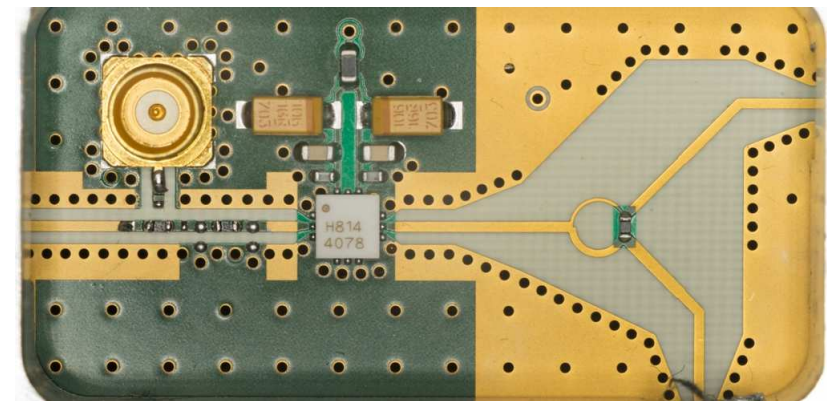
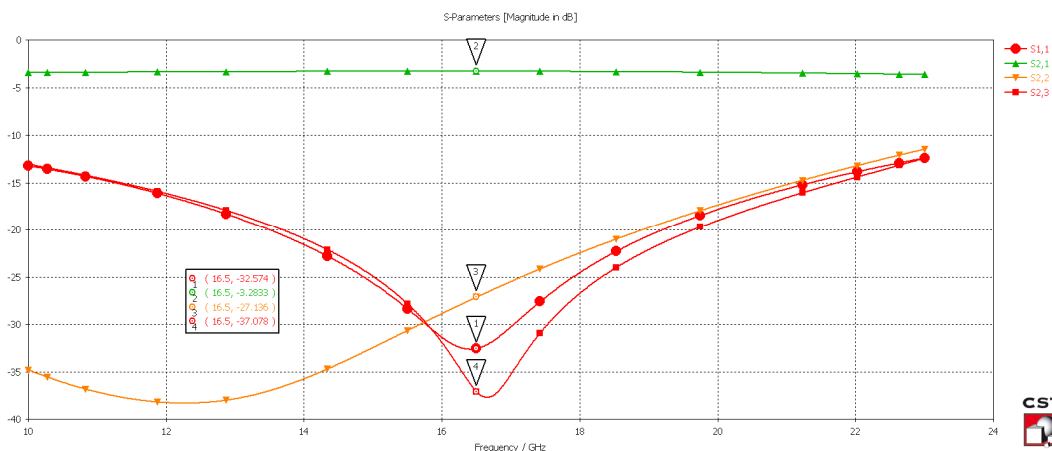
| No. of outputs | basic attenuation | typical insertion loss |
|----------------|-------------------|------------------------|
| 2 | 3 dB | 3,5 – 4,0 dB |
| 4 | 6 dB | 6,5 – 7,5 dB |
| 8 | 9 dB | 10 – 11 dB |

Příklad: Děliče

- SCW-2-722+ 4,8 – 7,2 GHz (minicircuits.com)
 - $n=2$, 0° integrovaný LTCC 1,6 x 0,8 x 0,6mm



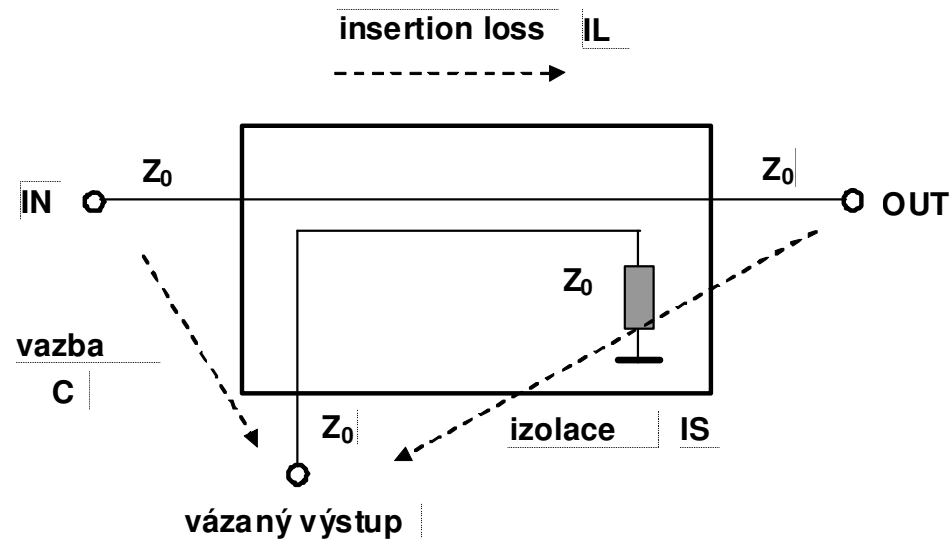
- Planární mikropaskový typu wilkinson (B2M17MIO)



Vazby ("Couplers")

- Nesymetrické děliče výkonu:**

- Nejčastěji $n=2$
- Např. 10/1dB
- Paralelní $\lambda/4$ vázaná vedení
- Nebo induktivně vázané transformátory
- BK na jednom vázaném výstupu
- **Vazební útlum $C \sim 8$ až 50dB**
- IL závisí také na C
- Často směrové účinky - **směrové vazby ("directional couplers")** $IS \gg C$
- Používají se také pro měření odrazů
- Směrovost ("directivity") $D = IS - C$ (vše v dB)
- Návrh mikropáskové vazby v B2B17MIO

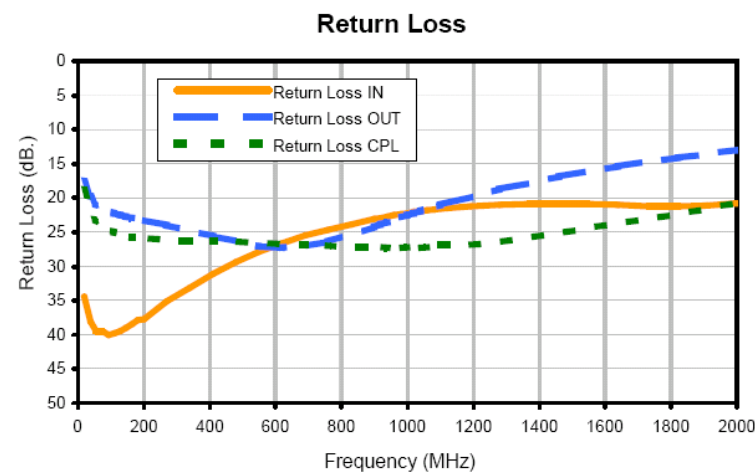
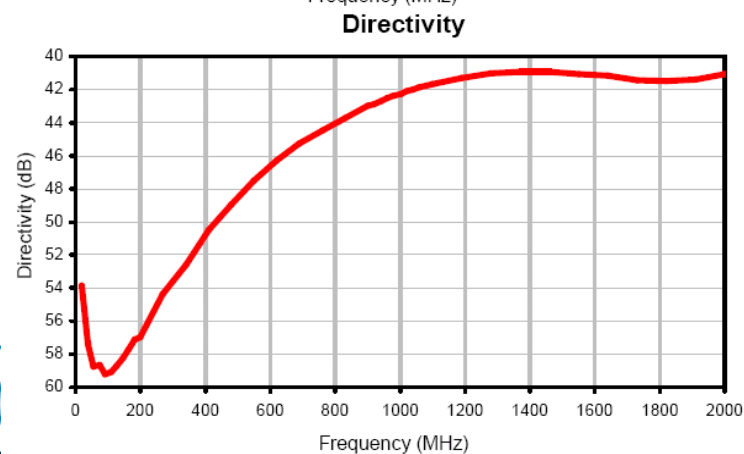
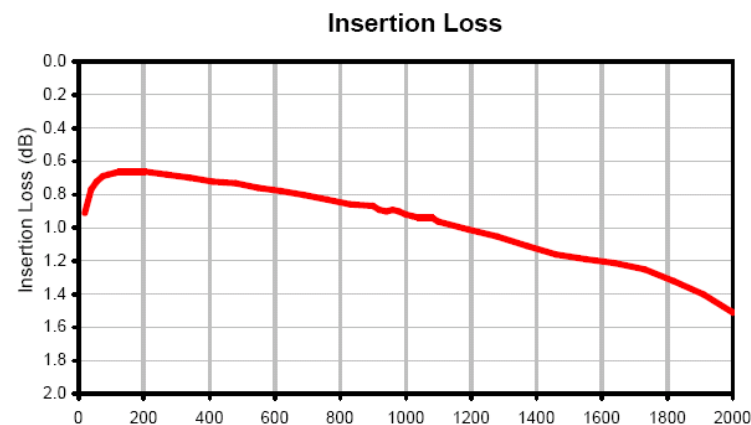
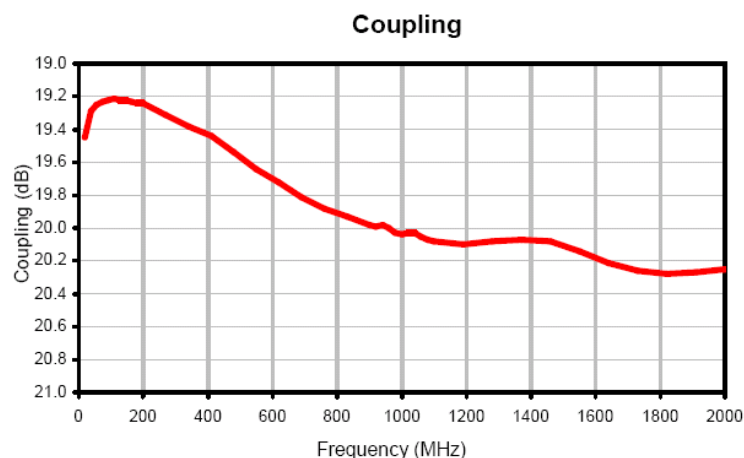
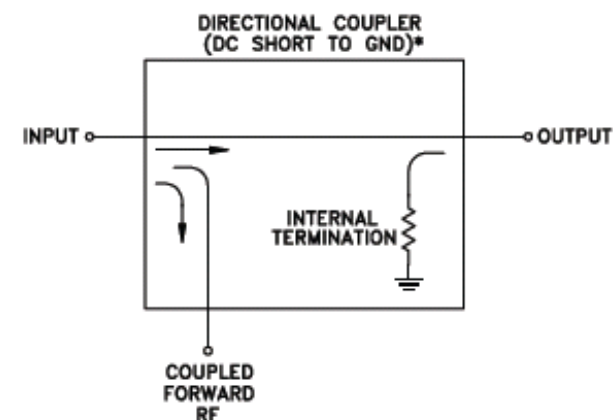


Příklad: Vazba

- ZFDC-20-50+ (minicircuits.com)
 - $C=20\text{dB}$
 - 20 - 2000MHz
 - V krabičce s konektory SMA

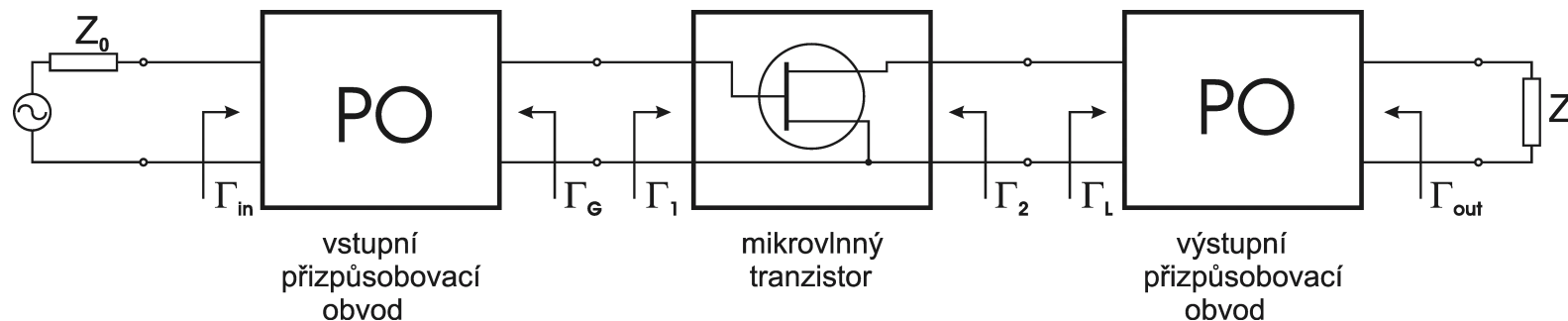
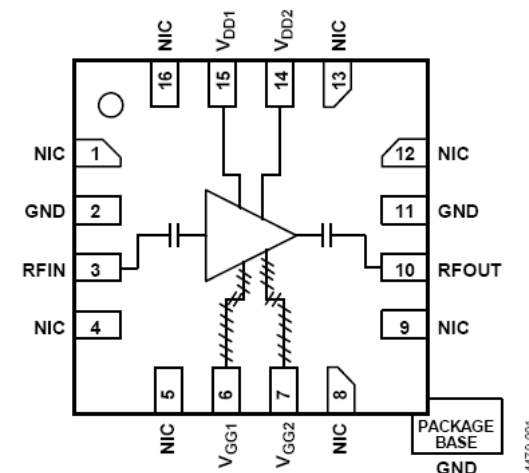


CASE STYLE: K18



Zesilovače („Amplifiers“)

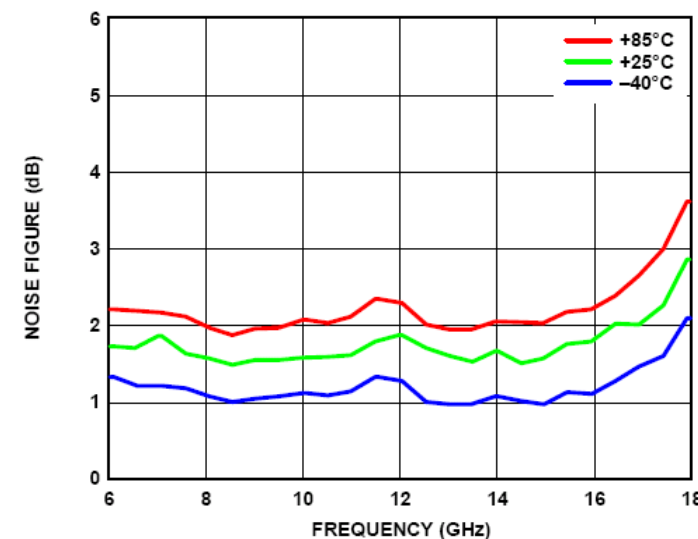
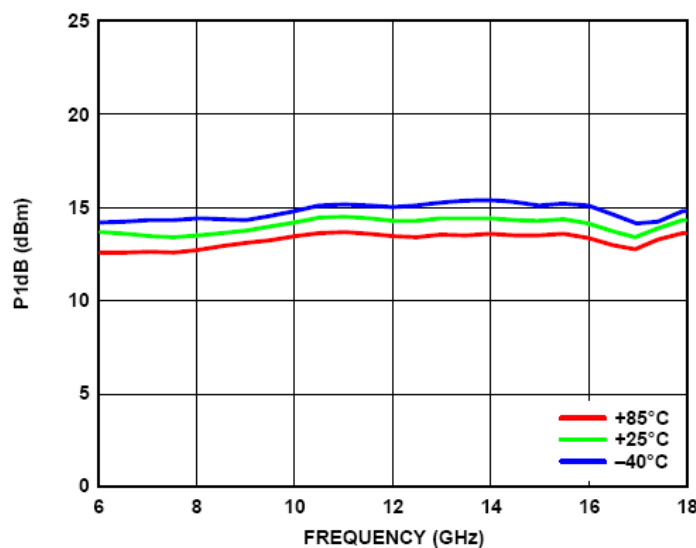
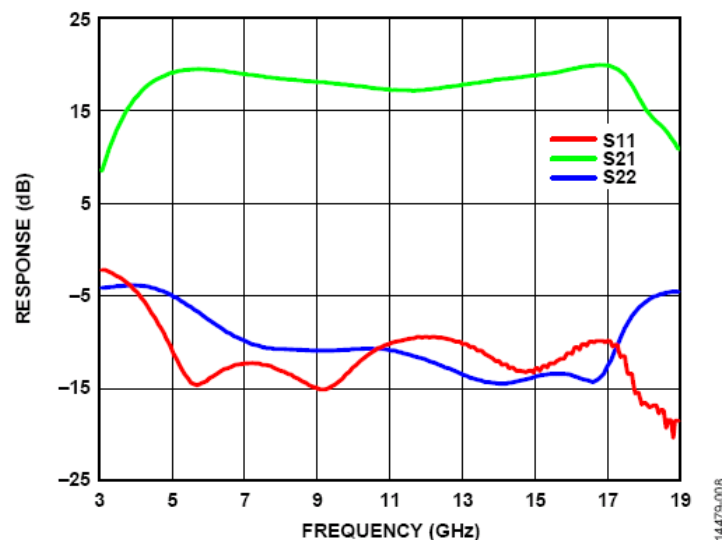
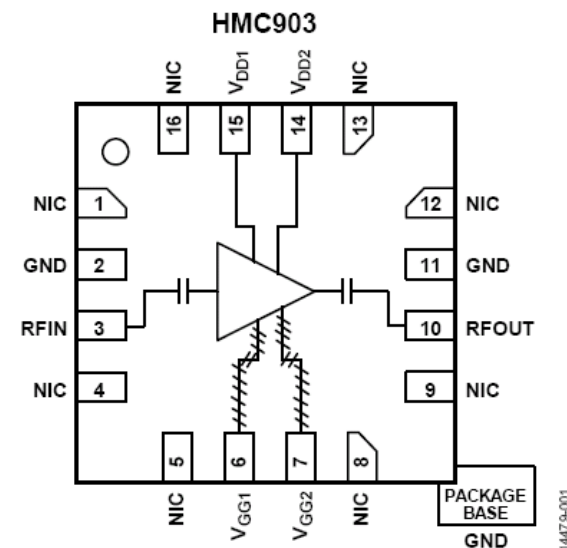
- Jsou nutné pro pokrytí útlumů ve VF systémech
- Mnoho různých typů:
 - Úzkopásmové x širokopásmové
 - Nízký výkon x vysoký výkon
 - Nízkošumové (LNA)
- Vnitřní struktura:
 - Tranzistory + přizpůsobovací obvody PO
 - Někdy se zpětnou vazbou
 - Často se skládají z více tranzistorů
- Analýza – úloha AWR 3, návrh – úloha AWR 5
- Podrobněji včetně teorie - B2M17MIO



Příklad: Nízkošumový zesilovač - LNA

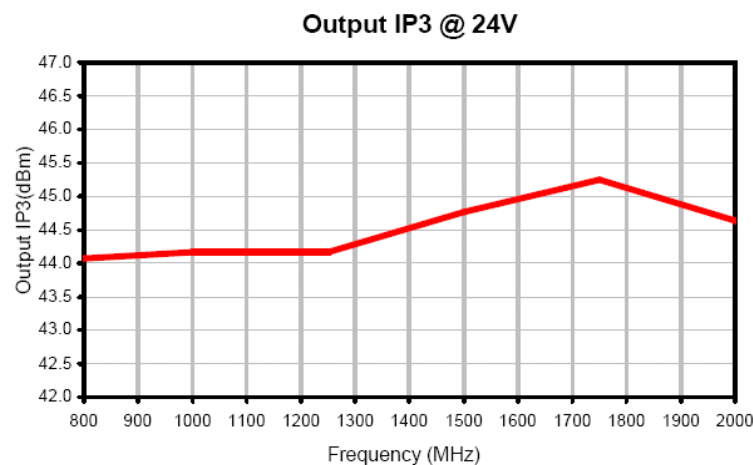
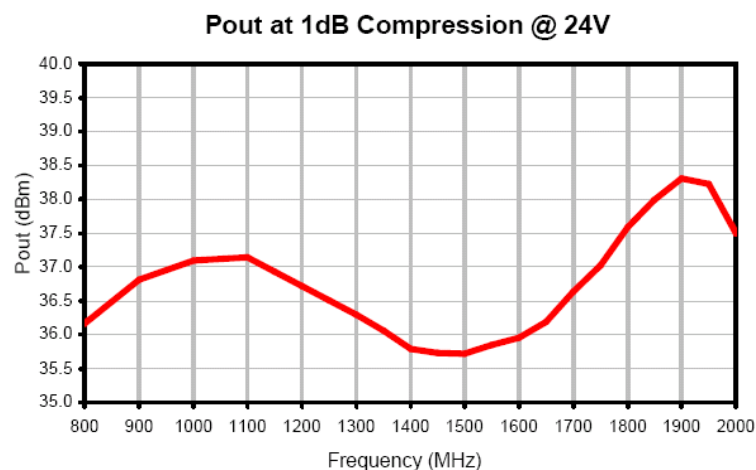
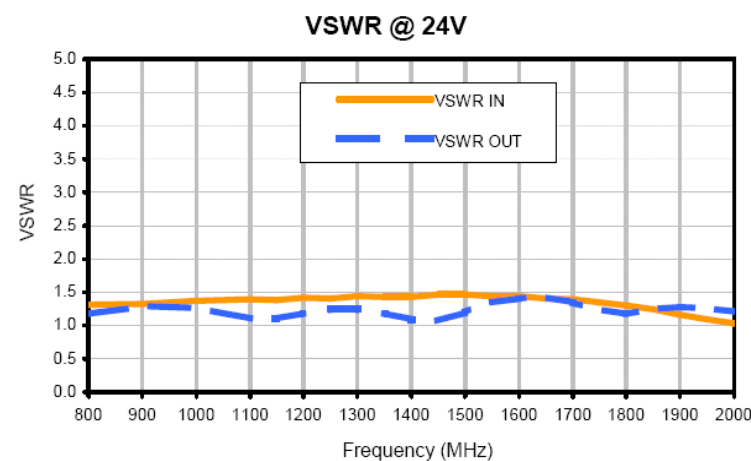
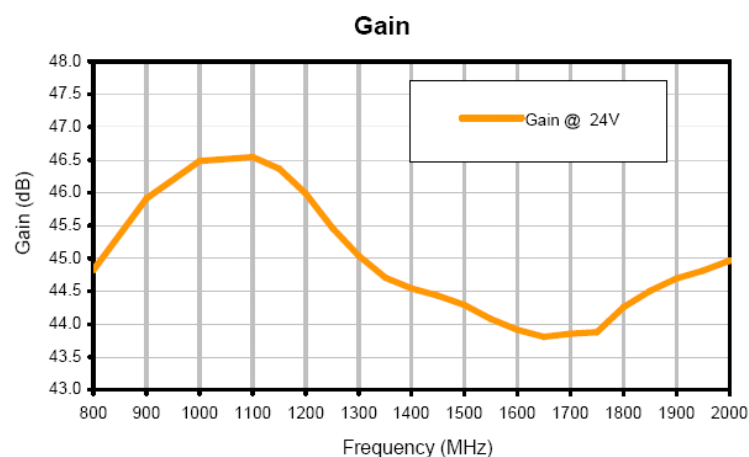
- HMC903LP3E (analog.com)
 - Širokopásmový 5 - 17GHz
 - Zisk $G \sim 17\text{dB}$
 - Nízkošumový $F \sim 2\text{dB}$
 - Nízký výstupní výkon $P_{-1\text{dB}} \sim 13\text{dBm}$
 - MMIC pouzdro 3x3mm
 - 3V/80mA

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



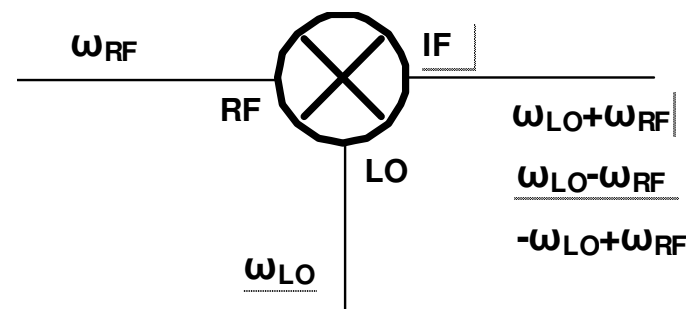
Příklad: Výkonový zesilovač - PA

- ZHL-5W-2G+ (minicircuits.com)
 - Výkonový zesilovač 5W
 - 800 - 2000MHz, konektory SMA
 - 24V/2,5A, 177x82x30mm



Směšovače („Mixers“)

- Jsou obsaženy v min. 95% všech radiových RX a TX
 - Jsou provozovány jako down-konvertory nebo up-konvertory, IQ modulátory, ...
 - Jsou založeny na nelinearitách 2. řádu → IM2**
 - Vyžadují relativně silný LO signál (typ. 5 - 15dBm)
 - Matematický popis → **násobička**



$$\begin{aligned}
 u_{IF}(t) &= k_2 V_{LO} \cos(\omega_{LO} t) V_{RF} \cos(\omega_{RF} t) = \\
 &= \frac{1}{2} k_2 V_{LO} V_{RF} [\cos(\omega_{LO} t + \omega_{RF} t) + \cos(\omega_{LO} t - \omega_{RF} t)]
 \end{aligned}$$

- Užitečný signál = nové frekvenční složky** $\omega_{IF} = \omega_{LO} + \omega_{RF}$ $\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_{RF}$
- Signály jsou konvertovány na nové vyšší nebo nižší frekvence**
 - Down-konverze** → na nižší frekvenci, typ. v přijímačích
 - Up-konverze** → na vyšší frekvenci, typ. ve vysílačích (brány RF a IF mohou být prohozeny)

Směšovače

- Díky nelineárnímu procesu je na výstupu směšovačů také **mnoho dalších parazitních složek**:

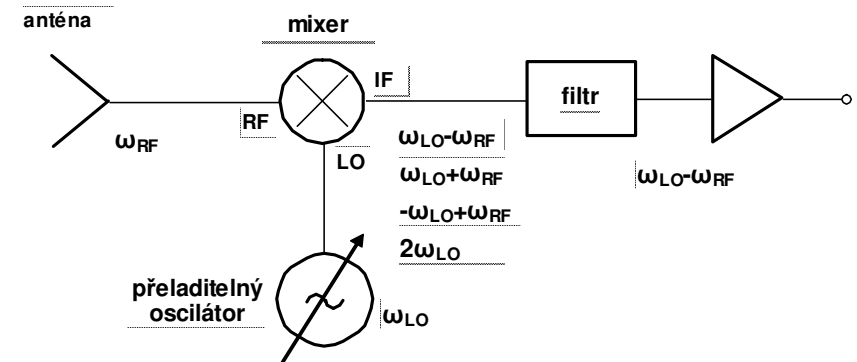
- Vstupní frekvence ω_{RF} , ω_{LO}
- Harmonické $2\omega_{RF}$, $2\omega_{LO}$, $3\omega_{LO}$,
- Vyšší IM produkty $\omega_{RF} \pm 2\omega_{LO}$, $2\omega_{RF} \pm 3\omega_{LO}$, ...
- Filtry (často SAW) musí propustit jen užitečné produkty $\omega_{IF} = \omega_{LO} + \omega_{RF}$ nebo $\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_{RF}$

- Důležité parametry:**

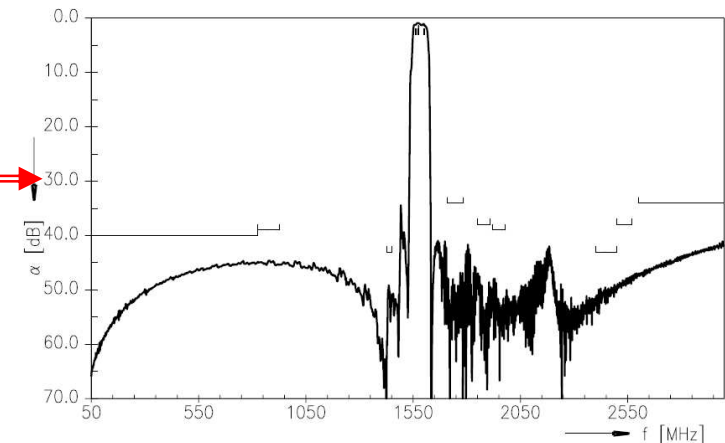
- Frekvenční rozsahy RF, LO, IF
- Konverzní ztráty (zisk)
- Nominální výkon LO
- Útlumy parazitních produktů

- Podrobnější popis:

- Na cvičeních → praktická měření
- B2B37ROZ, B2M17MIO



Transfer function (wideband)



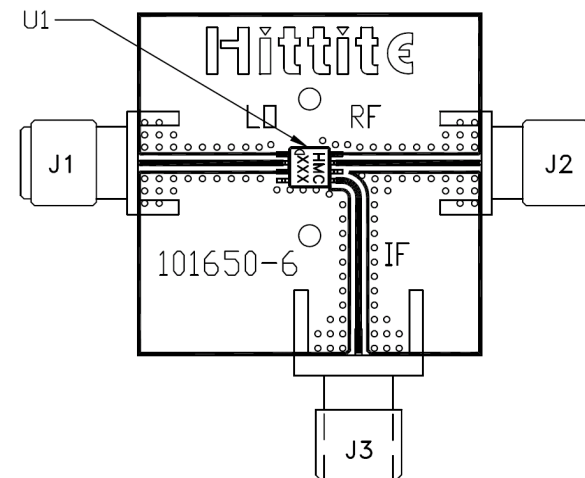
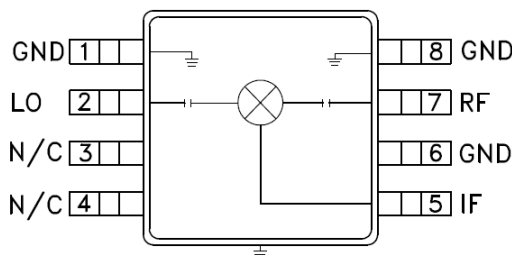
- Realizace:**

- MMIC x krabičky s konektory
- Pasivní (s diodami), L_c
- Aktivní (s tranzistory), G_c
- IQ

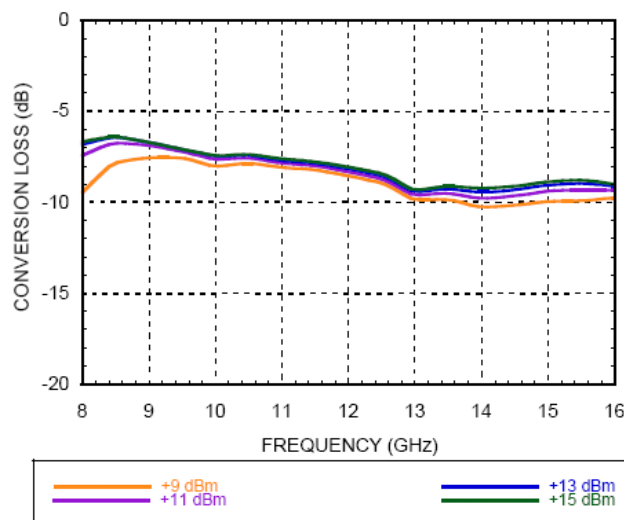
Příklad: Mikrovlnný směšovač

- HMC412BMS8G (analog.com)
 - Širokopásmový, MMIC 3x3mm
 - RF, LO → 8-16GHz
 - IF → DC-2,5GHz
 - P_{LO} = typ. 15dBm

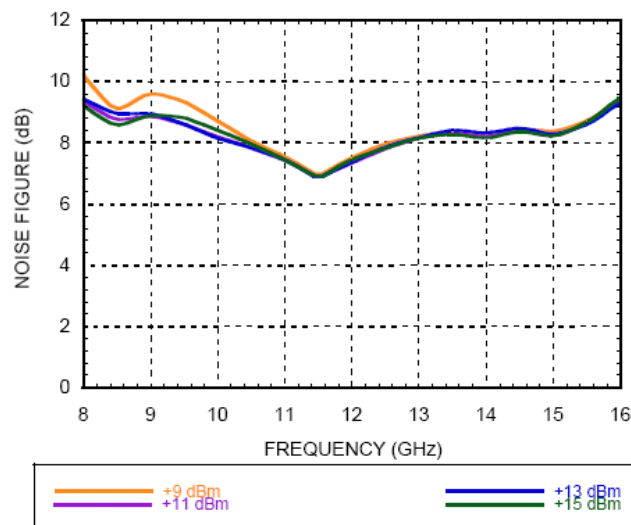
Functional Diagram



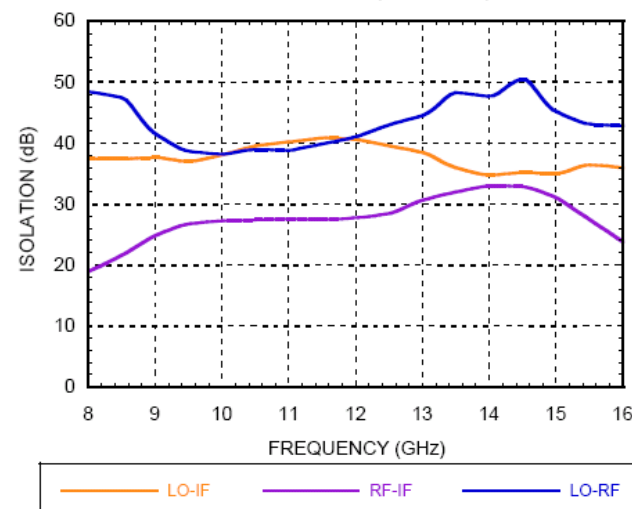
Conversion Loss vs. LO Drive
RFIN = -5 dBm, USB, Ta = +25C



Noise Figure vs. LO Power
RFIN = -5 dBm, USB, Ta = +25C



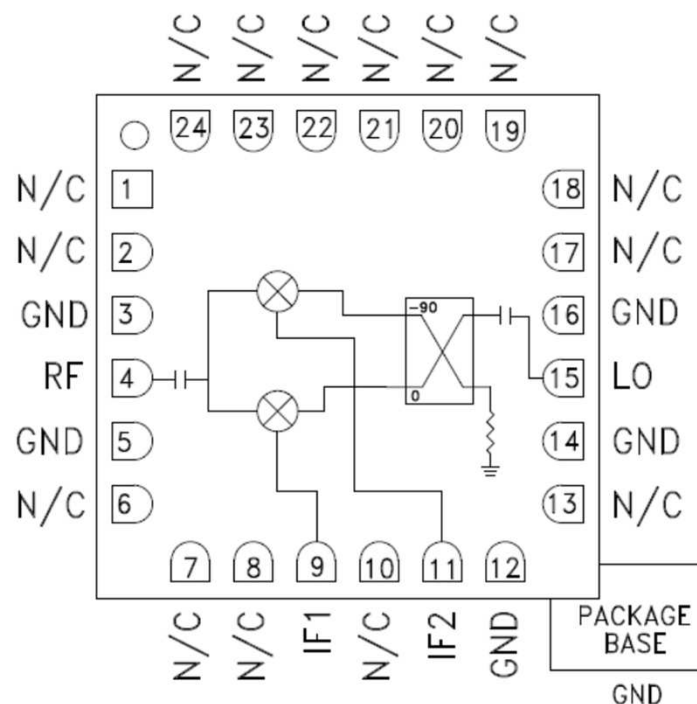
LO to RF, LO to IF, and RF to IF Isolation
LO Power = +13 dBm, USB, Ta = +25C



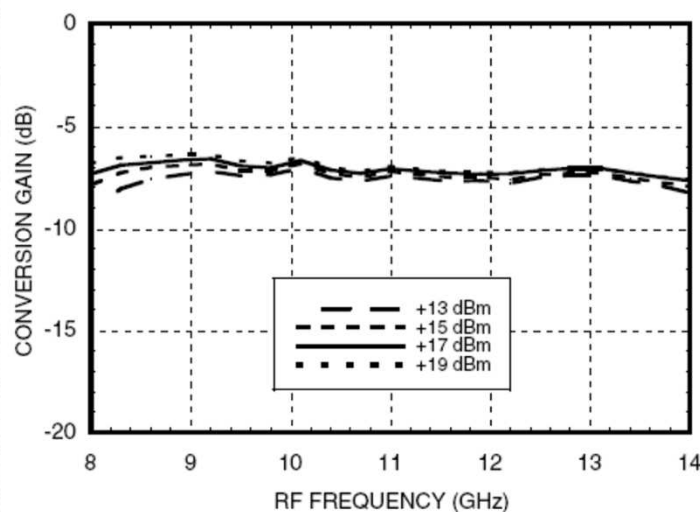
Příklad: IQ směšovač

- HMC521LC4 (analog.com)
 - MMIC, pouzdro 4x4mm
 - RF, LO → 8,5-13,5GHz, $P_{LO} = 19\text{dBm}$
 - IF → DC-3,5GHz
 - Uvnitř 2 směšovače + dělič 1:2 0/90°
 - Násobení $\sin(\omega_{LO}t)$ a $\cos(\omega_{LO}t)$
 - Použití → přímé IQ modulátory, demodulátory – (popis později v kurzu)

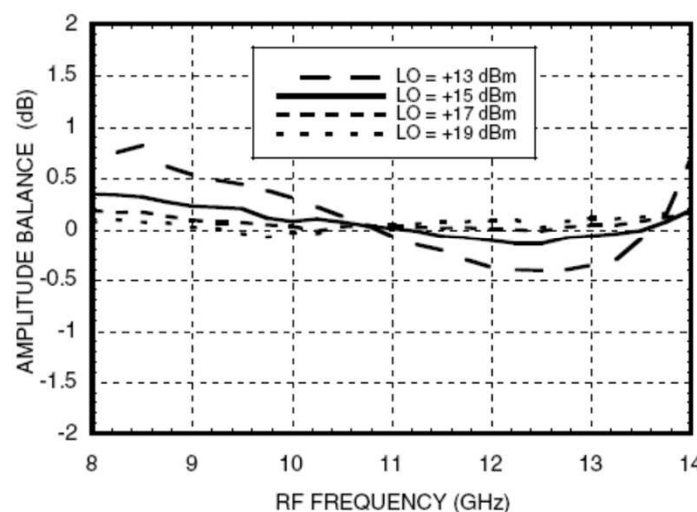
Functional Diagram



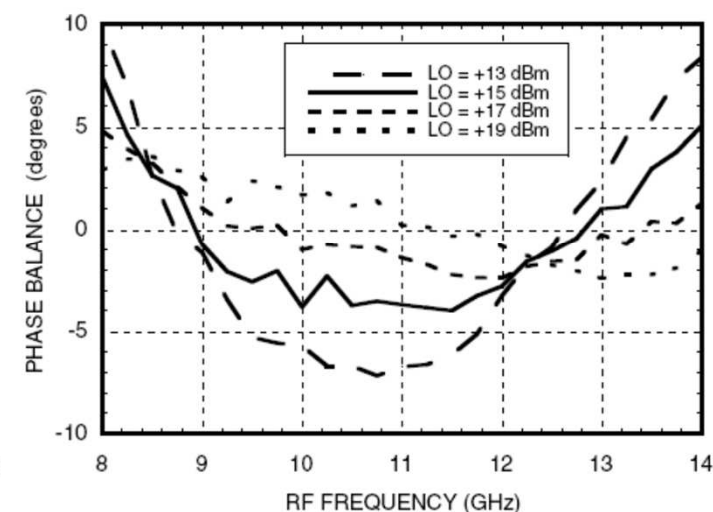
Conversion Gain vs. LO Drive



Amplitude Balance vs. LO Drive

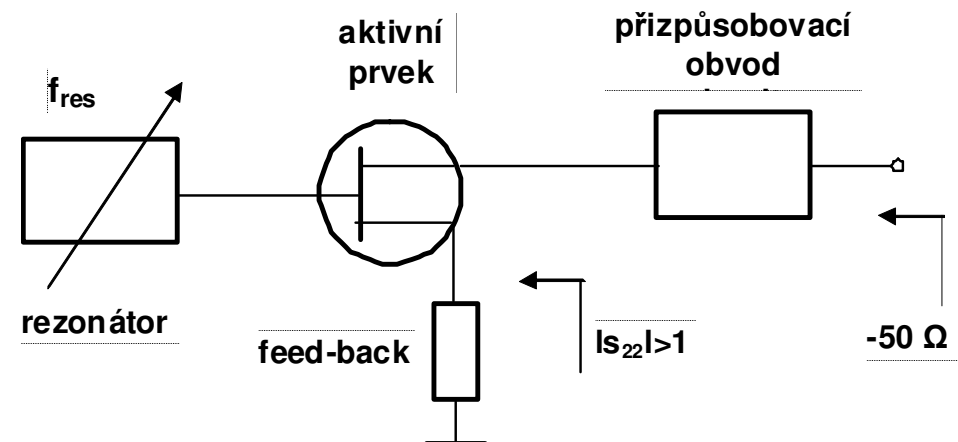
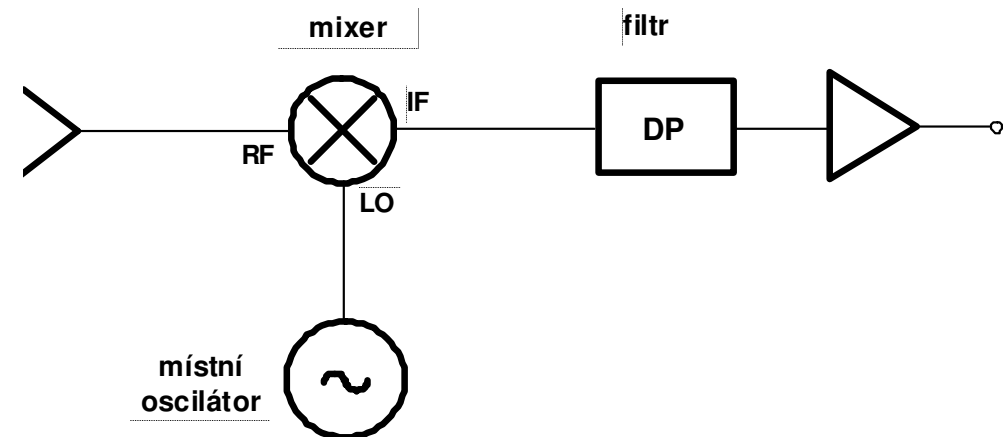
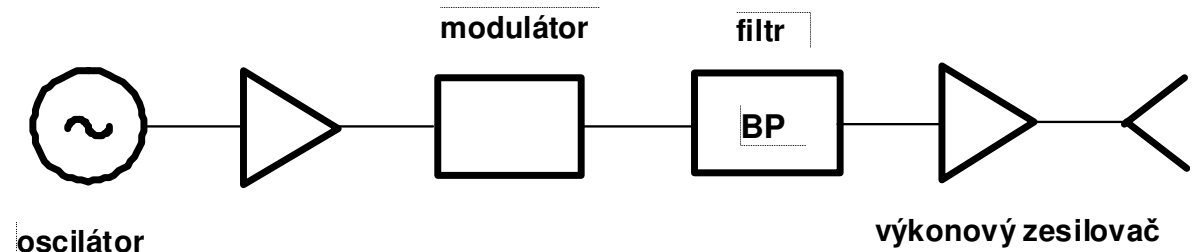


Phase Balance vs. LO Drive



Oscilátory

- 2 hlavní funkce:
 - **TX** → **zdroje sinusové nosné** ("carrier")
 - **RX** → **místní oscilátory** nutné pro buzení LO vstupů směšovačů
- Vnitřní struktura:
 - Mnoho různých typů
 - Rezonátor s vysokým Q definuje výstupní frekvenci
 - Tranzistor kryje vnitřní ztráty
 - Často je použita kladná zpětná vazba
- Základní typy:
 - Pevná frekvence → DRO, OCXO, TCXO, ...
 - **Proměnná frekvence** → **VCO**



Oscilátory řízené napětím - VCO

- **"Voltage controlled oscillators":**

- Rezonátory jsou elektronicky laditelné
- Ladění umožňuje změnit frekvenci
- Obvody fázového závěsu (PLL) stabilizují výstupní frekvenci a snižují fázový šum
- PLL je velmi důležitý obvod používaný např. ve všech mobilních TF
- Popis PLL - později

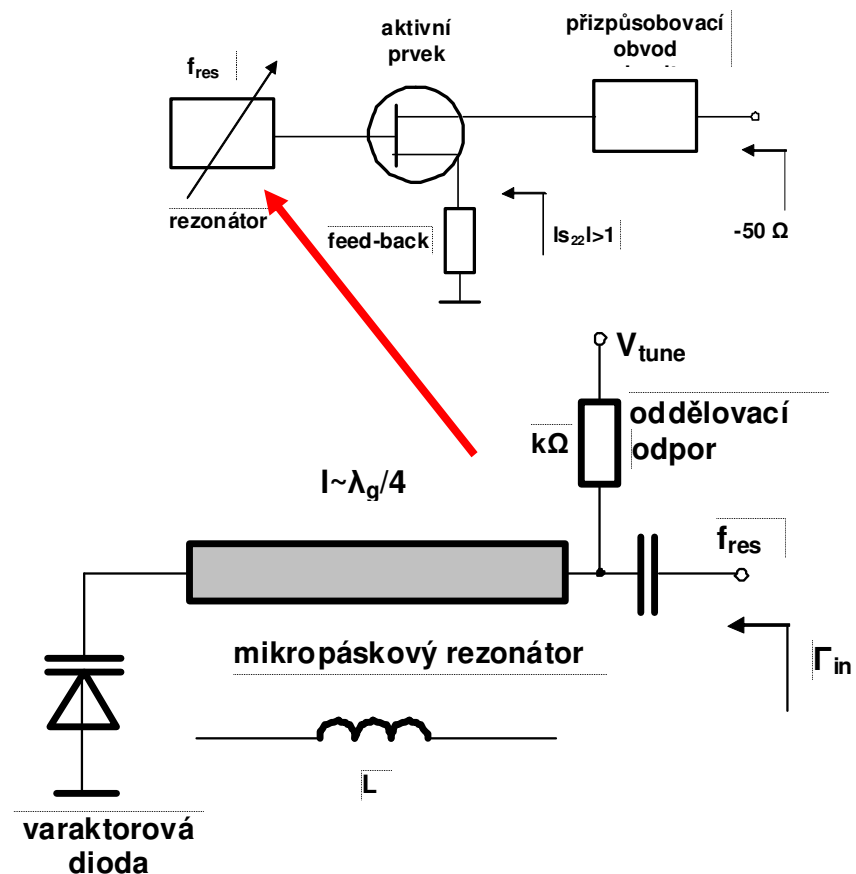
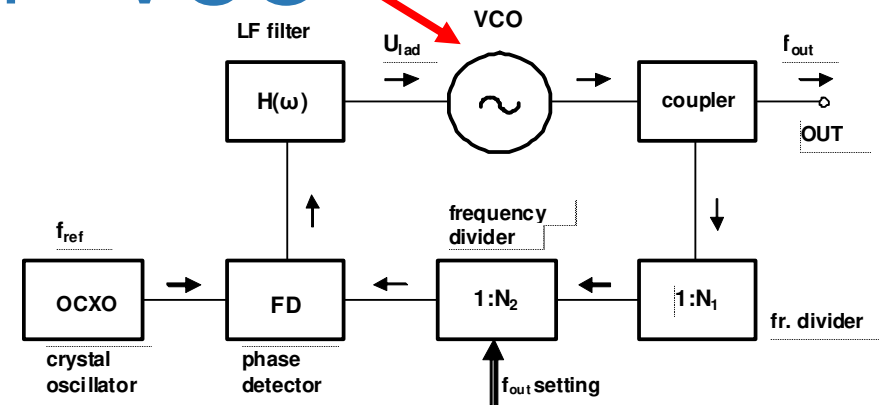
- Ladící prvky:

- **Varaktorové diody**

- $V_{tune}=0$ až 15V mění kapacitu typ. 10:1
 - Přeladění frekvence max. 2:1
 - Často výrazně méně

- Realizace:

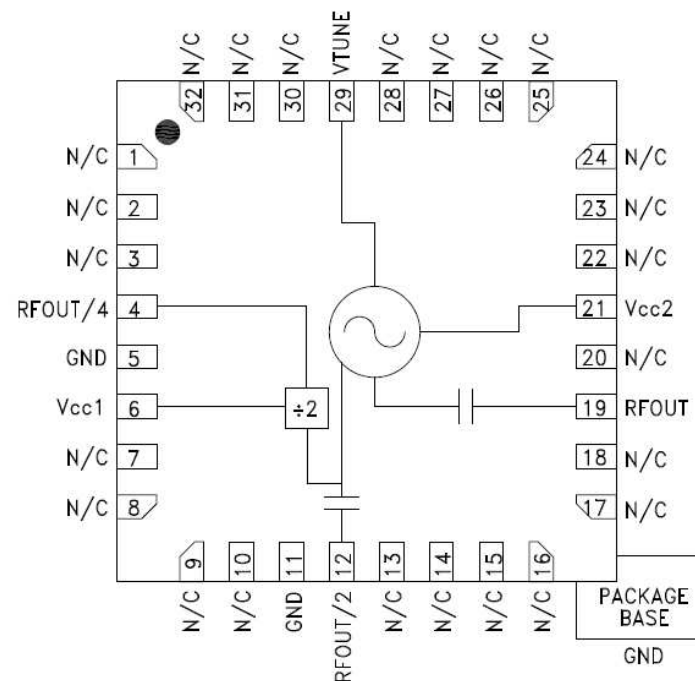
- MMIC
 - Často součást čipů s dalšími VF komponentami



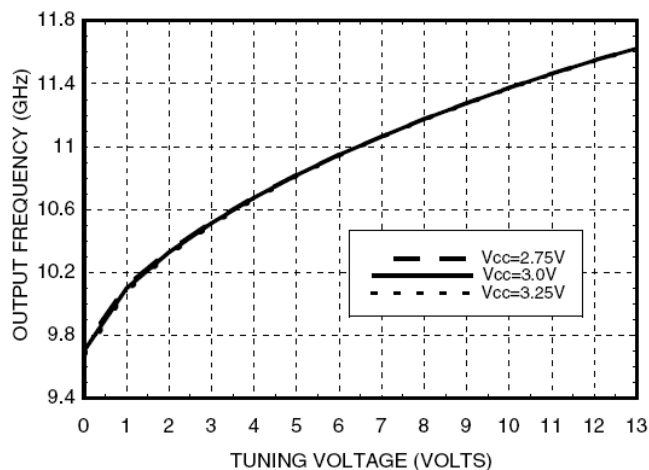
Příklad: VCO

- HMC513LP5E (analog.com)
 - Přeladitelný 10,43 - 11,46GHz
 - Výstupy $f_0/2$ a $f_0/4$ (obsahuje vnitřní děličky frekvence)
 - 3V/275mA
 - QFN pouzdro 5x5mm

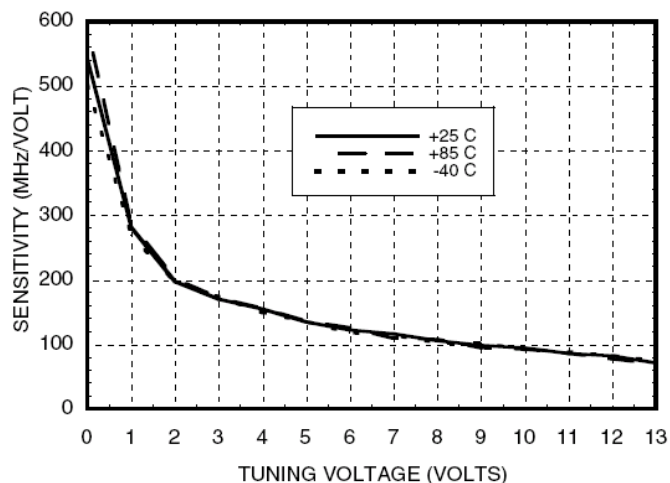
Functional Diagram



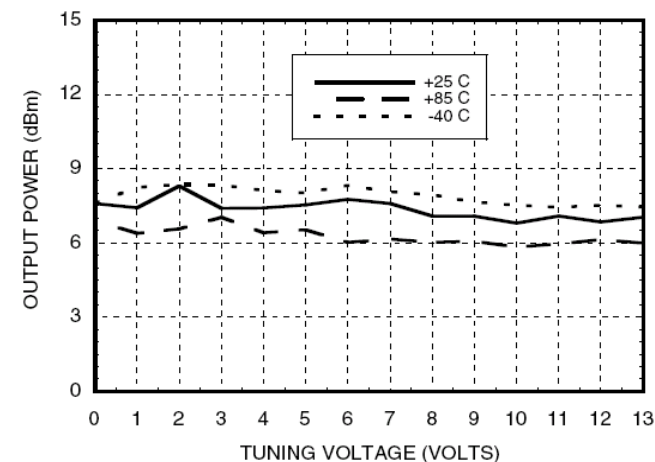
Frequency vs. Tuning Voltage, $T = 25^\circ\text{C}$



Sensitivity vs. Tuning Voltage, $V_{cc} = +3V$

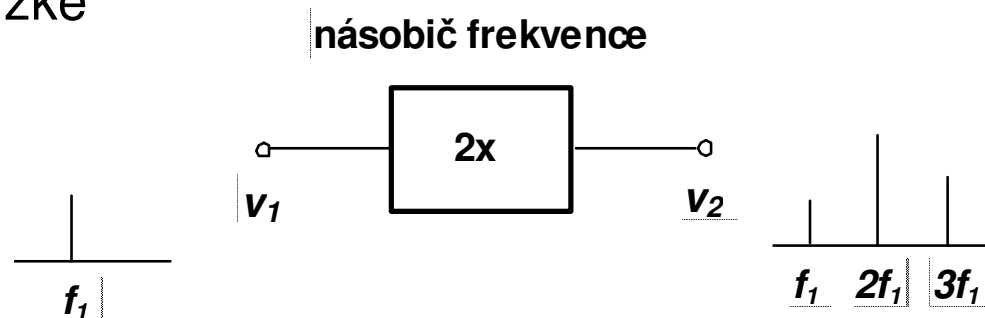


Output Power vs. Tuning Voltage, $V_{cc} = +3V$



Násobiče frekvence („Frequency Multipliers“)

- Používají se často pro **generování vysokých GHz frekvencí**
- Za oscilátorem pracujícím na relativně nízké frekvenci je zapojen násobič 2x, 3x, ...
- Na nižších frekvencích:
 - Lze vyrobit kvalitnější VCO
 - Snáze lze realizovat PLL
- **Příklad:** Automobilové radary 77GHz používají VCO 12,83GHz + frekvenční násobič 6x
- **Násobení frekvence** → provádí se na nelineárním prvku (dioda, tranzistor)
- **Násobiče 2x:**
 - Využívají nelinearitu 2. řádu
 - Nechtěné produkty $f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$ musí být vyfiltrovány

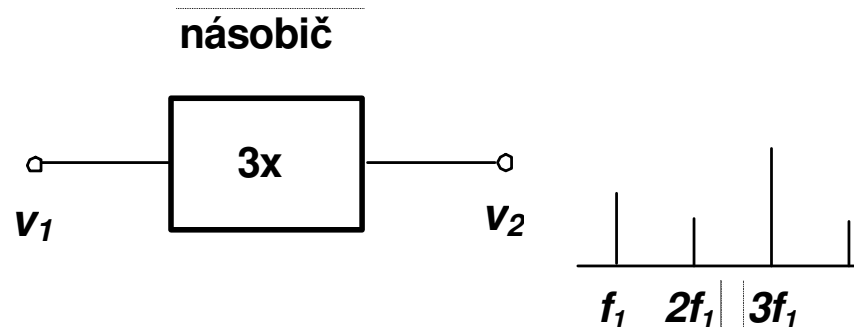
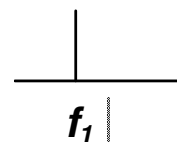


$$v_2 = k_2 v_1^2 = k_2 V_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \psi) = \frac{1}{2} k_2 V_1^2 (1 + \cos(2\omega_1 t + 2\psi))$$

Násobiče frekvence

• Násobiče 3x:

- Využívají nelinearitu 3. řádu
- Užitečný signál = 3. harmonická
- Nechtěné produkty $f_1, 2f_1, 4f_1, \dots$ musí být vyfiltrovány
- Pasivní násobiče $\rightarrow P_{in} \sim 10\text{dBm}$
- Aktivní násobiče (tranzistorové) \rightarrow stačí nižší vstupní výkon typ. 2dBm



$$v_2 = k_3 v_1^3 = k_3 V_1^3 \cos^3(\omega_1 t + \psi) =$$

$$= \textit{po filtraci} = \frac{1}{4} k_3 V_1^3 \cos(3\omega_1 t + 3\psi)$$

• Důležité parametry:

- Nominální vstupní výkon P_{in}
- Konverzní ztráty
- Potlačení nežádoucích signálů = měření výkonu signálů $f_1, \dots, 4f_1, \dots$ na výstupu

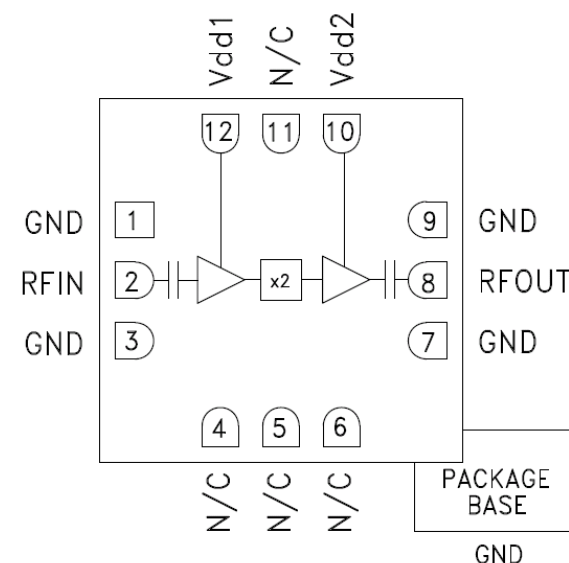
$$L_c = \frac{P_{in}(at \omega_1)}{P_{out}(at 2\omega_1)}$$

$$L_c = \frac{P_{in}(at \omega_1)}{P_{out}(at 3\omega_1)}$$

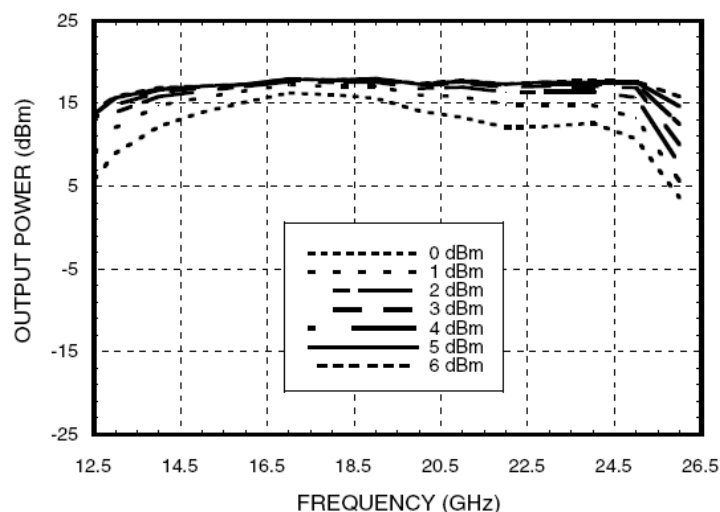
Příklad: Násobič frekvence 2x

- HMC814LC3B (www.analog.com)
 - Aktivní násobič 2x
 - Obsahuje 2 zesilovače
 - Vstup 6,5 - 12,3GHz
 - Výstup 13 - 24,6GHz
 - Vstupní výkon 2-6dBm, výstupní 17dBm
 - 5V/90mA, pouzdro QFN 3x3mm

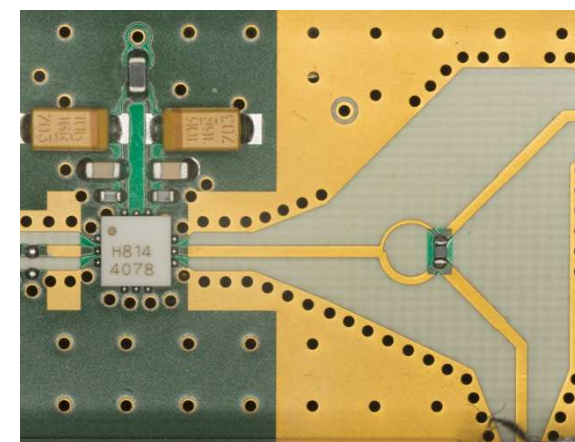
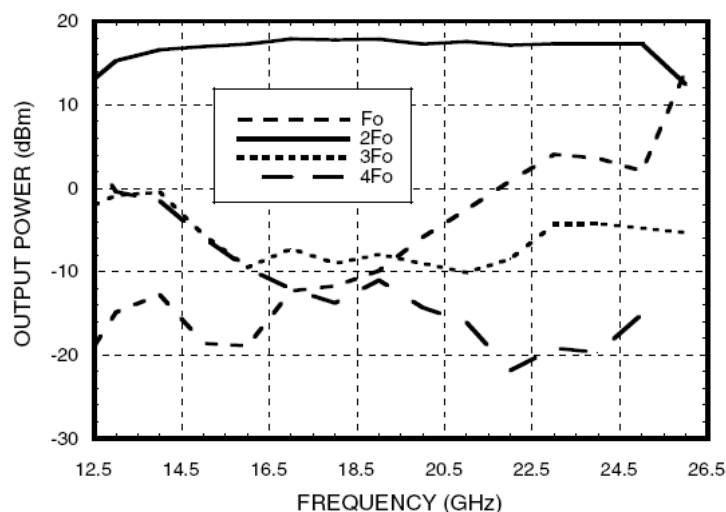
Functional Diagram



Output Power vs. Drive Level

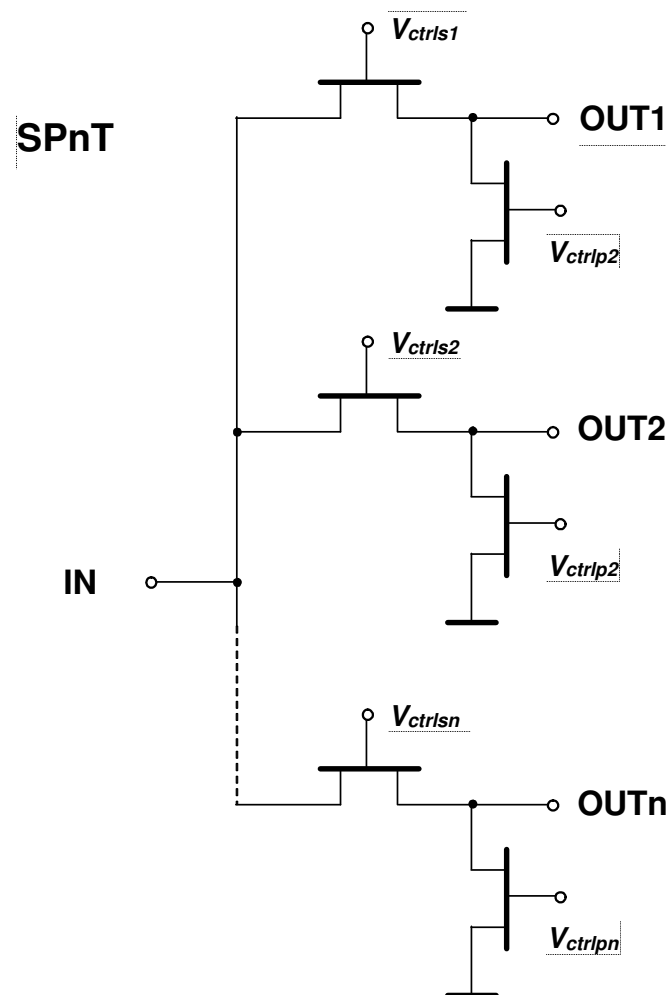
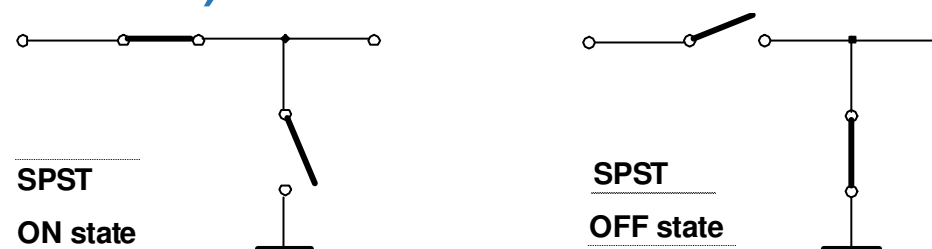


Isolation @ +4 dBm Drive Level



VF přepínače ("RF Switches")

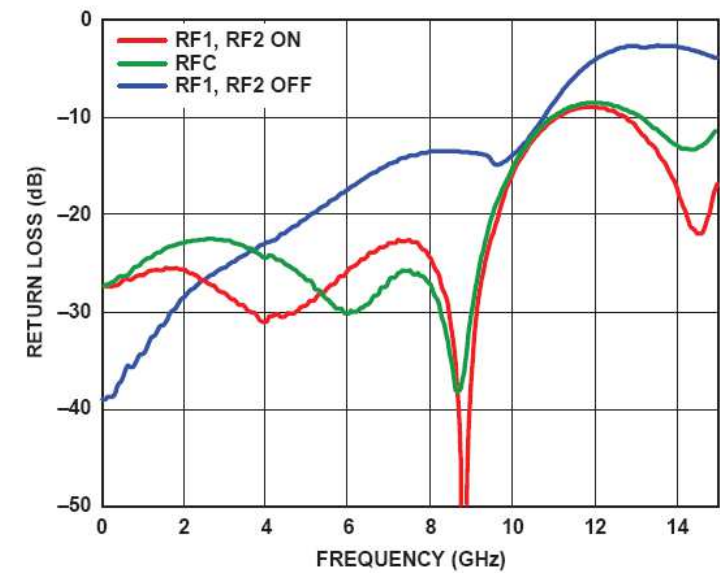
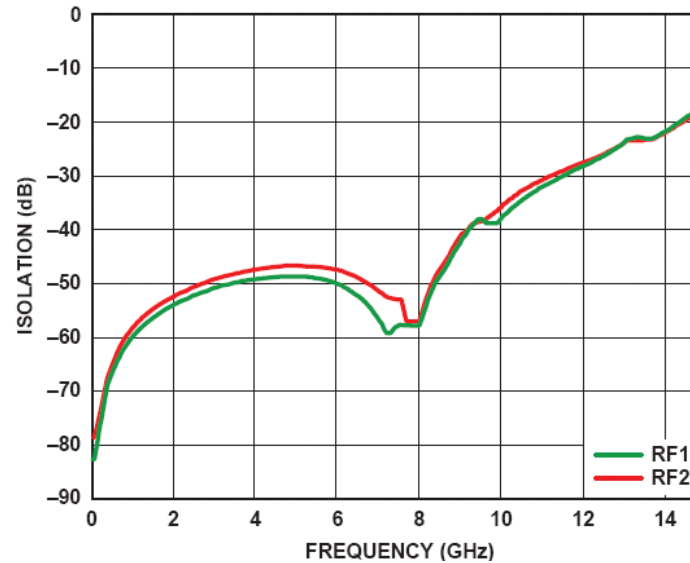
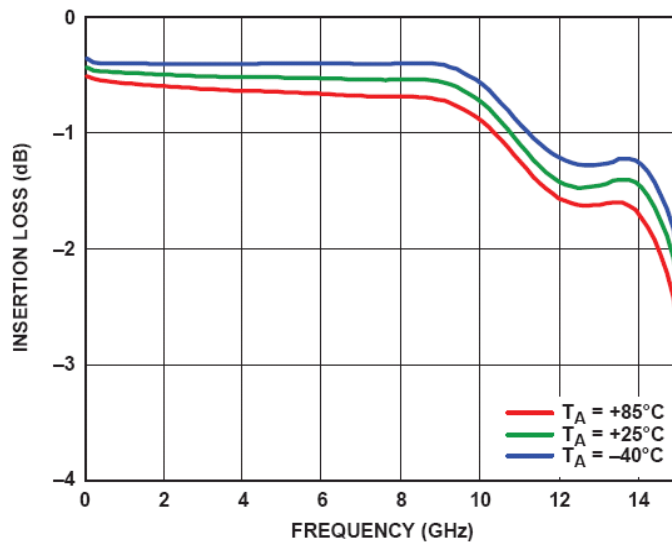
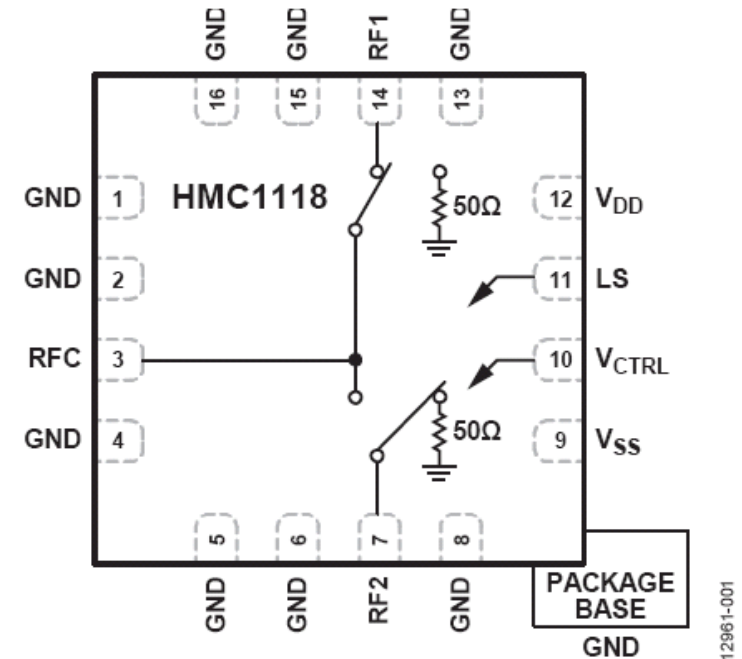
- **VF a mikrovlnné elektronicky nastavitelné přepínače**
- Používají se např. pro TDMA provoz nebo pro přepínání sub-pásem v mobilních TF
- **Přepínací prvky:**
 - PIN diody → pro výkonové aplikace
 - FETy (ON → $V_G=0$, OFF → $V_G=-3V$)
 - **Spínače - zapojené sériově a proti zemi**
- **Obvyklé typy:**
 - SPST
 - SPDT
 - SP4T
 -
- Popis vnitřních struktur v B2B37ROZ, B2M17MIO



Příklad: VF přepínač

- HMC1118 (www.analog.com)
 - 9kHz - 10GHz
 - Řídící napětí 0 / 3,3V
 - CMOS compatible
 - **Non-reflective**
 - QFN pouzdro 3x3mm

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Shrnutí - VF a mikrovlnné komponenty

- VF a mikrovlnné systémy se skládají z mnoha různých typických obvodů:
 - TL, filtry, děliče výkonu, zesilovače, ...
 - Aktivní x pasivní
 - Diskrétní x integrované
 - MMIC x s konektory
- Všechny komponenty a obvody musí vykazovat:
 - V aktivním frekvenčním pásmu kanálu → velmi dobré impedanční přizpůsobení ($RL \gg 10\text{dB}$)
 - Požadovaný zisk G nebo útlum IL
 - V případě nelineárních prvků → $IP2$, $IP3$, P_{IM2} , P_{IM3} , L_c , ...
- Pokud jsou tyto podmínky splněny → lze navrhnout a vyrobit kvalitní a spolehlivě pracující zařízení a systémy