



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



## Lekce 5: Základy datových komunikací

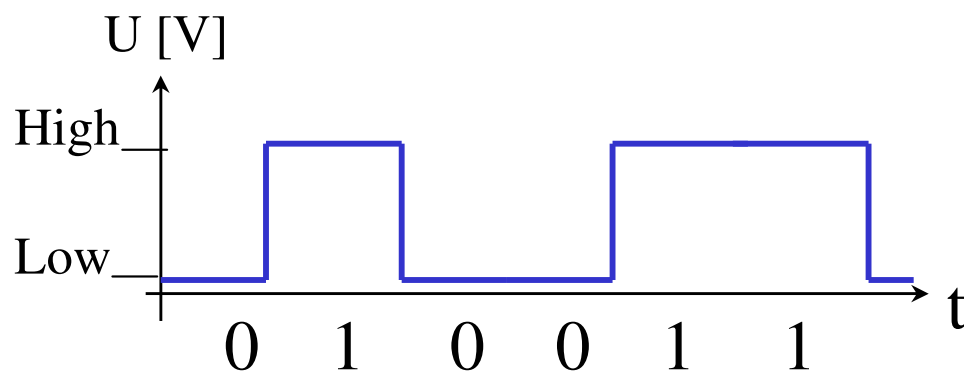
*Jiří Peterka, 2004*

# 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:
  - spread spectrum, frequency hopping
  - ISDN, xDSL, ....
  - GPRS, HSCSD, EDGE, ....
  - DOCSIS, ....

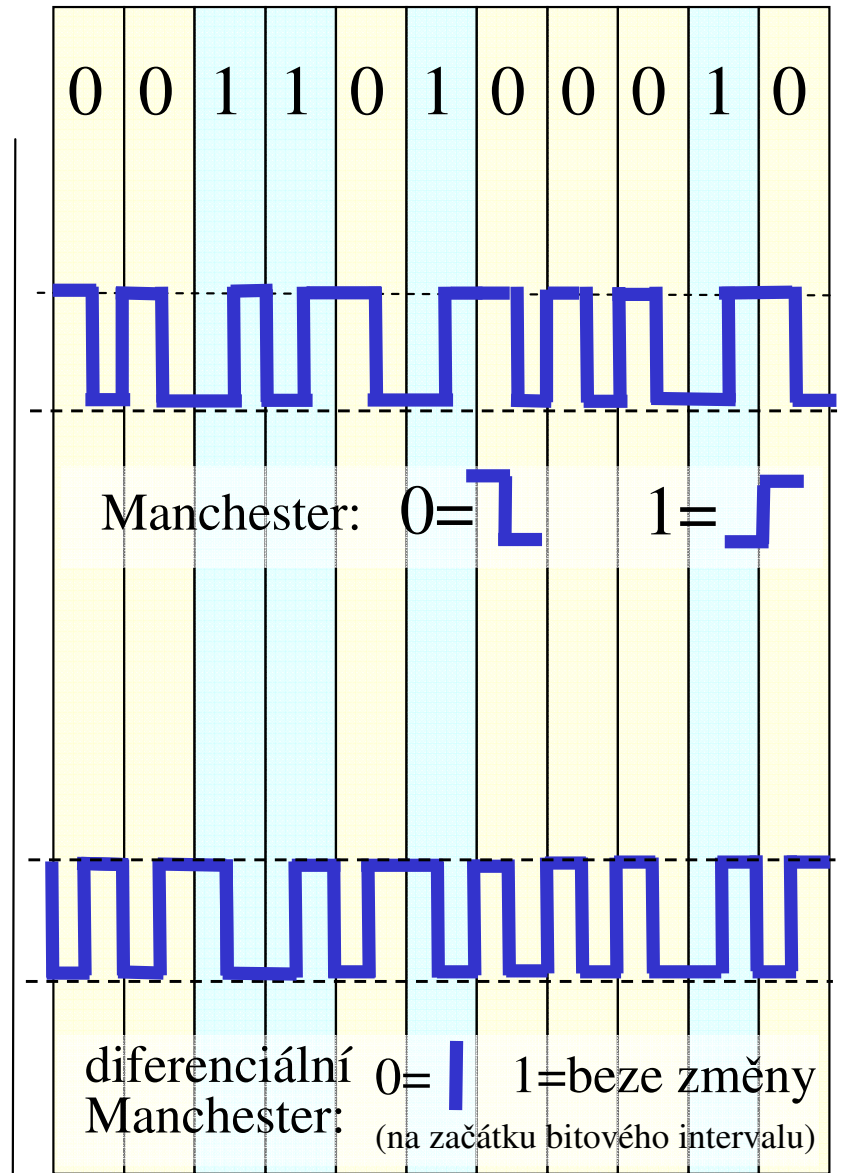
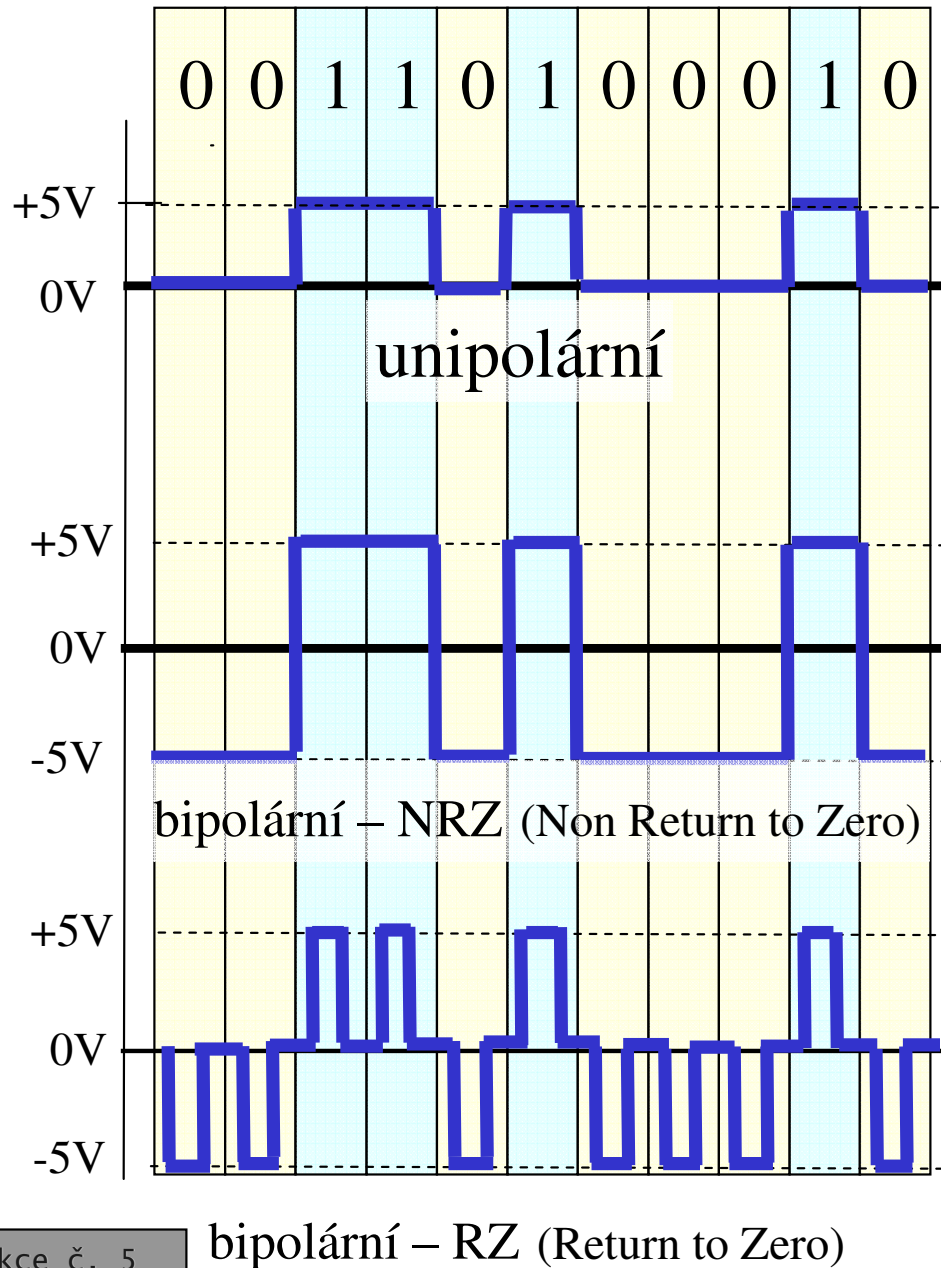
# přenos v základní pásmu (baseband, nemodulovaný přenos)

- jde o takový druh přenosu, při kterém je vstupní signál okamžitě převáděn na přenosné médium
  - bez činnosti modulačního prvku
- tj. přenáší se rovnou "data",
- představa:
  - přenášené bity se reprezentují:
    - napět'ovými 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)

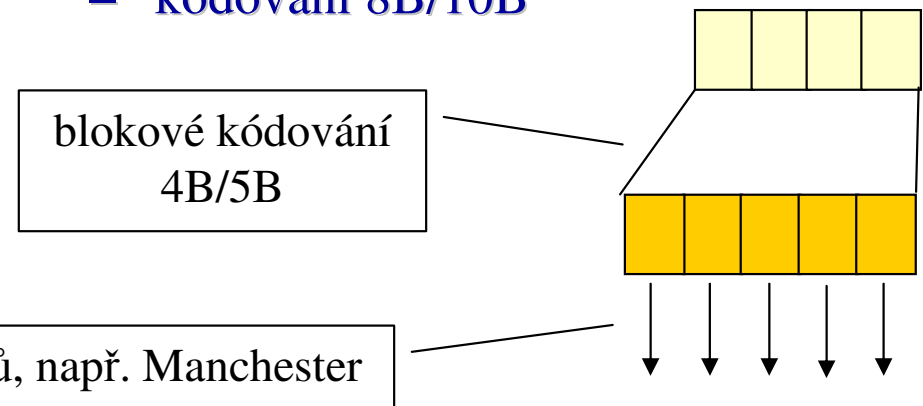
# Příklady kódování



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

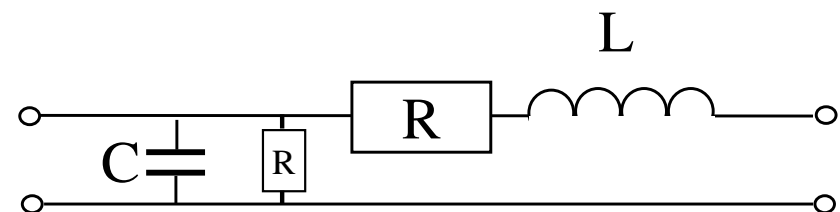
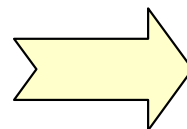
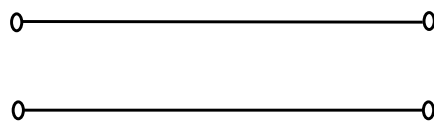
# Druhy kódování

- 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"
  - předřazené kódováním jako je Manchester, dif. Manchester, NRZI ..
  - kóduje určitý počet (užitečných) bitů do většího počtu 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
    - umožňuje udržet rovnoměrný počet 0 a 1
  - kódování 8B/10B

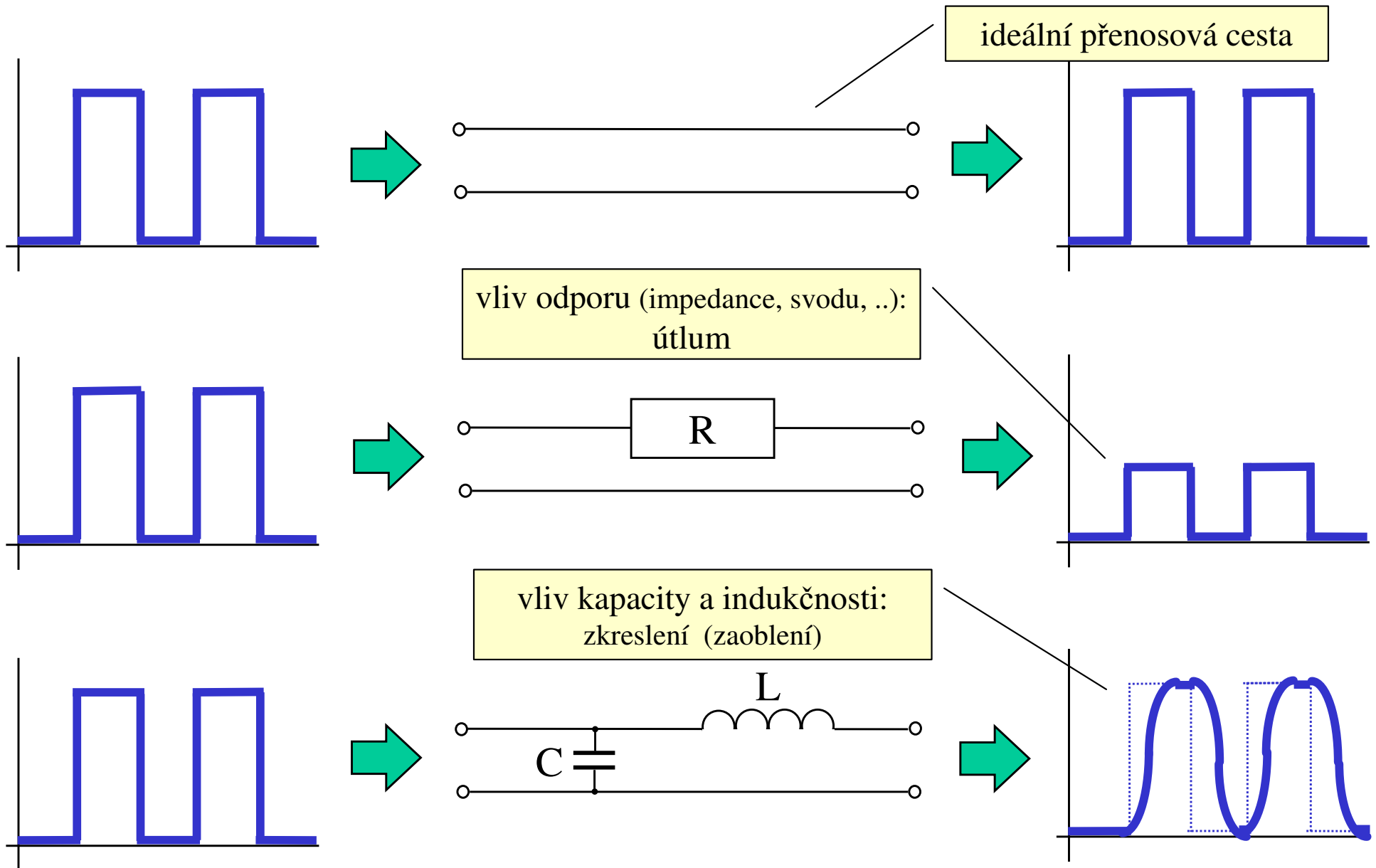


# Reálné vlastnosti přenosových cest

- 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



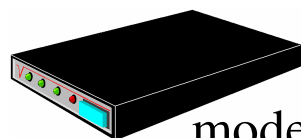
# Přenos v přeloženém pásmu (broadband, modulovaný přenos)

- řešení:
    - (problému s "pokaženým signálem" při přenosu v základním pásmu)
  - přenášet takový signál, jaký projde 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

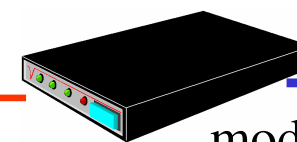
– v praxi se pro modulaci i demodulaci používají zařízení zvaná **MODEM** (MODulator/DEModulator)

v základním pásmu (nemodulovaný přenos) | v přeloženém pásmu (modulovaný přenos)

0111001



modem



modem

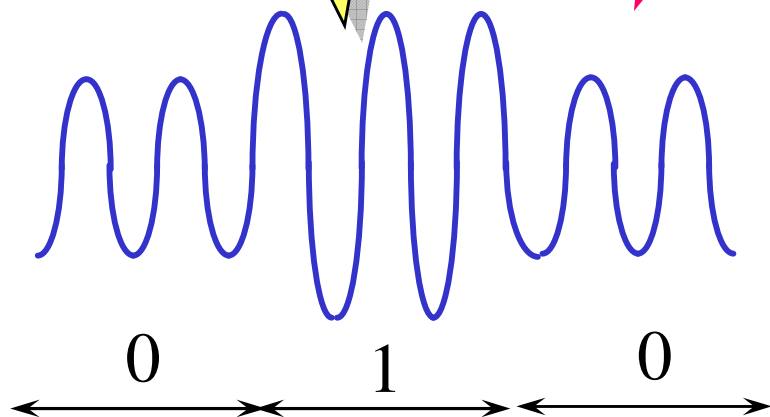
0111001



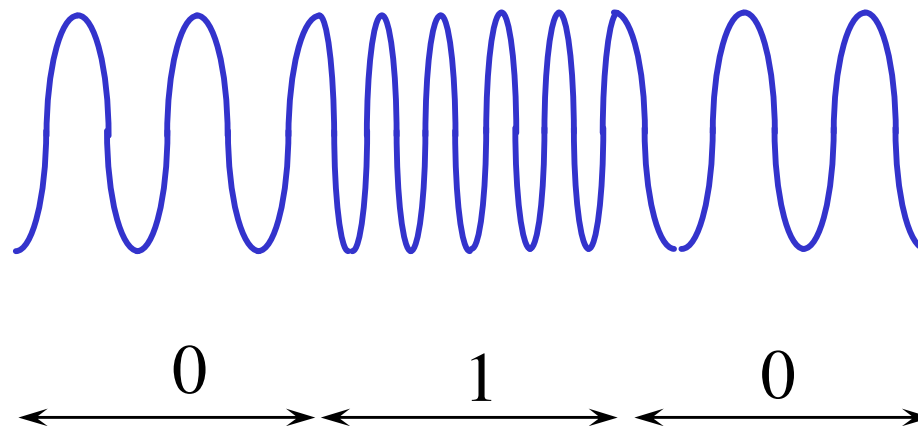
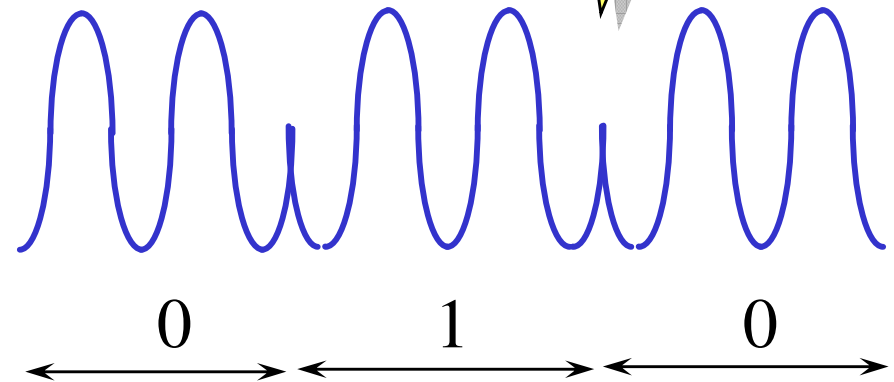
# Představa modulace

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

amplitudová  
modulace  
(mění se  $A$ )



fázová  
modulace  
(mění se  $\phi$ )



frekvenční  
modulace  
(mění se  $\omega$ )

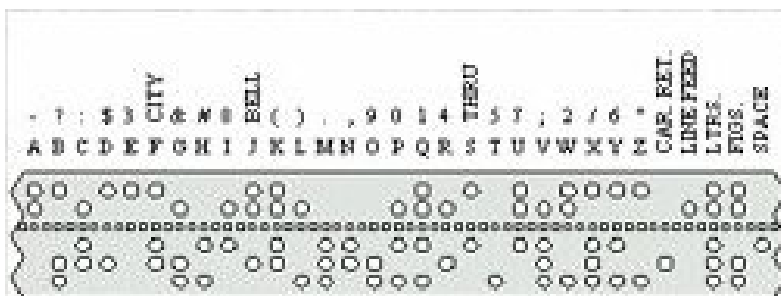
# Modulační rychlost (baud rate)

- 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"
    - vynalez 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

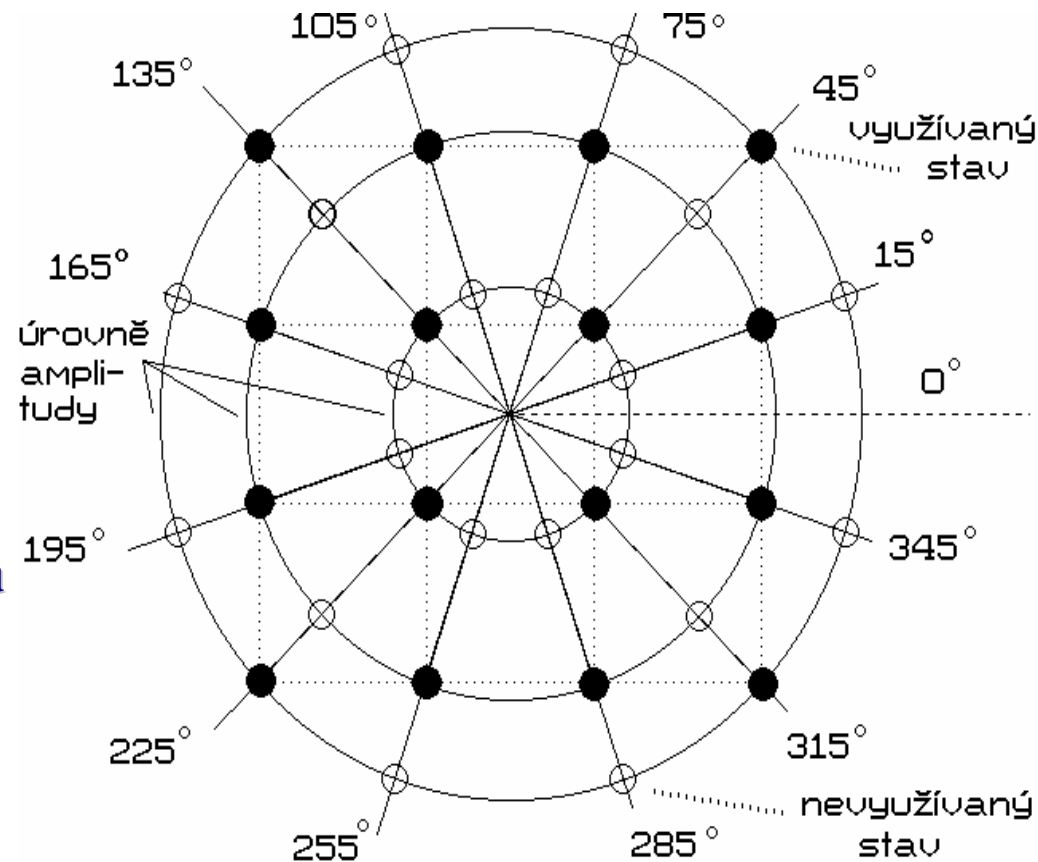
- vícestavová modulace
  - modulovaný (nosný) signál má určitý počet stavů ( $n$ )
  - pak každý z těchto stavů může reprezentovat  $\log_2(n)$  bitů
    - přesněji: každý přechod do nového stavu může reprezentovat přenos  $\log_2(n)$  bitů
  - příklad:
    - modemy V.34: až 3200 změn za sekundu, každá "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:
    - QAM: 12xfázová, 3x amplitudová
- pozorování:
  - počet stavů nelze libovolně zvyšovat, protože by příjemce by jej již 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: QAM – 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,
- QAM 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 přenese 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 = ½ 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) přenese 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, .....

Průměrné rychlosti ADSL s agregací 1:50  
říjen 2004

	256/64	512/128	1024/256
Contactel	-	383	777
Czech On Line (Volný)	-	298	431
České Radiokomunikace	-	349	771
Český Bezdrát	-	-	737
Český Telecom (IOL)	147	330	668
GTS	149	258	452
IPEX	-	300	-
Nextra	156	430	572
SkyNet	-	313	-
Tiscali	-	335	-
Průměr všech měření	148	338	598
% z objednané rychlosti	58%	66%	58%


*Pokud proběhlo méně než 50 měření u dané služby a 1st, nejsou výsledky vzhledem k malému vzorku dat uváděny.*

zdroj: měření serveru DSL.CZ

# Zvyšování přenosové rychlosti

- co dělat, když potřebujeme zvýšit přenosovou rychlost?

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

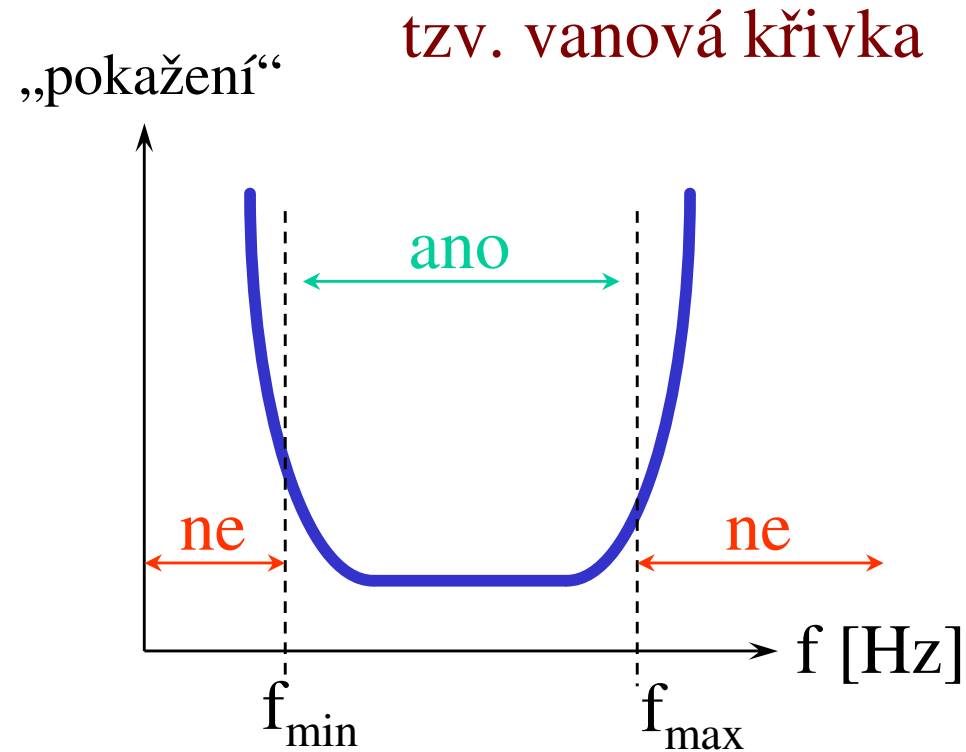
- 1. možnost: zvyšovat n (počet stavů)
  - jde o "intenzivní přístup"
    - "cestu zdokonalování"
    - zlepšování technologie
  - nejde to dělat donekonečna 
  - při pevně dané modulační rychlosti
  - intuitivně:
    - při překročení určitého stupně modulace (počtu stavů přenášeného signálu) již příjemce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



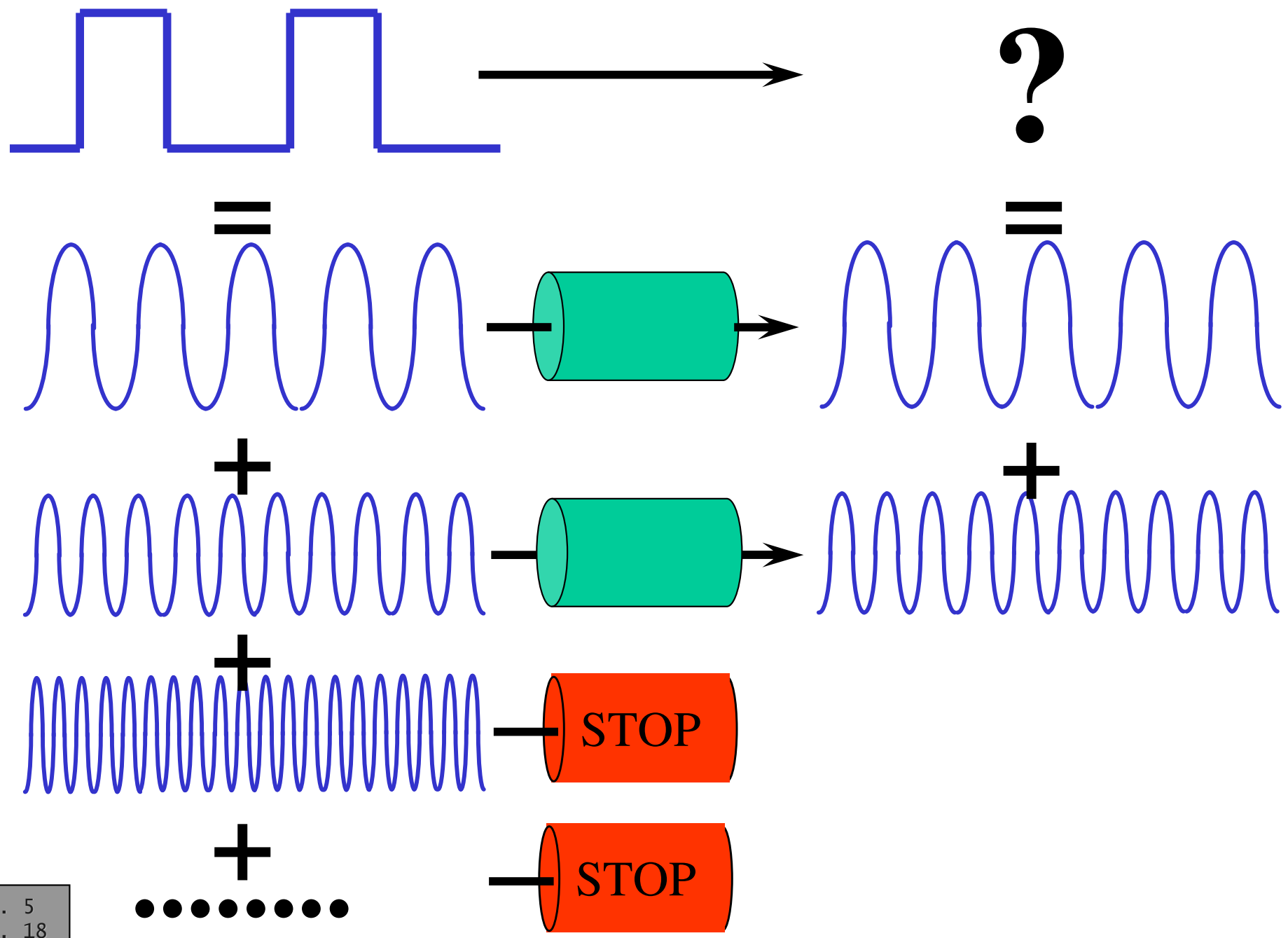


# Vliv šířky přenosového pásma na přenášený signál (obecného průběhu)

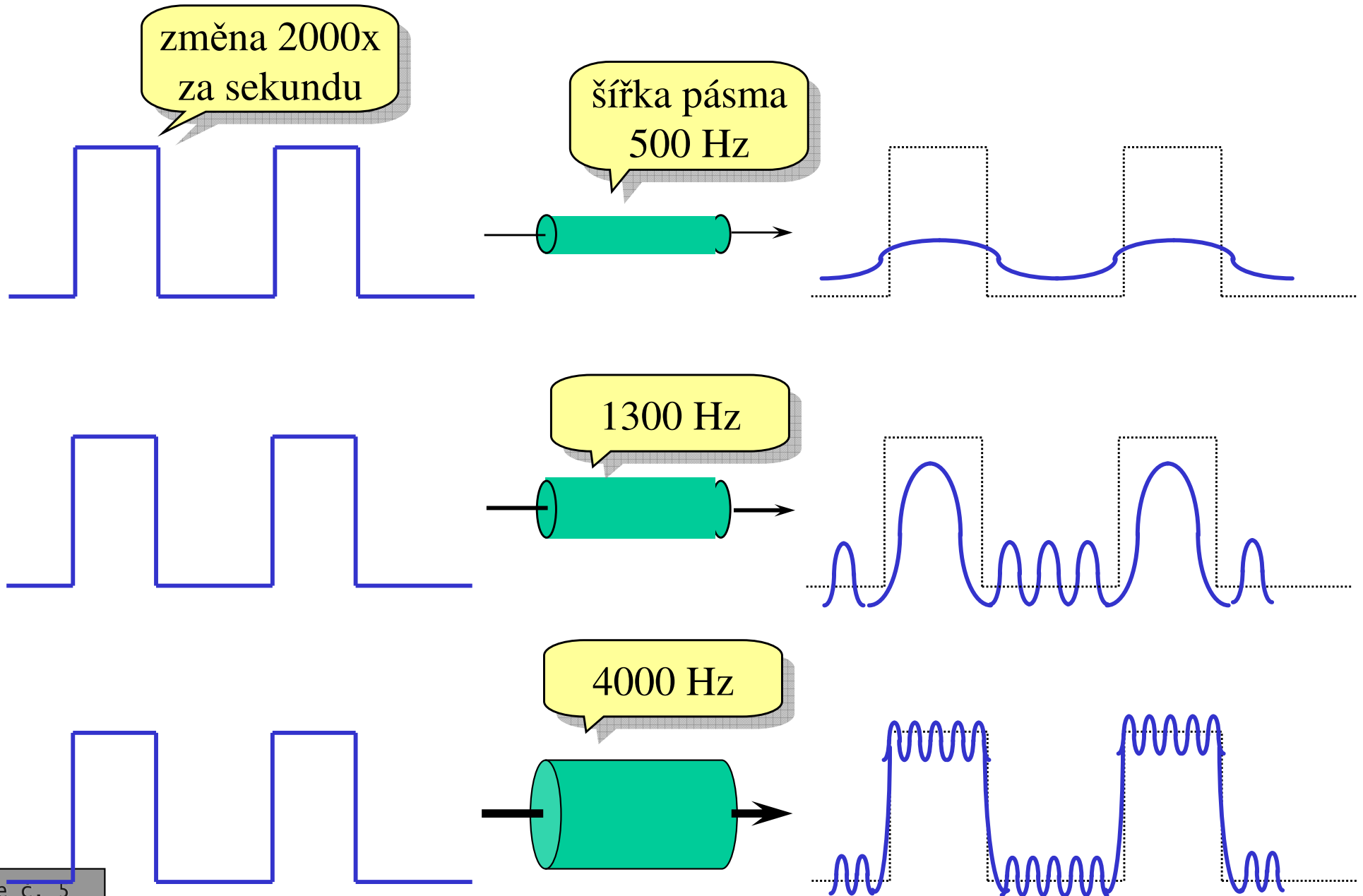
- pro signály harmonického (sinusového) průběhu je závislost na šířce přenosového pásma zřejmá
  - pokud frekvence harmonického signálu spadá do šířky pásma, signál "projde" (beze změn)
  - jinak neprojde vůbec
- pro signály obecného průběhu je efekt omezené šířky přenosového pásma složitější
- pomůcka:
  - (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



# 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]

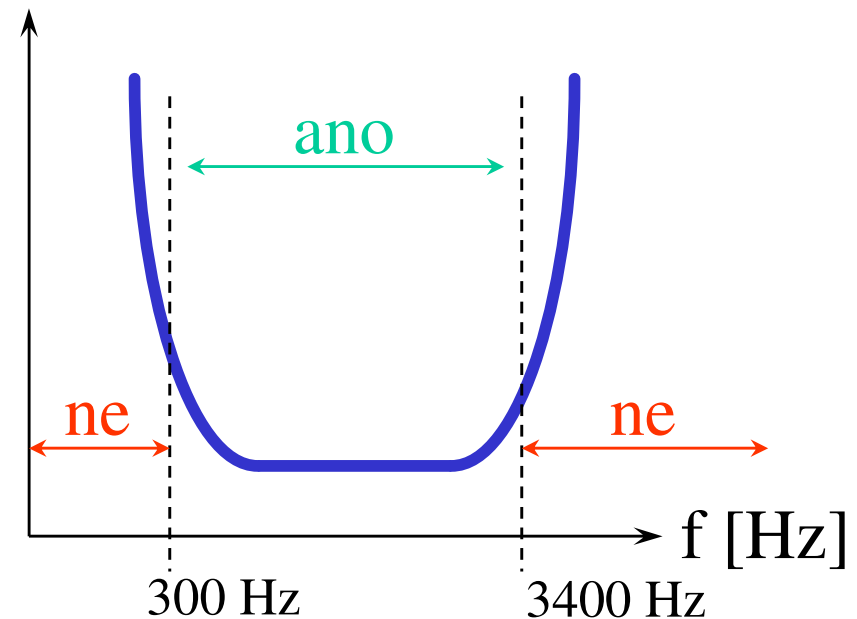
# Příklad: místní smyčka

- místní smyčka

- metalické vedení (kroucený pár), vedoucí od zákazníka k telefonní ústředně
  - používá se pro 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!!!

„pokažení“

tzv. vanová křivka

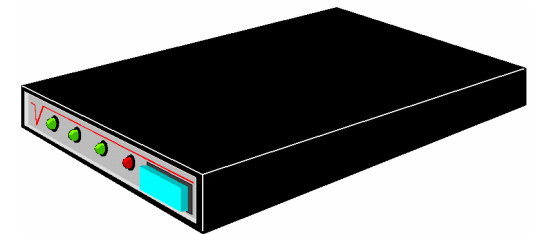


- modemy 33 kbps:

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

- modemy 56 kbps:

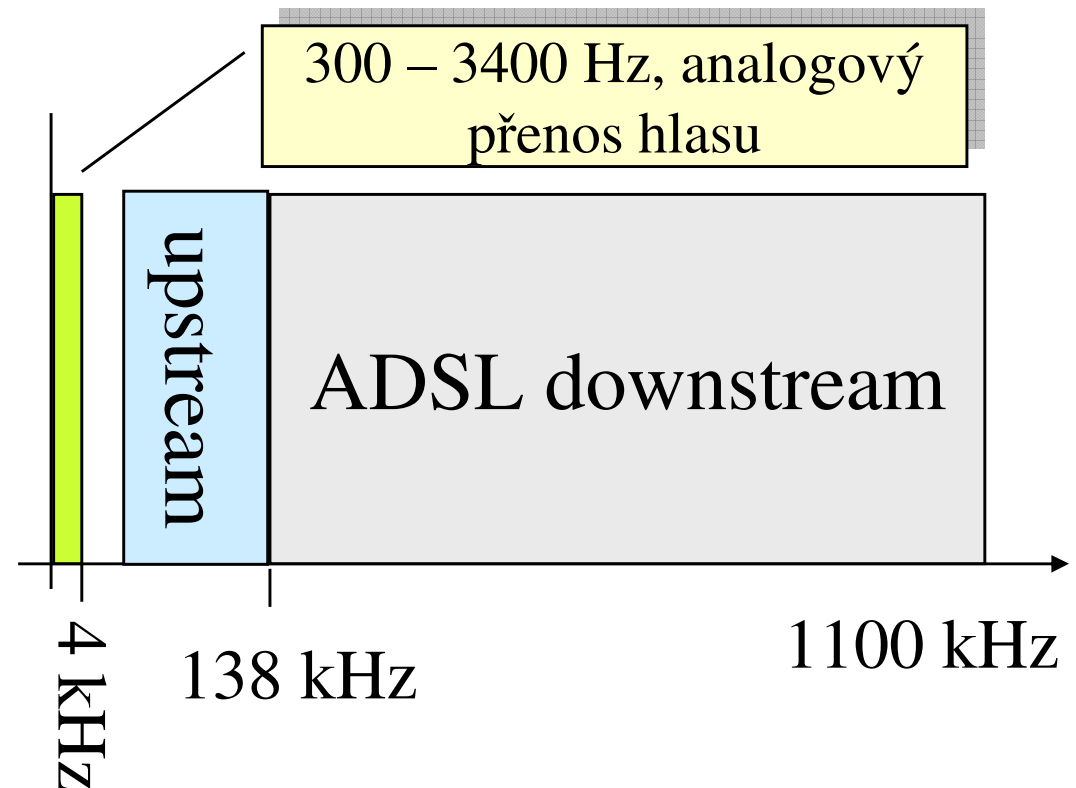
- dokáží fungovat jen "proti" digitální telefonní ústředně
  - pro ně je umělé omezení šířky pásma na 3,1 kHz odstraněno úplně



# Příklad: technologie ADSL

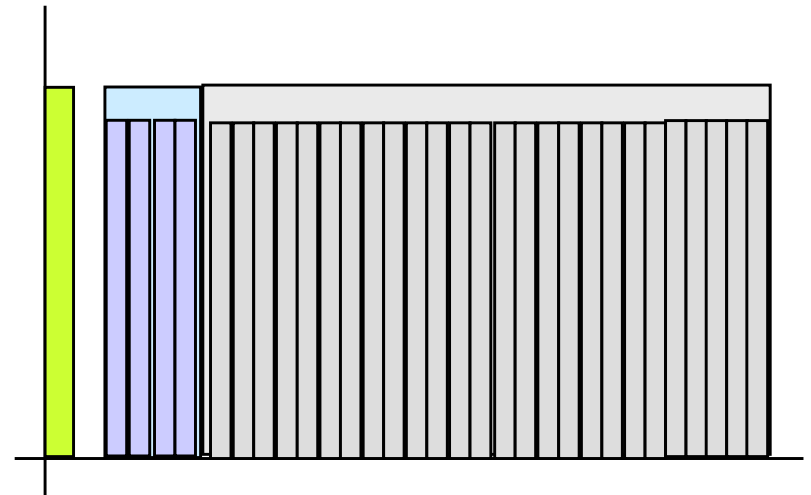
- pozorování:
  - "přenosový potenciál" místních smyček je podstatně větší
    - dán jejich šířkou přenosového pásma (rozsahem frekvencí, které jsou schopné přenášet)
    - hlasové služby (telefonie) využívají jen zlomek tohoto přenosového potenciálu
      - viz umělé omezení 300 až 3400 Hz
- ADSL (Asymmetric 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 ADSL?
  - max. rychlost směrem k uživateli (downstream): 6 až 8 Mbps
  - max. rychlost směrem od uživatele (upstream): 600 až 800 kbps
  - dosah: 2 až 5 km ???



# Modulace v ADSL

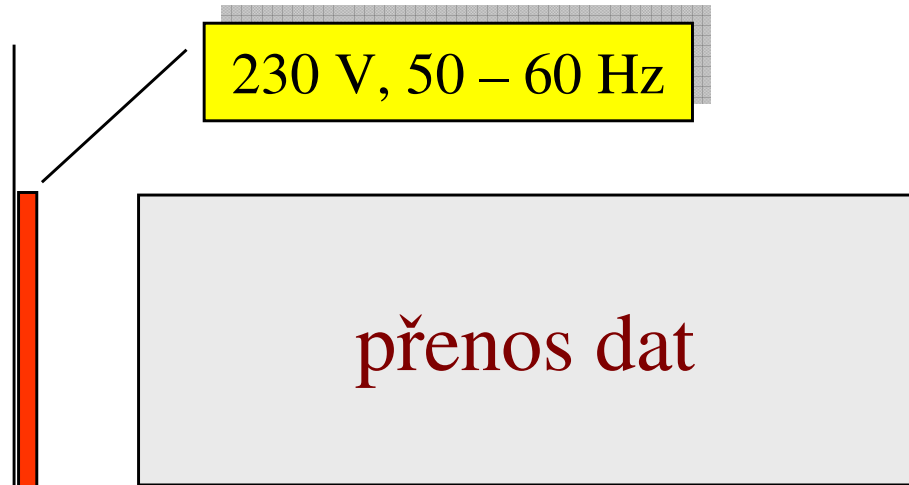
- technika **DSM – Discrete Multi-Tone**
- použité frekvenční pásmo se rozdělí na určitý počet podpásem
  - typicky 256 o šířce 4,3kHz
  - jde fakticky o tzv. frekvenční multiplex
- v každém pásmu je na jednu nosnou frekvenci namodulován datový signál o rychlosti 6,5 až 50 kbits
  - pomocí QAM (kvadrurní 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.





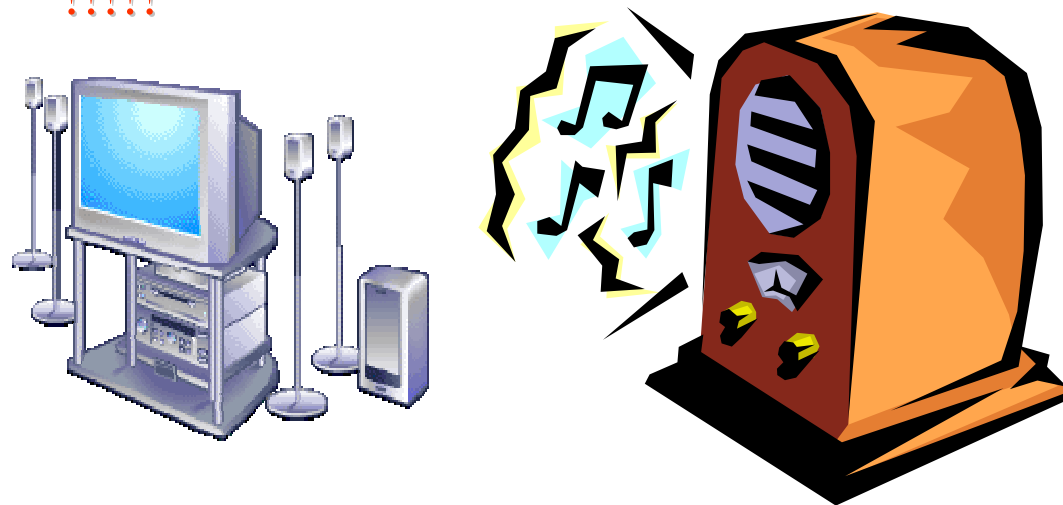
# Datové přenosy po napájecí síti (PLC, Powerline Communications)

- 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

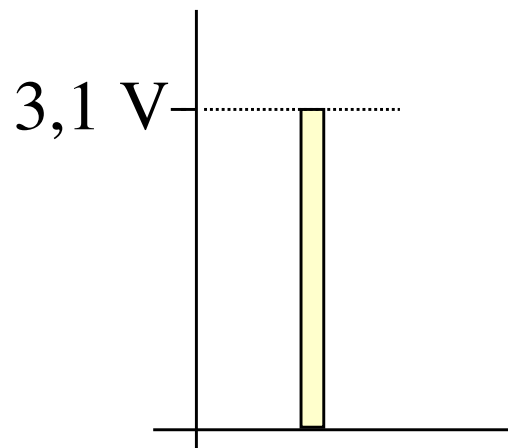


# Analogový a digitální přenos

- 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 !!!!!

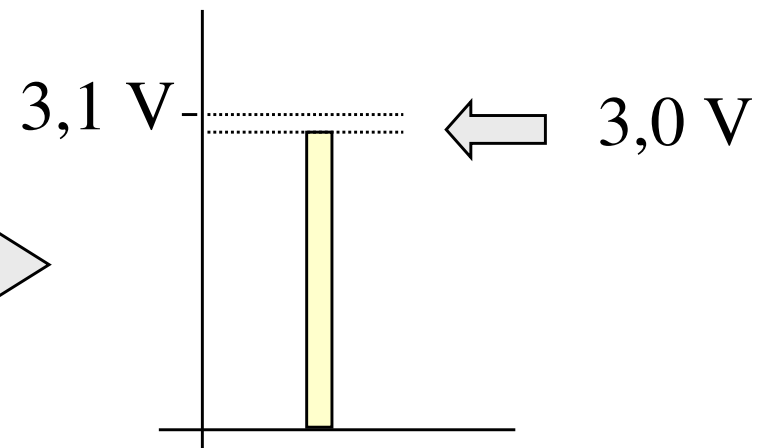


# Představa analogového a digitálního přenosu



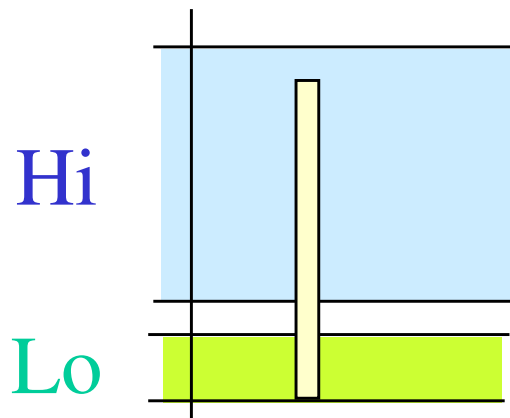
odesílá se "hodnota 3,1"

analogový přenos  
vliv útlumu

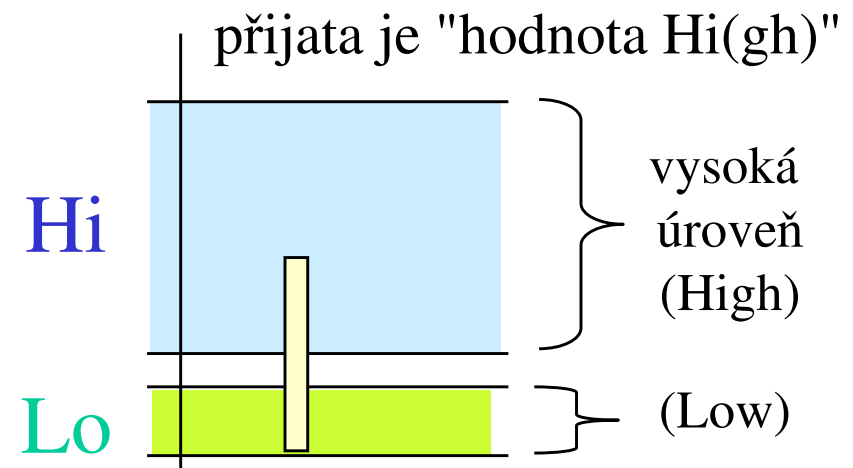


přijata je "hodnota 3,0"

odesílá se "hodnota Hi(gh)"



digitální přenos  
vliv útlumu



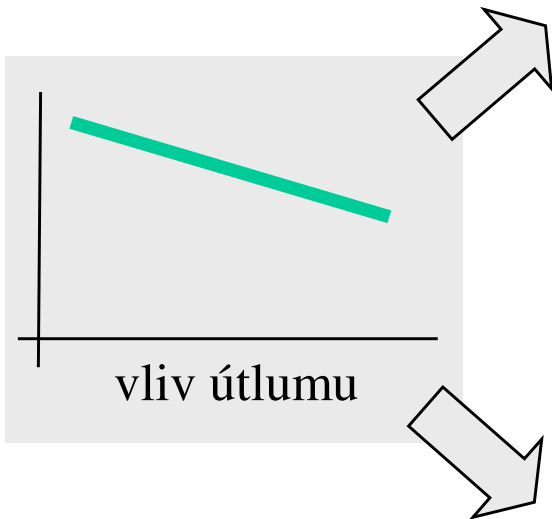
přijata je "hodnota Hi(gh)"

# Představa analogového a digitálního přenosu

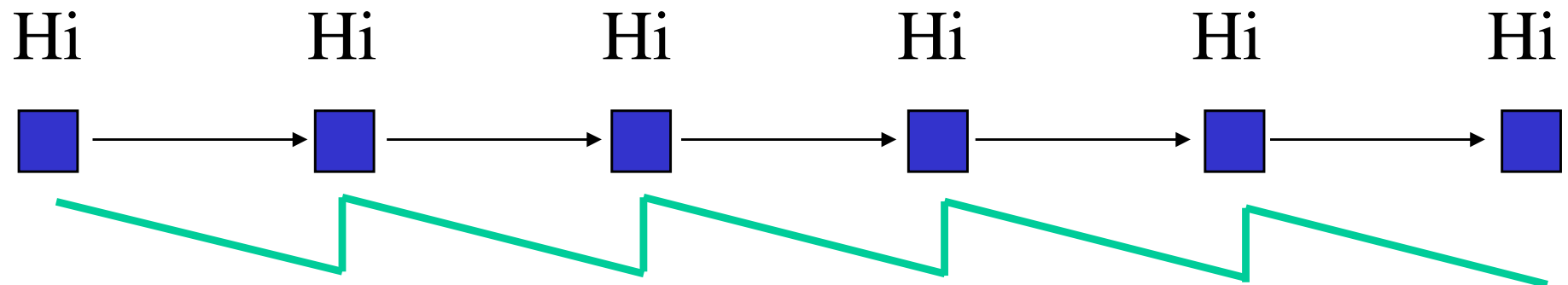


**analogový přenos: vliv útlumu se kumuluje**

obdobně pro další vlivy (zkreslení atd.)



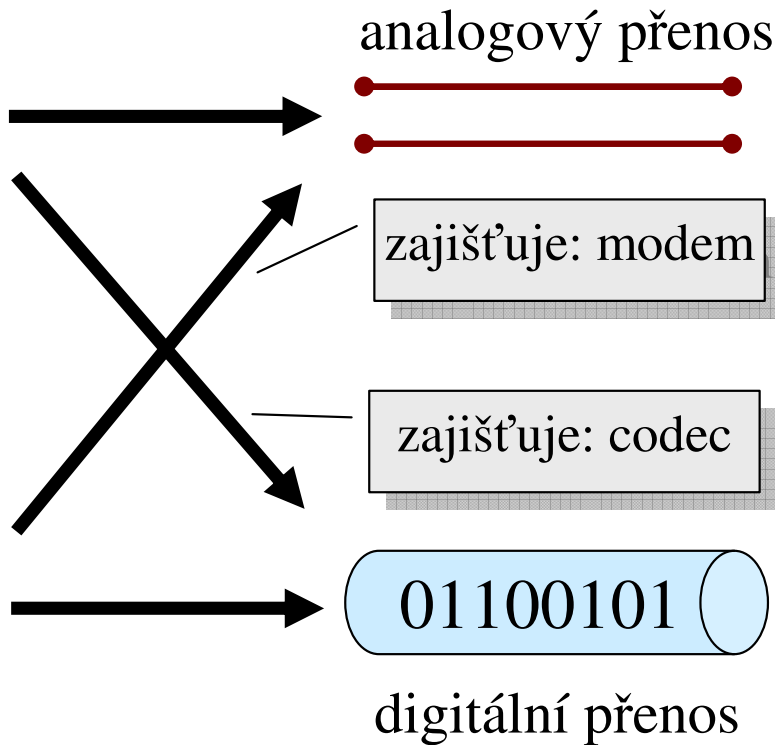
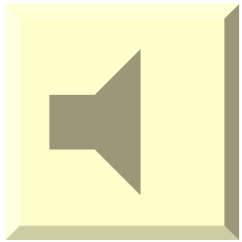
**digitální přenos: vliv útlumu se neprojeví**



# Analogový vs. digitální přenos

MODEM = MODulator&DEModulator

analogová data



CODEC = COder&DECoder

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

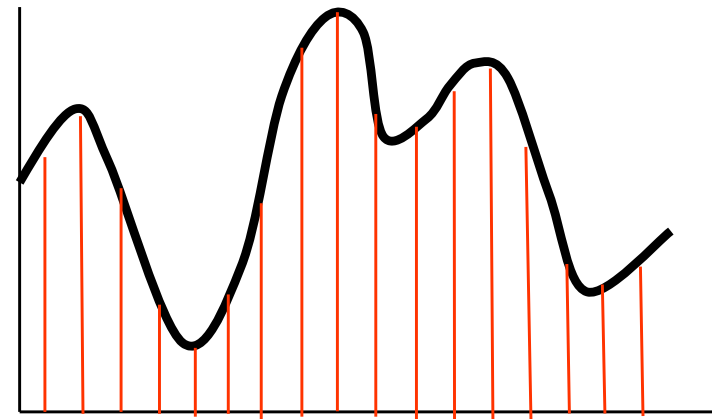
- přenos digitálních dat po analogovém přenosovém kanále:
  - data jsou "namodulována" na (analogový) signál pomocí modemu
  - a na druhé straně zpětně "demodulována"
- přenos analogových dat (např. hlasu, obrazu) po digitálním přenosovém kanále:
  - analogový signál musí být zdigitalizován (zakódován),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

# Výhody digitálního přenosu (oproti analogovému)

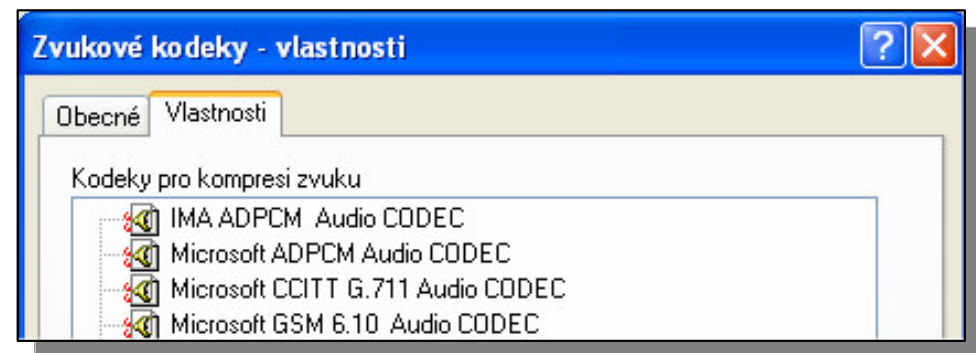
- může být ideální
  - "kvalita" dat se při přenosu (zpracování) nemění
    - viz například kopírování zvukových nahrávek v dig. podobě
  - chybovost lze účinně minimalizovat
    - četnost výskytu chyb lze snižovat, není to "příliš drahé"
- umožňuje dosahovat vyšších přenosových rychlostí
  - díky "vyšší 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**



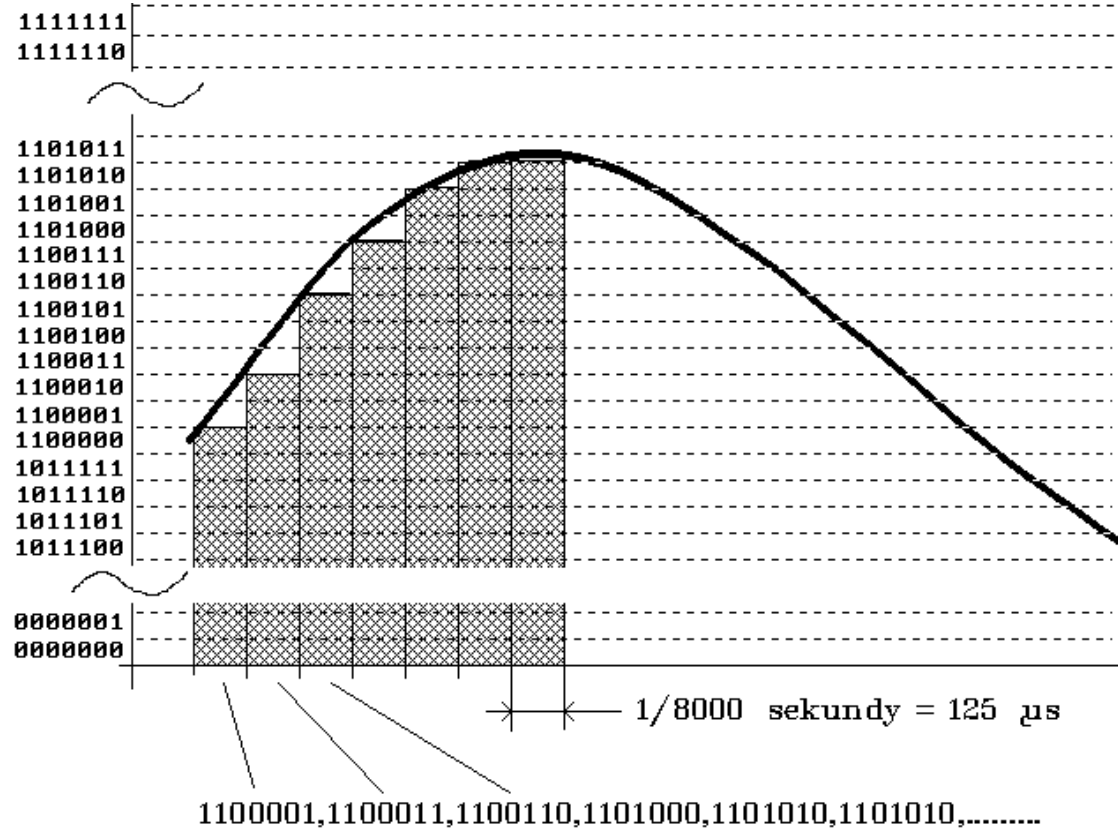
Harry Nyquist,  
1889-1976,  
pracoval v AT&T,  
Bellovy laboratoře

- 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, Shannonův teorém
- důsledek:
  - modulační rychlost je (optimálně) rovna dvojnásobku šířky pásma
    - !!! jen pokud pásmo začíná od 0 !!!

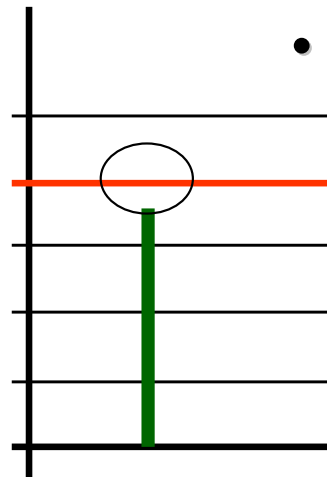


# Příklad: digitalizace hlasového hovoru (v telefonii)

- 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

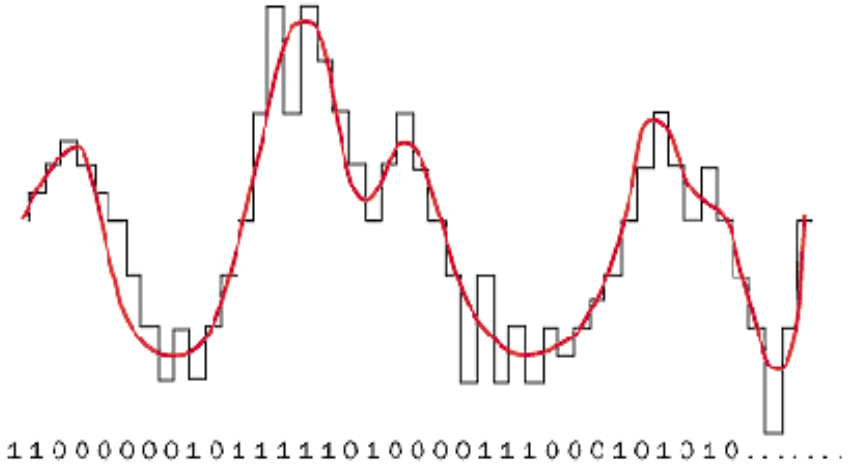


- získané vzorky jsou stále analogové
  - dochází k jejich "kvantizaci" – přiřazení k nejbližší diskrétní úrovni
    - přitom vzniká tzv. kvantizační šum



# 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