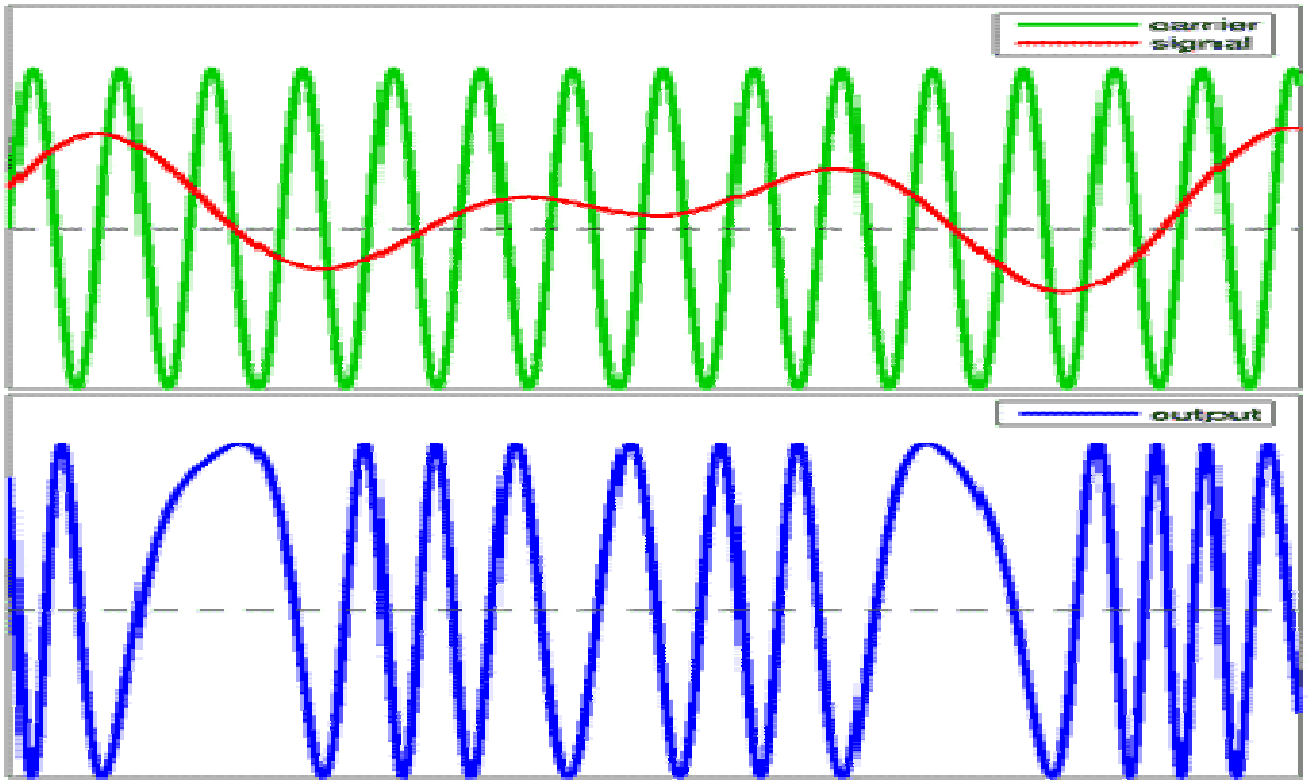
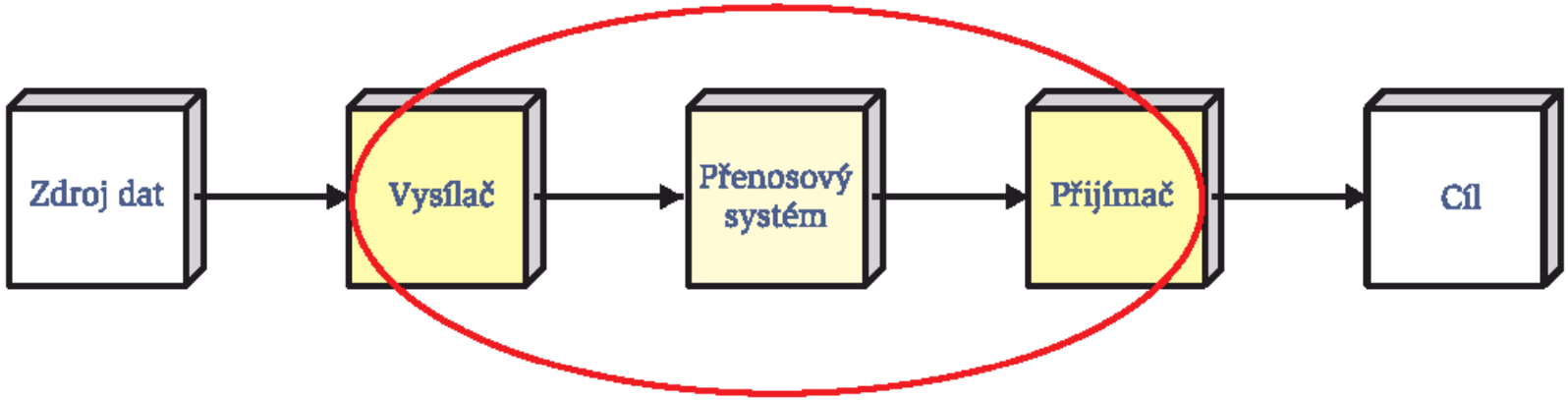


Přenos signálů sdělovacím prostředím

O čem přednáška je?

- Signál, analogový signál, digitální signál
- Data, analogová data, digitální data
- Reprezentace signálu ve frekvenční doméně
- Šířka pásma
- Analogové vysílání analogových a digitálních dat
- Digitální vysílání analogových a digitálních dat
- Kapacita přenosového kanálu, jak rychle lze přenášet data ?
- Nyquistova věta
- Shannonova věta

Základní pojmy



- Nosičem přenášených informací je signál
  - ✓ časová funkce elektromagnetických vlastností přenosového média
  - ✓ elektromagnetický signál
- Přenosová média
  - ✓ vodičového typu – twist (kroucený dvoudrát), koaxiál, optické vlákno
  - ✓ bezdrátového typu – atmosféra, voda, vakuum

Základní pojmy, 2

- Přímý spoj
  - ✓ Vysílač–přijímač, bez mezilehlých zařízení
  - ✓ s výjimkou zesilovačů/opakovačů pouze zesilujících/regenerujících signál
- 2-bodový spoj, *P2P*, *Point-to-Point*
  - ✓ spoj sdílí pouze 2 zařízení
- mnohobodový spoj, *Multi-Point*
  - ✓ spoj sdílí více než 2 zařízení
- Simplex, poloviční duplex (1/2-duplex), plný duplex (full-duplex, duplex)
  - ✓ jednosměrný spoj (televize)
  - ✓ střídavě obousměrný spoj („přepínám !")
  - ✓ obousměrný spoj (telefon)

Elektromagnetický signál

- Signál – prostředek pro přenos informace (dat)
- elektromagnetický signál – prostředek pro přenos dat šířením změn elektromagnetických vlastností prostředí
- reprezentace přenášených dat (informace) signálem – kódováním (zobrazováním) do signálových prvků
- signálové prvky jsou vymezeny charakteristikami signálu:
  - ✓ intenzita signálu, amplituda
  - ✓ rychlost výskytů jednotlivých signálových prvků, frekvence
  - ✓ posunutí signálu po časové ose, fáze
- příklad formy elementárního signálu — sinusovka, sinusový signál, sinusová vlna

Nosný signál

- nosný signál je signál,
  - ✓ který se šíří od vysílače signálu k přijímači signálu
  - ✓ do jehož charakteristik je zakódovaná přenášená informace
- nejšířeji využívaná báze signálů – elektromagnetické vlnění
  - ✓ šíří se volným prostorem
  - ✓ šíří se kovovými vodiči, . . .
- rychlost šíření c, frekvence f a vlnová délka λ jsou vzájemně vázány vztahem $c = f\lambda$
- rychlost šíření elektromagnetického vlnění ve vakuu je $c = 3 \times 10^8$ m/s, ve vodičích je o něco nižší
  - ✓ rádio vysílající na frekvenci 88.5 MHz vysílá na vlnové délce $\lambda = 3 \times 10^8/88,5 \times 10^6 \doteq 3,4$ m, vysílá v pásmu metrových vln

Sinusovka jako nosný signál

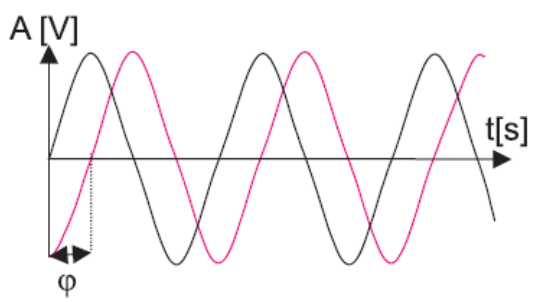
- generická forma sinusového signálu : $S = A.sin\,\Theta$
- A, amplituda, reprezentuje intenzitu signálu (přenášenou energii – napětí, . . .)
- úhel Θ je složka měnící se v čase,

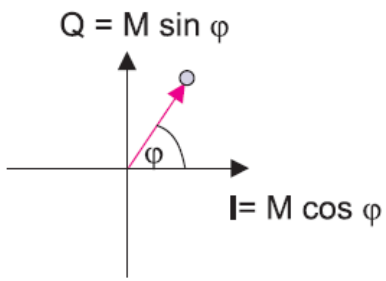
$$s(t) = A.sin(\omega t + \phi)$$

  - ✓ $s(t)$, je okamžitá hodnota signálu
  - ✓ ω, úhlová rychlost, vyjadřuje rychlost změny, je daná frekvencí, $\omega = 2\pi f$ (jednotka f – Hz, 1 Hz = 1 otáčka/s)
  - ✓ ϕ, fáze, posunutí signálu po časové ose v intervalu $< 0, 2\pi >$
- kódování informace do signálu (modulace signálu) = zobrazování informace do změn
  - ✓ amplitudy, amplitudová modulace
  - ✓ frekvence, frekvenční modulace
  - ✓ fáze, fázová modulace

Různé reprezentace signálů

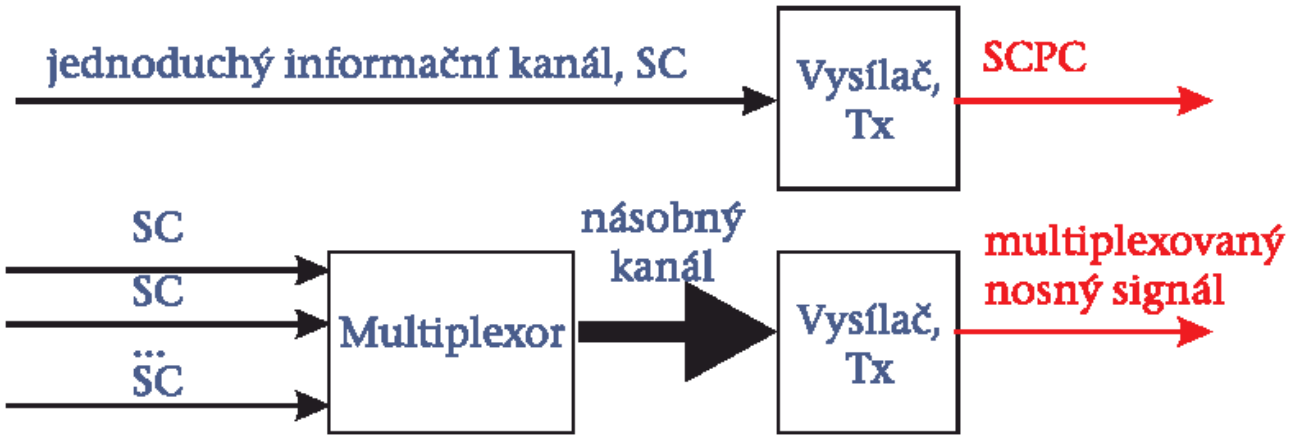
- průběhem amplitudy v čase, (časová doména)
- spektrem frekvencí, (frekvenční doména)
  - ✓ složené signály se převádějí do frekvenční domény pomocí Fourierovy transformace
- fázovým stavovým diagramem
  - ✓ amplituda M a fáze φ jsou vyádřené v polárních souřadnicích





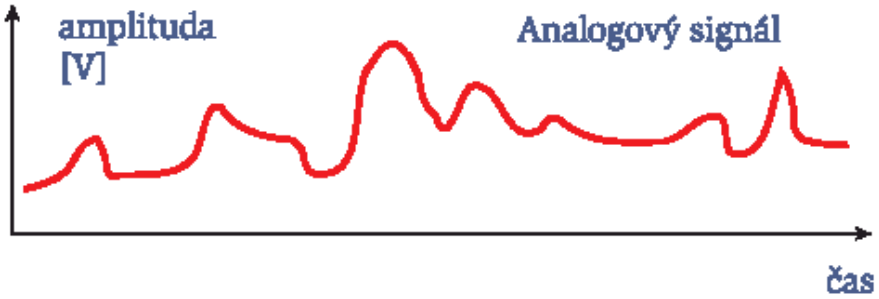
Informační kanál, multiplexing

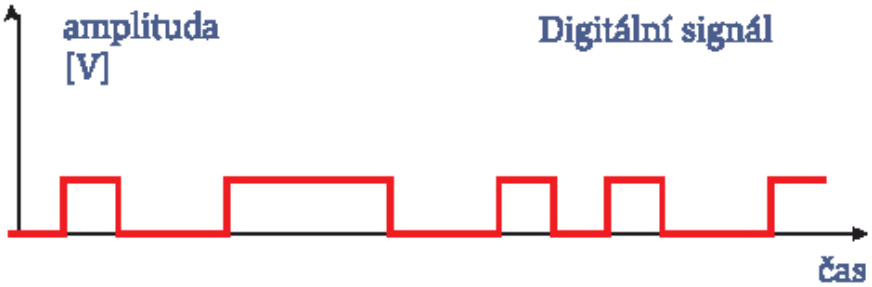
- generický pohled na komunikaci z hlediska přenosu informace
  - ✓ zdroj informace ⟶ vysílač ⟶ informační kanál ⟶ ⟶ přijímač ⟶ příjemce informace
- pokud signál nese jediný informační kanál, hovoříme o případu Single Channel Per Carrier, SCPC
- pokud signál nese současně nese více informačních kanálů, hovoříme o multiplexingu



Klasifikace signálů - analogový/digitální

- Charakterizace signálů
  - ✓ signál v čase spojitý / signál v čase diskrétní
  - ✓ signál v hodnotách spojitý / signál v hodnotách diskrétní
- Klasifikace:
  - ✓ analogový signál = spojitý v čase + spojitý v hodnotách
  - ✓ digitální signál = diskrétní v čase + diskrétní v hodnotách





Klasifikace signálů - (a)periodický

- Periodický signál – ex. analogový nebo digitální signálový vzorek, který se po čase opakuje
  $s(t+T) = s(t)$, $-\infty < t < +\infty$, T je perioda signálu
- jinak se jedná o aperiodický signál
- Charakteristiky (parametry) periodických signálů
  - ✓ perioda T, frekvence $f = 1/T$, amplituda A, fázový posuv φ
  - ✓ vlnová délka, $\lambda = v.T$, ve vakuu $v = 3 \times 10^5 km/s$
    prostor pokrytý jedním cyklem periodického signálu
  - ✓ fundamentální periodický signál je sinusovka
    $$\sin(t) = A_t \sin(2\pi f_t t + \varphi_t)$$
- Periodický signál chápaný jako funkce frekvence
  - ✓ je kompozicí jednoduchých harmonických signálů
  - ✓ harmonický signál – např. sinusovka, sinusová vlna – signál jednoduše charakterizovatelný amplitudou, fází a frekvencí

Parametry periodického signálu

- amplituda (A) – hodnota / síla signálu v čase [V, Volt]
  Špičková amplituda – maximální hodnota v čase
- frekvence, f – rychlost [cykly / s, Hz (Hertz)],
  kterou se vzorek signálu opakuje
  - ✓ pokud se signál skládá z více složek, pak
    – základní složka má základní frekvenci, f_0
    – frekvence ostatních složek = celočíselné násobky f_0
- perioda, T – časový interval [s],
  po kterém se vzorek/prvek signálu opakuje, $T = 1/f$
  - ✓ T_0 = perioda základní složky signálu, $T = 1/f_0$
  - ✓ ve fázovém prostoru 1 perioda = 2π radiánů = $360°$
- vlnová délka, λ, vzdálenost pokrytá jednou periodou signálu
  - ✓ vzdálenost mezi 2 body ve 2 následujících periodách signálu,
    které se nacházejí ve stejné fázi

Parametry periodického signálu, 2

- fáze, ϕ - míra relativní časové pozice v rámci jedné periody
  - ✓ fázový posuv o $\pi/4$ = fázový posuv o $45°$
  - ✓ fázový posuv o $\pi/2$ = fázový posuv o $90°$
- Pokud je vodorovná osa časová osa,
  - pak grafy zobrazují jak se mění hodnota signálu v jednom bodu v prostoru jako funkce času
- Pokud vodorovná osa modeluje prostor,
  - pak grafy zobrazují jak se mění hodnota signálu v jednom okamžiku jako funkce vzdálenosti
  - v daném okamžiku se intenzita signálu mění jako funkce vzdálenosti místa od zdroje signálu

Fourierova analýza – skládání složek

Každý (periodický) signál
lze rozložit na složky
s různými frekvencemi:

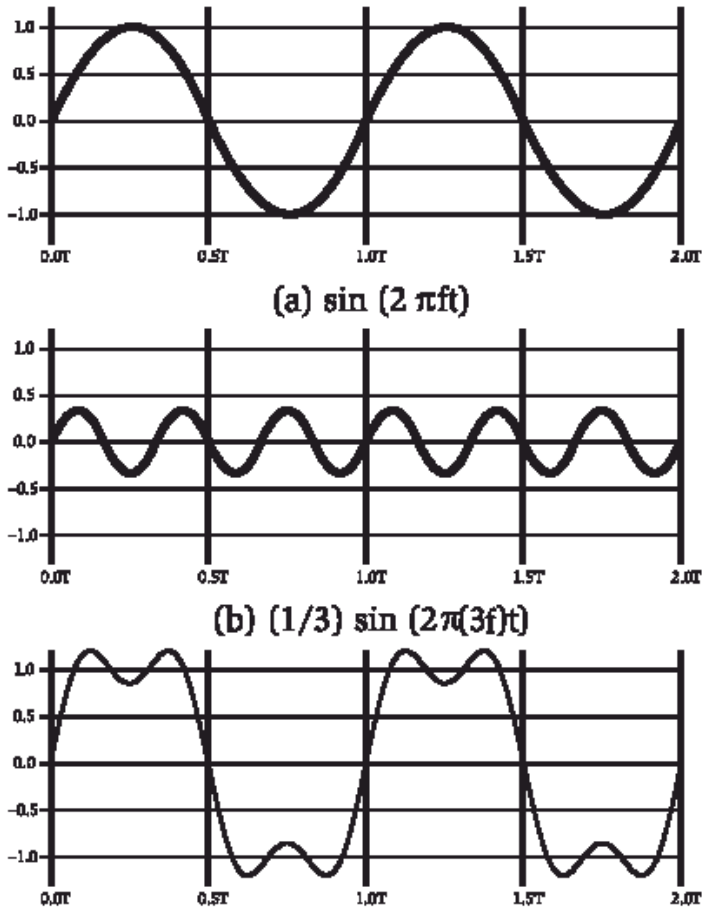
$$g(t) = \frac{1}{2}c + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f t) + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi n f t),$$

Vztahy pro c, a_n, b_n jsou definovány,
c je stejnosměrná složka,
dc (direct current) component.

$\Rightarrow$ signál lze chápat jako
funkci frekvence

Spektrum, pásmo frekvencí

– absolutní šířka pásma
– (efektivní) šířka pásma,
přenáší většinu energie signálu



Fourierova analýza – koeficienty

- Pro každou periodickou funkci $g(t)$
  s periodou T a s opakovací frekvencí $f_0 = 1/T$ platí
  $g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{i=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi n f t),$
- koeficienty
  - ✓ $c = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)\, dt$
  - ✓ $a_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t).\cos(2\pi n f_0 t)\, dt$
  - ✓ $b_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t).\sin(2\pi n f_0 t)\, dt$

Rychlost přenosu dat a šířka pásma

- každá binární hodnota (0,1) nechť je kódovaná pulsy, $p(t)$, každý puls má svoji
  - ✓ výšku (amplitudu, např. $p_0(t) = A, p_1(t) = -A$) a
  - ✓ šířku (dobu trvání, τ)
- rychlost přenosu bitů je tudíž $1/\tau$
  - ✓ čím je puls užší, tím je rychlost přenosu bitů dat vyšší
  - ✓ rychlost přenosu bitů dat nelze libovolně zvyšovat, zužování pulsů je omezeno šířkou pásma komunikačního systému
    - – š.p. komunikačního systému vymezuje interval frekvencí sinusových vln, které systém přenese dostatečně věrně a bez neakceptovatelného útlumu
    - – komunikační systém – přenosové médium, zesilovače, filtry, vysílače signálu, přijímače signálu, . . .
- ryzí digitální (,,pravoúhlý") signál má nekonečnou absolutní šířku pásma

Rychlost přenosu dat a šířka pásma, 2

- pro každý přenosový/komunikační systém platí:
  čím větší poskytuje šířku pásma, tím je dražší
- omezování šířky pásma způsobuje zkreslování, deformace signálu, (zamezuje se vlivu nepřenášených složek)
- čím je větší šířka pásma, tím vyšší je kapacita přenosu dat
- zkrácením základní periody (digitálního) signálu se dosáhne zvýšení rychlosti přenosu dat
  - ✓ při zachování počtu složek signálu je pak ale potřeba přenášet složky signálu z širšího intervalu frekvencí, je širší efektivní šířka pásma
  - ✓ tudíž je potřeba dostupnost přenosového kanálu s větší šířkou pásma
- zvětšením šířky pásma přenosového systému
  - ✓ lze zkrátit základní periodu signálu,
  - ✓ lze dosáhnout větší kapacity přenosu,
  - ✓ lze dosáhnout vyšší rychlosti přenosu dat, . . .

Síla signálu, decibely

- síla signálu (= přenášená energie)
- signál se šířením médiem zeslabuje
  (přenášená energie se rozptyluje, . . .)
- analogový signál se musí se účelově (záměrně) zesilovat
  pomocí zesilovačů,
- digitální signál se musí se účelově (záměrně) regenerovat
  pomocí opakovačů
- slábnutí je vesměs logaritmickou funkcí vzdálenosti
  a je proto výhodné slábnutí vyjadřovat
  vhodnou logaritmickou mírou, jednotkou

Síla signálu, decibely, 2

- historicky se po prvé pracovalo se signály při zpracování zvuku
- pro poměrovou míru různých úrovní zvuku se stanovila jednotka Bel (Alexander Graham Bell)
- běžně se používá desetinová jednotka – decibel, dB
- 1 dB $\sim$ minimální změna úrovně zvuku rozpoznatelná lidským sluchem
- decibel – jednotka míry poměru mezi 2 úrovněmi signálu
- decibelový zisk/ztráta, $G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$, kde P značí výkon (power)
- decibel je míra relativní
  - ✓ 50% ztrátě signálu odpovídají –3 dB, říká se *ztráta 3 dB*
  - ✓ ztráta 3 dB = snížení síly signálu z 1000 mW na 500 mW, ale také
  - ✓ ztráta 3 dB = snížení síly signálu z 10 mW na 5 mW

Přenosový kanál, kapacita kanálu

- Přenosový kanál
  - ✓ komunikační cesta, prostředí mezi zdrojem a přijímačem signálu
  - ✓ poruchy (např. šum) limitují dosažitelnou rychlost přenosu dat (přenosovým) kanálem
  - ✓ pro přenos digitálních dat je zajímavá otázka do jaké míry poruchy při přenosu signálu kanálem omezují rychlost přenosu dat / kapacitu kanálu?
- kapacita kanálu
  - ✓ objem dat obsažitelný v kanálu
  - ✓ dáno maximální rychlostí přenosu dat, kterou lze data kanálem přenášet
- charakteristické vzájemně se ovlivňující rysy
  - ✓ rychlost přenosu dat, šířka pásma, šum, frekvence chyb

Nyquistova věta

- platí pro idealizovaný kanál bez šumu
- určuje maximální rychlost přenosu dat C [b/s]
  více-úrovňovým signálem v kanálu s šířkou pásma B [Hz]
- $C = 2B \ \ log_2 M$, M = počet signálových úrovní/prvků signálu
  typicky 2, 4, 16, 64, ...
  signálová úroveň / prvek signálu = kombinace velikostí amplitud, fázových posuvů, frekvence, ...
- variace Nyquistovy věty na binární signál – $C = 2B$
  - ✓ rychlost přenosu dat C [b/s] kanálem bez šumu s šířkou pásma B [Hz] binárním signálem, tj. signálem se 2 signálovými prvky – dvě úrovně amplitudy, dvě frekvence, dvě fázová posunutí, ...
  - ✓ telefonním pásmem cca 3 kHz lze binárně přenášet dat rychlostí až 6 kb/s, ne rychleji !!!

Poměr signál/šum

- Poměr signál/šum — Signal-to-Noise Ratio (SNR, resp. S/N)
- poměr výkonu datového signálu N_1 (S, signal)
  k výkonu šumového signálu N_2 v kanále (N, noise),
- typicky měřený na straně přijímače $SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$
- poměr SNR na vstupu přijímače (demodulátoru)
  je klíčovým bodem návrhu komunikačního systému
  - ✓ $SNR > 10\ dB$, výkon šumu nepřesahuje 10 % výkonu signálu,
    přenos dat lze řešit bez zabezpečování proti vlivu šumu
  - ✓ $10\ dB > SNR > 4\ dB$, realizace přenosu dat
    vyžaduje aplikaci zabezpečování proti vlivu šumu
  - ✓ $SNR < 4\ dB$, výkon šumu se blíží k 50 % výkonu signálu,
    neumožňuje racionálně zabezpečit přenos dat

BER, Bit Error Rate

- pravděpodobnost výskytu 1-bitové chyby během přenosu dat
- typické vyjadřování

  BER 10^{-6} značí výskyt 1 chyby na přenos 10^{6} bitů

  ✓ typicky 1-bitová chyba během faxového přenosu A4-stránky
- Metody vylepšování BER

  ✓ opravné kódy, . . . (později detailněji)
- BER je vymezována hodnotou SNR, zvýšení BER se vyvolává

  ✓ snížením výkonu signálu – ztrátou směrování antény, útlumem signálu, . . .

  ✓ zvýšením výkonu šumu – interferencemi, vznik zdroje šumu, . . .

Shannonova věta

- rychlost přenosu dat C kanálem
  s šířkou pásma B se šumem o nenulovém výkonu
  $C = B \log_2(1 + S/N)$
- reprezentace teoretického maxima dosažitelné rychlosti
  přenosu dat v reálném přenosovém kanálu
- v praxi se často pracuje s nižšími rychlostmi než se
  Shannonovou rychlostí
- impulsní šum, z kreslování útlumem a zpožďováním se
  neuvažuje
- nic s neříká, jakým způsobem (kódováním) se rychlosti určené
  Shannonovou větou dosáhne

Shannonova věta, 2

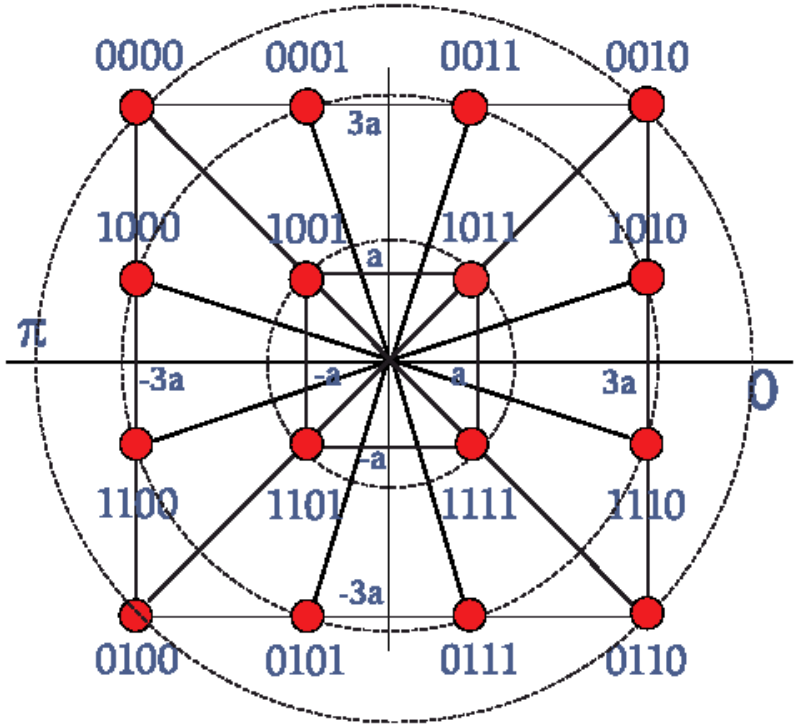
- vysoká hodnota SNR odpovídá vysoce kvalitnímu přenosovému prostředí, ve kterém lze např. používat malý počet mezilehlých opakovačů
- SNR stanovuje horní mez dosažitelné rychlosti přenosu dat
  - ✓ výskyt šumu zničí jeden nebo několik (více) bitů
  - ✓ čím rychleji se přenáší, tím data zabírají kratší úsek na časové osek
  - ✓ a tím více bitů se poruchou trvající jistou dobu zničí
    $\Rightarrow$ při dané úrovni šumu roste s rychlostí přenosu dat i BER
- čím vyšším výkonem a čím s větší šířkou pásma se vysílá, tím rychleji lze vysílat, ALE
- vyšší výkon bývá doprovázen vyšším šumem (intermodulace)
- větší šířka pásma obsahuje více bílého šumu, zvětšováním šířky pásma klesá SRN

Ilustrace významu Nyquistovy a Shannonovy věty

- Nechť dolní a horní mezní frekvence kanálu jsou 3 a 4 MHz, šířka pásma je tudíž $B = 1\ MHz$
- Nechť $SNR_{dB} = 24\ dB = 10 \log_{10}(S/N)$, tudíž $S/N = 251$
- Nejvyšší dosažitelná rychlost C podle Shannona

$$C = 10^6 \times \log_2(1 + 251) \approx 10^6 \times 8 = 8\ Mb/s$$

- Potřebný počet signálových prvků M pro dosažení C při dané šířce pásma B se odvodí podle Nyquistovy věty:
  $C = 2B \log_2\ M$, tj. $8 \times 10^6 = 2 \times 10^6 \times log_2\ M$,
  tj. $4 = log_2\ M$ a tudíž $M = 16$
- Toto splňuje např. modulační schéma 16-QAM:
  4 fázové posuvy a v každém 2 možné hodnoty amplitudy a 8 jiných fázových posunů se shodnou amplitudou

16-QAM, kvadraturní amplitudová modulace

- každá z dvojic {amplituda, fáze}reprezentuje čtveřici bitů
- přenosem 1 signálového prvku se přenáší 4 bity informace
- na obrázku je konstaleční vzorek ilustračně spojený s Grayovým kódováním (přiřazení signálových prvků čtveřicím bitů)