

Technika bezdrátové komunikace

B2B17TBK

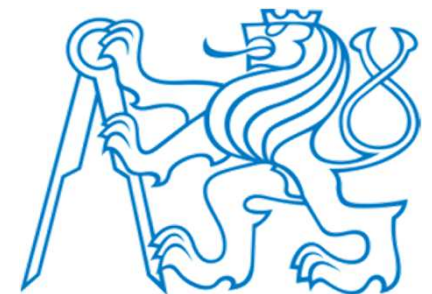
Část 3 - Parametry radiových obvodů a zařízení

Přemysl Hudec

ČVUT-FEL katedra elektromagnetického pole

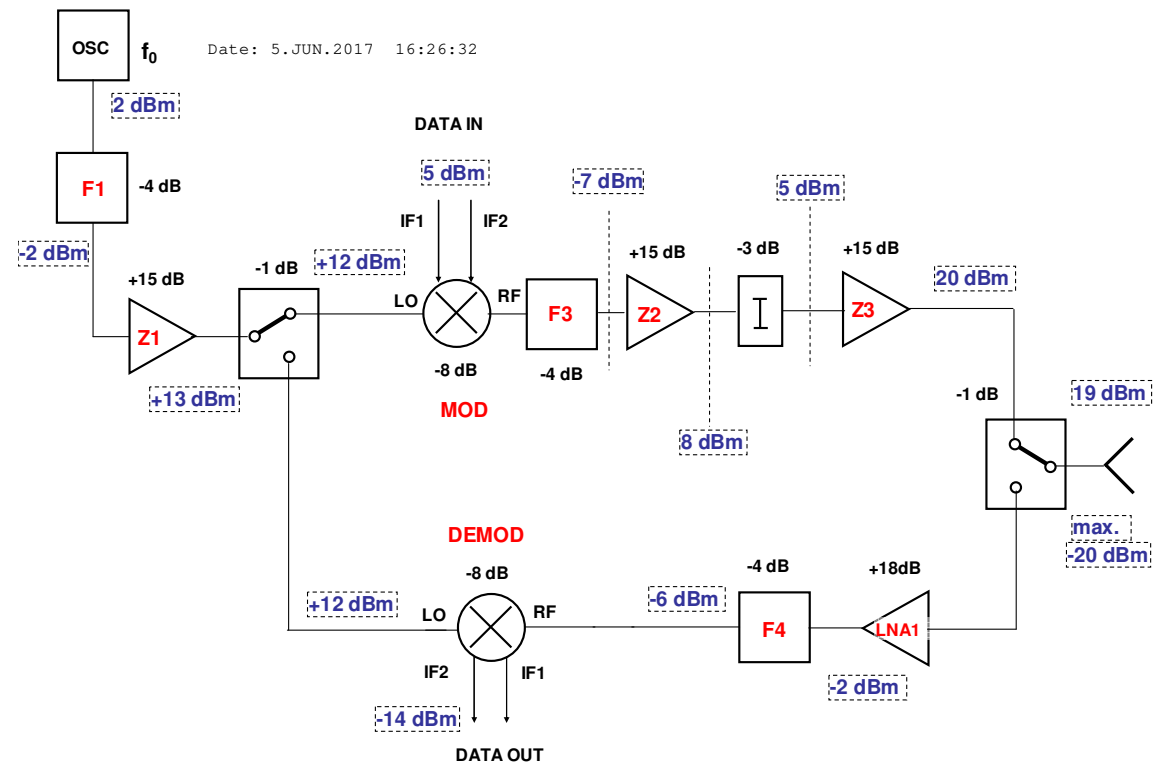
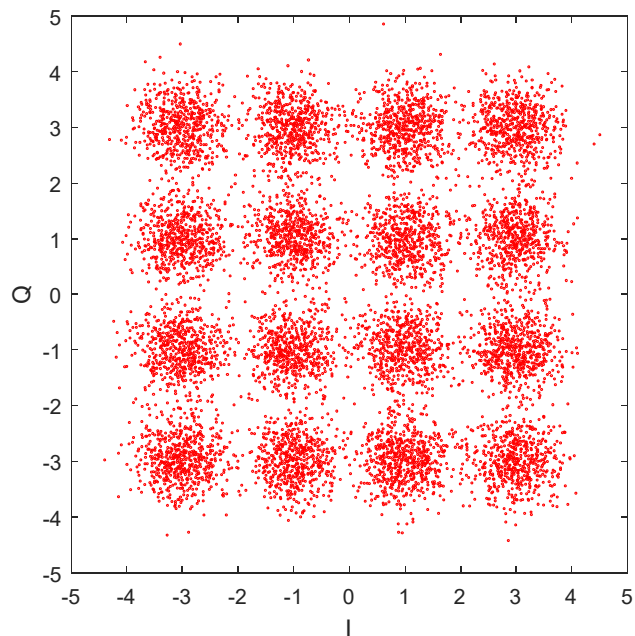
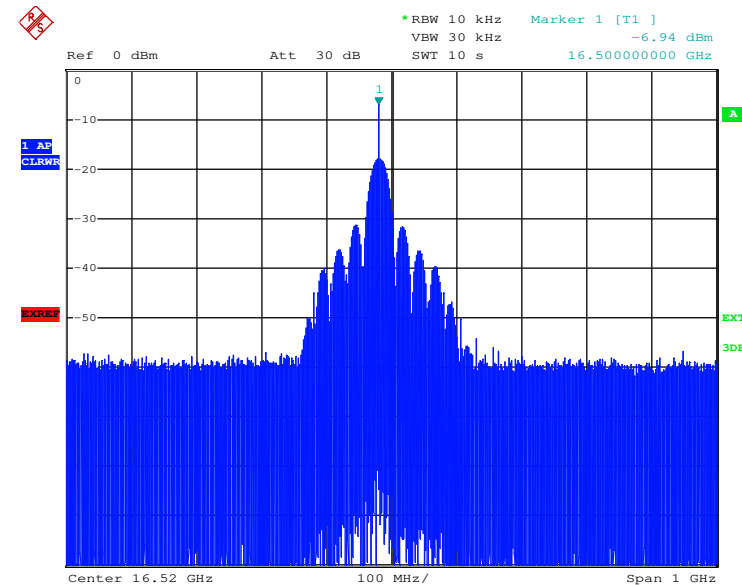
hudecp@fel.cvut.cz

verze 2025



Obsah

- S-parametry
- Výkon signálu, signálová úroveň
- Šumové parametry
- Nelineární parametry



Důležité parametry

- Mezi nejdůležitější parametry VF a mikrovlnných obvodů a systémů patří:
 - S-parametry
 - Výkon signálu, signálová úroveň
 - Odstup signál-šum, šumové číslo, šumová teplota, šumový práh
 - Výkon harmonických a IM produktů, IP2, IP3
- Běžně používané pro:
 - Návrh a analýzu VF a mikrovlnných komponent a obvodů
 - Návrh a analýzu VF a mikrovlnných radiových systémů
 - Související měření

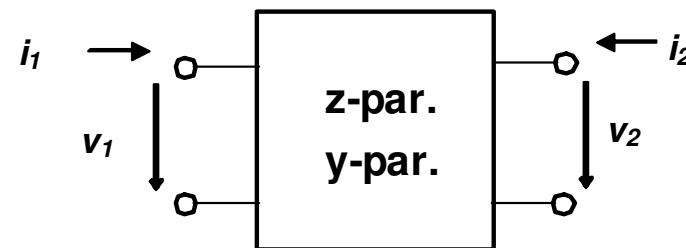
S-parametry

- **Podobné jako z- nebo y-parametry:**

- Ty se používají v oblasti NF
- Jsou založené na standardních parametrech TO, tedy u a i
- Používají se k popisu obecných 2-branů, vícebranů
- Používají se pro obecnou analýzu obvodů

- S-parametry:

- Používají se v oboru VF a mikrovln
- Jsou **založené na dopadajících a odražených napětových vlnách**
- U tomto oboru lze použít i z- nebo y-parametry,
- **ale s-parametry lépe odpovídají podmínkám VF a mikrovlnných zařízení**
- **a také se podstatně lépe měří, a to i na velmi vysokých GHz frekvencích.**

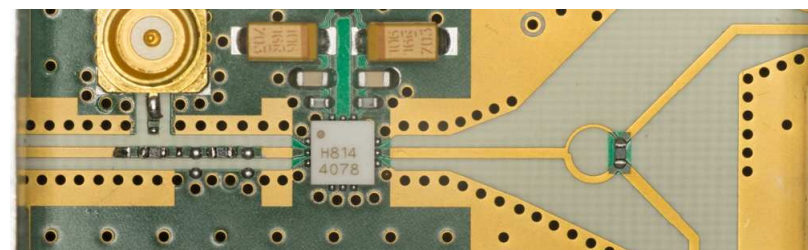
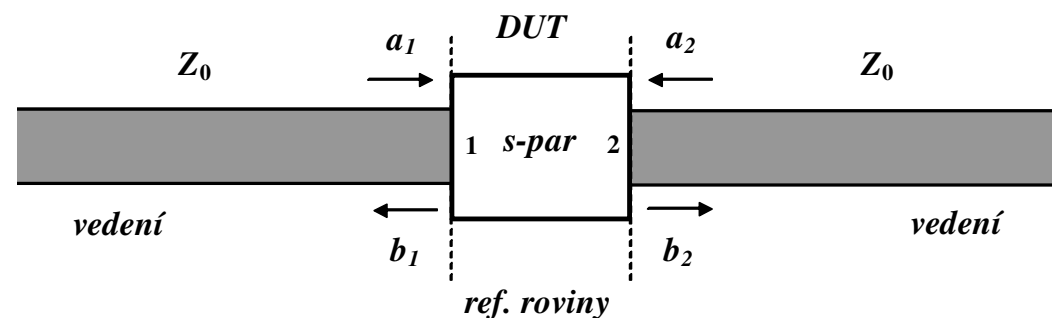


$$u_1 = z_{11} \cdot i_1 + z_{12} \cdot i_2$$

$$u_2 = z_{21} \cdot i_1 + z_{22} \cdot i_2$$

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$



S-parametry (S=„Scattering“)

- Jsou definovány pomocí:
 - Dopadajících a a odražených b napěťových vln
 - Normovaných k $\sqrt{2Z_0}$
 - Druhé mocniny a a $b \rightarrow$ mají význam výkonu

$$a_i = \frac{\hat{V}^+}{\sqrt{2Z_0}}$$

$$b_i = \frac{\hat{V}^-}{\sqrt{2Z_0}}$$

$$P_i^+ = |a_i|^2 \quad P_i^- = |b_i|^2$$

- Definice:

$$b_1 = s_{11} \cdot a_1 + s_{12} \cdot a_2$$

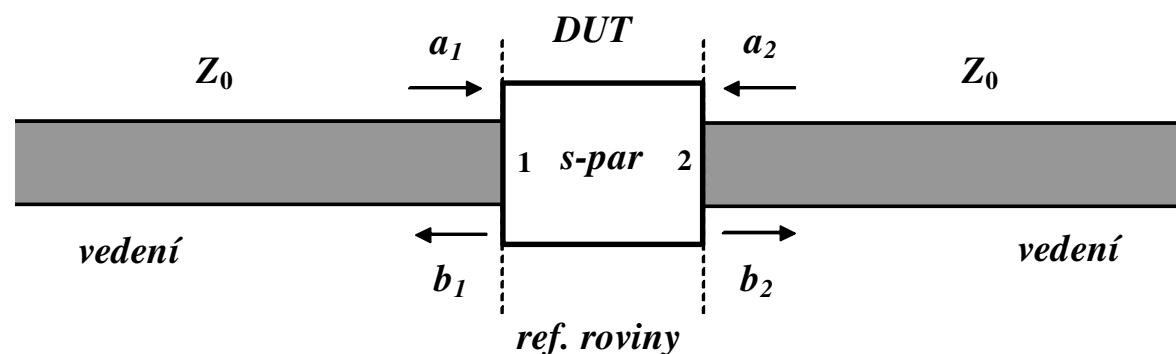
$$b_2 = s_{21} \cdot a_1 + s_{22} \cdot a_2$$

- Maticový zápis:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

- Popis N -branů:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix}$$

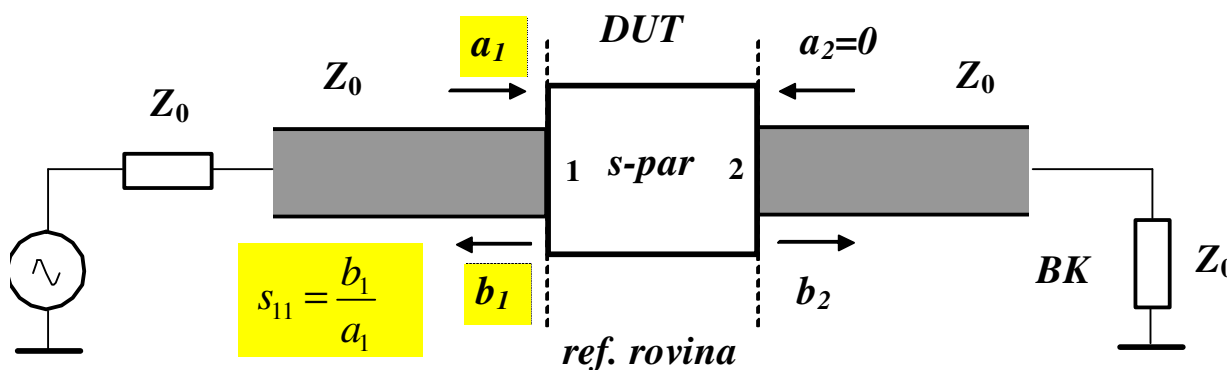


Význam a měření s_{11}

- Z: $b_1 = s_{11} \cdot a_1 + s_{12} \cdot a_2$
- Definice: $s_{11} = \frac{b_1}{a_1}$
- **Za podmínky:** $a_2 = 0$
- Tuto podmínku lze splnit zapojením bezodrazové koncovky (BK) s impedancí $Z_0 = 50\Omega$ na výstup 2-branchu
- s_{11} = vstupní koeficient odrazu s BK zapojenou na výstupu
- Lze jej měřit pomocí VNA („Vector Network Analyzer“)
- Výkonové vyjádření $10 \log |s_{11}|^2 = 20 \log |s_{11}| = -RL_1 = dBs_{11}$
- = útlum odrazů („Return Loss“) na vstupu při $Z_0 = 50\Omega$ zakončení 2-branchu

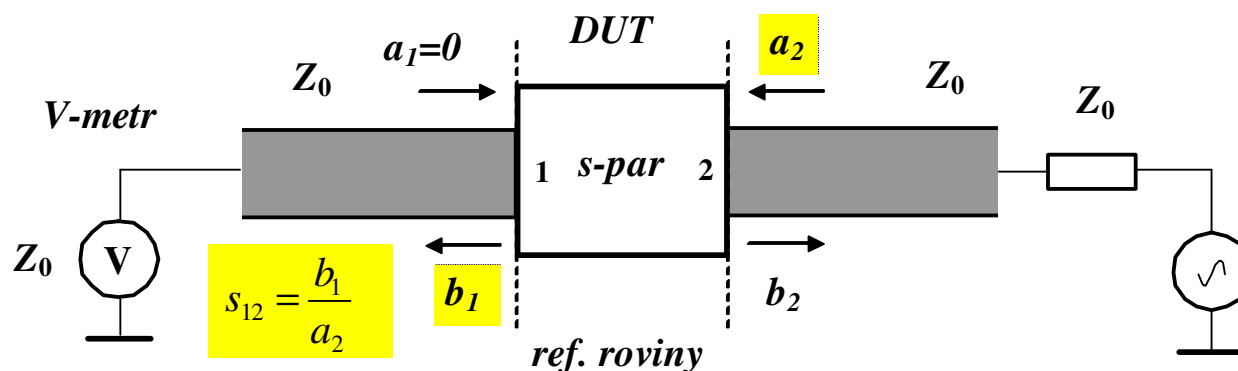


CASE STYLE: LL561



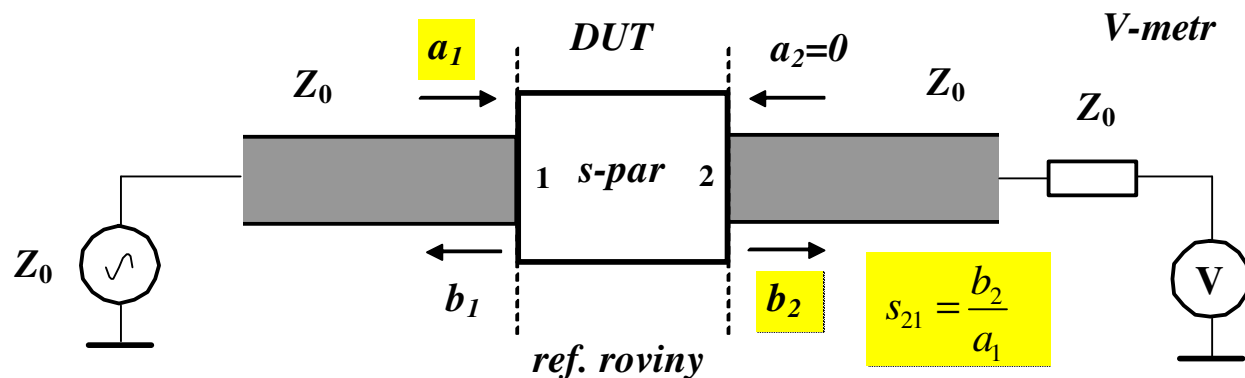
Význam a měření s_{12}

- Z: $b_1 = s_{11} \cdot a_1 + s_{12} \cdot a_2$
- Definice: $s_{12} = \frac{b_1}{a_2}$
- **Za podmínky:** $a_1 = 0$
- VF V-metr měřící b_1 musí mít impedanci $Z_{in} = Z_0 = 50\Omega$
- s_{12} = zpětný koeficient přenosu z výstupu do vstupu
- Lze jej také měřit pomocí VNA
- Výkonové vyjádření: $10\log|s_{12}|^2 = 20\log|s_{12}| = dBs_{12} = G_{retdB}$
- = zpětný výkonový zisk z 50Ω do 50Ω



Význam a měření s_{21}

- Z: $b_2 = s_{21} \cdot a_1 + s_{22} \cdot a_2$
- Definice: $s_{21} = \frac{b_2}{a_1}$
- **Za podmínky:** $a_2 = 0$
- VF V-metr měřící b_2 musí mít impedanci $Z_{in} = Z_0 = 50\Omega$
- s_{21} = dopředný koeficient přenosu
- Lze jej měřit pomocí VNA
- Výkonové vyjádření: $10 \log |s_{21}|^2 = 20 \log |s_{21}| = dBS_{21} = G_{dB}$
- = dopředný výkonový zisk z 50Ω do 50Ω



Význam a měření s_{22}

- Z: $b_2 = s_{21} \cdot a_1 + s_{22} \cdot a_2$

- Definice:

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

- **Za podmínky:** $a_1 = 0$

- Tu lze splnit zapojením BK $Z_0=50\Omega$ na vstup 2-branu

- s_{22} = koeficient odrazu na výstupu při zapojené BK na vstupu

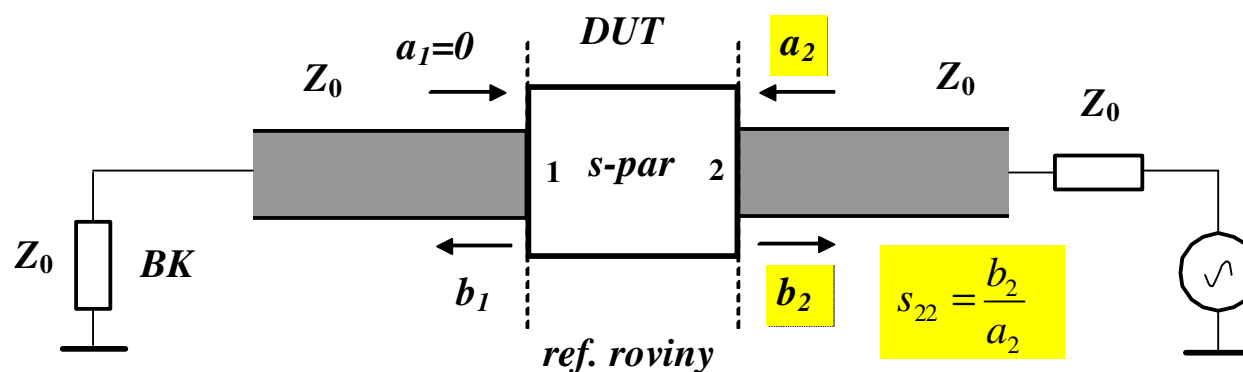
- Měří se pomocí VNA

- Výkonové vyjádření: $10\log|s_{22}|^2 = 20\log|s_{22}| = dBS_{21} = RL_2$

- = Útlum odrazů ("return loss") na výstupu při $Z_0=50\Omega$ na vstupu 2-branu



CASE STYLE: LL561



Srovnání z- a y-parametrů

- **Výhody s-parametrů:**

- Jsou definovány pro zakončení Z_0 na všech branách (obvykle 50Ω)
- **To odpovídá podmínce impedančního přizpůsobení**
- Na vysokých GHz frekvencích lze měřit napěťové vlny
- Pro zátěže 50Ω jsou mikrovlnné tranzistory stabilní

- **z- & y-parametry**

- Jsou definovány pro zátěže OPEN ($i=0$) nebo SHORT ($v=0$)
- **To vede na extrémní impedanční nepřizpůsobení**
- Na VF nelze měřit v , i
- Pro OPEN a SHORT jsou VF tranzistory často nestabilní

- Pokud je to potřeba, lze s-parametry na z- nebo y- snadno přepočítat

- **Přepočetni vztahy** jsou založené na jednoduchých rovnicích:

$$u_1 = a_1 + b_1$$

$$u_2 = a_2 + b_2$$

$$i_1 = \frac{a_1 - b_1}{Z_0}$$

$$i_2 = \frac{a_2 - b_2}{Z_0}$$

- Použití s-parametrů = cvičení

Výkony signálů = signálové úrovně

- V určitých bodech VF a mikrovlnných systémů musí být **definované výkony signálu = signálové úrovně** ("signal levels") - například:
 - Výstupní výkon TX, výkon na vstupu násobiče frekvence, minimální vstupní výkon RX, nominální výkon na LO vstupu směšovače, ...
 - Jsou to základní parametry důležité při návrhu jakéhokoliv radiového systému
- Lze je měřit VF měřiči výkonu nebo spektrálními analyzátory
- Velmi často se vyjadřují v dBm:

$$S_{dBm} = P_{dBm} = 10 \log \frac{P}{10^{-3}} [dBm]$$

$P [W]$	10	1	0,1	0,01	0,001	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-15}
$S [dBm]$	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-50	-70	-90	-120

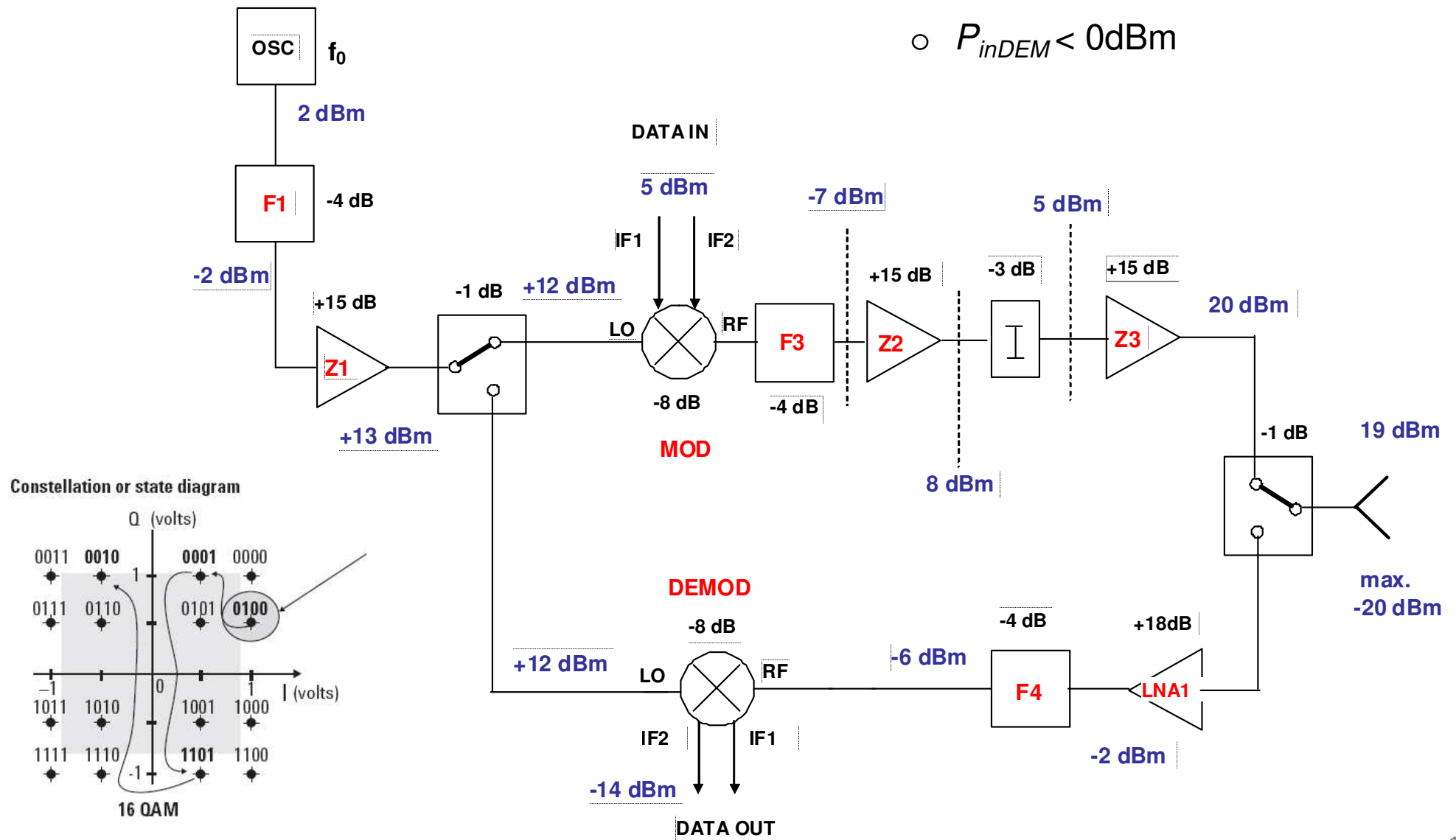
$P [mW]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S [dBm]$	0	3	4,8	6	7	7,8	8,5	9	9,5	10

Příklad:

- TDMA transceiver - návrh signálových úrovní

- Požadované úrovně:

- $P_{LO} = 12\text{dBm}$
- $P_{out} = 19\text{dBm}$
- $P_{inDEM} < 0\text{dBm}$



Šum („Noise“)

- Důležitý při **zpracování signálů s velmi nízkými úrovněmi**
- To je v bezdrátových radiových komunikacích velmi častý případ
- Je to způsobeno velmi vysokými hodnotami útlumu šíření volným prostředím ($FSL = \text{"free space loss"}$)
- V případě vysokých frekvencí a větších vzdáleností mohou být S velmi nízké a srovnatelné se šumem
- Ale pro správné vyhodnocení v demodulátoru musí být S dostatečně vysoko nad šumovým prahem N
- **Šumové příspěvky:**
 - Šum z přijímací antény
 - Šum generovaný lineárními obvody RX
 - Fázový šum místního oscilátoru

$$FSL = 10 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi R f}{c} \right)$$

- **$f=1\text{GHz}$**

R [m]	1	10	100	1000	10 km
FSL [dB]	32,4	52,4	72,4	92,4	112,4

- **$f=10\text{GHz}$**

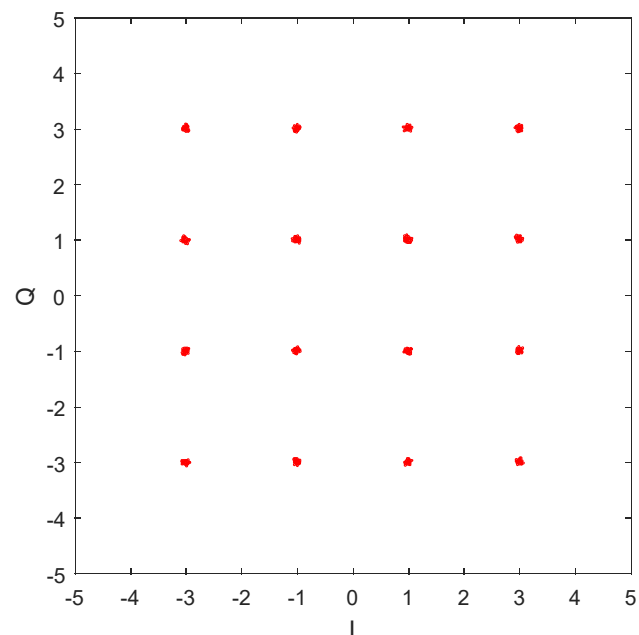
R [m]	1	10	100	1000	10 km
FSL [dB]	52,4	72,4	92,4	112,4	132,4

- **$f=100\text{GHz}$**

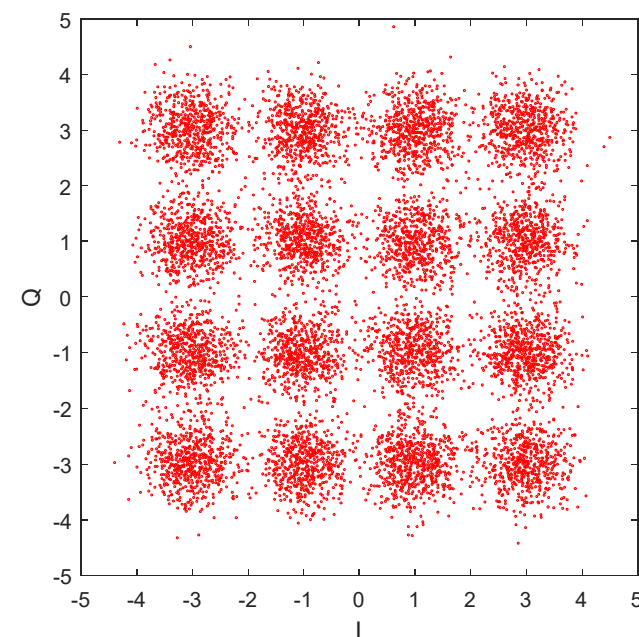
R [m]	1	10	100	1000	10 km
FSL [dB]	72,4	92,4	112,4	132,4	152,4

Šumové parametry

- Nejčastěji používané parametry:
 - **Odstup signál-šum** ("signal-to-noise ratio") SNR
 - **Šumové číslo** ("noise figure") F
 - **Šumová teplota** T_e
 - Šumový výkon, šumový práh N
 - Popis fázového šumu $PSD=f(\Delta f)$
- Vliv šumu:
 - Šum je náhodný signál, který se sčítá (někdy násobí) s užitečným digitálním signálem
 - Zvyšuje rozptyl symbolů
 - **To zvyšuje "bit-error rate" BER**
 - Šum musí být důsledně "pod kontrolou"



16QAM $SNR=40 \uparrow$ $SNR=15 \downarrow$



Odstup signál-šum

- Podíl výkonu signálu S a výkonu šumu N

$$SNR = \frac{S}{N}$$

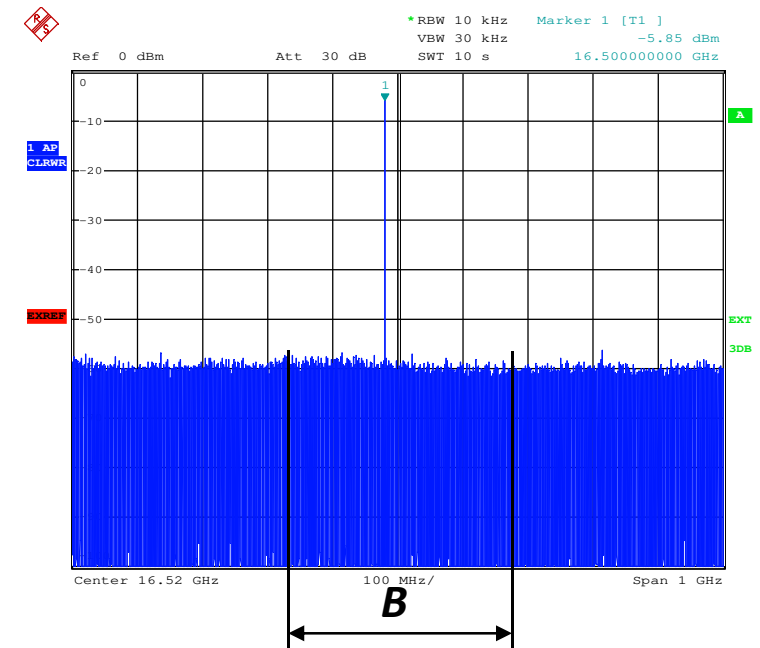
- V dBm:

$$SNR_{dB} = S_{dBm} - N_{dBm}$$

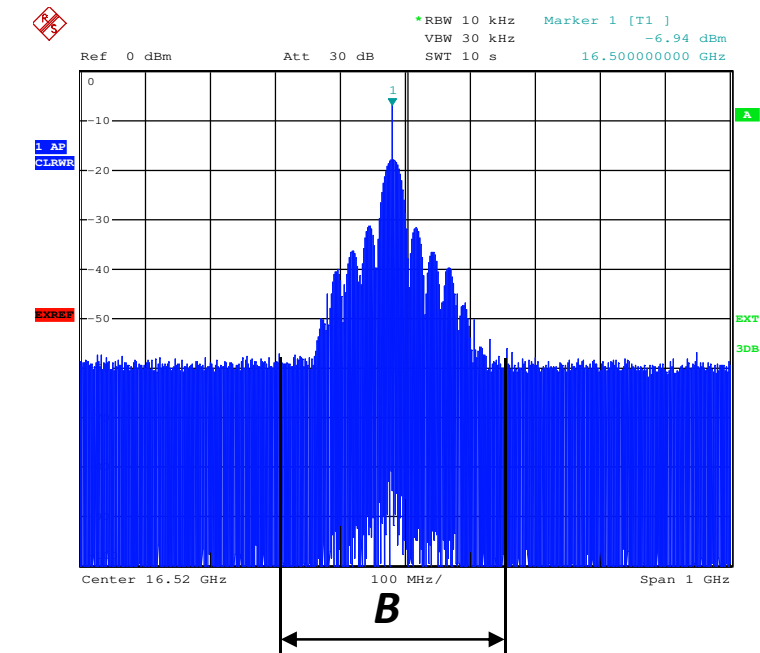
- Nemodulovaný signál - výkon lze pomocí SpA odečíst přímo
- Modulované signály - výkon musí být integrován přes šířku kanálu B

$$S = \int_{-B/2}^{+B/2} PSD_{sig} df$$

- Spektrální výkonová hustota PSD („Power Spectral Density“) ve W/Hz nebo dBm/Hz



Date: 5.JUN.2017 16:18:19



Date: 5.JUN.2017 16:26:32

Odstup signál-šum

- PSD šumu - označení N_0 - obvykle konstantní v pásmu B
- Jednotka = W/Hz resp. dBm/Hz
- Často se vyjadřuje pomocí ekvivalentní šumové teploty T

$$PSD_{noise} = N_0 = kT$$

- k = Boltzmanova konstanta

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$$

- T = virtuální ekvivalentní teplota bezodrazové koncovky, která generuje stejnou PSD šumu

- Bezodrazová koncovka

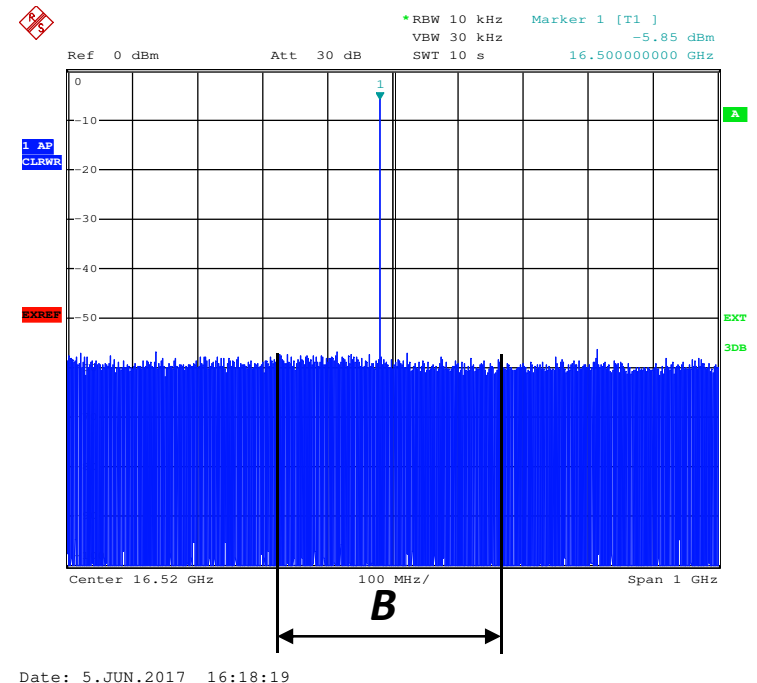
$$N_0 = kT_0$$

$$T_0 \cong 290 \text{ K}$$

- Šumový výkon v pásmu B

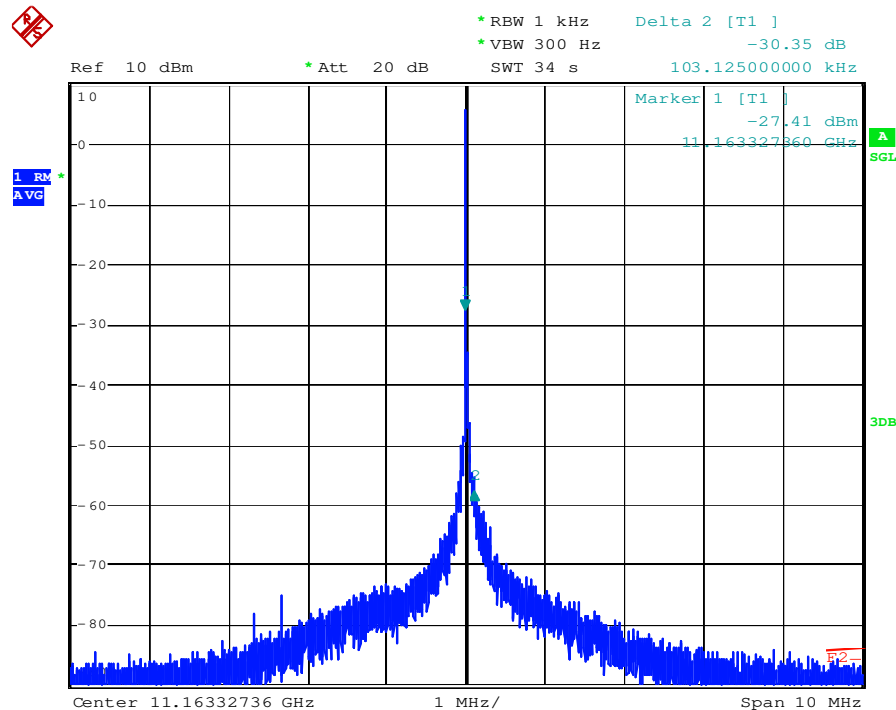
$$N = kTB$$

- Výjimka - fázový šum LO

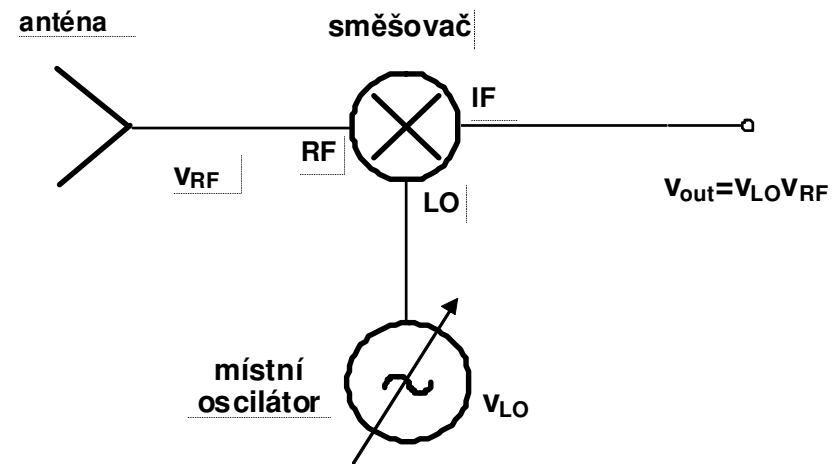


Fázový šum LO

- Místní oscilátor („Local Oscillator“, LO) = oscilátor používaný pro buzení LO vstupů směšovačů (relativně silným signálem ~10dBm)
- LO a směšovače patří mezi základní komponenty (skoro) všech radiových vysílačů a přijímačů - details později
- Fázový šum = šum v bezprostřední blízkosti nosné způsobený náhodnými změnami fáze
- Fázový šum se násobením (konvoluce spekter) přenáší na užitečný signál
- Vliv fázového šumu se řeší ve všech radiových přijímačích (RX)
- Měření i výpočty → relativně složité



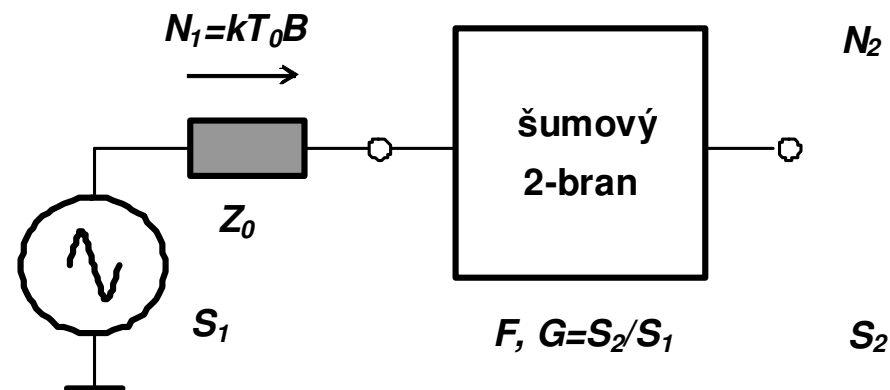
Date: 16.OCT.2008 17:33:23



Šumové číslo F

- Používá se pro popis šumových vlastností 2-branů
- 2 hlavní definice:
 - SNR definice
 - Výkonová definice
- SNR definice:**
 - S_1 = výkon signálu na vstupu
 - N_1 = výkon šumu na vstupu
 - S_2 = výkon signálu na výstupu
 - N_2 = výkon šumu na výstupu
- DŮLEŽITÉ:
 - Platí pouze pro $N_1 = kT_0B$
 - To je šumové vyzařování "černého tělesa"
 - Definiční teplota $T_0 = 290\text{ K}$

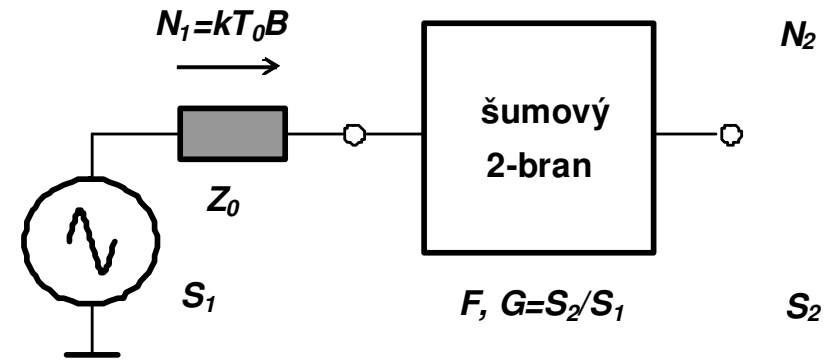
$$F = \frac{\frac{S_1}{N_1}}{\frac{S_2}{N_2}}$$



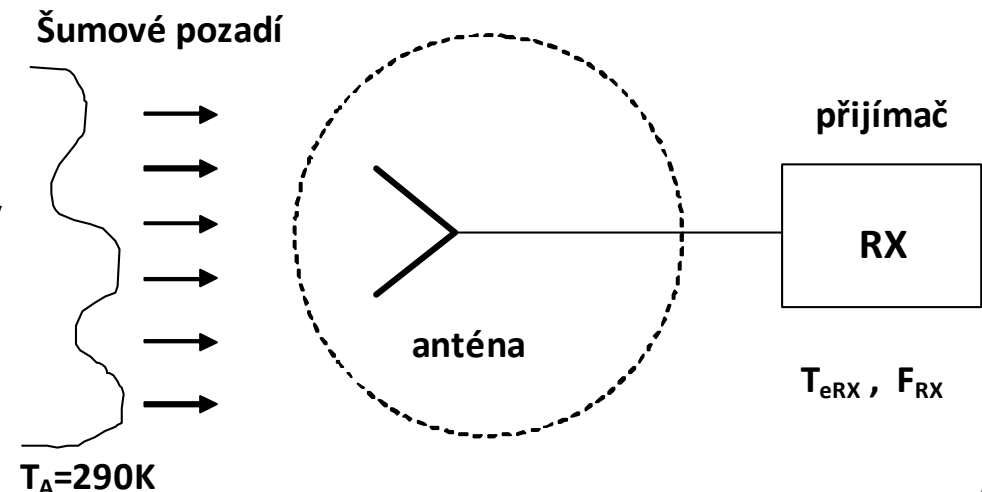
- Použití definice založené na SNR :
 - Systémové výpočty
 - Rozhodující pro BER
 - Každá modulace a BER vyžadují určitou hodnotu SNR_{min}**
 - Pro analýzu VF obvodů ale tato definice vhodná není

Referenční "černé těleso"

- Generuje šum $N_1 = kT_0B$
- Referenční teplota $T_0 = 290\text{ K}$
- Praktická realizace ve VF oboru → bezodrazová koncovka (BK)
 - Impedance přesně $Z_0 = 50\Omega$
 - Velmi vysoké RL
 - Vyrábí se do 10^1 - 10^2 GHz
 - Standardní VF komponenta
- Jiná relevantní realizace = anténa:
 - Impedančně přizpůsobená
 - Namířená na "černý" povrch s fyzickou teplotou 290K
 - V oboru bezdrátových komunikací → častý případ
- V ostatních případech $N_1 \neq kT_0B$ a definici F nelze použít přímo



CASE STYLE: LL561



Šumové číslo F

- Výkonová definice:

- Nahrazuje signály S_1 a S_2 ziskem 2-branu G :

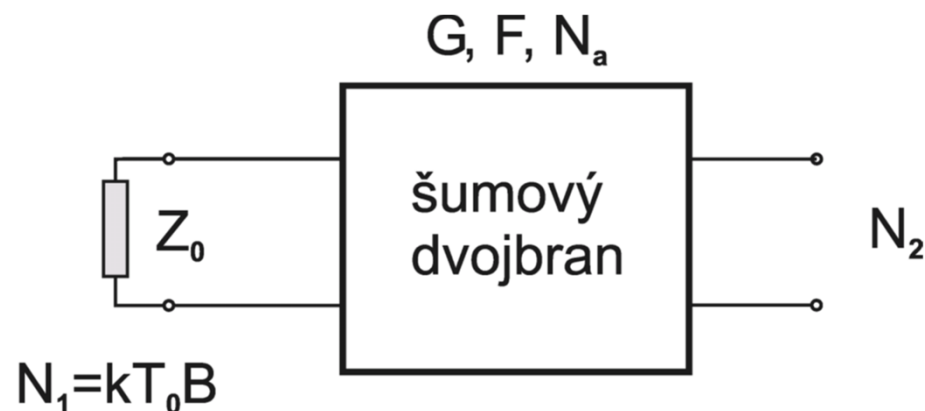
$$G = S_2 / S_1$$

- Vhodné pro návrh obvodů a měření
- Na vstupu musí být BK s impedancí přesně Z_0 a šumovým výkonem

$$N_1 = kT_0 B$$

- Definice:

- Celkový výstupní šumový výkon N_2 dělený zesíleným šumem z BK na vstupu.
- N_a = šumový výkon přidáný 2-branem
- N_a lze použít pro složitější šumové výpočty - například šum kaskády



$$F = \frac{N_2}{GN_1} = \frac{GN_1 + N_a}{GN_1} = 1 + \frac{N_a}{GN_1} = 1 + \frac{N_a}{kT_0 BG}$$

- Často v dB

$$F_{dB} = 10 \cdot \log F$$

$$F = 10^{F_{dB} / 10}$$



Ekvivalentní šumová teplota T_e

- Výhodné pro řešení šumu antén:

- Z 2-branu jsou vyjmuty všechny vnitřní zdroje šumu a jsou nahrazeny virtuální přídatnou BK zapojenou na vstupu,
 - a to BK s šumovou teplotou T_e
 - T_e lze vypočítat z N_a

- N_a z definice F :

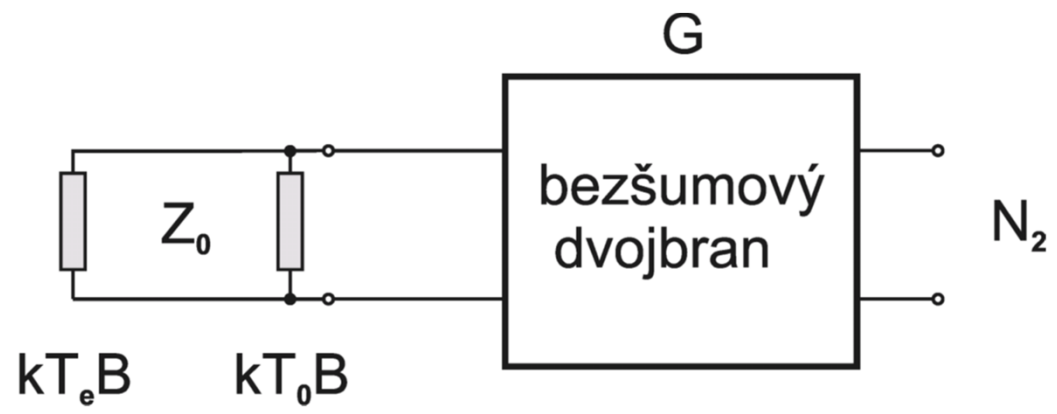
$$N_a = (F - 1)kT_0BG$$

- N_a odpovídající T_e :

$$N_a = kT_eBG$$

- Srovnáním:

$$T_e = (F - 1)T_0$$



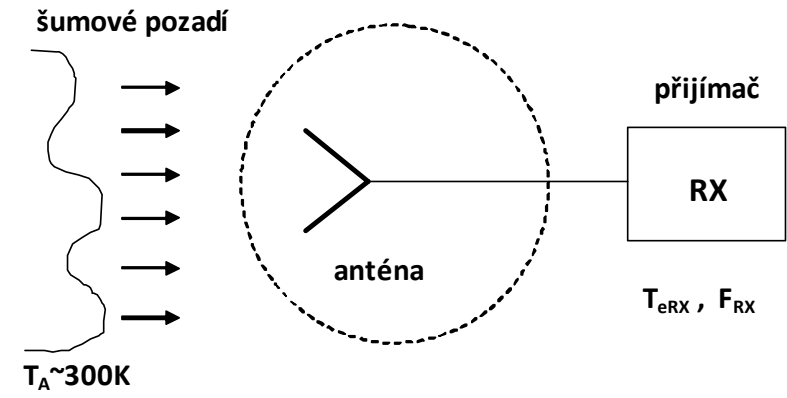
- Použití v radioastronomii:

- Obvody s velmi nízkými F :

$$F = 1,1 \quad F_{dB} = 0,413dB \quad T_e = 29K$$

$$F = 1,11 \quad F_{dB} = 0,453dB \quad T_e = 31,9K$$

- Řešení šumu antén - podrobnosti dále



Šumové číslo pasivních komponent

- Dobře impedančně přizpůsobené pasivní VF komponenty:**

- Atenuátory
- Kabely, přenosová vedení
- Filtry v průchozím pásmu
- VF přepínače
-

- F je možné vyhodnotit podle definice:

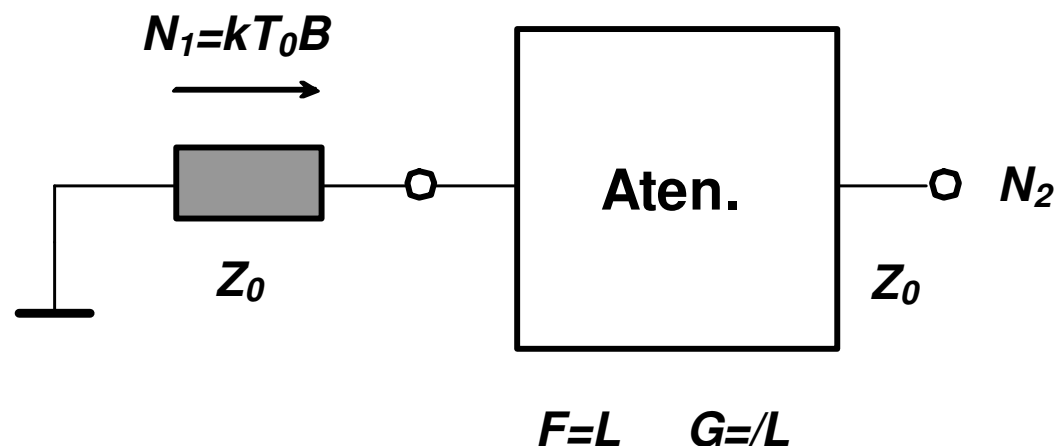
- Kombinace BK-atenuátor generuje šumový výkon

$$N_2 = kT_0 B$$

- , přitom přenos je $G=1/L$

- Šumové číslo F se rovná útlumu pasivního 2-branu L

- Může být velmi významné



$$F = \frac{N_2}{GN_1} = \frac{kT_0 B}{\frac{kT_0 B}{L}} = L$$

- Při zakončení ostatních bran pomocí BK lze použít i pro vícebrany:

- Děliče výkonu
- Směrové vazby
-

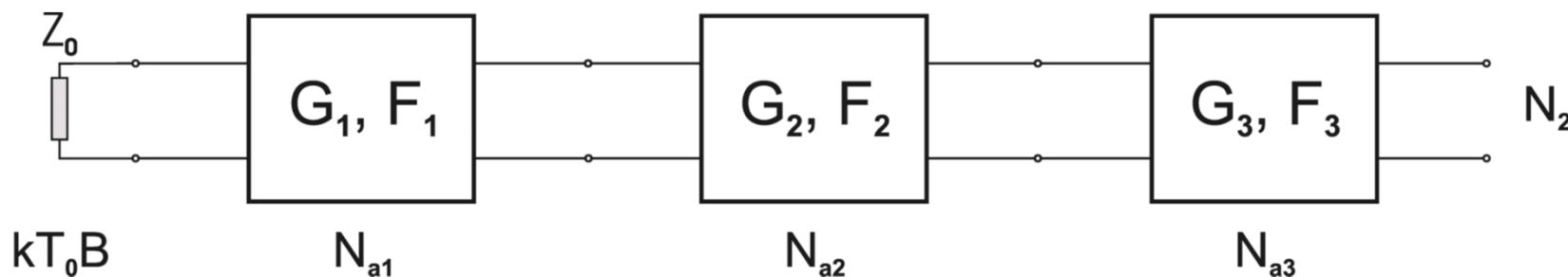
Šumové číslo kaskády

- Radiové RX se vždy skládají z více kaskádně zapojených komponent
- Pro většinu z nich platí $N_1 \neq kT_0B$ $N_{a1} = (F_1 - 1)kT_0BG_1$
- Definiční vztah pro F nelze tedy použít přímo $N_{a2} = (F_2 - 1)kT_0BG_2$
- **S výhodou lze použít N_a** \longrightarrow $N_{a3} = (F_3 - 1)kT_0BG_3$

- Šumový výkon:
$$N_2 = kT_0BG_1G_2G_3 + N_{a1}G_2G_3 + N_{a2}G_3 + N_{a3} =$$
$$= kT_0B[G_1G_2G_3 + (F_1 - 1)G_1G_2G_3 + (F_2 - 1)G_2G_3 + (F_3 - 1)G_3]$$

- Friisův vztah:
$$F_c = \frac{N_2}{kT_0BG_1G_2G_3} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1G_2} + \dots$$

- Lze jej rozšířit pro libovolně dlouhé kaskády

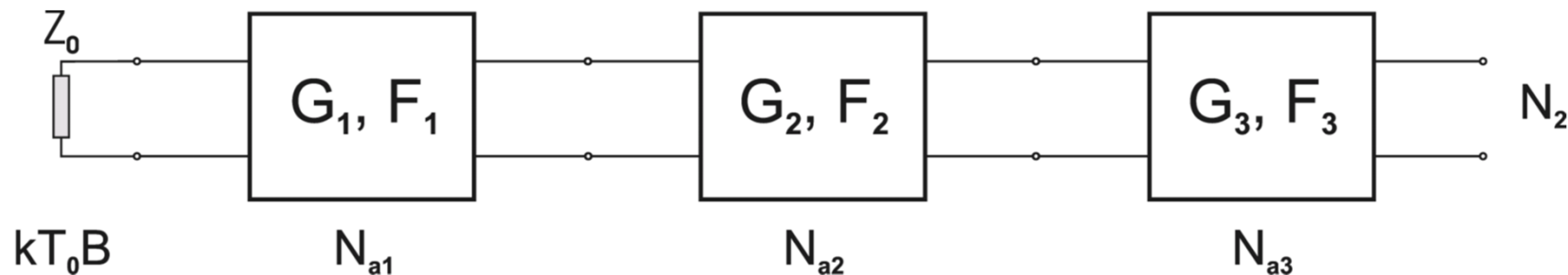


Šumové číslo kaskády

- Celkové šumové číslo:

$$F_c = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

- Silně závisí na F_1 = šumové číslo prvního obvodu v kaskádě
- Proto jsou na vstupech RX obvykle nízkošumové předzesilovače LNA
- Hodnoty F_{LNA} mohou být velmi nízké - i výrazně méně než 1dB (1,26), a to i na vyšších GHz frekvencích (např. v satelitních komunikacích)
- Ne vždy jsou ale extrémně nízké hodnoty F nezbytné - závisí to na systémovém rozboru / návrhu (později)
- Vliv šumových příspěvků následujících obvodů v kaskádě je omezen ziskem LNA s hodnotou G_1 - ta by měla být proto dostatečně vysoká



Příklad: Friisův vztah

- Vstupní obvody RX se skládají z propojovacího kabelu, vstupního TDD přepínače, LNA, filtru a přímého IQ demodulátoru. Vypočítejte celkové šumové číslo F_c tohoto RX.
- Útlumy kabelu a přepínače lze sloučit do vstupního útlumu L_{in} .

Celkové šumové číslo RX:

$$F_c = L_{in} + (F_{LNA} - 1)L_{in} + \frac{(F_F - 1)L_{in}}{G_{LNA}} + \frac{(F_{dem} - 1)L_{in}L_F}{G_{LNA}}$$

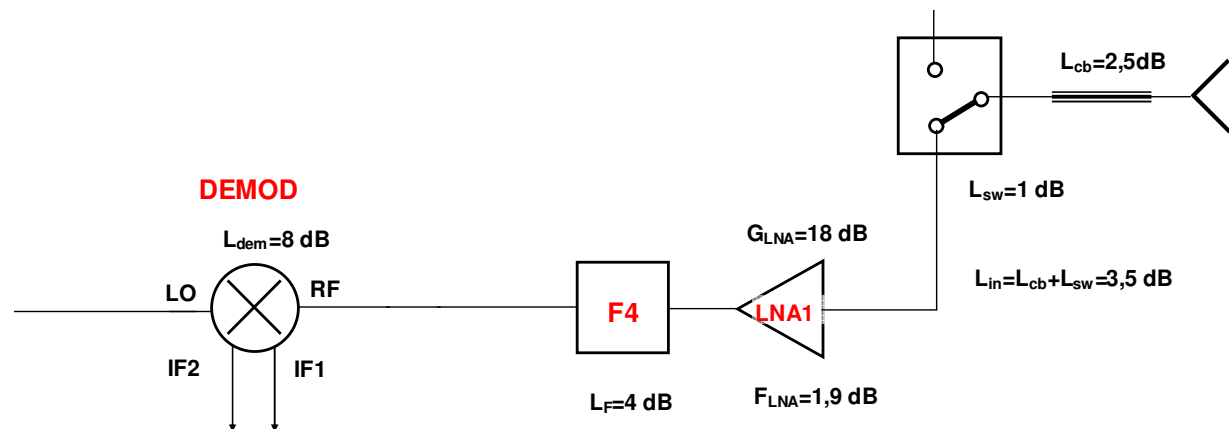
- Šumové číslo demodulátoru:

$$F_{dem} \cong L_{conv}$$

- Výsledné F_c :

$$F_c = 2,24 + 1,23 + 0,0536 + 0,473 = 4,0$$

$$F_c = 10\log(4) = 6 \text{ dB}$$



parametr	L_{in}	F_{LNA}	G_{LNA}	L_F	L_{dem}
hodnota dB	3,5	1,9	18	4	8
hodnota [-]	2,24	1,55	63,1	2,51	6,31



Systemové šumové výpočty

- Předcházející příklad ukazuje silný vliv útlumu na vstupu L_{in} na celkové šumové číslo RX

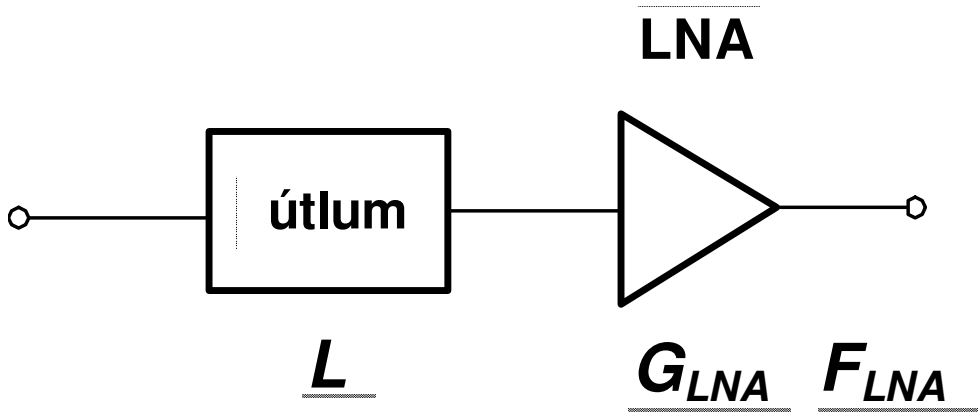
$$F_c = L_{in} + (F_{LNA} - 1)L_{in} = L_{in} + L_{in}F_{LNA} - L_{in} = L_{in}F_{LNA}$$

$$F_{cdB} = L_{indB} + F_{LNAdB}$$

- Ztráty před LNA v dB se přímo sčítají s F_{LNA} (také v dB)
- Vysoké útlumy mezi anténou a LNA mohou být "zničující"

- **Vliv šumu antény:**

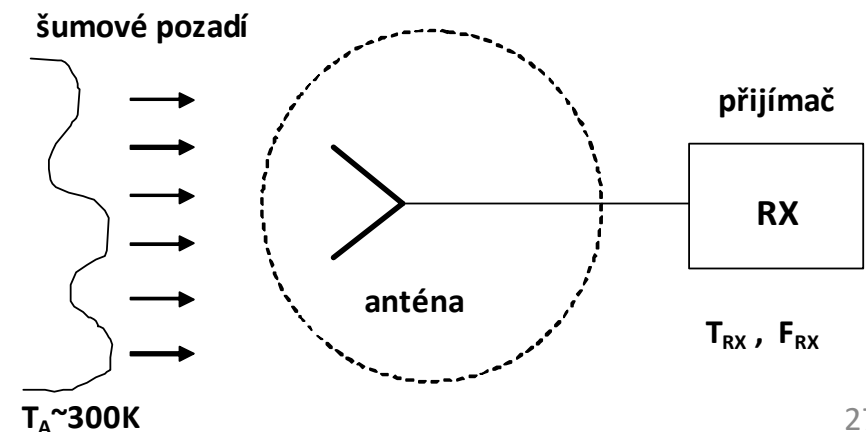
- Nelze jej řešit přes šumové číslo - to je definováno jen pro 2-brany
- **Lze jej řešit pomocí šumových teplot**
- Šumová teplota antény T_A :
 - Je dána hlavně teplotou okolí
 - Pozemské komunikace $T_A \cong 300K$
 - Satelitní komunikace $T_A \cong 3K$
- Vliv šumu RX: $T_{RX} = (F_{RX} - 1)T_0$



Systémové šumové výpočty

- Výsledná systémová šumová teplota: $T_{sys} = T_A + T_{RX}$
- **Pozemské komunikace:**
 - Antény "vidí" povrch země, budovy, lidi, ... $T_A \cong 300K$
 - Tomu odpovídá $T_A \cong T_0$
 - Systémová šumová teplota $T_{sys} = T_A + T_{RX} = T_0 + (F_{RX} - 1)T_0 = F_{RX} T_0$
 - $T_A \cong 300K$ je dost vysoká hodnota → použití extrémně nízkošumových LNA s nízkými T_{RX} nepřináší velký efekt a jsou zbytečně nákladné
 - Příklad: Šumová čísla F mobilních telefonů jsou obvykle kolem 6dB
- **Satelitní komunikace:**
 - Antény "vidí" téměř 0K (jen reliktní záření) $T_A \cong 3K$
 - Velmi nízké hodnoty T_{RX} jsou pak velmi výhodné
- Z T_{sys} lze vypočítat šumový práh RX
vztažený ke vstupu:

$$N_{in} = kT_{sys} B$$



Systémové šumové výpočty

• Příklad:

- Mobilní datový přenos 64-QAM vyžaduje pro požadované BER

$$SNR = 14dB$$

- Šířka pásma RX

$$B = 1MHz$$

- Šumové číslo RX

$$F_{RX} = 6dB = 4$$

- Mobilní komunikace

$$T_A \cong 290K$$

- Vypočtete minimální signál

$$S_{inmin}$$

• Řešení:

- Systémová teplota

$$T_{sys} = T_A + T_{RX} = F_{RX} T_0 = 4 \cdot 290 = 1160K$$

- Šumový práh

$$N_{in} = kT_{sys} B = 1,38 \cdot 10^{-23} 1160 \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 10^{-14} = -108dBm$$

- Minimální výkon signálu

$$S_{inmin} = N_{in} SNR = -108 + 14 = -94dBm$$

Nelineární jevy

- Vedle šumu je funkce všech VF systémů omezená i nelineárním chováním některých obvodů:

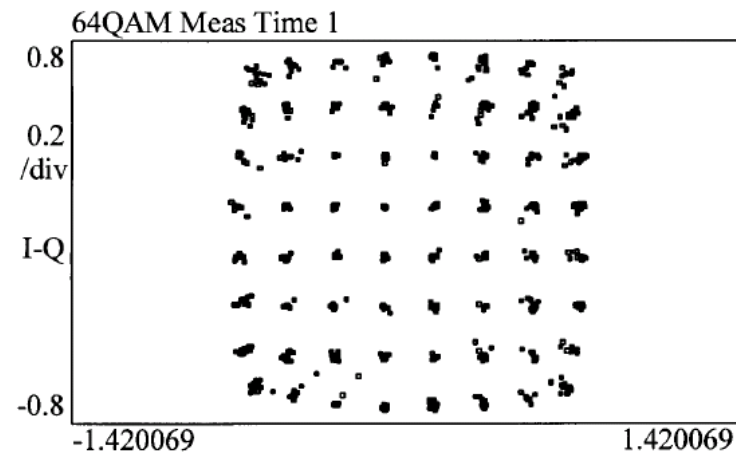
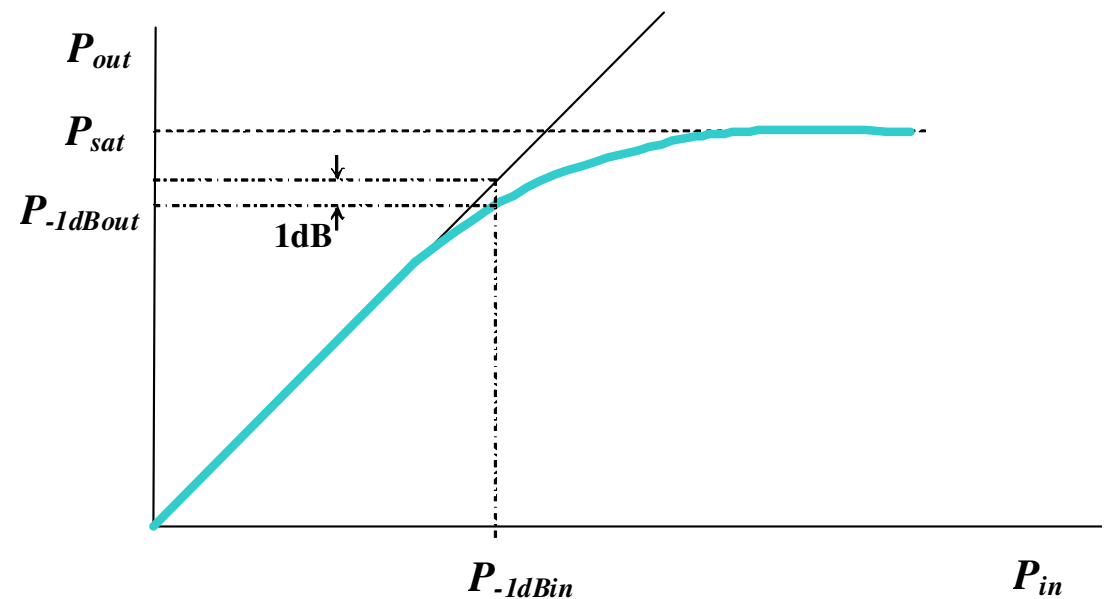
- Zesilovače
- Směšovače
- Násobiče frekvence
- Limitery
- ...

- Nelineární chování musí být často zvažováno i při použití:

- VF prepínačů
- Proměnných attenuátorů
-

- Obecně, všechny obvody obsahující tranzistory nebo diody

- Příklad:
 - Saturace VF zesilovačů
 - Vliv na konstelační diagram





Jeden vstupní signál

- Obvyklý popis nelineárního chování
→ pomocí polynomiální aproximace:

$$v_2 = k_1 v_1 + k_2 v_1^2 + k_3 v_1^3 + \dots$$

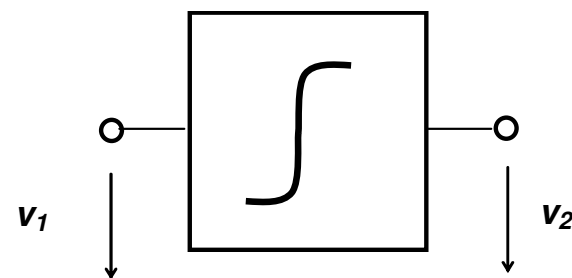
- 1 vstupní sinusový signál

$$v_1 = V_1 \cos \omega_1 t$$

- Výstupní signál:

$$v_2 = \frac{1}{2} k_2 V_1^2 + \left(k_1 V_1 + \frac{3}{4} k_3 V_1^3 \right) \cos(\omega_1 t) + \frac{1}{2} k_2 V_1^2 \cos(2\omega_1 t) + \frac{1}{4} k_3 V_1^3 \cos(3\omega_1 t) + \dots$$

- Na výstupu je více různých nelineárních produktů
- Nelineární obvody vykazují kompresi a generují nové výstupní frekvence



- Použité vzorce:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\alpha)$$

$$\cos^3 \alpha = \frac{1}{4} (\cos 3\alpha + 3\cos \alpha)$$

Výstupní spektrum

- Jednotlivé složky v_2 :**

- **DC složka** = detekce
- **Zesílený/zeslabený vstupní signál**
- **Komprese signálu** $k_3 \leq 0$
- **2. harmonická**
- **3. harmonická**

- Použití:**

- VF detektory
- Zesilovače
- Omezovače = limitery
- Násobiče frekvence 2x, 3x, ...

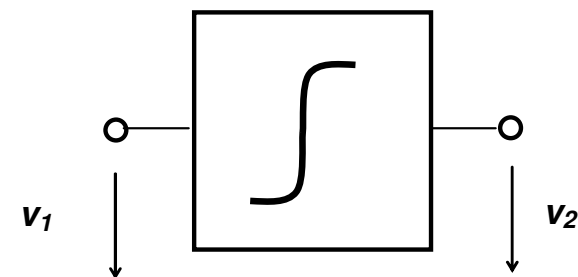
$$\frac{1}{2}k_2V_1^2$$

$$k_1V_1\cos(\omega_1t)$$

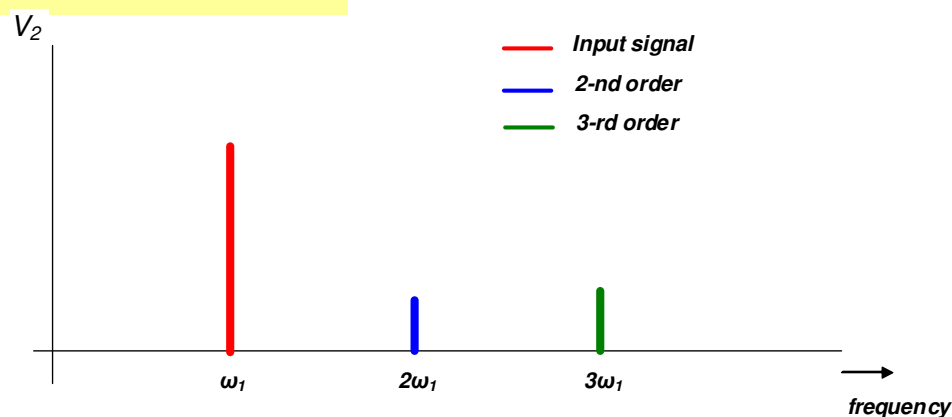
$$\frac{3}{4}|k_3|V_1^3\cos(\omega_1t)$$

$$\frac{1}{2}k_2V_1^2\cos(2\omega_1t)$$

$$\frac{1}{4}k_3V_1^3\cos(3\omega_1t)$$



$$v_1 = V_1\cos\omega_1t$$

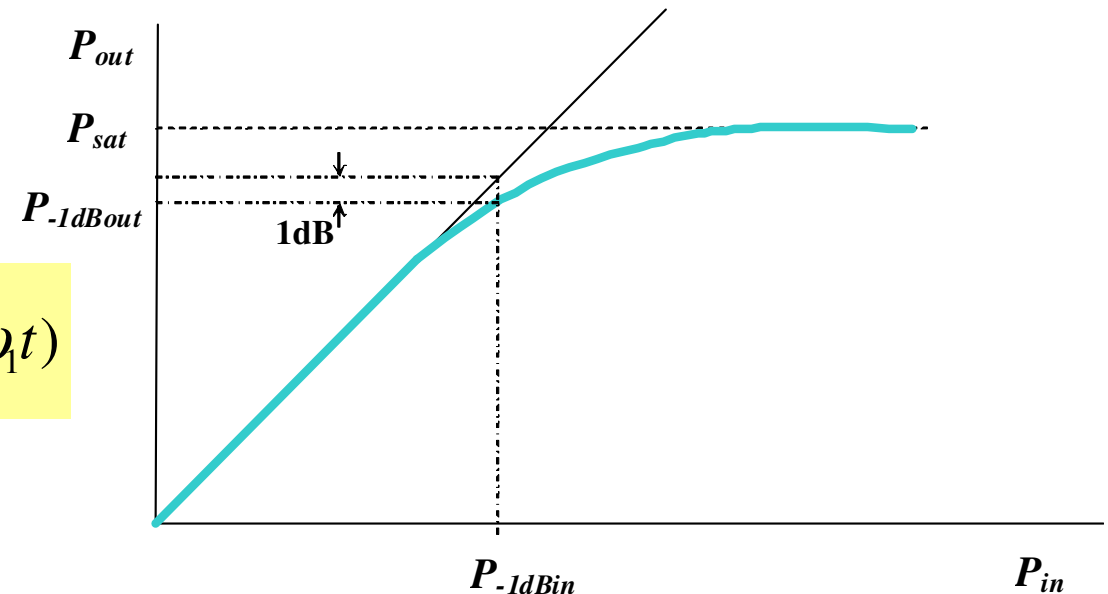


Kompresa P_{-1dB}

- Je to nelineární produkt 3. řádu
- Výstupní napětí na ω_1 :

$$v_2(\omega_1) = k_1 V_1 \cos(\omega_1 t) - \frac{3}{4} |k_3| V_1^3 \cos(\omega_1 t)$$

- Protože je $k_3 < 0$, pro vyšší V_1 klesá výstupní výkon
- Zesilovače → komprese je způsobena omezeným napájecím napětím
- V praxi se popisuje pomocí parametru P_{-1dB}
- P_{-1dB} = výstupní výkon odpovídající rozdílu 1dB mezi reálným průběhem $P_{out} = f(P_{in})$ a extrapolovanou lineární částí



- P_{-1dB} = použitelný výstupní výkon
 - **ALE na výstupu mohou být již nepříjemné úrovně parazitních IM produktů**
 - Důsledkem mohou být rušivé interference nebo rozšiřování spektra
 - Detaily dále
- V praxi proto často $P_{out} < P_{-1dB}$

Dva vstupní signály

- Jednotlivé složky v_2 :**

- DC složka, detekce

$$\frac{1}{2} k_2 (V_1^2 + V_1^2) = k_2 V_1^2 \quad v_1$$

- Zesílené / zeslabené v_1

$$k_1 V_1 [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)]$$

- Komprese

$$k_3 \leq 0$$

$$\frac{3}{4} |k_3| V_1^3 [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)]$$

- 2. harmonická

$$\frac{1}{2} k_2 V_1^2 [\cos(2\omega_1 t) + \cos(2\omega_2 t)]$$

- 3. harmonická

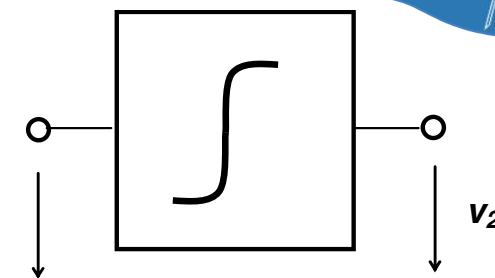
$$\frac{1}{4} k_3 V_1^3 [\cos(3\omega_1 t) + \cos(3\omega_2 t)]$$

- IM produkty 2. řádu

$$k_2 V_1^2 [\cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

- IM produkty 3. řádu

$$\begin{aligned} & \frac{3}{4} k_3 V_1^3 [\cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \cos(2\omega_1 + \omega_2)t] + \\ & + \frac{3}{4} k_3 V_1^3 [\cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \cos(2\omega_2 + \omega_1)t] \end{aligned}$$



$$v_1 = V_1 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$$

Výstupní spektrum

- Nové výstupní frekvence:

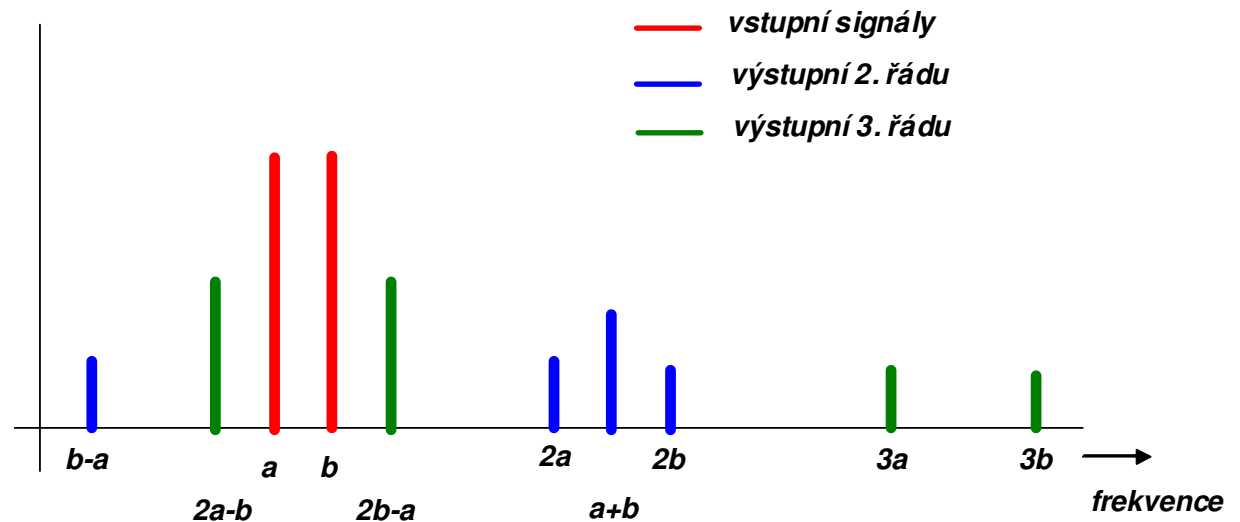
- 2. harmonické

- 3. harmonické

- Intermodulační produkty (IM)

- IM 2. řádu (typu $a \pm b$)

- IM 3. řádu (typu $2a \pm b$)



- Význam IM produktů 2. řádu

- Použití = směšovače ("mixers")

- Ty patří mezi základní komponenty všech radiových TX i RX

- IM mohou ale i způsobovat rušivé signály = interference,

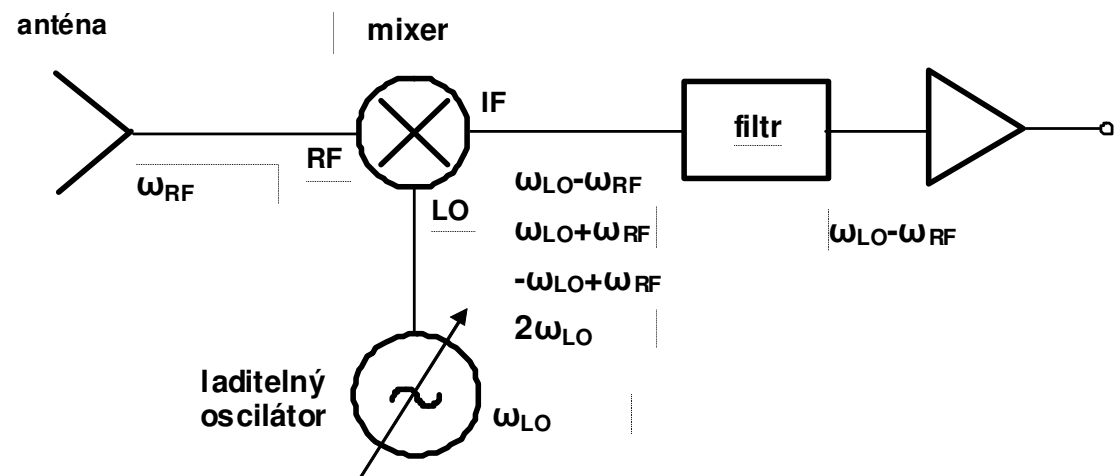
- a to pokud spadají do jiného VF kanálu

- Produkty 2. řádu obvykle spadají daleko od výchozích frekvencí,

takže je lze dobře filtrovat.

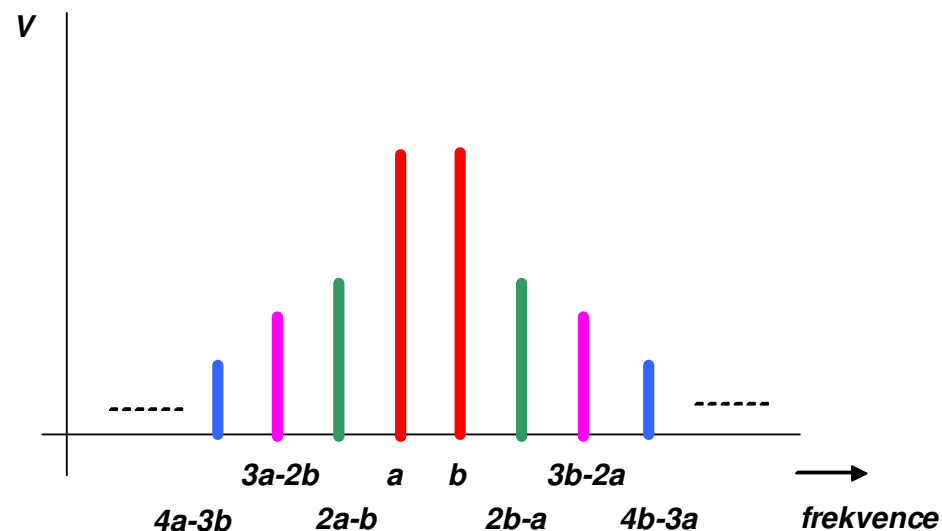
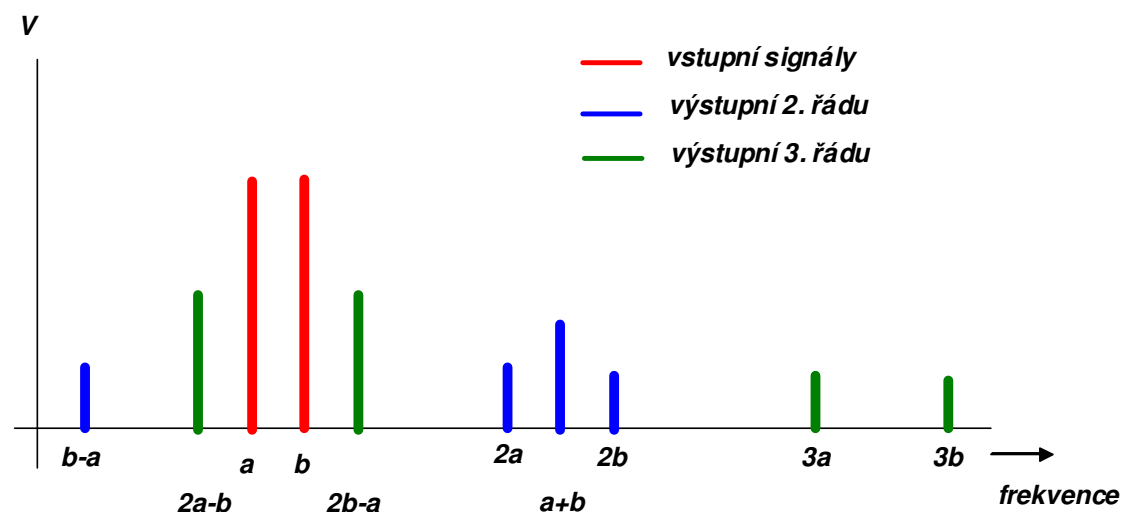
$$f_{IF} = \pm f_{LO} \pm f_{RF}$$

$$f_{RF} = \pm f_{LO} \pm f_{IF}$$



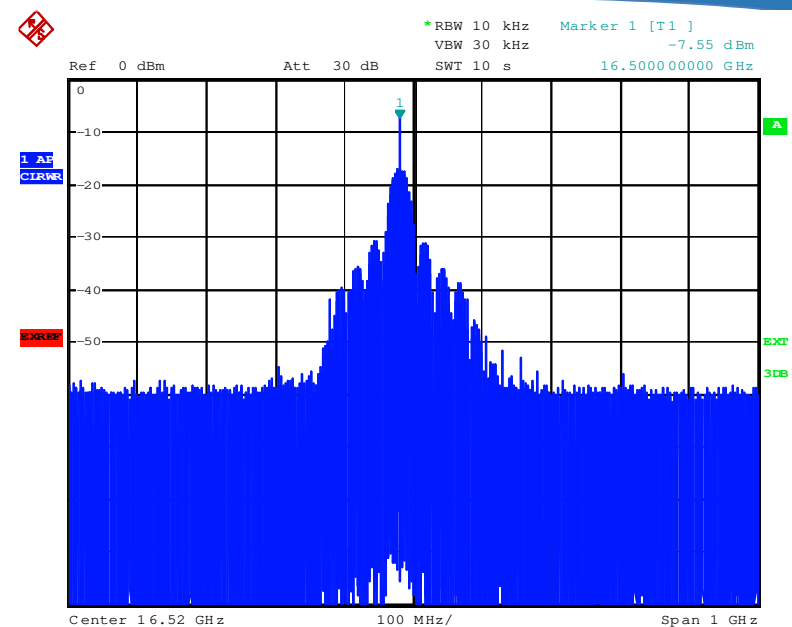
IM produkty 3. řádu

- Typu $2a \pm b$:
 - Vždy jsou to rušivé interference.
 - Ve VF radiových komunikacích představují jeden z nejvážnějších problémů.
 - Digitální signály \rightarrow mají diskrétní spektrum (vzdálenost čar = $1/T_s$).
 - IM produkty typu $2a \pm b$ mají frekvence, které jsou těsně vedle budících frekvencí, a mohou tedy spadat do stejného nebo sousedního kanálu.
 - To se může týkat i dalších složek $ma \pm nb$, přičemž tyto interference se chovají jako zvýšený vnitřní šum v daném radiovém kanálu,
 - který zvyšuje chybovost BER.

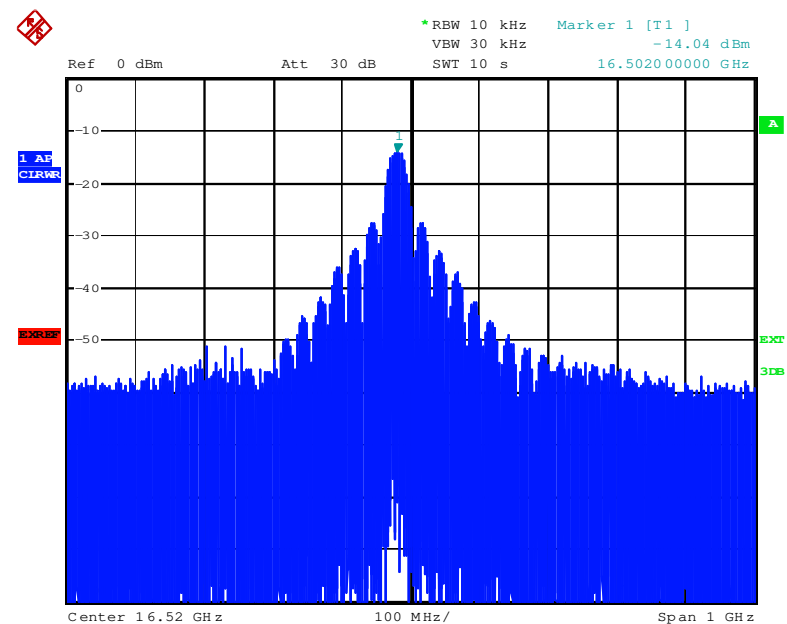


Rozšiřování spektra

- Generace nových blízkých složek *na \pm mb* také vede k rozšiřování výstupního spektra ("spectral regrowth"):
 - To může rušit sousední kanály.
 - Je to definováno EMC/EMI normami,
 - které jsou dost přísné.
 - Měřený parametr = **výkon v sousedním kanálu** ("adjacent channel power" = *ACHP*).
- Lze omezit:
 - Použitím lineárnějších obvodů
 - Nastavením nižšího výstupního výkonu
 - Bližší popis dále



Date: 5.JUN.2017 16:41:39



Date: 5.JUN.2017 16:56:43

IP2, snížení IM2

- IP2 = 2-nd order intercept point**

- Užitečný pro výpočty IM2:

- P_{IM2} = výkon složky IM2
- O_{IM2} = odstup IM2 vůči vstupnímu signálu na ω_1 (1a)

- IP2 = průsečík extrapolovaných závislosti 1a a $a \pm b$, je to virtuální výkon v dBm**

- Užitečné vzorce (v dBm):

$$P_{IM2} = IP2 - 2(IP2 - P_{out}) = 2P_{out} - IP2$$

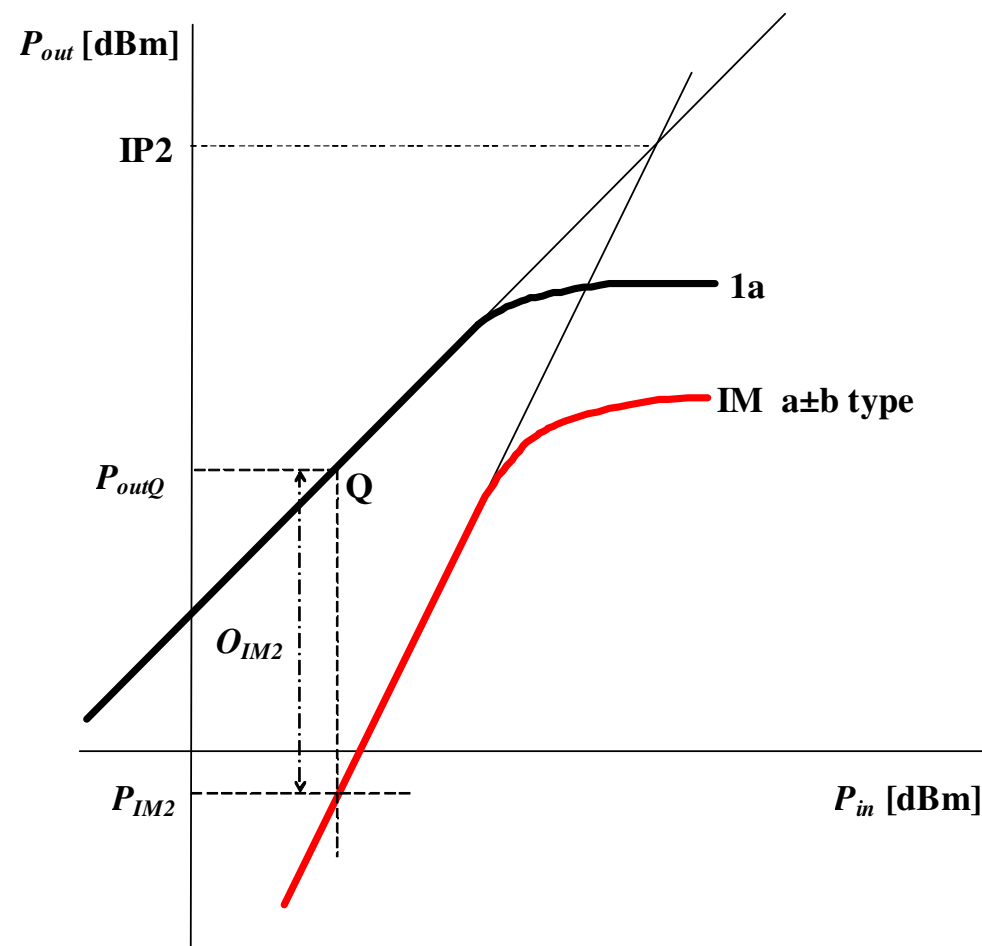
$$O_{IM2} = P_{out} - P_{IM2} = P_{out} - (2P_{out} - IP2) = IP2 - P_{out}$$

- Směrnice závislosti 1a = 1

$$10\log(V_1^1) = 10\log(V_1)$$

- Směrnice závislosti $a \pm b = 2$

$$10\log(V_1^2) = 20\log(V_1)$$

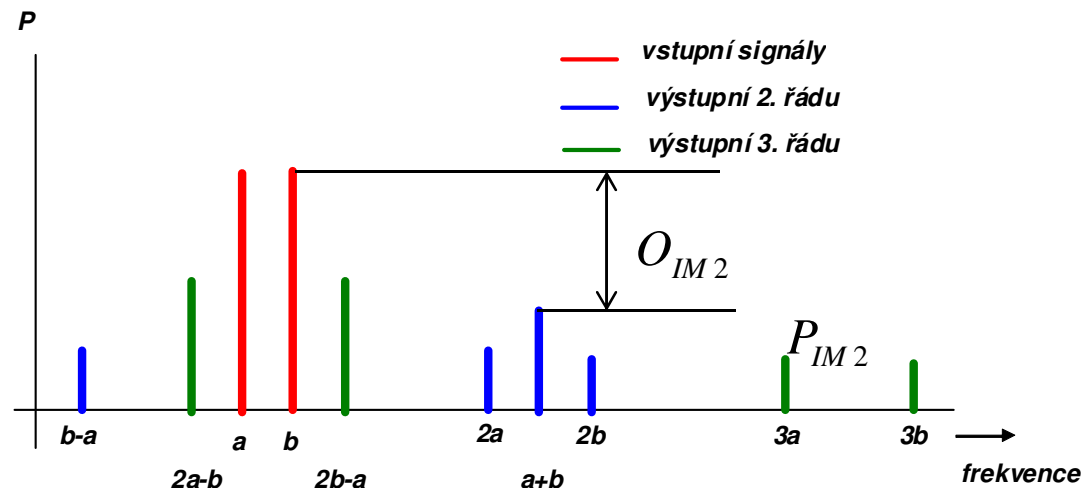


- Snížení IM2:

- Snížení výkonu signálu 1a o 1dB snižuje P_{IM2} o 2dB a zvyšuje O_{IM2} o 1dB
- Nejjednodušší opatření

Příklad: Výpočty IM2

- Parametry výkonového zesilovače ZHL-4W-422+ (www.minicircuits.com)
- Na $f=1\text{GHz}$:
 - $IP2=55,8\text{dBm}$
 - $P_{-1\text{dB}}=36,6\text{dBm}$
- Vypočtěte P_{IM2} a O_{IM2} odpovídající $P_{out}=10, 20, 30$ a $36,6\text{dBm}$
- Výsledky jsou v připojené tabulce
- Snížení P_{out} je účinný a často používaný nástroj pro omezení parazitních produktů IM2
- $IP2$ se liší pro produkty typu $2a$ resp. $a\pm b$, musí být správně definováno



$P_{out} [dBm]$	36,6	30	20	10
$P_{out} [W]$	4,5	1,0	0,1	0,01
$P_{IM2} [dBm]$	17,4	4,2	-15,8	-35,8
$O_{IM2} [dB]$	19,2	25,8	35,8	45,8

IP3, snížení IM3

- **IP3 = 3-rd order intercept point**

- Užitečný pro výpočty IM3:

- P_{IM3} = výkon složky IM3
- O_{IM3} = odstup složky IM3 vůči budícímu signálu na ω_1 (1a)

- **IP3 = průsečík extrapolovaných lineárních částí závislostí 1a a 2a±b, je to virtuální výkon v dBm.**

- Užitečné vzorce (v dBm):

$$P_{IM3} = IP3 - 3(IP3 - P_{out}) = 3P_{out} - 2IP3$$

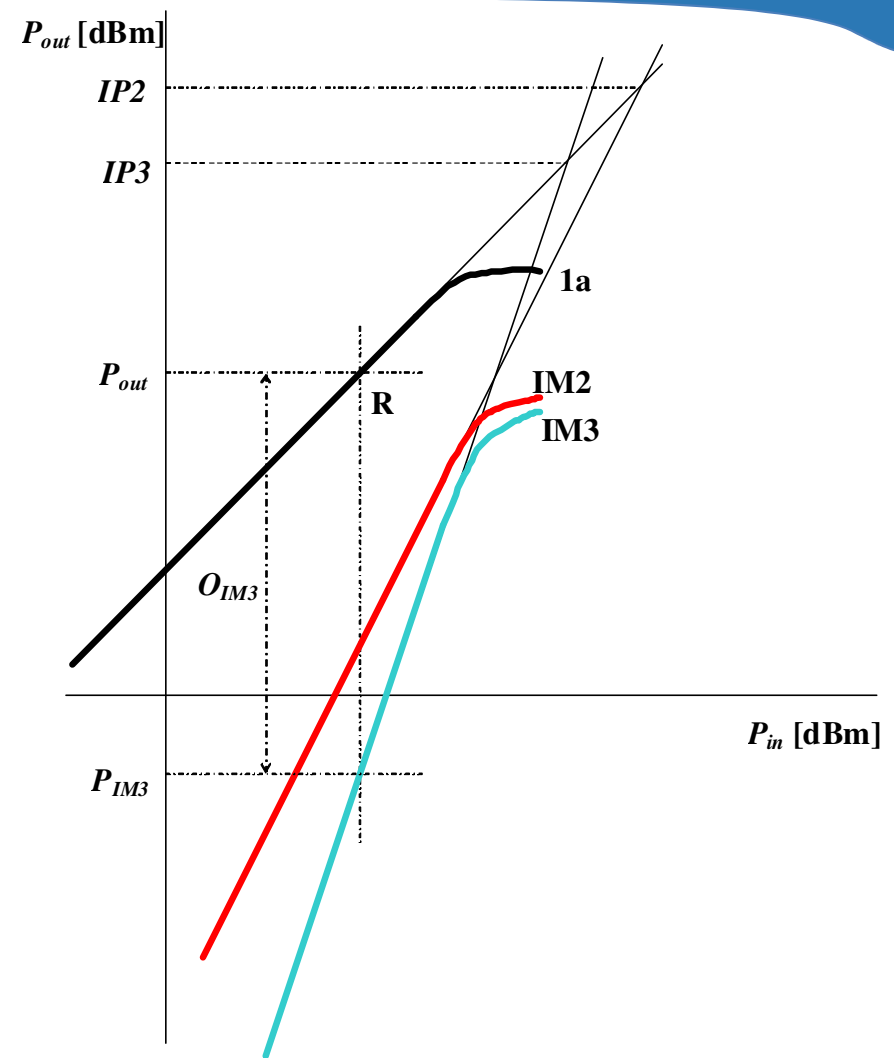
$$O_{IM3} = P_{out} - P_{IM3} = P_{out} - (3P_{out} - 2IP3) = 2IP3 - 2P_{out}$$

- Směrnice závislosti 1a = 1

$$10\log(V_1^1) = 10\log(V_1)$$

- Směrnice závislosti 2a±b = 3

$$10\log(V_1^3) = 30\log(V_1)$$

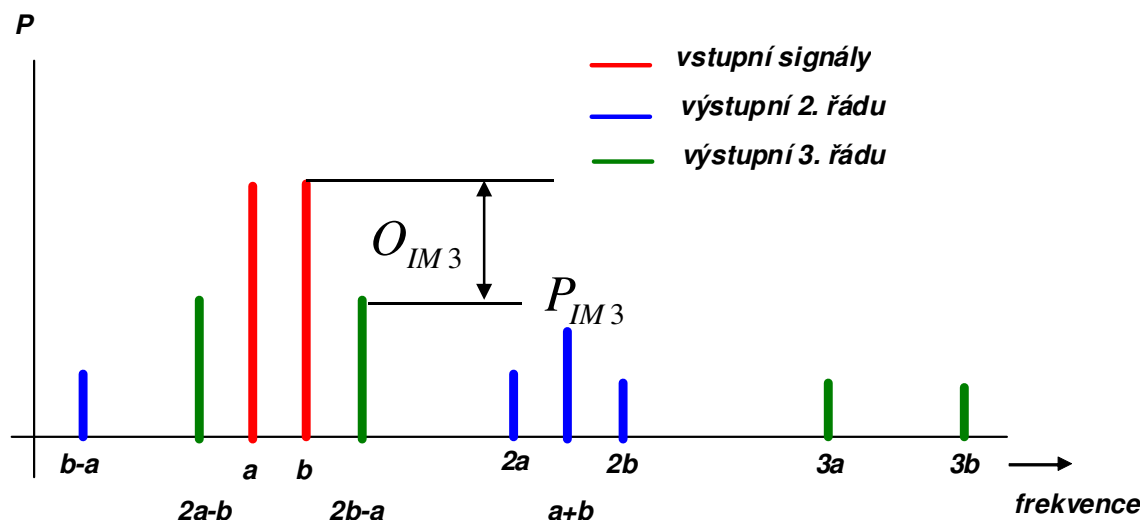


- Snížení IM3:

- Snížení výkonu signálu 1a o 1dB sníží P_{IM3} o 3dB a zvýší O_{IM3} o 2dB

Příklad: Výpočty IM3

- Parametry výkonového zesilovače ZHL-4W-422+ (www.minicircuits.com)
- Na $f=1\text{GHz}$:
 - $IP3=47,8\text{dBm}$
 - $P_{-1\text{dB}}=36,6\text{dBm}$
- Vypočtěte P_{IM3} a O_{IM3} odpovídající $P_{out}=10, 20, 30$ a $36,6\text{dBm}$**
- Výsledky jsou uvedeny v tabulce
- Snížení P_{out} je účinný a často používaný nástroj pro omezení všech parazitních produktů IM3
- $IP3$ se liší pro produkty typu $3a$ a $2a\pm b$, musí být správně definováno



$P_{out} [dBm]$	36,6	30	20	10
$P_{out} [W]$	4,5	1,0	0,1	0,01
$P_{IM3} [dBm]$	14,2	-5,6	-35,6	-65,6
$O_{IM3} [dB]$	22,4	35,6	55,6	75,6

Shrnutí - parametry

- Mezi nejdůležitější parametry v oboru VF a mikrovlnné techniky patří:
 - S-parametry
 - Výkony signálů = signálové úrovně
 - Šumové parametry F , T_e a fázový šum LO
 - Nelineární parametry P_{-1dB} , P_{IM2} , $IP2$, P_{IM3} , $IP3$
- Tyto parametry se používají pro:
 - Návrh VF a mikrovlnných systémů
 - Měření
 - Nastavování a údržbu bezdrátových radiových tras