

Lekce 4: Základy datových komunikací

Jiří Peterka

co je potřeba znát?

- **kde vzniká schopnost přenášet data?**
 - čím je dána, na čem závisí?
 - šířka pásma, modulace
 - jak ji zvyšovat, kde jsou její limity?
 - Nyquistův teorém, Shannonovo kritérium
 - jak se vyjadřuje a v čem se měří?
 - modulační a přenosová rychlost
- **jaké vlastnosti mají reálná přenosová média?**
 - jaký je přenosový potenciál různých přenosových médií?
 - kroucená dvoulinka
 - koaxiální kabely
 - optické kabely
- **jak fungují optické přenosy?**
 - čistě optické přenosy
- **jaké jsou techniky přenosu dat, používané na fyzické vrstvě?**
 - modulovaný a nemodulovaný přenos
 - modulace a kódování
 - arytmičtý, asynchronní a synchronní přenos
 - analogový a digitální přenos
 - digitalizace analogových signálů
 - techniky multiplexu
 - FDM, TDM, STDM
 - OFDM, CDMA
 - izochronní přenos, bitstream,
- **jak fungují bezdrátové přenosy?**
 - spread spectrum,
 - frequency hopping,
 -

reálné vlastnosti přenosových cest

- přenosové cesty nejsou ideální – ale mají „reálné obvodové vlastnosti“

- tím je omezena i jejich schopnost přenášet různé signály

- v důsledku toho je omezena i jejich schopnost přenášet data !!!

- **proto mají pouze určitý (omezený) přenosový potenciál**

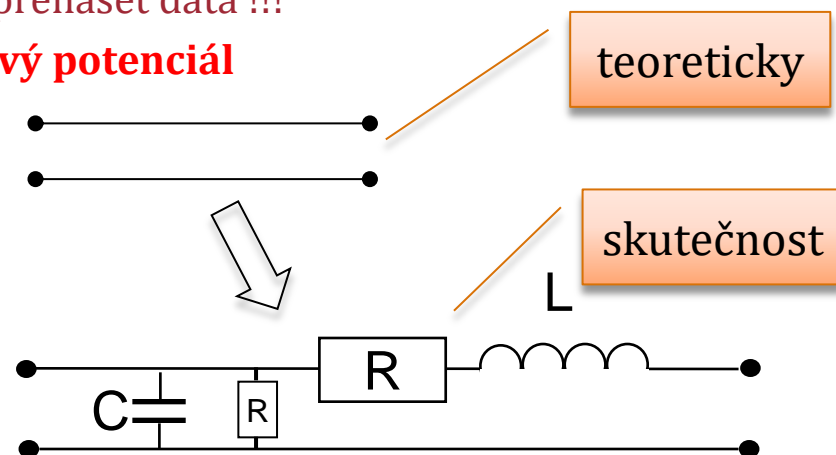
- přenosové cesty (kabely), které přenáší (elektrický) signál:

- ho vždy nějak negativně ovlivňují:

- útlum (attenuation)
 - zeslabují přenášený signál
- zkreslení (distortion)
 - deformují přenášený signál
- přeslech (crosstalk)
 - „prolínání“ signálů z přenosů po jiných vedeních (kabelech)
- rušení (interference)
 - obecné „prolínání“ dalších rušivých signálů

- vždy nějak vyzařují do svého okolí

- dva souběžně vedené vodiče se vždy chovají jako anténa



- **důsledek:**

- každá přenosová cesta přenáší některé signály lépe, jiné hůře

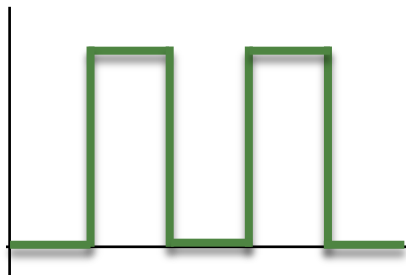
- záleží zejména na frekvenci přenášeného signálu a na povaze jeho změn

- některé signály jsou již tak „pokaženy“, že nemá smysl je danou přenosovou cestou přenášet

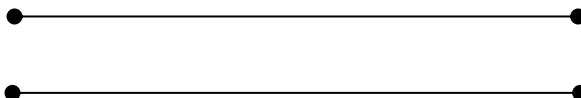
- pro jiné to ještě smysl má

vliv útlumu a zkreslení

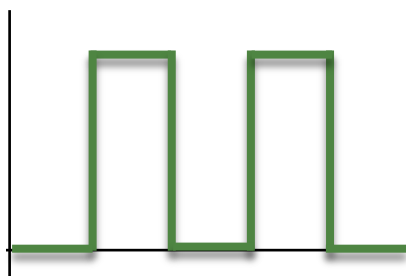
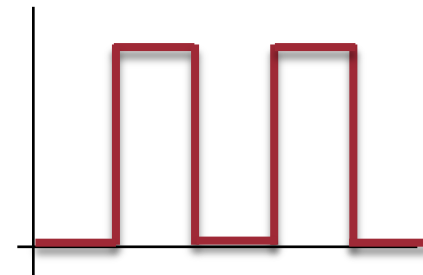
„odesílaný“ signál



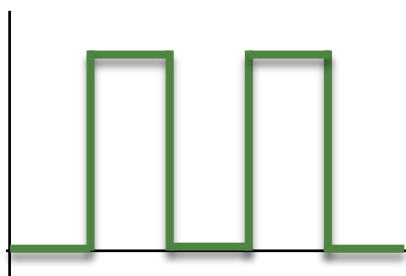
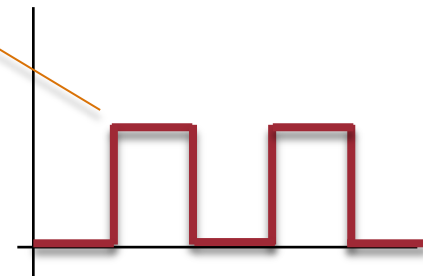
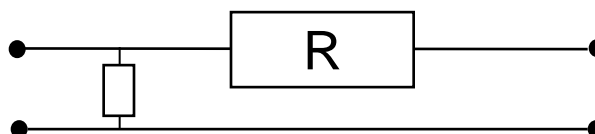
ideální přenosová cesta



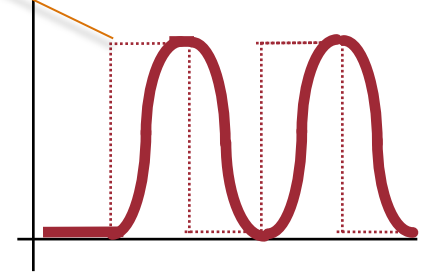
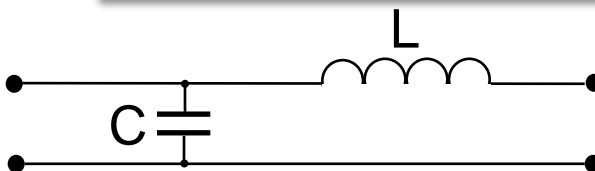
„přijímaný“ signál



útlum



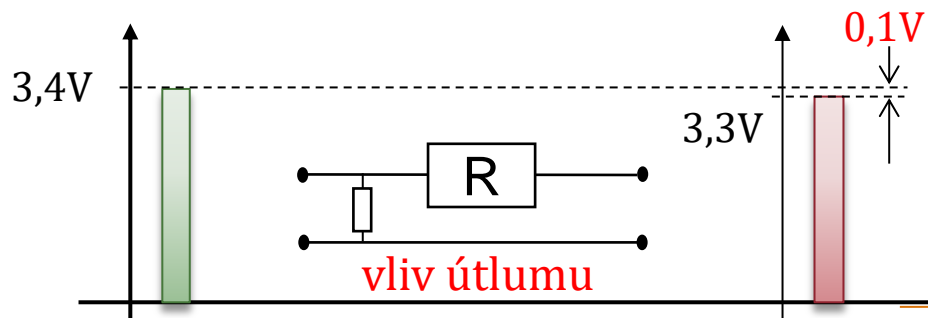
zkreslení
(vliv kapacity a indukčnosti)



- míra dopadu je v obou případech úměrná délce přenosové cesty
 - čím delší je „drát“, tím větší je útlum a zkreslení

analogový vs. digitální přenos

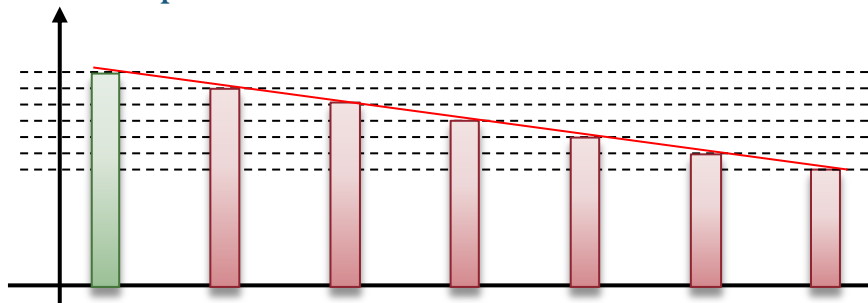
- **reálné přenosové cesty vždy přenáší nějakou analogovou veličinu**
 - **metalické (kovové): přenáší elektrický signál**
 - lze měřit velikost napětí, velikost proudu, sledovat průběh v čase (změny)
 - **optické: přenáší světlo**
 - lze měřit intenzitu světla, sledovat průběh v čase
 - **bezdrátové (rádiové): přenáší elektromagnetické vlnění**
 - lze měřit kmitočet (frekvenci), intenzitu, fázi,
- **zda jde o analogový nebo digitální přenos, rozhoduje interpretace !!!**
- **analogový přenos:**
 - **zajímá nás přímá hodnota analogové veličiny**
 - např. že el. signál má úroveň napětí 3,4V
 - „užitečnou informaci“ je 3,4
 - ale přijato je 3,3
- **digitální přenos:**
 - **zajímá nás, zda hodnota analogové veličiny spadá do určitého intervalu**
 - například:
 - zda je úroveň napětí mezi 3V a 5V
 - „vysoká úroveň“ (High)
 - nebo zda je mezi 0 a 1V
 - „nízká úroveň“ (Low)



analogový vs. digitální přenos

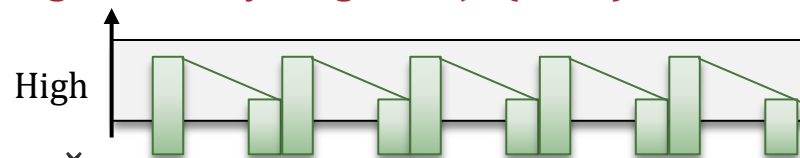
- **analogový přenos není ideální**

- v tom smyslu, že by zachoval přenášenou informaci bez jakékoli změny
 - vždy ji nějak změní
 - viz pokles napětí vlivem útlumu
- otázkou je pouze „míra pokažení“ přenášeného signálu
 - tuto míru lze snižovat, ale nikdy ne zcela odstranit
 - navíc je to hodně drahé
 - čím více se snažíme zlepšit, tím je to dražší
 - další problém: řetězení
 - v celém přenosovém řetězci se „míra pokažení“ sčítá až násobí !



- **digitální přenos může být ideální**

- dokáže zachovat přenášenou informaci bez jakékoli změny
 - přenášený signál ale nesmí „vybočit“ z příslušné úrovně
- řetězení není problém
 - signál se vždy zregeneruje (zesílí)



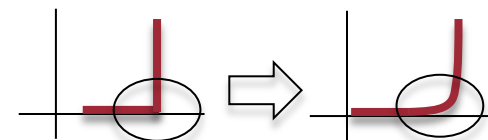
- **celkově:**

- digitální přenos je efektivnější než analogový
 - digitálně lze dosahovat vyšších přenosových kapacit než analogově
 - s nižší „spotřebou surovin“
- příklad: tzv. digitální dividenda
 - dříve pro analogové TV programy:
 - 1 frekvenční kanál = 1 TV program
 - digitální TV vysílání (DVB-T):
 - 1 frekvenční kanál = 4-6 TV programů

modulovaný a nemodulovaný přenos

- důsledek (toho, že přenosové cesty nejsou nikdy ideální):**

- některé signály jsou přenášeny lépe, některé hůře
 - zejména pokud jde o míru jejich zkreslení
- obecně: nejvíce vadí „ostré změny“ (zlomy, hrany)



- modulovaný přenos**

- snaha přenášet takový signál, který danou přenosovou cestou projde nejlépe
 - což je signál, který má nejvíce pozvolné změny !
 - v praxi: tzv. harmonický signál
 - signál sinusového průběhu

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



- **výhoda:**

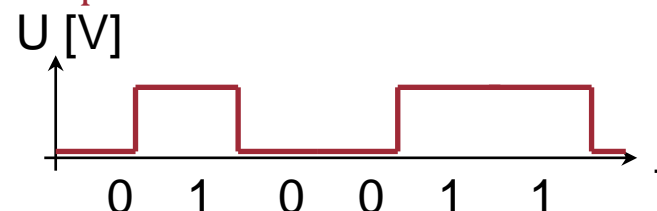
- takovýto signál lze přenášet na větší vzdálenosti i vyššími rychlostmi

- **problém:**

- samotný harmonický signál v sobě ještě nenese žádnou užitečnou informaci

- nemodulovaný přenos**

- přenáší se i takový signál, který přenosovou cestou prochází hůře
 - což je signál, který může mít i ostré hrany
 - v praxi: ostré hrany (nebo úrovně signálu) přímo reprezentují přenášená data



- **výhoda:**

- je to jednodušší na realizaci

- **nevýhoda:**

- kvůli zkreslení lze využít jen na krátké vzdálenosti

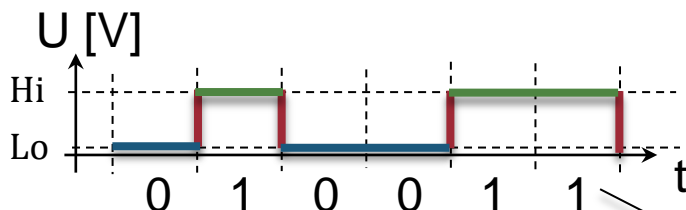
nemodulovaný přenos

- též: přenos v základním pásmu, baseband přenos

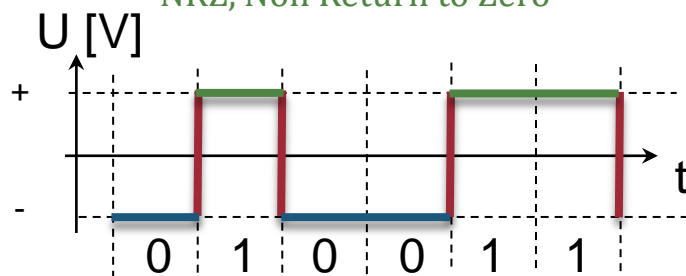
- „užitečnou hodnotu“ může vyjadřovat:

- úroveň napětí (U)

- unipolární varianta
 - vysoká (High) a nízká (Low) úroveň



- bipolární varianta:
 - kladná a záporná úroveň
 - NRZ, Non Return to Zero

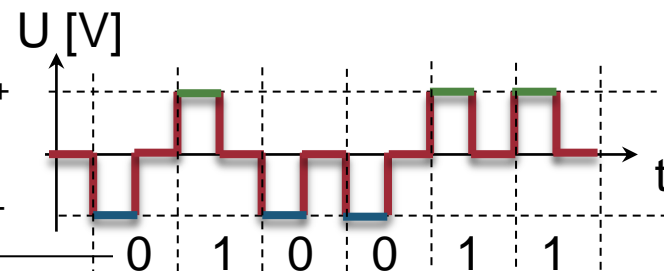


- úroveň proudu (I)

zde stačí 1 změna signálu na 1 bit

- varianta „s návratem k nule“

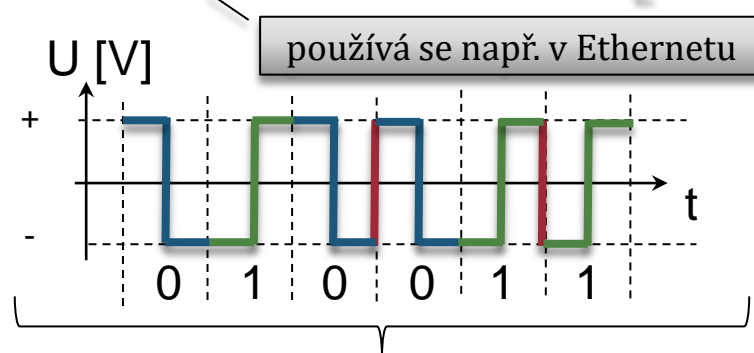
- „po každém bitu“ se úroveň signálu vrací k 0
- RZ, Return to Zero



nebo obráceně
(dle konvence)

- změna úrovně

- kódování Manchester: $1 = \text{high-to-low}$, $0 = \text{low-to-high}$



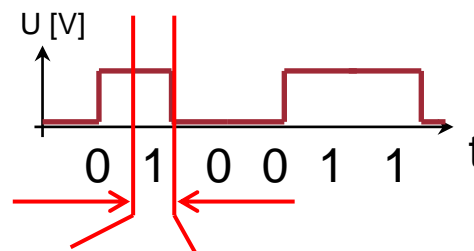
používá se např. v Ethernetu

zde jsou nutné až 2 změny signálu na 1 bit

potřeba synchronizace

- přenos jednotlivého bitu trvá určitou dobu

- tzv. bitový interval

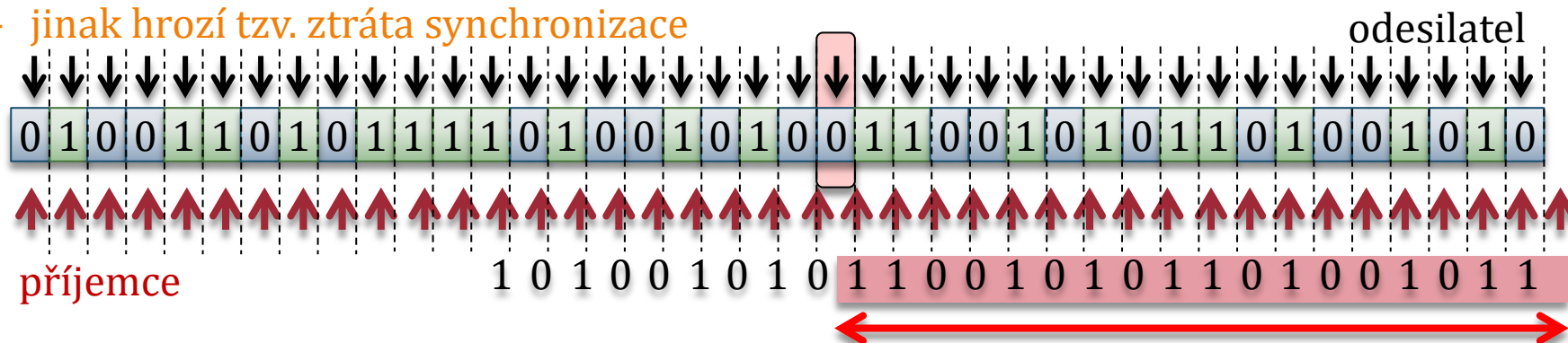


- co je důležité:

- aby příjemce dokázal vždy správně rozpoznat začátek a konec bitového intervalu

- a díky tomu mohl správně vyhodnotit hodnotu přenášeného bitu

- jinak hrozí tzv. ztráta synchronizace



- při ztrátě synchronizace příjemce přijímá jiné bity, než jaké by měl správně přijímat

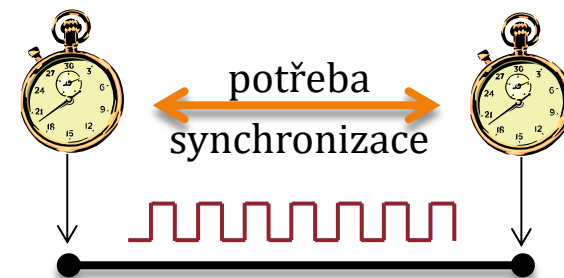
- protože se „strefuje“ do nesprávných bitových intervalů

- řešení:

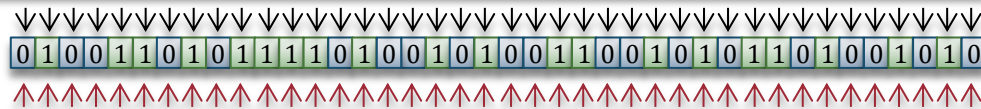
- udržování synchronizace

- představa: příjemce i odesilatel mají své hodinky, podle kterých odměřují začátky a konce bitových intervalů

- požadavek na synchronizaci je pak požadavkem na to, aby se tyto hodinky „moc nerozešly“



možnosti synchronizace



- **pro tzv. (plně) synchronní přenos**

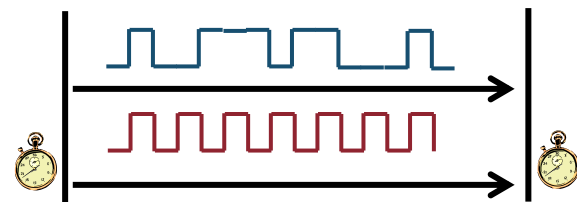
- s trvalým udržováním synchronizace, po celou dobu přenosu

- **samostatné časování**

- kromě dat se přenáší také samostatný synchronizační signál („tikání hodinek“)

- v praxi se moc nepoužívá

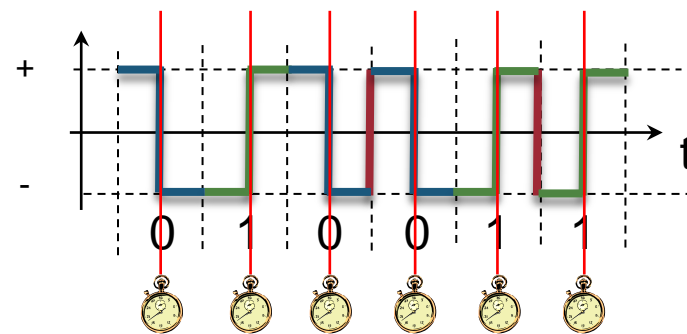
- náročné na režii (100% navíc)



- **časování je vloženo přímo do „datového signálu“**

- např. u kódování Manchester, kde je v každém bitovém intervalu vždy aspoň jedna změna

- a ta představuje „tik“ hodin



- **časování se odvozuje ze samotných dat**

- změny signálu reprezentují jednotlivé „ticky“

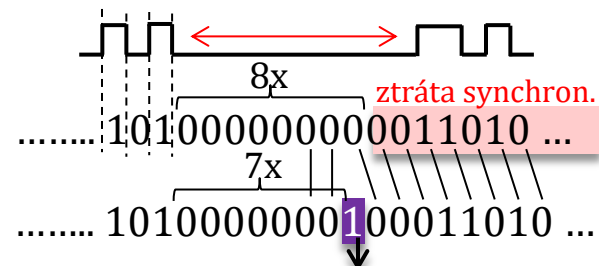
- nebezpečí:

- delší posloupnost beze změny signálu může způsobit, že příjemce ztratí synchronizaci

- řešení: technika **bit stuffing**

- za určitým počtem bitů „beze změny“ (ještě než příjemce ztratí synchronizaci) se vloží uměle vytvořená změna

- např. za každých 7 po sobě jdoucích 0 se vloží jedna 1, kterou příjemce zase odstraní



blokové kódování

- **změny v přenášených datech (přenášeném signálu) prospívají přenosům!**

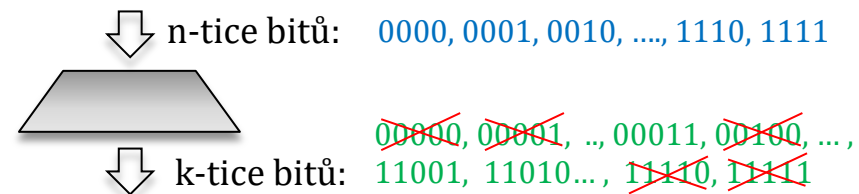
- a to jak pro modulované, tak i pro nemodulované přenosy
- usnadňují udržování synchronizace
- snáze (a spolehlivěji) se detekují
- díky tomu lze dosahovat vyšších rychlostí přenosu, nebo zlepšovat spolehlivost přenosu



- **otázka:**

- jak zanést co nejvíce změn do přenášených dat, nad kterými nemáme vliv a která nemůžeme měnit?

- nebo do skutečně přenášeného signálu?



- **možnosti:**

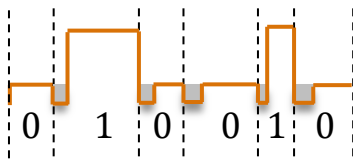
- redundantní kódování
 - časování se přidává přímo do „datového signálu“
 - například: kódování Manchester
 - každý bitový interval obsahuje vždy nejméně jednu změnu
 - má to nejvyšší (100%) režii
- technika bit stuffing
 - vkládání bitu „pokud je potřeba“
 - režie je limitně = 0%
- blokové kódování
 - místo „vstupního“ bloku n-bitů se odesílá „výstupní“ blok o velikosti k-bitů
 - předpoklad: $k > n$ (= určitá redundance)
 - příklad: kódování 4b/5b (100 Mbit Ethernet)
 - místo bloku 4 bitů se odesílá 5 bitů
 - příklad: kódování 8b/10b (Gbit Ethernet)
 - místo bloku 8 bitů se odesílá 10 bitů
 - efekt: ne všechny k-tice jsou využity
 - vybírají se ty, které mají nejvíce změn !!

asynchronní a arytmičkový přenos

- existují ještě další způsoby, jak zajistit synchronizaci

- **asynchronní přenos**

- a-synchronní = bez synchronizace
 - ve smyslu: nepotřebuje žádnou (další) synchronizaci
- začátek a konec každého bitového intervalu je signalizován samostatně
 - je k tomu nutná 3-stavová logika
 - signál, který má (nejméně) 3 stavy



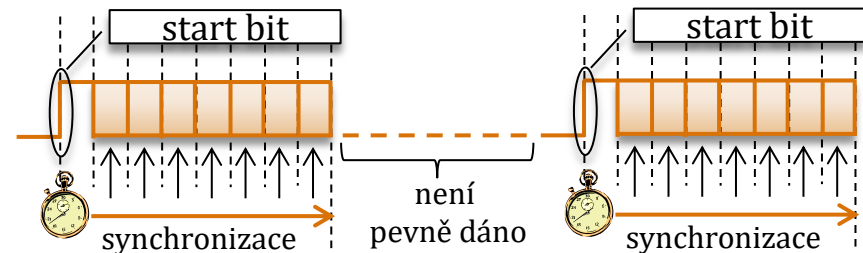
- jednotlivé bitové intervaly nemusí být stejně dlouhé
- v praxi se (příliš) nepoužívá

- **pozor na terminologii:**

- když se dnes řekne „asynchronní“
 - míní se tím „arytmický“ !!!

- **arytmický přenos**

- data jsou přenášena po znacích
 - znak = skupina bitů pevné velikosti
 - např. 7 bitů (obvykle 5 až 8 bitů)
- a-rytmický = bez rytmu
 - ve smyslu: postrádá rytmus (přenosu)
 - ve smyslu: prodlevy mezi znaky mohou být libovolně dlouhé
- na začátku každého znaku je start bit
 - podle něj se příjemce zasynchronizuje
 - „seřídí si své hodinky“



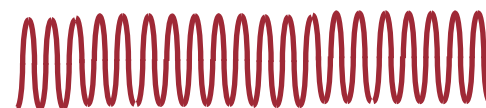
- předpoklad: synchronizace „vydrží“ po dobu přenosu celého znaku
 - a na začátku dalšího znaku dojde k nové synchronizaci

modulovaný přenos

- **připomenutí**

- modulovaný přenos = snažíme se přenášet takový signál, který danou přenosovou cestou projde nejlépe

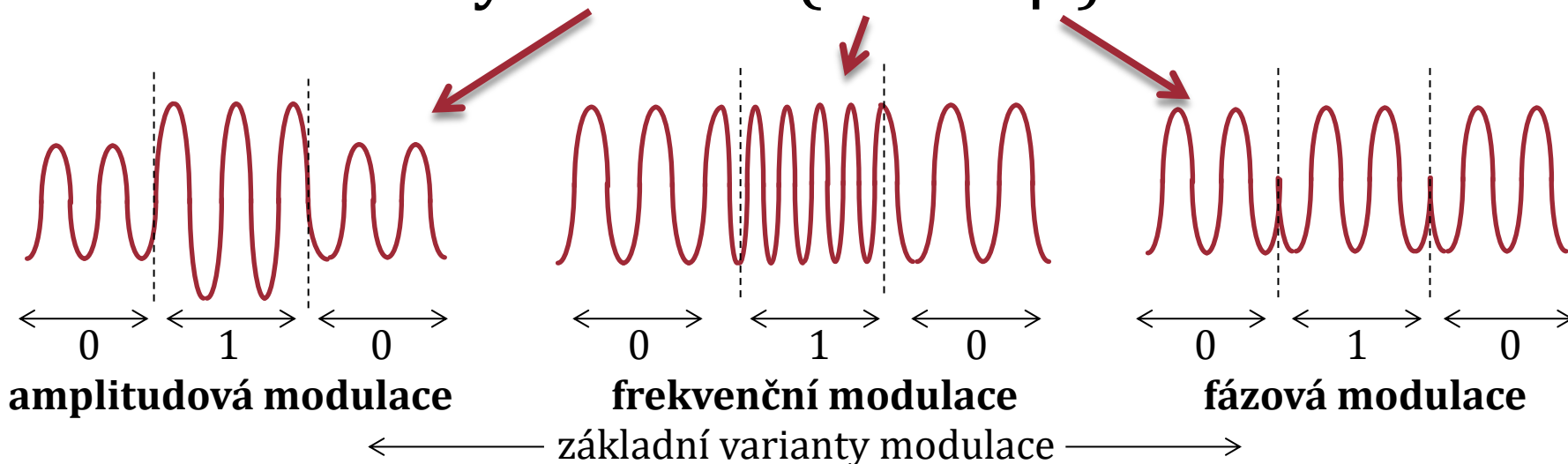
- což je harmonický signál (signál sinusového průběhu):



- **ale:**

- samotný harmonický signál ještě nenese žádnou užitečnou informaci
 - představuje pouze tzv. **nosnou** (nosný signál, harmonickou nosnou)
- na tento signál je teprve třeba „naložit“ informaci, určenou k přenesení
 - „naložit“ formou změny některého z parametrů harmonického signálu = **modulace**
- digitální modulace: „nakládáme“ digitální data

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

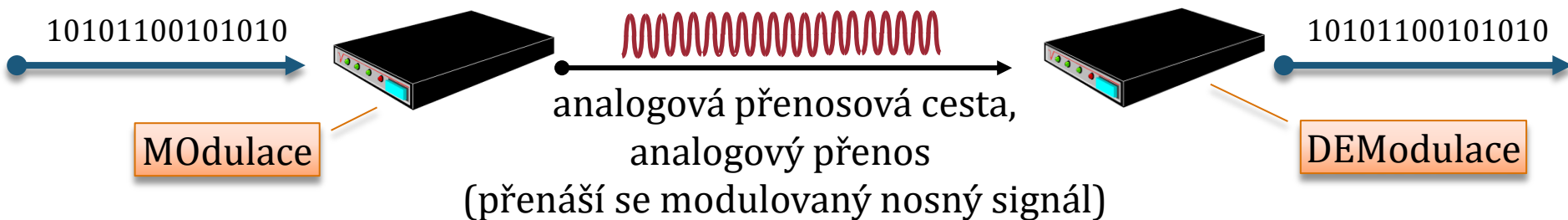


modemy a kodeky

- modulaci nosného signálu má na starosti zařízení zvané **MODEM**

- M**Od**ulátor/D**EM**odulátor

- zajišťuje i demodulaci: „sejmutí“ užitečné informace z modulovaného signálu



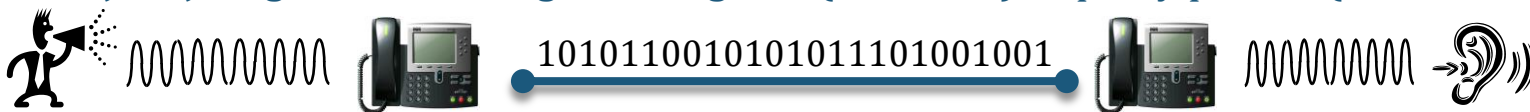
- v praxi: modem slouží pro přenos digitálních dat po analogové přenosové cestě

- například:
 - po analogové telefonní lince (telefonní modem, rychlosti až 56 kbit/s)
 - po tzv. místní smyčce (ADSL modem, VDSL modem, DSLAM, rychlosti v řádu Mbit/s)
 - po kabelové přípojce (kabelový modem, rychlosti v řádu Mbit/s)
 -

- opačná situace:

- máme digitální přenosovou cestu, potřebujeme po ní přenášet analogová data

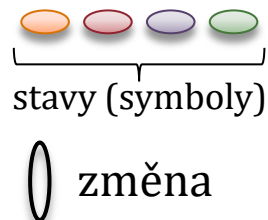
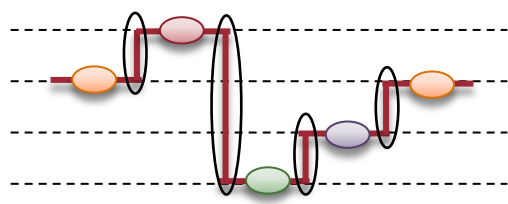
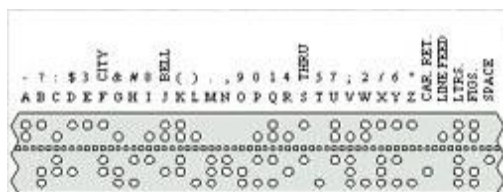
- potřebujeme zařízení zvané **KODEK** (K**OD**ér/D**EK**odér)
 - zajišťuje digitalizaci analogového signálu (kódování) a zpětný převod (dekódování)



modulační rychlost (baud rate)

- je rychlost, s jakou se mění modulace nosného signálu

- 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

- změna signálu je přechodem mezi 2 různými stavy signálu (též: symboly)
 - symbol = stav (modulovaného) signálu
- místo pojmu "modulační rychlost" se někdy používá také pojem "symbolová rychlost"
 - anglicky: baud rate
- **modulační rychlost nevypovídá o tom, kolik dat se přenáší !!!**
 - to záleží ještě na tom, kolik je stavů/symbolů
 - kolik bitů reprezentuje jedna změna stavu!!!

vícestavová modulace

- **nosný signál nemusí přecházet (díky modulaci) jen mezi 2 různými stavy (symboly)**

– ale může nabývat většího počtu různých stavů → jde o vícestavovou modulaci

- **stavy vs. bity:**

– pro znázornění k bitů potřebujeme 2^k různých stavů

– resp: pomocí n stavů lze znázornit $\log_2(n)$ bitů

- **příklady:**

– 2 stavová modulace

- 2 různé stavy znázorní 1 bit



– 4 stavová modulace

- 4 různé stavy znázorní 2 bity



– 8 stavová modulace

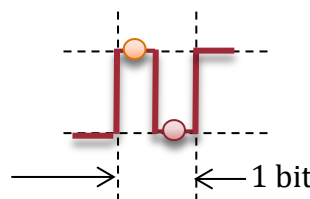
- atd.



- **ale také obráceně:**

– na 1 bit se spotřebují 2 změny stavu

- kódování Manchester (Ethernet)



- **praktický problém:**

– počet stavů/symbolů nelze libovolně zvyšovat

- protože příjemce by je už nebyl schopen dostatečně spolehlivě rozlišit

- **důsledek:**

– někde leží hranice, za kterou už nemá smysl zvyšovat počet stavů/symbolů

- tato hranice je dána šířkou přenosového pásma

kombinovaná modulace

- **připomenutí:**

- existují 3 základní varianty modulace: amplitudová, frekvenční a fázová
 - každá z nich je jinak „efektivní“ – ve smyslu možnosti spolehlivé detekce změny stavu
 - nejefektivnější je modulace fázová
 - vyvolává „ostré“ změny, které se nejsnáze detekují, umožňuje rozlišit nejvíce stavů

- **v praxi:**

- pro zvýšení „výtežnosti“ (počtu rozlišitelných stavů) se základní varianty modulace kombinují

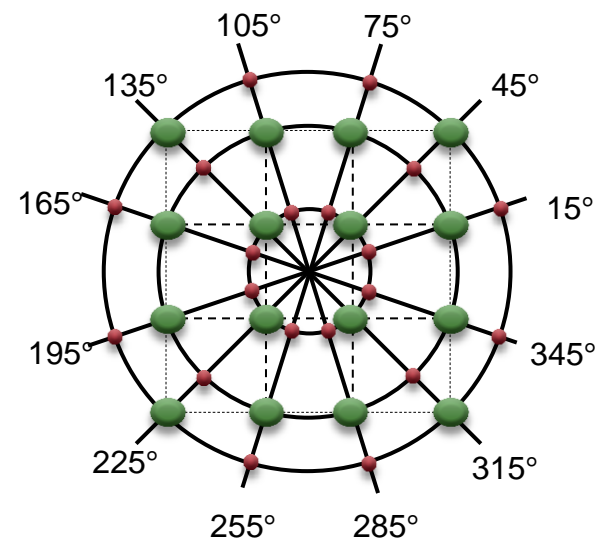
- **příklad:**

- modulace QAM

- kvadrurní amplitudová modulace

- má více variant

- QAM 16
 - rozlišováno je 16 stavů
 - každá změna reprezentuje 4 bity
- QAM 64
 - 64 stavů, 6 bitů na 1 změnu
- QAM 256
 - 256 stavů, 8 bitů na 1 změnu



- **podrobněji: modulace QAM 16**

- vzniká součtem 2 nosných signálů
 - posunutých o 90°, proto „kvadrurní“
- jedna nosná: amplitudová modulace, 3 stavy
- druhá nosná: fázová modulace, 12 stavů
- výsledek: 36 kombinací (12x3)
 - z nich je skutečně využíváno jen 16
 - a to ty, které jsou „nejdále od sebe“

přenosová rychlost (bit rate)

- **říká, kolik bitů se přenese za sekundu**
 - měří se v bitech za sekundu (resp. v násobcích: kbit/s, Mbit/s, Gbit/s atd.)
 - má nominální charakter
 - vypovídá o tom, jak dlouho trvá přenos jednoho bitu
 - bez ohledu na to, zda jde o „užitečný“ nebo režijní bit
 - efektivní (skutečně dosahovaná) přenosová rychlost může být i výrazně nižší
 - přenosová rychlost nevypovídá nic o tom, kolikrát za sekundu se změnil přenášený (modulovaný) signál
 - tj. jaká je modulační rychlost
- **obecný vztah mezi modulační a přenosovou rychlostí:**

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

přenosová rychlost [bit/s]	modulační rychlost [Bd]	počet rozlišovaných stavů	bitů/změnu	standard
2400	600	16	4	V.22bis
9600	2400	16	4	V.32
14400	2400	64	6	V.32bis
28800	3200	512	9	V.34
56000	8000	128	7	V.90,V.92

– příklady:

- Ethernet:
 - přenosová rychlost = ½ modulační rychlosti
- RS-232, Centronics, ...
 - přenosová rychlost = modulační rychlost
- telefonní modemy
 - přenosová rychlost > modulační rychlost
 - viz tabulka

přenosový výkon

- **připomenutí:**

- **přenosová rychlost je nominální veličina**

- nedělá rozdíl mezi užitečnými daty a režii (kterou také „započítává“)
 - vypovídá spíše o tom, jak dlouho trvá přenos jednoho bitu (užitečného či režijního)

- **jiná veličina:**

jde o veličiny stejného rozměru (bit/s, resp. násobky)

- **přenosový výkon (též: efektivní přenosová rychlost, skutečně dosahovaná rychlost, propustnost)**

- : throughput
 - započítává pouze užitečná data (nikoli režii)
 - vypovídá o tom, jaký objem (užitečných) dat se přenese za delší časový úsek

např. 1 hodinu, 1 den

- **obvykle:**

- **přenosový výkon je (často i výrazně) nižší, než přenosová rychlost**

- kvůli tomu, že v něm není započítána žádná režie (zatímco v přenosové rychlosti ano)
 - jako např.: hlavičky a patičky bloků (segmentů, paketů, rámců, buněk, ...), prodlevy, ..

- **ale:**

- **za určitých okolností může být i vyšší**

- kvůli kompresi přenášených dat
 - např. u telefonních modemů

standard	max. nominální rychlost	reálná efektivní rychlost
802.11b	11 Mbit/s	do 6 Mbit/s
802.11g	54 Mbit/s	do 22 Mbit/s
802.11a	54 Mbit/s	do 25 Mbit/s

bezdrátové technologie 802.11 (Wi-Fi)

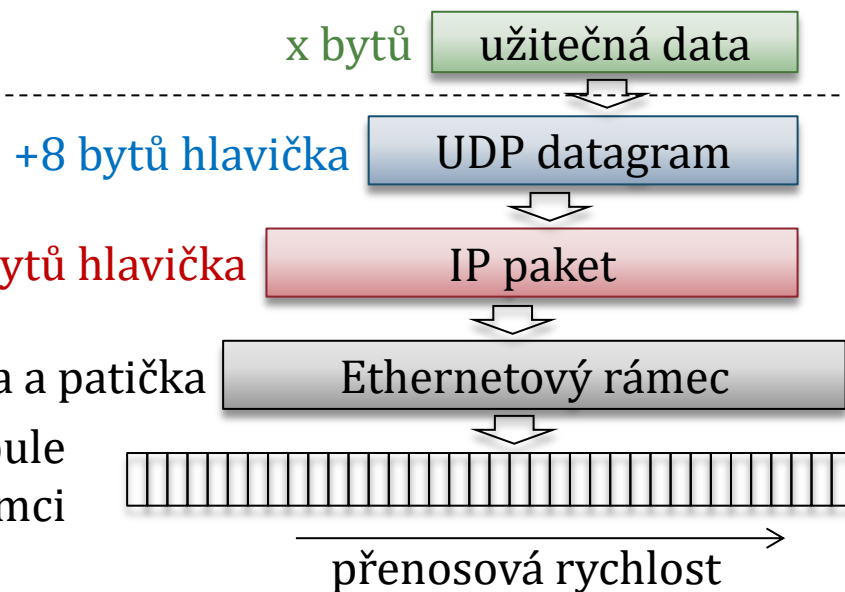
přenosový výkon a režie protokolů

- **přenosový výkon závisí i na velikosti přenášených dat**

– **skrze režii protokolů**

režie Ethernetu, IP a UDP:
celkem 66 bytů
na 1 blok užitečných dat
(pokud nedojde k fragmentaci)

+18 bytů hlavička a patička
+20 bytů preamble
a odstup mezi rámci



- **příklady:**

– **přenášíme 64 bytů užitečných dat**

- fakticky (nominální přenosovou rychlostí) se přenesou 64+66 bytů
 - režie protokolů představuje 50,76%
 - je-li přenosová rychlost např. 1 Mbit/s, přenosový výkon bude méně než poloviční !!

– **přenášíme 1024 bytů užitečných dat**

- fakticky se přenesou 1024+66 bytů
 - režie protokolů představuje 6,05%

- **v praxi se uplatňuje i další režie:**

– **na agregaci**

- chování dalších uživatelů, kteří sdílí stejnou přenosovou kapacitu

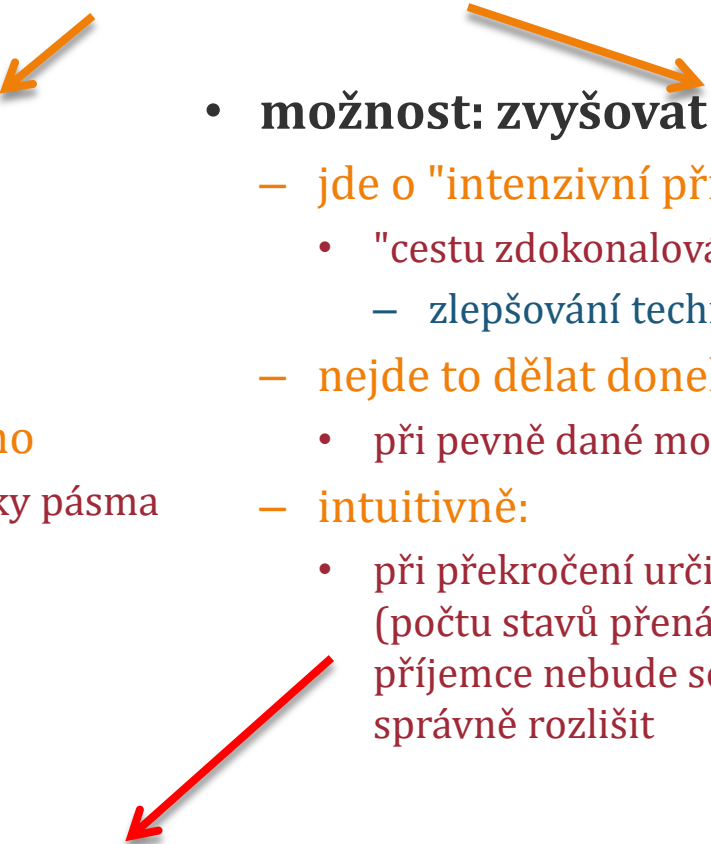
– **na zajištění spolehlivosti přenosu**

- chybně přenesená data se přenáší znovu

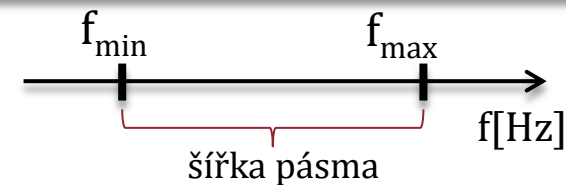
– **na umělá omezení**

- např. FUP (Fair Use Policy)

zvyšování přenosové rychlosti

- co dělat, když potřebujeme zvýšit přenosovou rychlost?
 - a když víme, že platí: $v_{\text{přenosová}} = v_{\text{modulační}} * \log_2(n)$ 
- možnost: zvyšovat $v_{\text{modulační}}$
 - jde o "extenzivní přístup"
 - využívání více zdrojů
 - konkrétně tzv. šířky pásma
 - je to drahé (stojí to peníze)
 - ale: lze to dělat libovolně dlouho
 - ovšem s rostoucí spotřebou šířky pásma
 - tedy s vyššími náklady
- otázka:
 - jak dlouho lze zvyšovat počet (rozlišovaných) stavů?
 - kde leží hranice dokonalosti technologií??
 - na čem je tato hranice závislá?
 - závisí pouze na šířce pásma a na kvalitě linky, nezávisí na použité technologii !!!!
- 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

šířka přenosového pásma



- intuitivně:**

- jde o rozsah frekvencí, které lze využít pro přenos signálu

- anglicky: bandwidth

- týká se:**



- všech signálů: od „diskrétních“ až po nosné signály harmonického průběhu

- rozhoduje o tom, jak „dobře“ je signál přenesen**

- jak se změní jeho průběh (i amplituda)

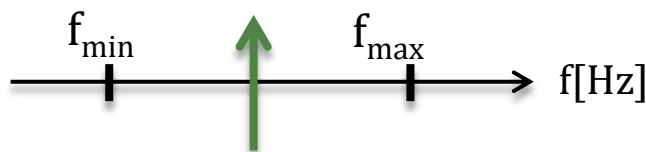


- vliv šířky pásma na harmonický signál**

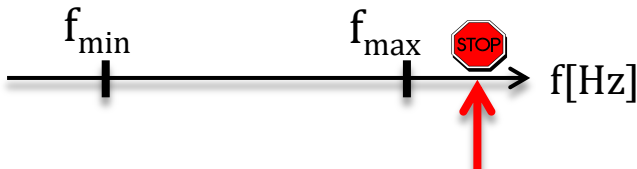
$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

- je (v principu) jednoduchý:

- pokud frekvence signálu leží uvnitř (intervalu) šířky pásma, je přenesen

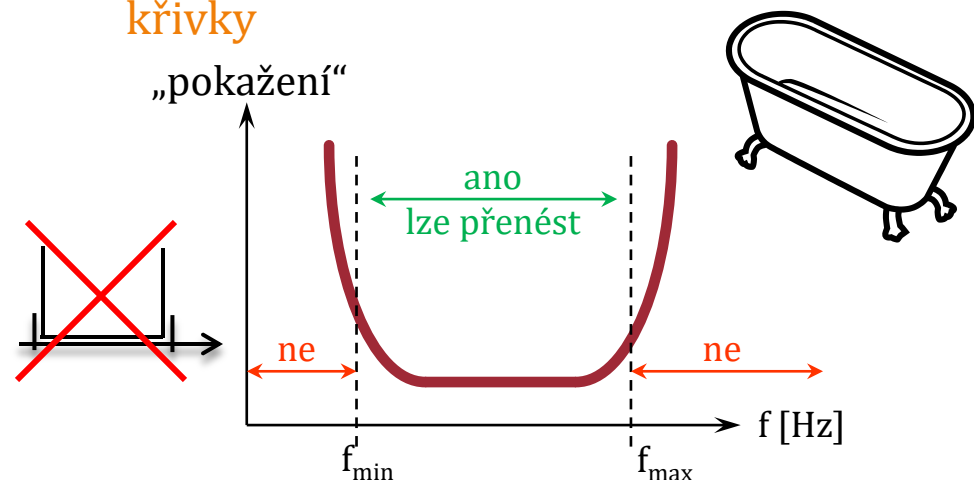


- pokud leží mimo (interval) šířky pásma, není přenesen vůbec



- prakticky je situace o něco složitější:**

- míra pokažení (hlavně útlumu) se nemění skokem, ale podle tzv. vanové křivky

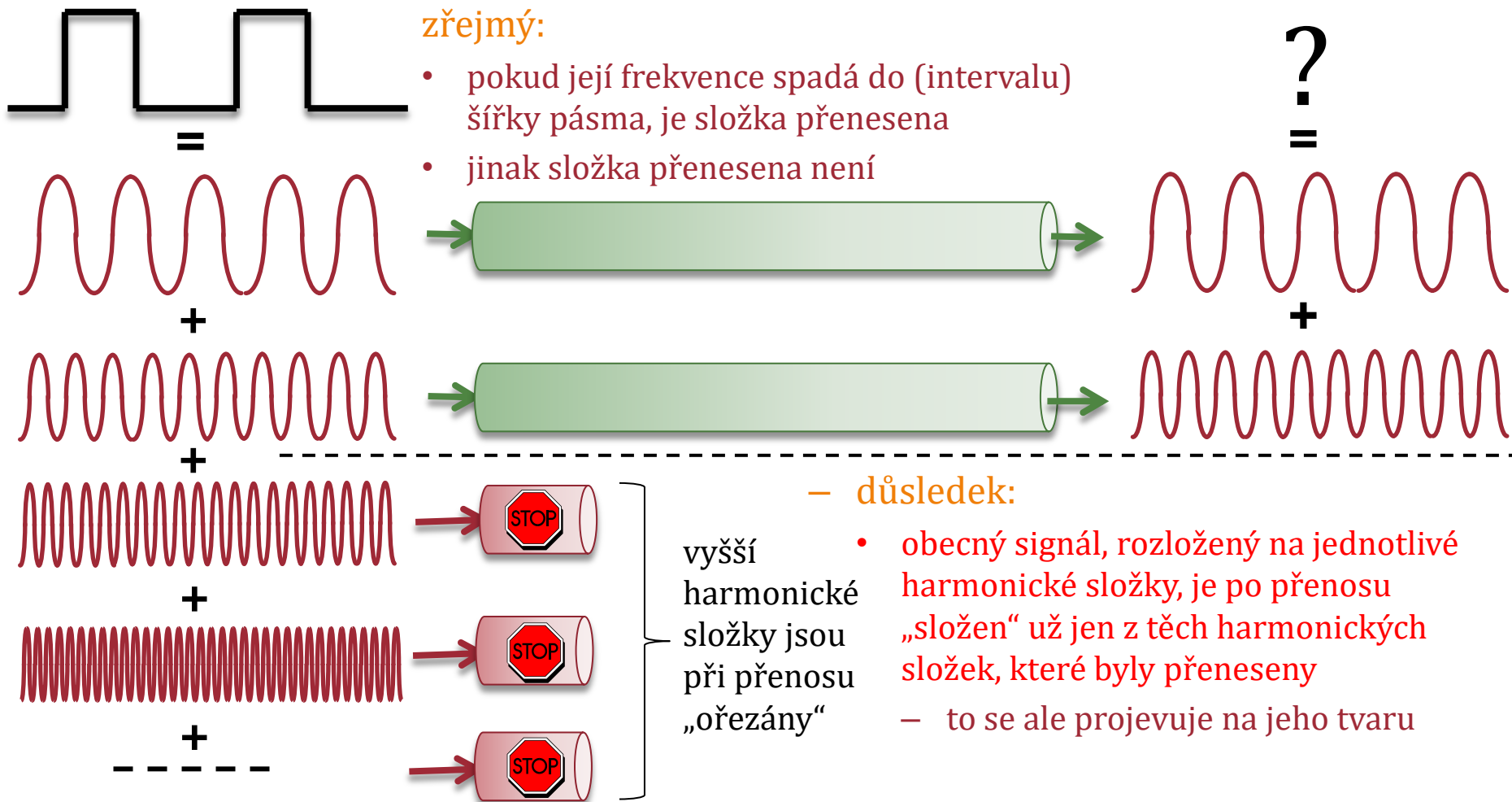


vliv na signál obecného průběhu

- **vliv šířky pásma na přenos obecného signálu je složitější**
 - ale: lze si pomoci rozkladem obecného signálu na harmonické složky
 - obdoba Taylorova rozvoje: obecný signál je součtem (nekonečné) řady harmonických složek

– efekt na každou harmonickou složku je ale zřejmý:

- pokud její frekvence spadá do (intervalu) šířky pásma, je složka přenesena
- jinak složka přenesena není



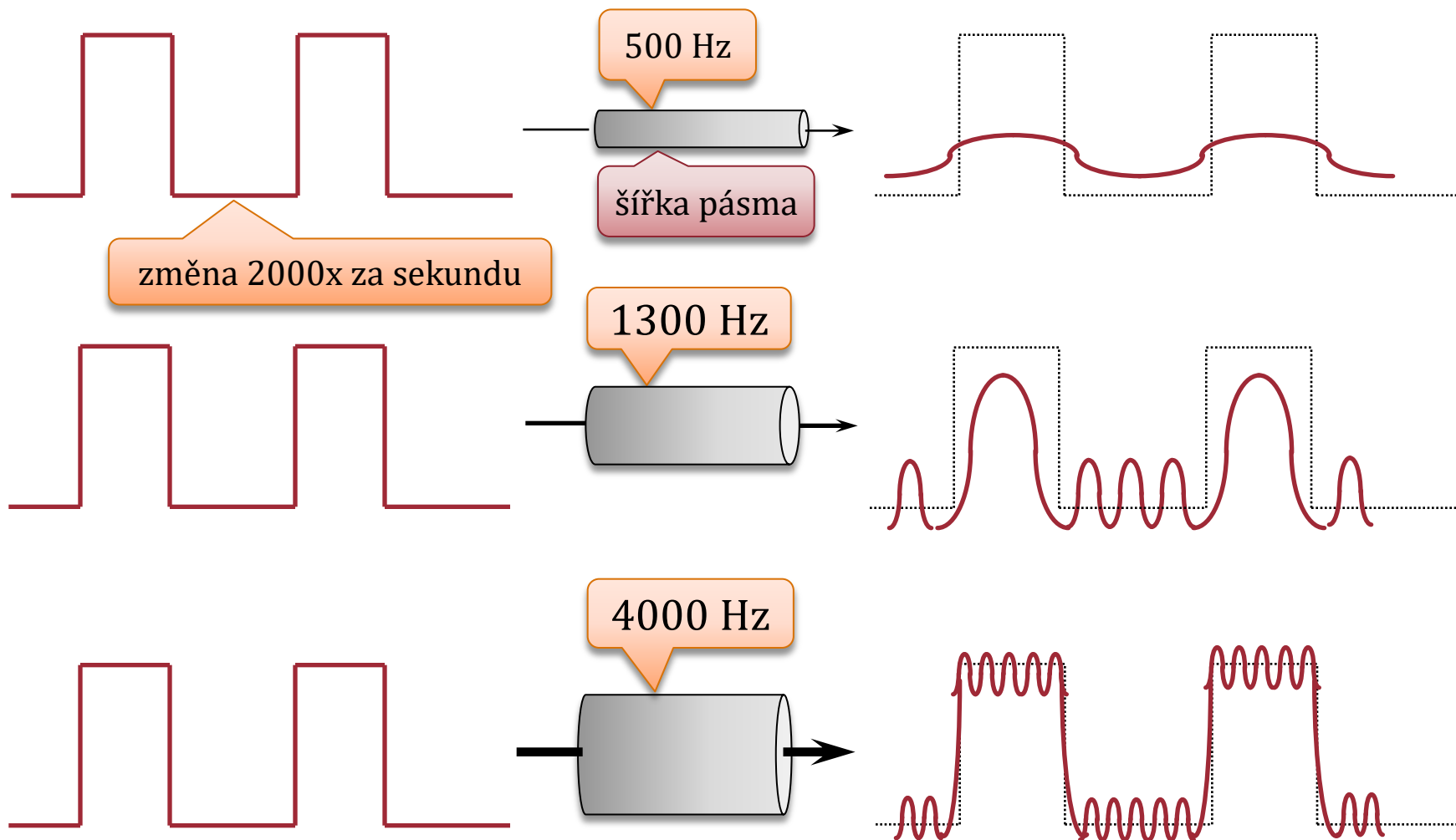
– důsledek:

- obecný signál, rozložený na jednotlivé harmonické složky, je po přenosu „složen“ už jen z těch harmonických složek, které byly přeneseny
 - to se ale projevuje na jeho tvaru

vyšší harmonické složky jsou při přenosu „ořezány“

představa vlivu šířky pásma

- počet přenesených harmonických složek rozhoduje o věrnosti přijatého signálu
 - o míře jeho podobnosti původně odesílanému signálu



shrnutí

- intuitivně:

- 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“
- tím větší může být modulační rychlost
- tím větší může být přenosová rychlost
- platí to obecně, pro přenosy v základním i přeloženém pásmu

- šířka přenosového pásma má charakter "zdroje" (suroviny)

- za šířku pásma se platí !!!

- závislost mezi šířkou pásma a „schopností přenášet data“ je v zásadě lineární!!!



- ale:

- jaká je exaktní forma závislosti?

- mezi šířkou pásma, modulační a přenosovou rychlostí

- je-li pevně dána šířka pásma, na čem závisí maximální dosažitelná přenosová rychlost?

- viz $V_{\text{přenosová}} = V_{\text{modulační}} \cdot \log_2(n)$

- 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 a „kvalitou“ přenosové cesty
 - odstupem signálu od šumu
 - konkrétně:

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

- **důsledky:**
 - závislost na šířce pásma je lineární !!!
 - naopak zcela chybí závislost na použité technologii !!!
 - nezáleží na použité modulaci ani na počtu rozlišovaných stavů přenášeného signálu (n)
- **závěr:**
 - technologiemi lze "vylepšovat" využití nějaké přenosové kapacity, ale jen do hranice dané Shannonovým teorémem
- **praxe:**
 - telefonní modemy: jsou prakticky „nadoraz“
 - optické přenosy: mají k hranici velmi daleko

už nelze zvyšovat přenosovou rychlost

lze ještě hodně zrychlovat

příklad: analogové telefonní modemy

- **pevná analogová telefonní linka**

- využívá tzv. **místní smyčku**

- jde o metalické vedení (kroucený pár), vedoucí od účastníka k telefonní ústředně
 - přesněji: využívá „hovorové pásmo“ místní smyčky

- kvalitní smyčka má odstup signál:šum

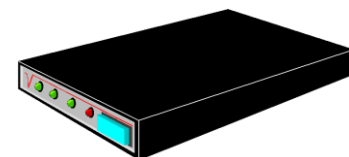
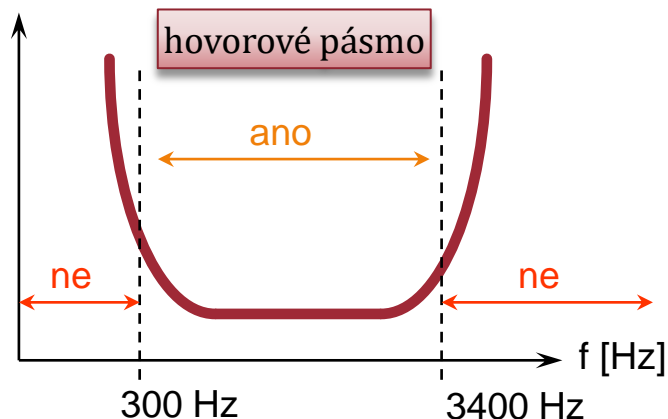
- 1000:1, neboli 30 dB

- na straně ústředny je realizováno umělé frekvenční omezení:

- 300 až 3400 Hz!!!

- tj. šířka pásma: 3,1 kHz

„pokažení“



- **v praxi:**

- existují analogové telefonní modemy s rychlostí 33 kbit/s

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

- existují i telefonní modemy s rychlostí 56 kbit/s:

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

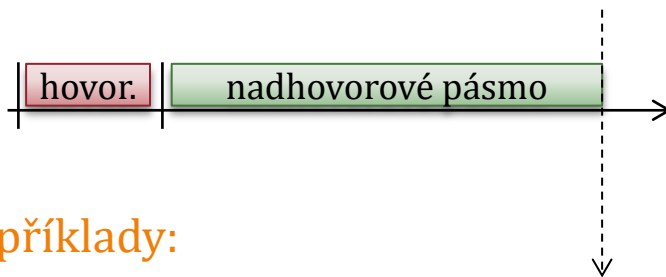
- **dle Shannonova teorému:**

- maximální přenosová rychlost (na analogové tel. lince) vychází na cca 30 kbit/s

příklady: xDSL, PLC, optika

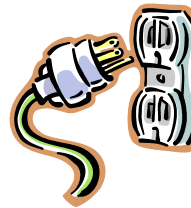
• xDSL (Digital Subscriber Line)

- technologie, které využívají nadhovorové pásmo místní smyčky
- je výrazně širší, proto mohou dosahovat výrazně vyšších přenosových rychlostí



– příklady:

- ADSL:
 - využívá pásmo do 1,1 MHz
 - dosahuje až 8 Mbit/s(down)
- ADSL2+
 - využívá pásmo do 2,2 MHz
 - dosahuje až 25 Mbit/s
- VDSL, VDSL2+
 - využívá pásmo do 30 MHz
 - dosahuje až 52 Mbit/s



• PLC (PowerLine Communications)

- technologie, která využívá schopnosti silových rozvodů (230 V) přenášet i vyšší frekvence
- obvykle se využívá rozsah od 1,8 MHz do 30 MHz
- což je pásmo krátkých vln, které používají radioamatéři
 - 160m až 10metrové vlny
 - problém s rušením !!!
- někdy až do 50/100 MHz
- dosahované rychlosti: až 200 Mbit/s

• optické přenosy

- využívají světlo, v pásmu 10^8 MHz



- obrovská šířka pásma !!!!!
- obrovský přenosový potenciál podle Shannonova kritéria
- zatím jsme ve využití jen na začátku
 - je využit jen malý zlomek celého potenciálu optických přenosů

Nyquistův teorém

- **otázka:**

- jak souvisí modulační rychlost se šířkou pásma?

- **intuitivní odpověď:**

- je to podobné jako u přenosové rychlosti
 - čím užší je šířka pásma, tím větší je zkreslení přeneseného signálu
 - a tím hůře dokáže příjemce detekovat změny stavu signálu
- ale jaká je konkrétní závislost?



- **skutečnost:**

- vyplývá z výsledků Harryho Nyquista
 - Nyquistův teorém
 - formulován 1928, dokázal až Claude Shannon v roce 1949
- zjednodušeně:

- $v_{\text{Nyquist}} = 2 * \text{šířka pásma}$
 - týká se ale jen "frekvenčně omezeného" signálu (0 až f)

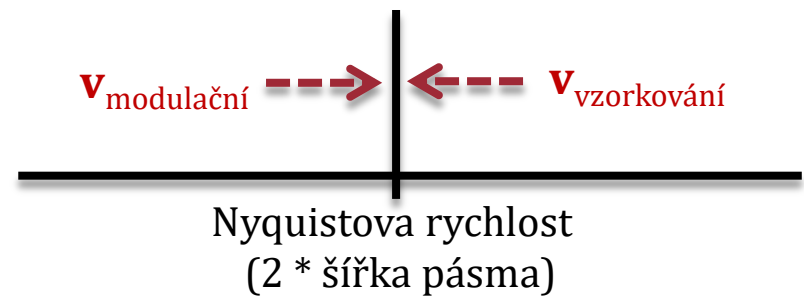
Nyquist
rate

- **modulační (symbolová) rychlost:**

- v_{Nyquist} je horní mezí pro $v_{\text{modulační}}$
 - nemá smysl zvyšovat modulační rychlost nad $v_{\text{Nyquist}} = 2 * \text{šířka pásma}$
 - jinak už nepůjde správně detekovat všechny změny
 - v praxi: $v_{\text{modulační}} = 2 * \text{šířka pásma}$

- **rychlost vzorkování:**

- jak často je třeba vzorkovat zdrojový signál?
 - je nutné to dělat nejméně 2x za periodu !
- v_{Nyquist} je spodní mezí pro $v_{\text{vzorkování}}$
 - pomaleji: o něco bychom přišli
 - rychleji: už nezískáme „nic navíc“
 - v praxi: $v_{\text{vzorkovací}} = 2 * \text{šířka pásma}$



digitalizace analogového signálu

- **připomenutí:**

- modem:

- slouží k přenosu digitálních dat po analogové přenosové cestě

- kodek:

- slouží k přenosu analogových dat po digitální přenosové cestě

- **digitalizace:**

- je převod analogového signálu na digitální data

- aneb: to, co dělá kodek

- **obecný postup digitalizace:**

1. analogový signál se "vyvzorkuje"

- sejmou se vzorky momentální hodnoty analogového signálu

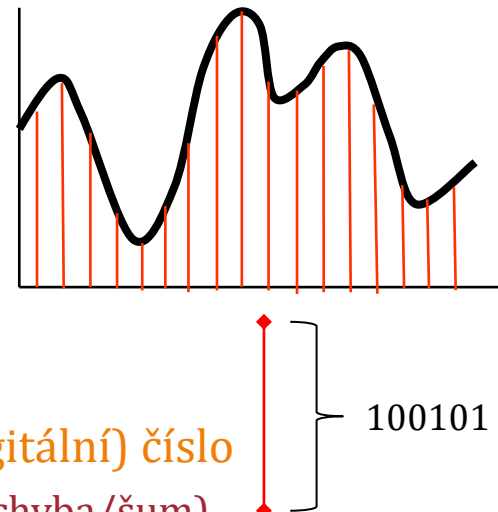
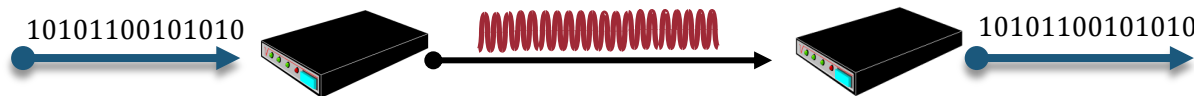
2. velikost každého (analogového) vzorku se vyjádří jako (digitální) číslo

- přitom nutně dochází k určitému zaokrouhlení (kvantizační chyba/šum)

- získaná (digitální) data se komprimují a event. dále upravují

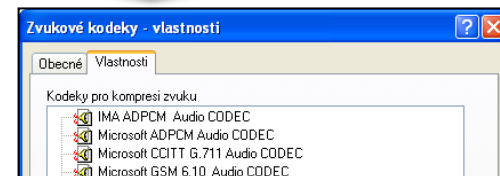
- **v praxi se musí vyřešit otázky jako:**

- jak často vzorkovat původní analogový signál
- kolik bitů je potřeba na vyjádření hodnoty každého vzorku
- jak co nejvíce zmenšit objem bitů, který takto vzniká



1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1

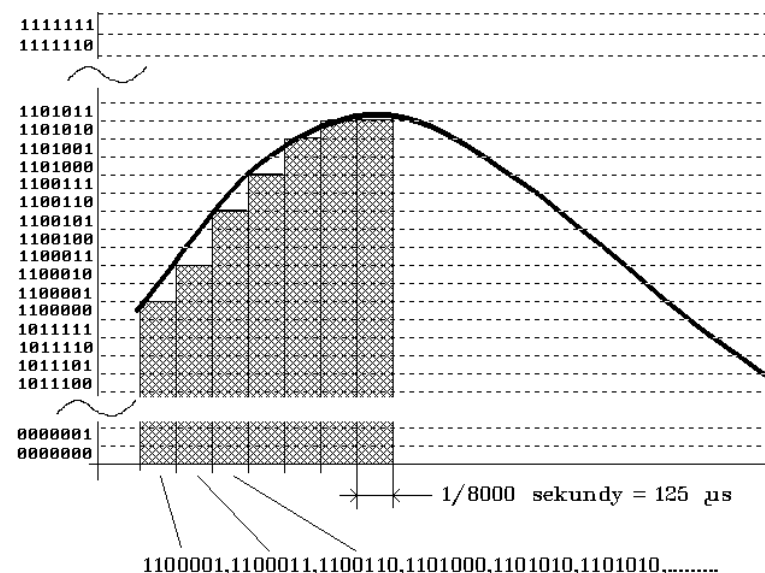
kodeků bývá na výběr více



příklady kodeků: PCM, FR, EFR

- **PCM (Pulse Coded Modulation)**

- pochází z roku 1937, vytvořeno pro (digitální) pevnou telefonní síť
 - používá se dodnes
 - nejen v (pevné) telefonii, vč. ISDN
 - je velmi neefektivní
 - zcela bez komprimace
- vstupní signál má rozsah 4 kHz
 - analogový hovor je v rozsahu 300 až 3400 Hz
 - je „zaokrouhlen“ na 0 - 4000 Hz
- dle Nyquista: nutné vzorkovat 8000x za sekundu
 - 2 x za periodu (2x 4000)
 - vzniká 8000 vzorků za 1 sekundu
- každý vzorek se vyjádří pomocí 8 bitů
 - jen 256 možných úrovní
 - relativně velká kvantizační chyba
- celkový datový tok: 8000x8 bitů/s
 - 64 kbit/s



- **v mobilních sítích**

- se používají podstatně efektivnější kodeky
 - FR (Full Rate): 13 kbit/s na hovor
 - a 9,8 kbit/s na opravu chyb
 - EFR (Enhanced Full Rate): 12,2 kbit/s
 - a 10,6 kbit/s na opravu chyb
 - HR (Half Rate): 6,5 kbit/s na hovor
 - moc se neosvědčil