



Katedra softwarového inženýrství,
Matematicko-fyzikální fakulta,
Univerzita Karlova, Praha



Lekce 5: Základy datových komunikací

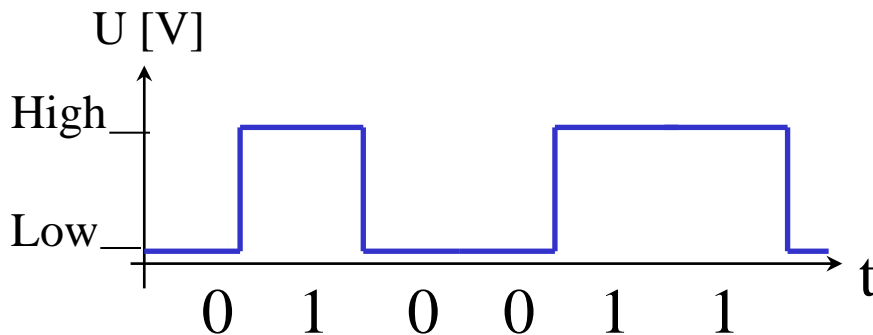
Jiří Peterka, 2009

co je třeba znát z „teoretických základů“?

- co je "schopnost přenášet data"
 - jak se vyjadřuje? V čem se měří?
 - čím je dána? Na čem závisí?
 - jak ji zvyšovat? Kde jsou limity?
- jaké vlastnosti mají reálná přenosová média? Jaký je jejich "přenosový potenciál"?
 - kroucená dvoulinka
 - koaxiální kabely
 - optické kabely
- jak fungují bezdrátové přenosy
- jak se přenáší data v existujících sítích
 - (pevných) telefonních sítích
 - mobilních sítích
 - kabelových sítích
- veličiny:
 - šířka přenosového pásma
 - modulace, modulační rychlost
 - přenosová rychlost
 - přenosový výkon
 -
- vztahy:
 - závislost modulační rychlosti na šířce pásma
 - závislost přenosové rychlosti na šířce pásma
- techniky a technologie:
 - spread spectrum, frequency hopping, OFDM, CDMA,
 - ISDN, xDSL,
 - GPRS, HSCSD, EDGE, UMTS, .
 - DOCSIS,

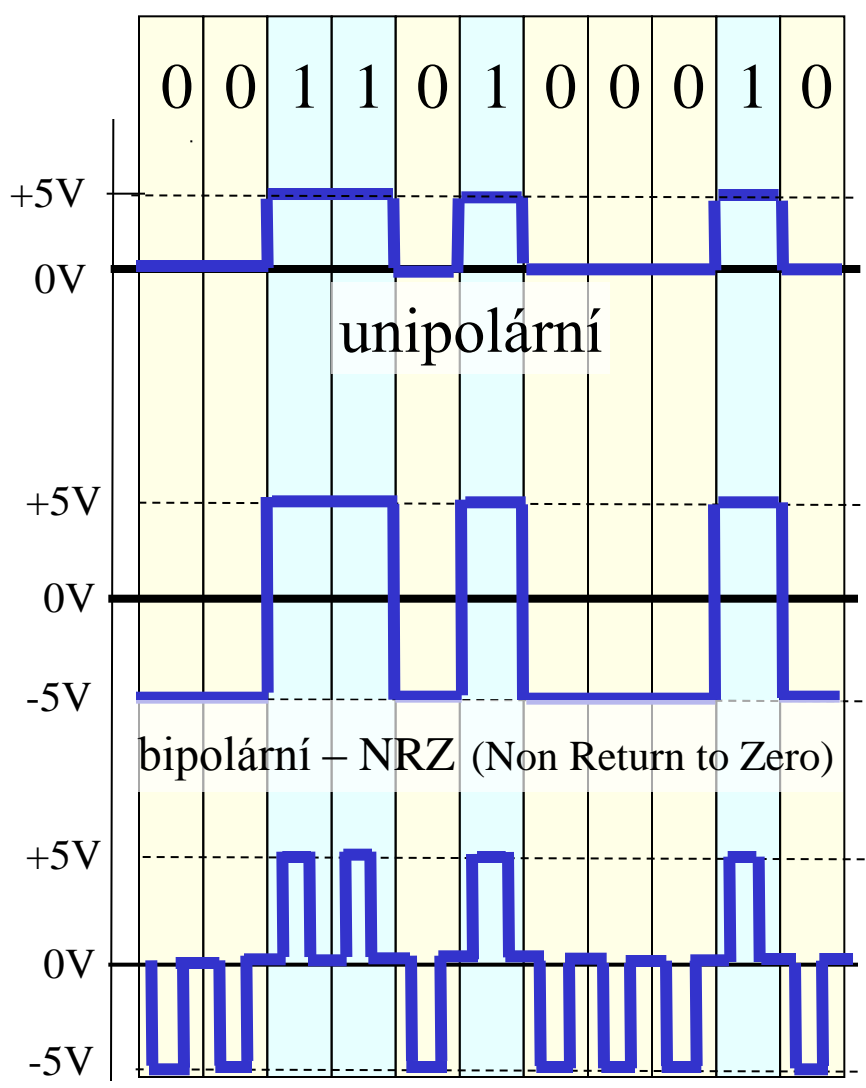
přenos v základní pásmu (baseband, nemodulovaný přenos)

- jde o takový druh přenosu, při kterém je vstupní signál okamžitě převáděn na přenosové médium
 - bez činnosti modulačního prvku
- tj. přenáší se rovnou "data",
- představa:
 - přenášené bity se reprezentují:
 - napětovými úrovněmi (H/L), nebo
 - velikostí proudu (tzv. proudová smyčka), kdy prochází/neprochází el. proud
- **na přenosovém médiu probíhá jen 1 přenos !!**

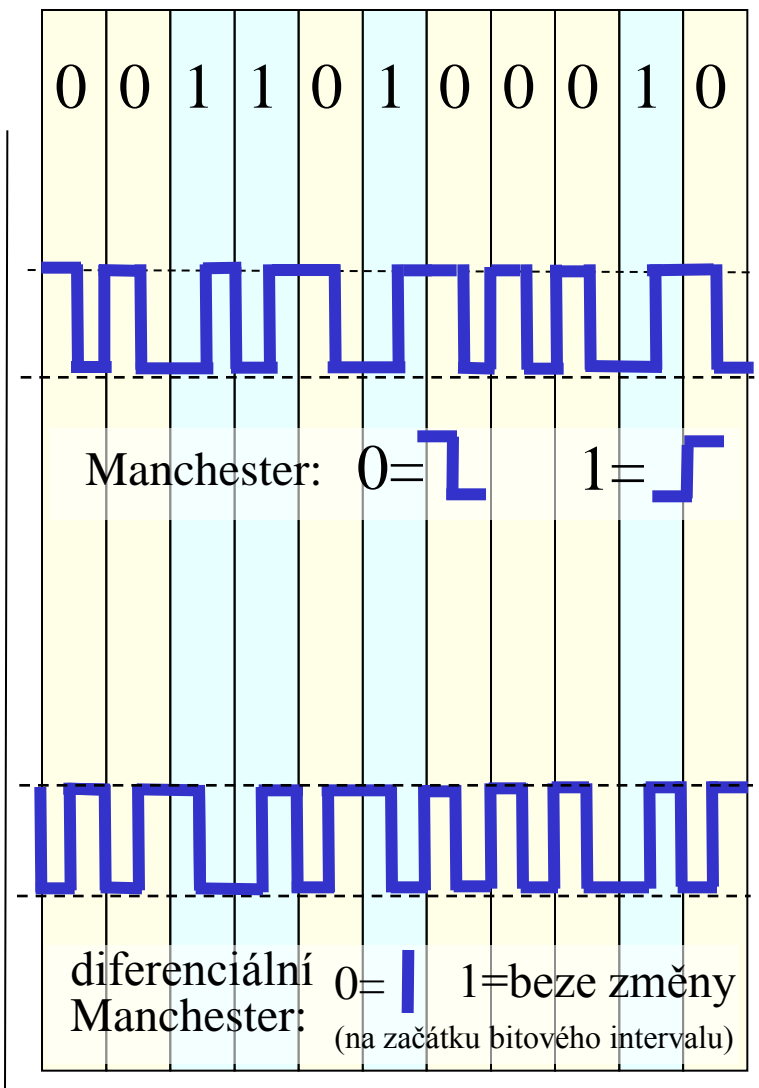


- přenos v základním pásmu může být také kódovaný
 - jeden datový bit je "zakódován" do více změn přenášeného signálu
 - výhoda: větší "robustnost"
 - snáze se detekují chyby
- příklad:
 - kódování Manchester
 - používá se např. v Ethernetu
 - na 1 bit jdou 2 změny signálu
 - 0: změna z H(igh) na L(ow)
 - 1: změna z L(ow) na H(igh)
 - diferenciální Manchester
 - používá se např. v Token Ringu
 - jedna změna signálu: časování
 - druhá změna: datový bit
 - 0: je změna
 - 1: není změna
- přenosy v základním pásmu se používají "na krátkou vzdálenost"
 - např. v sítích LAN (Ethernet)

příklady kódování



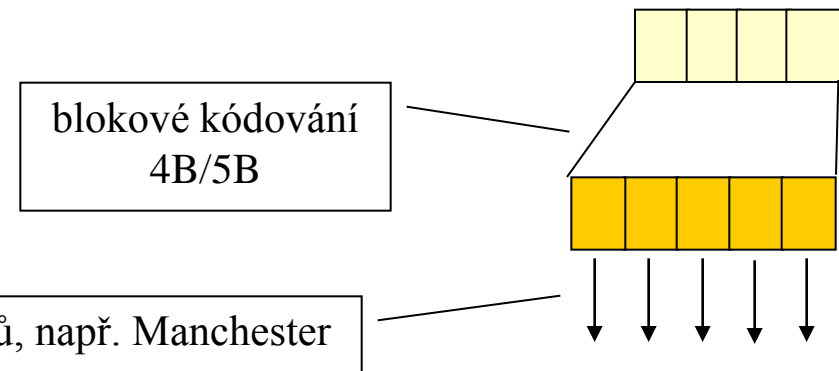
bipolární – RZ (Return to Zero)



uprostřed bitového intervalu je časovací hrana, na které se může příjemce synchronizovat

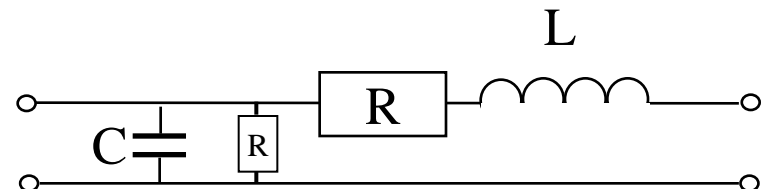
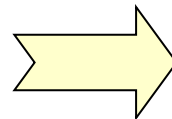
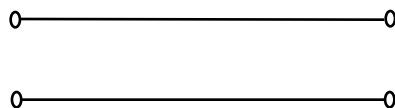
druhy kódování

- kódování NRZ (bez návratu k nule) je implementačně náročnější
 - problémy způsobují delší sekvence stejných bitů
 - signál se během této sekvence nemění
 - nebezpečí ztráty synchronizace u příjemce
 - příjemce rozpoznává jednotlivé bity hlavně podle změny úrovně napětí
 - používá např. technologie SONET
 - řeší kódování s návratem k nule
 - RZ, Return to Zero
 - částečně řeší kódování NRZI
 - Non Return to Zero – Inverted
 - 1=změna signálu, 0 beze změny
 - "nevadí" dlouhé posloupnosti 1
 - "vadí" dlouhé posloupnosti 0
- "blokové kódování"
 - kóduje určitý počet (užitečných) bitů do většího počtu (přenášených) bitů
 - kvůli větší robustnosti, lepší možnosti detekce chyb, možnosti lépe vyvážit počet 0 a 1, ...
- příklad:
 - kódování 4B/5B
 - používá se např. v FDDI
 - kódování 5B/6B
 - kódování 8B/10B



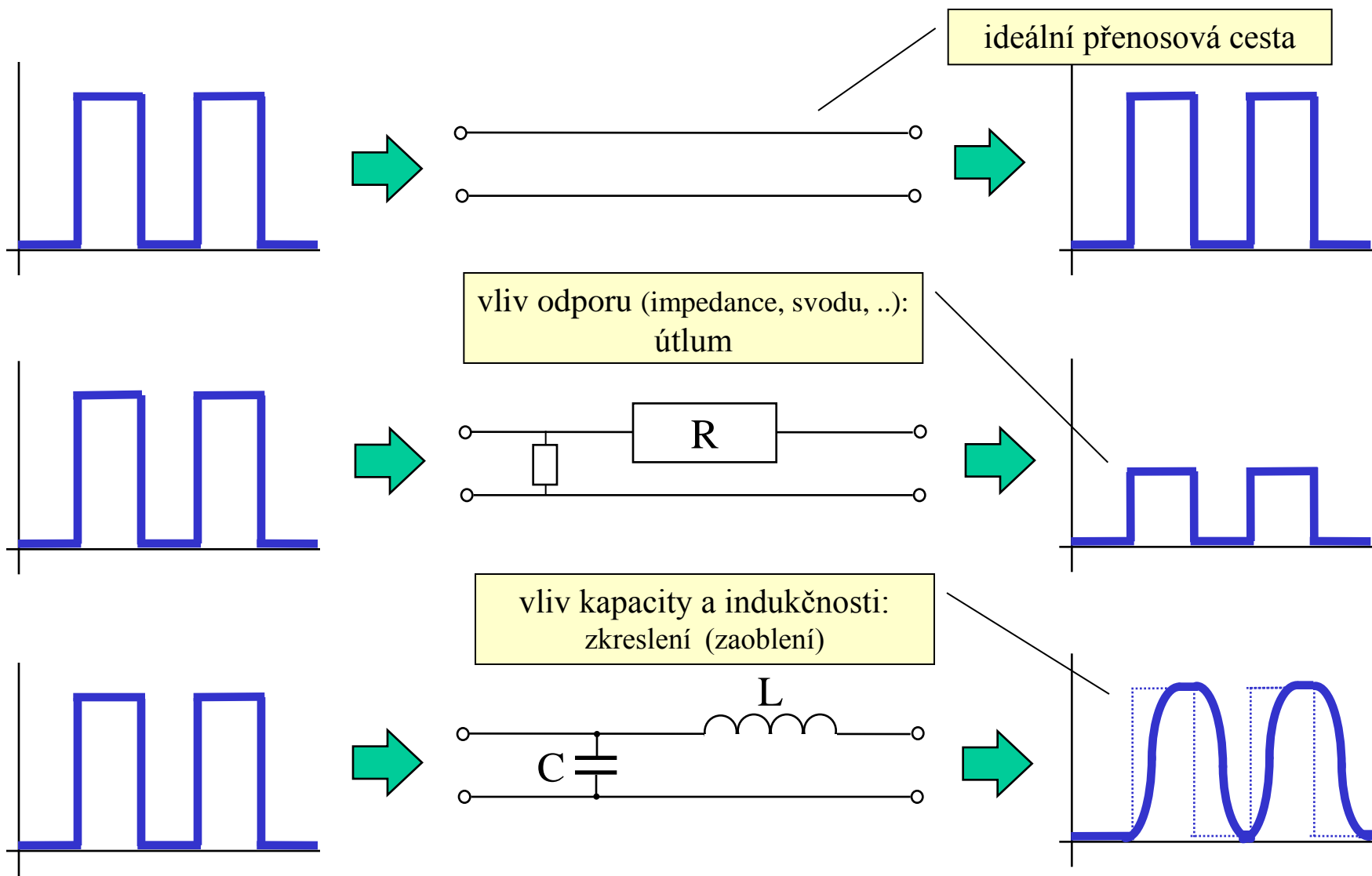
reálné vlastnosti přenosových cest

- přenosu (v základním pásmu)
na větší vzdálenosti brání to,
že přenosové cesty nejsou nikdy
ideální !!!
 - vždy nějak negativně ovlivňují
přenášený signál
 - vykazují:
 - **útlum** (zeslabuje přenášený signál)
 - **zkreslení** (deformuje přenášený
signál)
 - **přeslech** („prolínání“ signálů z
jiných vedení)
 - **rušení, vyzařování**



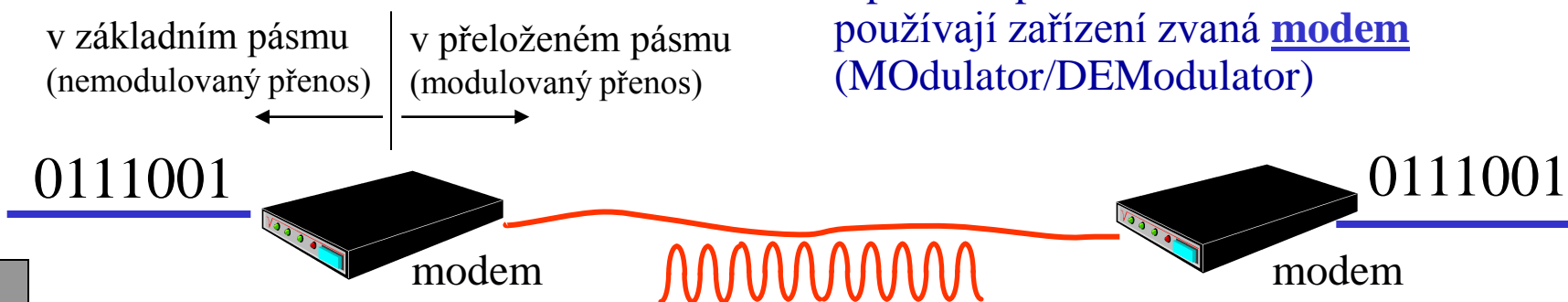
- důsledek:
 - každá přenosová cesta přenáší
některé signály lépe, jiné hůře
 - záleží zejména na frekvenci
přenášeného signálu a na povaze
jeho změn
 - některé signály jsou již tak
„pokaženy“, že nemá smysl je
danou přenosovou cestou
přenášet (pro jiné to ještě smysl
má)

představa vlivu útlumu a zkreslení



přenos v přeloženém pásmu (broadband, modulovaný přenos)

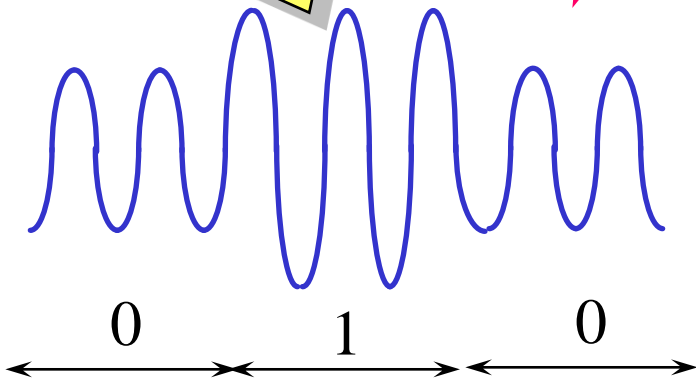
- řešení:
 - (problému s "pokaženým signálem" při přenosu v základním pásmu)
- přenášet takový signál, jaký projde přenosovou cestou nejlépe!!!
 - v praxi: signál harmonického (sinusového, kosinusového) průběhu
 - $y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$
 - představuje tzv. nosnou
 - nosný signál
 - nosný signál ještě sám nenese žádnou informaci
 - žádná data
- princip modulace:
 - data, určená k přenosu, se "naloží" na nosný signál
 - podle přenášených dat se mění některý (některé) z parametrů přenášeného nosného signálu
 - jde o tzv. modulaci
 - "modulování" (měnění) nosného signálu podle toho, jaká data se mají přenést
 - odesílatel (zdroj modulovaného signálu) mění odesílaný signál
 - demodulace
 - příjemce musí být schopen rozpoznat (rozlišit) změny nosného signálu, a z nich "získat" přenášená data
 - v praxi se pro modulaci i demodulaci používají zařízení zvaná modem (MOdulator/DEModulator)



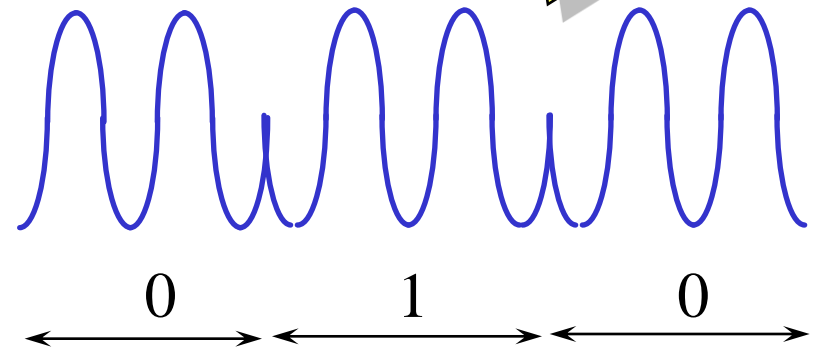
představa modulace

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

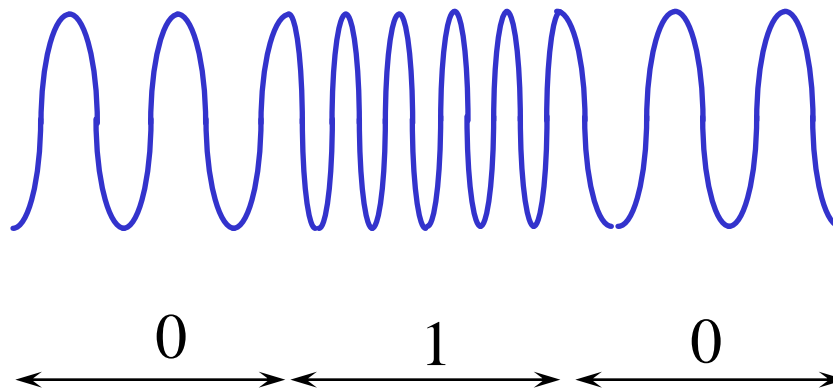
amplitudová
modulace
(mění se A)



fázová
modulace
(mění se ϕ)



frekvenční
modulace
(mění se ω)



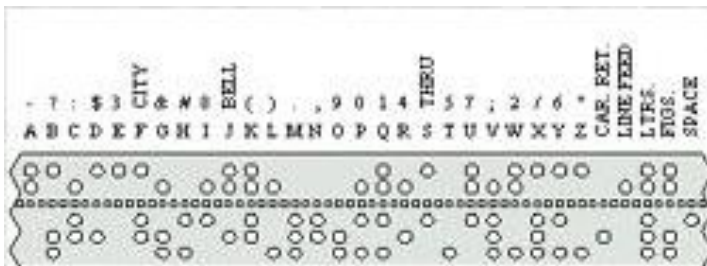
modulační rychlost (baud rate)

- je rychlost, s jakou se mění přenášený signál
 - modulační rychlost je počet změn signálu za sekundu
 - měří se v jednotkách zvaných BAUD [Bd]
 - podle francouzského inženýra **Jean-Maurice-Émile Baudota** (1845-1903)
 - sestrojil "tisknoucí rychlotelegraf"
 - vynalezl časový multiplex
 - možnost, aby více telegrafů komunikovalo po jedné lince
 - vynalezl telegrafní kód (1870)



J.M.E. Baudot

- modulační rychlost nevyovídá nic o tom, kolik dat se přenáší !!!
 - to záleží na tom, kolik bitů "nese" (reprezentuje) jedna změna signálu!!!
- místo "modulační rychlost" se též používá pojem "symbolová rychlost"
 - anglicky: baud rate



vícestavová a kombinovaná modulace

- vícestavová modulace

- modulovaný (nosný) signál má určitý počet stavů (n)
- pak každý z těchto stavů může reprezentovat $\log_2(n)$ bitů
 - přesněji: každý přechod do nového stavu může reprezentovat přenos $\log_2(n)$ bitů

- příklad:

- modemy V.34: až 3200 změn za sekundu, každá "nese" 9 bitů

- základní způsoby modulace obvykle nedokáží dosáhnout nejvyšších přenosových rychlostí

- přesněji: počtu rozlišitelných stavů

- proto se základní způsoby modulace kombinují

- např. fázová a amplitudová

- příklad:

- QAM16: 12xfázová, 3x amplitudová

- pozorování:

- počet stavů nelze libovolně zvyšovat, protože příjemce by je už nedokázal rozlišit !!!
- obecně: nejlépe se rozpoznávají stavy u fázové modulace

- pozorování:

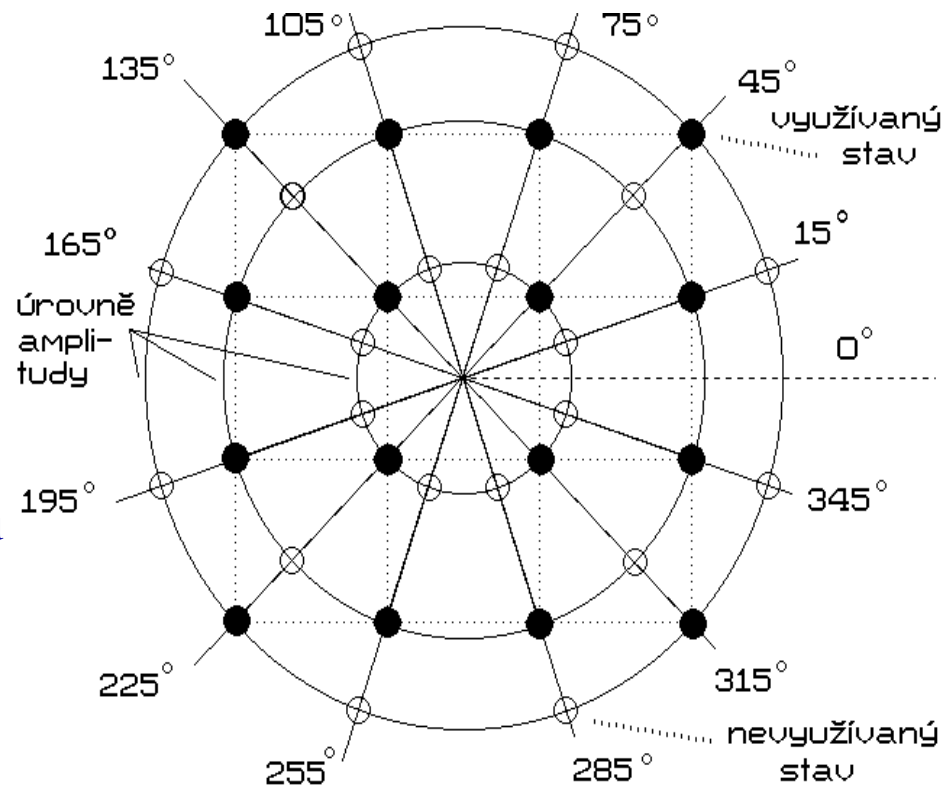
- po jedné přenosové cestě lze přenášet více nosných (modulovaných) signálů současně
 - musí být vhodně frekvenčně posunuty
 - jde o tzv. frekvenční multiplex



| Přenosová rychlost [b/s] | Modulační rychlost [Bd] | Počet rozlišovaných stavů | Bitů/změnu | Standard |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|----------|
| 2400 b/s | 600 | 16 | 4 | V.22bis |
| 9600 b/s | 2400 | 16 | 4 | V.32 |
| 14400 | 2400 | 64 | 6 | V.32bis |
| 28800 | 2400-3200 | 512 | 9 | V.34 |

příklad: QAM16 – kvadrurní amplitudová modulace

- jde o kombinaci amplitudové a fázové modulace –
 - používá 12 různých fázových posunů a 3 různé úrovně amplitudy, což dává celkem 36 různých stavů
- z 36 různých stavů přenášeného signálu je skutečně využito jen 16
 - ... protože všech 36 je obtížné při příjmu spolehlivě rozlišit
- 16 využívaných stavů je voleno tak, aby byly “co nejdále od sebe”
 - každý z 16 stavů reprezentuje jednu čtveřici bitů,
- QAM16 umožňuje používat přenosovou rychlost, která je číselně 4x vyšší než rychlost modulační
- používá se v modemech pro 2400 bps a 9600 bps



přenosová rychlost (bit rate)

- přenosová rychlost (angl.: bit rate):
 - říká, kolik bitů se přenesou za sekundu
 - měří se v bitech za sekundu (resp. v násobcích – kbit/s, Mbit/s atd.)
 - má nominální charakter
 - spíše vypovídá o tom, jak dlouho trvá přenos jednoho bitu
 - efektivní (skutečně dosahovaná) přenosová rychlost může být i výrazně nižší
 - přenosová rychlost nevypovídá nic o tom, kolikrát za sekundu se změnil přenášený signál
 - tj. jaká je modulační rychlost
- obecný vztah mezi modulační a přenosovou rychlostí:

$$V_{\text{přenosová}} = V_{\text{modulační}} * \log_2(n)$$

- příklady:
 - Ethernet:
 - přenosová rychlost = 1/2 modulační r.
 - RS-232, Centronics, ...
 - přenosová rychlost = modulační rychlost
 - telefonní modemy
 - přenosová rychlost > modulační rychlost
 - viz tabulka

| Přenosová rychlost [b/s] | Modulační rychlost [Bd] | Počet rozlišovaných stavů | Bitů/změnu | Standard |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| 2400 b/s | 600 | 16 | 4 | V.22bis |
| 9600 b/s | 2400 | 16 | 4 | V.32 |
| 14400 | 2400 | 64 | 6 | V.32bis |
| 28800 | 2400-3200 | 512 | 9 | V.34 |
| 56000 | 8000 | 128 | 7 | V.90,V.92 |

počet skutečně rozlišovaných stavů

přenosový výkon (efektivní přenosová rychlost)

- přenosová rychlost ještě nevypovídá o tom, jaký objem dat se (skutečně) přeneše za delší časový interval
 - např. za hodinu, za 24 hodin apod.
 - o tom vypovídá až tzv. efektivní (skutečně dosahovaná) přenosová rychlost
 - někdy označovaná také jako tzv. **přenosový výkon**
 - efektivní rychlost může být větší nebo menší než rychlost nominální přenosová rychlost
- působí na ni faktory, které
 - zvyšují efektivní rychlost:
 - zejména komprese přenášených dat
 - zvýšení např. až 4x
 - snižují efektivní rychlost
 - různé druhy režie, zajištění spolehlivosti, řízení, řízení přístupu, agregace, Fair Use Policy,

DSL v síti O2

| Průměrné rychlosti DSL v síti O2 X.09 | | | | |
|--|------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2 Mbit/s | 4 Mbit/s | 8 Mbit/s | 16 Mbit/s |
| O2 Internet ADSL | 961 | 1 822 | 3 718 | 4 947 |
| T-Mobile | - | - | 4 276 | 5 283 |
| VOLNÝ | - | - | 4 270 | - |
| Průměr všech měření | 994 | 1 825 | 3 723 | 5 098 |
| % z objednané rychlosti | 49% | 45% | 45% | 31% |


Pokud bylo vyhodnoceno méně než 50 měření u dané služby a ISP, nejsou výsledky vzhledem k malému vzorku dat uváděny.

zdroj: měření serveru DSL.CZ, říjen 2009

zvyšování přenosové rychlosti

- co dělat, když potřebujeme zvýšit přenosovou rychlost?

$$V_{\text{přenosová}} = V_{\text{modulační}} * \log_2(n)$$

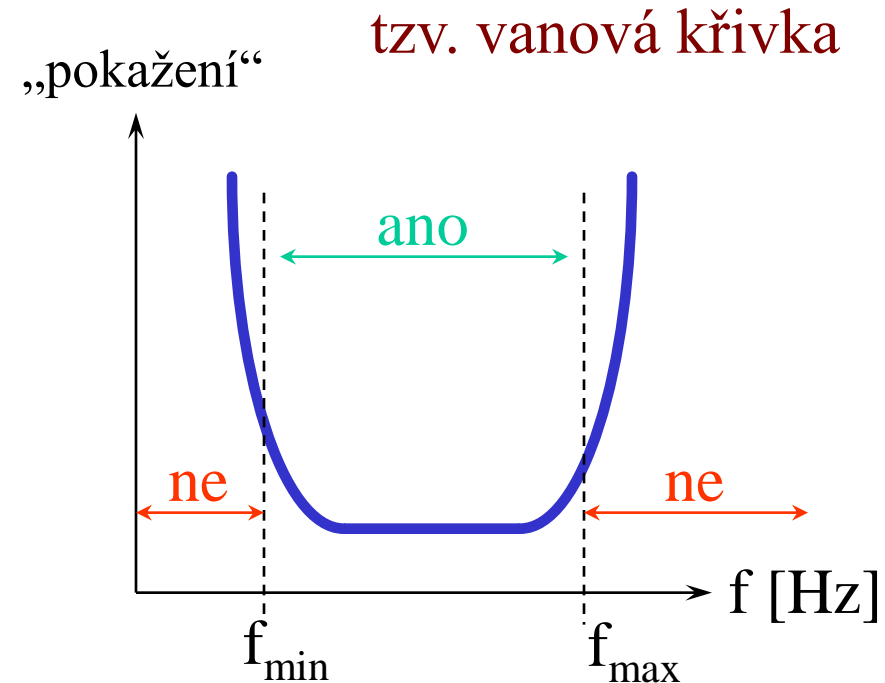
- 1. možnost: zvyšovat n (počet stavů)
 - jde o "intenzivní přístup"
 - "cestu zdokonalování"
 - zlepšování technologie
 - nejde to dělat donekonečna 
 - při pevně dané modulační rychlosti
 - intuitivně:
 - při překročení určitého stupně modulace (počtu stavů přenášeného signálu) již příjemce nebude schopen tyto stavy správně rozlišit

- 2. možnost: zvyšovat modulační rychlost
 - jde o "extenzivní přístup"
 - využívání více zdrojů, konkrétně tzv. šířky pásma
 - je to drahé (stojí to peníze)
 - lze to dělat libovolně dlouho
 - ale jen za cenu "konzumace" více zdrojů
- otázka:
 - jak dlouho lze zvyšovat počet (rozlišovaných) stavů?
 - kde leží hranice dokonalosti technologií??
 - na čem je tato hranice závislá?

odpověď: **hranice závisí na šířce pásma a na kvalitě linky.**
Naopak nezávisí na použité technologii !!!!

šířka přenosového pásma (angl: bandwidth)

- souvisí s reálnými (obvodovými) vlastnostmi přenosových cest
 - některé signály přenáší lépe, jiné hůře
- pro harmonický signál:
 - závislost „míry pokažení přenášeného signálu“ má většinou intervalový charakter
 - závislý primárně na frekvenci signálu



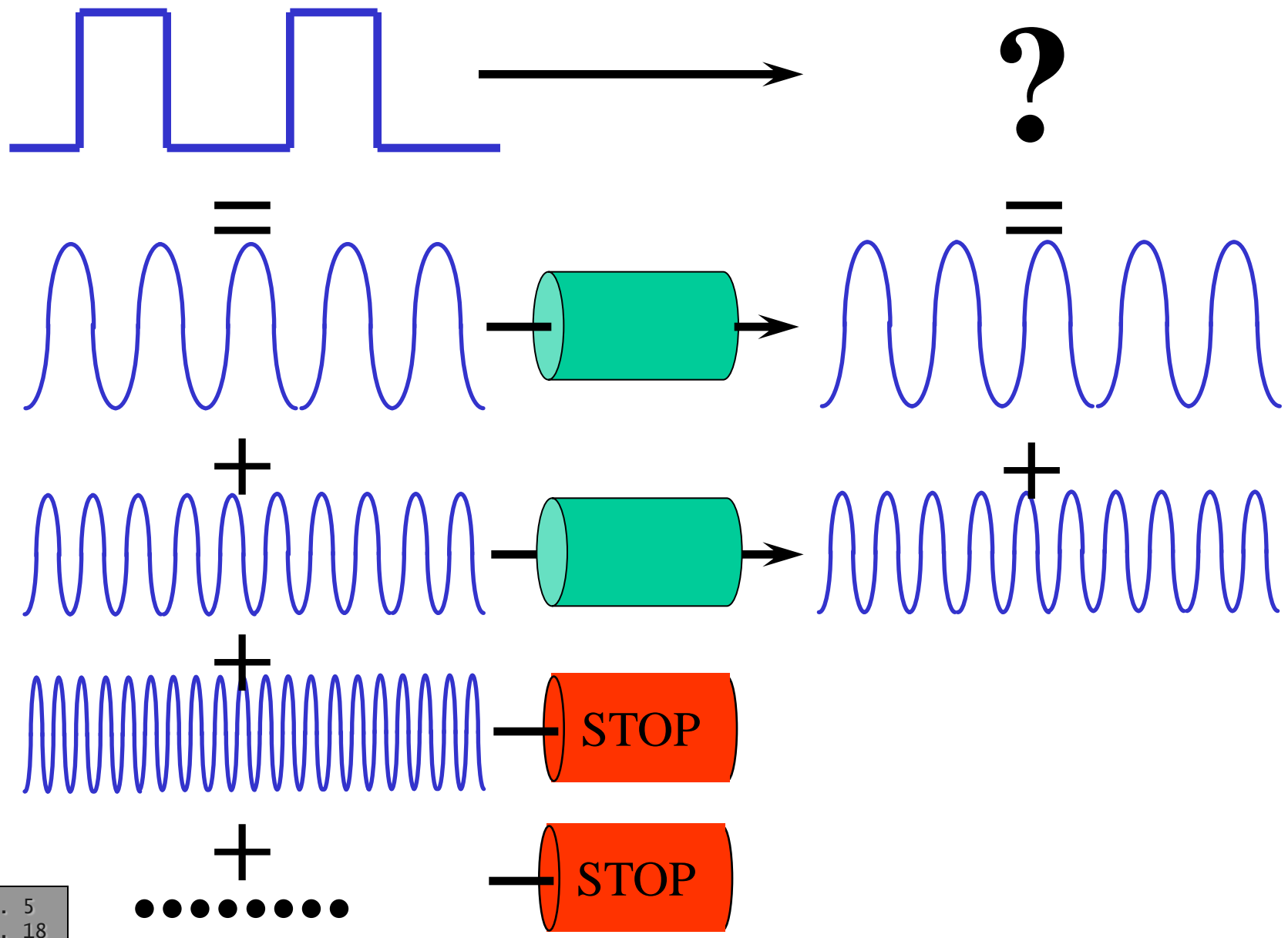
- lze najít rozsah frekvencí (f_{\min} až f_{\max}), které daná přenosová cesta přenáší s ještě únosným „pokažením“
 - $f_{\max} - f_{\min}$ představuje tzv. šířku přenosového pásma, anglicky: bandwidth
 - platí pro harmonický signál (sinusového/kosinusového průběhu)
 - harmonické signály mimo uvedený rozsah nejsou přeneseny vůbec
 - resp. s tak velkým "pokažením" (útlumem, zkreslením), že nemá cenu

vliv šířky přenosového pásma na přenášený signál (obecného průběhu)

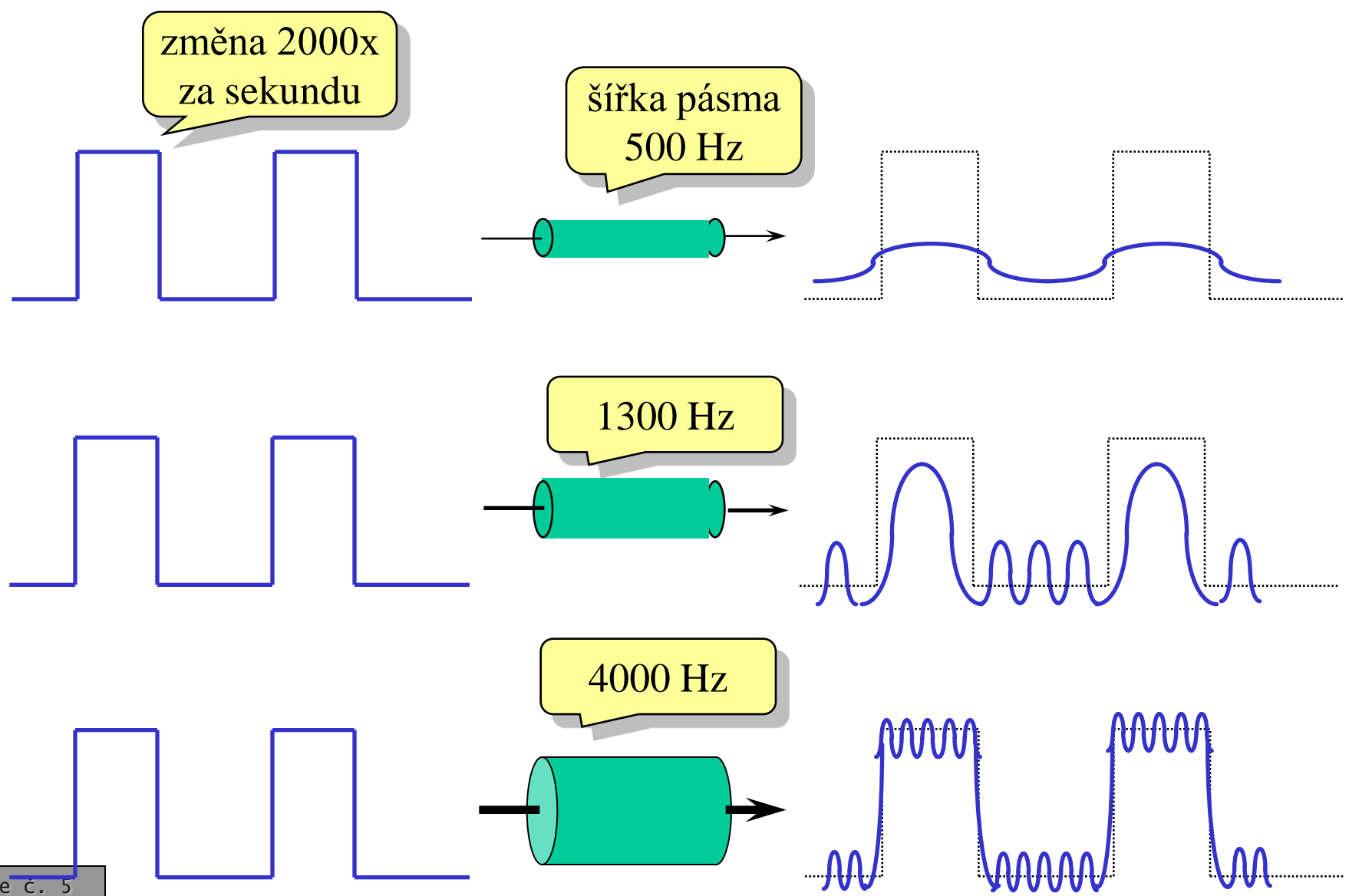
- pro signály harmonického (sinusového) průběhu je závislost na šířce přenosového pásma zřejmá
 - pokud frekvence harmonického signálu spadá do šířky pásma, signál "projde" (beze změn)
 - jinak neprojde vůbec
- pro signály obecného průběhu je efekt omezené šířky přenosového pásma složitější
- pomůcka:
 - (každý) signál obecného průběhu lze rozložit (dekomponovat) na signály harmonického průběhu (dle Fouriera)
 - na tzv. harmonické složky, s celočíselnými násobky základní frekvence
- vliv šířky pásma na harmonické složky signálu obecného průběhu je zřejmý
 - určitý počet nižších harmonických složek „projde“
 - vyšší harmonické složky „neprojdou“
 - výsledek (přijatý signál) je dán součtem pouze těch harmonických složek, které projdou!!
 - tím dochází k deformaci (zkreslení) původního signálu
- důsledky:
 - čím větší šířka pásma, tím je přenos kvalitnější
 - čím bude šířka přenosového pásma větší, tím více harmonických složek se přenesou, a tím bude přijatý signál věrněji odpovídat původnímu signálu – bude méně zkreslený
 - kvalitnější přenos umožňuje "namodulovat" (naložit na přenášený signál) více dat

intuitivní závěr: **čím větší je šířka pásma, tím více dat lze přenést (tím vyšší přenosové rychlosti lze dosáhnout) !!!!**

představa – vliv omezené šířky přenosového pásma



příklad – vliv šířky přenosového pásma na výsledný (přenesený) signál



změna 2000x
za sekundu

šířka pásma
500 Hz

1300 Hz

4000 Hz

shrnutí

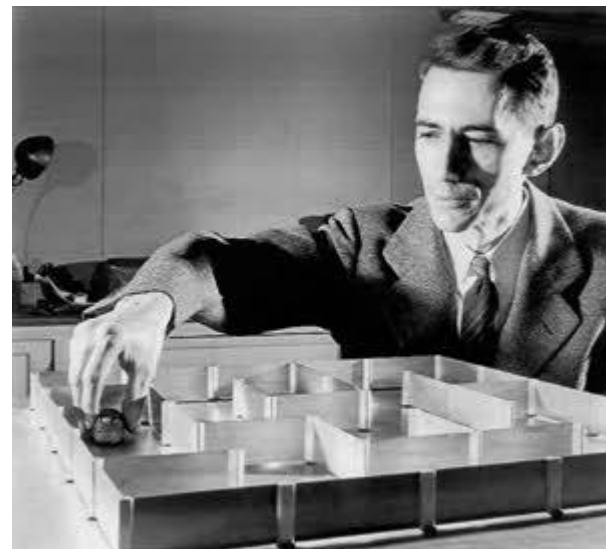
- obecné pozorování:
 - čím větší je šířka pásma, tím více je přijatý signál „podobný“ tomu, který byl odeslán
 - ... a tím lépe lze poznat, co má reprezentovat
 - při určité rychlosti změn by deformace přijatého signálu byly již tak velké, že by se nedalo poznat, co má signál reprezentovat
- závěr:
 - čím větší je šířka přenosového pásma, tím větší je „schopnost přenášet data“
 - platí to obecně, pro přenosy v základním i přeloženém pásmu
 - závislost mezi šířkou pásma a „schopností přenášet data“ je v zásadě lineární!!!
- šířka přenosového pásma má charakter "zdroje" (suroviny)
 - za šířku pásma se platí !!!
- intuitivní závislost je zřejmá
 - ale jaká je exaktní forma závislosti?
 - je-li pevně dána šířka pásma, na čem závisí maximální dosažitelná přenosová rychlost?
 - viz $v_{\text{přenosová}} = v_{\text{modulační}} * \log_2(n)$
 - lze libovolně dlouho zvyšovat n ?
 - ne, nelze – někde existuje hranice!!
 - na čem tato hranice závisí?
 - jak moc/málo závisí na dokonalosti našich technologií?

Shannonův teorém

- Claude Elwood Shannon (1916-2001):
 - zakladatel moderní teorie informace
- tzv. Shannonův teorém (Shannon-Hartley):
 - ona hranice je dána
 - šířkou přenosového pásma
 - „kvalitou“ přenosové cesty
 - (odstupem signálu od šumu)
 - číselně:

$$\max(v_{\text{přenosová}}) = \text{šířka pásma} * \log_2(1 + \text{signál/šum})$$

- důsledky:
 - závislost na šířce pásma je lineární !!!
 - naopak zcela chybí závislost na použité technologii !!!
 - nezáleží na použité modulaci
 - nevyskytuje se tam počet rozlišovaných stavů přenášeného signálu
 - závěr: technologiemi lze "vylepšovat" využití nějaké přenosové kapacity, ale jen do hranice dané Shannonovým teorémem



vyjadřuje se jako
 $10 \log_{10}(S/N)$ [dB]

příklad: místní smyčka

- místní smyčka

- metalické vedení (kroucený pár), vedoucí od zákazníka k telefonní ústředně
- používá se v rámci veřejné telefonní sítě, pro realizaci účastnické přípojky
 - v této roli je zde vybudováno umělé frekvenční omezení: 300 až 3400 Hz!!!
 - tj. šířka pásma: 3,1 kHz
 - kvalitní linka má odstup signál:šum = 1000:1 (tj. 30 dB)
- dle Shannonova teorému pak vychází maximální přenosová rychlost cca 30 kbps

- žádný modem pro analogové telefonní linky nemůže nikdy fungovat rychleji!!!

- modemy 33 kbps:

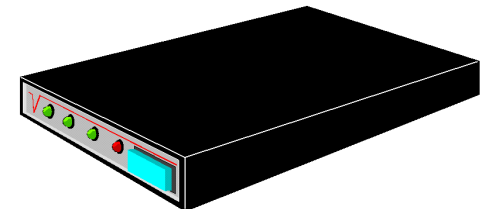
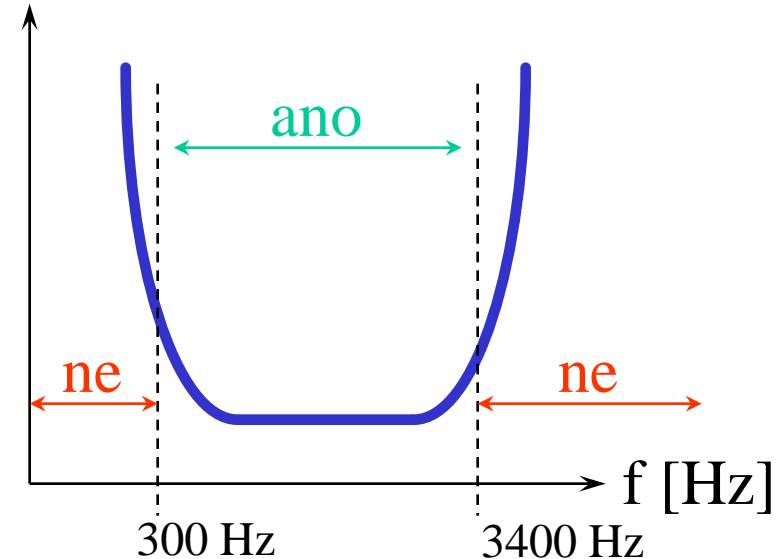
- dokáží využít i okrajové části pásma („boky“ vanové křivky)
 - jakoby: uměle si „roztahují“ původní šířku pásma 3,1 kHz

- modemy 56 kbps:

- dokáží fungovat jen "proti" digitální telefonní ústředně
 - pro ně je umělé omezení šířky pásma na 3,1 kHz odstraněno úplně

„pokažení“

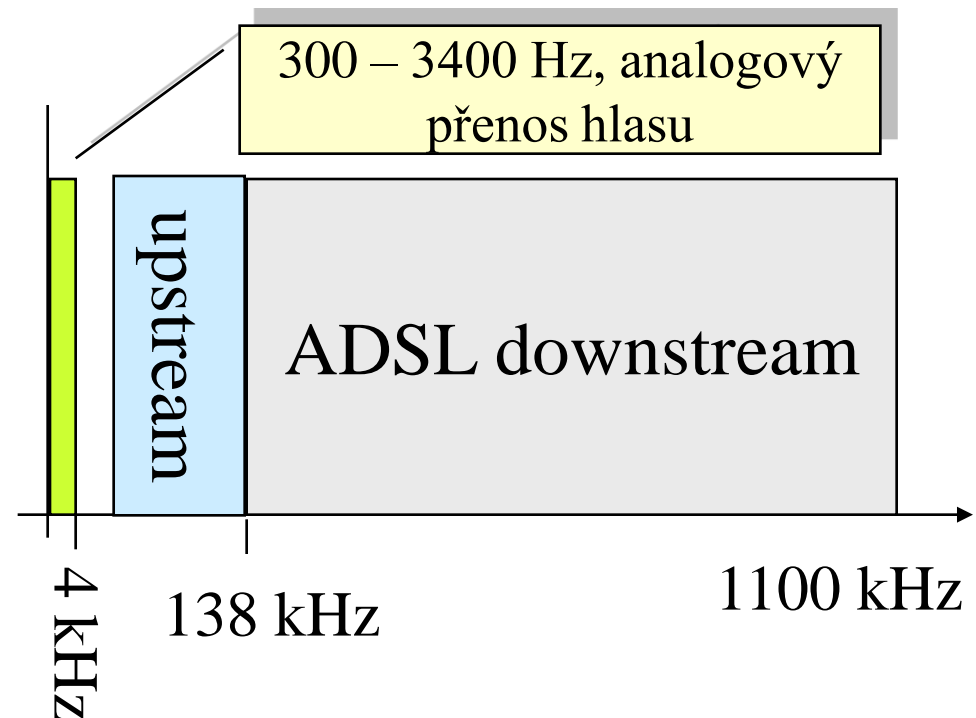
tzv. vanová křivka



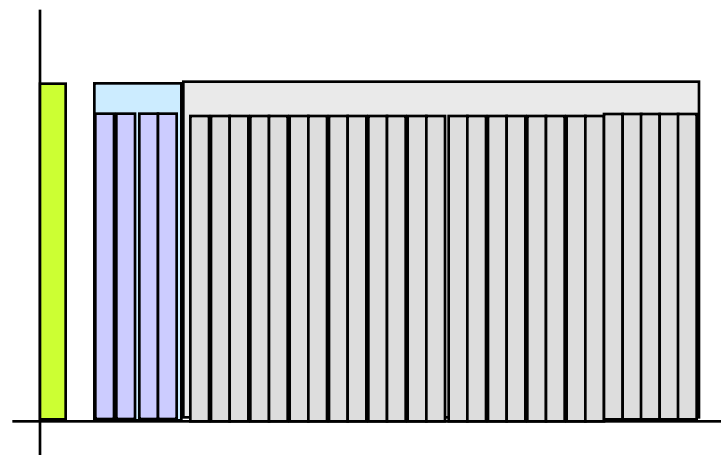
příklad: technologie ADSL

- pozorování:
 - "přenosový potenciál" místních smyček je podstatně větší
 - dán jejich šířkou přenosového pásma (rozsahem frekvencí, které jsou schopné přenášet)
 - hlasové služby (telefonie) využívají jen zlomek tohoto přenosového potenciálu
 - viz umělé omezení 300 až 3400 Hz
- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), z rodiny xDSL
 - je pokusem o maximální využití přenosových schopností metalického vedení (např. místní smyčky)
 - využívají se vyšší frekvenční pásma a propracovanější techniky modulace
 - tj. podstatně větší šířka pásma
 - nižší frekvence nechává ADSL volné (pro využití k tradičnímu analogovému přenosu hlasu - telefonování)

- co dokáže (základní varianta) ADSL?
 - max. rychlost směrem k uživateli (downstream): 6 až 8 Mbps
 - max. rychlost směrem od uživatele (upstream): 600 až 800 kbps
 - dosah: jednotky kilometrů

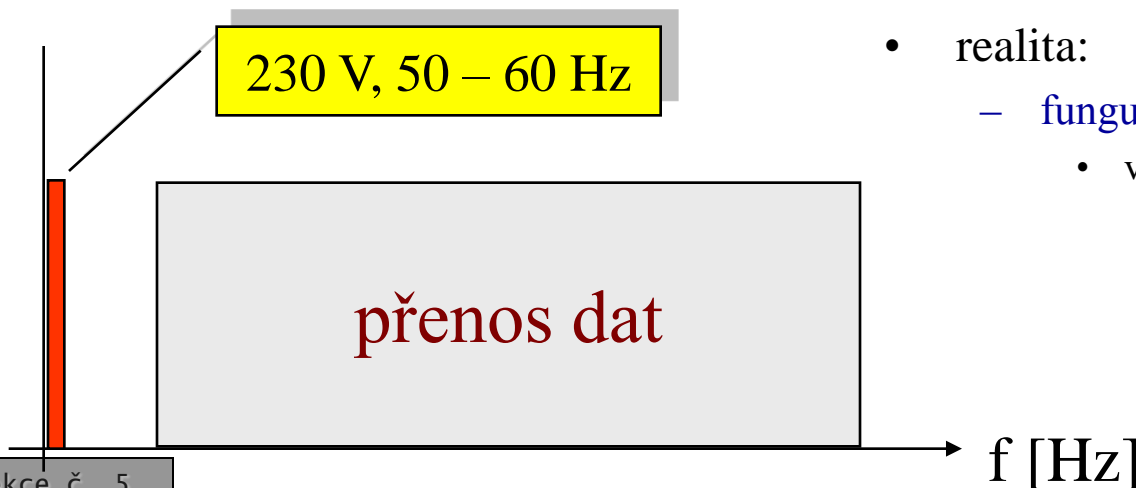


- technika **DSM – Discrete Multi-Tone**
- použité frekvenční pásmo se rozdělí na určitý počet podpásem
 - typicky 256 o šířce 4,3kHz
 - jde fakticky o tzv. frekvenční multiplex
- v každém pásmu je na jednu nosnou frekvenci namodulován datový signál o rychlosti 6,5 až 50 kbits
 - pomocí QAM (kvadrurní amplitudové modulace QAM)
 - nosné jsou od sebe 4,3125MHz
- na nižších kmitočtech je menší útlum metalického páru a větší odstup signálu od šumu
 - tj. lze dosáhnout vyšší přenosovou rychlost,
 - na vyšších kmitočtech je rychlost nižší.
- vylepšením je **OFDM**
 - ortogonální frekvenční multiplex
 - jednotlivé nosné se "trochu" překrývají



datové přenosy po napájecí síti (PLC, Powerline Communications)

- přenosovým médiem jsou (silové) rozvody
 - 230V
- stejný princip jako u ADSL
 - určitý rozsah nižších frekvencí je ponechán pro "původní využití"
 - přenos napájecího napětí 220V (230V) o frekvenci 50-60 Hz
 - vyšší frekvence jsou využity pro datové přenosy
- specifikum: silné a měnící se rušení
 - řešení: využívané frekvenční pásmo je rozděleno na úzká "dílčí pásma" jako u ADSL
 - v těchto dílčích pásmech je přenášen modulovaný signál (nosná)
- systém neustále vyhodnocuje rušení v jednotlivých dílčích pásmech
 - podle situace adaptivně rozkládá "zátěž" (přenášená data) mezi jednotlivá dílčí pásma
- původní předpoklad:
 - bude se to používat k překlenutí poslední míle
- realita:
 - funguje to v rámci posledního metru
 - v rámci bytů, za domovním transformátorem

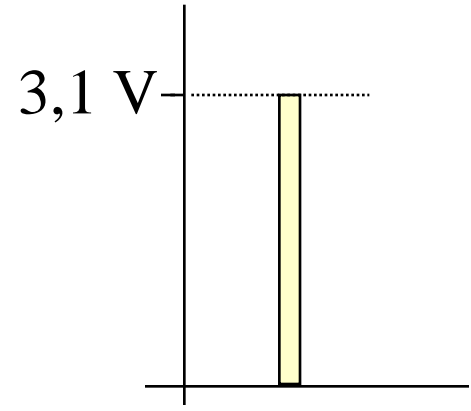


analogový a digitální přenos

- motto: "*vždy se přenáší něco analogového ...*"
 - přenášený signál má vždy charakter analogové veličiny (proudu, napětí, světla ...)
- záleží na tom, jak vyhodnocuji (interpretuji) to, co je přeneseno
- analogový přenos:
 - **zajímá mne konkrétní hodnota přenášené veličiny**
 - např. okamžitá hodnota napětí, proudu apod.
- digitální přenos:
 - **zajímá mne, zda hodnota přenášené veličiny spadá do jednoho intervalu či do druhého intervalu**
 - např. zda je hodnota napětí větší než 0,6V či nikoli
- důsledky:
 - **analogový přenos není nikdy ideální !!!**
 - nedokáže přenést hodnotu s ideální přesností
 - **digitální přenos je (může být) ideální !!!!!**

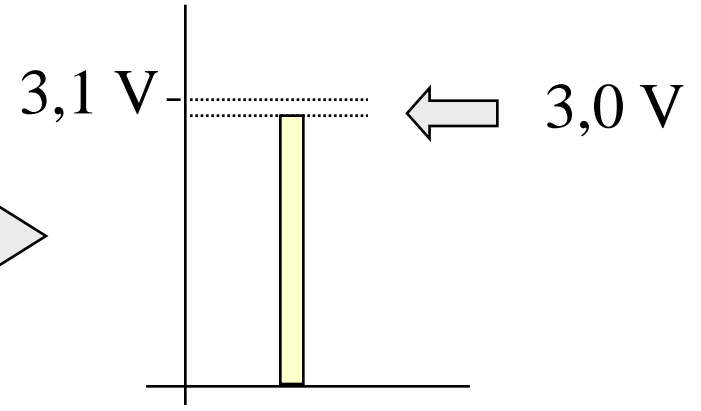


představa analogového a digitálního přenosu



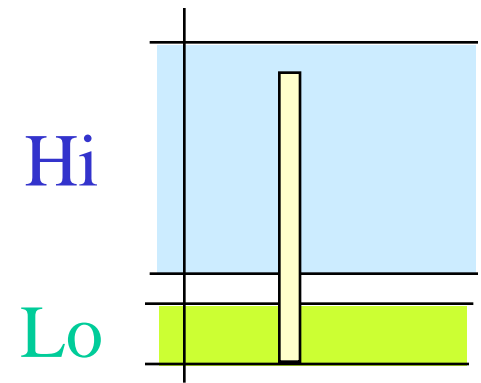
odesílá se "hodnota 3,1"

analogový přenos
vliv útlumu

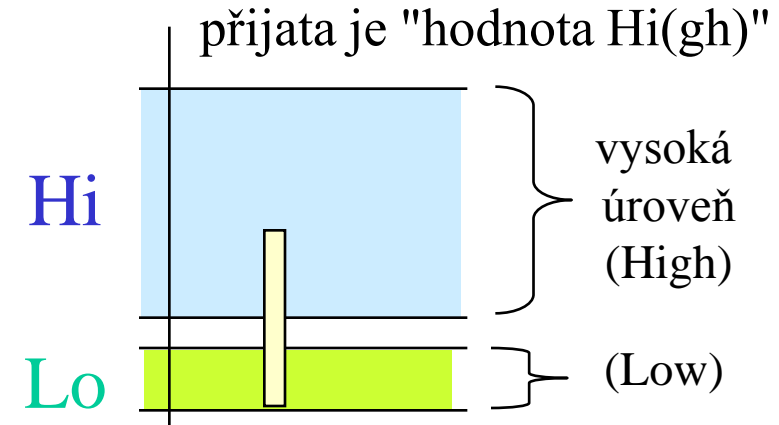


přijata je "hodnota 3,0"

odesílá se "hodnota Hi(gh)"



digitální přenos
vliv útlumu

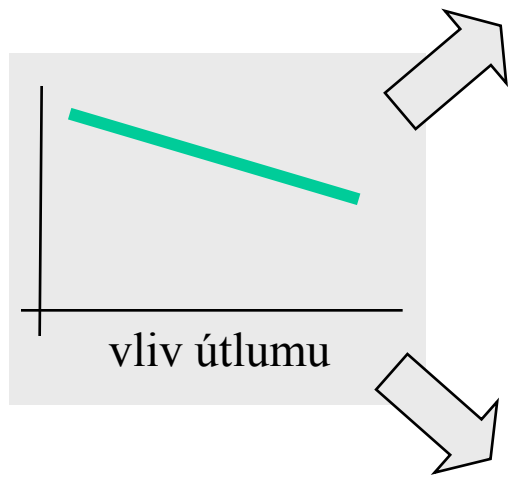


představa analogového a digitálního přenosu

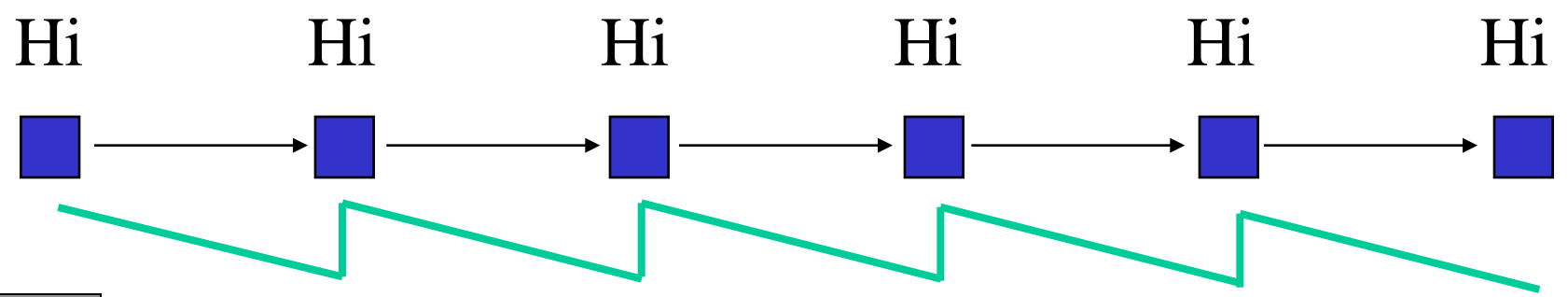


analogový přenos: vliv útlumu se kumuluje

obdobně pro další vlivy (zkreslení atd.)



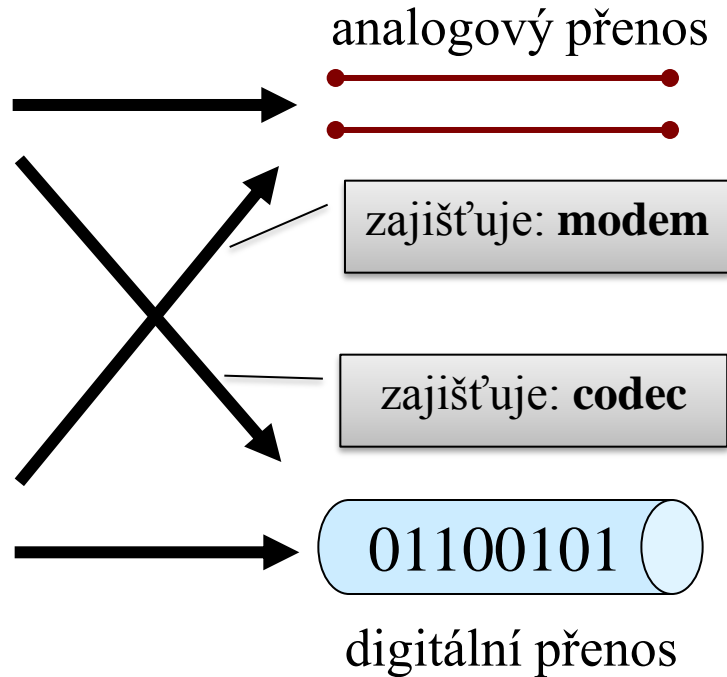
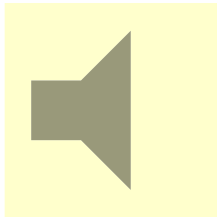
digitální přenos: vliv útlumu se neprojeví



analogový vs. digitální přenos

MODEM = MODulator&DEModulator

analogová data



CODEC = COder&DECoder

DSP – Digital Signal Processing
(obecně: zpracování analogového signálu
pomocí digitálních technologií)

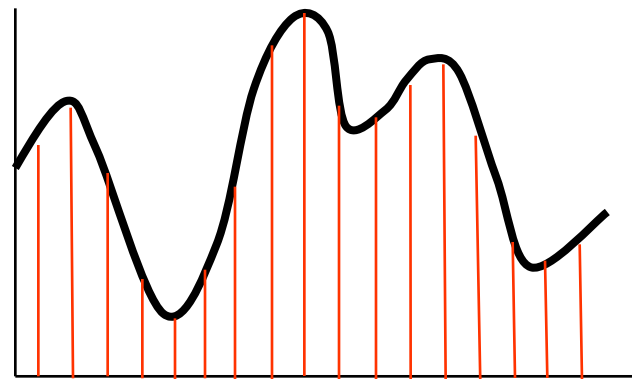
- přenos digitálních dat po analogovém přenosovém kanále:
 - data jsou "namodulována" na (analogový) signál **pomocí modemu**
 - a na druhé straně zpětně "demodulována"
- přenos analogových dat (např. hlasu, obrazu) po digitálním přenosovém kanále:
 - analogový signál musí být zdigitalizován (zakódován), **pomocí tzv. kodeku**
 - a na druhé straně "rekonstruován" (dekódován)

výhody digitálního přenosu (oproti analogovému)

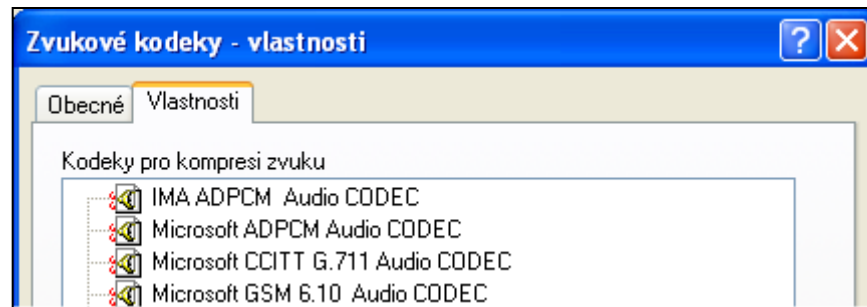
- může být ideální
 - "kvalita" dat se při přenosu (zpracování) nemění
 - viz například kopírování zvukových nahrávek v dig. podobě
 - chybovost lze účinně minimalizovat
 - četnost výskytu chyb lze snižovat, není to "příliš drahé"
- umožňuje dosahovat vyšších přenosových rychlostí
 - díky "vyšší toleranci" ke změnám přenášeného signálu (pokud zůstane ve stejném diskretním intervalu)
- může být bezpečnější
 - přenášená data lze snáze šifrovat/kódovat,
 - lze snáze zajistit spolehlivost přenosu
- je efektivnější
 - má větší "výtežnost"
 - umožňuje "přenést více", při stejné "spotřebě zdrojů"
 - příklad:
 - analogové TV vysílání: na 1 frekvenční kanál se "vejde" jen jeden TV program
 - digitální TV vysílání: na 1 frekvenční kanál se "vejde" více Tv a R programů současně (celý tzv. multiplex)
- dokáže přenášet různé druhy provozu souběžně
 - hlas, obraz i "čistá data"
 - otázkou je kvalita služeb!!!
- přenesená data lze snadno zpracovávat
 - "následné" zpracování přenesených dat
 - komprimace dat pro přenos
 - ...

jak se digitalizuje analogový signál?

- obecný postup:
 - analogový signál se "vyvzorkuje"
 - sejmou se vzorky momentální hodnoty analogového signálu
 - velikost každého (analogového) vzorku se vyjádří jako (digitální) číslo
 - získaná (digitální) data se komprimují a event. dále upravují
- přitom se musí vyřešit otázky jako:
 - jak často vzorkovat původní analogový signál
 - kolik bitů je potřeba na vyjádření hodnoty každého vzorku
 - jak co nejvíce zmenšit objem bitů, který takto vzniká



- výsledky digitalizace (pomocí různých kodeků) mohou generovat výrazně odlišné datové toky
- příklad: telefonní hovor
 - v pevné síti (PCM): 64 000 b/s
 - v mobilní síti: 12-13 kbit/s
 - VOIP: i pod 10 kbps



Nyquistův vzorkovací teorém

- otázka:
 - jak často je třeba vzorkovat (analogový) signál, aby jej bylo možné zase správně rekonstruovat?
 - aby se z něj "nic neztratilo"?
- odpověď (Harry Nyquist, 1928):
 - je nutné to dělat nejméně 2x za periodu ($f_{\text{vzorkovací}} > 2 f_{\text{signálu}}$)
 - aby se nic neztratilo
 - rychlejší vzorkování již nepřinese žádnou "informaci navíc"
 - nemá smysl to dělat rychleji
 - důsledek:
 - **optimální je vzorkovat právě 2x za periodu**

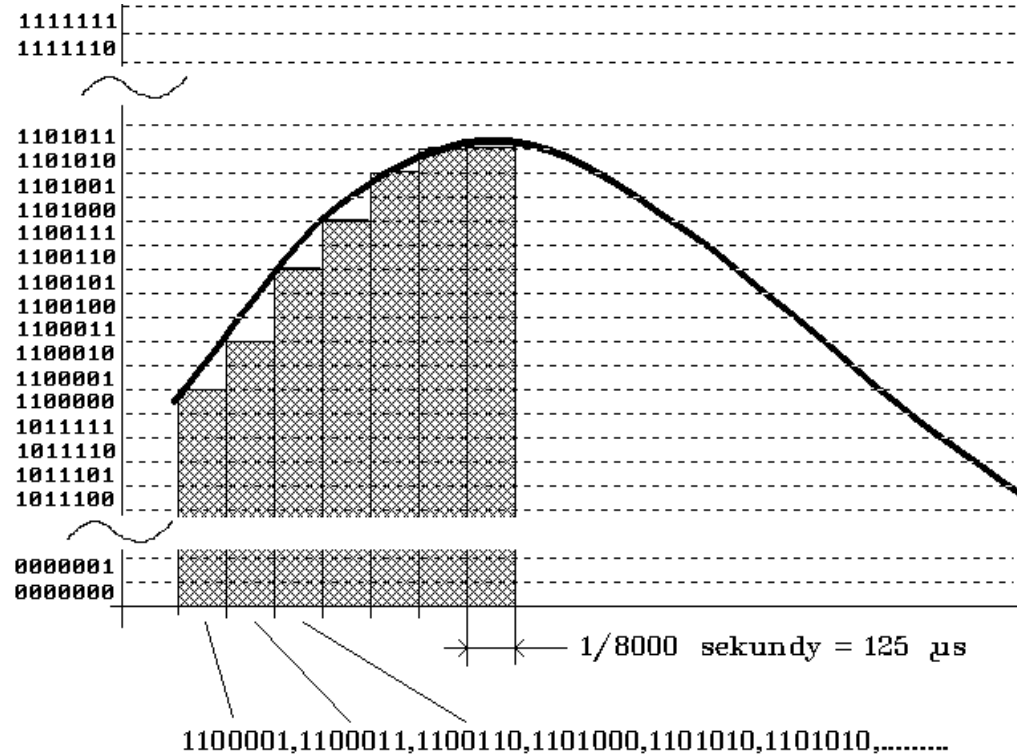


Harry Nyquist,
1889-1976,
pracoval v AT&T,
Bellovy laboratoře

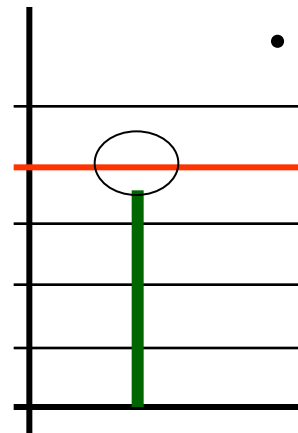
- týká se "frekvenčně omezeného signálu"
 - jeho Fourierův rozvoj končí na určité frekvenci f
- H. Nyquist formuloval v roce 1928
 - formálně dokázal až Claude Shannon, v roce 1949
 - tzv. Nyquistův teorém
- důsledek:
 - modulační rychlost je (optimálně) rovna dvojnásobku šířky pásma
 - !!! jen pokud pásmo začíná od 0 !!!

příklad: digitalizace hlasového hovoru (v telefonii)

- telefonní hovor je přenášen v rozsahu 300 až 3400 Hz
 - lidské ucho vnímá (obvykle) 20 až 20 000 Hz
 - ale 300 až 3400 Hz stačí pro srozumitelnost hovoru
 - z kapacitních důvodů je žádoucí, aby šířka pásma byla co nejmenší
- pro potřeby digitalizace se uvažuje větší rozsah
 - 0 až 4000 Hz
- podle Nyquistova teorému:
 - je třeba vzorkovat 8000x za sekundu (2x4000 Hz)
 - tj. 1x za 125 mikrosekund

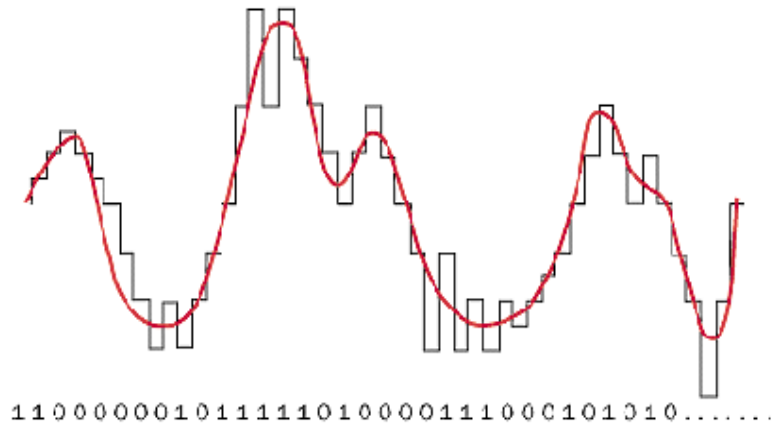


- získané vzorky jsou stále analogové
 - dochází k jejich "kvantizaci" – přiřazení k nejbližší diskretní úrovni
 - přitom vzniká tzv. kvantizační šum



příklad: digitalizace hlasového hovoru (techniky PCM, DPCM, ADPCM)

- po sejmutí každého vzorku (a jeho kvantizaci) musí být jeho hodnota (velikost) vyjádřena digitálně
 - jako číselná hodnota
- technika PCM (Pulse Coded Modulation):
 - vezme se "absolutní velikost" vzorku
 - a vyjádří jako 8-bitové číslo
 - 8 bitů, 8000x za sekundu dává datový tok (rychlost) 64 000 bitů za sekundu
 - princip pochází z roku 1937 !!!
- technika DPCM (diferenciální PCM)
 - pracuje s rozdílem mezi po sobě jdoucími vzorky
 - generuje datový tok 48 kbps



- technika ADPCM (adaptivní DPCM)
 - jako diferenciální PCM, pracuje s rozdíly mezi po sobě jdoucími vzorky
 - podle velikosti rozdílu mění kvantizační úroveň
 - při malých změnách "zjemňuje"
- v mobilních sítích se používají kodeky
 - FR (Full Rate), EFR (Enhanced Full Rate): 13 kbit/s na hovor
 - + 9,8 kbit/s na opravu chyb
 - HR (Half Rate): 6,5 kbit/s na hovor
 - + 4,9 kbit/s na opravu chyb

terminologická poznámka, aneb: co je broadband?

- klasické pojetí:
 - šířka pásma (bandwidth) je ryze "analogový" pojem
 - představuje rozsah (využitelných) frekvencí
 - měří se v Hz
 - odpovídá "spotřebě", nikoli "přínosu", resp. "efektu"
 - přenosová rychlost (transmission speed) je "digitální" pojem
 - představuje (nominální) rychlost přenosu bitů
 - měří se v bitech/s
 - odpovídá "přínosu", resp. "efektu"
- důsledek:
 - pojmy **narrowband** (úzkopásmový) a **broadband** (širokopásmový) vypovídají pouze o "spotřebě", nikoli o "efektu"
 - **vysokorychlostní** (high-speed) vypovídá o "efektu", nikoli o "spotřebě" 
 - i na broadbandu lze dosahovat nízkých rychlostí !!!
- alternativní pojetí:
 - šířka pásma (bandwidth) je jak analogový, tak digitální pojem
 - "analogová" šířka pásma = rozsah frekvencí
 - měří se v Hz
 - "digitální" šířka pásma = přenosová rychlost
 - měří se v bitech/s
- důsledek:
 - pojem broadband (široké pásmo, širokopásmový) lze vykládat i ve smyslu vysokých přenosových rychlostí
- otázka:
 - které pojetí je správné?
 - názor: pouze klasické
 - je správné volání po broadbandu? Máme mít broadbandovou strategii, nebo strategii vysokorychlostního přístupu?
 - co zajímá uživatele?
 - rozsah využitelných frekvencí, nebo dosahovaná přenosová rychlost?