

Technika bezdrátové komunikace

B2B17TBK

Část 6 - Radiové bezdrátové systémy

Přemysl Hudec

ČVUT-FEL katedra elektromagnetického pole

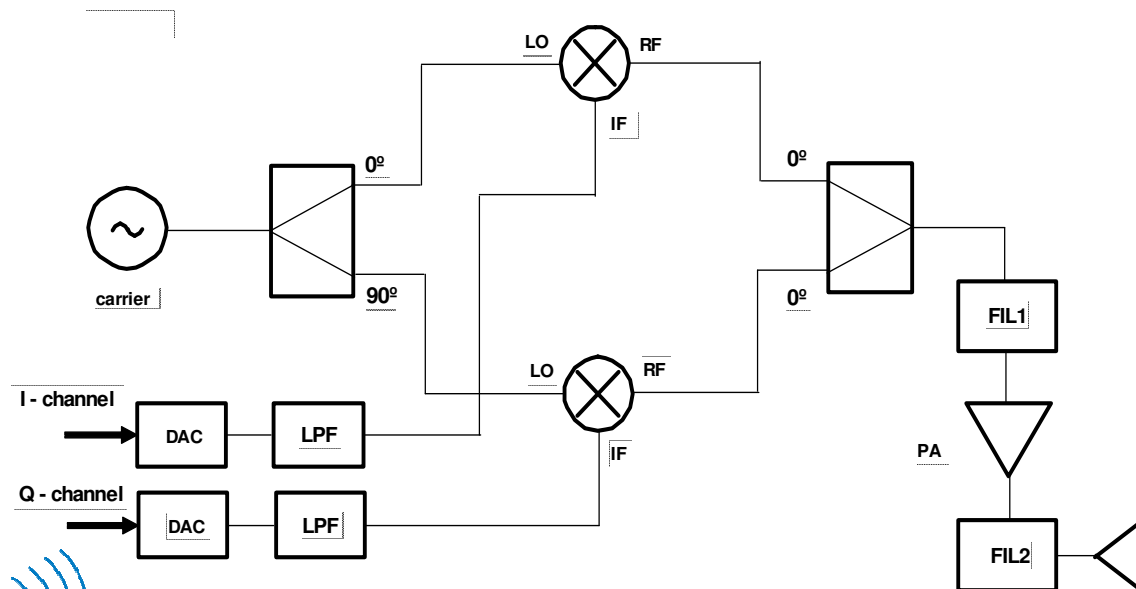
hudecp@fel.cvut.cz

verze 3/2020



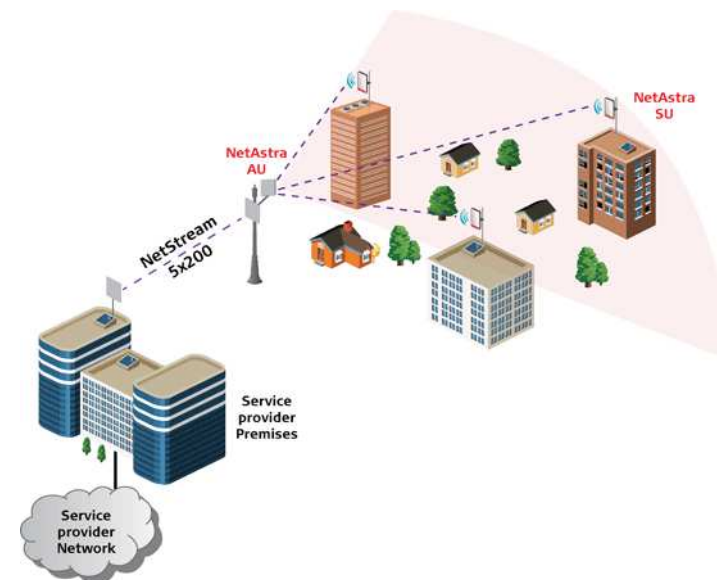
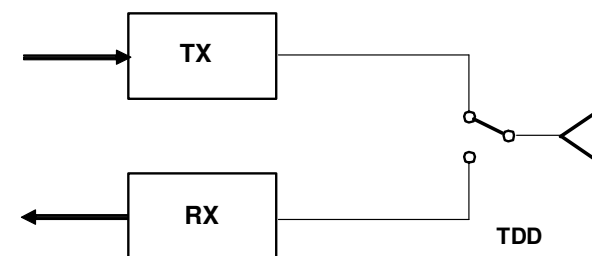
Obsah

- Architektura radiových tras
- Vícenásobný přístup
- VF a mikrovlnné vysílače
- VF a mikrovlnné přijímače
- Transceivery
- Praktické příklady



Architektura radiových tras

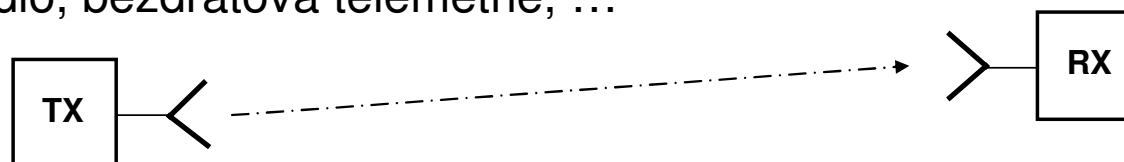
- Bezdrátové radiové trasy přenášejí informace **mezi 2 nebo více body**
- Body mohou být **stacionární nebo mobilní**
- Téměř vždy je nutné propojit **více uživatelů v jednom čase**
- Mezi hlavní součásti radiových tras patří:
 - Radiové vysílače ("transmitters" = TXs)
 - Radiové přijímače ("receivers" = RXs)
 - Antény
- Základní rozdělení může být provedeno podle:
 - Směrnosti ("directionality")
 - Topologie
 - Typu vícenásobného přístupu ("multiple access")
- **Směrnost → definuje směry přenosu dat:**
 - Simplexní
 - Poloduplexní
 - Plně duplexní



Přenosy simplexní, poloduplexní

- **Simplexní → radiové trasy přenášejí informaci jen v 1 směru:**

- Může být "point-to-point" (PTP) nebo "point-to-multipoint" (PTM)
- Radiové terminály obsahují jen TX nebo RX
- Příklady: DVB-T, VKV FM rádio, bezdrátová telemetrie, ...



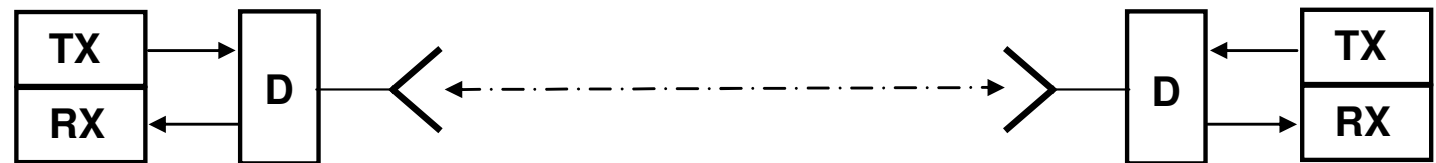
- **Poloduplex → radiové trasy přenášejí informace v obou směrech,**

- ale v 1 časovém úseku je v terminálu aktivní jen TX nebo jen RX.
- Jedná se o časové přepínání "time-division duplexing" (TDD).
- Rychlé TDD se může chovat jako plný duplex → **ale s nižší datovou rychlostí.**
- Příklady: Jednodušší osobní vysílačky, WLAN, ...



Plný duplex

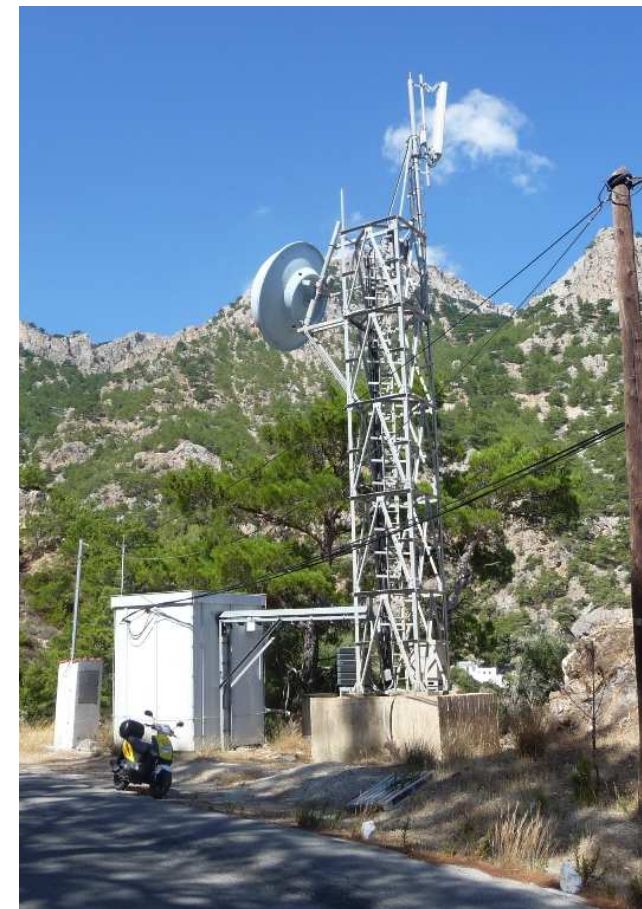
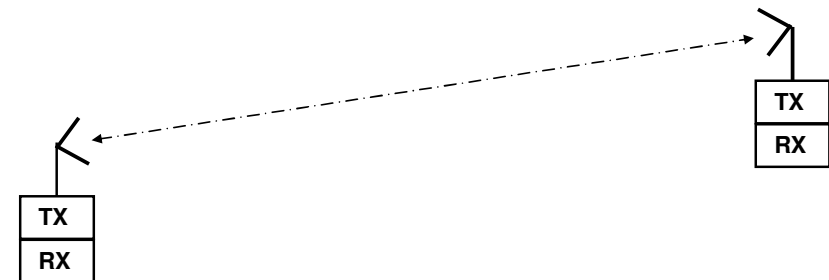
- **Plný duplex** → v 1 čase mohou uživatelé současně vysílat i přijímat:
 - Bez zásadních omezení
 - Jedná se o provoz typu "frequency-division duplexing" (FDD) → **vysílání a příjem jsou prováděny na rozdílných frekvencích**
 - Frekvence musí být dostatečně vzdálené → pro sloučení TX a RX do 1 antény se používají diplexery = slučovací filtry (v části Komponenty)
 - Příklady: Vysokorychlostní datové trasy, mobilní komunikace, ...
 - Široce používané



Topologie

- Obvyklé topologie radiových tras:
 - "Point-to-point" (PTP)
 - "Point-to-multipoint" (PTM)
 - "Broadcast" = vysílání
 - "Cellular" = buňkové sítě
- **Radiové trasy "point-to-point":**
 - Používají se směrové antény (parabolické)
 - Obvykle na vyšších GHz frekvencích (>10GHz)
 - Aplikace:
 - Nahrazení metalických nebo optických spojení
 - Vysokorychlostní páteřní radiové trasy
 - Propojení základnových stanic (BS) mobilních sítí i WLAN
 - Satelitní trasy

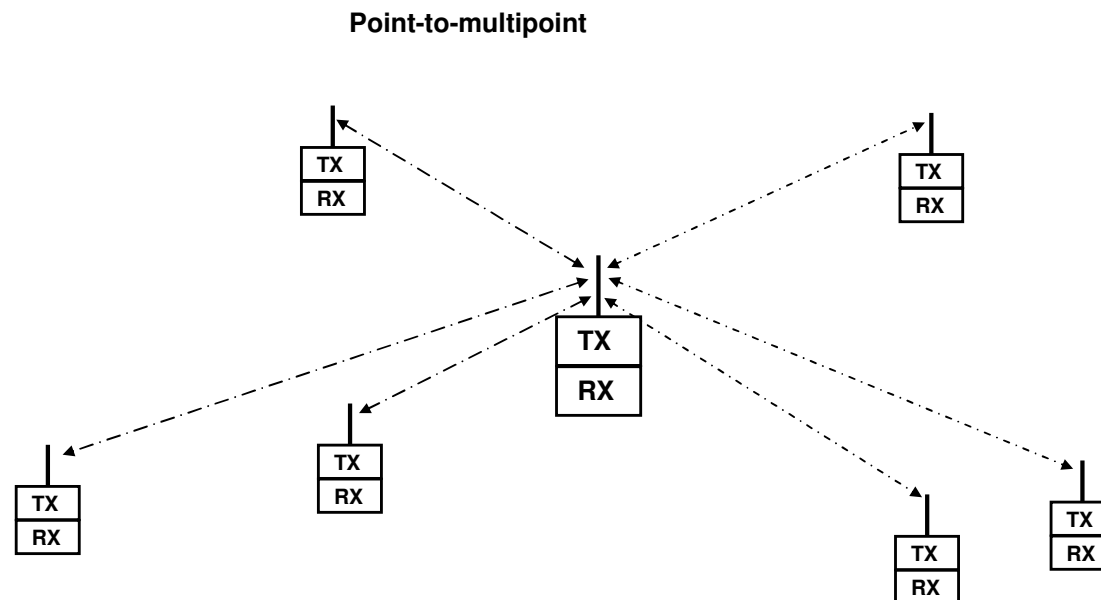
Point-to-point



Topologie

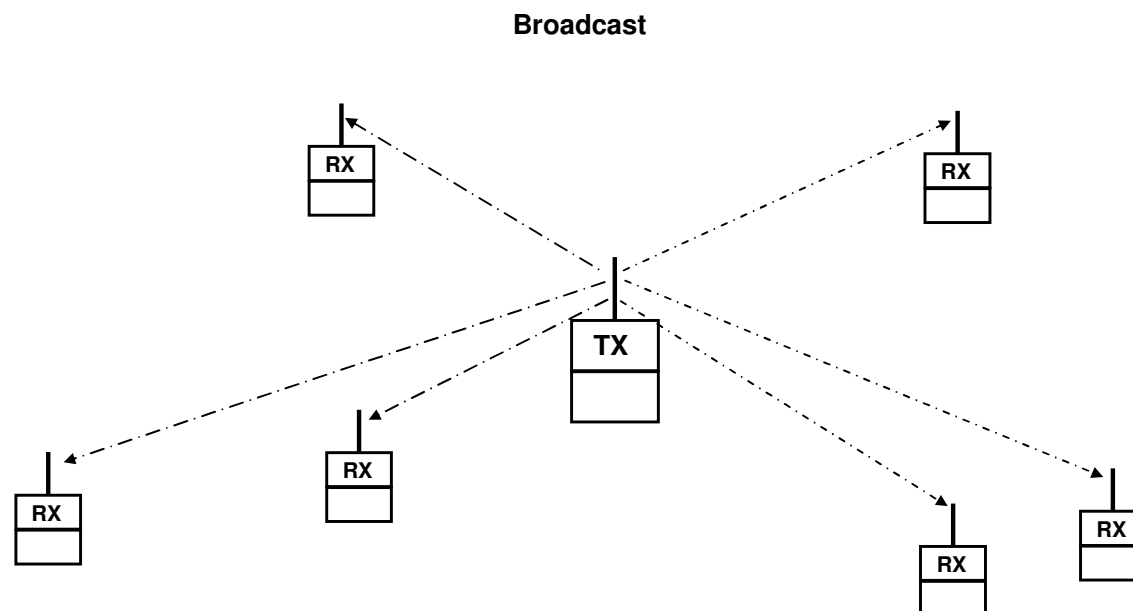
• "Point-to multipoint":

- Master - slave
- Všesměrová ("omni-directional") anténa u "master"
- Často směrovější antény u "slaves"
- Terminály mohou být stacionární i mobilní
- Aplikace: WLANs, mobilní buňkové sítě, senzorové sítě, ...



• "Broadcast":

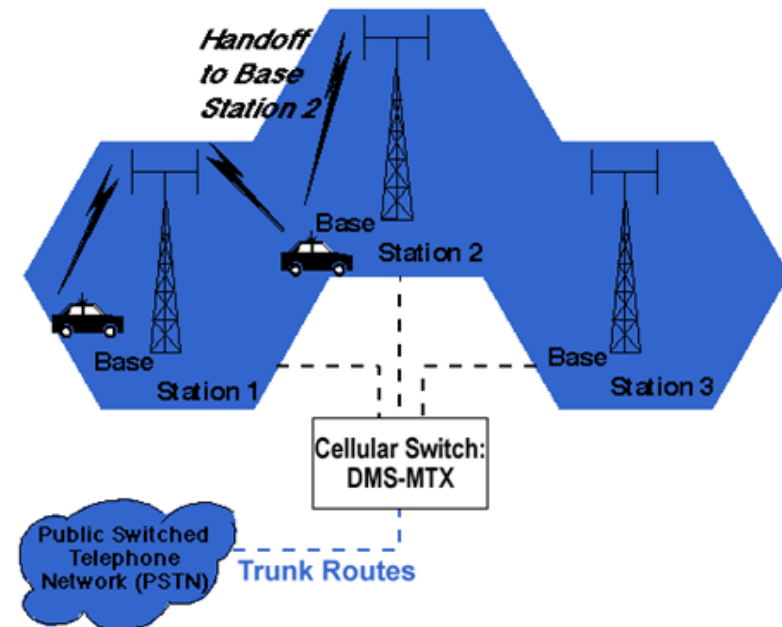
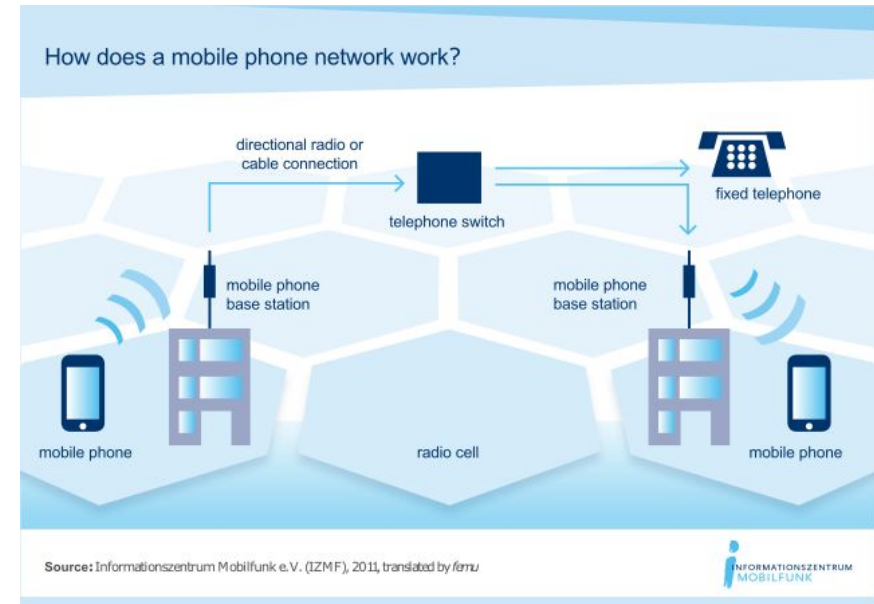
- Jako "point-to-multipoint",
- ale jen simplexní provoz.
- Aplikace: VKV FM rádio, DVB-T, DAB, ...



Topologie

- **"Cellular":**

- Systém více speciálních "point-to-multipoint" buněk
- Stacionární základnové stanice (BS)
- Mobilní terminály (MT)
- Zaručené automatické předávání ("hand-over") z jedné buňky do druhé
- Často také "broadcast" vrstvy
- Velmi složité řízení ve frekvenční i časové oblasti
- Podrobnosti - např. B2B32TSI



Vícenásobný přístup

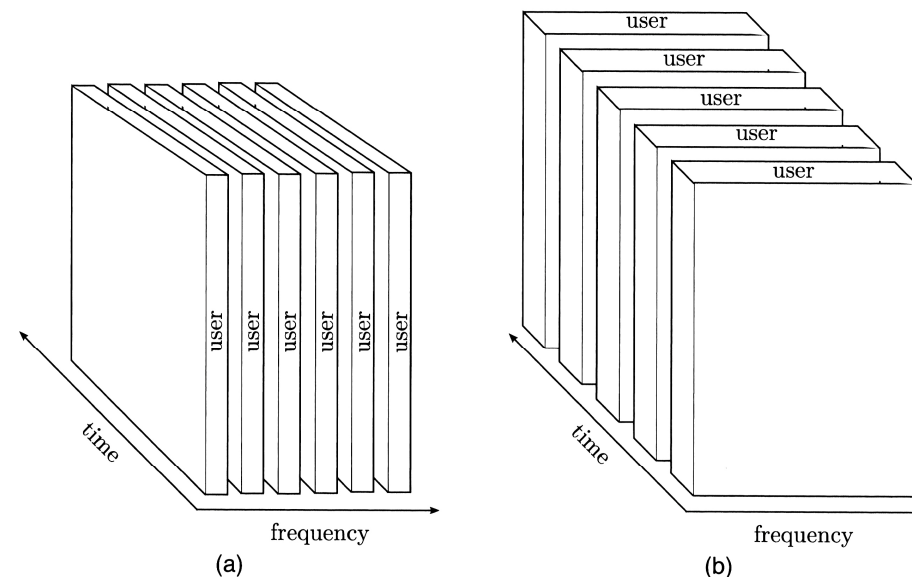
- Používané metody jak obsloužit více uživatelů v 1 čase
- Možnosti:
 - FDMA = "frequency-division multiple access"
 - TDMA = "time-division multiple access"
 - CDMA = "code-division multiple access"

• FDMA

- Jednotliví uživatelé komunikují v různých frekvenčních kanálech
- Dělení uživatelů ve spektru
- **Každý uživatel komunikuje 100% času, ale má k dispozici jen omezené spektrum**
- Příklady: VKV FM rádio, GSM, ...

• TDMA

- Jednotliví uživatelé komunikují v různých časových "slotech"

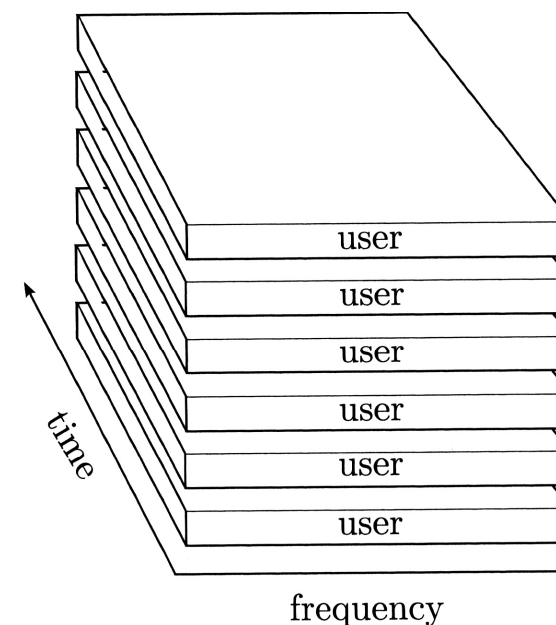


- Dělení uživatelů v čase
- **Každý uživatel má k dispozici 100% spektra, ale jen v omezeném čase**
- Příklady: WLAN, GSM, ...

Vícenásobný přístup

- **CDMA:**

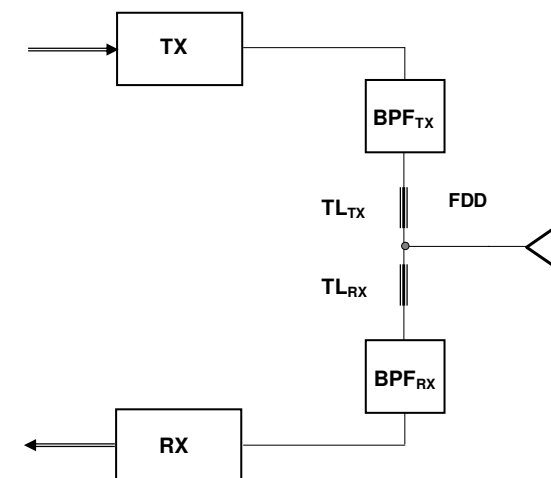
- Speciální technika původně používaná ve vojenské oblasti
- **Každý uživatel komunikuje 100% času a má k dispozici 100% spektra,**
- **ale spektrum (pásmo) musí být velmi široké → "spread-spectrum".**
- Dělení uživatelů je provedeno přídavnou modulací s použitím individuálních kódů
- Jsou použity ortogonální kódy s 0 vzájemnými korelacemi
- V RX se přijatý signál koreluje s oním individuálním kódem daného terminálu
- Korelací se šířka pásma zúží na původní hodnotu potlačí se velmi efektivně všechny ostatní nekorelované kanály



- **Stejné frekvenční pásmo široké B může být tedy sdíleno vysokým počtem uživatelů,**
- **ale pásmo musí být široké a není úplně efektivně využito.**
- Příklady: WLAN, UMTS, ...
- V současné době již méně populární

VF a mikrovlnné vysílače

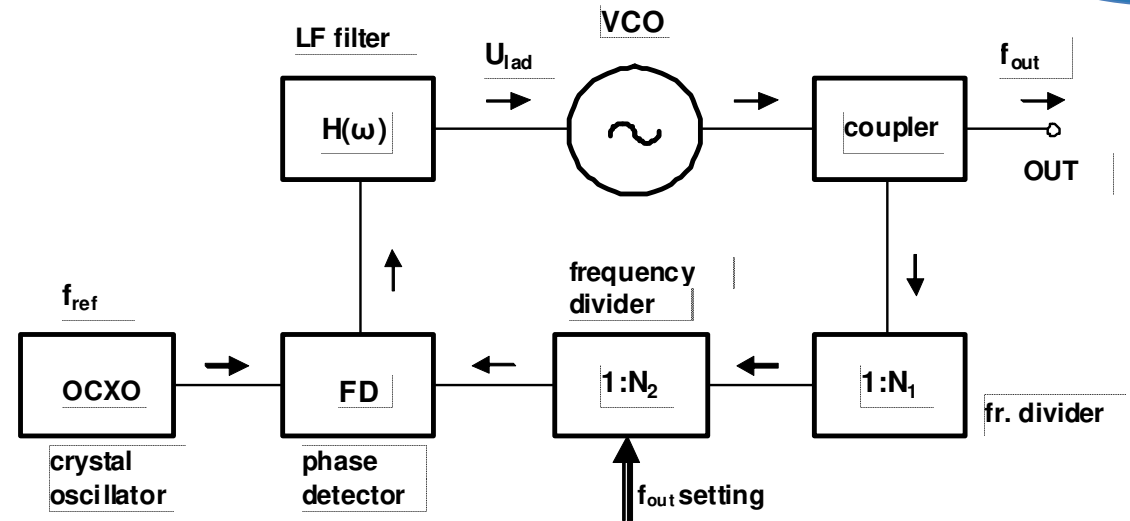
- VF a mikrovlnné vysílače:
 - Představují 1 ze základních komponent všech radiových tras
 - **Provádějí digitální modulaci nosné f_0 (obvykle 10^2MHz až 10^2GHz)**
 - Výhody použití vysokých frekvencí:
 - Menší antény
 - Nižší interference
 - Široká frekvenční pásma → vysoké přenosové rychlosti
 - Modulace → amplitudy, frekvence, fáze (nebo kombinace)
- **Frekvenční stabilizace nosné:**
 - f_0 musí být extrémně stabilní
 - Jinak hrozí problémy s interferencemi a kvalitou příjmu
 - Nejčastěji používané techniky:
 - Fázový závěs = "phase-lock loop" (PLL)
 - Přímá digitální syntéza = "direct digital synthesis" (DDS)



PLL

- **"Phase-lock loop":**

- Skládá se z VCO, výstupní vazby, děliček frekvence, fázového detektoru, referenčního oscilátoru (např. OCXO) a NF filtru
- OCXO = "oven-controlled crystal oscillator", extrémně stabilní, ale jen fixní nízká frekvence (typ. $\leq 100\text{MHz}$)
- Část signálu z VCO je přivedena na vstup nastavitelných děliček
- Výstupní frekvence VCO vydělená $N_1 N_2$ se musí rovnat f_{ref}
- Fázový detektor měří frekvenční a fázové rozdíly
- **Pokud je to potřeba, tak přes NF filtr typu DP řídí smyčka VCO tak, aby rozdíly byly 0**



- Výstupní frekvence $f_{out} = f_{ref} N_1 N_2$
- N_2 může být zlomek \rightarrow "fractional-N synthesis"
- **PLL také významně potlačuje fázový šum VCO**
- Příklad: ADF4356 (analog.com), PLL 53 - 6800MHz, s integrovaným VCO 3400-6800MHz

DDS

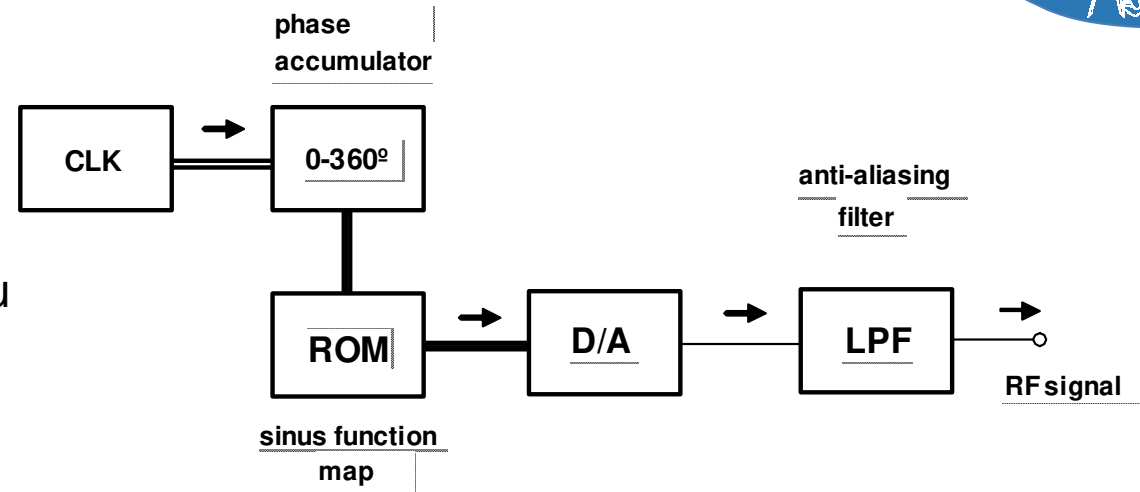
- **"Direct digital synthesis":**

- Přesný generátor hodinového signálu (např. OCXO) inkrementuje fázový akumulátor
- Pokud je nastaven krok 1° , tak se po 360 krocích akumulátor vrátí zpět na 0
- Akumulátor adresuje mapu funkce sinus, která je uložena v ROM
- Řada výsledných čísel je konvertována do analogové oblasti
- Filtr typu DP potlačuje nežádoucí produkty (aliasing)
- **Výstupní frekvence je definována f_{CLK} a nastaveným krokem akumulátoru**

- Výhody:

- **Přesné a velmi rychlé nastavení výstupní frekvence**

Fázová koherence během přepínání



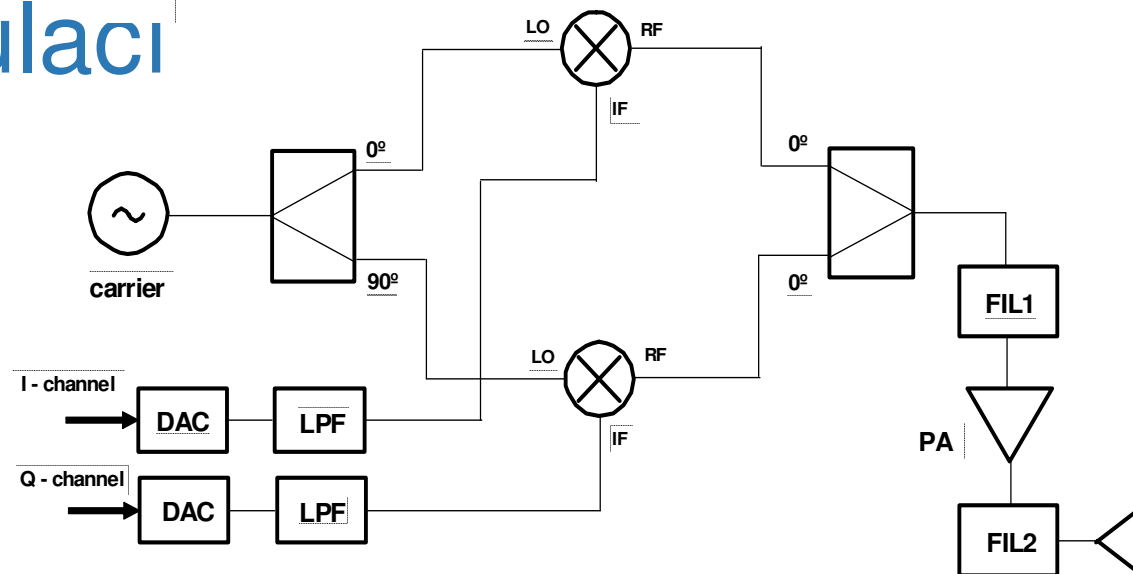
- 2-kanálové DDS mohou zaručit naprosto přesný fázový posuv 90° (ideální pro IQ zpracování)
- Ale mají omezené horní pásmo $\sim 1,4\text{GHz}$ (stav 2017) a vysoký DC příkon
- Příklad: AD9914 (analog.com)
- V praxi zatím převažují PLL

TX s přímou IQ modulací

- Výstupní signál:

$$s_{TX}(t) = v_I(t)\cos(\omega_0 t) + v_Q(t)\sin(\omega_0 t)$$

- FIL1 → potlačuje parazitní IM produkty modulátoru
- PA → určuje výstupní výkon
- FIL2 → potlačuje IM produkty PA

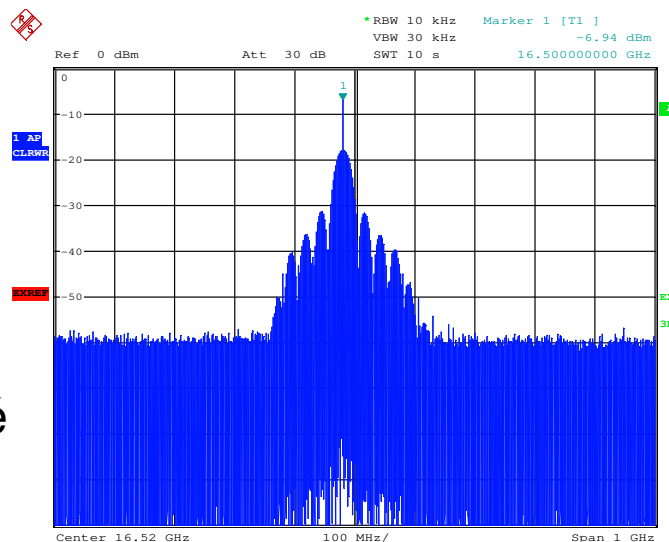


- Výhody přímé modulace:**

- Moderní jednoduchá struktura
- Umožňuje širokopásmové přeladění
- 1xPLL, malé rozměry, nízký DC příkon
- Vstupní signály jsou v BB → malé nároky na DAC



Široce používané v mobilních komunikacích i jinde



- Nevýhody:**

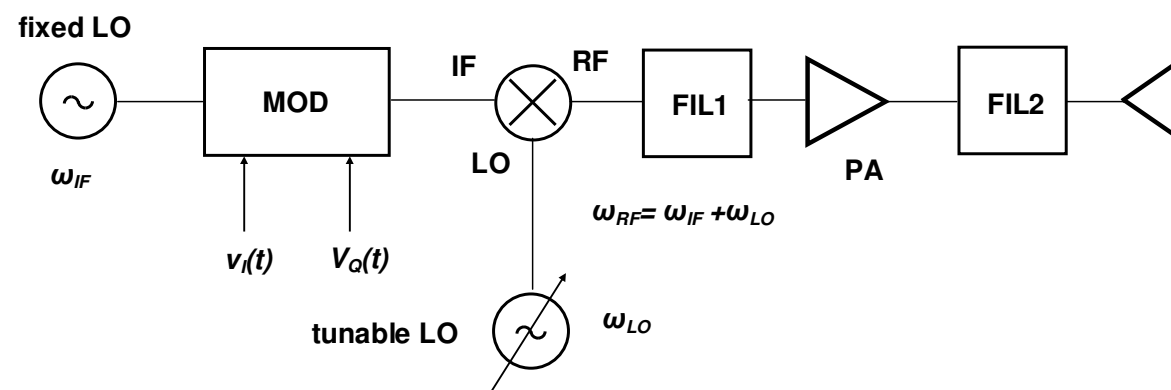
- Kvadratické chyby na vyšších GHz frekvencích
- Složitě potlačení LO → parazitní vyzařování do antény

TX s frekvenční konverzí

- Vysílače s konverzí:

- Modulace je prováděna na relativně nízké IF ("intermediate frequency" = mezifrekvence)
- Použitím up-konvertoru je modulovaný signál konvertován na cílovou nosnou ω_0**

$$\omega_0 = \omega_{IF} + \omega_{LO}$$



- Výhody:**

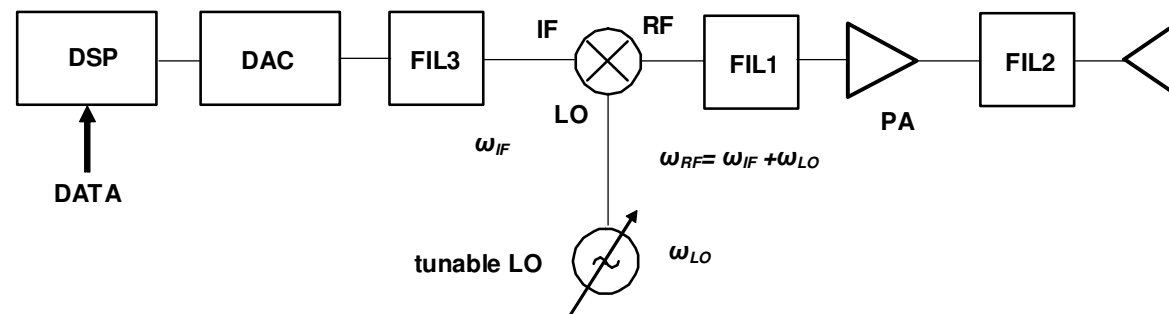
- Řeší problémy přímé modulace
- Na nízkých frekvencích jsou nižší kvadrurní chyby
- Lze dokonale potlačit vyzařování LO do výstupního signálu a do antény
- Zajišťuje lepší linearitu modulátoru

- Nevýhody:**

- Složitější struktura
- 2x LO
- Větší rozměry, DC příkon, cena

TX s frekvenční konverzí

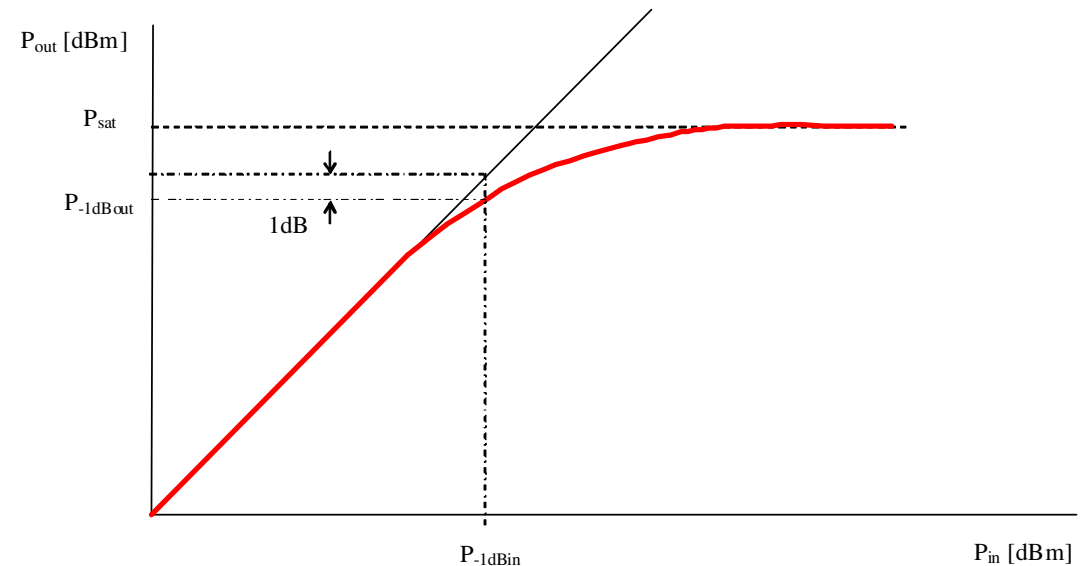
- Verze s digitální IF:
 - Moderní radiové struktury stále posunují hranici analog-digitál směrem k více digitálním verzím
 - **Modulace je prováděna v DSP a pomocí DAC konvertována do analogové formy na ω_{IF}**
 - FIL3 řeší aliasing
 - Pomocí up-konvertoru je signál z ω_{IF} konvertován na nosnou ω_0
- **Výhody:**
 - Více digitální verze
 - Modulaci lze měnit změnou SW



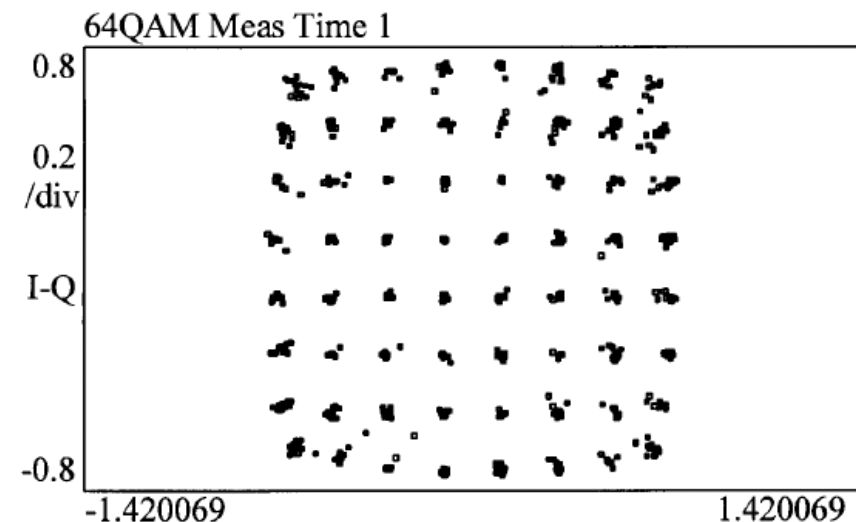
- **Nevýhody:**
 - Jsou nutné rychlé DSP a DAC
 - Vyšší DC příkon, někdy cena

Výkonové zesilovače

- Určují výstupní výkon TX P_{out} rozhodující pro dosah radiové trasy → Friisův vztah (později v kurzu)
- **Ale také definují řadu důležitých parametrů TX:**
 - Účinnost → v mobilních komunikacích jeden z nejdůležitějších parametrů
 - Komprese P_{-1dB}
 - IM parametry → interference, rozšiřování spektra
 - Účinnost a linearita jsou většinou protichůdné požadavky
- **Linearita PA:**
 - Saturace ovlivňuje krajní stavy x-QAM
 - Důsledkem může být zvýšení BER

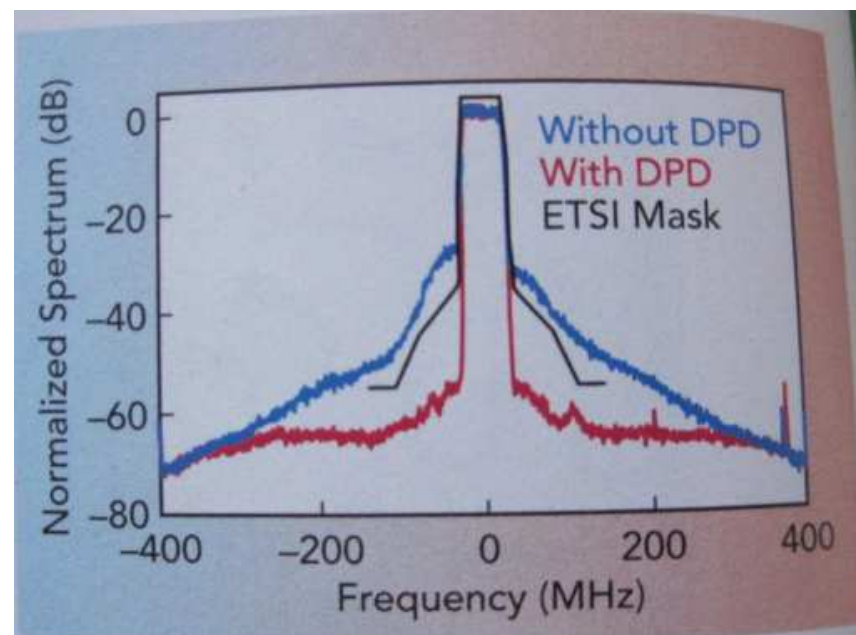
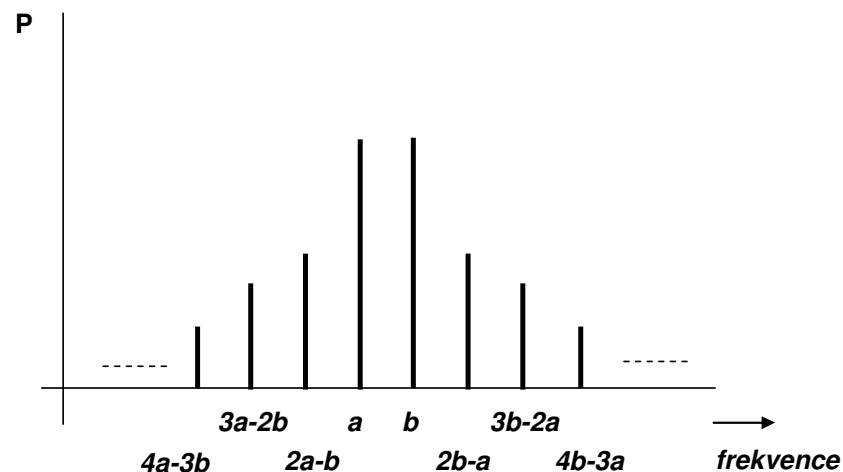


$$\eta = P_{RF} / P_{DC}$$



Linearita

- Nedostatečná linearita PA:
 - Zvyšuje produkty IM3
 - **Důsledkem jsou rozšiřování spektra a vnitřní kanálové interference**
 - Obojí musí být v TX pod kontrolou
 - Výstupní spektrum je omezeno přísnými normami
 - Jinak by mohlo dojít k rušení sousedních kanálů
 - **Velmi citlivé jsou modulační s velkými změnami amplitudy (obálky) → x-QAM, OFDM, ...**
 - Méně citlivé jsou modulační s konstantní obálkou → FM, x-PSK, ...



PA třídy A

- PA s vysokou linearitou:

- ALE s nízkou účinností

- Klidové předpětí:

- Napájecí napětí $V_{DS0} = V_{DS\max} / 2$
 - Proud $I_{DS0} = I_{DS\max} / 2$

- Tranzistor je otevřen 100% času

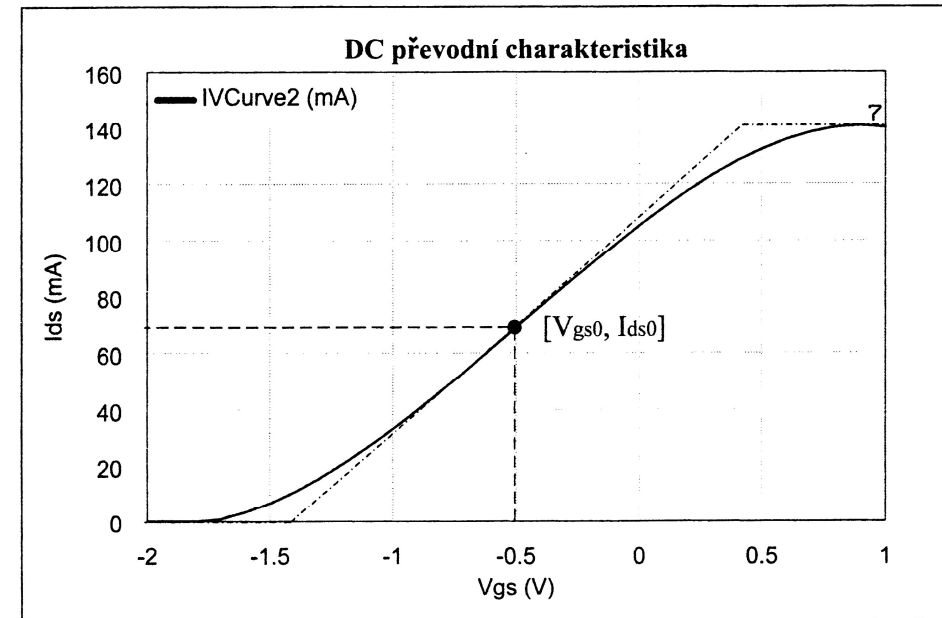
- DC příkon $P_{DC} = I_{DS0} V_{DS0}$

- Optimální zátěž $R_{opt} = V_{DS0} / I_{DS0}$

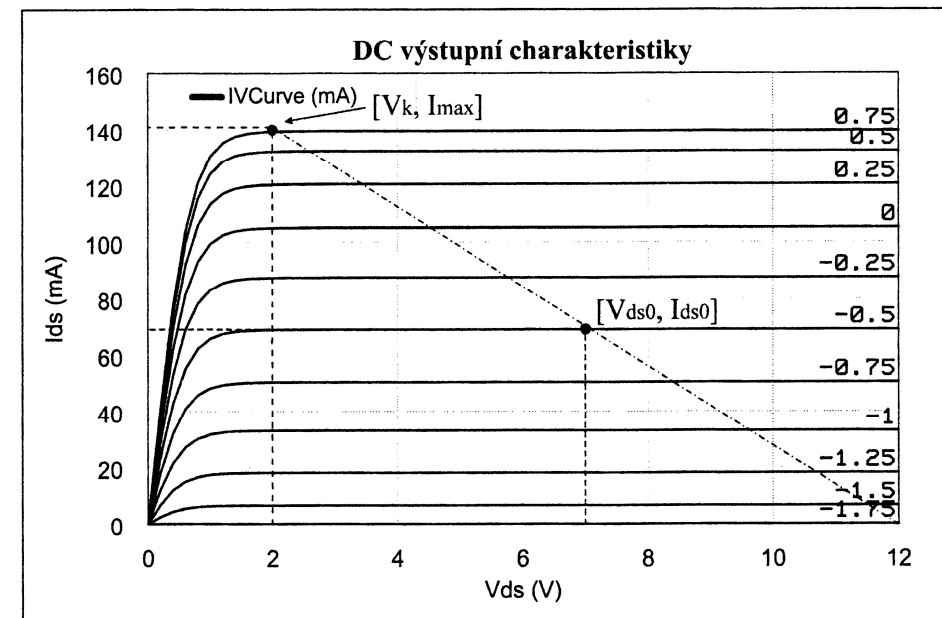
- Max. VF výkon do R_{opt}

$$P_{VF\max} = \frac{V_{DS0}}{\sqrt{2}} \frac{I_{DS0}}{\sqrt{2}} = 50\% P_{DC}$$

- V praxi je účinnost často významně nižší



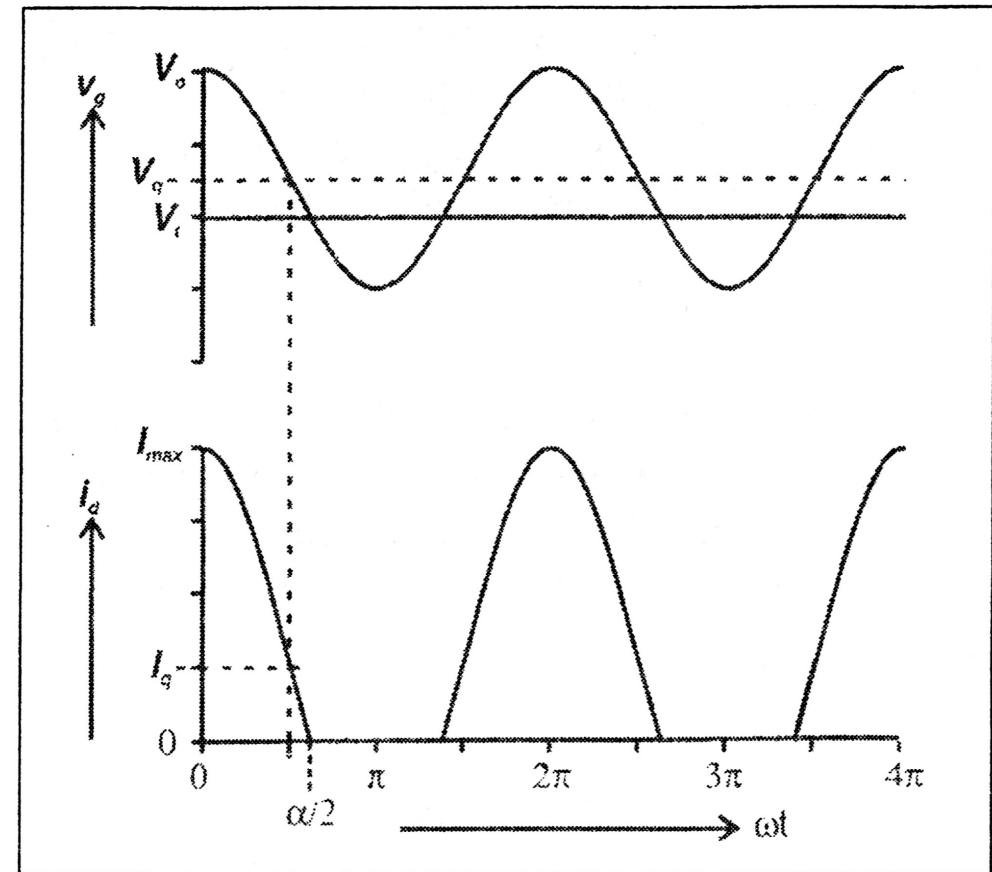
Obr. 4.8.4. Převodní charakteristika výkonového FE tranzistoru.



Obr. 4.8.5. Výstupní charakteristiky výkonového FE tranzistoru.

Další třídy zesilovačů

- **Třída B:**
 - Úhel otevření 180°
 - Tranzistor je otevřený 50% času
- **Třída C:**
 - Úhel otevření $<180^\circ$
 - Jen úzké sinusové pulsy
- **Třída D:**
 - Téměř pravoúhlé signály
 - Výkonový DAC
- **Třída E:**
 - Pomocí filtrů jsou vyšší harmonické vráceny do zesilovače
- Podrobnosti v B2B37ROZ

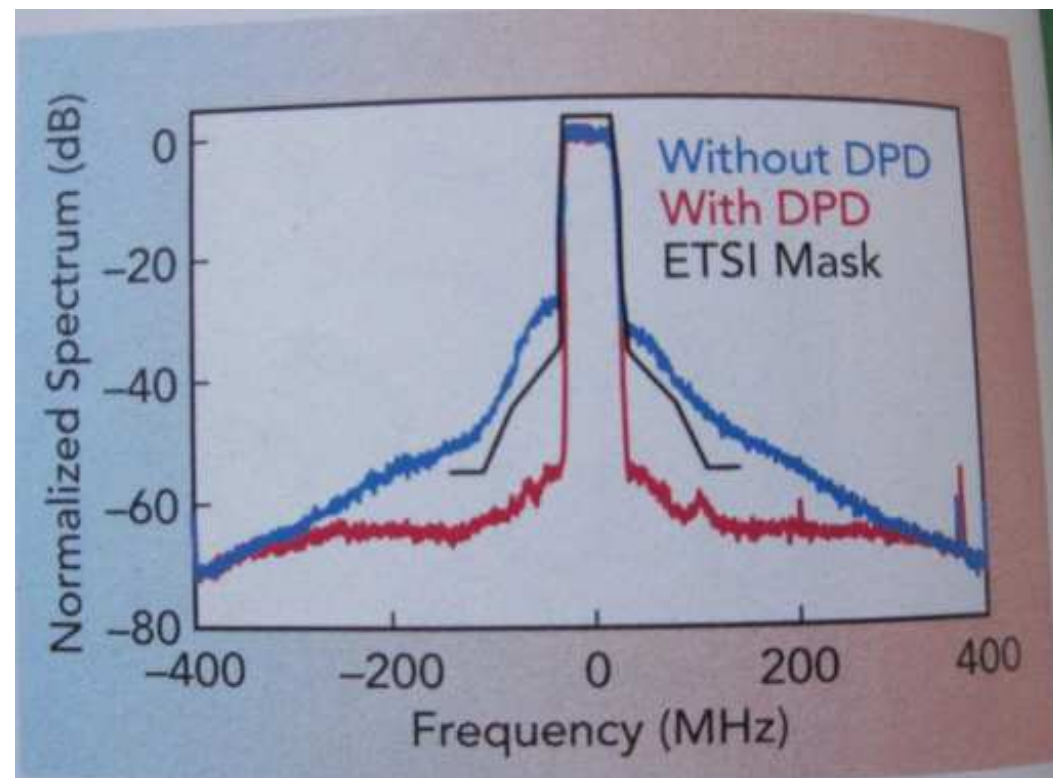


Obr. 4.8.13. Časový průběh *gate* napětí a proudu *drainem*.

- **Podstatně vyšší účinnost**
- **Ale podstatně nižší linearita**
- Použitelné většinou jen pro modulace s konstantní obálkou

Linearizace

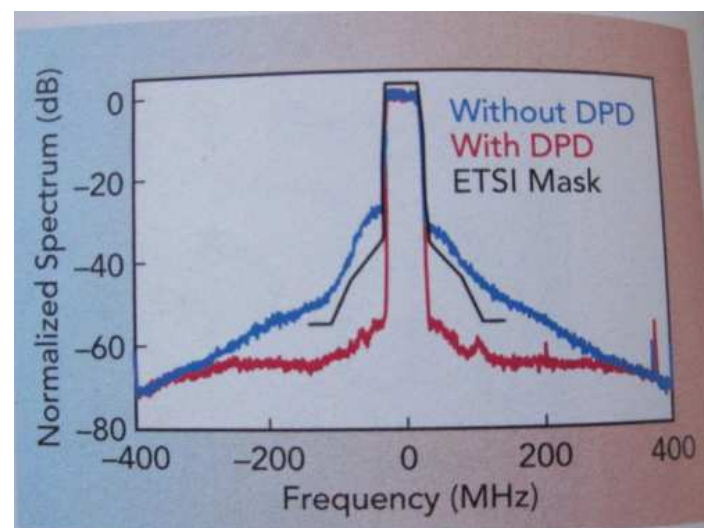
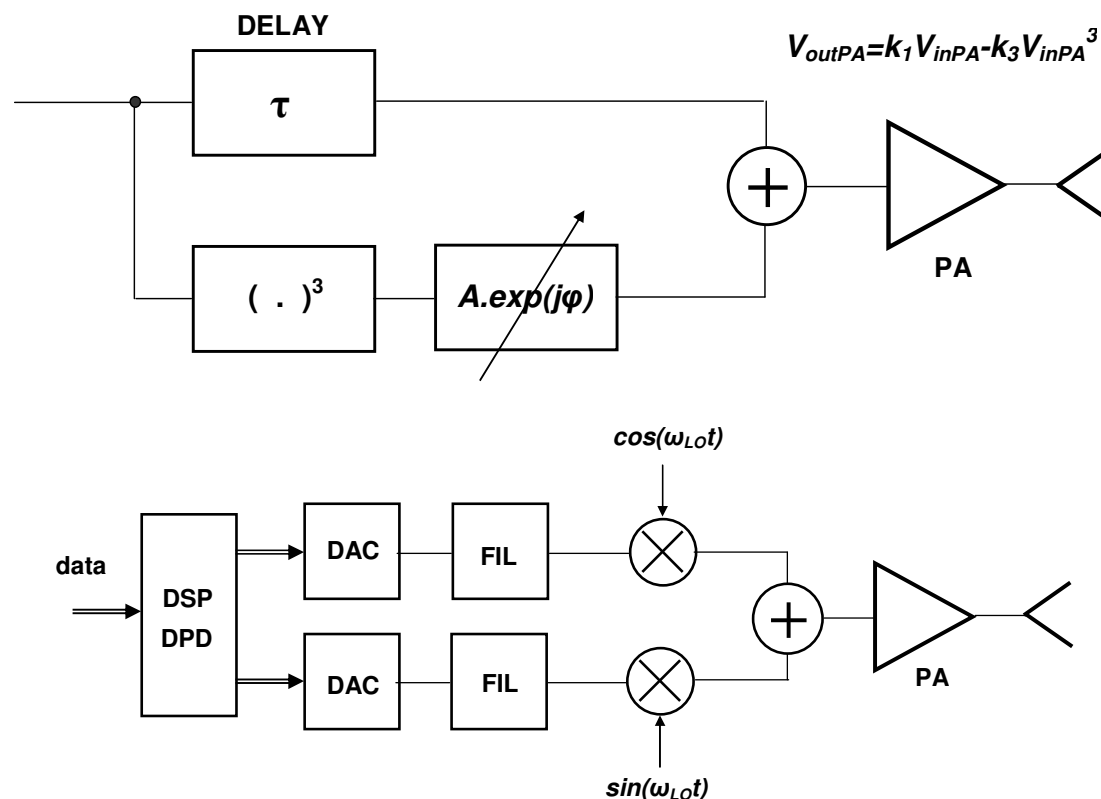
- Většina moderních modulací vyžaduje lineární zesilovače s vysokou účinností (mobilní komunikace)
- **Řešení → linearizace jednodušších PA**
- Možnosti:
 - "Pre-distortion" (PD)
 - "Digital pre-distortion" (DPD)
 - "Envelope tracking" (ET)
 - "Feed-forward"
 - "Doherty"
- Všeobecné vlastnosti:
 - Kromě PA jsou nutné další komponenty



- Výhody:
 - Moderní stále více používaná řešení
 - **Lze současně zajistit linearitu i účinnost**
 - Menší rozměry - menší chladiče
 - Často s digitálním zpracováním
 - Několik příkladů ↓

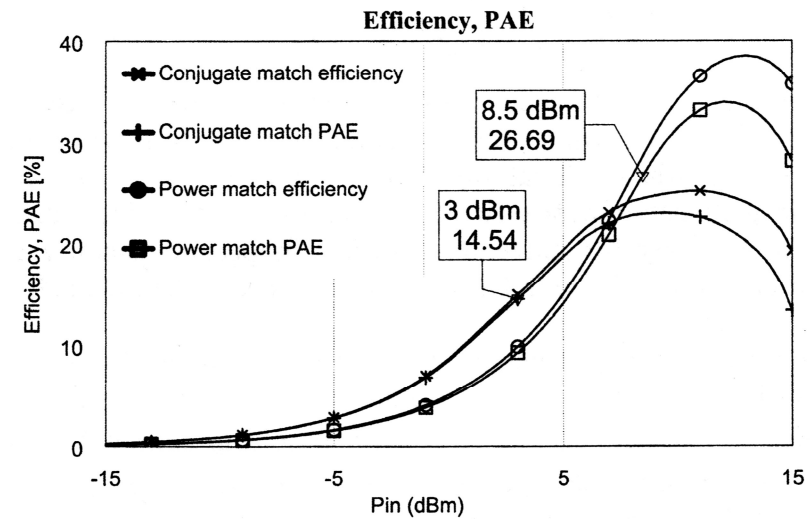
PD, DPD

- "Pre-distortion":
 - Oblíbená technika
 - Používá PA s mírnou nelinearitou
 - Vstupní signál je upraven tak, aby výstupní signál nebyl nelinearitou ovlivněn
 - **Ke vstupnímu signálu je nutné přičíst kubickou složku s vhodnou amplitudou a fází**
- **Moderní komunikační zařízení často používají "digital pre-distortion":**
 - DPD je realizována v DSP a BB
 - A následně konvertována na f_0
 - Výhody:
 - Přesnější linearizace
 - Menší rozměry
 - Příklad vlivu DPD →

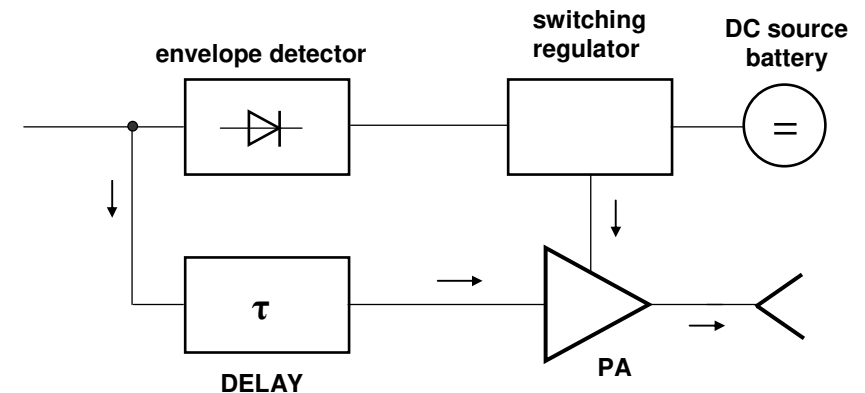


"Envelope tracking"

- Účinnost PA:
 - Je nejvyšší poblíž saturace
 - Teoreticky: A \rightarrow 50%, B \rightarrow 78%
 - ALE rychle klesá s amplitudou
 - **Problém v případě signálů s vysokým poměrem "peak-to-average power ratio" (PAPR)**
 - x-QAM, OFDM, ...
- Principy "envelope tracking" (ET):
 - Detektor obálky měří okamžitou amplitudu signálu
 - **Řízený spínaný regulátor nastavuje DC napájecí napětí na hodnotu těsně nad potřebnou saturační úroveň**
 - PA tak pracuje stále poblíž saturace
 - Princip je velmi jednoduchý, praktická realizace je dost složitá



Obr. 4.8.7. Účinnost a PAE v závislosti na vstupním výkonu.



- Musí být navrženo jako celý systém
- Často se používá s DPD
- **Široce používaný v mobilních komunikacích**

VF a mikrovlnné přijímače

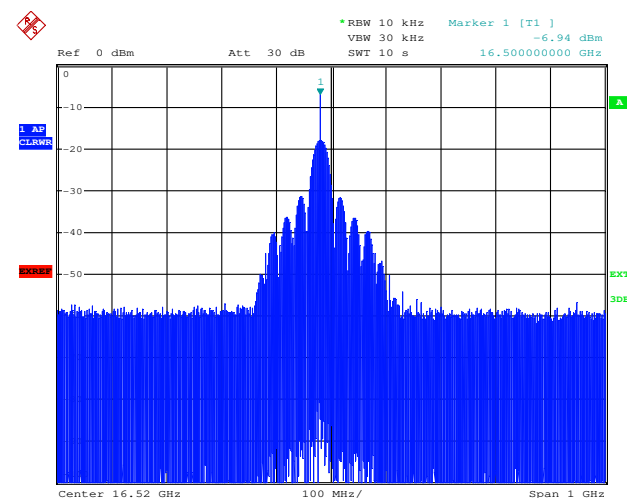
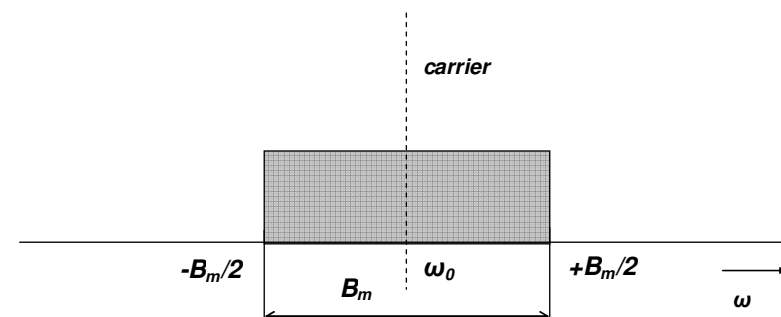
- Zpracovávají signály z antén
- Signály jsou modulované a mohou mít velmi nízké úrovně → důvody:
 - Často nízké vysílané výkony (e.g. 10dBm)
 - Vysoké útlumy FSL
- **Signály jsou na vhodné nosné s frekvencí ω_0 a zabírají modulační pásmo B_m**
- V okolí mohou existovat:
 - Další kanály FDMA (více paralelně komunikujících uživatelů)
 - Další bezdrátové služby
 - Rušivé signály
 - Šum - vždy
- Náročné požadavky na příjem

$f=1$ GHz

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

$f=100$ GHz

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



VF a mikrovlnné přijímače

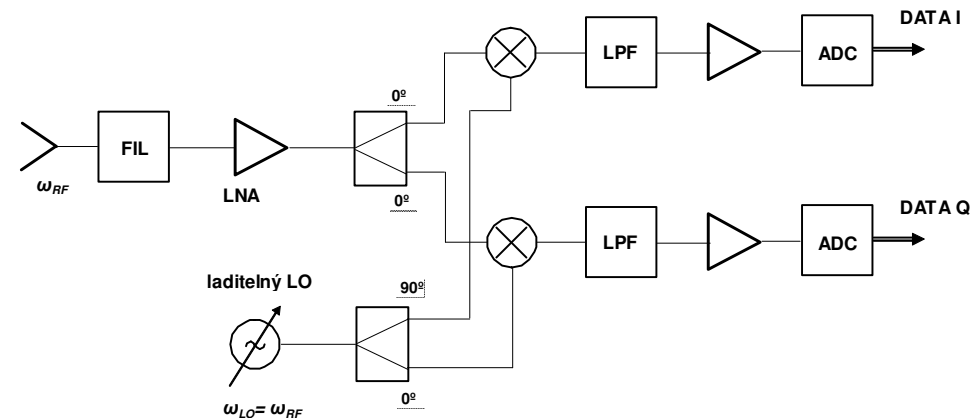
• Všeobecné požadavky:

- Příjem i velmi slabých signálů
- Při dostatečných hodnotách SNR nebo E_b/N_0
- Ale také kvalitní příjem signálů s vysokými úrovněmi (např. MT blízko BS)
- Snadno přeladitelné v celém pásmu pracovních frekvencí
- Selektivní příjem 1 požadovaného kanálu
- Velmi účinné potlačení jak blízkých tak vzdálených signálů
- Často také → malé rozměry, nízký DC příkon, cena, ...

• Používané komponenty:

- Filtry, LO, zesilovače, děliče výkonu, demodulátory, ...

○ Některé RX mohou být složité

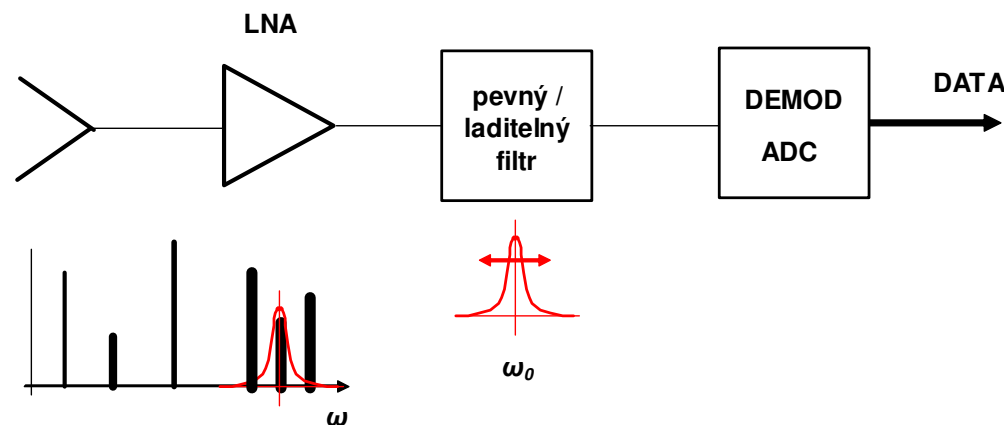


• "Digitální rádio":

- **"Software defined radio" (SDR) = moderní struktura RX**
- Minimální rozsah VF analogových obvodů
- Maximum funkcí je prováděno digitálními obvody
- Obsahují rychlé ADC a DSP
- Výhody → **lze je jednoduše adaptovat na nové přenosové formáty**

VF přímo laděné přijímače

- Přímě laděné RX:
 - Výběr pracovního kanálu je prováděn pevným / přeladitelným filtrem
 - Vstupní LNA zvyšuje SNR
- Problémy:
 - Přeladitelné filtry:
 - Vykazují horší selektivitu (strmost hran)
 - Poskytují horší výběr kanálů a potlačení interferencí
 - Širší šumové pásmo
 - Varikapy (varaktorové diody) umožňují typ. frekvenční přeladění jen 1:2
 - Konverze A/D je prováděna na ω_0 :
 - Drahé ADC, horší parametry
 - Na vysokých GHz \rightarrow ADC neexistují
 - Stabilita \rightarrow RX mohou mít jen nízký zisk
 - Mohou být problémy s demodulací



- Výhody:
 - Velmi jednoduchá struktura
 - Mohou být velmi levné
- Aplikace:
 - Jen nejjednodušší zařízení s nízkou cílovou cenou
 - Na fixních nízkých frekvencích
 - Dálková ovládání, senzory, ...



RX typu superhet

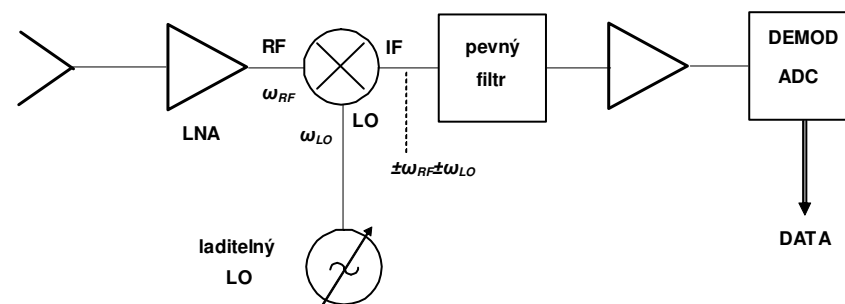
- Řeší většinu problémů přímo laditelných RX:

- Pásmo přeladění může být velmi široké (např. 1MHz - 3GHz)
- **Může vykazovat téměř dokonalou selektivitu**
 - Filtry mohou mít téměř ideální pravoúhlé frekvenční průběhy (SAW)
 - Filtry mohou být velmi úzké → e.g. $B=1\text{kHz}$ @30GHz
- A/D konverze a demodulace může být prováděna na nízkých frekvencích → lepší parametry, nižší cena, ...
- Menší problémy se stabilitou → RX mohou mít vyšší zisk

- ALE → přinášejí nové problémy:

- **Zrcadlový příjem**

Mají složitější strukturu



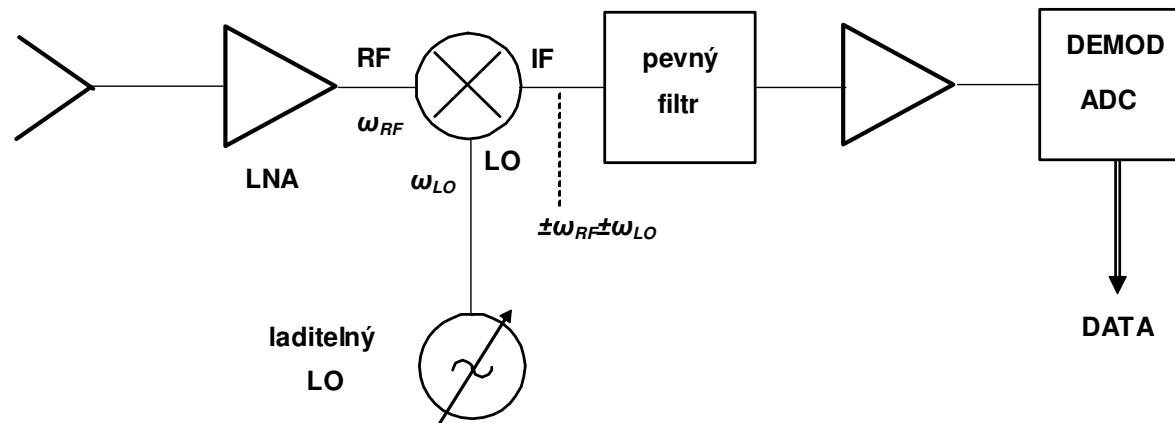
- Použití:

- **Určitě nepoužívanější typ RX**
- Možná 99% všech RX
- Také např. v měřicích přístrojích
- Patent Armstrong 1918 → princip se od té doby nezměnil
- Jeden z největších vynálezů,
- ale kupodivu ne tak slavný

Struktura RX s 1 konverzí

- Komponenty:

- LNA
- Mixer
- Přeladitelný LO (VCO + PLL)
- Pevný IF filtr



- Založeno na vlastnostech směšovačů:

- Mixer = analogová násobička
- Vstupní signály $v_{LO}(t)$ a $v_{RF}(t)$
- Nové frekvence na výstupu

$$u_{IF}(t) = k_2 V_{LO} \cos(\omega_{LO}t + \psi_1) V_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \psi_2) = \frac{1}{2} k_2 V_{LO} V_{RF} \left[\cos(\omega_{LO}t + \psi_1 + \omega_{RF}t + \psi_2) + \cos(\omega_{LO}t + \psi_1 - \omega_{RF}t - \psi_2) \right]$$

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

- V RX se používají rozdílové produkty

$$\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_{RF}$$

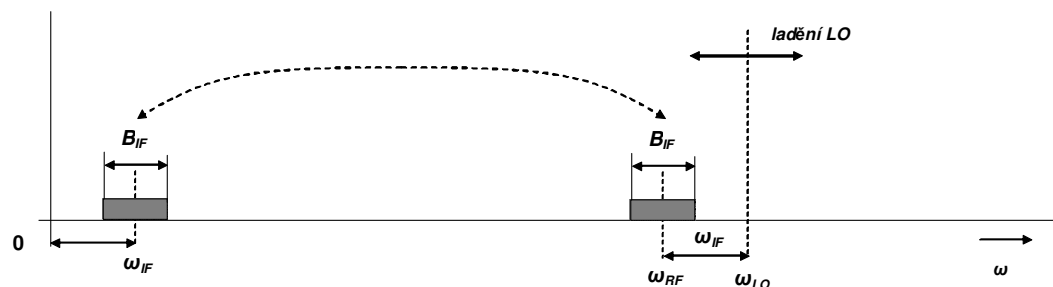
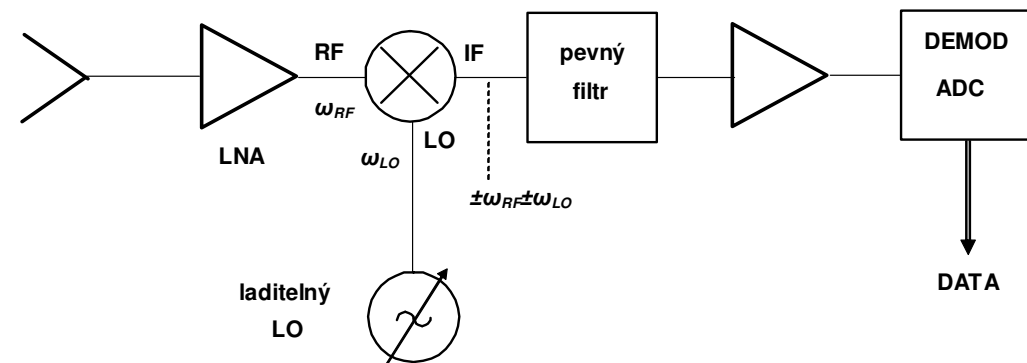
- S použitím přeladitelného LO lze vstupní VF signály konvertovat na pevnou relativně nízkou ω_{IF} frekvenci**

- Přijímané signály na $\omega_0 = \omega_{RF}$ lze velmi jednoduše vybírat = ladit změnou ω_{LO}**

- Pro konst. V_{LO} je V_{IF} přímo úměrné V_{RF} = pseudolineární režim

Struktura RX s 1 konverzí

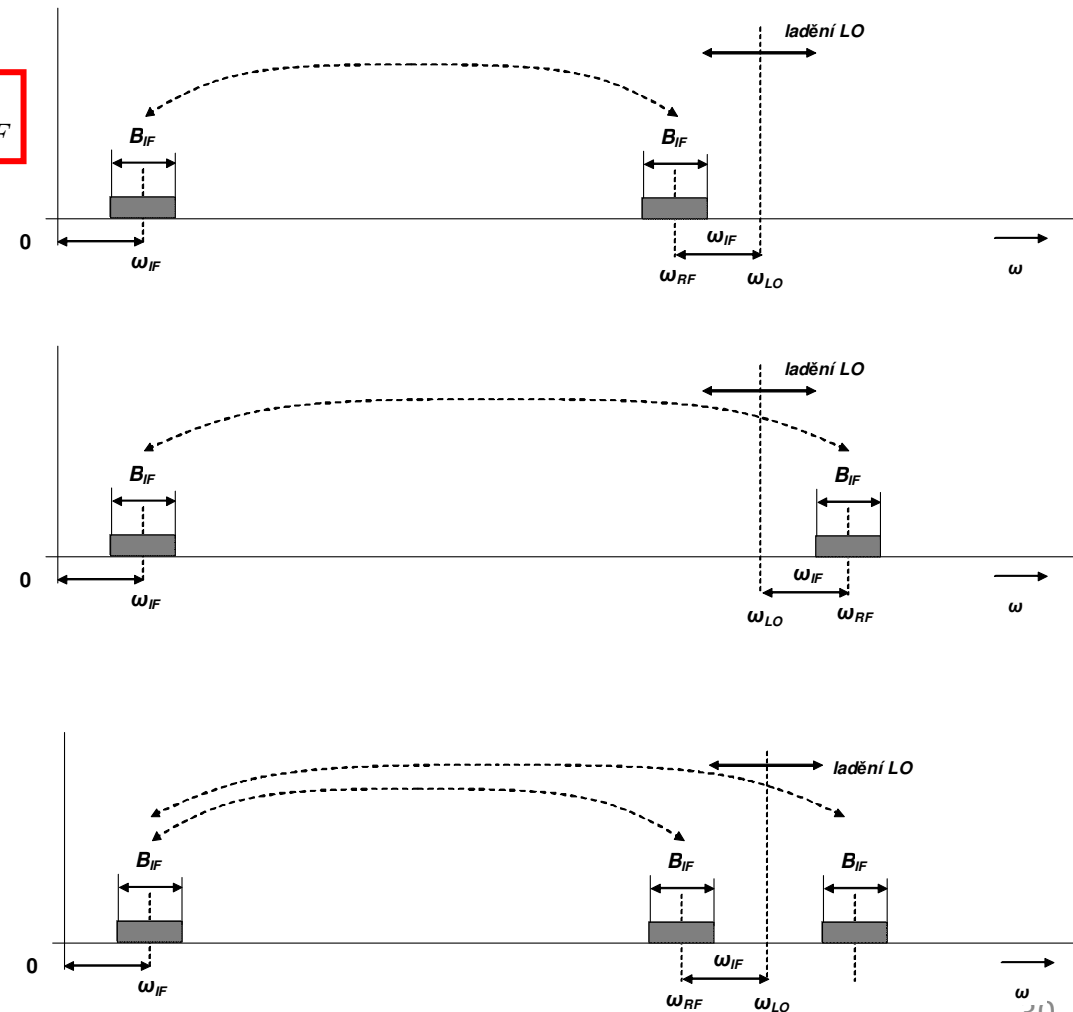
- Do IF filtru s šířkou pásma B_{IF} konvertuje RX signály z B_{IF} širokého pásma v okolí ω_{RF}
- IF filtr:
 - **Pracuje na pevné a relativně nízké frekvenci**
 - **Nemusí být laditelný**
 - Může mít proto téměř ideální tvar (SAW)
 - Může zabezpečit téměř ideální potlačení sousedních kanálů, rušení, šumu, ...
 - Může být analogový i digitální
 - Může být doplněn IF zesilovači → RX může mít dostatečně vysoký zisk
- Nový PROBLÉM:
 - **Zrcadlový příjem ("mirror reception")**



$$\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_{RF}$$

Zrcadlový příjem

- Vyplývá z $\cos(\alpha) = \cos(-\alpha)$
- Proto $\cos(\omega_{LO}t - \omega_{RF}t) = \cos(\omega_{RF}t - \omega_{LO}t)$
- Konvertované frekvence $\omega_{RF} = \omega_{LO} \pm \omega_{IF}$
- **Do IF filtru jsou vždy konvertována 2 pásma široká B_{IF} :**
 - DSB konverze - LSB / USB
 - Se stejnou účinností
 - **Jedno postranní pásmo ("side-band") je užitečné, druhé je parazitní:**
 - Může obsahovat jiný signál nebo interference
 - Vždy obsahuje šum
- Vždy musí být potlačeno



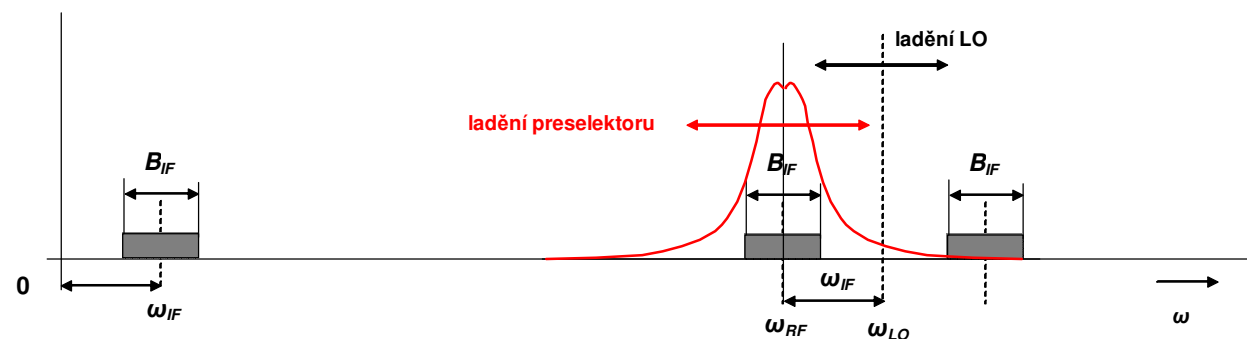
Potlačení zrcadlového příjmu

- Možnosti:

- Preselektor
- Vícenásobné směšování
- Potlačení typ. >60dB

- Preselektor:**

- Filtr před směšovačem
- Často přeladitelný
- **Ladí se paralelně s LO**
- ω_{LO} an ω_{RF} se liší o ω_{IF}
- Nevýhody:
 - Relativně úzkopásmové
 - Pásmo přeladění max. 1:2
 - Složitá synchronizace ladění preselektoru a LO

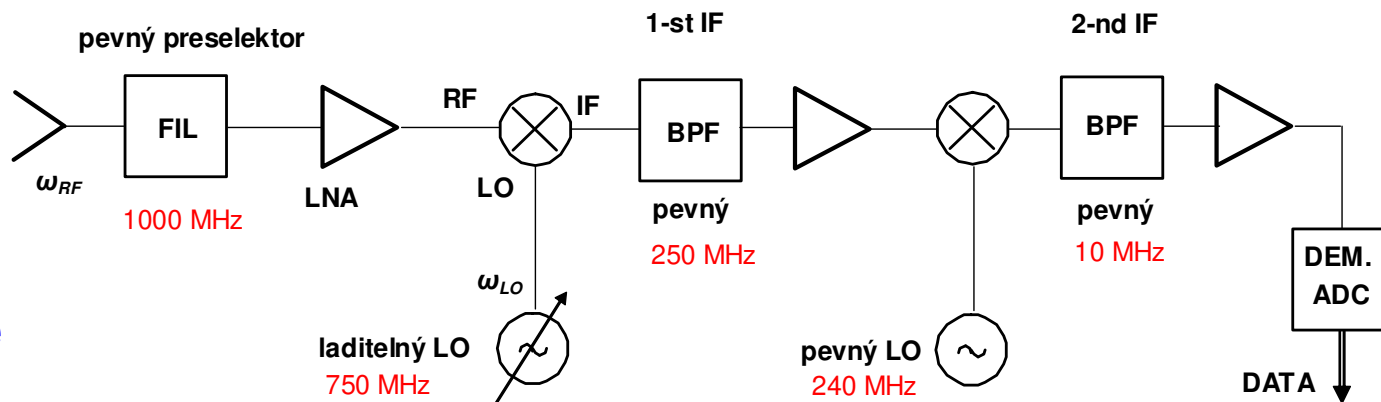


- Použití: např. VKV FM rádio
- V moderních RX strukturách nejsou preselektory oblíbené

Vícenásobné směřování

- Princip funkce:

- Používá se vysoká frekvence 1. IF filtru ω_{IF1}
- **Zrcadlové pásmo je potom vzdálené a dá se dobře filtrovat**
- Lze použít jednoduchý filtr na fixní frekvenci
- ALE další zpracování na vysoké ω_{IF1} frekvenci je neefektivní
- Horší parametry demodulátoru, vyšší nároky na ADC, ...
- Proto se obvykle používá 2. přídavný směšovací stupeň



- Výhody:

- Umožňuje širokopásmový příjem (např. 1 - 3000 MHz)
- Vyjma 1 LO nevyžaduje žádný ladicí prvek
- **Téměř ideální potlačení zrcadlového příjmu**
- Často používané

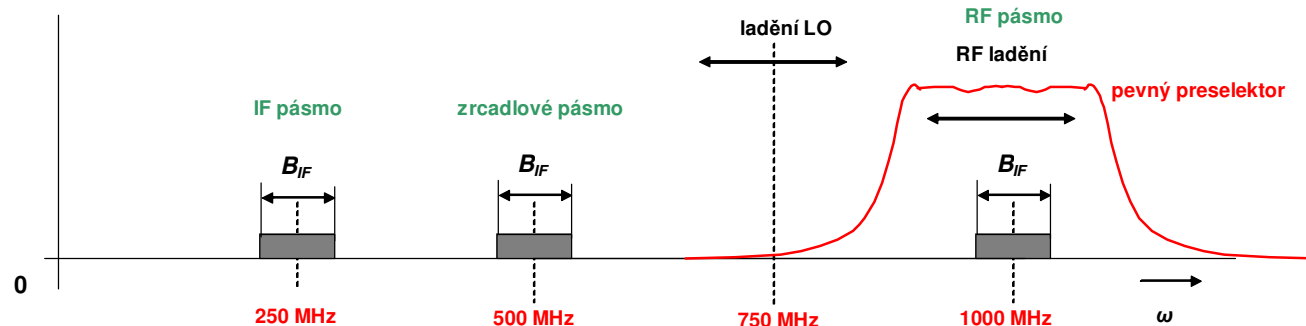
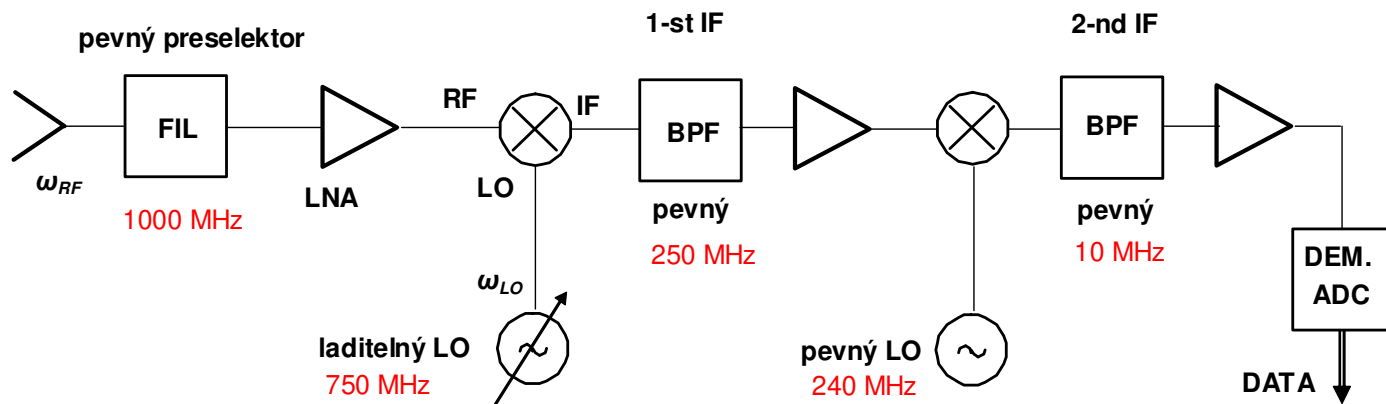
- Nevýhody:

- Složitější struktura → 2 směšovače, 2 LO, přídavné filtry, ...
- Vyšší DC příkon (zejména PLL), větší rozměry, vyšší cena

Příklad: Vícenásobné směřování

• Přijímač:

- Vstupní frekvenční rozsah 950 - 1050MHz
- $B_{RX}=5\text{MHz}$
- 1. směšování:
 $f_{IF1}=250\text{MHz}$, $B_{IF1}>5\text{MHz}$
- Šířka B_{IF1} není kritická, nezajišťuje selektivitu
- Rozsah přeladění LO1 700 - 800MHz
- 2. směšování: LO2 pevná frekvence 240MHz
- $f_{IF2}=10\text{MHz}$, $B_{IF2}=5\text{MHz}$
(Hlavní selektivní filtr)

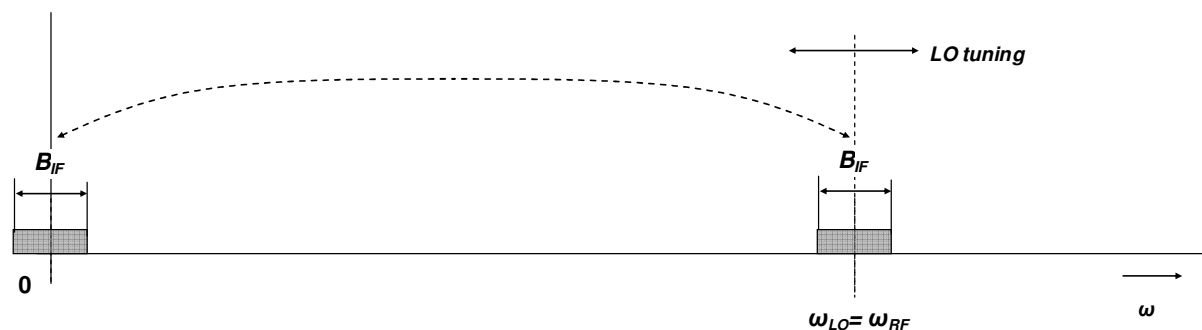
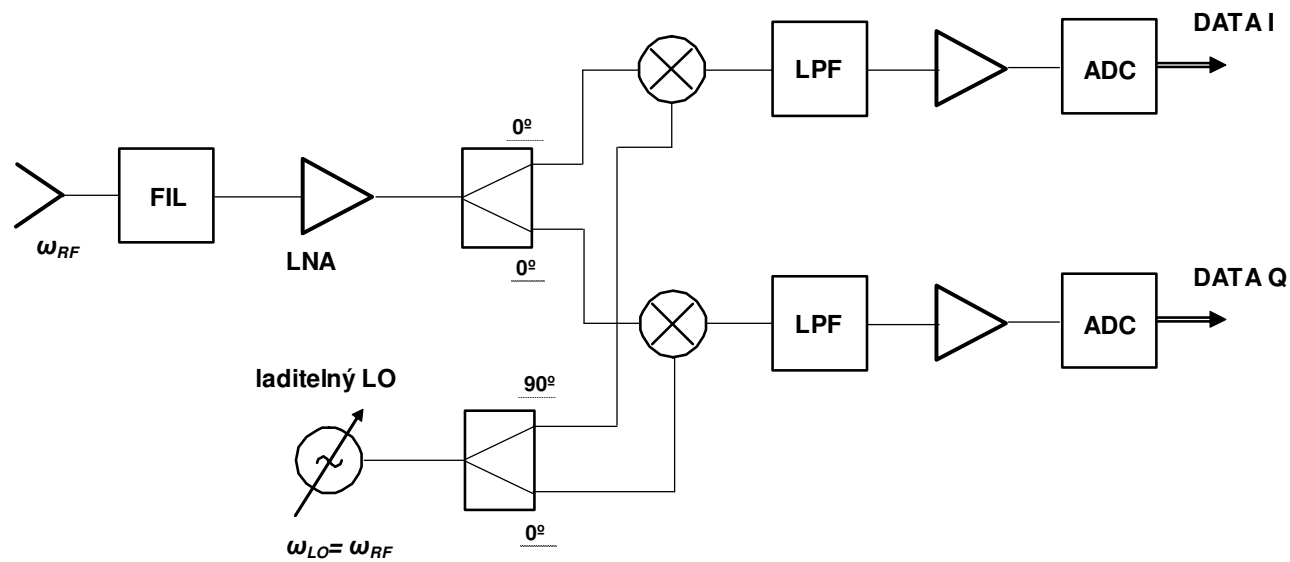


• Zrcadlové pásmo:

- Střední frekvence 500MHz
- **Relativně jednoduchá PP (945 - 1055MHz) nebo HP (>945MHz) zabezpečí dokonalé potlačení zrcadlového příjmu**

RX s přímou konverzí

- Moderní široce používaná struktura
- $\omega_{LO} = \omega_0 = \omega_{RF}$
- Přímá konverze do BB:
 - Od 0 do $B_m/2 = B_{IF}/2$
 - ALE musí se také řešit zrcadlový příjem
- Zrcadlový příjem:
 - Hlavní a zrcadlové signály leží ve stejném frekvenčním pásmu
 - Oddělení je možné provést při IQ zpracování
 - **V IQ rovině rotují signály opačnými směry**



- Projevují se jako kladné a záporné frekvence

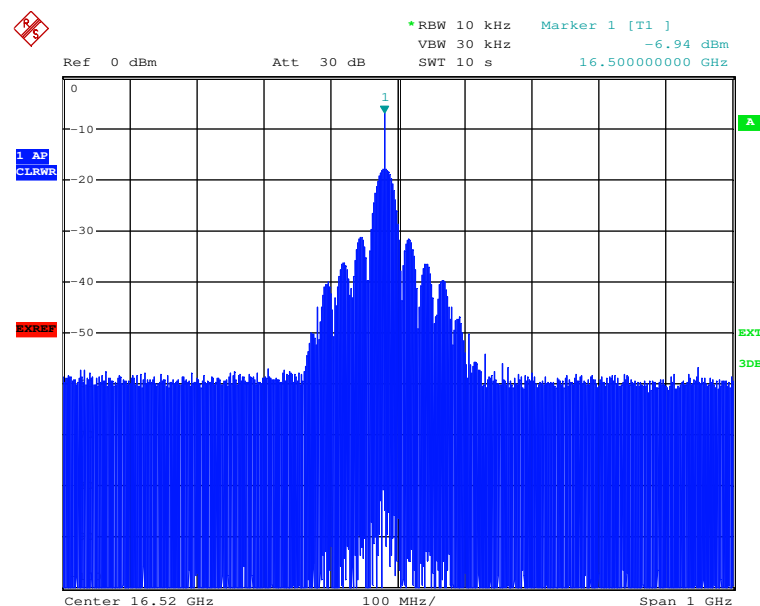
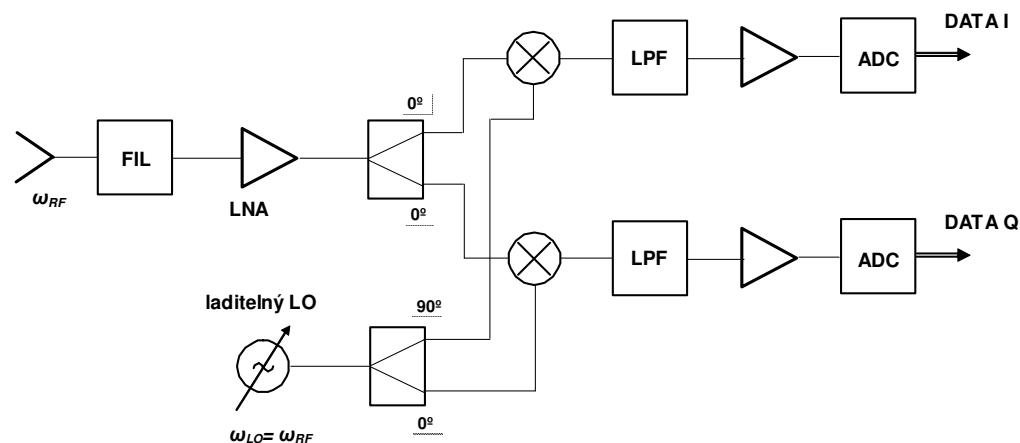
Přímá konverze - vlastnosti

• Výhody:

- Širokopásmový příjem → malá HW omezení
- Relativně jednoduché, malé rozměry, nízký DC příkon, cena, ...
- ADC pracují na nízkých frekvencích → výhodné parametry, cena
- Demodulace je prováděna v digitální doméně → odpovídá koncepci SDR, lze jednoduše modifikovat
- Lze měnit i $B_m = B_{IF}$
- Moderní široce používaná struktura

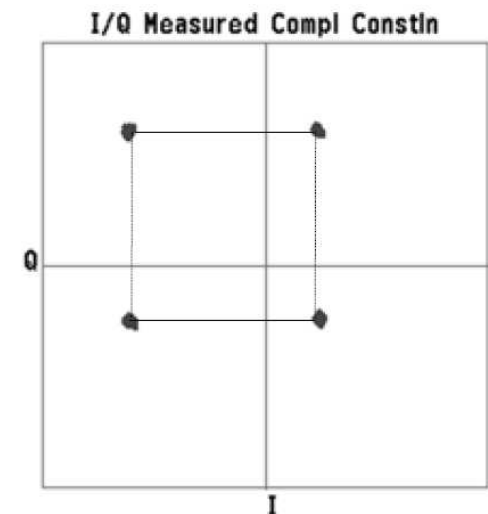
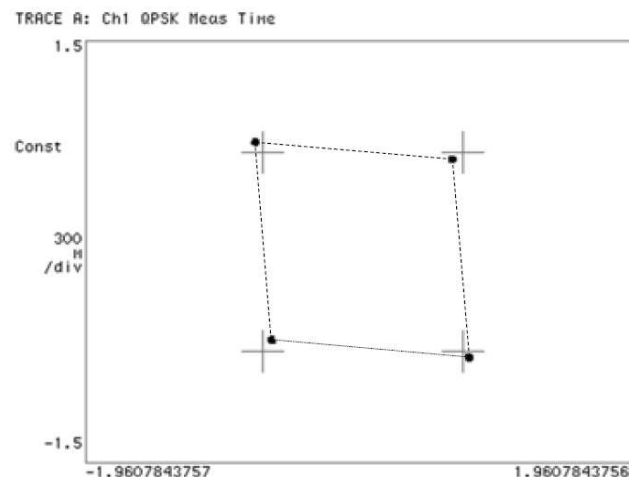
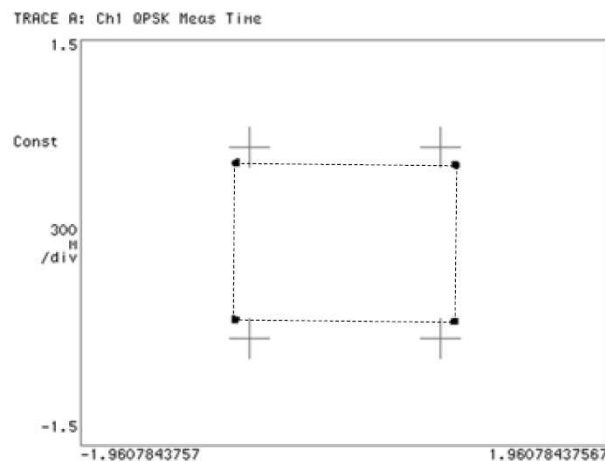
• Nevýhody:

- LO může pronikat do antény, nelze filtrovat
- IQ chyby mohou ovlivňovat potlačení zrcadlového příjmu a BER



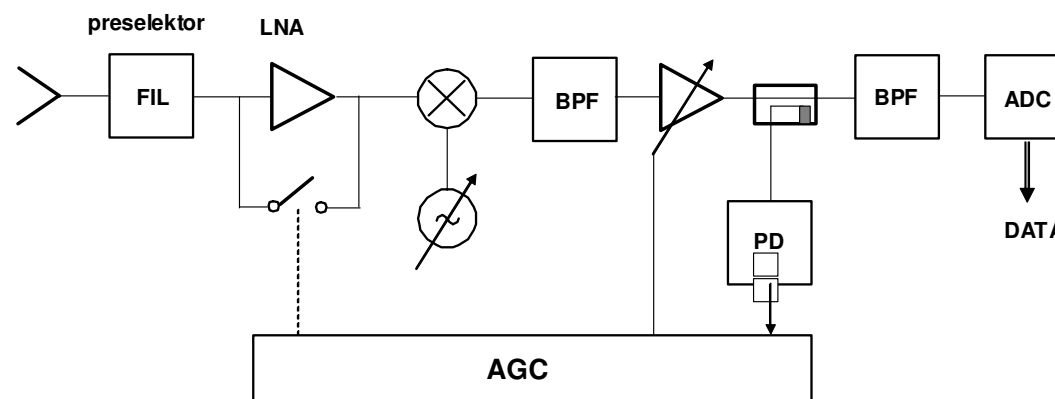
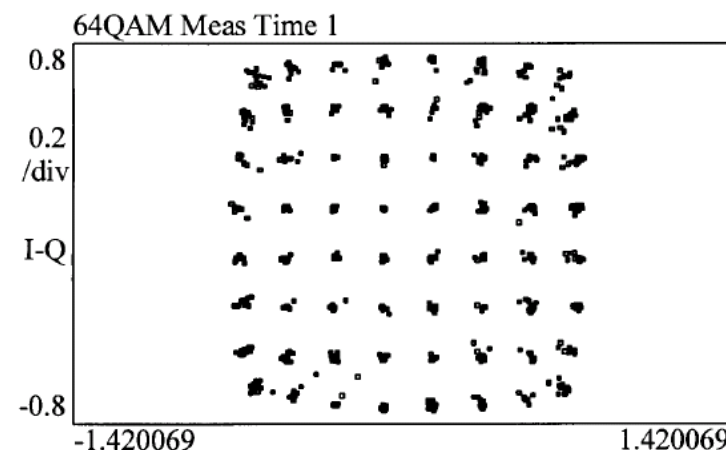
IQ chyby

- Možné IQ chyby:
 - "Amplitude imbalance"**
 - "Phase imbalance"**
 - "DC offset"**
- Možná řešení:
 - Kalibrace známým signálem a analogová / digitální korekce
 - ALE → kalibrační-korekční proces může významně zvýšit složitost obvodů, výslednou cenu, příkon
 - Přes výše uvedené problémy jsou RX s přímou konverzí velmi oblíbené**



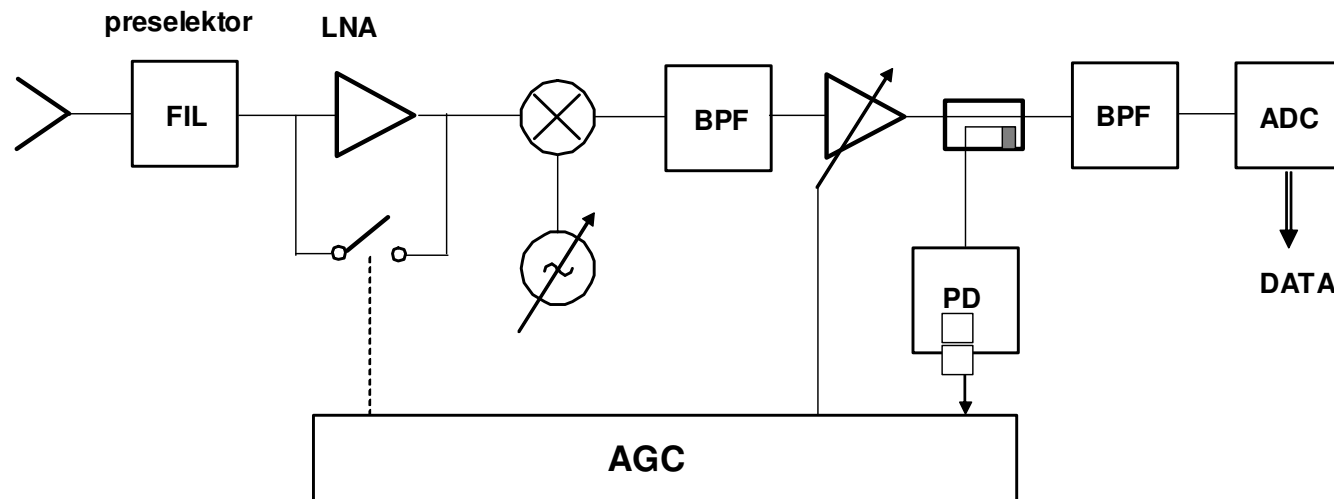
Obvody AGC

- V případě VF a mikrovlnných RX je nutné také řešit problémy s příliš silnými signály
- Je nutné je řešit se stejnou naléhavostí jako příliš slabé signály a šum:
 - Například v případech, kdy je MT velmi blízko BS
 - Příliš silné signály mohou způsobit:
 - Saturaci zesilovačů v RX
 - Generaci IM produktů
 - Přetečení ADC
- Řešení = obvody "automatic gain-control" (AGC)



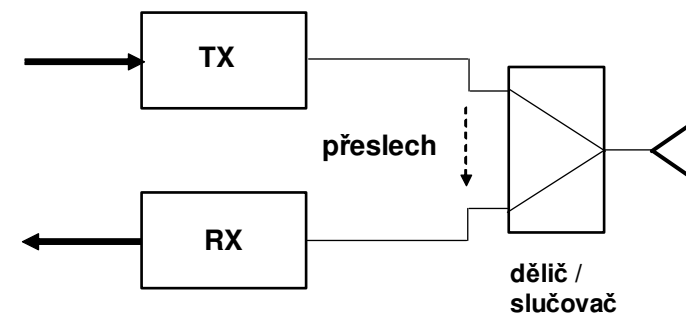
Obvody AGC

- Podrobnější popis funkce:
 - AGC obsahují vazbu, obvod měřící VF výkon (power detector = PD), a zesilovače s proměnným ziskem ("variable-gain amplifiers" = VGAs)
 - VGAs se skládají z zesilovačů s konstantním ziskem a analogově nebo digitálně řízených atenuátorů
 - **Smyčka AGC řídí zisk VGA podle okamžitého výkonu přijímaného signálu**
 - Lze řídit zisk RF, IF nebo BB zesilovačů, a to v rozsahu až několika 10^1 dB
 - **V případě velmi silných vstupních signálů lze vypnout LNA**
 - Obvody AGC pracují s určitou časovou konstantou, která musí odpovídat předpokládaným časovým změnám přijímaných signálů (podrobnosti později v části "Šíření")



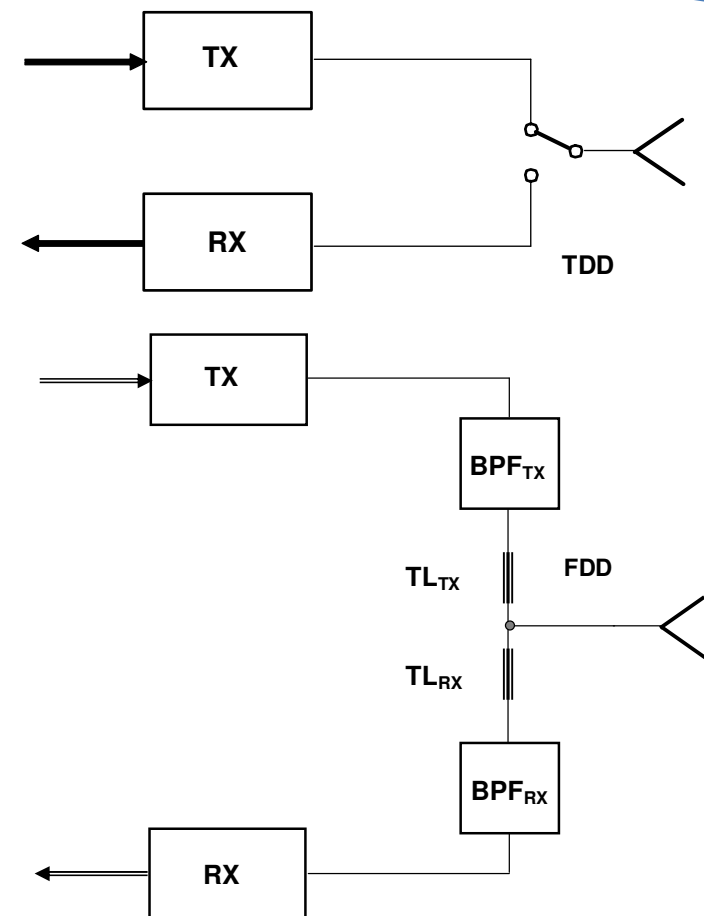
Transceivery

- V zařízeních pro přenosy poloduplex a plný duplex je nutné sloučit TX a RX do 1 antény
- **Slučovače = "duplexery"**
- Požadavky:
 - Vysoké oddělení TX a RX
 - Odpovídající výkonové zatížení
 - Co nejnižší IL
- Použití standardního slučovače:
 - Vykazuje útlum $\sim 4\text{dB}$, zvyšuje F a snižuje P_{out}
 - Oddělení TX a RX jen $\sim 20\text{dB}$
 - Nemůže zvládnout vyšší P_{out}
 - Je nevhodné
- Možná řešení:
 - **TDD = "time division duplexing"**
 - **FDD = "frequency division duplexing"**



Duplexery

- TDD:
 - **Použití VF přepínačů (FET, PIN)**
 - Jednoduché a efektivní řešení
 - ALE omezená přenosová rychlost
- FDD:
 - **Použití duplexerů = slučovacích filtrů**
 - TX a RX musí pracovat na dostatečně vzdálených frekvencích → **příklad UMTS:**
 - Uplink 1920 - 1980 MHz
 - Downlink 2110 - 2180MHz
 - Lze dosáhnout velmi nízká IL
 - RX a TX pracují 100% času = plný duplex
- Duplexery:
 - Např. kombinace DP a HP
 - Nebo 2 PP s rozdílnými propustnými pásmy na ω_{TX} a ω_{RX}



- PP na ω_{TX} musí mít ∞ impedanci na ω_{RX} a obráceně
- Lze transformovat pomocí TL
- Pro vyšší výkony (v BS) se používají koaxiální dutiny (velmi drahé)
- V MTs se používají duplexery SAW

Shrnutí - Systémy 1

- Zařízení pro bezdrátové radiové přenosy se skládají z vysílačů, přijímačů a antén.
- Směrnost přenosů může být typu simplex, polo-duplex nebo plný duplex.
- Obecné rozdělení podle topologie je PTP, PTM, "broadcast" a "cellular".
- Vícenásobný přístup více uživatel může být zajištěn technikami TDMA, FDMA nebo CDMA.
- Frekvenčně velmi stabilní nosné jsou generovány obvody PLL nebo DDS.
- Radiové vysílače používají přímou modulaci nosné nebo modulaci s frekvenční konverzí.
- Výkonové zesilovače PA zajišťují dostatečný výstupní výkon, linearitu a účinnost TX. Zesilovače s vysokým výkonem a linearitou mohou mít složitou strukturu.
- VF a mikrovlnné přijímače musí zajistit vysokou selektivitu příjmu velmi slabých i velmi silných signálů.

Shrnutí - Systémy 2

- Přímotesilující RX vykazují špatnou selektivitu i rozsah přeladění.
- RX typu superhet řeší většinu problémů příjmu i za velmi náročných podmínek. Na druhé straně přináší problémy se zrcadlovým příjmem.
- Moderní RX pro digitální komunikace používají často strukturu s přímou konverzí do BB.
- Obvody AGC přispívají k efektivnímu příjmu slabých i silných signálů.
- Transceivery používají různé duplexery pro sloučení TX a RX do jedné antény.
- Jako duplexery pro TDD se používají VF přepínače.
- Jako duplexery pro FDD se používají duplexery = speciální slučovací filtry.