

2. Fyzická a linková vrstva

PB156: Počítačové sítě

Eva Hladká

Slidy připravil: Tomáš Rebok

Fakulta informatiky Masarykovy univerzity

jaro 2011

Struktura přednášky

- 1 L1. Fyzická vrstva
 - Přehled
 - Úvod
 - Signály
 - Přenos dat
 - Přenosová média
 - Rekapitulace
- 2 L2. Vrstva datového spoje
 - Přehled
 - Úvod
 - Služby
 - Tvorba rámců, adresace
 - Chybové řízení
 - Řízení přístupu k médiu (MAC)
 - L2 síť
 - Budování L2 sítí
 - Rekapitulace

Struktura přednášky

- 1 L1. Fyzická vrstva
 - Přehled
 - Úvod
 - Signály
 - Přenos dat
 - Přenosová média
 - Rekapitulace
- 2 L2. Vrstva datového spoje
 - Přehled
 - Úvod
 - Služby
 - Tvorba rámců, adresace
 - Chybové řízení
 - Řízení přístupu k médiu (MAC)
 - L2 síť
 - Budování L2 sítí
 - Rekapitulace

L1. Fyzická vrstva – Přehled

ISO / OSI

Aplikační vrstva
Síťové aplikace

Prezentační vrstva
Reprezentace dat

Relační vrstva
Relace, meziuzlová komunikace

Transportní vrstva
End-to-end spoje, zajištění spolehlivosti

Síťová vrstva
Výběr cesty a IP (logické adresování)

Vrstva datového spoje
MAC a LLC (fyzické adresování)

Fyzická vrstva
Přenosová média, signály, přenos binárních dat

Co nás nyní čeká...

- představení L1, poskytované služby
- analogové/digitální signály
- přenos binárních dat – modulace, kódování
- přenosová média, multiplexing

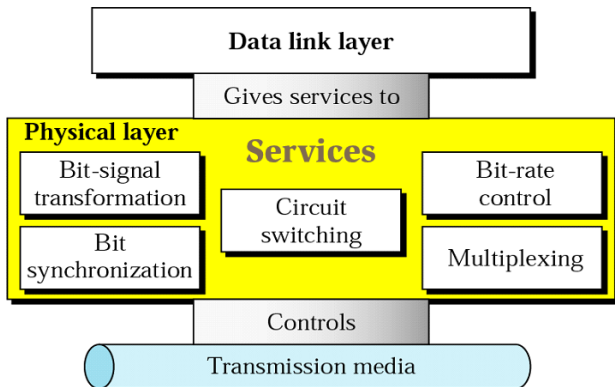
L1 z pohledu sítě – kde se pohybujeme?



- pouze point-to-point spoje
- bez možnosti adresace stanic

Úvod

- data mezi komunikujícími uzly přenášeny *přenosovým médiem*
 - přenosové médium = pasivní entita, žádná logika řízení
- **fyzická vrstva:**
 - poskytuje funkcionalitu pro spolupráci s přenosovým médiem
 - poskytuje služby pro *vrstvu datového spoje*
 - vrstva datového spoje předává do (získává z) fyzické vrstvy data vyjádřená posloupností 0 a 1, seskupená do *rámců*
 - fyzická vrstva transformuje bitový obsah rámců do *signálů* šířených přenosovým médiem
 - řídí děje v přenosovém médiu; rozhoduje např. o:
 - vysílání/přijmu přenášených dat (signálů)
 - kódování dat do signálů
 - počtu logických kanálů přenášejících data z různých zdrojů souběžně



Obrázek: Ilustrace služeb fyzické vrstvy.

Úvod – pokračování

- **hlavní cíl:** zajistit přenos jednotlivých bitů (= obsahu předaných rámců) mezi odesílatelem a příjemcem
 - zprostředkovává tak logickou cestu, kterou cestují zasílané bity
- nejrůznější standardy (RS-232-C, CCITT V.24, CCITT X.21, *IEEE 802.x*) definující elektrické, mechanické, funkční a procedurální vlastnosti rozhraní pro připojení různých přenosových prostředků a zařízení; například:
 - parametry přenášených signálů, jejich význam a časový průběh
 - vzájemné návaznosti řídicích a stavových signálů
 - zapojení konektorů
 - a mnoho dalšího

L1 – Physical Layer

Services

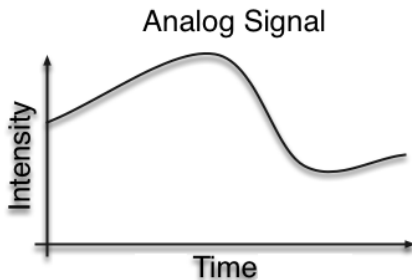
- *Bit-to-Signal Transformation*
 - representing the bits by a signal – electromagnetic energy that can propagate through medium
- *Bit-Rate Control*
 - the number of bits sent per second
- *Bit Synchronization*
 - the timing of the bit transfer (synchronization of the bits by providing clocking mechanisms that control both sender and receiver)
- *Multiplexing*
 - the process of dividing a link (physical medium) into logical channels for better efficiency
- *Circuit Switching*
 - circuit switching is usually a function of the physical layer
 - (packet switching is an issue of the data link layer)

Signály

- data jsou přenosovým médiem přenášeny ve formě (elektromagnetických) *signálů*
 - data musí být na signály transformována
- *signál* = časová funkce reprezentující změny fyzikálních (elektromagnetických) vlastností přenosového média
- data určená k přenosu – *digitální* (binární)
- signály šířené přenosovým médiem – *analogové* nebo *digitální*
 - některá média vhodná pro analogový i digitální přenos – drátový vodič (koaxiál, kroucená dvoulinka), optické vlákno
 - některá média vhodná pouze pro analogový přenos – éter

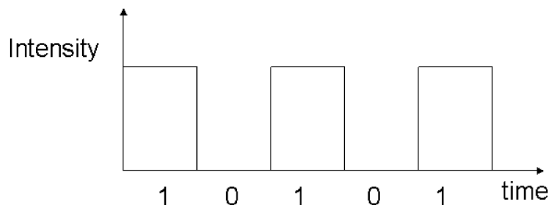
Analogový signál

- spojitý v čase (mění se hladce)
- lze jej šířit jak vodiči, tak bezdrátovým prostředím
- např. hlas, hudba, ...



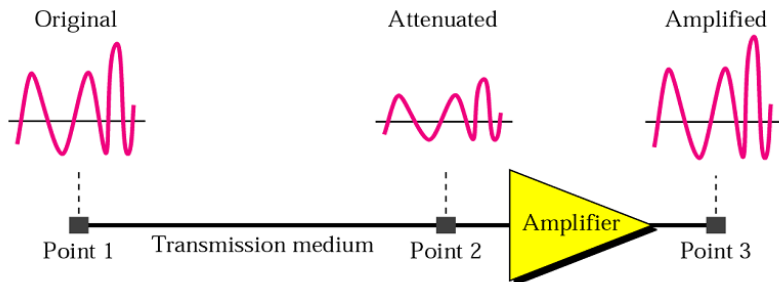
Digitální signál

- diskrétní v čase (mění se skokově)
- lze jej šířit pouze vodiči
- data diskrétní v hodnotách, např. znaky, prvky abecedy, ...



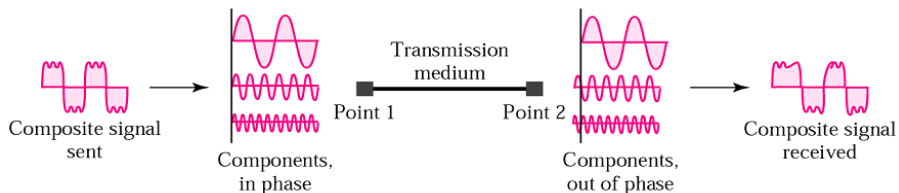
Defekty signálů – útlum (slábnutí)

- slábnutí signálu, ztráta energie
- způsobeno např. odporem média



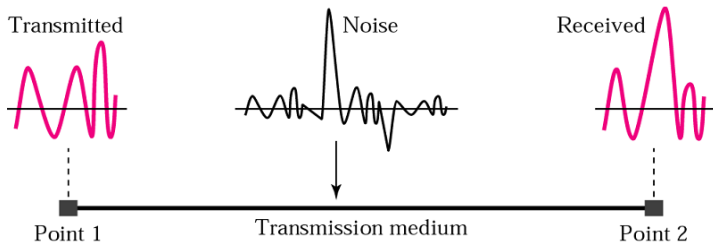
Defekty signálů – zkreslení

- ztráta tvaru
- způsobeno rozdílnou rychlostí šíření signálů na různých frekvencích



Defekty signálů – šum

- vliv cizorodé energie
- např. termální šum, indukovaný signál, přeslech, atp.



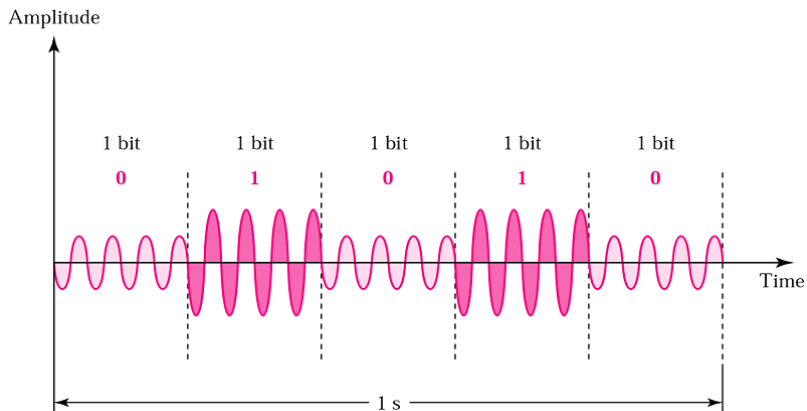
Přenos dat

- digitální/binární data („0 a 1“ proudící z/do vyšších vrstev) lze přenosovým médiem přenášet:
 - analogovým signálem
 - *modulací* nosného signálu digitálními daty
 - digitálním signálem
 - *transformací* kódování

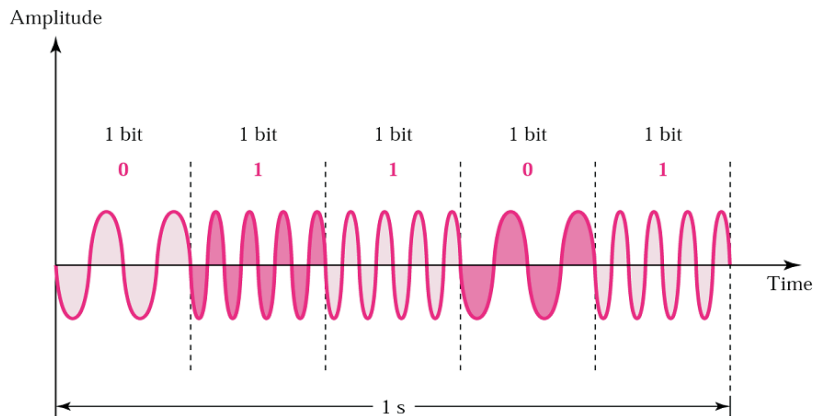
Analogový přenos – modulace signálu

- analogový signál lze přenášenými digitálními daty modulovat např.:
 - *amplitudovou digitální modulací* – mění se amplituda nosného signálu
 - *frekvenční digitální modulací* – mění se frekvence nosného signálu
 - *fázovou digitální modulací* – mění se fáze nosného signálu
- pro modulaci/demodulaci signálu slouží *modem*
(= MOdulátor/DEModulátor)

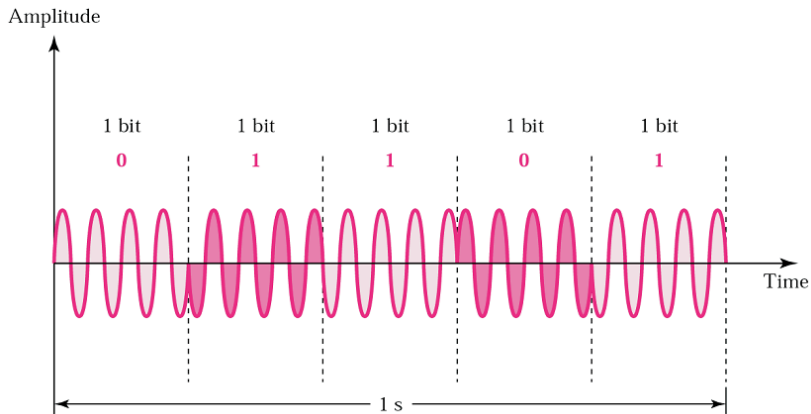
Analogový přenos – amplitudová digitální modulace



Analogový přenos – frekvenční digitální modulace

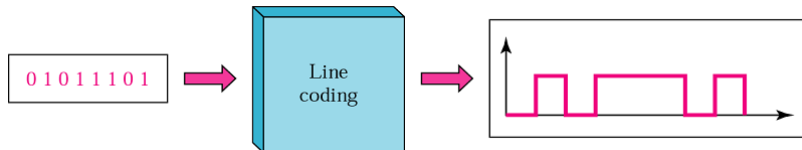


Analogový přenos – fázová digitální modulace



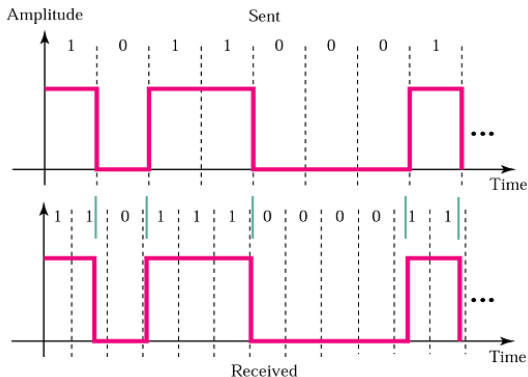
Digitální přenos – kódování

- *kódování* – proces konverze binárních dat do digitálního signálu
 - přímé, NRZ, Manchester, 4B/5B, aj.



- **problém:** *synchronizace vysílače a přijímače*
 - změnu úrovně signálu ($0 \rightarrow 1$, $1 \rightarrow 0$) lze využít pro synchronizaci hodin
 - neřeší dlouhé posloupnosti 0/1

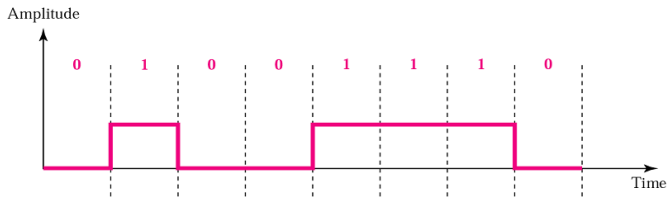
Digitální přenos – problém synchronizace hodin



Obrázek: Ilustrace problému synchronizace vysílače a přijímače (zcela bez synchronizace) – vysílač vysílá 10110001, přijímač přijímá 110111000011.

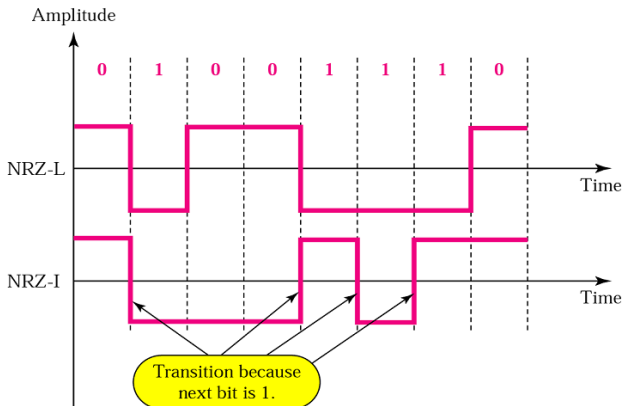
Digitální přenos – přímé kódování

- 1 = kladná hodnota amplitudy, 0 - nulová hodnota amplitudy
- žádná samosynchronizovatelnost



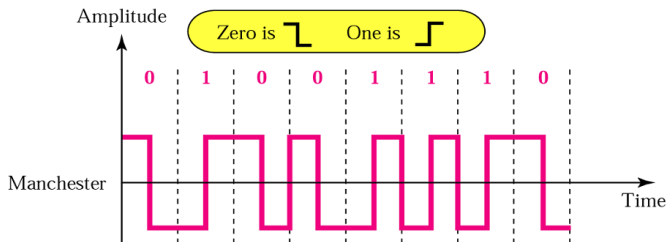
Digitální přenos – NRZ kódování

- *NRZ-L* – 1 = záporná, 0 = kladná amplituda
 - žádná samosynchronizovatelnost
- *NRZ-I* – 1 = změna polarizace amplitudy, 0 = žádná změna
 - řeší jen posloupnost 1, neřeší posloupnost 0



Digitální přenos – kódování Manchester

- každý bit kódován 2 prvky signálu
 - snížení efektivní přenosové kapacity
- plná samosynchronizovatelnost



Digitální přenos – kódování 4B/5B

- uměle zavedená redundance pro zabezpečení synchronizace
 - včetně možnosti detekce chyb
- substituce originálních 4-bitových bloků speciálními 5-bitovými vzorky
 - nejvýše tři 0 mohou následovat po sobě
 - vlastní přenos s využitím NRZ-I (počet 1 není důležitý)

4B	5B	4B	5B
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

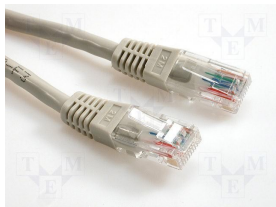
Přenosová média

- poskytují prostředí pro činnost fyzické vrstvy
- základní členění:
 - *voděná média*
 - poskytují fyzický kanál od jednoho zařízení ke druhému
 - kroucená dvoulinka (LANs, až 10 Gbps), koaxiální kabel, optické vlákno (páteře, stovky Gbps), atp.
 - *nevoděná média*
 - přenáší elektromagnetické vlnění bez použití fyzického vodiče
 - signály se šíří éterem (vzduch, vakuum, voda)
 - rádiové vysílání, mikrovlnné vysílání, infračervené vysílání, atp.
- detaily viz *PV183: Technologie počítačových sítí*

Voděná média



(a) Optický kabel.



(b) Kroucená dvoulinka.

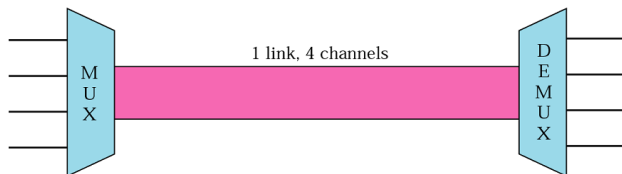


(c) Koaxiální kabel.

Obrázek: Vybraná voděná přenosová média.

Multiplexing

- *multiplexing* – technika sdílení dostupné přenosové kapacity přenosového média souběžnými komunikacemi
 - cílem je efektivnější využití média
 - uplatněn zejména u optických vláken a bezdrátů

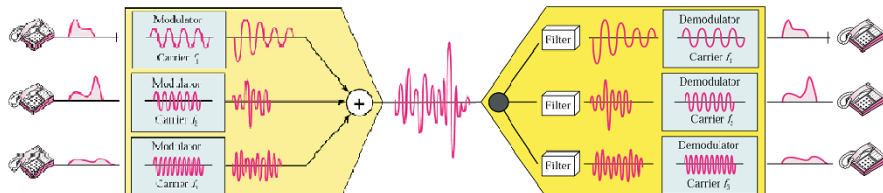


- pro analogové signály:
 - *Frequency-Division Multiplexing (FDM)*
 - *Wave-Division Multiplexing (WDM)*
- pro digitální signály:
 - *Time-Division Multiplexing (TDM)*

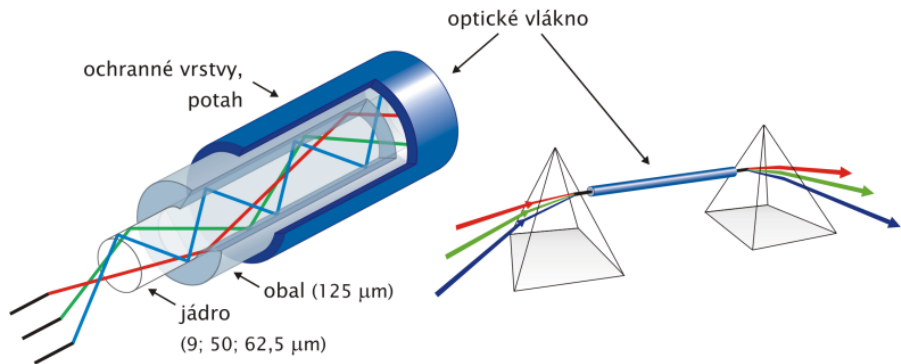
Multiplexing – analogové signály

- *Frequency-Division Multiplexing (FDM)*
 - každý přenášený signál je modulován samostatným nosným signálem s unikátní nosnou frekvencí
 - modulované nosné signály se kombinují do nového signálu, který se přenáší spojem
 - například pro telefonní spoje mezi ústřednami
 - éter: netřeba fyzicky realizovat multiplexory/demultiplexory, stanice mohou vysílat na odlišných frekvencích
- *Wave-Division Multiplexing (WDM)*
 - varianta FDM pro optické signály (optická vlákna)
 - použití více světelných paprsků na různých frekvencích
 - každá barva světla (vlnová délka, frekvence) reprezentuje 1 kanál

Frequency-Division Multiplexing (FDM)



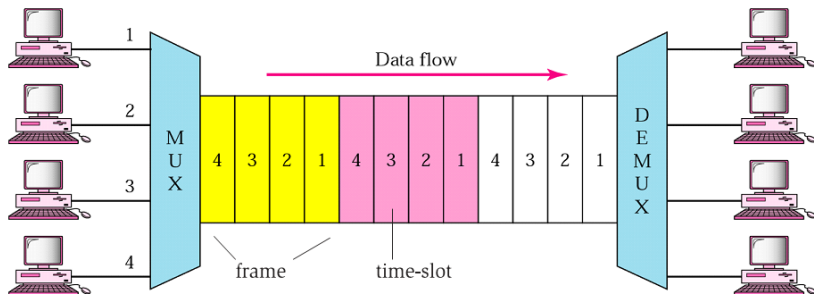
Wave-Division Multiplexing (WDM)



Multiplexing – digitální signály

• Time-Division Multiplexing (TDM)

- v libovolném okamžiku kanál využívá výhradně jeden vysílající (po jistou dobu)
- vysoká propustnost i při mnoha vysílajících
- nutnost precizní synchronizace vysílače a přijímače



Rekapitulace – fyzická vrstva

- zajišťuje přenos jednotlivých bitů mezi odesílatelem a příjemcem
- přenášené bity jsou transformovány do signálů šířených přenosovým médiem
 - pro přenos analogovým signálem je zapotřebí modulace
 - pro přenos digitálním signálem je zapotřebí transformace kódování
 - zejména kvůli problémům synchronizace
- média mohou být voděná (např. kroucená dvoulinka, optické vlákno) a nevoděná (éter)
 - každé z nich vhodné pro jiné přenosové prostředí
 - sdílení média souběžnými přenosy provedeno technikou multiplexingu
- *další informace:*
 - PV169: Základy přenosu dat (doc. Staudek)
 - PV183: Technologie počítačových sítí (dr. Pelikán)

Struktura přednášky

- 1 L1. Fyzická vrstva
 - Přehled
 - Úvod
 - Signály
 - Přenos dat
 - Přenosová média
 - Rekapitulace
- 2 L2. Vrstva datového spoje
 - Přehled
 - Úvod
 - Služby
 - Tvorba rámců, adresace
 - Chybové řízení
 - Řízení přístupu k médiu (MAC)
 - L2 síť
 - Budování L2 sítí
 - Rekapitulace

L2. Vrstva datového spoje – Přehled

ISO / OSI

Aplikační vrstva
Síťové aplikace

Prezentační vrstva
Reprezentace dat

Relační vrstva
Relace, meziuzlová komunikace

Transportní vrstva
End-to-end spoje, zajištění spolehlivosti

Síťová vrstva
Výběr cesty a IP (logické adresování)

Vrstva datového spoje
MAC a LLC (fyzické adresování)

Fyzická vrstva
Přenosová média, signály, přenos binárních dat

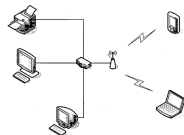
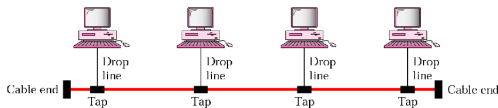
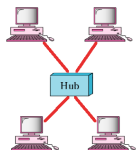
Proč nestačí L1?

- nezajišťuje opakování chybně přenesené informace
- nepodporuje určení entity mající právo vysílat do média
- nepodporuje ovládání toku dat ze zdroje do média
- nepodporuje komunikaci mezi definovanými partnery

Co nás nyní čeká. . .

- představení L2, poskytované služby
- detekce a korekce chyb
- řízení přístupu k médiu
- L2 sítě

L2 z pohledu sítě – kde se pohybujeme?

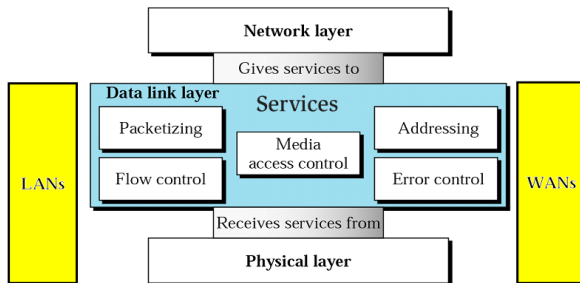


- lokální síť – *Local Area Networks (LAN)*
- přenosové médium sdíleno více stanicemi (nutnost adresace stanic)
- tzv. *node-to-node delivery*

Úvod

● Vrstva datového spoje:

- přijímá *pakety* od síťové vrstvy, které transformuje do *rámců*
- ve spolupráci s fyzickou vrstvou zajišťuje přenos rámců mezi dvěma komunikujícími uzly propojenými (*sdíleným*) *přenosovým médiem*
 - tj. pouze doručení na stejném segmentu (stejně LAN)
- zaručuje spolehlivost přenosu mezi těmito uzly
- zajišťuje, aby cílový uzel nebyl zahlcován proudícím tokem dat
- řídí přístup uzlů ke sdílenému přenosovému médiumu



Služby

- *Tvorba rámců (Framing)*
 - pakety přicházející ze síťové vrstvy jsou „baleny“ do *rámců (frames)*
- *Adresování (Addressing)*
 - adresy entit vrstvy fyzického spoje – *fyzické/MAC adresy*
 - rámce obsahují zdrojovou a cílovou fyzickou adresu komunikujících entit
- *Chybové řízení (Error Control)*
 - chyby ve fyzické vrstvě nelze zcela eliminovat
 - L2 vrstva zajišťuje požadovanou úroveň spolehlivosti datového spoje (detekce a korekce chyb)
- *Řízení toku (Flow Control)*
 - zabraňuje zahlcení příjemce
 - mechanismy *stop-and-wait, sliding-window*
- *Řízení přístupu k médiu (Medium Access Control – MAC)*
 - nezbytné v prostředí, ve kterém přenosové médium sdílí více entit
 - eliminuje kolize způsobené násobným vysíláním

Tvorba rámců, adresace

- příklad Ethernetového rámce:

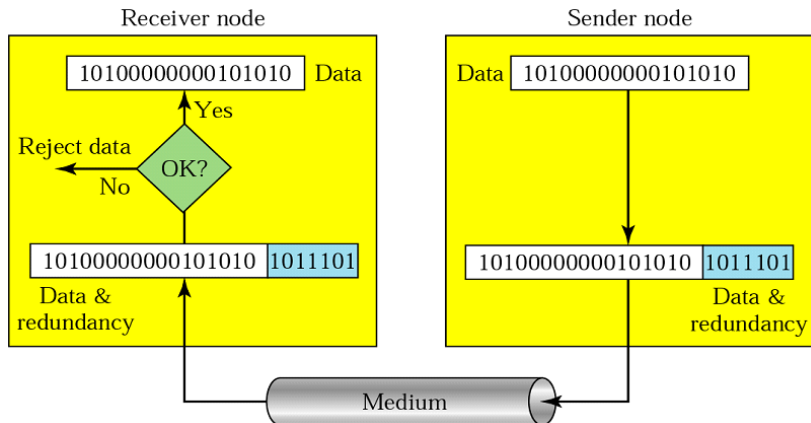


- preamble:
 - identifikace počátku rámce (synchronizační prvek)
- adresace:
 - každá stanice (síťová karta) „jednoznačně“ identifikována MAC adresou
 - např. 01:23:45:67:89:ab

Chybové řízení

- fyzická vrstva je vždy (s určitou pravděpodobností) předmětem chyb
 - chyba = změna hodnoty bitu
 - např. optická vlákna cca 10^{-12} , wireless cca 10^{-5}
- vrstva datového spoje provádí detekci/korekci chyb
 - vysílač přidá bity, jejichž hodnota je funkcí přenášených dat
 - přijímač spočte stejnou funkci a v případě rozdílu hodnoty detekuje (pokusí se opravit) chybu
 - v případě detekce (nemožnosti opravy) je vyžádáno opakování přenosu
 - *Error Detection, Automatic Request for Retransmission (ARQ)*
 - detekce chyby a zajištění opakování přenosu
 - vhodné pro málo chybuující přenosová média
 - *Forward Error Correction (FEC)*
 - detekce chyb a snaha o jejich korekci (s využitím redundance dat)
 - vhodné pro často chybuující přenosová média či média s velkou latencí
 - např. *Hammingův kód*
 - detaily viz *PV169: Základy přenosu dat*

Proces detekce chyb



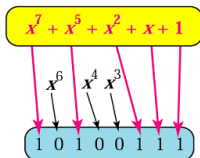
Obrázek: Proces detekce chyb – vysílač přidává k bloku bitů dat bity *kódu pro detekci chyb*(y).

Kódy pro detekci chyb

- *sudá/lichá parita*
 - k přenášeným bitům dat se přidá 1 bit tak, aby měla sudý/lichý počet jedniček
 - detekuje pouze chyby v jednom bitu
 - silnější varianta: *dvoudimenzionální parita*
 - obecně velmi slabý nástroj pro detekci chyb
- *cyklické kódy s kontrolní redundancí*
 - *Cyclic Redundancy Check (CRC)*
 - garantuje silnou kontrolu (možná detekce všech jednobitových, dvoubitových a většiny dávkových chyb)

Kódy pro detekci chyb – CRC

- pro blok k -bitů dat se vygeneruje $(n - k)$ -bitová posloupnost přidávaná ke k -bitům zprávy
- přenášená zpráva (rámeček, n -bitů) reprezentuje polynom $M(x)$ stupně $(n - 1)$
- *klíč* – vhodně zvolený polynom $C(x)$ stupně $(n - k)$
- *přidávaná posloupnost (CRC)* – zbytek po dělení $\frac{M(x)}{C(x)}$ ($\Rightarrow n - k$ bitů)
- příklady $C(x)$
 - CRC-8: $C(x) = x^8 + x^2 + x + 1$
 - CRC-12: $C(x) = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$
 - CRC-16: $C(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$



Řízení přístupu k médiu (MAC)

- funkcionality odpovědná za koordinaci přístupu více stanic ke sdílenému přenosovému médiu
- *Cíl*: eliminace kolizí (konfliktů) při vysílání
 - tj. souběžného vysílání do jediného přenosového prostředí
- protokoly řízení přístupu:
 - *protokoly neřízeného přístupu*
 - *protokoly řízeného přístupu*
 - *protokoly multiplexově-orientovaného přístupu*
 - zpřístupnění multiplexingu fyzické vrstvy vrstvě L2
 - FDMA (Frequency-Division Media Access), TDMA (Time-Division Media Access), atd.

MAC protokoly neřízeného přístupu

- *Aloha*

- stanice vysílá kdykoliv má připravený rámeček
- kolize detekovány nepřijetím potvrzení o přijetí v definovaném časovém intervalu
- po kolizi náhodnou dobu vyčká a zkusí vysílat znovu
- neefektivní

- *CSMA/CD*

- upravená Aloha – stanice vysílá jen když zjistí klid v médiu
- současně na médiu naslouchá pro detekci případné kolize (*CD = Collision Detection*)
- aplikace v klasickém LAN Ethernetu; nepoužitelné v nevoděném médiu

- *CSMA/CA*

- obcházení kolizí
- použitelné v nevoděném médiu

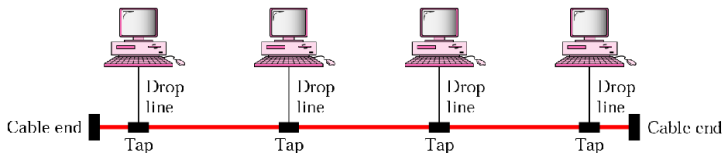
MAC protokoly řízeného přístupu

- stanice smí vysílat jen tehdy, když k tomu získá právo
 - od řídicí/jiné stanice
- *rezervace*
 - vysílání v předem domluvených vyhrazených intervalech
- *vyzývání*
 - centrální stanice vyzývá (a vybírá) stanici, která bude vysílat
- *předávání příznaku*
 - předávání „peška“ indikujícího právo k vysílání

L2 síť

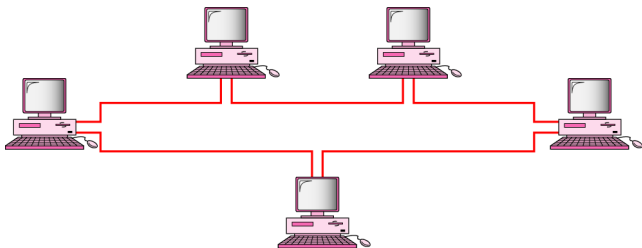
- lokální počítačové síť (LANs)
 - systematická topologie pro jednoduché síť
 - topologie = fyzické uspořádání stanic na médiu
 - sběrnice, kruh, hvězda, strom, mesh atp.
 - rozlehlejší síť tvořeny vzájemným propojováním jednoduchých topologií
- *kolizní doména*
 - určena stanicemi sdílejícími přenosové médium
 - kdykoliv začne v kolizní doméně více stanic vysílat, dojde ke kolizi (znehodnocení signálu ⇒ nutnost opakování přenosu)

L2 síť – sběrníková topologie (*bus topology*)



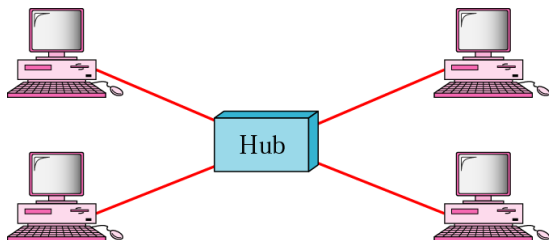
- relativně jednoduše instalovatelná
- kolizní doména tvořena všemi připojenými stanicemi
- CSMA/CD jako protokol řízení přístupu k médium
- náchylná k defektům (výpadek kabelu = výpadek celé sítě)

L2 síť – kruhová topologie (*ring topology*)



- všechny zprávy putují v jednom směru
- kolizní doména tvořena všemi připojenými stanicemi
- právo vysílat určuje metoda „peška“
- velmi náchylná k defektům (výpadek kabelu/zařízení = výpadek celé sítě)

L2 síť – hvězdicová topologie (*star topology*)

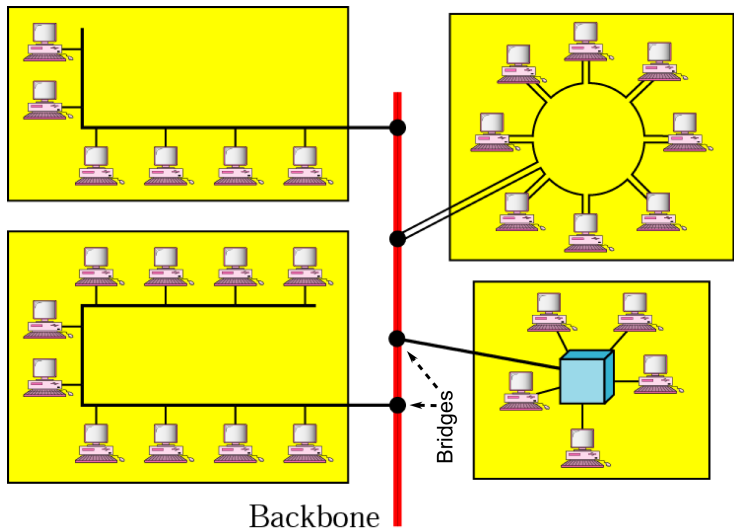


- centrální propojovací bod (hub, bridge, switch)
- hůře instalovatelná
- kolizní doména v závislosti na propojovacím bodu
 - *hub* – operuje na L1 – kolizní doména tvořena všemi připojenými stanicemi
 - *bridge, switch* – operují na L2 – kolizní doména vždy tvořena pouze dvěma sousedícími stanicemi
- nepřiliš náchylná k defektům (výpadek kabelu = výpadek pouze daného zařízení)

Budování L2 sítí

- můstek (*bridge*)
 - transparentní propojení sítí
 - vlastnosti:
 - všechen provoz prochází můstkem
 - odděluje sdílená média (kolize se nepřenáší)
 - může mít více jak dvě připojení
 - přepínač (*switch*) \approx víceportový můstek
- založeno na MAC adresách
 - *Backward Learning Algorithm* – můstek se „učí“ umístění stanic nasloucháním na médiu (sledováním zdrojových adres)
 - rámce se směřují dle cílové adresy
- vlastnosti:
 - lze vytvořit sítě s cykly
 - distribuovaný *Spanning Tree Algorithm* pro výpočet kostry
 - nevhodné pro velké sítě
 - přepínací tabulky rostou s počtem stanic – pomalá konvergence

Budování L2 sítí – ilustrace



Distribuovaný *Spanning Tree Algorithm*

- **cíl algoritmu:** nepoužívat některé porty můstků (zabránit cyklům)
- každý můstek posílá periodické zprávy
 - <vlastní adresa, adresa kořenového můstku, vzdálenost od kořene>
- když dostane zprávu od souseda, upraví definici „nejlepší“ cesty
 - preferuje kořen s menší adresou
 - preferuje menší vzdálenosti
 - při stejných vzdálenostech preferuje nižší adresu
- mechanismus:
 - volba kořenového vrcholu stromu (nejnižší adresa)
 - postupný růst stromu – nejkratší vzdálenost od kořene (preference mají uzly s nižší adresou, pokud existuje více možností)
 - nalezené „nejlepší“ cesty definují aktivní porty můstků
 - všechny ostatní porty vypnout

Distribuovaný *Spanning Tree Algorithm* – náčrt algoritmu

- fáze výběru kořenového můstku
 - po zapnutí všechny můstky prohlásí, že jsou kořenem (*Root Bridge*)
 - každý z nich zašle konfigurační informaci na všechny porty
 - na základě těchto informací je zvolen kořenový můstek s nejnižší ID
- fáze výběru kořenových portů
 - každý můstek si za svůj kořenový port (*Root Port*) zvolí ten s nejnižší cenou cesty k *Root Bridge*
 - mají-li dva porty stejnou cenu, je zvolen ten s nižším *Port ID* (druhý se vypne (stane se *non-designated*) pro vyloučení smyček)
- fáze výběru aktivních/neaktivních portů
 - *Root Bridge* nastaví všechny svoje porty jako aktivní (*Designated*)
 - na všech spojích, na kterých nejsou *Root Porty*, si přepínače vyměňují informace a zjišťují, kdo z nich má nižší *Bridge ID*. Ten potom nastaví svůj port jako aktivní, druhý s vyšším *Bridge ID* svůj port vypne
- více viz animace: http://frakira.fi.muni.cz/~jeronimo/vyuka/Cisco-spanning_tree.swf

Rekapitulace – vrstva datového spoje

- zajišťuje přenos rámců mezi dvěma komunikujícími uzly (určeny MAC adresami) propojenými sdíleným přenosovým médiem
 - se zajištěním spolehlivosti přenosu
 - s ochranou přijímajícího uzlu proti zahlcení
 - s řízením přístupu k médiu (MAC protokoly)
- L2 síť (LANs):
 - sběrníková, kruhová, hvězdicová topologie
 - základní stavební prvky pro rozsáhlé síte: můstky, switche
 - *Backward Learning Algorithm* pro získání informací o lokaci uzlů (nezbytné pro správné přepínání rámců)
 - *Spanning Tree Algorithm* pro výpočet minimální kostry cest
- *další informace:*
 - PV169: Základy přenosu dat (doc. Staudek)
 - PV183: Technologie počítačových sítí (dr. Pelikán)
 - PA151: Soudobé počítačové sítě (doc. Staudek)
 - PV234: Přepínání v LAN, bezdrátové sítě a rozsáhlé sítě (dr. Pelikán et al.)
 - grafové algoritmy – PB165: Grafy a sítě (prof. Matyska, doc. Hladká, doc. Rudová)