

# Počítačové sítě, v. 3.1



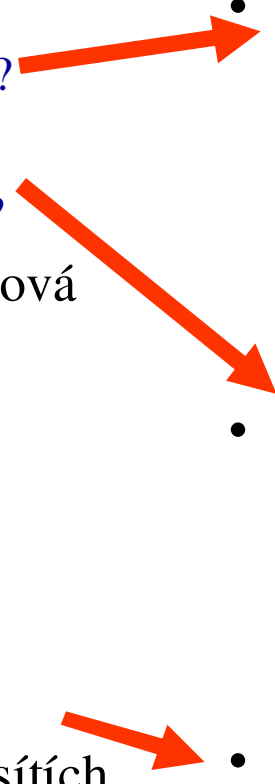
Katedra softwarového inženýrství,  
Matematicko-fyzikální fakulta,  
Univerzita Karlova, Praha



## Lekce 5: Základy datových komunikací

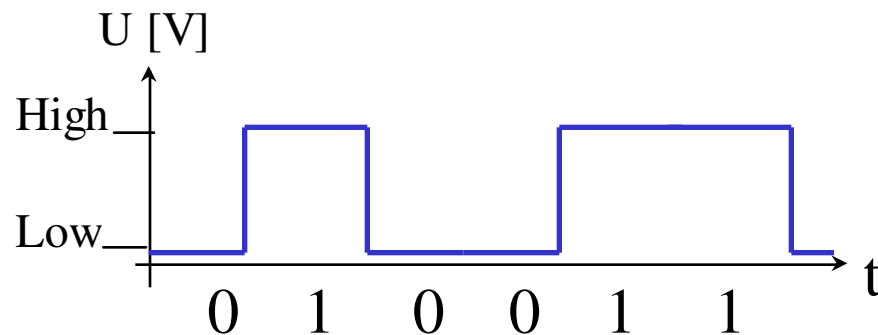
*Jiří Peterka, 2005*

## Co je třeba znát z „teoretických základů“?

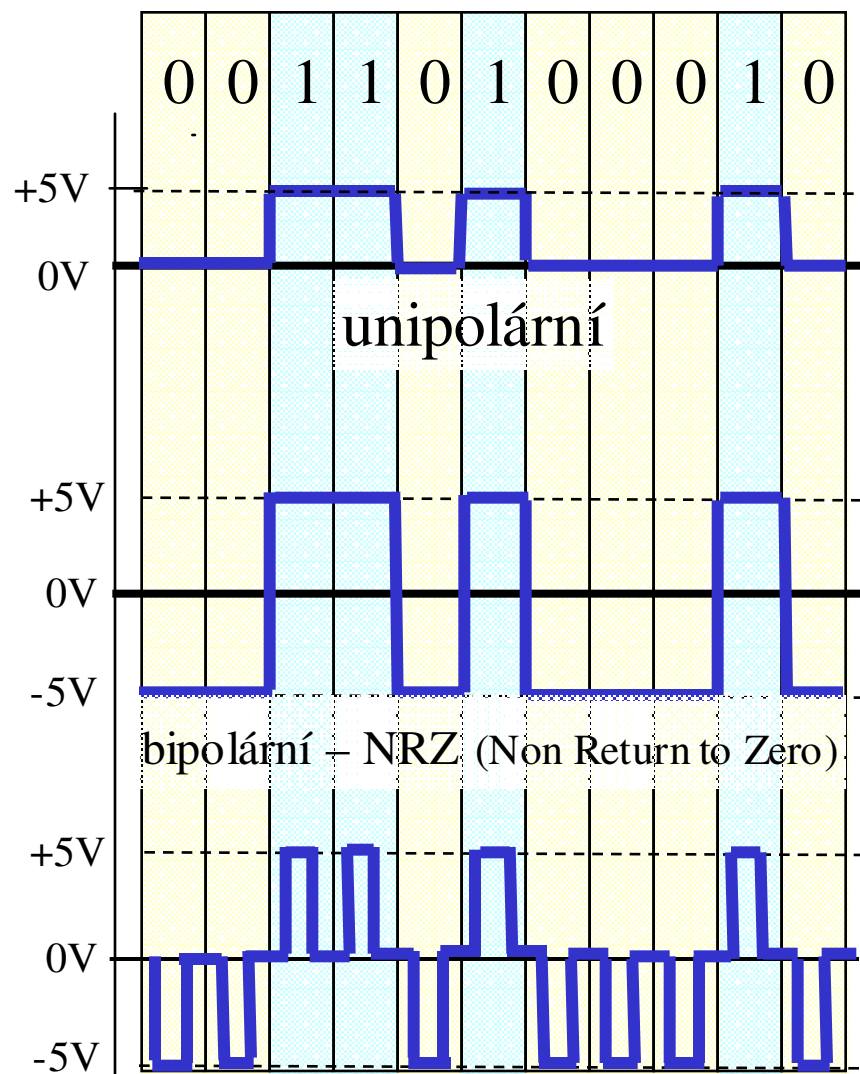
- co je "schopnost přenášet data"
    - jak se vyjadřuje? V čem se měří?
    - čím je dána? Na čem závisí?
    - jak ji zvyšovat? Kde jsou limity?
  - jaké vlastnosti mají reálná přenosová média? Jaký je jejich "přenosový potenciál"?
    - kroucená dvoulinka
    - koaxiální kabely
    - optické kabely
  - 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
    - ISDN, xDSL, ....
    - GPRS, HSCSD, EDGE, UMTS, .
    - DOCSIS, ....
- 

# přenos v základní pásmu (baseband, nemodulovaný přenos)

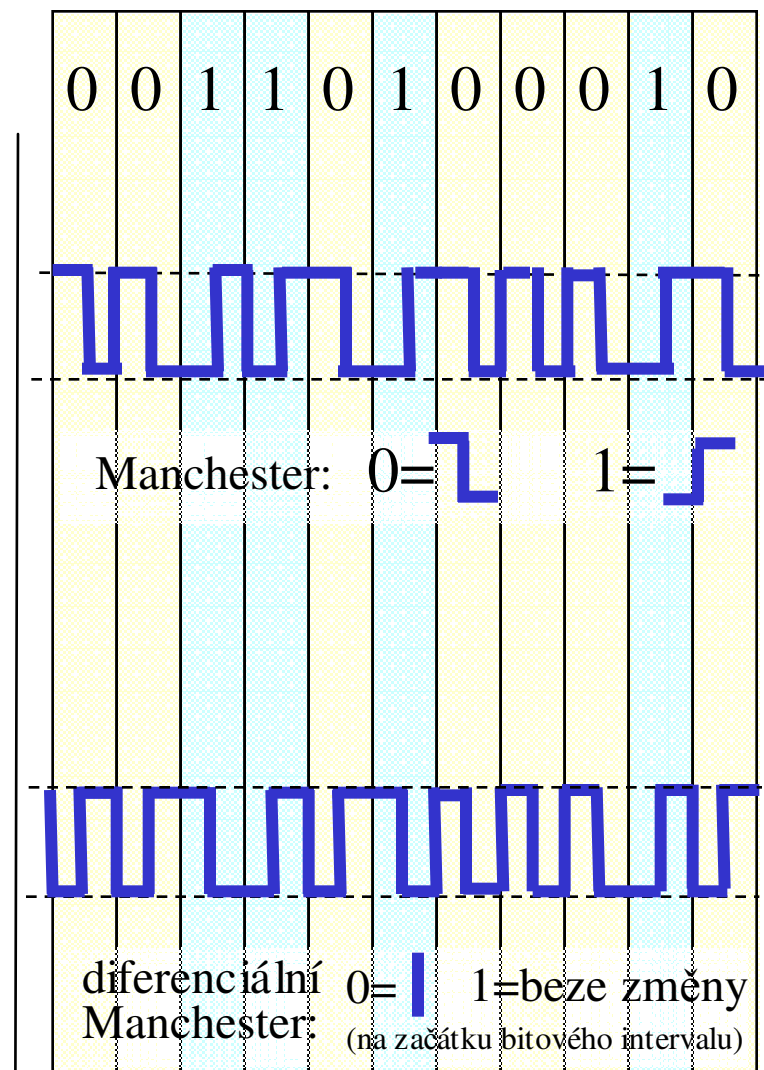
- jde o takový druh přenosu, při kterém je vstupní signál okamžitě převáděn na přenosové médium
  - bez činnosti modulačního prvku
- tj. přenáší se rovnou "data",
- představa:
  - přenášené bity se reprezentují:
    - napěťovými úrovněmi (H/L), nebo
    - velikostí proudu (tzv. proudová smyčka), kdy 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



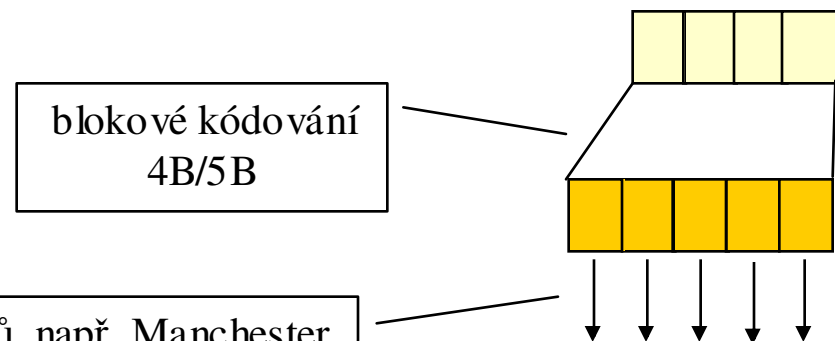
bipolární – RZ (Return to Zero)



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

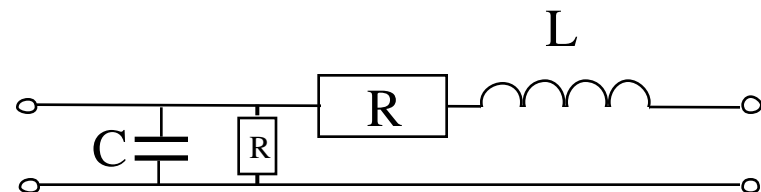
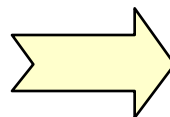
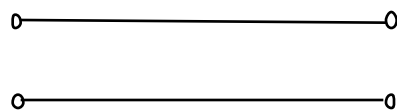
# Druhy kódování

- 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

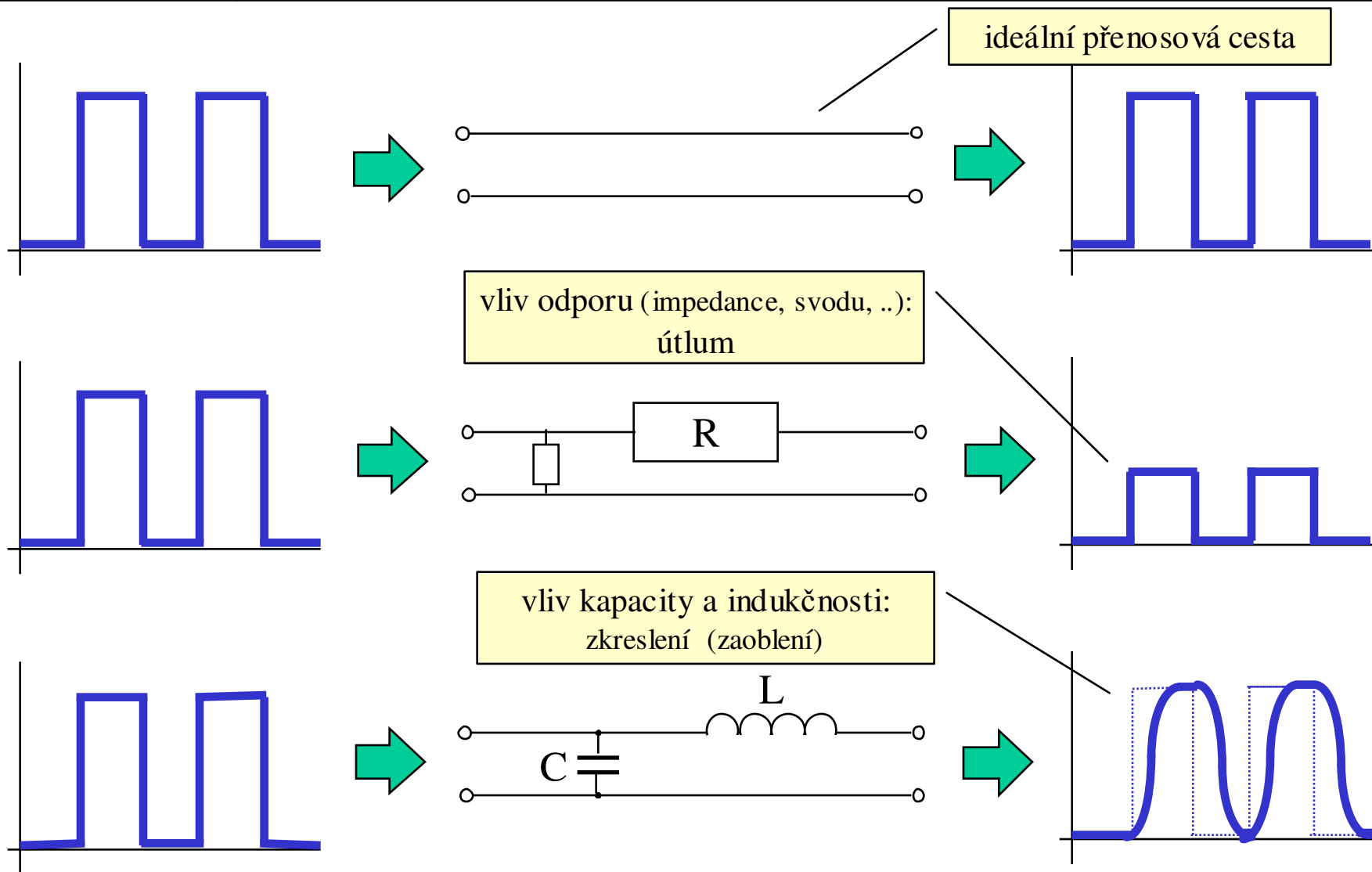


# Reálné vlastnosti přenosových cest

- 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)

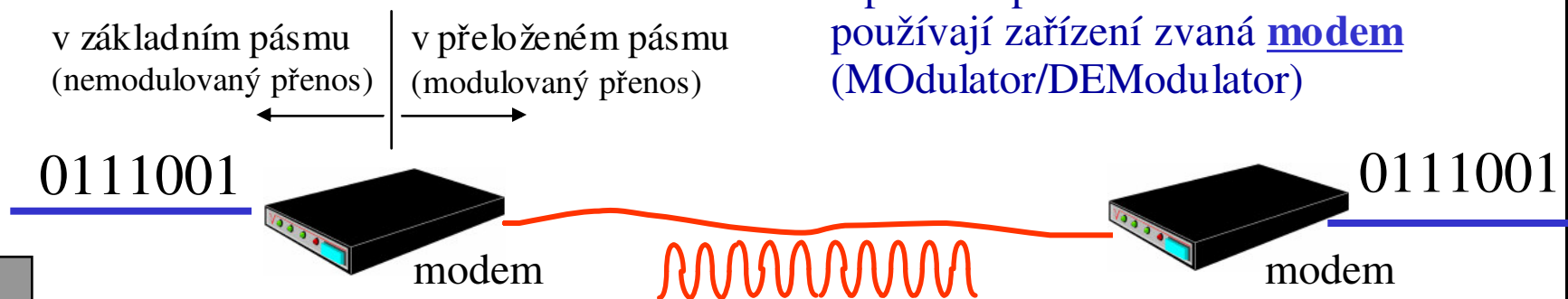


# Představa vlivu útlumu a zkreslení



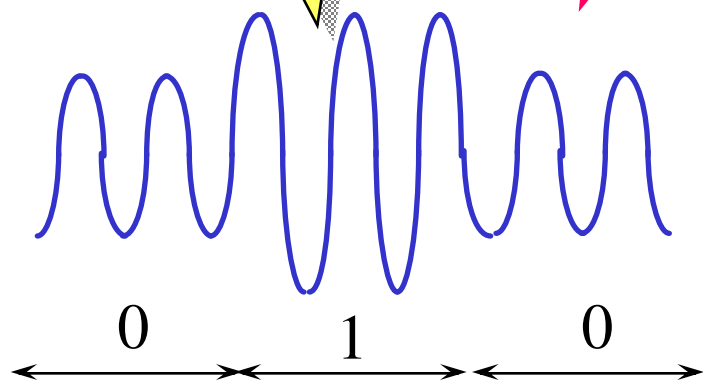
# Přenos v přeloženém pásmu (broadband, modulovaný přenos)

- 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)



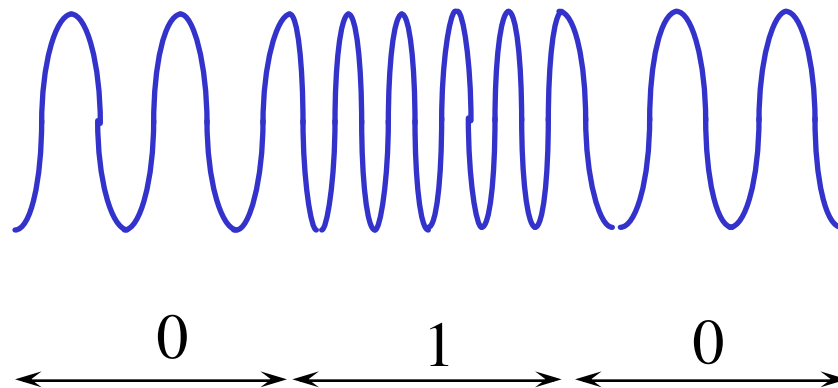
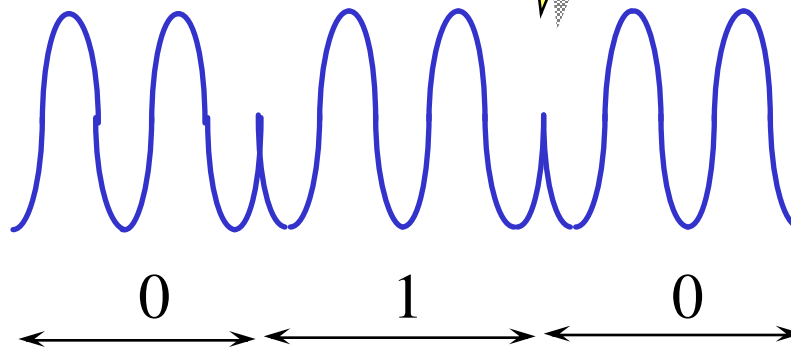
# Představa modulace

amplitudová  
modulace  
(mění se A)



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

fázová  
modulace  
(mění se  $\phi$ )



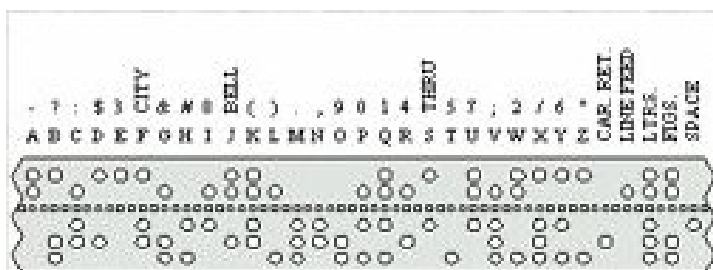
frekvenční  
modulace  
(mění se  $\omega$ )

# 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"
    - vynalezl časový multiplex
      - možnost, aby více telegrafů komunikovalo po jedné lince
    - vynalezl telegrafní kód (1870)



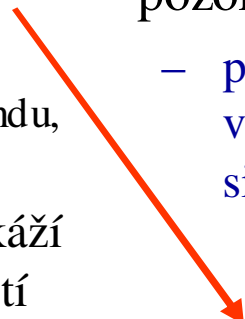
J.M.E. Baudot



- modulační rychlost nevypovídá 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

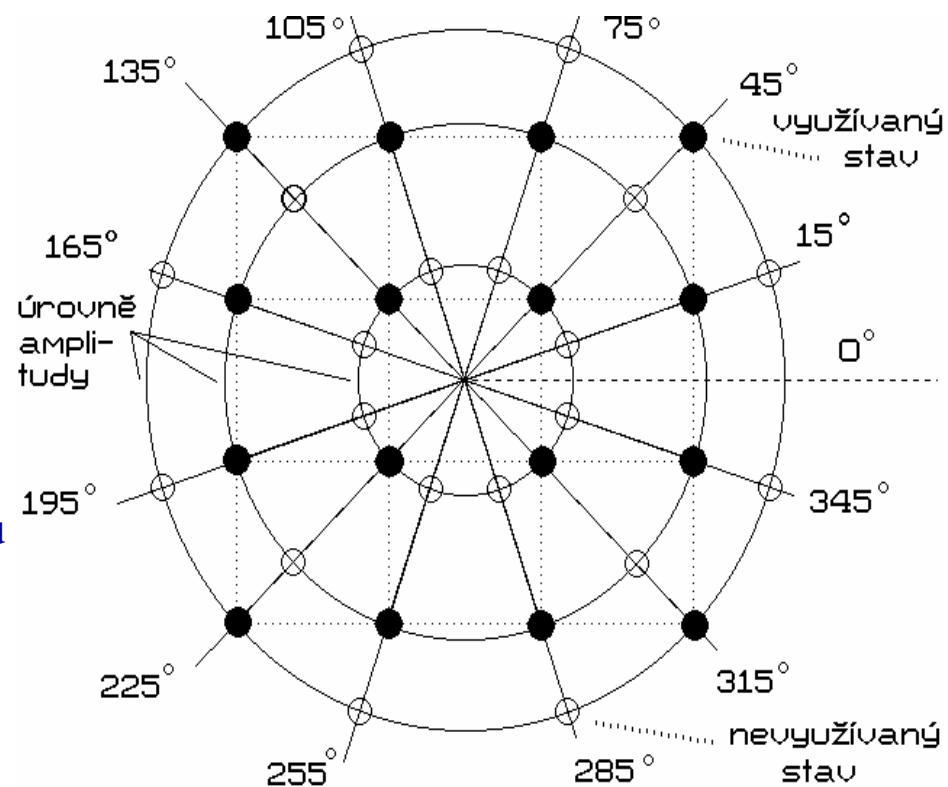
- vícestavová modulace
  - modulovaný (nosný) signál má určitý počet stavů ( $n$ )
  - pak každý z těchto stavů může reprezentovat  $\log_2(n)$  bitů
    - přesněji: každý přechod do nového stavu může reprezentovat přenos  $\log_2(n)$  bitů
  - příklad:
    - modemy V.34: až 3200 změn za sekundu, každá "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 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: 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 = 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) 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

Průměrné rychlosti ADSL s agregací 1:50  
říjen 2005

|                               | 128/64 | 256/64 | 512/128 | 1024/256 | 2048/256 |
|-------------------------------|--------|--------|---------|----------|----------|
| Contactel                     | N/A    | N/A    | 387     | 820      | N/A      |
| Czech On Line (Volný)         | N/A    | 186    | 368     | 714      | N/A      |
| České radiokomunikace         | N/A    | N/A    | N/A     | 651      | N/A      |
| Český Telecom (IOL)           | 89     | 172    | 342     | 701      | 1201     |
| GTS Novera                    | N/A    | N/A    | 363     | 643      | N/A      |
| Nextra                        | N/A    | N/A    | 387     | 608      | 1238     |
| Tiscali                       | N/A    | 169    | 379     | 795      | N/A      |
| Průměr všech měření           | 90     | 177    | 359     | 693      | 1220     |
| procent z objednané rychlosti | 70     | 69     | 70      | 68       | 60       |

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 (stojí to peníze)

– lze to dělat libovolně dlouho

- ale jen za cenu "konzumace" více zdrojů

- otázka:

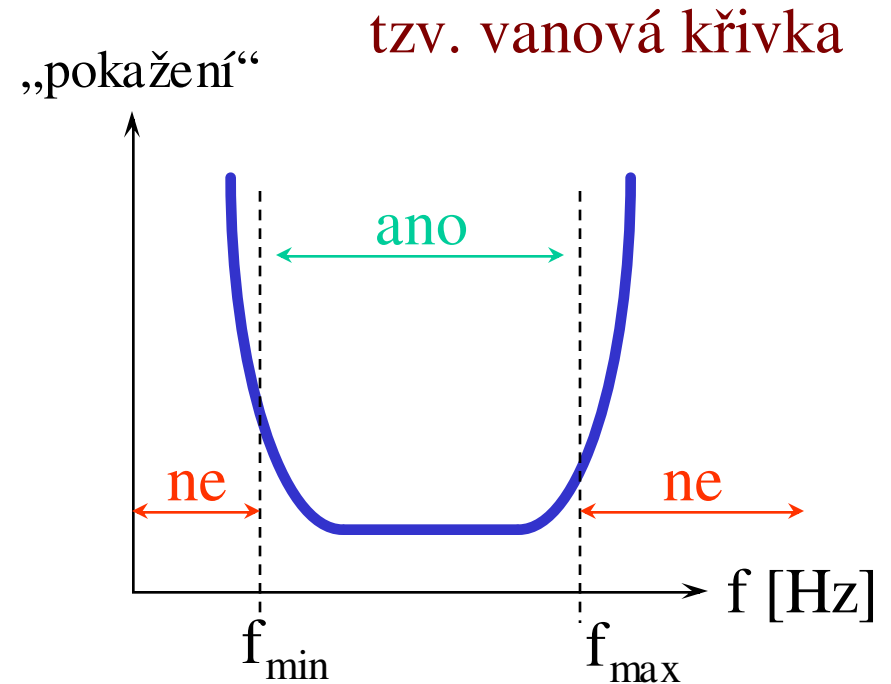
- jak dlouho lze zvyšovat počet (rozlišovaných) stavů?
- kde leží hranice dokonalosti technologií??
- na čem je tato hranice závislá?

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



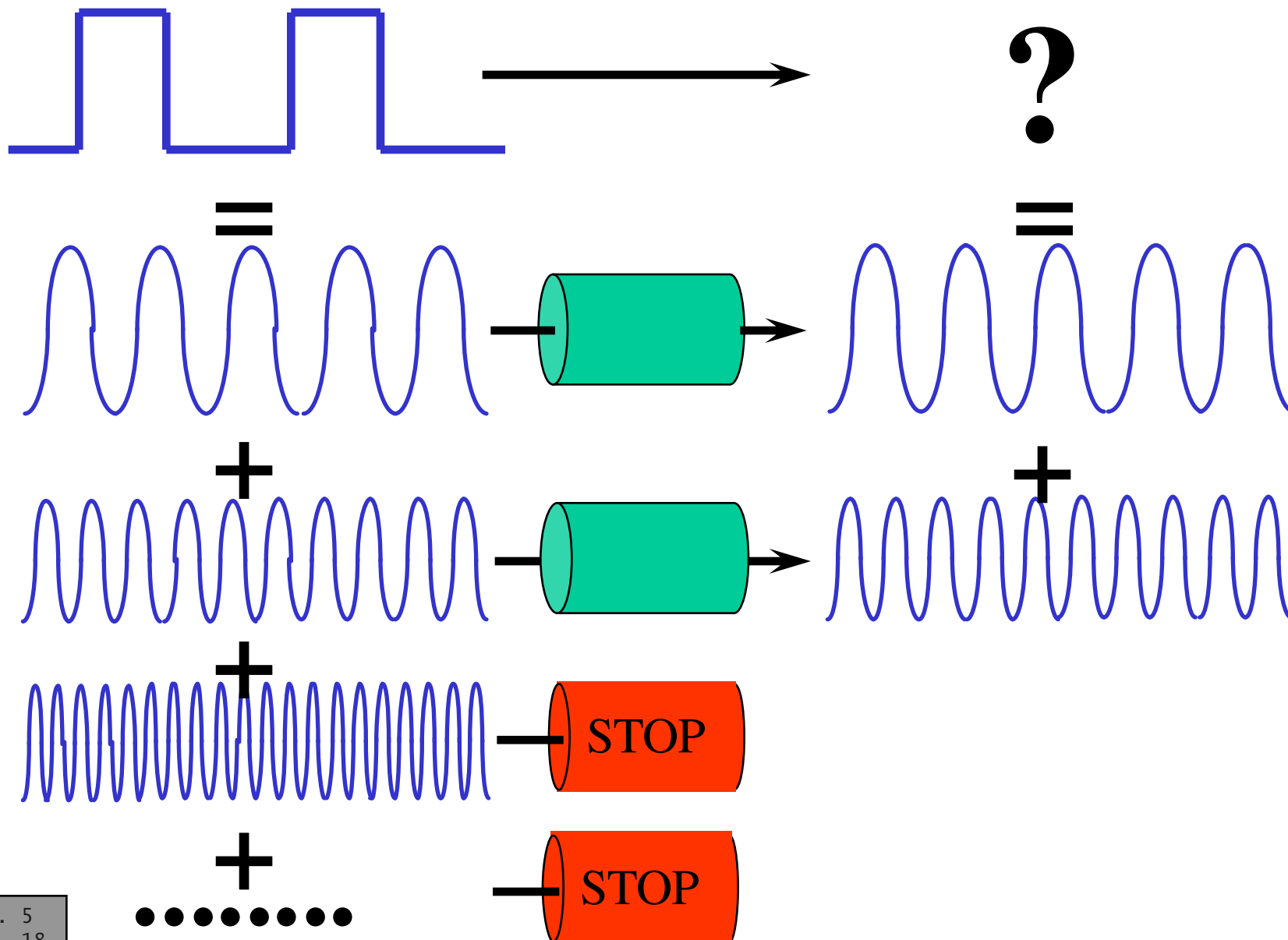
- lze najít rozsah frekvencí ( $f_{\min}$  až  $f_{\max}$ ), které daná přenosová cesta přenáší s ještě únosným „pokažením“
  - $f_{\max} - f_{\min}$  představuje tzv. šířku přenosového pásma, anglicky: bandwidth
    - platí pro harmonický signál (sinusového/kosinusového průběhu)
  - harmonické signály 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)

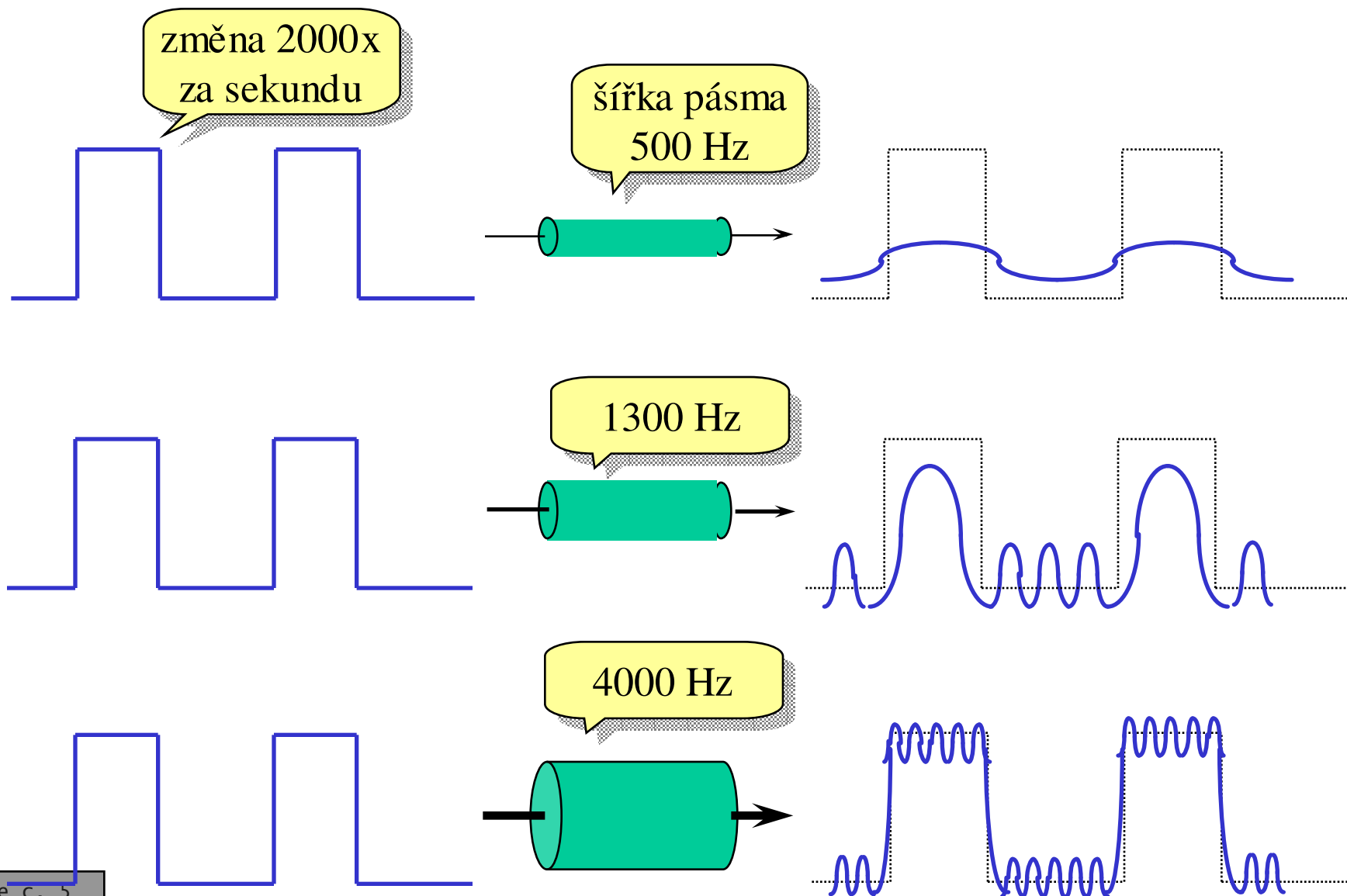
- pro signály harmonického (sinusového) průběhu je závislost na šířce přenosového pásma zřejmá
  - pokud frekvence harmonického signálu spadá do šířky pásma, signál "projde" (beze změn)
  - jinak neprojde vůbec
- pro signály obecného průběhu je efekt omezené šířky přenosového pásma složitější
- pomůcka: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

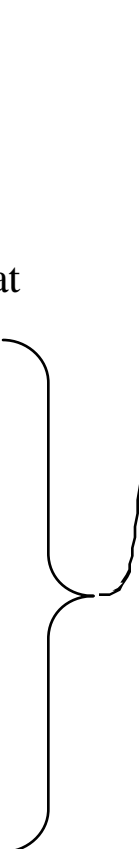
# Představa – vliv omezené šířky přenosového pásma



## Příklad – vliv šířky přenosového pásma na výsledný (přenesený) signál

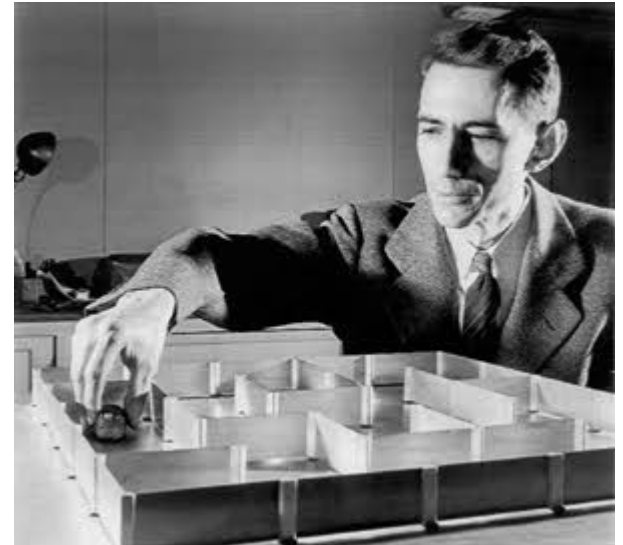


# Shrnutí

- 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:



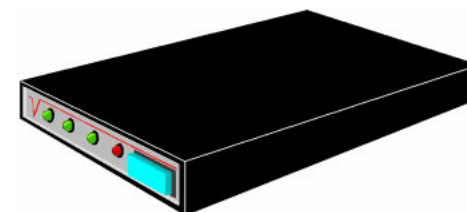
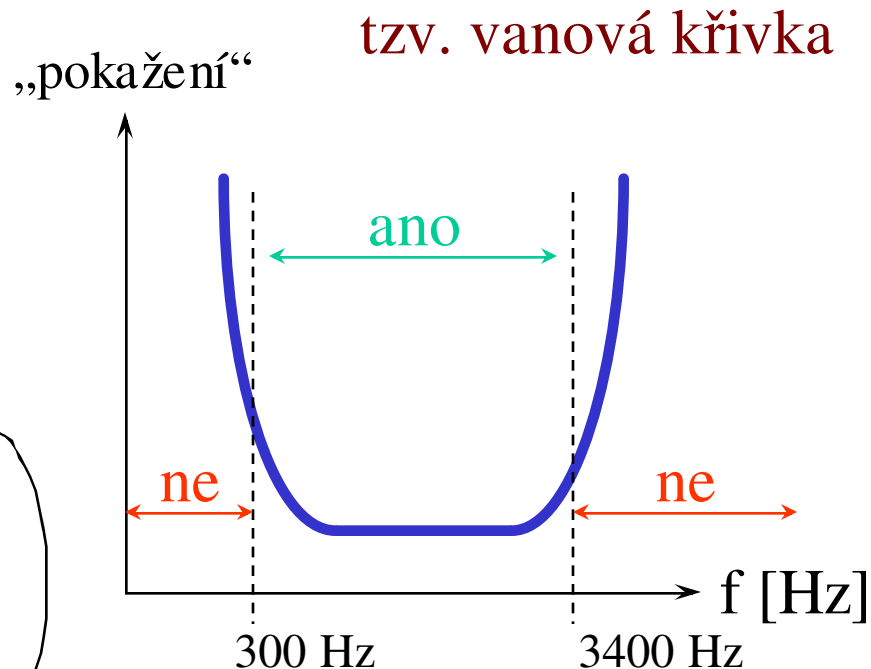
$$\max(v_{\text{přenosová}}) = \text{šířka pásma} * \log_2(1 + \text{signál/šum})$$

- 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  
 $10 \log_{10}(S/N) \text{ [dB]}$

# Příklad: místní smyčka

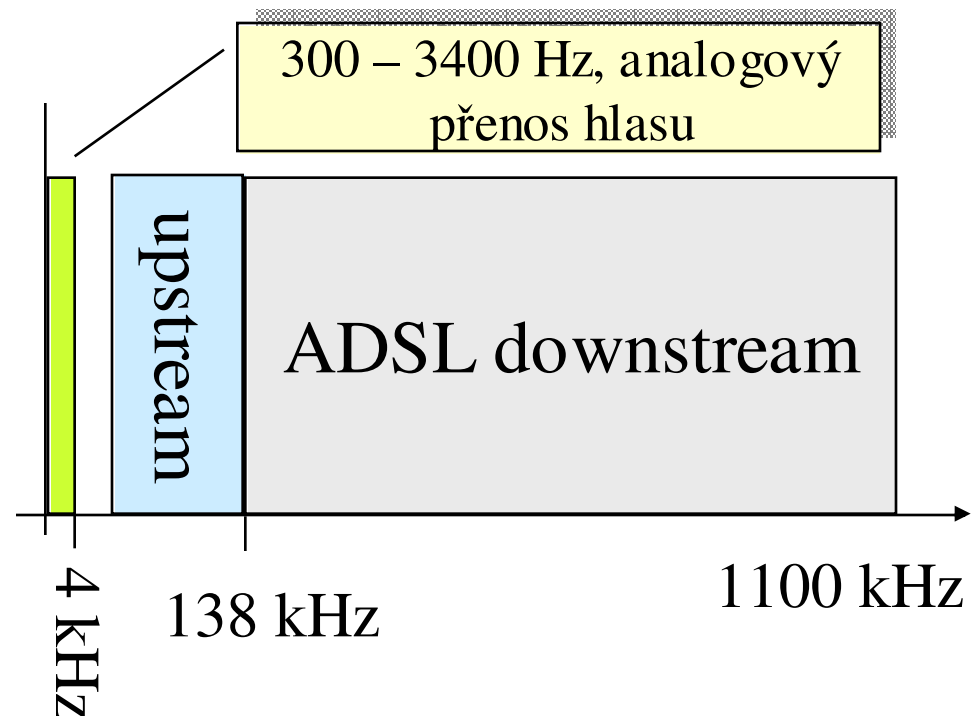
- místní smyčka
  - metalické vedení (kroucený pár), vedoucí od zákazníka k telefonní ústředně
  - používá se pro v rámci veřejné telefonní sítě, pro realizaci účastnické přípojky
    - v této roli je zde vybudováno umělé frekvenční omezení: 300 až 3400 Hz!!!
    - tj. šířka pásma: 3,1 kHz
    - kvalitní 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!!!
- 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

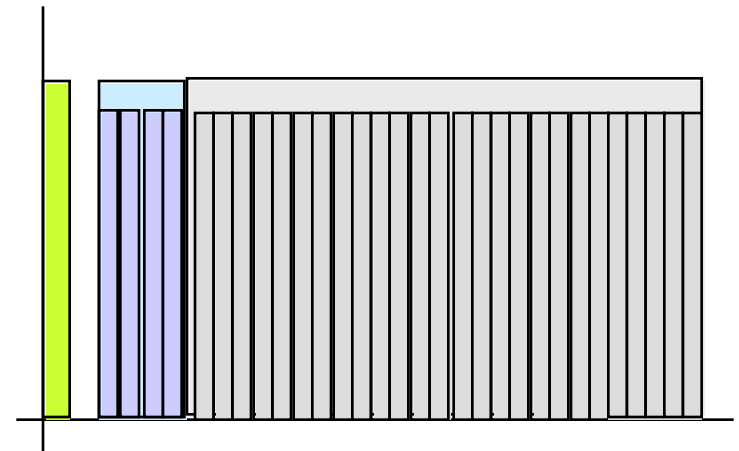
- pozorování:
  - "přenosový potenciál" místních smyček je podstatně větší
    - dán jejich šířkou přenosového pásma (rozsahem frekvencí, které jsou schopné přenášet)
    - hlasové služby (telefonie) využívají jen zlomek tohoto přenosového potenciálu
      - viz umělé omezení 300 až 3400 Hz
- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), z rodiny xDSL
  - je pokusem o maximální využití přenosových schopností metalického vedení (např. místní smyčky)
  - využívají se vyšší frekvenční pásma a pracovnější 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 ???



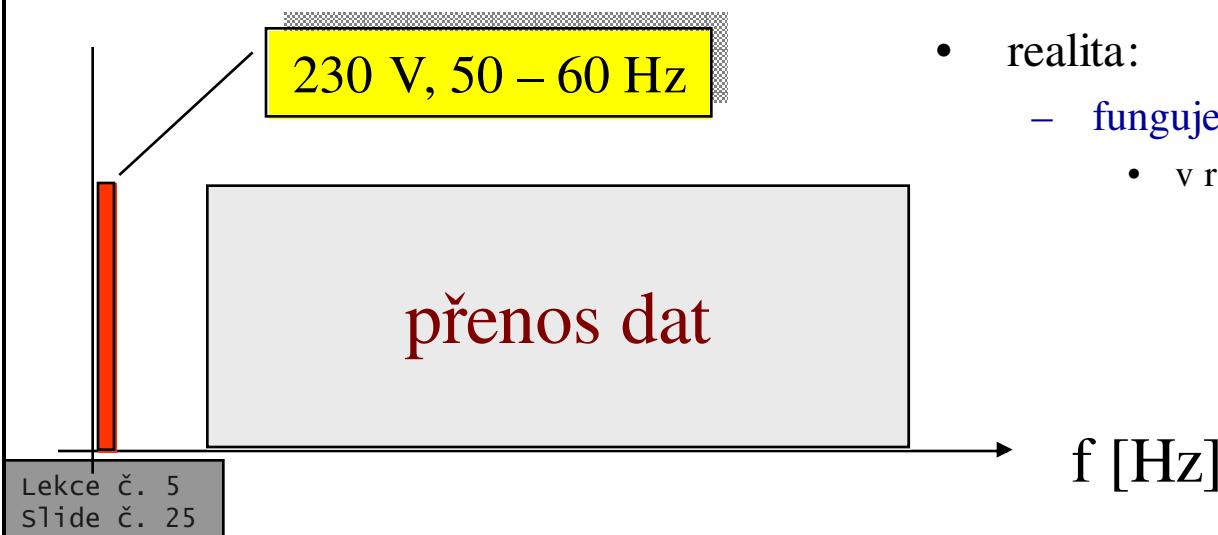
# Modulace v ADSL

- 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.
- vylepšení: **OFDM**
  - ortogonální frekvenční multiplex
  - jednotlivé nosné se "trochu" překrývají



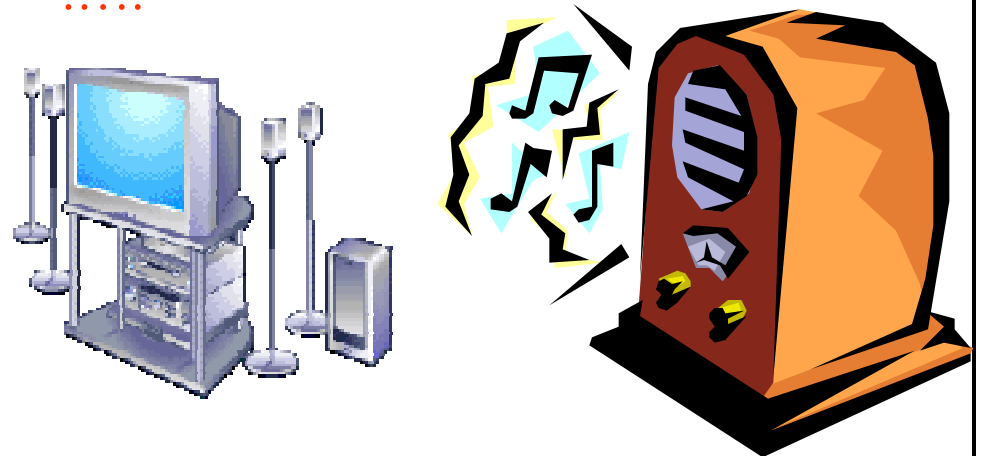
# Datové přenosy po napájecí síti (PLC, Powerline Communications)

- 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

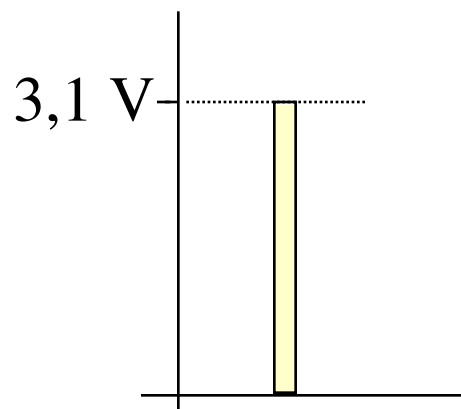


# Analogový a digitální přenos

- 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 0,6 V či nikoli
- důsledky:
  - *analogový přenos není nikdy ideální !!!*
    - nedokáže přenést hodnotu s ideální přesností
  - *digitální přenos je (může být) ideální !!!!!*

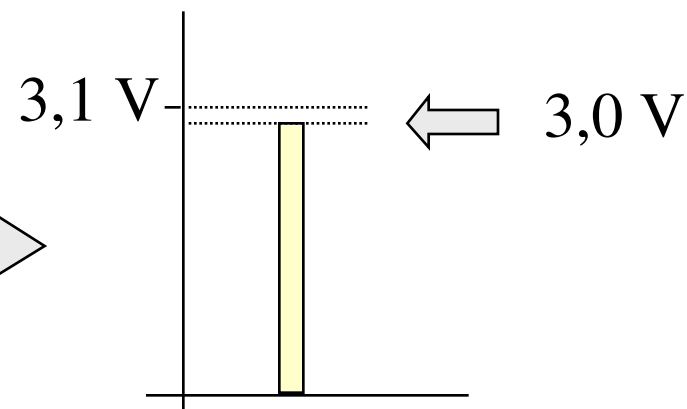


# Představa analogového a digitálního přenosu



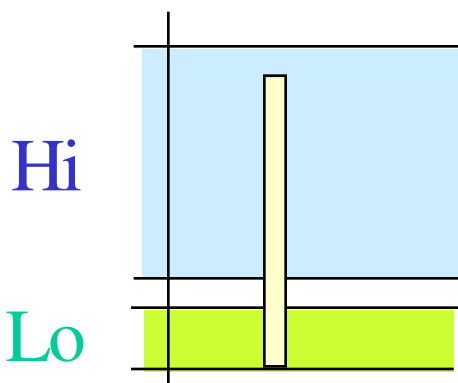
odesílá se "hodnota 3,1"

analogový přenos  
vliv útlumu

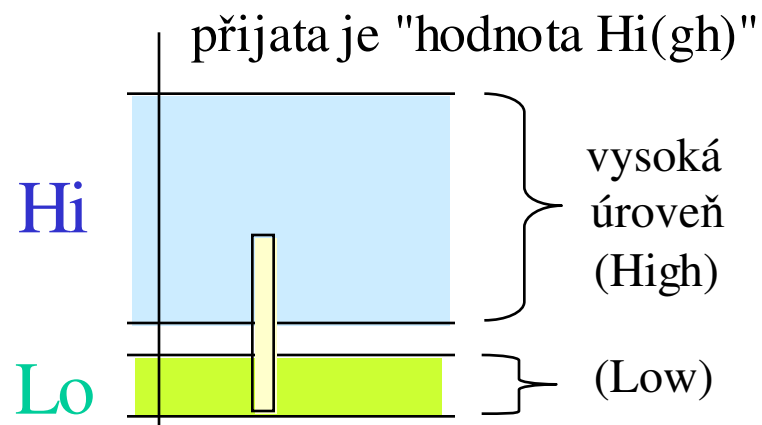


přijata je "hodnota 3,0"

odesílá se "hodnota Hi(gh)"



digitální přenos  
vliv útlumu

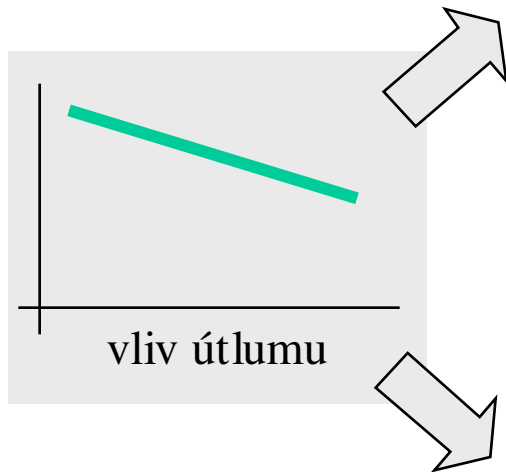


# Představa analogového a digitálního přenosu

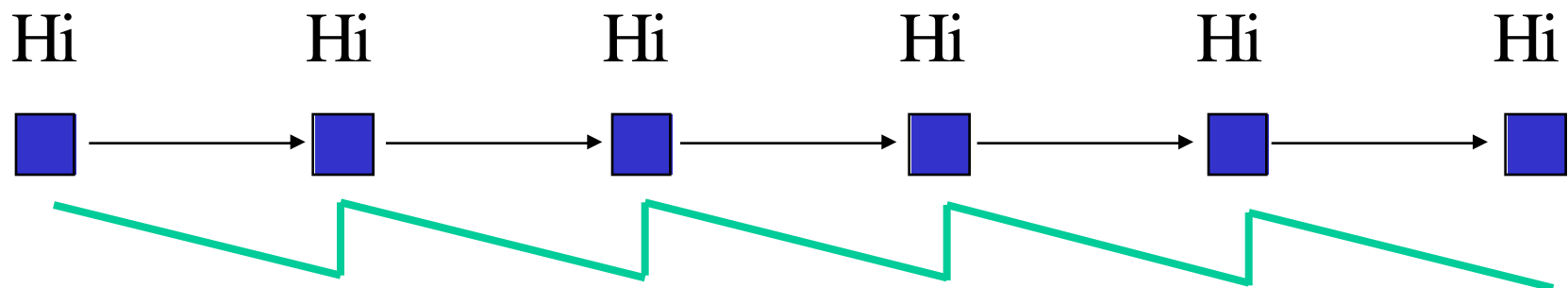


**analogový přenos: vliv útlumu se kumuluje**

obdobně pro další vlivy (zkreslení atd.)



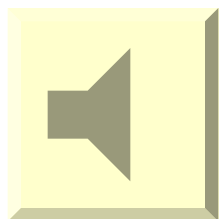
**digitální přenos: vliv útlumu se neprojeví**



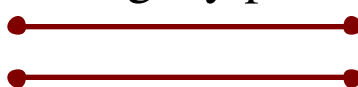
# Analogový vs. digitální přenos

MODEM = MODulator & DEModulator

analogová data

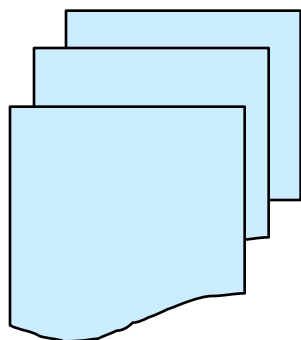


analogový přenos



zajišťuje: modem

digitální data



zajišťuje: codec

01100101

digitální přenos

CODEC = COder & DECoder

DSP – Digital Signal Processing

(obecně: zpracování analogového signálu pomocí digitálních technologií)

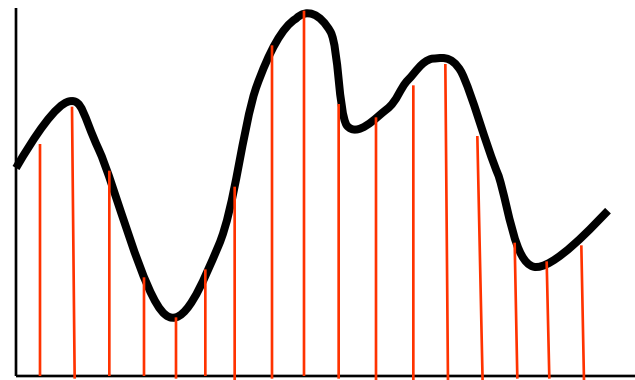
- přenos digitálních dat po analogovém přenosovém kanále:
  - data jsou "namodulována" na (analogový) signál pomocí modemu
  - a na druhé straně zpětně "demodulována"
- přenos analogových dat (např. hlasu, obrazu) po digitálním přenosovém kanále:
  - analogový signál musí být zdigitalizován (zakódován),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

# Výhody digitálního přenosu (oproti analogovému)

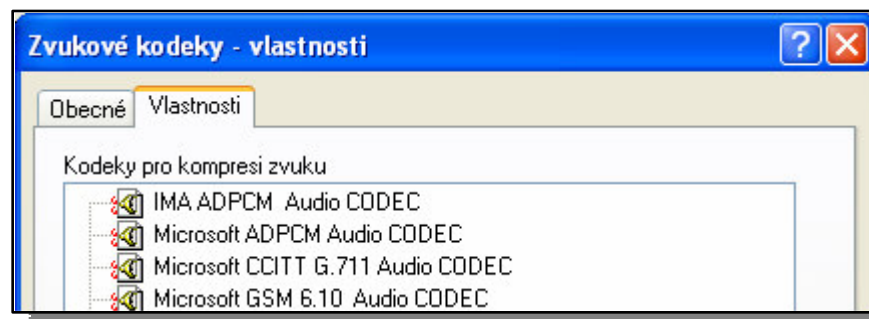
- může být ideální
  - "kvalita" dat se při přenosu (zpracování) nemění
    - viz například kopírování zvukových nahrávek v dig. podobě
  - chybovost lze účinně minimalizovat
    - četnost výskytu chyb lze snižovat, není to "příliš drahé"
- umožňuje dosahovat vyšších přenosových rychlostí
  - díky "vyšší toleranci" ke změnám přenášeného signálu (pokud zůstane ve stejném diskrétním 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

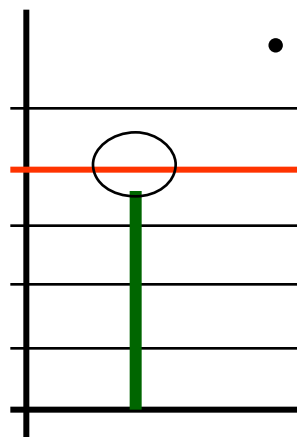
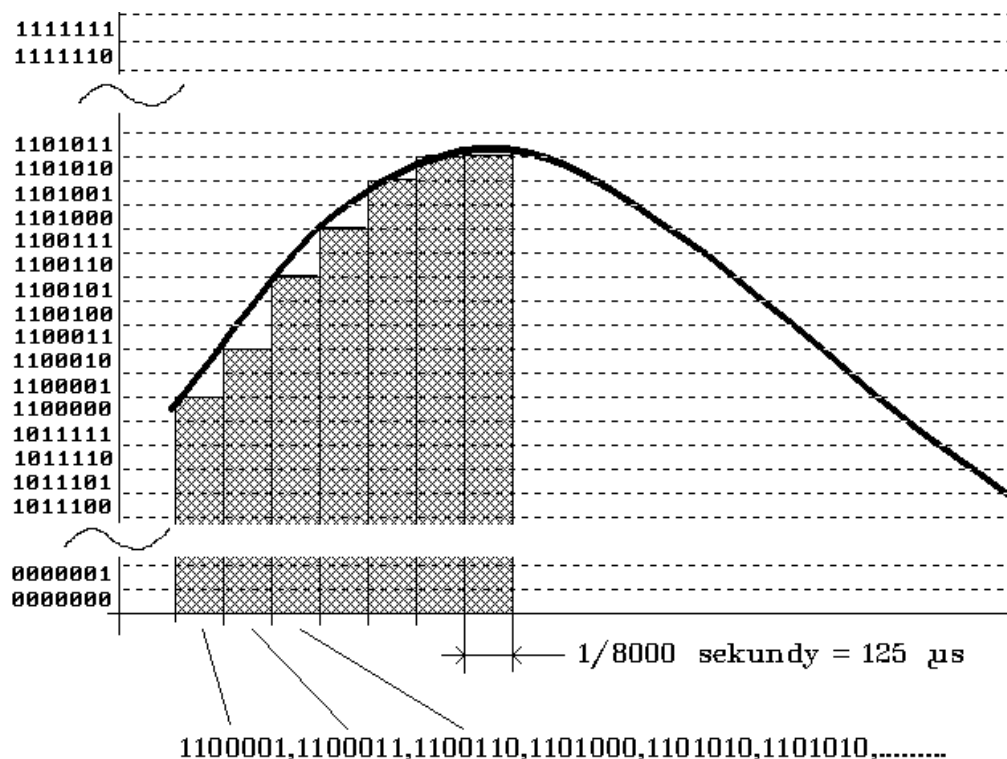


Harry Nyquist,  
1889-1976,  
pracoval v AT&T,  
Bellovy laboratoře

- 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)

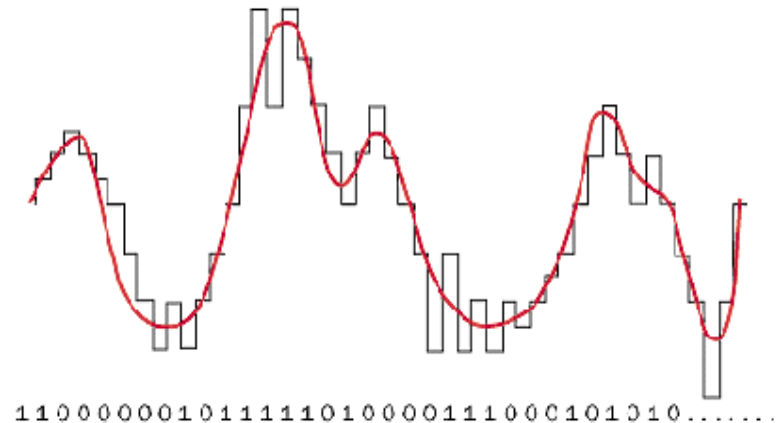
- telefonní hovor je přenášen v rozsahu 300 až 3400 Hz
  - lidské ucho vnímá (obvykle) 20 až 20 000 Hz
  - ale 300 až 3400 Hz stačí pro srozumitelnost hovoru
    - z kapacitních důvodů je žádoucí, aby šířka pásma byla co nejmenší
- pro potřeby digitalizace se uvažuje větší rozsah
  - 0 až 4000 Hz
- podle 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 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

# 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?