



RADIOKOMUNIKAČNÍ TECHNIKA A ANTÉNY

RÁDIOVÝ PŘIJÍMAČ – KONCEPCE, FUNKCE, VLASTNOSTI, ...

Tomáš Zálabský

University of Pardubice, Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Czech Republic

Blok 2/5

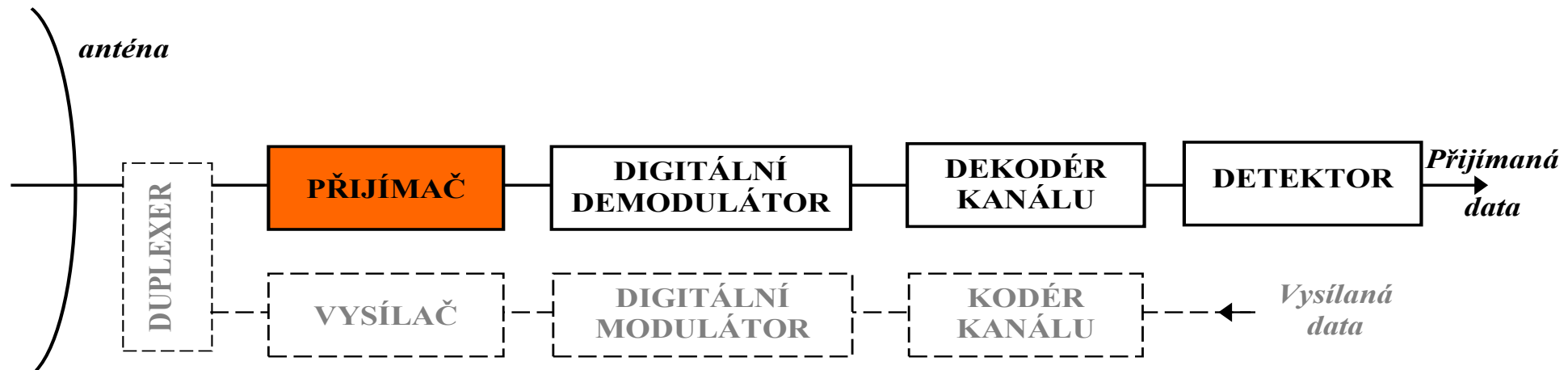
CZVRT

OBSAH BLOKU II

- Koncepce přijímačů
- Šumové vlastnosti přijímačů
- Lineární zkreslení
- Nelineární zkreslení
- Kmitočtové konverze v přijímači
- Oscilátory v přijímači
- Výkonové zesílení
- Praktická část

FUNKCE PŘIJÍMAČE

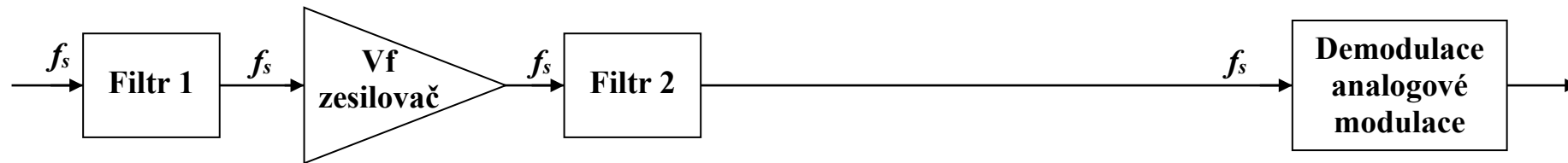
- Začlenění přijímače do radiokomunikačního systému:



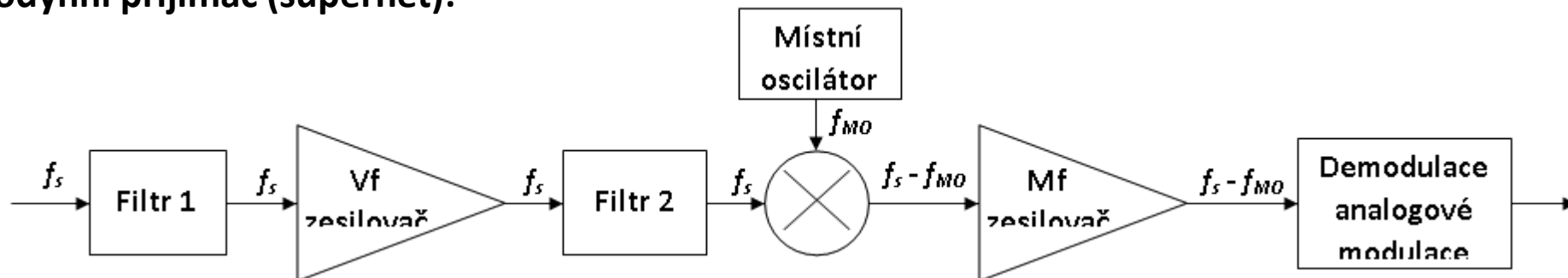
- Funkce přijímače:
 - Potlačení mimopásmového rušení (kmitočtová filtrace)
 - Nízkošumové zesílení přijatého signálu
 - Konverze signálu na nižší kmitočet
 - Digitalizace signálu
 - Demodulace analogových modulací

KONCEPCE PŘIJÍMAČŮ

- Homodynní (přímo zesilující) přijímač:



- Heterodynní přijímač (superhet):



KONCEPCE PŘIJÍMAČŮ

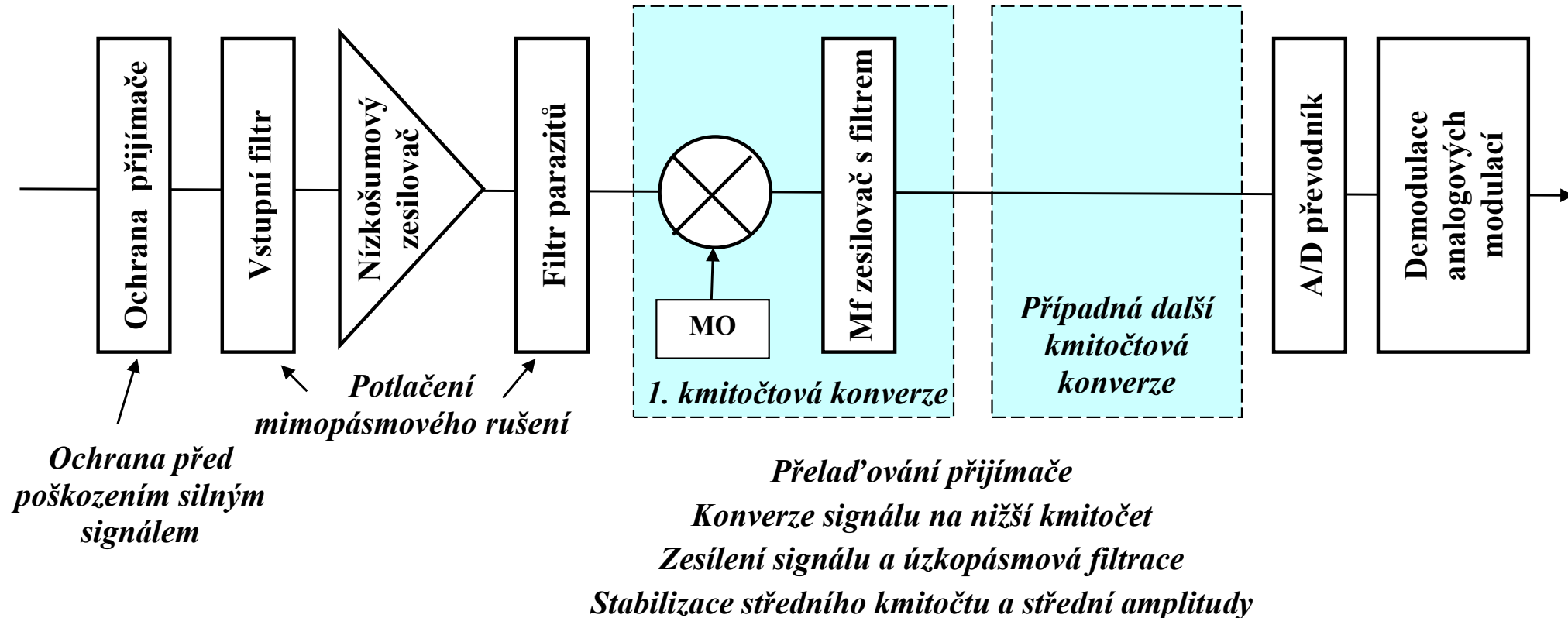
- Výhody superhetu:

- snížení kmitočtu signálu: $f_{mf} = f_s - f_{MO}$, např: $f_s = 1 \text{ GHz}$, $f_{MO} = 990 \text{ MHz}$ -> $f_{mf} = 10 \text{ MHz}$
- snadné přeladování: $f_s = f_{MO} + f_{mf}$: $f_{mf} = \text{konst.}$ -> $f_s = \Delta f_{MO}$
- zpracování na konstantním kmitočtu ($f_{mf} = \text{konst.}$): kvalitní úzkopásmová filtrace, vysoký zisk

- Nevýhody superhetu:

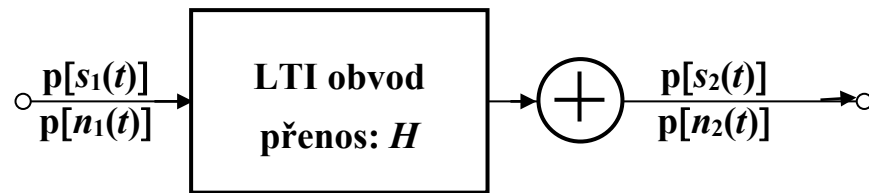
- vyšší složitost (zejména potřeba místního oscilátoru a jeho stabilizace) – dnes ale není překážkou
- větší problémy s dynamickým rozsahem (směšovač je nelineární obvod)
- parazitní kmitočty (směšovač je nelineární obvod) – nutná filtrace

PODROBNÁ STRUKTURA SUPERHETU



ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Obecně každý obvod generuje nějaký vlastní šum (AWGN, tepelný, výstřelový, ...) a proto se vždy poměr mezi výkonem signálu a šumu při zachování stejné šířky pásma B průchodem přes jakýkoliv obvod zhorší:



$$s_2(t) = H \cdot s_1(t)$$
$$n_2(t) = H \cdot n_1(t) + n_v(t)$$

kde: $n_v(t)$..je vlastní šum, generovaný uvnitř obvodu

- Poměr výkonů signálu a šumu na vstupu: S_1/N_1
- Poměr výkonů signálu a šumu na výstupu: $S_2/N_2 = |H|^2 S_1 / (|H|^2 N_1 + N_v) = S_1 / (N_1 + N_v / |H|^2) < S_1/N_1$

Šumové číslo obvodu:

$$F = (S_1/N_1) / (S_2/N_2) > 1$$

a) jestliže vstupní šum $N_1 = kT_0!!$

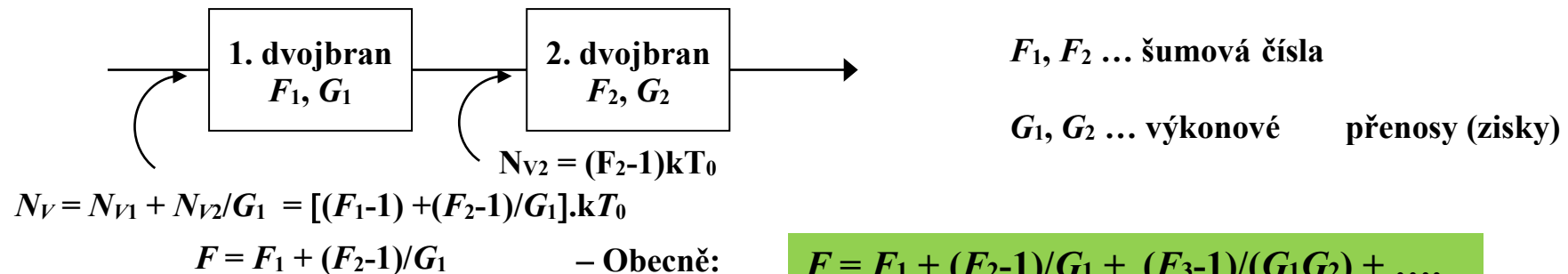
b) jestliže jsou **vstup i výstup přizpůsobeny** (jde tedy o maximální dosažitelné výkony)

ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Kdybychom ale vztáhli vlastní šum obvodu ke vstupu místo k výstupu (tj. kdybychom předpokládali, že se vlastní šum přidává ke vstupnímu šumu již na vstupu obvodu), dostaneme pro výkon vlastního šumu na vstupu:

$$N_{v1} = N_v / |H|^2 = (F-1) \cdot kT_0 \equiv k \cdot [(F-1) \cdot T_0] = k \cdot T_e$$

- Každý lineární obvod přizpůsobený na vstupu i výstupu (u komunikačních systémů bývá obvykle splněno) lze tedy z hlediska šumu charakterizovat:
 - Šumovým číslem $F = (S_1/N_1)/(S_2/N_2)$ při $N_1 = kT_0$ nebo
 - Efektivní šumovou teplotou $T_e = (F-1) \cdot T_0$ - odtud $N_{v1} = kT_e$
- Šumové číslo kaskádního zapojení přizpůsobených lineárních dvojbranů:

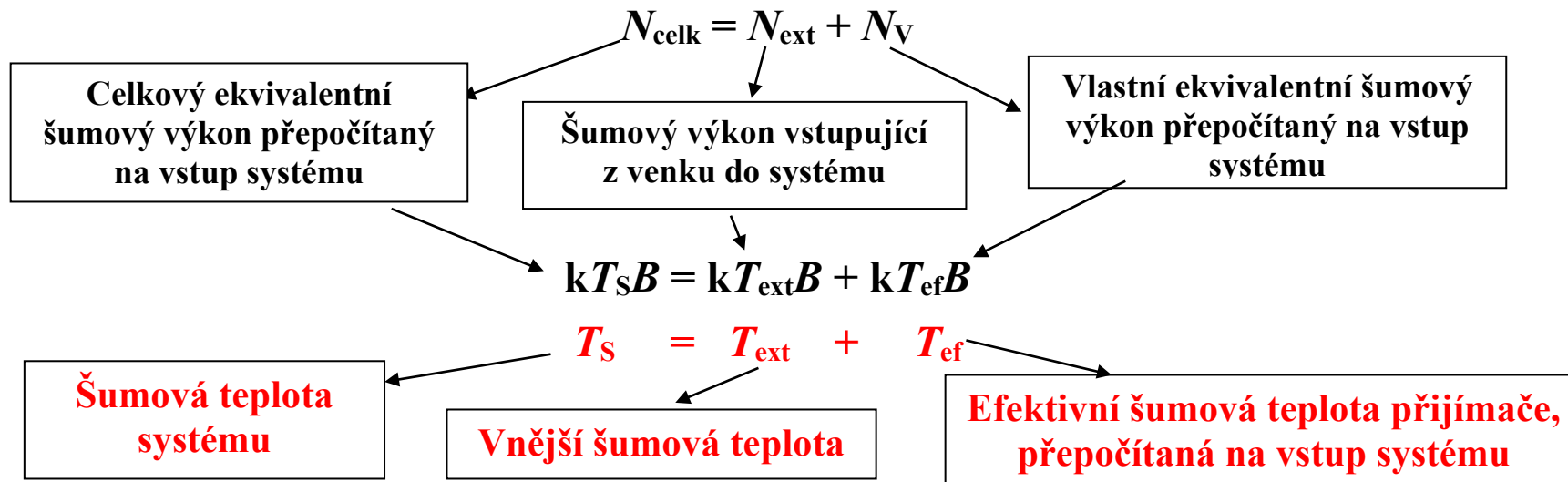


$$F = F_1 + (F_2-1)/G_1 + (F_3-1)/(G_1G_2) + \dots$$

$$T_{\text{celk}} = T_{e1} + T_{e2}/G_1 + T_{e3}/(G_1G_2) + \dots$$

ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Šumová teplota systému TS:
- Charakterizuje celkový ekvivalentní výkon šumu přepočítaný na vstup systému:
-



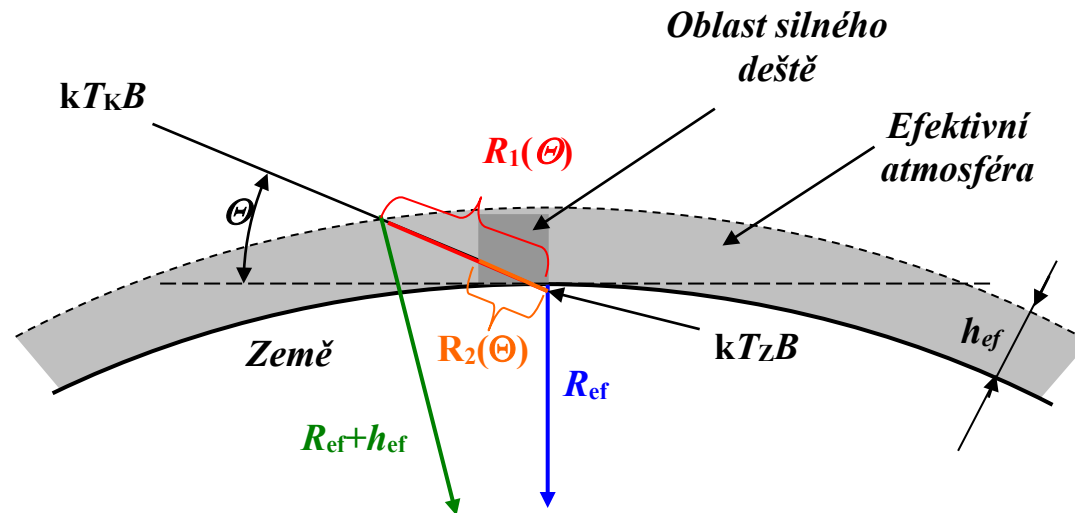
ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Odvození vnější efektivní šumové teploty T_{ext} :
- U radiokomunikačních systémů je vnější šum $N_{\text{ext}} = kT_{\text{ext}} \cdot B$ dodáván anténou a proto se zde vnější šumová teplota T_{ext} nazývá efektivní šumovou teplotou antény T_a .
- Nyní se zde budeme zabývat výpočtem efektivní šumové teploty antény T_a :
- Pokud by všude okolo byla stejná teplota prostředí T , pak by z každého prostorového úhlu $d\Omega$ dopadal na anténu šumový výkon: $dN = (kTB/4\pi)d\Omega$
- Bude-li ve směru (Φ, Θ) **efektivní šumová teplota atmosféry** $T_{\text{at}}(\Phi, \Theta)$, bude to dělat příspěvek:

$$dN(\Phi, \Theta) = [kT_{\text{at}}(\Phi, \Theta) \cdot B/4\pi]d\Omega$$

ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Odvození vnější efektivní šumové teploty T_{ext} :
- Vypočteme závislost $T_{\text{at}}(\Phi, \Theta)$:



- T_K je teplota kosmického prostoru – závisí na kmitočtu ale s výjimkou směru k Slunci je málo závislá na směru Φ, Θ
- T_Z je teplota Země (lze ji ztotožnit s T_0)
- R_1 je dráha paprsku v efektivní atmosféře (závisí na elevaci Θ)
- R_2 je dráha paprsku v dešti

ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Pro efektivní šumovou teplotu antény dostáváme:

$$T_a = \frac{G}{4\pi} \int_0^{2\pi+\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} T(\Phi, \Theta) f^2(\Phi, \Theta) \cos \Theta d\Theta d\Phi \cong \left[\frac{T_{at}(\Phi_0, \Theta_0)}{L_n} + \frac{T_0 + T_{st}(L_n - 1)}{2L_n} \right]$$

28 K + 65 K = 93 K

Efekt. šum. teplota atmosféry ve směru osy svazku ← $\frac{T_{at}(\Phi_0, \Theta_0)}{L_n}$

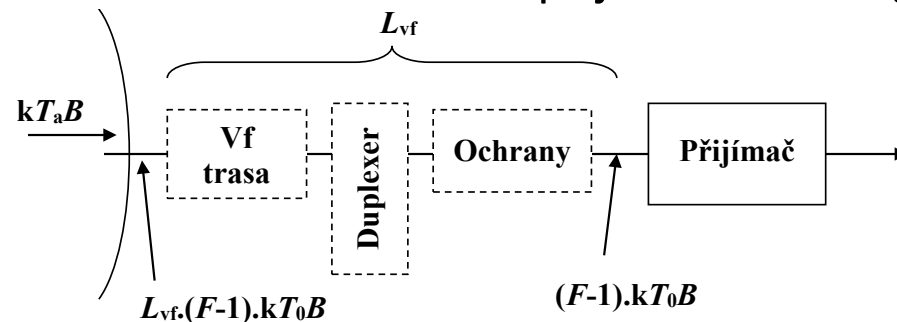
Ztráty vyzařováním mimo hlavní lalok (do 2 dB) ← L_n

Teplota Země (300 K) ← T_0

Průměrná efekt. šum. teplota atmosféry (na 10 GHz: $\cong 20$ K při čisté atm. $\cong 72,5$ K při silném dešti) ← $\frac{T_{st}(L_n - 1)}{2L_n}$

ŠUMOVÉ VLASTNOSTI PŘIJÍMAČE

- Šumová teplota systému se většinou vztahuje k výstupu z antény.
- Důvody:
 - a) V tomto místě počítáme přijímaný výkon signálu PP
 - b) V tomto místě počítáme i přijímaný šum (kT_aB)
- Proto přetransformujeme do tohoto místa i vnitřní šum přijímače a šum generovaný vf obvody



- Celkový šumový výkon na vstupu systému je tedy roven:

$$N = kT_aB + (L_{vf} - 1) \cdot kT_0B + L_{vf}(F-1) \cdot kT_0B \equiv kT_sB \Rightarrow T_s = T_a + (L_{vf} \cdot F - 1)T_0$$

Šumová teplota systému
(Reprezentuje celkový šum
přečítaný na výstup
z antény)

Šumová teplota antény
(Reprezentuje celkový
šum přijímaný anténou)

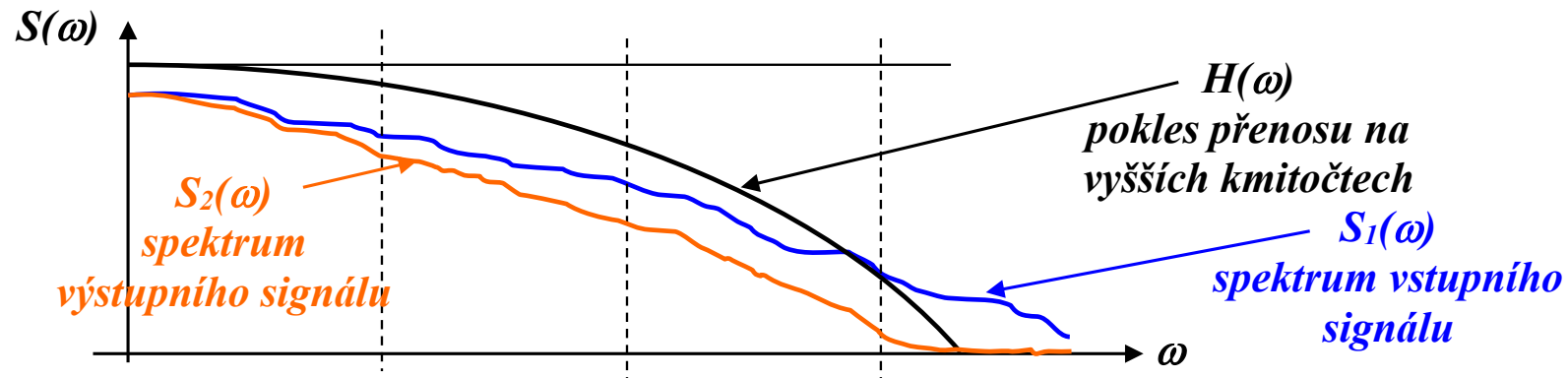
Ztráty ve vf
obvodech před
přijímačem

Šumové číslo
přijímače

Normální
teplota

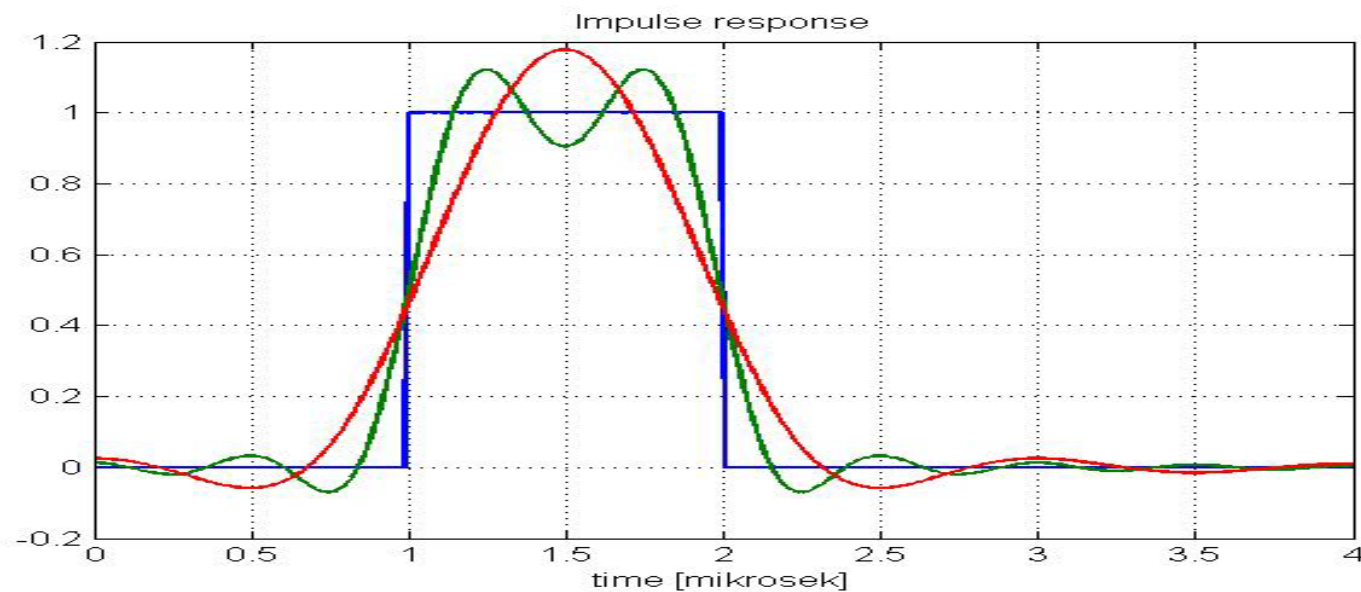
LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Lineární zkreslení je změna signálu, k níž dojde při průchodu lineárním časově invariantním (LTI) obvodem s výjimkou posunutí signálu v čase (zpoždění) a vynásobení konstantou.
- Lineární zkreslení dělíme obvykle na **amplitudové zkreslení** v důsledku toho, že amplituda přenosu $|H(\omega)|$ závisí na kmitočtu a **fázové zkreslení** v důsledku toho, že zpoždění T_d závisí na kmitočtu – tedy že závislost fáze na kmitočtu se liší od lineární: $T_d = -\partial\Phi/\partial\omega \neq \text{konst.}$
- Důsledky:
 - Amplitudové zkreslení = změna kmitočtového obsahu signálu – typický případ:



LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Projevy:
 - u analogových přenosů zvuku bývají potlačeny výšky
 - u digitálních přenosů se snižuje strmost hran impulzů



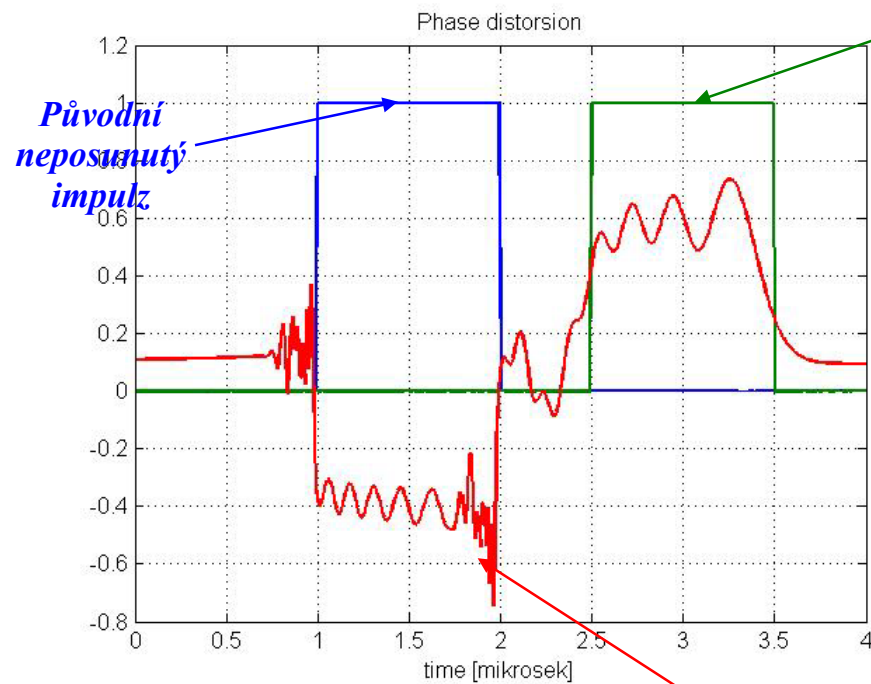
Modrá – nezkreslený průběh

Zelená – zkreslený průběh

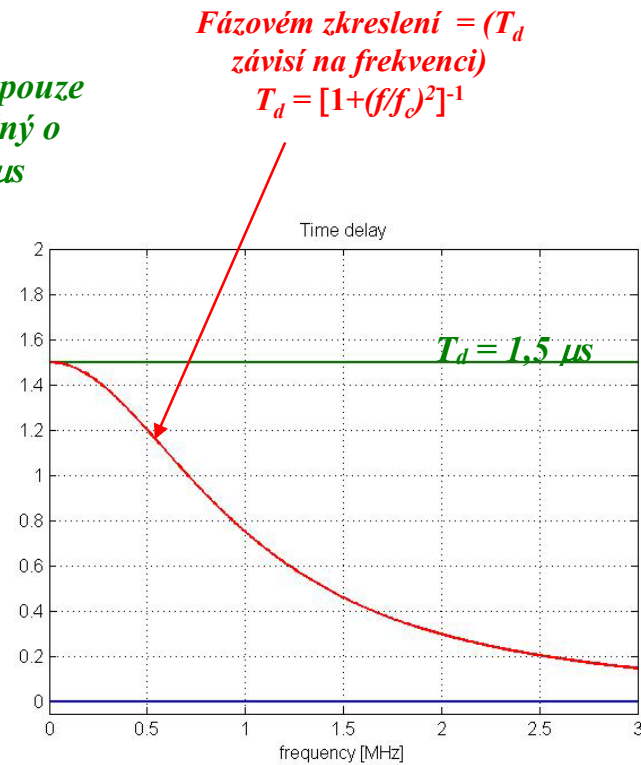
Červená – ještě více zkreslený průběh

LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Fázové zkreslení = disperze (rozmazání) – jednotlivé kmitočtové složky signálu dosáhnou výstupu v různou dobu
 - u analogových modulací minimální důsledky
 - u digitálních se tvary impulzů rozpadají



Signál po fázovém zkreslení
 $T_d = [1+(f/f_c)^2]$



LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

■ Shrnutí:

- Lineární zkreslení způsobuje snížení kvality přenosu (u analogových modulací zhoršení reprodukce zvuku, obrazu, u digitálních modulací zvýšení pravděpodobnosti chyby). Proto musí být lineární zkreslení signálu maximálně potlačeno (při návrhu systému) a napraveno/odstraněno (v provozu).
- Procesu odstranění lineárního zkreslení v provozu se říká korekce = náprava nebo ekvalizace = vyrovnání (charakteristiky přenosového kanálu - od slova equal = rovný). K tomu používáme korektory nebo ekvalizátory, což jsou v podstatě lineární obvody - filtry, vložené do přenosového řetězce, které upravují přenosovou funkci v pásmu přenosu tak, aby se co nejméně lišila od ideální (Konstantní absolutní hodnota a konstantní zpoždění).

■ Příčiny lineárního zkreslení:

- Obecně je to každá nerovnoměrnost (kmitočtová závislost) v přenosové charakteristice obvodů přijímače a vysílače nebo v přenosové cestě.
 - Antény ($P_p \sim 1/\lambda^2 = f^2/c$)
 - Vř trasy (disperze vlnodů, odrazy na dlouhých vedeních)
 - Zesilovače, směšovače, ostatní aktivní obvody
 - Filtry
 - Vícecestné šíření mezi vysílačem a přijímačem
 - Disperze v prostředí mezi vysílačem a přijímačem (např. v ionosféře)

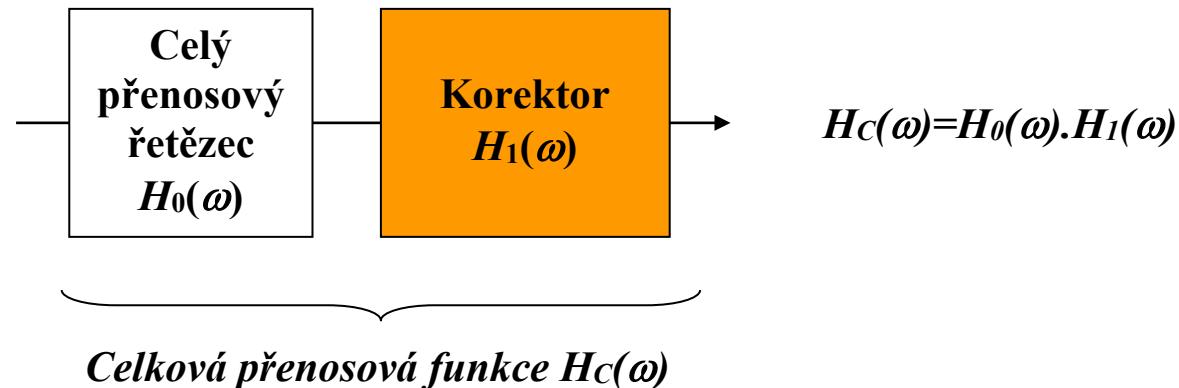
LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

■ Řešení:

- Zkreslení I. skupiny (slabé zkreslení) se kompenzuje při výrobě systému pevně nastavenými korektory
- Zkreslení II. skupiny (silné zkreslení) se kompenzuje adaptivními ekvalizátory – budeme podrobně probírat v předmětu Zpracování signálu v digitálních komunikacích.

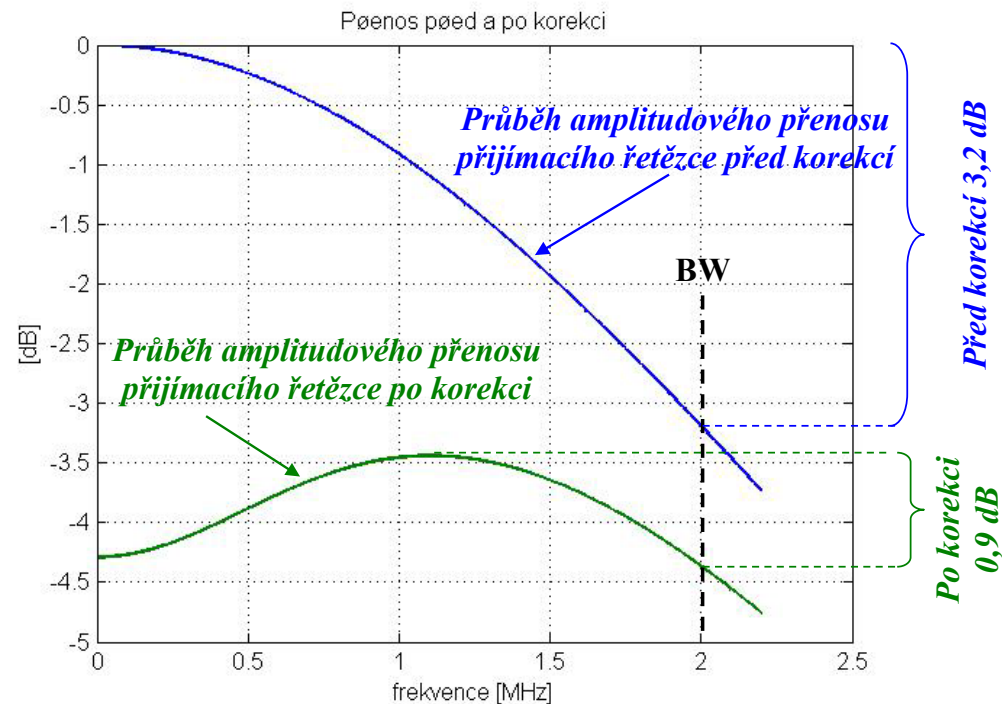
■ KOREKTOR:

- Lineární, časově invariantní (LTI) obvod (filtr), který zařazujeme do cesty signálu a jehož úkolem je minimalizovat kmitočtovou závislost amplitudového přenosu (absolutní hodnoty přenosové funkce $H(\omega)$) a skupinového zpoždění ($T_g = -\partial\Phi/\partial\omega$).



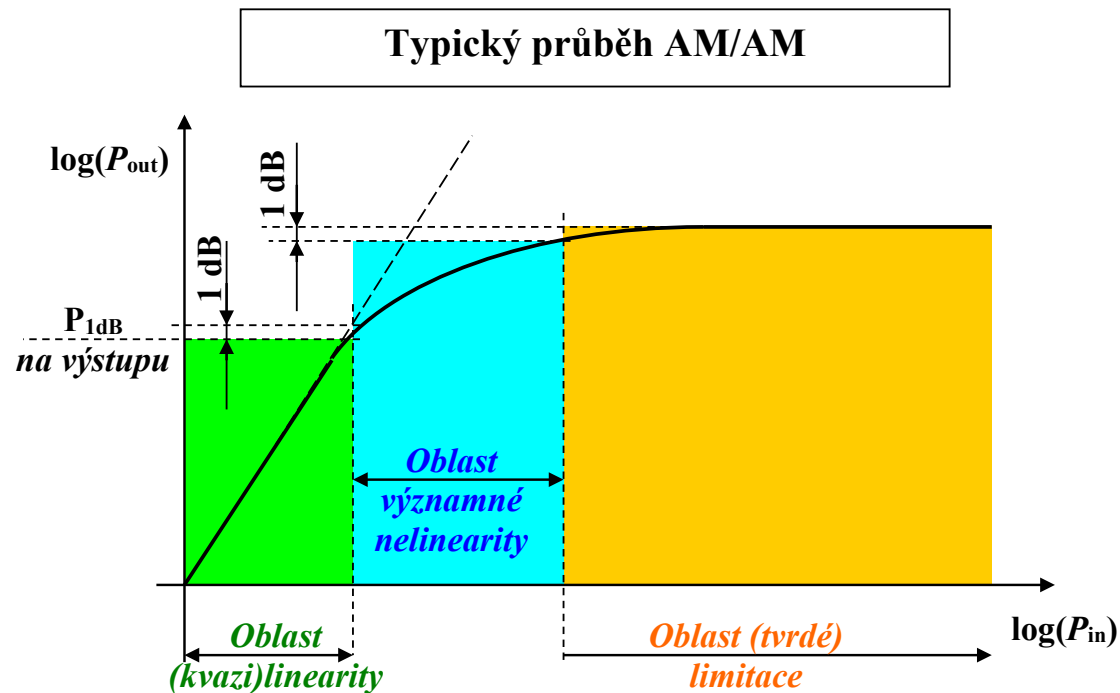
LINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Korektory dělíme na:
 - **Amplitudové** – minimalizují pouze kmitočtovou závislost $|H(\omega)|$
 - **Fázové** – minimalizují pouze kmitočtovou závislost $T_g(\omega)$
 - **Komplexní** – minimalizují kmitočtovou závislost jak $|H(\omega)|$, tak $T_g(\omega)$
- Korektory mohou být realizovány jak v analogovém provedení (s využitím reaktancí a rezistancí) nebo v digitálním provedení (většinou FIR).
- Analogový amplitudový korektor:



NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

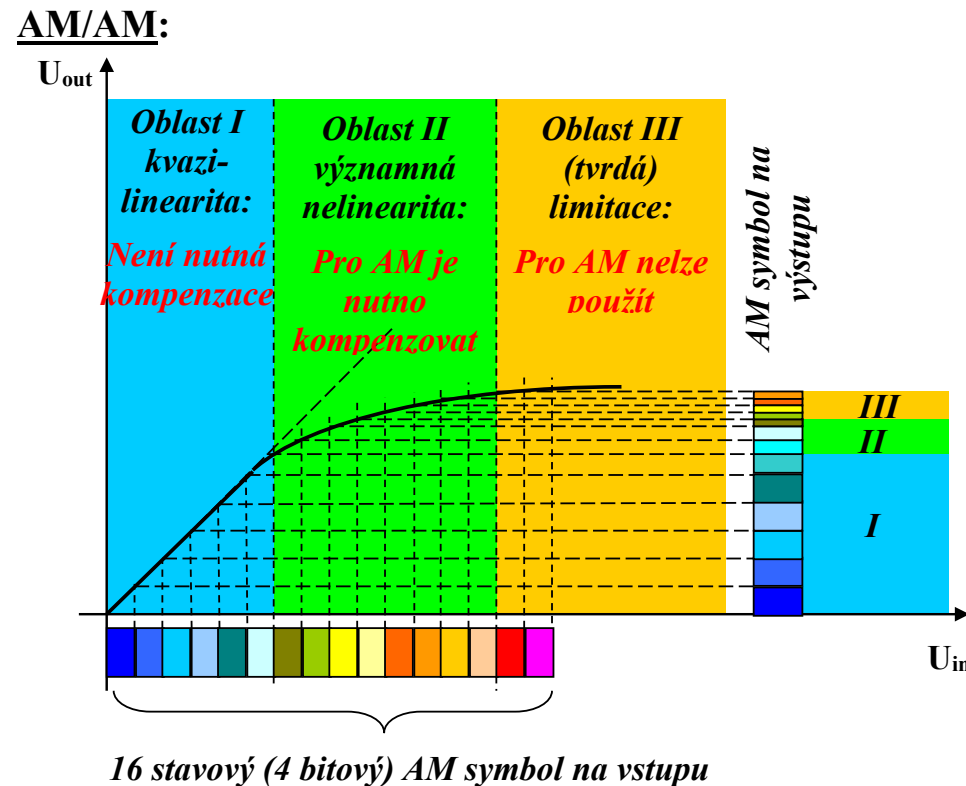
- Definice:
 - Nelineárním zkreslením rozumíme takovou změnu signálu, ke které dojde při průchodu nelineárním obvodem.
- Projevy nelineárního zkreslení v časové oblasti:
 - Nelineární závislost amplitudy výstupního signálu na amplitudě vstupního signálu (tzv. konverze AM/AM)
 - Závislost fáze výstupního signálu na amplitudě vstupního signálu (tzv. konverze AM/PM)



Typický průběh AM/PM neexistuje – závislost $\Phi(P_{in})$ je velice individuální

NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Důsledky projevů nelineárního zkreslení v časové oblasti:



- Pro AM/PM to nelze takto obecně popsat, ale opět dochází ke zkreslení fázové modulace v důsledku amplitudových změn (např. u QAM, OFDM apod.) a korekce jsou nezbytné v oblasti významné nelinearity.

NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

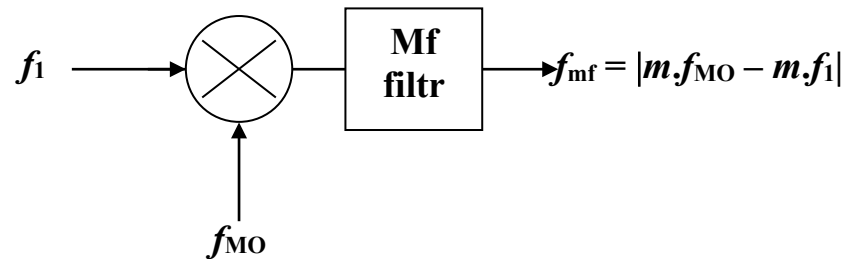
- Projevy nelineárního zkreslení ve frekvenční oblasti:
- Na výstupu se objevují i jiné kmitočty než na vstupu:
 - Je-li vstupní signál **harmonický** o kmitočtu ω_1 , pak na výstupu je signál periodický se stejnou periodou ale obsahuje i **další harmonické kmitočty** $n \cdot \omega_1$ (tzv. harmonické zkreslení)
 - Skládá-li se vstupní signál z harmonických kmitočtů se dvěma kmitočty ω_1 a ω_2 , pak se na výstupu mohou objevit signály obecně na všech tzv. kombinačních kmitočtech (tzv. intermodulační zkreslení): $\omega_{mn} = m \cdot \omega_1 + n \cdot \omega_2$, kde m a n jsou celá čísla (tj. kladná, záporná i nula), součtu: $K = |m| + |n|$ říkáme **řád produktu**.
 - Při komplikovanější skladbě vstupního signálu ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K$), mohou vzniknout všechny kombinační kmitočty typu:

$$\sum_{k=1}^K m_k \omega_k$$

kde m_k jsou celá čísla

NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ - DŮSLEDKY

- U směšovačů: Vznik parazitních přijímacích kanálů

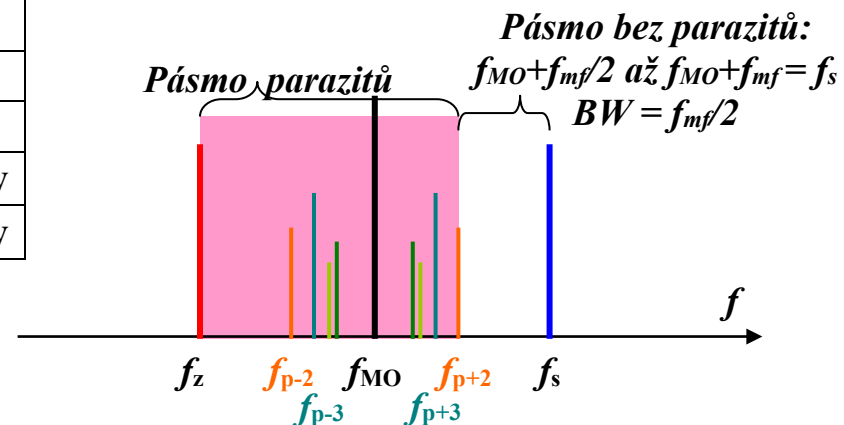


Každý přijímaný kmitočet f_1 pak splňuje podmínku:

$$f_{1m} = f_{MO} + f_{mf}/m$$

Přehled přijímaných kmitočtů

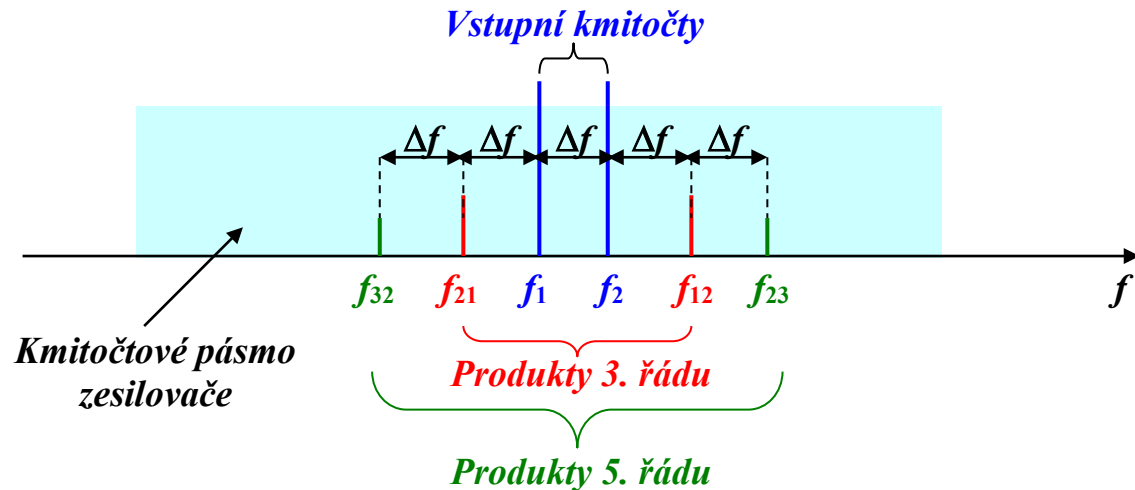
m	přijímaný kmitočet	poznámka
1	$f_{MO} + f_{mf}$	f_s ... žádoucí přijímaný signál
-1	$f_{MO} - f_{mf}$	f_z ... zrcadlový signál (parazit)
± 2	$f_{MO} \pm f_{mf}/2$	f_{p2} ... parazitní přijímané signály
± 3	$f_{MO} \pm f_{mf}/3$	f_{p3} ... parazitní přijímané signály



NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ - DŮSLEDKY

- U zesilovačů:

- Vznik nových kmitočtů v pásmu zesilovaných kmitočtů ze dvou vstupních kmitočtů f_1 a f_2 – nejnebezpečnější jsou kombinační kmitočty 3. řádu: $f_{21} = 2f_1 - f_2$ a $f_{12} = 2f_2 - f_1$ a 5. řádu: $f_{32} = 3f_1 - 2f_2$ a $f_{23} = 3f_2 - 2f_1$

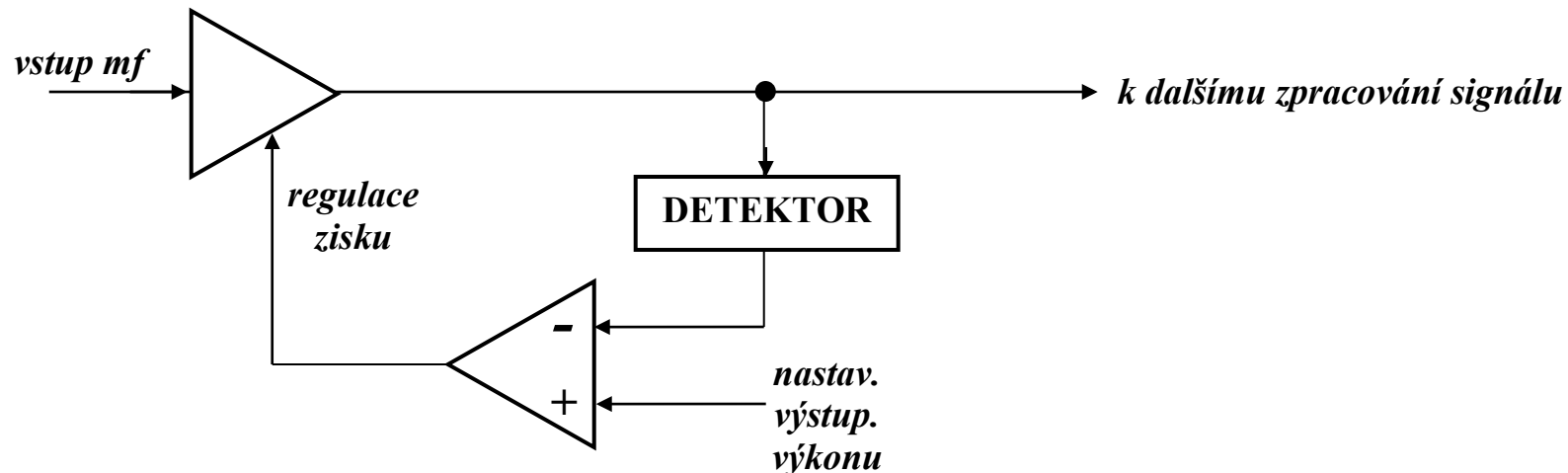


NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ - DŮSLEDKY

- U zesilovačů:
- *Změní-li se například amplituda vstupního signálu na kmitočtu ω_1 P -krát, změní se amplituda produktu $n\omega_1 + m\omega_2$ ($P^{|n|}$)-krát*
- Základní signál na výstupu tedy roste s 1. mocninou amplitudy vstupního signálu a produkt K -tého řádu s K -tou mocninou (tedy rychleji). Při nízkých amplitudách vstupního signálu je tedy na výstupu dominantní základní signál a při zvyšování amplitudy vstupního signálu se začínají objevovat nad šumem produkty vyšších řádů, které rostou rychleji než základní signál.
- Výstupní úroveň, při níž by se výstupní výkon produktu K -tého řádu rovnal výstupnímu výkonu základního signálu (pokud by oba rostly podle této zjednodušené teorie) se nazývá **Bod zahrazení K -tého řádu** (Intercept Point) IP_K .
- Pomocí tohoto parametru lze vypočítat tzv. **Volný dynamický rozsah** (Spurious Free Dynamic Range – SFDR). Je to rozsah vstupních výkonů mezi výkonem, kdy základní signál dosáhne úrovně šumu a výkonem při němž se z šumu vynoří první produkt vyššího řádu.

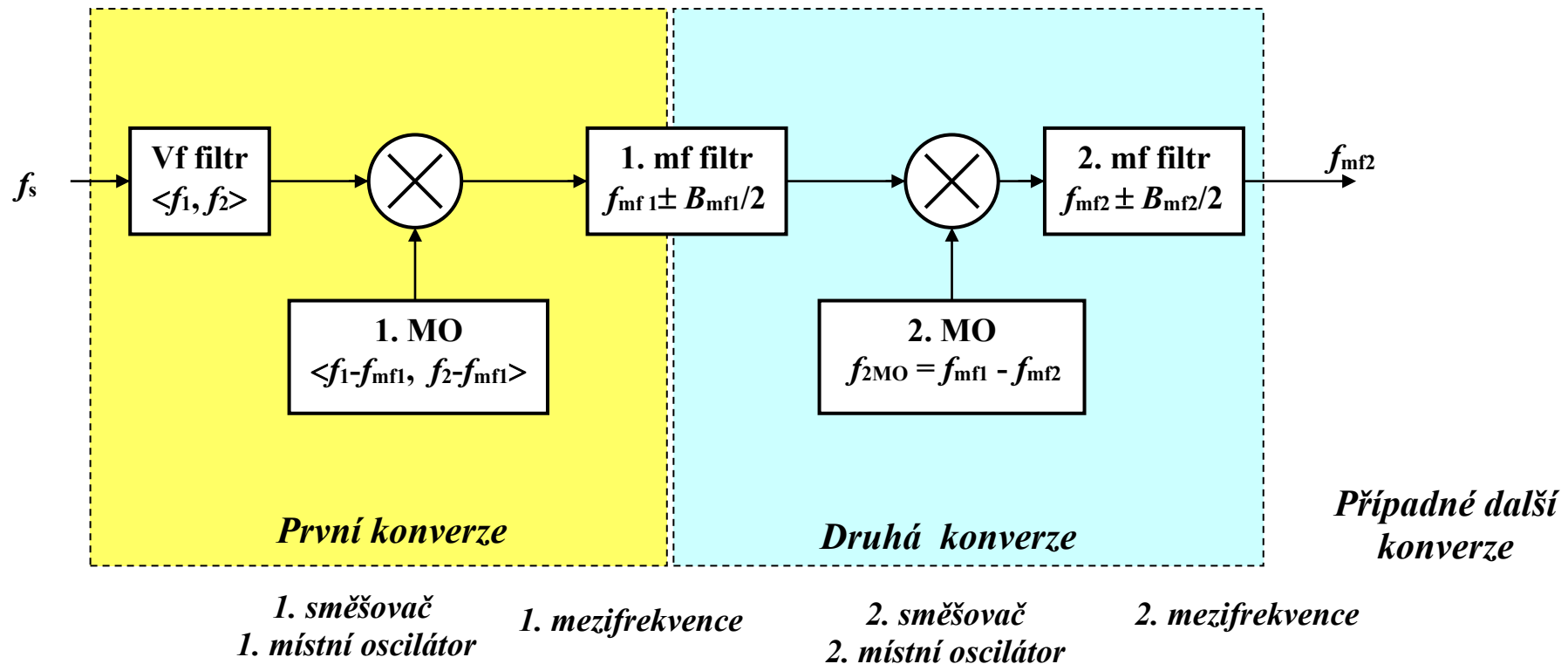
NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ

- Způsob řešení problémů s intermodulačním zkreslením u přijímačů:
- Filtrace produktů mimo pásmo signálu (specielně u směšovačů)
- Volba součástek s dostatečným dynamickým rozsahem
- Kontrola úrovně signálu (návrh zisků jednotlivých stupňů, jejich počáteční nastavení ve výrobě, adaptivní řízení zisku v provozu – AVC)
- Obvod udržování konstantní amplitudy výstupního signálu (AVC – Automatické Vyrovnávání Citlivosti nebo: AGC – Automatic Gain Control)



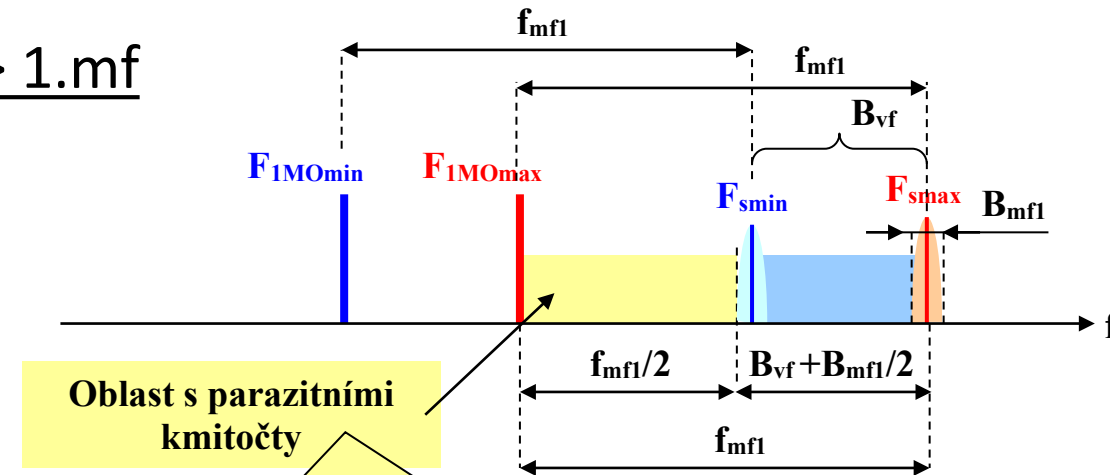
KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- Schéma kmitočtových konverzí u přijímače:



KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- První konverze: $\nu_f \rightarrow 1.mf$



*Jde o kmitočty: $f_p = f_{MO} + f_{mf1}/p$
Pokud by takový kmitočet přišel z vnějšku, konvertoval by se na 1.mf a vytvářel by rušení – proto jej musí vstupní filtr o šířce B_{ν_f} potlačit.*

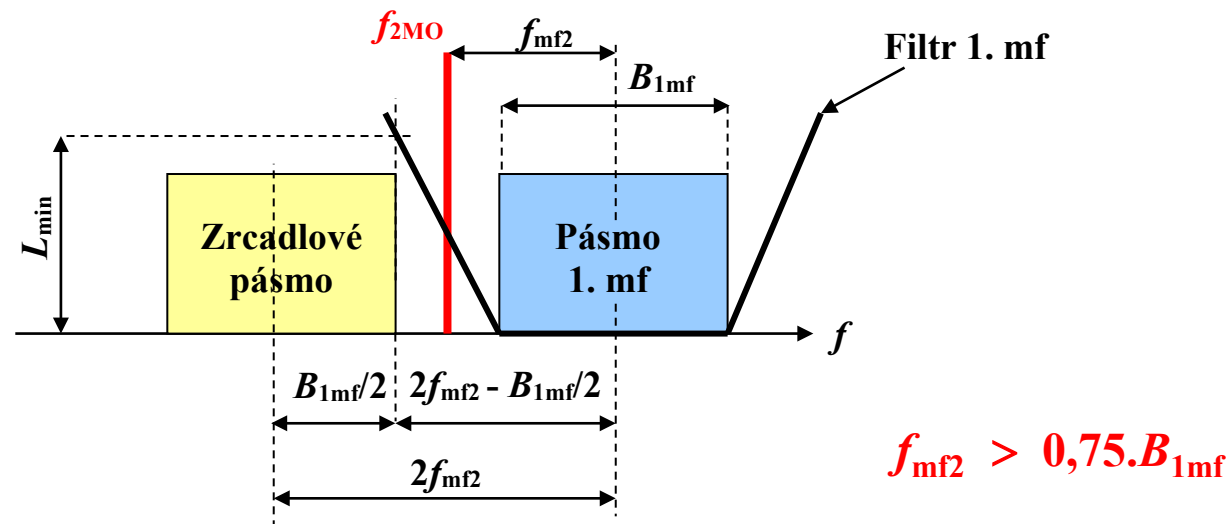
$$f_{mf1} \geq 2 \cdot B_{\nu_f} + B_{mf1}$$

Například: $B_{\nu_f} = 200 \text{ MHz}$, $B_{mf1} = 20 \text{ MHz} \Rightarrow f_{mf1} \geq 420 \text{ MHz}$

Kmitočet 1. mf se proto často volí v pásmu 300 – 800 MHz.

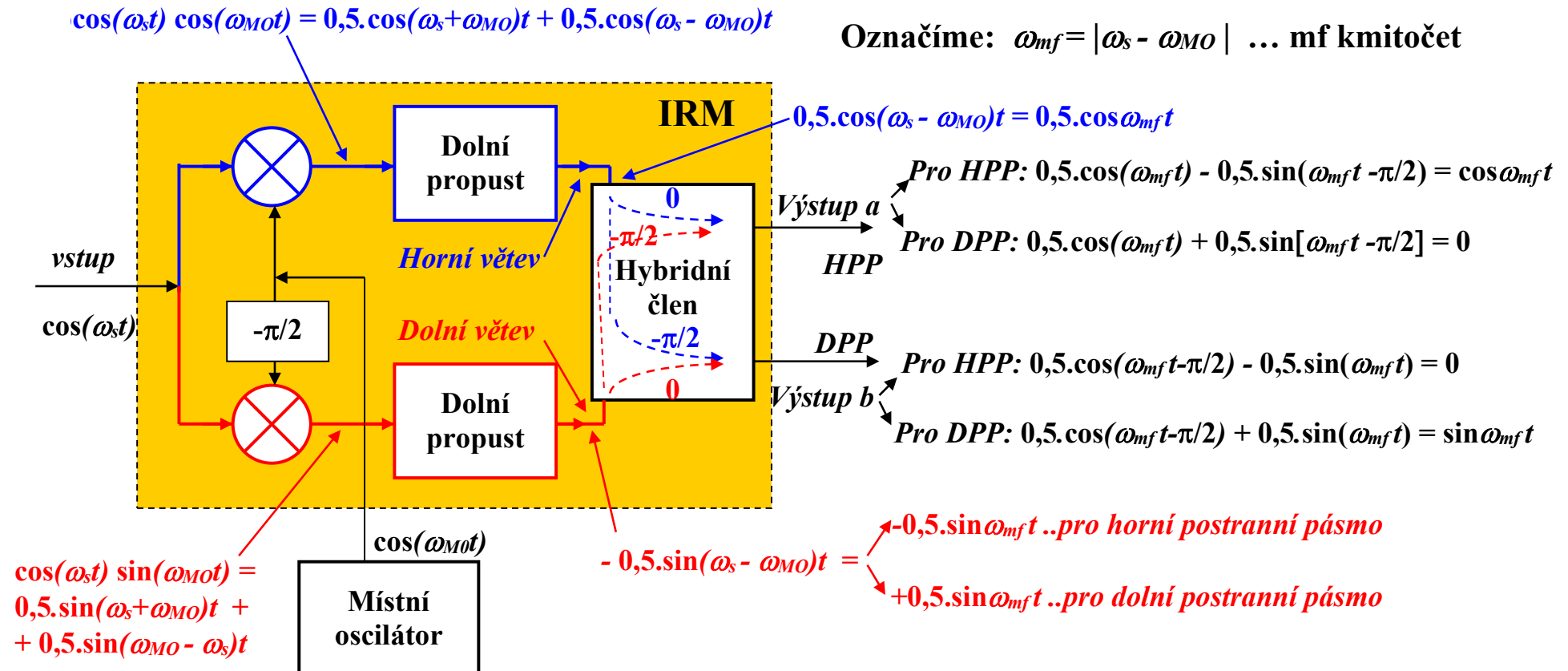
KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- Druhá konverze: 1. mf -> 2.mf
- V tomto případě předpokládáme, že do druhého směšovače **nemohou přicházet rušivé signály zvnějšku**, takže **nemusíme uvažovat pásmo parazitních kmitočtů $f_p = f_{MO} + f_{mf}/p$**
- Šum ze zrcadlového pásma (zesílený zesilovačem 1. mf) by však způsoboval zhoršení šumových vlastností přijímače, pokud by se konvertoval na 2. mf. Proto musí být filtrem 1. mf dostatečně ($L_{min} > 25$ dB) potlačen



KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- Směšovače s potlačením zrcadla (IRM – Image Rejection Mixer).
- Jde vlastně o určitý symetrický systém směšovačů, pracujících s fázovým rozdílem $\pi/2$



KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

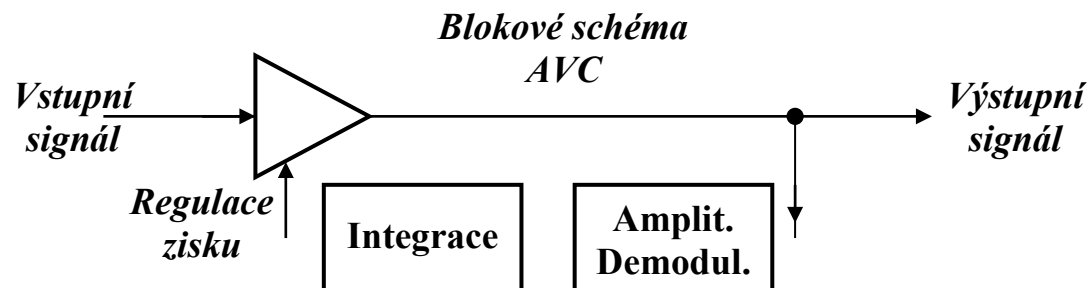
■ Shrnutí funkcí 1. a 2. mf:

■ Úlohy 1. mf:

- Umožnit přeladování přijímače pouhým přeladováním 1.MO
- Umožnit filtraci nežádoucích parazitních kanálů: $f_z = f_{1.MO} - f_{1.mf}$, $f_p = f_{MO} + f_{1.mf}/p$, $p = \pm 2, \pm 3, \dots$

■ Úlohy 2. mf:

- Dosáhnout dostatečně vysoký zisk řetězce (obvykle 60 – 80 dB)
- Dosáhnout vysoké selektivity (kvalitní filtrace pásma signálu)
- Zajistit aby maximální úroveň signálu nepřesáhla dynamický rozsah ale měla standardní úroveň, potřebnou pro demodulaci i při proměnné úrovni přijímaných signálů \Rightarrow adaptivní řízení zisku = AVC (Automatické vyrovnávání citlivosti) nebo angl. AGC (Automatic Gain Control):

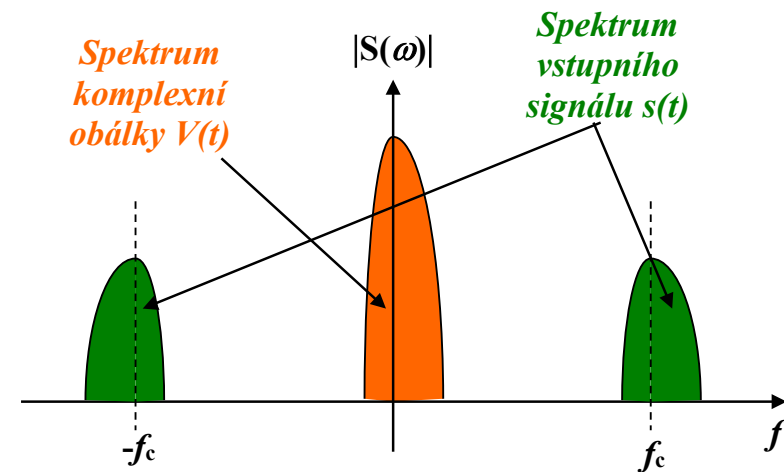
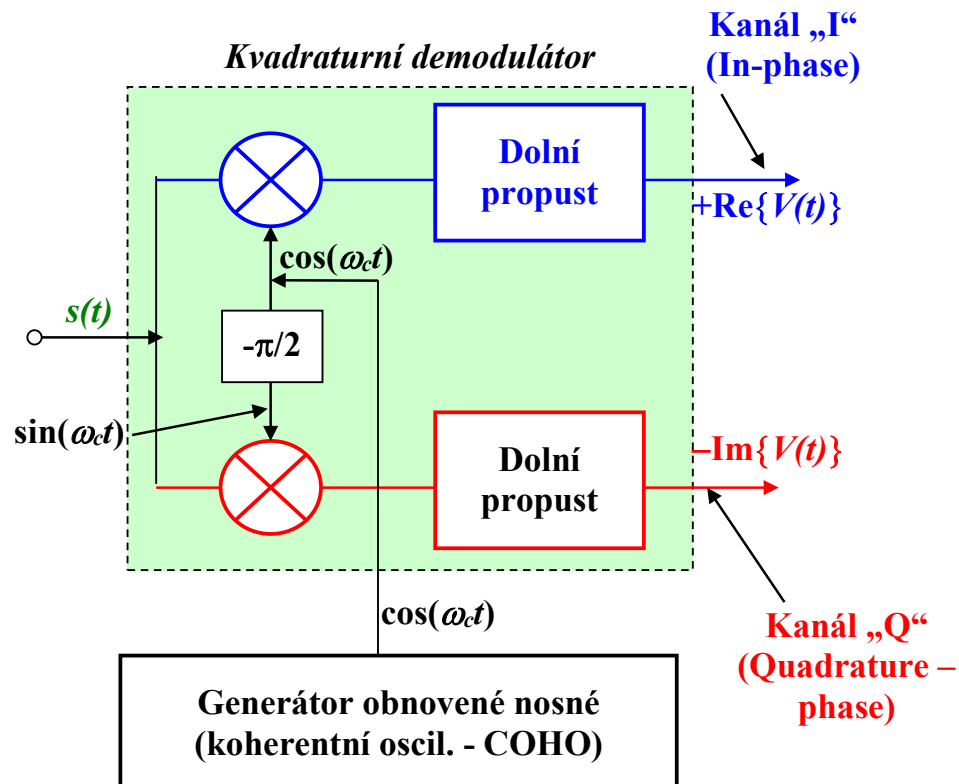


KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- Poznámky:
 - Pokud lze funkce 1. a 2. mf splnit jediným stupněm, lze přijímač realizovat pouze s jednou kmitočtovou konverzí (tj. s jednou mf).
 - První mf se vypouští také tehdy, když požadavky na potlačení rušení pomocí 1.mf nejsou příliš striktní (např. komerční TV a R přijímače)
- Na kmitočtech 2. mf lze již dobře provést nekoherentní demodulaci analogových modulací AM nebo FM.
- Pokud je však nutno demodulovat koherentně s obnovenou nosnou ω_c (např. demodulace analogové AM bez nosné, diskrétní fázové a kmitočtové modulace) provede se ještě jedna kmitočtová konverze a to „konverze na komplexní obálku“. Tato konverze je realizována pomocí tzv. koherentního oscilátoru (COHO), což je generátor nosného kmitočtu koherentní s nosnou přijímaného signálu (tj. trvale udržuje stálý rozdíl mezi fází svou a fází nosné signálu v přijímači).

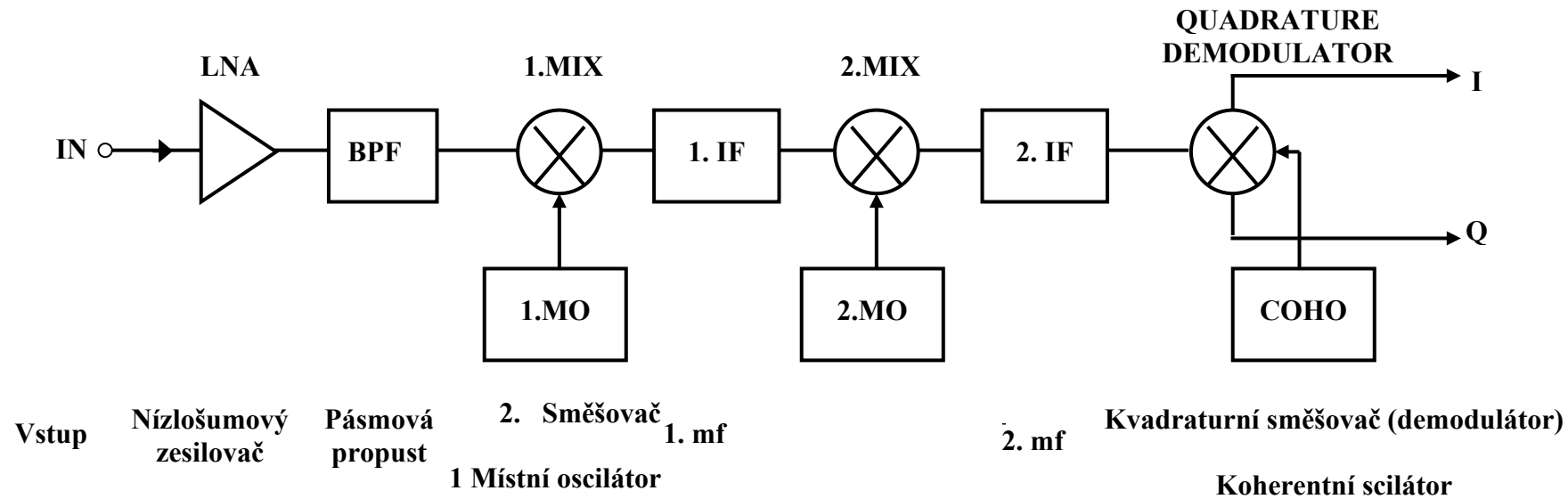
KMITOČTOVÉ KONVERZE V PŘIJÍMAČI

- Konverze na komplexní obálku (neboli na nulovou mf):
- Signál se směšuje s (obnovenou) nosnou a výstupní signál je tzv. komplexní obálka (signál v základním pásmu), která má obecně 2 kvadrurní kanály:



OSCILÁTORY V PŘIJÍMAČI

- Zjednodušené schéma přijímače:



- Základní požadavky na oscilátory v přijímači:

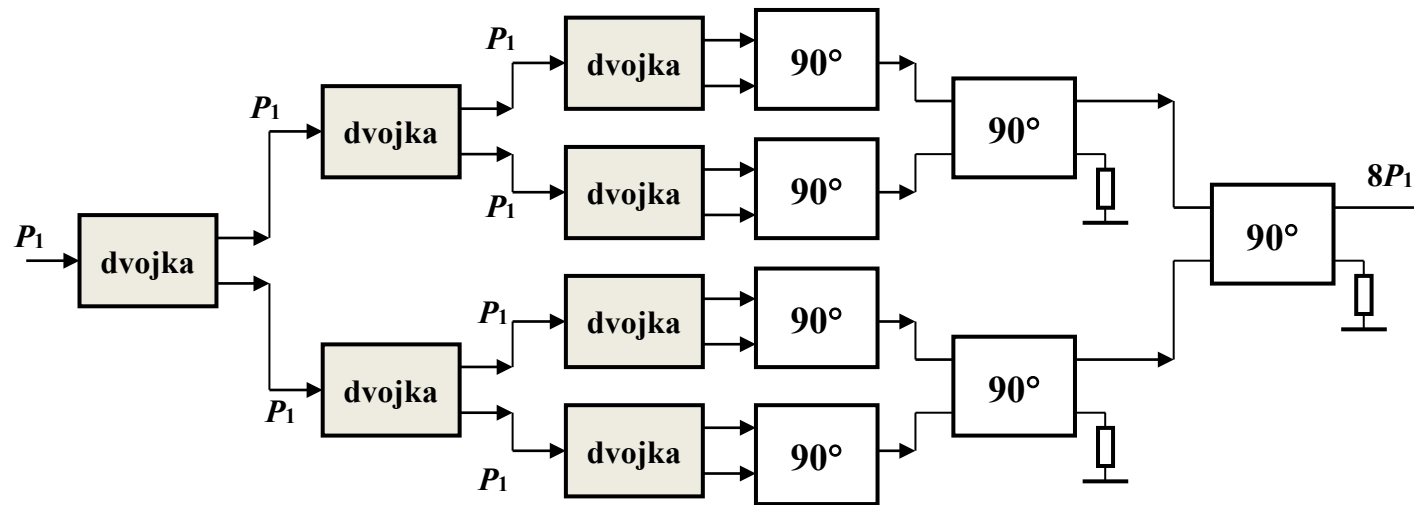
- Vysoká dlouhodobá a krátkodobá stabilita kmitočtu: *Požadavek platí pro všechny oscilátory*
- Přeladění v definovaném pásmu kmitočtů (na diskretní kmitočty): *Zejména pro 1.MO*
- Sledování kmitočtu signálu: *Zejména pro 1. MO nebo 2. MO*
- Sledování kmitočtu a fáze signálu: *Zejména pro COHO*

VÝKONOVÉ ZESÍLENÍ

- Aktivní prvky vysokofrekvenčních výkonových zesilovačů:
 - Elektronky – obecně vysoký součin P_{xf} :
 - permaktrony (neboli elektronky s postupnou vlnou – TWT Traveling Wave Tube): výkon až desítky kW, účinnost asi 20%, zisk až 90 dB, kmitočty do 100 GHz, š. pásma až 2:1 (satelitní transpondéry)
 - klystrony: výkony až stovky kW, účinnost kolem 50%, zisk 30 až 40 dB, kmitočty do 100 GHz, šířka pásma kolem 5%
 - triody, tetrody: výkony až desítky kW, kmitočty stovky MHz
 - Polovodičové součástky – obecně velká šířka pásma (desítky %), vyšší účinnost (kolem 50%), menší součin P_{xf}
 - bipolární tranzistory:
 - BJT (Bipolar Junction Transistor) např. Si NPN – výkon řádově jednotky W, kmitočty do 6 GHz
 - HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) např. GaAsIn – výkony do stovek mW, kmitočty do desítek GHz
 - FETy:
 - MOSFET – výkony do 2 kW CW, kmitočty do 1 GHz
 - LDMOS (Laterally Diffused MOSFET) – výkony do 50 W CW, kmitočty do 5 GHz
 - HEMT (High Electron Mobility Transistor např. GaN) – výkony do 500 W, kmitočty do 6 GHz, vysoká linearita

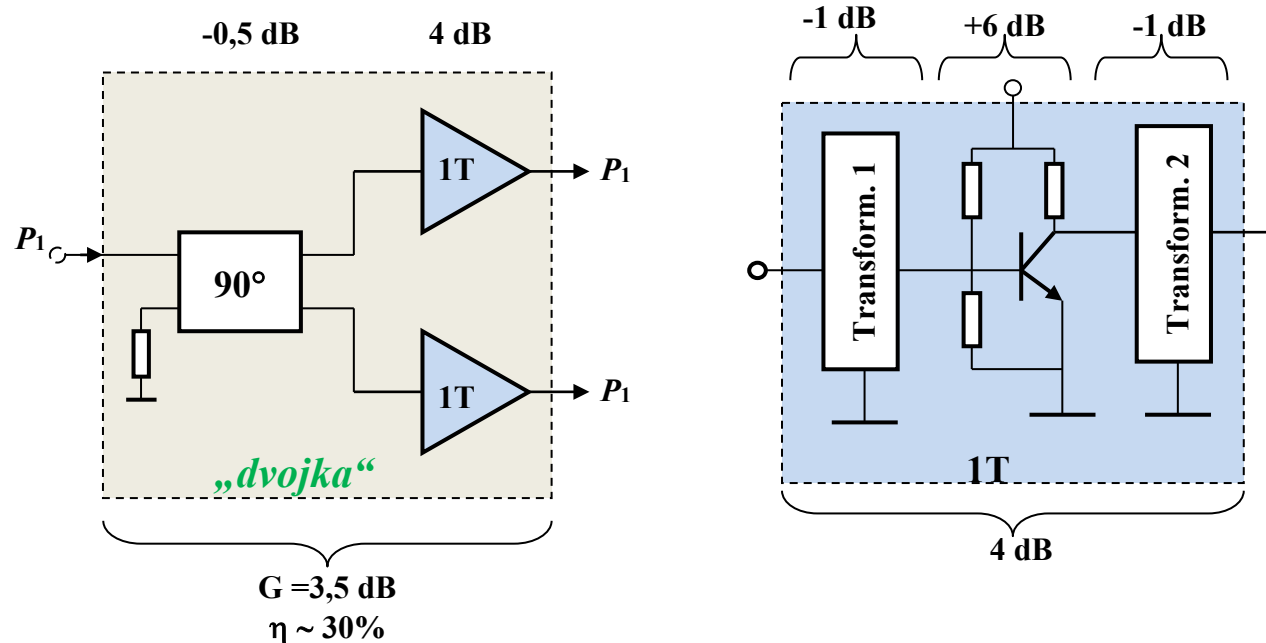
VÝKONOVÉ ZESÍLENÍ

- Vyšší výstupní výkony tranzistorových zesilovačů se dosahují zvláštním uspořádáním výkonových stupňů:



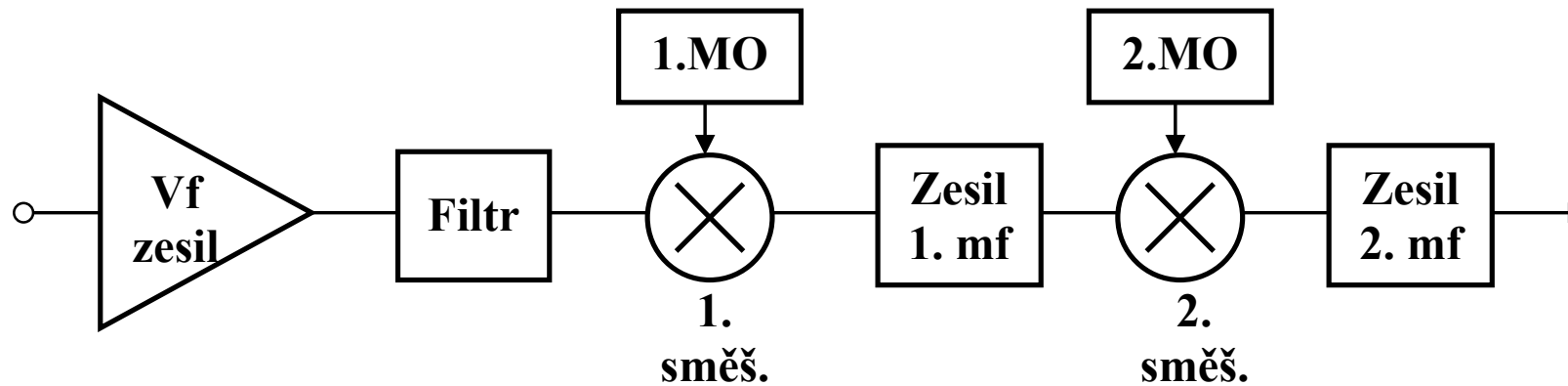
VÝKONOVÉ ZESÍLENÍ

- Hlavní problémy konstrukce výkonových zesilovačů:
 - Chlazení: odvedení několika kW z velmi malého prostoru
 - Napájení: nutná dokonalá filtrace – omezení vzájemných vazeb mezi zesilovači
 - V_f izolace: nutné omezení vzájemného ovlivňování jednotlivých tranzistorů
 - Nelineární zkreslení: Výstupní zesilovače pracují vždy v oblasti **významné nelinearity**



PRAKTICKÁ ČÁST – VÝPOČET ŠUMOVÉHO ČÍSLA PŘIJÍMAČE

- Vypočítejte šumové číslo přijímače směrového pojítka v pásmu 35 GHz v sestavě podle obr.:



$G_{vf}=20$ dB
 $F_1=2,5$ dB

$L_f=3,2$ dB

$L_{S1}=7$ dB

$T_{S1} = 240$ K

$G_{mf1}=20$ dB

$F_{mf1}=3,5$ dB

$L_{S2}=8$ dB

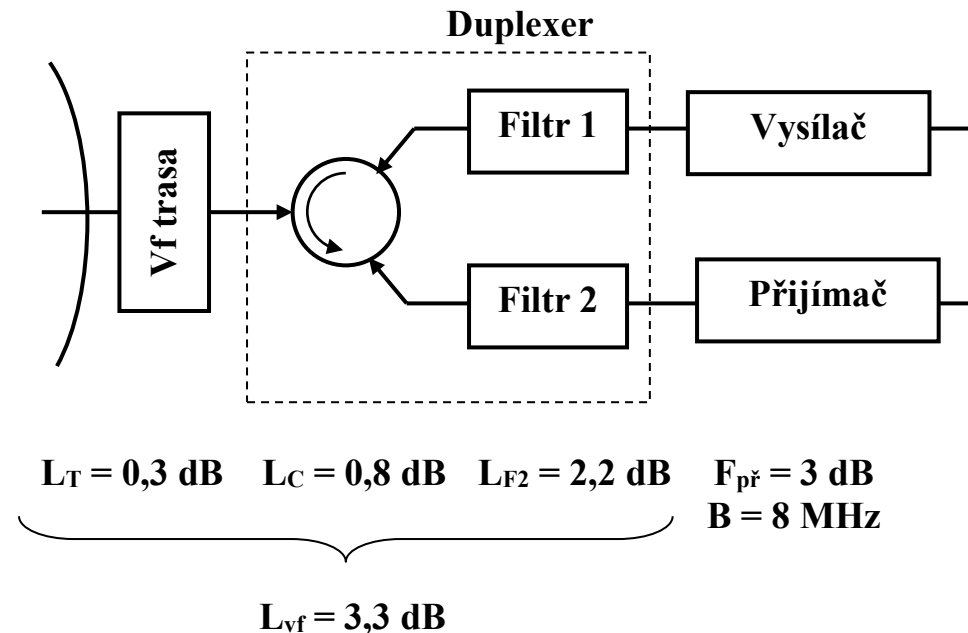
$T_{S2} = 300$ K

$G_{mf2}=60$ dB

$F_{mf2}=4$ dB

PRAKTICKÁ ČÁST – VÝPOČET ŠUMOVÉ TEPLoty SYSTÉMU

- Směrové pojítka v pásmu 35 GHz pracuje v sestavě podle obr. Osa antény směřuje horizontálně. Určete:
 - Efektivní šumovou teplotu systému T_s . Počítejte s následujícími hodnotami teplot atmosféry: $T(\Theta=0) = 282$ K, $T_{pr} = 248$ K. Ztráty vyzařováním mimo hlavní lalok jsou rovny: $L_n = 1,8$ dB.
 - Minimální potřebný přijímaný výkon signálu P_{min} , jestliže pro kvalitní příjem je na anténě zapotřebí minimální odstup výkonu signálu od šumu $10 \cdot \log(S/N)_{min} = 12$ dB.



PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE S VEKTOROVÝM OBVODOVÝM ANALYZÁTOREM

■ Základní kroky pro práci s vektorovým obvODOVÝM analyzátoREM R&S ZVL

■ Zapnutí a inicializace:

- Zapněte analyzátor a nechte ho projít inicializačním procesem.

■ Ovládání přístroje:

- Přístroj můžete ovládat pomocí tlačítek na předním panelu nebo pomocí klávesnice a myši.
- Tlačítka na předním panelu zahrnují:
 - **PRESET**: Uvede přístroj do předem definovaného stavu.
 - **FILE**: Aktivuje menu pro práci se soubory.
 - **SETUP**: Základní nastavení přístroje.
 - **PRINT**: Tisk dat a nastavení tiskárny.
 - **HELP**: Vyvolání nápovědy.
 - **MODE**: Volba režimu mezi obvODOVÝM a spektrálním analyzátoREM.
 - **MENU**: Aktivuje menu obvODOVÉHO analyzátoRU.

■ Nastavení parametrů:

- **Střední frekvence (Center Frequency)**: Nastavte střední frekvenci měřeného pásma.
- **Rozsah (Span)**: Nastavte šířku měřeného pásma.
- **Šířka pásma (Bandwidth)**: Nastavte šířku pásma IF filtru.
- **Rozmítání (Sweep)**: Nastavte typ rozmítání (lineární, logaritmické) a počet bodů měření.

PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE S VEKTOROVÝM OBVODOVÝM ANALYZÁTOREM

■ Základní kroky pro práci s vektorovým obvodovým analyzátozem R&S ZVL

■ Kalibrace přístroje:

- Proveďte kalibraci přístroje pomocí kalibrační sady (např. ZV-Z121).
- Postup kalibrace:
 - Stiskněte tlačítko **PRESET**.
 - Nastavte požadovaný frekvenční rozsah pomocí tlačítek **CENTER** a **SPAN**.
 - Aktivujte kalibrační menu stisknutím tlačítka **CAL**.
 - Vyberte typ kalibrace (jednoportová, dvouportová) a postupujte podle pokynů průvodce kalibrací.

■ Měření a analýza:

- Připojte měřené zařízení k zkalibrovaným portům analyzátoru.
- Nastavte požadované měřené parametry pomocí tlačítka **MEAS**.
- Zvolte formát zobrazení dat (např. kartézský graf, polární graf, Smithův diagram) pomocí tlačítka **FORMAT**.
- Nastavte měřítko zobrazení pomocí tlačítka **SCALE**.

■ Ukládání a export dat:

- Uložte naměřená data pomocí menu **FILE**.
- Data můžete exportovat pro další analýzu nebo tisk.

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ FILTRŮ

- **Laboratorní úloha: Měření přenosové charakteristiky pasivního filtru typu pásmová propust s využitím vektorového obvodového analyzátoru**
 - Cílem této laboratorní úlohy je měřit a analyzovat přenosovou charakteristiku pasivního filtru typu pásmová propust (band-pass filter) pomocí vektorového obvodového analyzátoru (VNA).
- **Potřebné vybavení**
 - Pasivní pásmová propust (integrovaná na kitu ME1000)
 - Vektorový obvodový analyzátor (VNA ZVL13)
 - Koaxiální kabely a konektory

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ FILTRŮ

- **Postup**
- **Příprava zařízení:**
 - Zapněte vektorový obvodový analyzátor a nechte jej projít inicializačním procesem.
 - Připojte porty pásmové propusti k vstupu VNA.
- **Nastavení parametrů:**
 - **VNA:** Nastavte střední frekvenci (Center Frequency) na střed pásma propustnosti filtru a rozsah (Span) tak, aby zahrnoval celé pásmo propustnosti.
- **Kalibrace VNA:**
 - Proveďte kalibraci VNA pomocí standardních kalibračních prvků (Open, Short, Load) pro zajištění přesnosti měření.
 - Ujistěte se, že kalibrace pokrývá celé frekvenční pásmo, které budete měřit.
- **Měření přenosové charakteristiky:**
 - Změřte celou přenosovou charakteristiku
- **Analýza dat:**
 - Vytvořte graf přenosové charakteristiky filtru, kde na vodorovné ose bude frekvence a na svislé ose úroveň signálu (např. v decibelech) a fáze.
 - Identifikujte frekvence, při kterých je úroveň signálu maximální (střed pásma) a frekvenční rozsah pásmové propusti, strmost a potlačení signálu mimo přenosové pásmo
- **Vyhodnocení výsledků:**
 - Porovnejte naměřené hodnoty s teoretickými předpoklady pro daný typ filtru.
 - Diskutujte možné zdroje chyb a odchylek, jako jsou nepřesnosti měření, vliv okolního rušení nebo tolerance součástek

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ ZESILOVAČŮ

- **Laboratorní úloha: Měření přenosové charakteristiky zesilovače, bodu zahrazení 3. řádu a volného dynamického rozsahu**
 - Cílem této laboratorní úlohy je měřit přenosovou charakteristiku zesilovače, určit bod zahrazení 3. řádu (Third-Order Intercept Point, IP3) a volný dynamický rozsah zesilovače pomocí signálového generátoru a spektrálního analyzátoru.
- **Potřebné vybavení**
 - Zesilovač (integrovaný na kitu ME1000)
 - Signálový generátor
 - Spektrální analyzátor
 - Koaxiální kabely a konektory
 - Attenuátory (pro snížení úrovně signálu, pokud je potřeba)

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ FILTRŮ

■ Postup

■ Příprava zařízení:

- Zapněte spektrální analyzátor a signálový generátor a nechte je projít inicializačním procesem.
- Připojte výstup signálového generátoru k vstupu zesilovače.
- Připojte výstup zesilovače k vstupu spektrálního analyzátoru.

■ Nastavení parametrů:

- **Signálový generátor:** Nastavte generátor na sinusový výstup s frekvencí v pásmu, které zesilovač podporuje. Začněte s nízkou úrovní signálu.
- **Spektrální analyzátor:** Nastavte střední frekvenci (Center Frequency) na frekvenci signálu generátoru a rozsah (Span) tak, aby zahrnoval harmonické a intermodulační produkty.

■ Měření přenosové charakteristiky:

- Postupně zvyšujte úroveň vstupního signálu a zaznamenávejte úroveň výstupního signálu na spektrálním analyzátoru.
- Vytvořte graf přenosové charakteristiky zesilovače, kde na vodorovné ose bude úroveň vstupního signálu a na svislé ose úroveň výstupního signálu.

PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH PARAMETRŮ FILTRŮ

■ Postup

■ Určení bodu zahrazení 3. řádu (IP3):

- Nastavte signálový generátor na dvě blízké frekvence (např. f_1) a f_2) s rovnoměrnou úrovní.
- Zaznamenejte úroveň základních tónů (f_1) a f_2) a intermodulačních produktů $2f_1 - f_2$ a $2f_2 - f_1$).
- Postupně zvyšujte úroveň vstupního signálu a zaznamenávejte úroveň intermodulačních produktů.
- Vytvořte graf, kde na vodorovné ose bude úroveň vstupního signálu a na svislé ose úroveň základních tónů a intermodulačních produktů.
- Bod, kde se extrapolované přímky základních tónů a intermodulačních produktů protínají, je IP3.

■ Měření volného dynamického rozsahu:

- Volný dynamický rozsah je rozdíl mezi úrovní šumu a úrovní signálu při bodu zahrazení 1 dB (1 dB compression point).
- Změřte úroveň šumu zesilovače bez vstupního signálu.
- Zvyšte úroveň vstupního signálu, dokud výstupní signál nezačne klesat o 1 dB od lineární odezvy.
- Volný dynamický rozsah je rozdíl mezi touto úrovní a úrovní šumu.

■ Vyhodnocení výsledků

- Porovnejte naměřené hodnoty s teoretickými předpoklady pro daný typ zesilovače.
- Diskutujte možné zdroje chyb a odchylek, jako jsou nepřesnosti měření, vliv okolního rušení nebo tolerance součástek

ZDROJE

- [1] Žalud, V., Dobeš, J. Moderní radiotechnika. Praha, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [2] Pokorný, Miroslav. Základy techniky radiové komunikace. Ostrava: Ostravská univerzita, 2006. ISBN 80-7368-155-2.
- [3] Skalický, Petr. Číslicové systémy v radiotechnice. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02854-2.
- [4] Syrovátka, Břetislav. Radiové vysílače a přijímače. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03236-1.

Vytvořeno v rámci projektu: **DANTE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-16591/2022

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

