

Technika bezdrátové komunikace

B2B17TBK

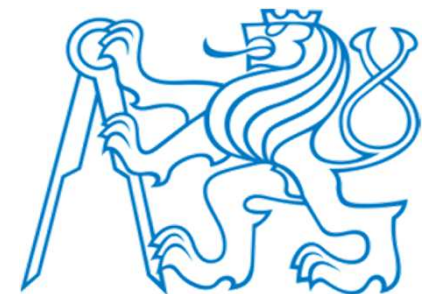
Část 5 - Signály

Přemysl Hudec

ČVUT-FEL katedra elektromagnetického pole

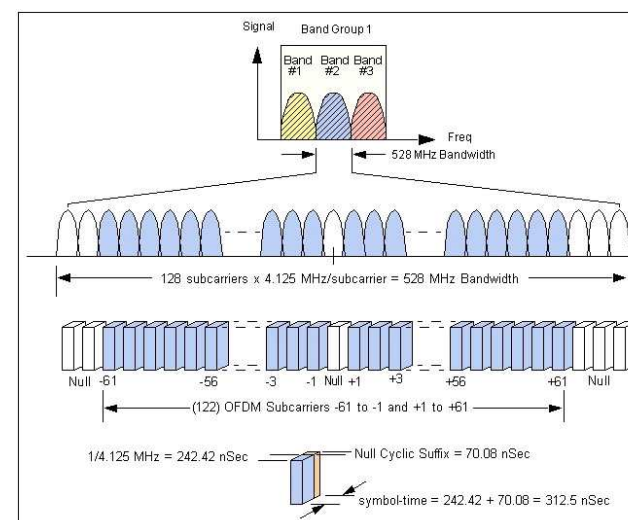
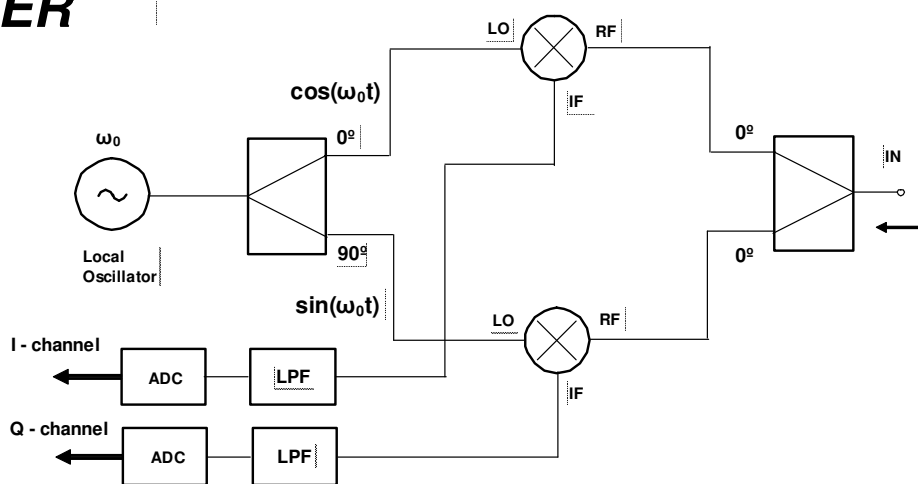
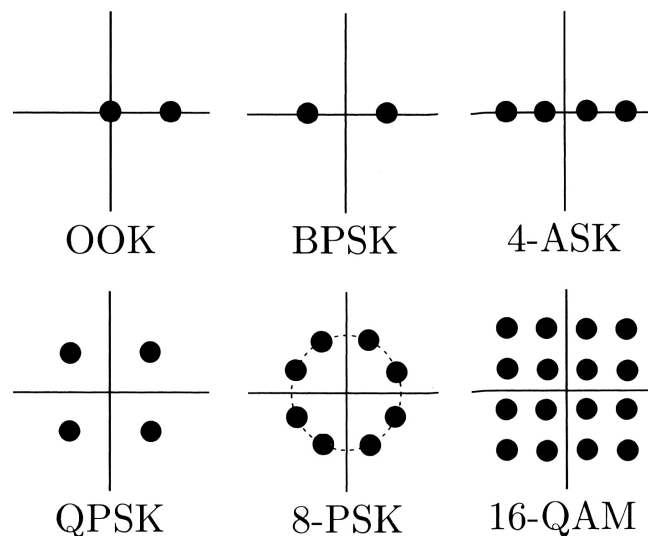
hudecp@fel.cvut.cz

verze 2025



Obsah

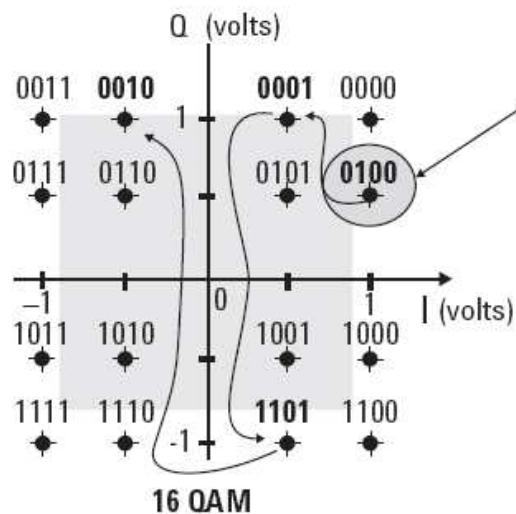
- VF a mikrovlnné signály
- Koncepce modulované nosné
- Analogové versus digitální modulace
- IQ modulace
- OFDM
- Parametr E_b/N_0
- **BER**



VF a mikrovlnné signály

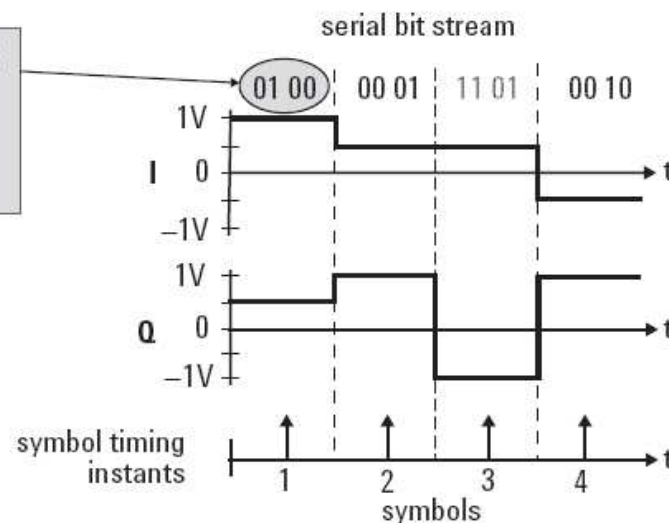
- V tomto kurzu jen VELMI VELMI stručný základní přehled
- Podrobnosti v B2B37ROZ, B2B37SAS, B2M37DKM
- Nyní téměř 100% komunikací jsou digitální komunikace
- **Informace jsou přenášeny ve formě symbolů, které jsou vybírány z omezené množiny symbolů**
- Na obrázku je jako příklad 16 symbolů, každý symbol přenáší 4 bity

Constellation or state diagram



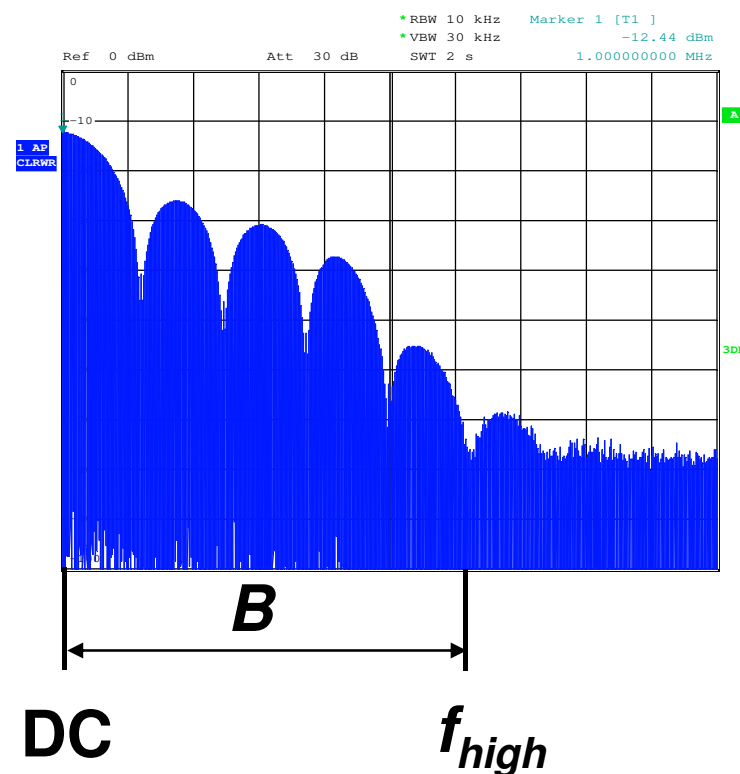
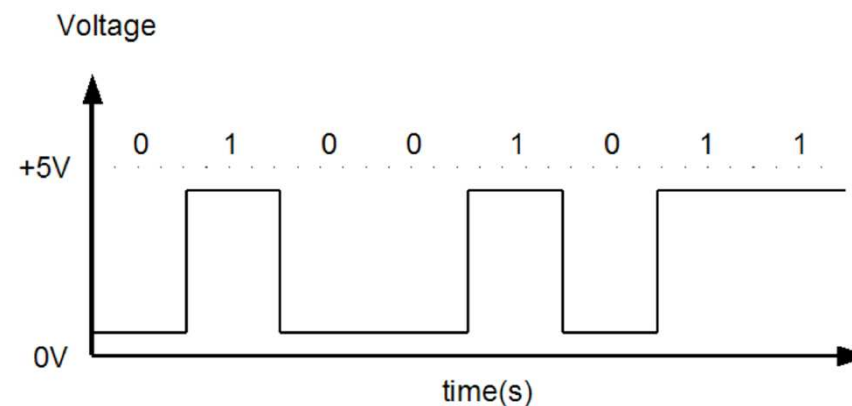
state: 0100
symbol: 1
 $I = 1\text{ V}$
 $Q = 0.5\text{ V}$

Symbol mapping to IQ voltages



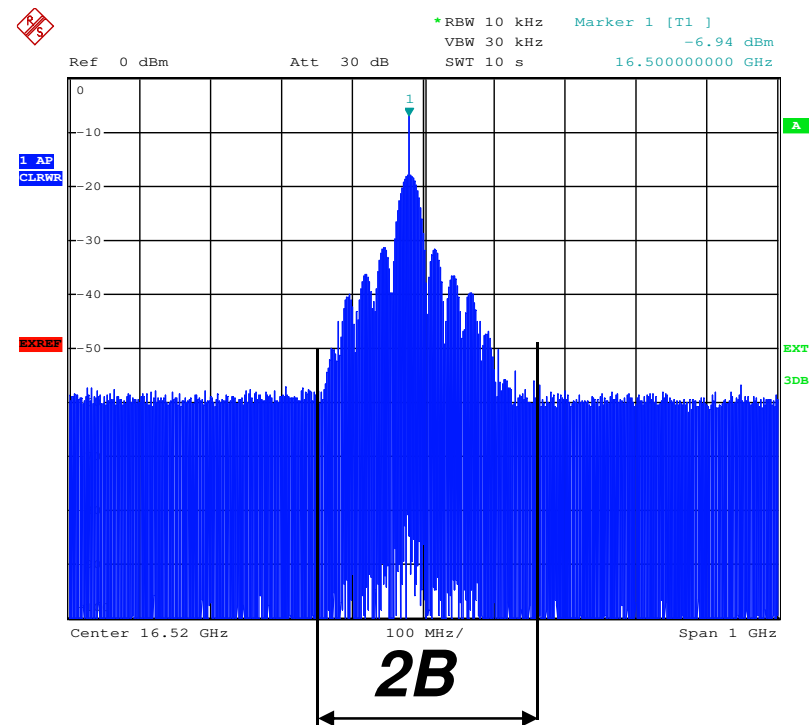
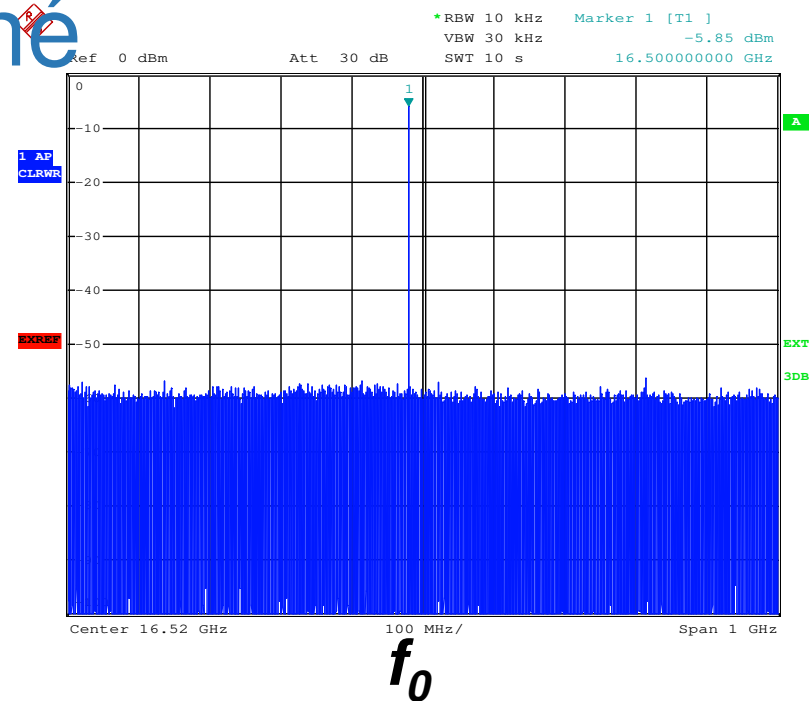
Digitální signál v základním pásmu

- Digitální signály v základním frekvenčním pásmu ("base-band", BB) obsahují frekvence od DC do f_{high}
- Je možné je přímo bezdrátově přenášet? **URČITĚ NE:**
 - Vyžadovaly by nesmyslně velké antény
 - Byly by zatíženy neřešitelnými interferencemi
 - Přímé přenosy jsou možné jen po metalických vedeních (ETHERNET, ...)
- Proto 100% moderních radiových komunikací používá digitální modulaci VF nebo mikrovlnné nosné ("carrier") f_0



Koncepce modulované nosné

- Sinusová nosná f_0 je modulována digitálním signálem:
 - Nosná f_0 = sinusový signál, 1 spektrální čára
 - Digitální modulační signál → **B** široké spektrum v BB
 - **Výsledek modulace → $2B$ široké spektrum kolem f_0**
- Výhody:
 - f_0 lze zvolit z velmi širokého pásma frekvencí
 - Běžně od cca 10^2 MHz do 10^2 GHz
 - Pro vyšší f_0 , je možné používat menší antény (~1,5cm na 10GHz)
 - Na vyšších f_0 , jsou k dispozici větší šířky pásma tedy vyšší datové rychlosti
 - Rozložením (koordinací) služeb na různé frekvence lze omezit interference



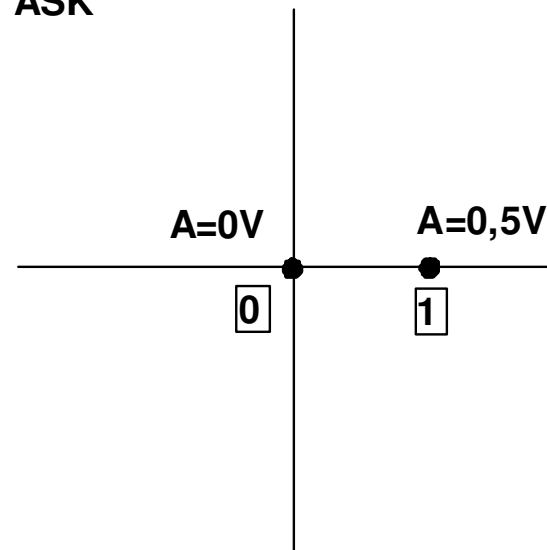
Možnosti modulace

- Možnosti modulace:
 - U základního f_0 sinusového signálu je možné modulovat:

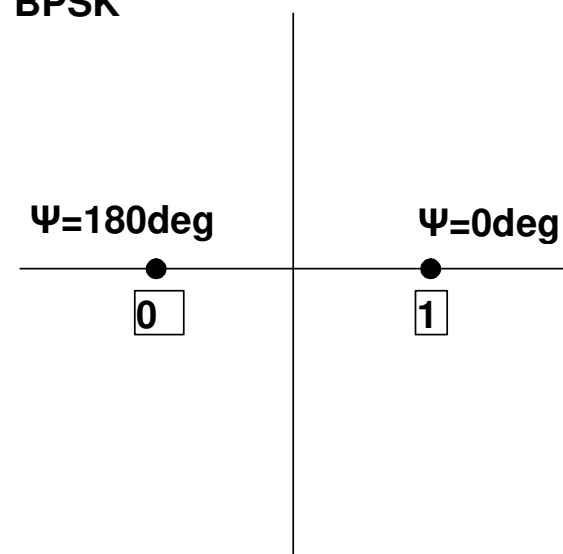
$$u(t) = A \cos(\omega_0 t + \Psi)$$

- Amplitudu** → amplitudová modulace AM
- Frekvenci** → frekvenční modulace FM
- Fázi** → fázová modulace PM
- Kombinaci amplituda + fáze** → X-QAM

ASK

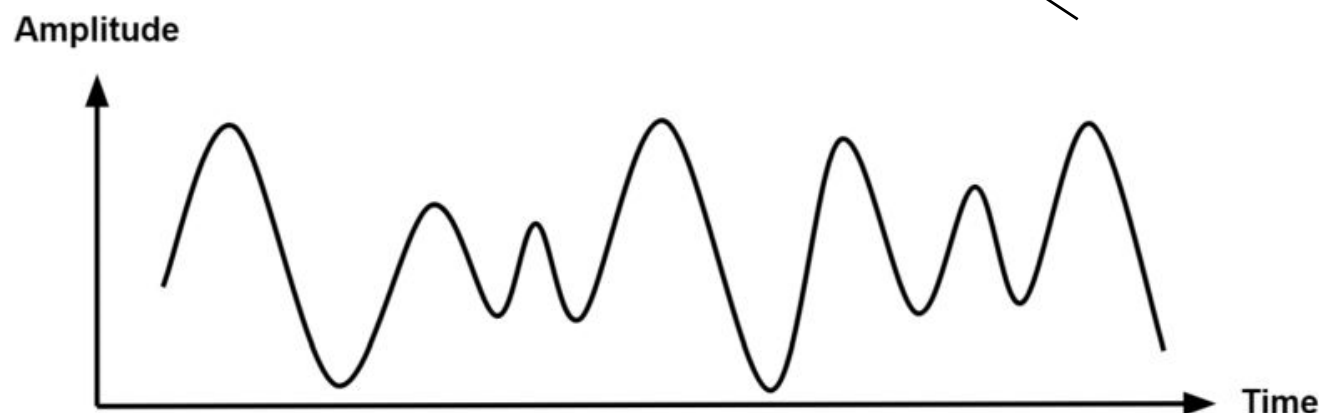
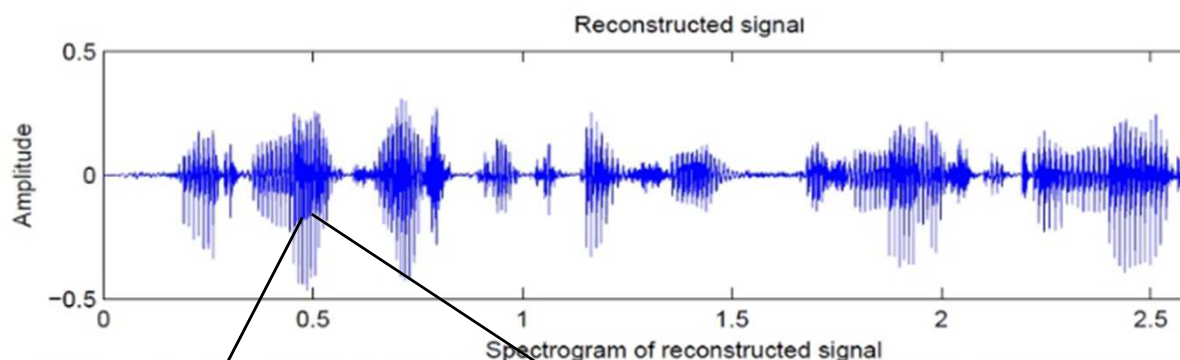


BPSK



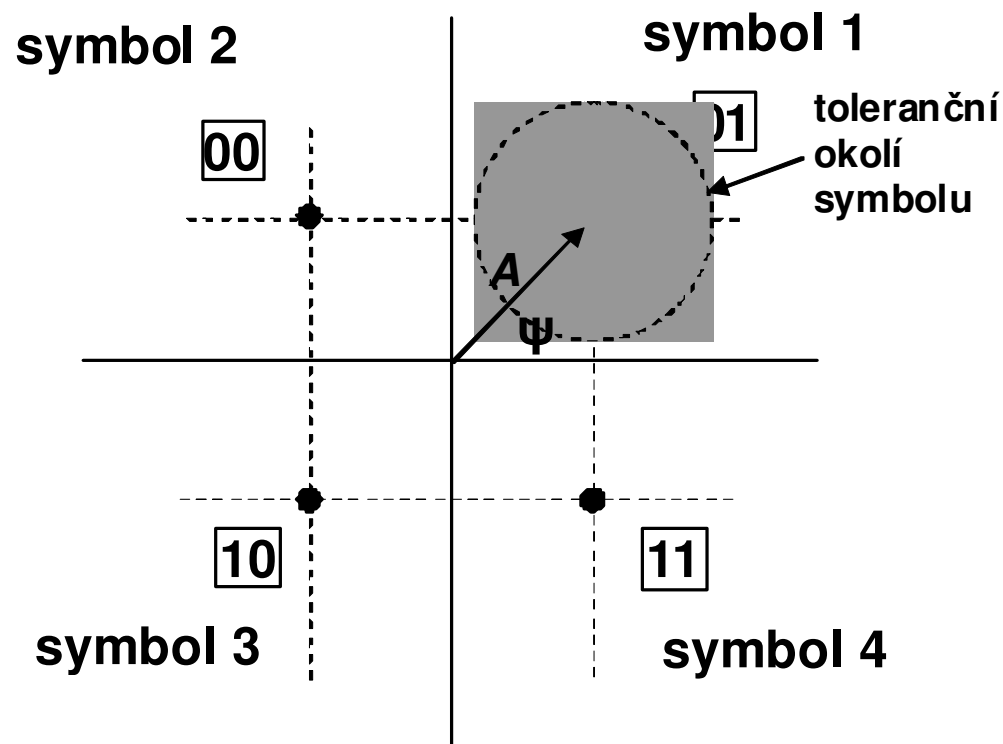
Analogové x digitální modulace

- Analogové modulace:
 - **Amplitudy, frekvence nebo fáze jsou měněny spojitě**
 - **Nekonečný počet předpokládaných stavů**
 - **Je nutné je sledovat ve spojitém čase (stále)**
 - Složitě vyhodnocování, jsou nutné **velmi vysoké hodnoty SNR**
 - Min. 45dB pro analogový TV signál



Analogové x digitální modulace

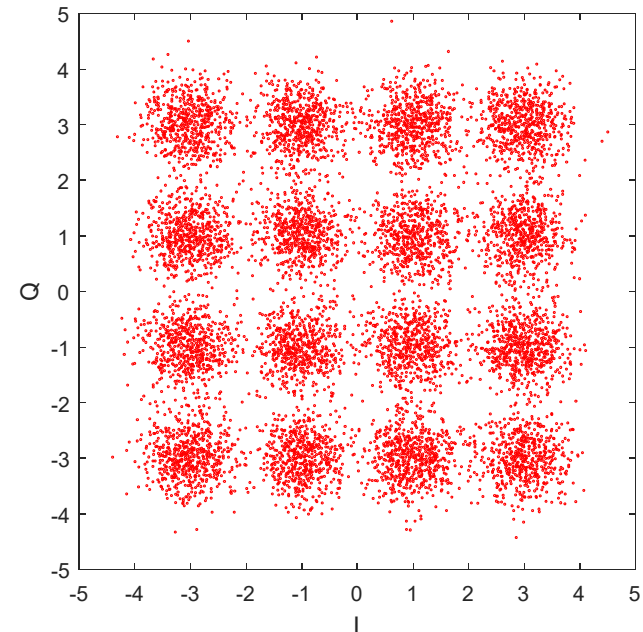
- Digitální modulace:
 - A , ω , Ψ nabývají jen omezený počet stavů
 - Informace se přenáší jako řada symbolů z omezené sady možných symbolů
 - Symboly jsou přenášeny v diskrétním čase, optimální čas pro vyhodnocování je předpokládátný → je dán přenosovou symbolovou rychlostí
- Příklad QPSK = 4-QAM:
 - Celkem 4 symboly
 - Liší se amplitudou a fází
 - Každý přenáší současně 2 bity
 - Kolem každého symbolu je toleranční okolí
 - Vyhodnocování je tedy velmi tolerantní na chyby, například šum
 - Dostatečné mohou být SNR~15dB



Digitální modulace

- **Výhody:**

- Pro správné vyhodnocování stačí podstatně nižší hodnoty SNR
- Lze vysílat nižší výkony
- Stačí podstatně menší šířky pásma $B \rightarrow$ jednodušší koordinace frekvencí
- Umožňuje sloučit zcela rozdílné služby do 1 toku \rightarrow např. hlas, video, data, ...
- Umožňuje nasadit mimořádně efektivní metody zpracování signálů \rightarrow komprese, kanálové kódování, šifrování, ... (nejsou možné v analogové formě)
- Téměř 100% moderních komunikací jsou proto digitální komunikace



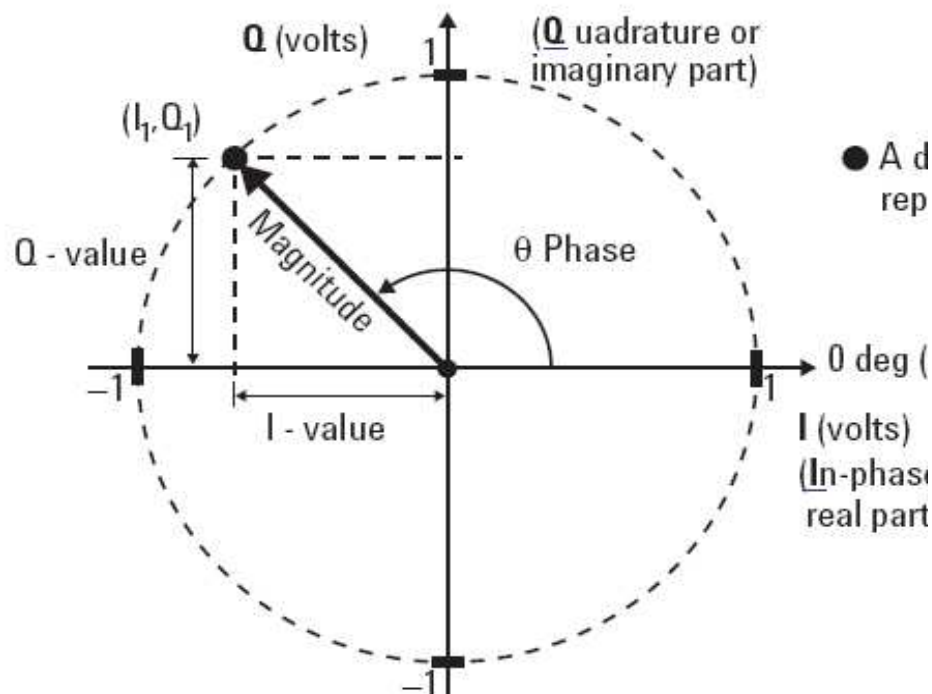
- **Nevýhody**

- **Skoro žádné**
- Při poklesu SNR pod určitou hranici velmi rychle (téměř skokem) klesá kvalita přenosu
- U analogových přenosů je pokles pozvolnější
- Proto se stále ještě používají například pro komunikaci mezi letadly a řízením letového provozu

IQ modulace

- Moderní a často používaná rodina digitálních modulací:
 - **Quadrature Amplitude Modulation = M-QAM**
 - **Současné změny amplitudy a fáze**
 - Může být popsáno v IQ diagramu = v rovině definované osami I („In-phase“) a Q („Quadrature“)
 - Může být popsáno v polární rovině amplituda-fáze
 - Každý bod v IQ rovině definuje 1 symbol (stav) s určitou amplitudou a fází
 - Každý z M symbolů současně přenáší N bitů

$$N = \log_2(M)$$

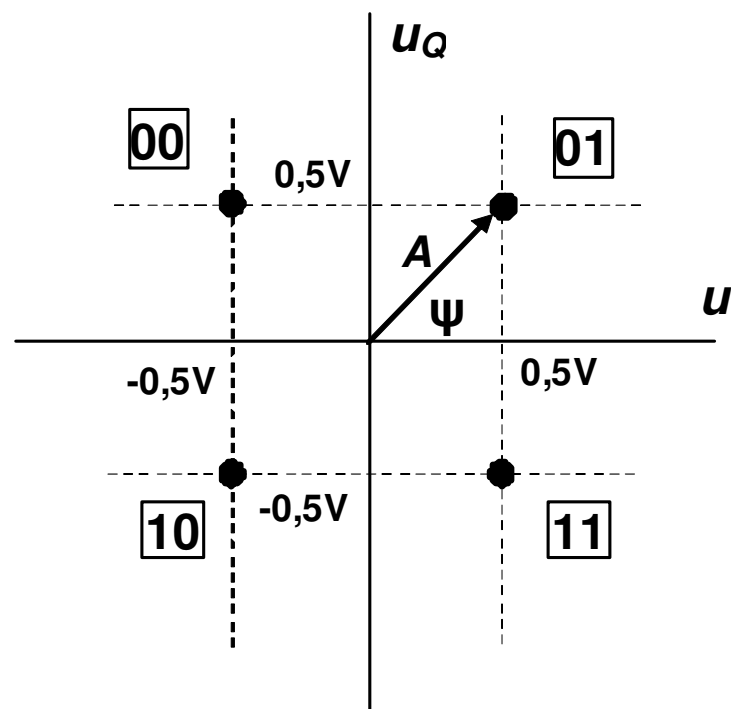


- **Často používané konfigurace:**

- | | |
|------------|-------------|
| ○ 16-QAM | 4 bity/sym |
| ○ 64-QAM | 6 bitů/sym |
| ○ 256-QAM | 8 bitů/sym |
| ○ | |
| ○ 1048-QAM | 10 bitů/sym |
| ○ 4096-QAM | 12 bitů/sym |

IQ modulace - popis

- **Symbyly jsou definovány v rovině** = možnosti:
 - Polární rovina se souřadnicemi amplituda – fáze $A - \psi$
 - **Dvě navzájem kolmé (kvadrurní) osy**
 - **Obvykle označené I („In-phase“) a Q („Quadrature“)**
 - Každý symbol je určen složkovými napětími u_I a u_Q
 - **Používá se i popis v rovině komplexních čísel, kde je rovina definována $\text{Re}+j\text{Im}$**
 - Ten se ve složitějších výpočtech používá nejčastěji
 - Používá se pojem „komplexní obálka“ = „complex envelope“



$$v_I(t) = A(t)\cos(\Phi(t))$$

$$v_Q(t) = A(t)\sin(\Phi(t))$$

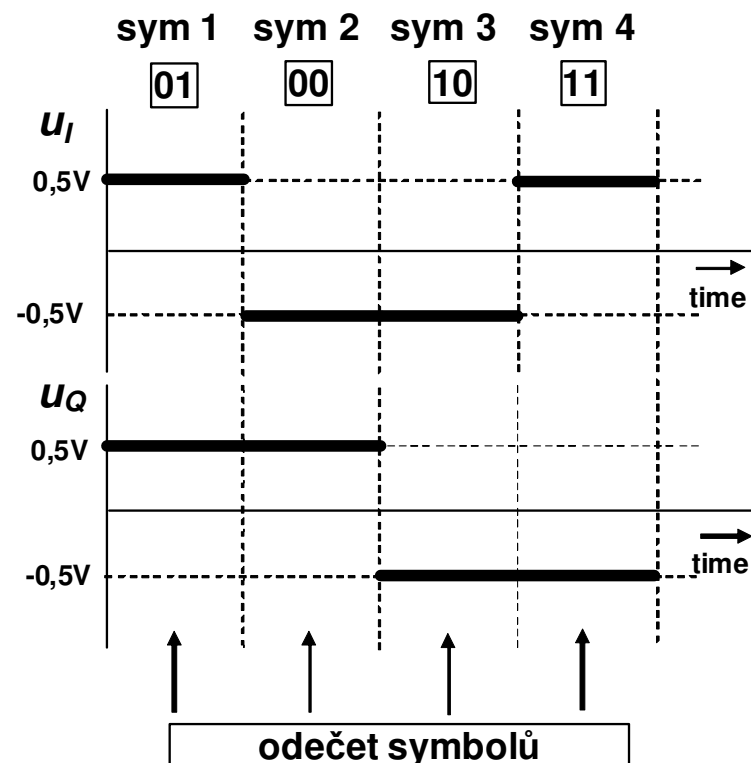
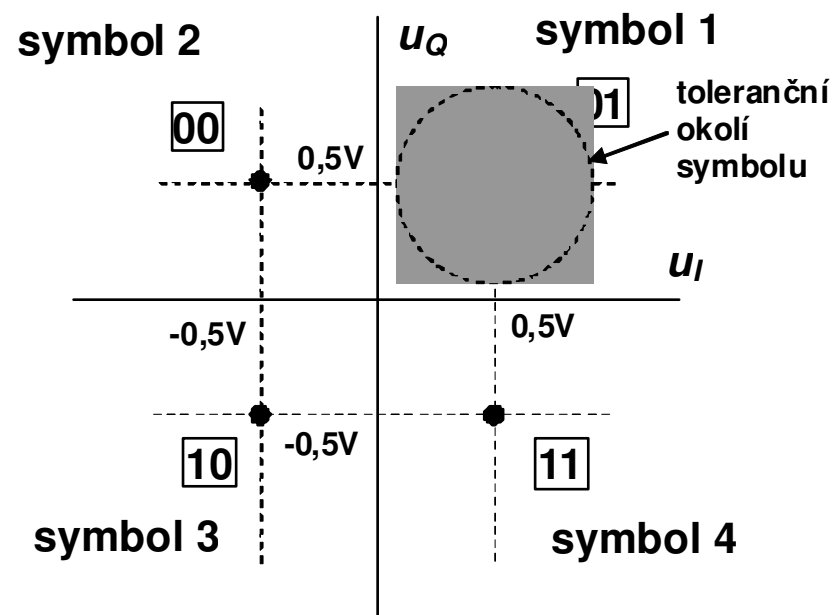
$$\hat{s}_{TX}(t) = A(t)e^{j\omega_0 t}e^{j\Phi(t)}$$

$$\tilde{s}_{TX}(t) = A(t)e^{j\Phi(t)}$$

$$A(t)e^{j\Phi(t)} = A(t)\cos(\Phi(t)) + jA(t)\sin(\Phi(t)) = v_I(t) + jv_Q(t)$$

Příklad 4-QAM

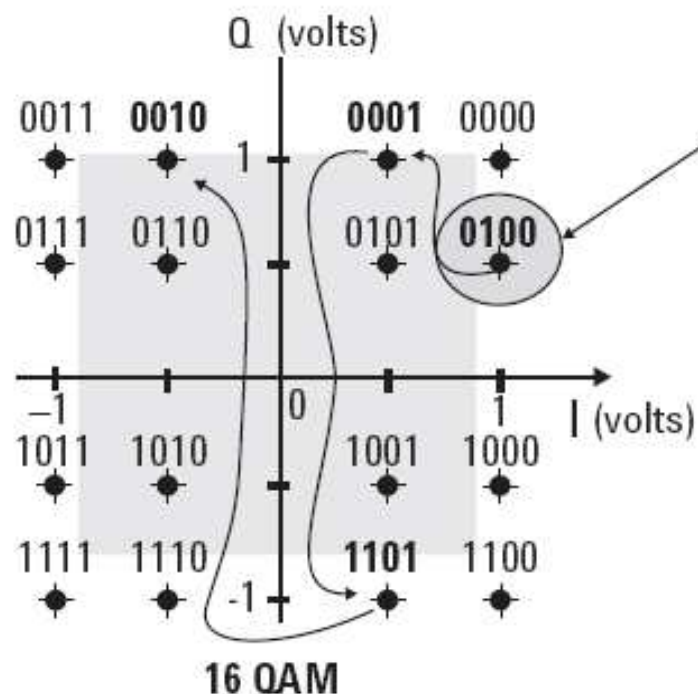
- Jiné označení je QPSK
- Celkem 4 symboly – stejné amplitudy, liší se fází
- Složková napětí (příklad)
 - $u_I = \pm 0,5V$
 - $u_Q = \pm 0,5V$
- Symbol 1 = přenáší 01
 - $u_I = 0,5V$ $u_Q = 0,5V$
- Symbol 2 = přenáší 00
 - $u_I = -0,5V$ $u_Q = 0,5V$
- Symbol 3 = přenáší 10
 - $u_I = -0,5V$ $u_Q = -0,5V$
- Symbol 4 = přenáší 11
 - $u_I = 0,5V$ $u_Q = -0,5V$
- Symboly se odečítají na středu dob symbolů



Příklad 16-QAM

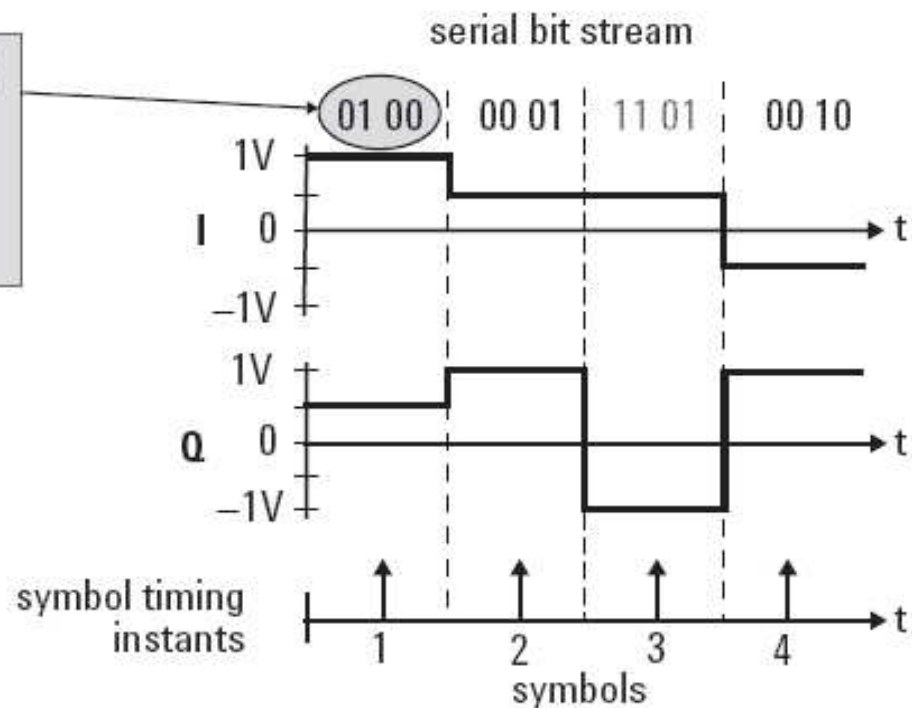
- Celkem 16 symbolů
- Každý nese informaci o 4 bitech
- Složková napětí u_I a u_Q mají dvě úrovně $\pm 0,5V$ a $\pm 1V$
- Při datovém přenosu se u_I a u_Q mění v čase

Constellation or state diagram



state: 0100
symbol: 1
 $I = 1V$
 $Q = 0.5V$

Symbol mapping to IQ voltages



Matematický popis IQ modulace

- Vysílaný VF signál:

$$s_{TX}(t) = A(t)\cos(\omega_0 t + \Psi(t))$$

- Vzorec

$$A\cos(\alpha + \beta) = A\cos(\alpha)\cos(\beta) + A\sin(\alpha)\sin(\beta)$$

- Po úpravě

$$s_{TX}(t) = A(t)\cos(\omega_0 t)\cos(\Psi(t)) + A(t)\sin(\omega_0 t)\sin(\Psi(t))$$

- Při použití složkových napětí

$$v_I(t) = A(t)\cos(\Psi(t))$$

$$v_Q(t) = A(t)\sin(\Psi(t))$$

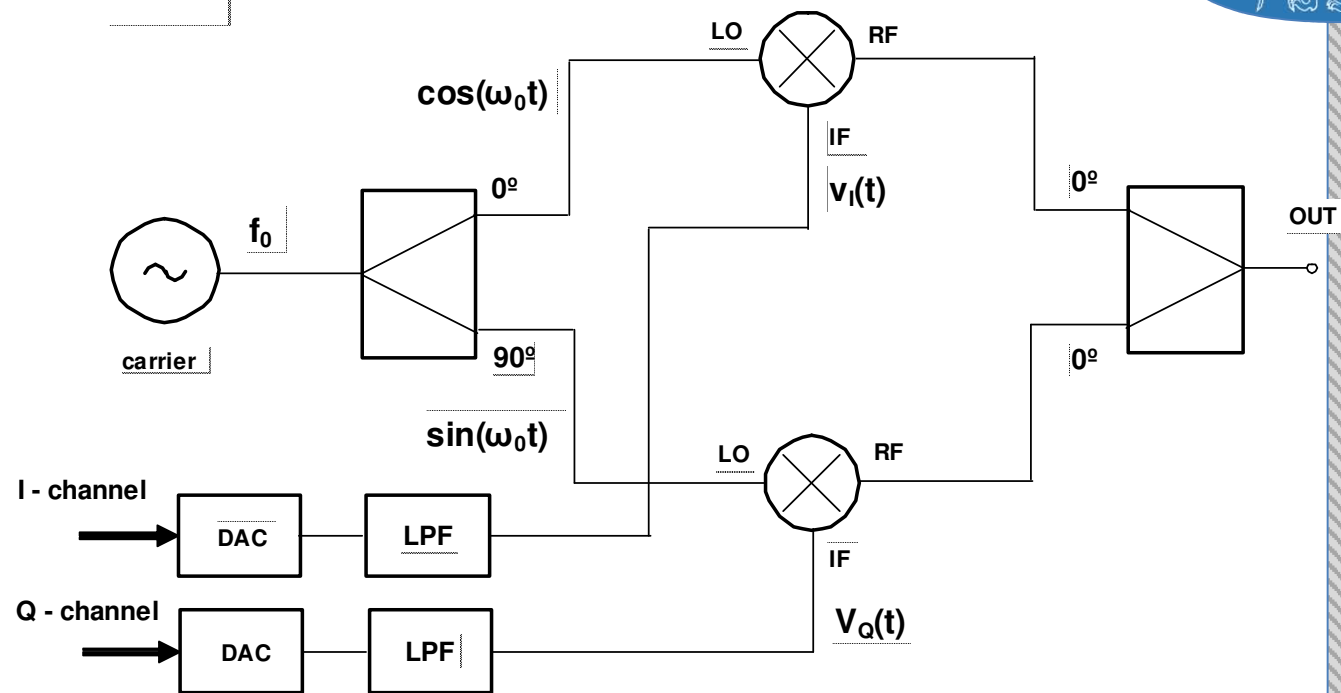
- Je vysílaný signál

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

- Generuje se v IQ modulátorech
- To jsou základní prvky většiny digitálních TX
- Obdobně fungují IQ demodulátory v RX

IQ modulátor

- Vytvoření signálu M-QAM:
 - Nosná ω_0 je pomocí $0^\circ/90^\circ$ děliče rozdělena do LO vstupů 2 identických směšovačů
 - Na IF vstupy jsou připojeny signály $v_I(t)$ a $v_Q(t)$ z výstupů 2 identických DAC
 - Směšovače pracují jako násobičky
 - **Horní směšovač generuje:**
 - **Dolní směšovač generuje:**
 - Signály se sčítají slučovačem $0^\circ/0^\circ$
- Praktická realizace → často digitálně v DSP + DAC



$$v_I(t)\cos(\omega_0 t)$$

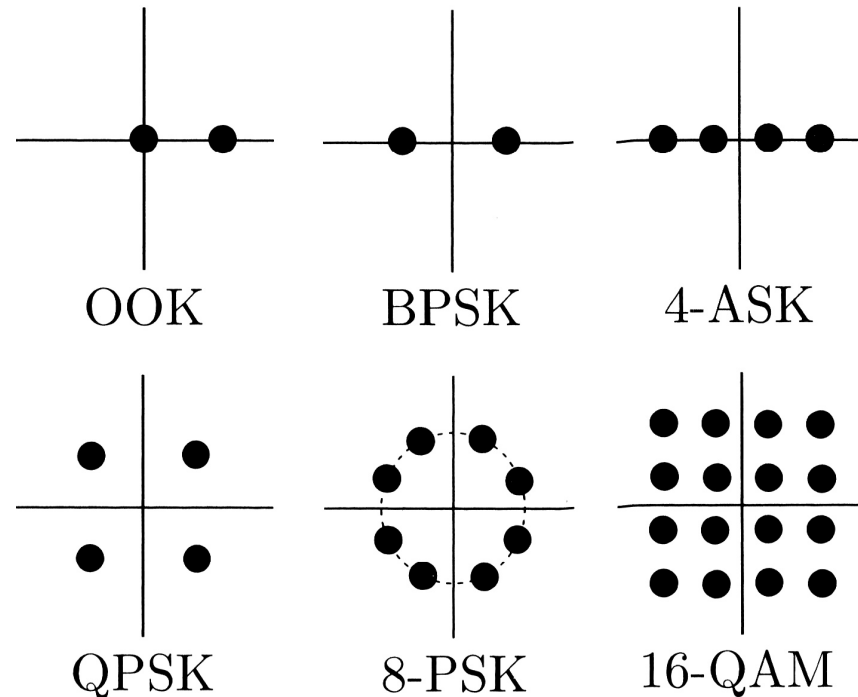
$$v_Q(t)\sin(\omega_0 t)$$

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

Základní digitální modulace

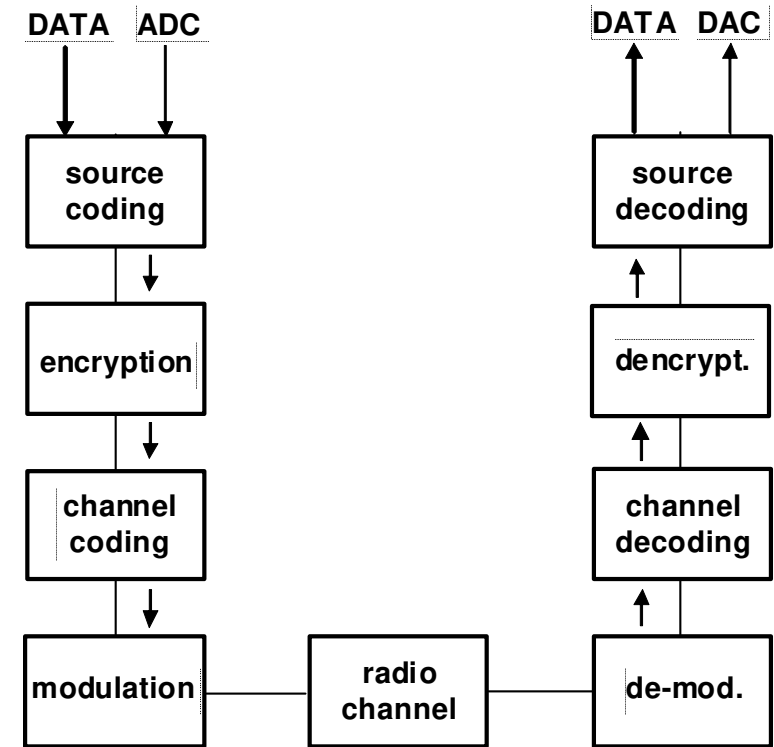
- Parametry:
 - A_k = diskretní amplituda
 - $\Phi_k = \Psi_k$ = diskretní fáze
 - M = počet symbolů
- Zkratky:
 - OOK** → "ON-OFF keying"
 - BPSK** → "bipolar phase-shift keying"
 - QPSK** → "quadrature phase-shift keying"
 - M-PSK** → "M-state PSK"
 - M-ASK** → "M-state amplitude shift keying"
 - M-QAM** → "M-state quadrature-amplitude modulation"
 - V praxi:
 - 32-QAM, ... , 2048-QAM

	A_k	Φ_k	M	bits/symbol
OOK	$A_c, 0$	0	2	1
BPSK	A_c	0, π	2	1
QPSK	A_c	0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$	4	2
M-PSK	A_c		M	$\log_2(M)$
M-ASK				
M-QAM				



Signal-processing

- Zpracování digitálních signálů:
 - **Zdrojové kódování ("source coding")** → úprava digitálních signálů pro modulaci - např. komprese (MPEG, ...)
 - **Šifrování ("encryption")** → potlačení neoprávněného příjmu dat pomocí přídatného kódování
 - **Kanálové kódování ("channel coding")** → zpracování dat přispívající k vyšší odolnosti proti problémům vznikajícím při přenosu - interference, šumy, úniky ("fading")
 - **Modulace** → kódování dat na nosnou
- Výsledkem je **analogový signál**, který reprezentuje data:
 - **V diskrétním čase**
 - **S omezenou "abecedou" = s omezenou sadou symbolů**



- **V RX → musí být provedeny opačné kroky:**
 - Demodulace
 - Kanálové dekódování
 - Dešifrování
 - Zdrojové dekódování

Kanálové kódování („Channel Coding“)

- Skupina metod používaných k omezení nežádoucích vlivů při přenosu (šum, úniky EM vln, IM produkty, ...) na chybovost přenosu dat BER:
 - K vlastním datům jsou přidávány další pomocné informace (bity)
 - To umožňuje detekovat chyby a někdy je i opravovat
 - **Přídavné = redundantní bity** nepřenášejí užitečné informace - zhoršují tedy spektrální účinnost datového přenosu
 - Ale zlepšují energetickou účinnost (lze vysílat nižší VF výkon)
 - V digitálních komunikacích jsou velmi široce používány
- Detekce chyb, například:
 - Kontrola parity
 - Kontrolní součet
 - **Obvykle, "mnohem-mnohem" složitější metody**
 - **Pokročilé kódování umožňuje chyby opravovat**
- Výsledek kanálového kódování = "coding gain"

Pro požadované BER umožňuje snížit nároky na E_b/N_0

Nebo efektivně zvýšit SNR

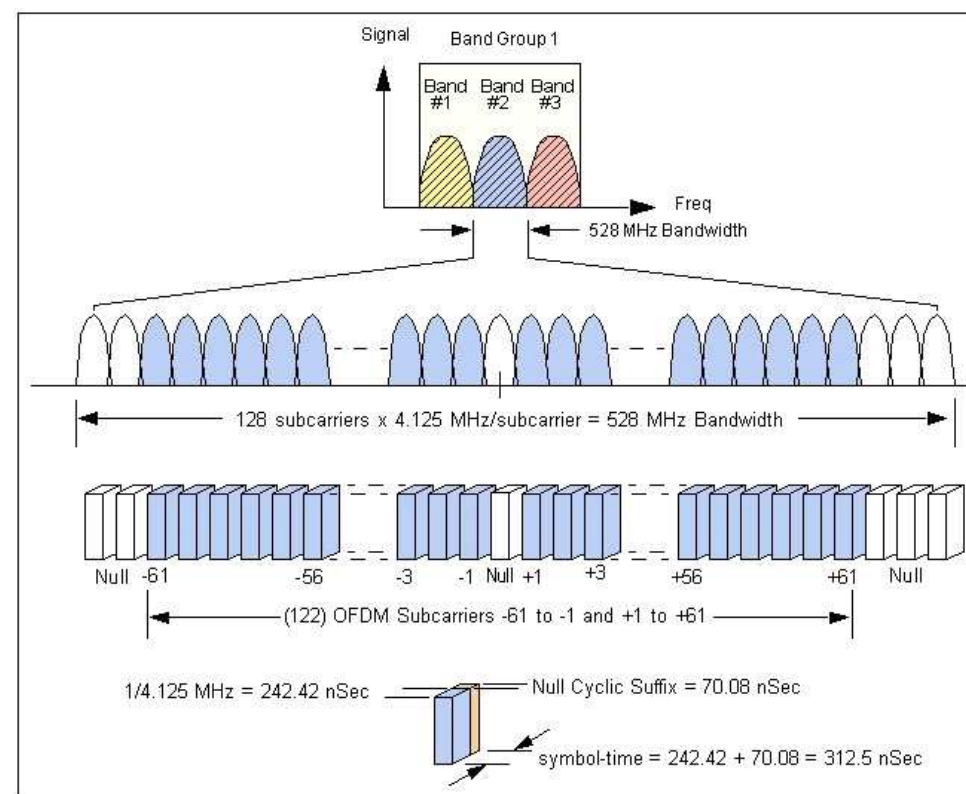
OFDM

- „Orthogonal Frequency Division Multiplex“

- Moderní široce používaný modulační concept
- Vhodný pro datové přenosy v přítomnosti silných úniků - typ. DVB-T, LTE, ...

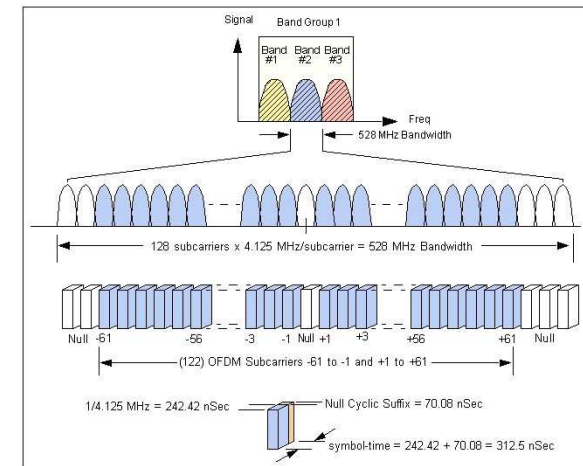
- Hlavní principy:

- Datový tok je rozdělen do N paralelních kanálů
- Každý kanál má přiřazenu trochu jinou frekvenci nosné
- 2 sousední nosné se liší o Δf
- Každý kanál je modulován některou ze standardních modulací
- Např. 64-QAM
- Při vzdálenosti subnosných $\Delta f = 1/T_s$ jsou signály zcela nekorelované (navzájem se neovlivňují)
- T_s je doba 1 symbolu



OFDM

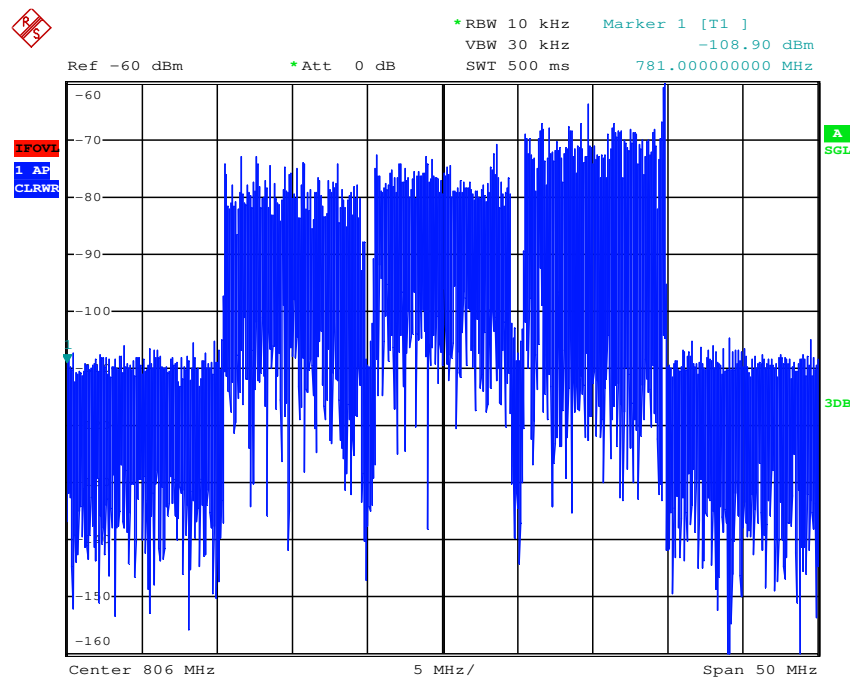
- Je ekvivalentní:
 - Používat 1 kanál s větší šířkou pásma $1/T$
 - Nebo N kanálů s šířkou pásma $1/NT$
- Výhody OFDM:
 - Vysoká odolnost vůči únikům = změny amplitudy přijatých VF signálů vznikajících jako důsledek odrazů EM vln při šíření a atmosférickými vlivy - podrobnost dále v kurzu.
 - Funguje jako "frekvenční diverzita" - signály jsou vysílány na více frekvencích a některé jsou vždy ovlivněny méně.
- Nevýhody OFDM:
 - Shluk frekvenčně blízkých signálů představuje v časové oblasti signál s velmi proměnnou amplitudou - **při špičkách může docházet k saturaci PA a generaci IM produktů.**
 - Zesilovače s vysokými hodnotami P_{-1dB} a $IP3 \rightarrow$ obecně rozměrnější, vyšší příkon, nižší účinnost, dražší.
 - Citlivost na Dopplerovy frekvenční posuvy.



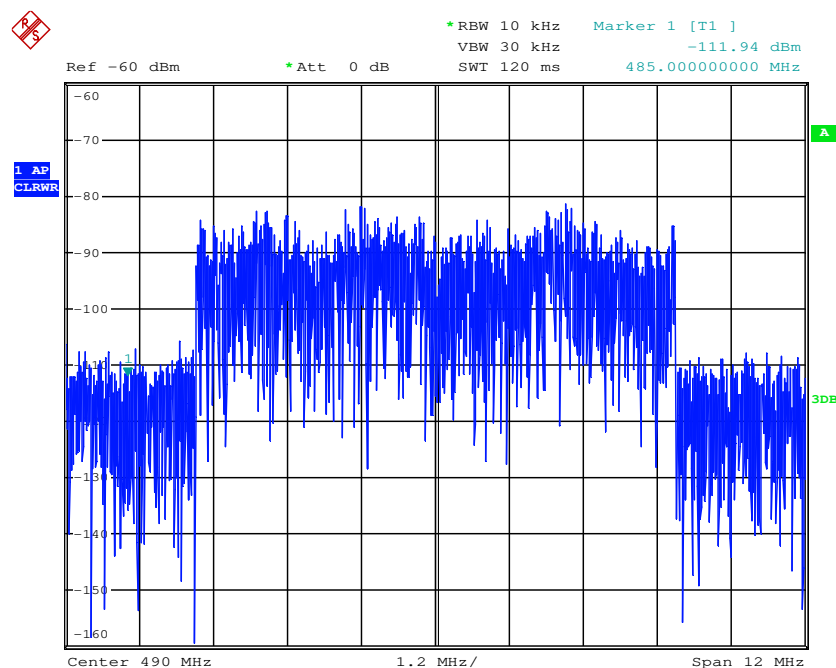
$$\Delta f_D = \frac{v_r f_0}{c}$$

OFDM - příklady

- LTE

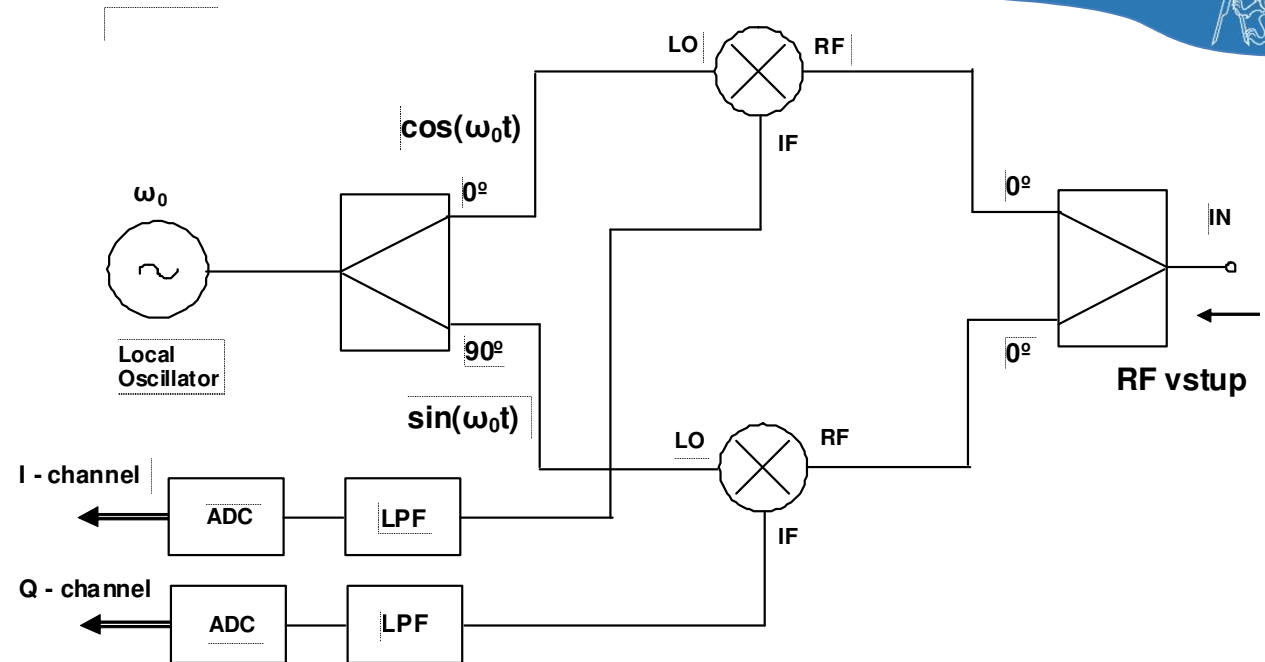


- DVB-T2



IQ demodulace

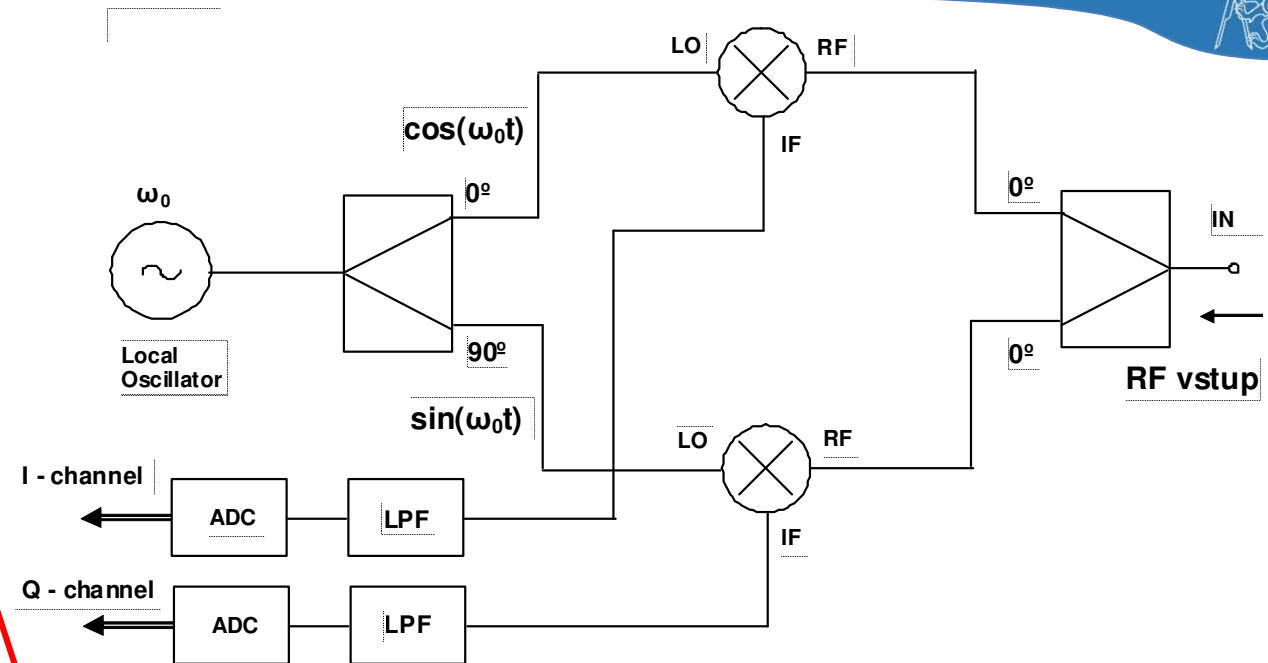
- Může být prováděna v IQ demodulátoru:
 - Pomocí děliče 0° je vstupní signál rozdělen do 2 identických větví se 2 identickými směšovači
 - Na LO branách jsou směšovače buzeny silným signálem ω_0 rozděleným děličem $0^\circ / 90^\circ$
 - **Oba směšovače pracují jako násobičky**
 - **Řešení pro větev I:**
 - Na výstupu filtru typu DP je signál $v_I(t)$



$$\begin{aligned} v_I^{IF}(t) &= [v_I(t)\cos(\omega_0 t) + v_Q(t)\sin(\omega_0 t)]\cos(\omega_0 t) = \\ &= v_I(t)\cos^2(\omega_0 t) + v_Q(t)\sin(\omega_0 t)\cos(\omega_0 t) = \\ &= \frac{1}{2}v_I(t)(1 + \cos(2\omega_0 t)) + \frac{1}{2}v_Q(t)(\sin(0) + \cos(2\omega_0 t)) = \\ &= \text{filtrace} = \frac{1}{2}v_I(t) \end{aligned}$$

IQ demodulace

- Řešení pro větev Q:
 - Na výstupu za filtrem je signál $v_Q(t)$
- Praktická demodulace:
 - HW demodulátor → ne vždy
 - Často → ADC + digitální IQ demodulace v DSP
 - Nižší amplitudové a fázové chyby ("amplitude and phase errors")
 - Lze také měnit modulaci, data-rate, ...,
 - a to velmi snadno jen změnou SW.



$$\begin{aligned} v_Q^{IF}(t) &= [v_I(t)\cos(\omega_0 t) + v_Q(t)\sin(\omega_0 t)]\sin(\omega_0 t) = \\ &= v_I(t)\cos(\omega_0 t)\sin(\omega_0 t) + v_Q(t)\sin^2(\omega_0 t) = \\ &= \frac{1}{2}v_I(t)(\sin(0) + \sin(2\omega_0 t)) + \frac{1}{2}v_Q(t)(1 - \cos(2\omega_0 t)) = \\ &= \text{filtrace} = \frac{1}{2}v_Q(t) \end{aligned}$$

Parametr E_b/N_0

- Energie na symbol

$$E_s = A_m^2 \int_0^T 1^2 dt = A_m^2 T$$

- Energie na bit:

$$E_b = \frac{E_s}{\log_2(M)}$$

- Výkon signálu

$$S = \frac{E_b}{T_b}$$

- Výkon šumu

$$P_n = kT_e B$$

- Spektrální výkonová hustota šumu:

- Uvažuje se konstantní v celém B

$$N_0 = \frac{P_n}{B}$$

- Odstup signál-šum:

$$SNR = \frac{S}{P_n} = \frac{\frac{E_b}{T_b}}{N_0 B} = \frac{1}{T_b B} \frac{E_b}{N_0}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = T_b B \cdot SNR$$

- $\frac{E_b}{N_0}$ Používá se v moderních komunikacích pro srovnání různých modulací

BER

- "Bit error-rate" = pravděpodobnost chyb:
 - Počet chybně přenesených bitů k celkovému počtu bitů
 - Jeden z nejdůležitějších parametrů každého bezdrátového propojení
 - Požadovaná max. hodnota *BER* udává **cílovou kvalitu dané služby**
 - K požadované max. *BER* lze vypočítat minimální nutnou hodnotu E_b/N_0 (docela složité výpočty)
 - Podrobnosti v B2B37ROZ, B2M37DKM
 - V tomto kurzu → jen grafické příklady
 - Závislosti *BER* na E_b/N_0 pro různé standardní modulace
 - Složitější modulace vyžadují vyšší hodnoty E_b/N_0

$$\frac{E_b}{N_0} = T_b B \cdot SNR$$

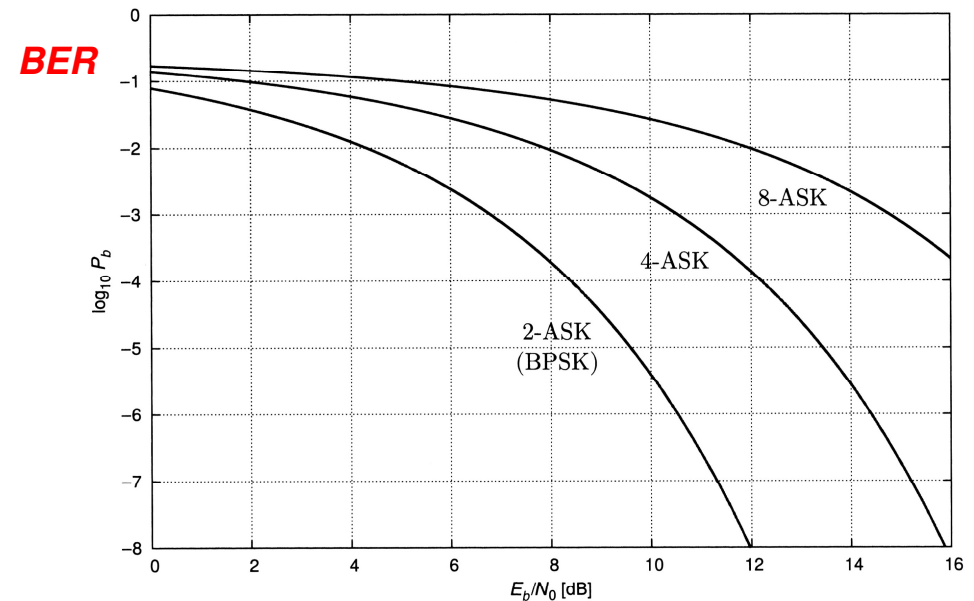


Figure 6.18. Probability of bit error as a function of E_b/N_0 for M -ASK.

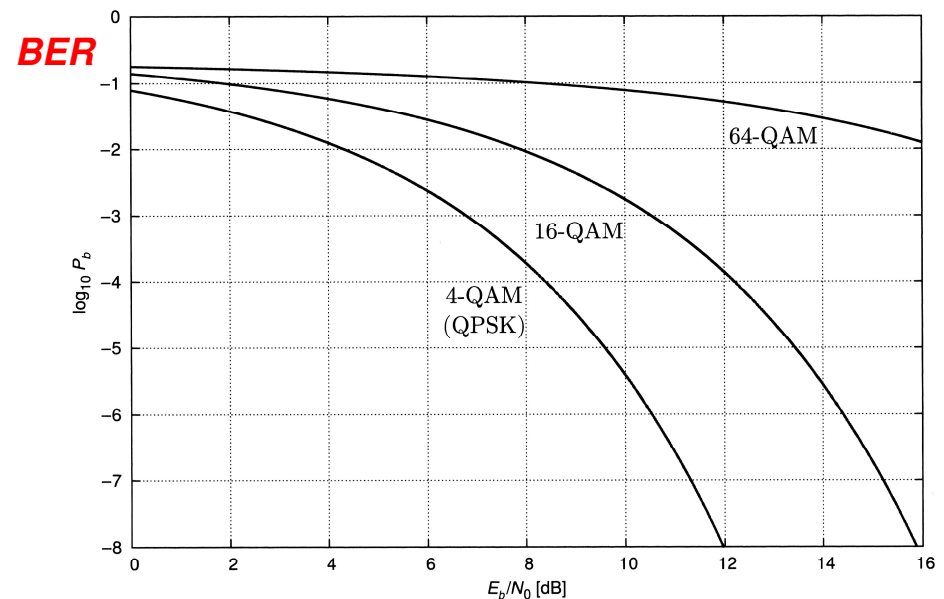


Figure 6.19. Probability of bit error as a function of E_b/N_0 for M -QAM.

Shrnutí: Signály

- Moderní radiové bezdrátové komunikace:
 - Používají skoro 100% digitální modulace,
 - **a to ve formě digitálně modulovaných nosných.**
- Hlavní kroky zpracování digitálních signálů:
 - Zdrojové kódování - dekódování
 - Šifrování - dešifrování
 - Kanálové kódování - dekódování
 - Modulace - demodulace
- Velmi často se používá IQ modulace - demodulace
- **Pro výpočty se používá E_b/N_0 místo SNR**
- OFDM je moderní modulační koncepce s významnými výhodami (i nevýhodami)
- **Požadovaná max. hodnota BER je jeden z nejvýznamnějších cílových parametrů každé radiové trasy**