

Počítačové sítě 2

Jan Outrata



KATEDRA INFORMATIKY
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

přednášky



- [KR] Kurose J. F., Ross K. W.: *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 7th Edition. Pearson, 2017.
- Kurose J. F., Ross K. W.: *Počítačové sítě*. Computer Press, 2014.
- [TFW] Tanenbaum A. S., Feamster N., Wetherall D.: *Computer Networks*, 6th edition. Pearson, 2021.
- Forouzan B.: *TCP/IP Protocol Suite*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2009.
- [PS] Satrapa P.: *IPv6 - čtvrté vydání*. Edice CZ.NIC, 2019.
- Peterson L. L., Davie B. S.: *Computer Networks: A Systems Approach*, 6th edition. Morgan Kaufmann, 2022.



Bezdrátové sítě (Wireless networks)



- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)
 - + „**bezkontaktní**“ **sítě/technologie (RFID/NFC)** – prezenze, identifikace (platby) aj., „čipy“

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)
 - + „**bezkontaktní**“ **sítě/technologie (RFID/NFC)** – prezence, identifikace (platby) aj., „čipy“
 - + **senzorové sítě** – vestavěná zařízení (senzory) pro sběr dat o okolí

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)
 - + „**bezkontaktní**“ **sítě/technologie (RFID/NFC)** – prezenze, identifikace (platby) aj., „čipy“
 - + **senzorové sítě** – vestavěná zařízení (senzory) pro sběr dat o okolí
 - ?

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)
 - + **„bezkontaktní“ síť/technologie (RFID/NFC)** – prezence, identifikace (platby) aj., „čipy“
 - + **senzorové sítě** – vestavěná zařízení (senzory) pro sběr dat o okolí
?
- osobní přenosná a vnitřní domácí zařízení, venkovní infrastruktura, auta („mobilní kancelář“), „věci“ (IoT)... s bezdrátovým připojením k Internetu (Wi-Fi, mobilní)

- za posledních 30 let **mobilní sítě** – telefon + SMS (1G, 2G), připojení k Internetu (3G), aplikace (4G/LTE), „smart“ (5G) ~ počítač
- za posledních 20 let **bezdrátová LAN (Wi-Fi)** – (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče / připojení k Internetu, hotspot
 - + **bezdrátová PAN (Bluetooth)** – bezdrátové propojení (mobilních) zařízení „všeho druhu“ (počítače, spotřební elektronika, periferie)
 - + „**bezkontaktní**“ sítě/technologie (**RFID/NFC**) – prezence, identifikace (platby) aj., „čipy“
 - + **senzorové sítě** – vestavěná zařízení (senzory) pro sběr dat o okolí
?
- osobní přenosná a vnitřní domácí zařízení, venkovní infrastruktura, auta („mobilní kancelář“), „věci“ (IoT)... s bezdrátovým připojením k Internetu (Wi-Fi, mobilní)
- jiné problémy než drátové sítě, *bezdrátovost vs. mobilita*

- uzly = **stanice** bezdrátově připojené k **base station** a/nebo mezi sebou
 - **base station**
 - řízení komunikace připojených = **asociovaných** stanic, typicky komunikace stanic pouze s base station
 - přepínač + most: volitelně připojený do ostatní (typicky drátové) sítě = **infrastruktury** a zprostředkovávající ji stanicím – **infrastrukturní režim**
 - např. access point (AP, Wi-Fi), BTS (mobilní sítě)
 - **ad hoc režim**: komunikace stanic přímo mezi sebou (včetně point-to-point), typicky bez base station
- + problémy komunikace (přímá/nepřímá), s mobilitou stanic aj.

- **Wi-Fi (IEEE 802.11)**, WiMAX (802.16) – (W)LAN/MAN, jednotky Mb/s až Gb/s, desítky m až jednotky km
- **mobilní** – WAN, jednotky kb/s až stovky Mb/s, stovky m až desítky km
- **Bluetooth (IEEE 802.15.1)** – PAN, stovky kb/s až jednotky Mb/s, jednotky až desítky m
- **satelitní** – WAN, až stovky Mb/s, stovky až tisíce km



- přenosové médium elektromagnetické záření (**rádio, mikrovlny**) – výhody i nevýhody
- přenos dat pomocí šíření signálu na dané (nosné) frekvenci, problémy:
 - path fading (loss) = klesající úroveň signálu se vzdáleností a průchody materiály
 - interference signálů a šumu na stejném frekvenčním pásmu
 - multipath propagation = více cest s modifikovaným signálem k příjemci, kvůli odrazům a interferencím
 - horší s vyšší frekvencí a nižší úrovní signálu \Rightarrow více chyb
 - řešení: použití více frekvencí (spread, multiplex) a vysílačů/přijímačů (antén), různé metody modulace bitů do signálu, opakování přenosu, opravné kódy dat aj.

- přenosové médium elektromagnetické záření (**rádio, mikrovlny**) – výhody i nevýhody
- přenos dat pomocí šíření signálu na dané (nosné) frekvenci, problémy:
 - path fading (loss) = klesající úroveň signálu se vzdáleností a průchody materiály
 - interference signálů a šumu na stejném frekvenčním pásmu
 - multipath propagation = více cest s modifikovaným signálem k příjemci, kvůli odrazům a interferencím
 - horší s vyšší frekvencí a nižší úrovní signálu \Rightarrow více chyb
 - řešení: použití více frekvencí (spread, multiplex) a vysílačů/přijímačů (antén), různé metody modulace bitů do signálu, opakování přenosu, opravné kódy dat aj.
- **signal-to-noise ratio (SNR, S/N)** = poměr úrovně přijímaného (kombinovaného degradovaného) signálu a šumu prostředí, v dB ($= 10 \log_{10} \text{poměr}$), úroveň signálu (typicky) v dBm = SNR k 1 mW (šumu)

Obrázek z knihy
zdroj: TFW 2-8

- **signal-to-noise ratio (SNR, S/N)** = poměr úrovně přijímaného (kombinovaného degradovaného) signálu a šumu prostředí, v dB ($= 10 \log_{10} \text{poměr}$), úroveň signálu (typicky) v dBm = SNR k 1 mW (šumu)

Obrázek z knihy
zdroj: KR 7.3

- **signal-to-noise ratio (SNR, S/N)** = poměr úrovně přijímaného (kombinovaného degradovaného) signálu a šumu prostředí, v dB ($= 10 \log_{10} \text{poměr}$), úroveň signálu (typicky) v dBm = SNR k 1 mW (šumu)

- **šíření signálu** ve **frekvenčním pásmu (band)** – pásmo jako okruh (circuit):
 - frequency hopping spread spectrum (FHSS): pseudo-náhodné přeskakování v čase mezi více (nosnými) frekvencemi
 - direct sequence spread spectrum (DSSS): současné využívání více (nosných) frekvencí
- **modulace** bitů dat do (analogového) signálu: změna amplitudy (ASK), frekvence (FSK), fáze (PSK) frekvence nebo kombinace (A+P)
- **multiplex** více přenosů (paralelních částí nebo různých stanic) do frekvenčního pásma:
 - frekvenční (FDM): rozdělení (division) na nepřekrývající se (pod)pásma dané šířky pro přenos
 - ortogonální frekvenční (OFDM(A)): mnoho nosných frekvencí (subcarriers) pro přenosy s překrývajícími se (pod)pásmy
 - časový (TDM): disjunktní rozdělení času na (časové) rámce s konstantním počtem slotů pevné délky s daným slotem každého rámce pro přenos
 - kódový (CDM(A)): kódování přenosů v celém pásmu (chipping/XOR bitů vhodným kódem pro přenos a předpoklad součtu, vyšší chipping rate, např. 11x)



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 2-16



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 2-17



Obrázek z knihy
zdroj: KR 1.14



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 2-20



Obrázek z knihy
zdroj: KR 7.6

- frekvenční (pod)pásmo = broadcast sdílené médium – potřeba **protokol vícenásobného přístupu (vysílání)**
- + řešení **problémů skryté** (hidden) – A i C „vidí“ B, ale ne sebe, **a vystavené stanice** (exposed terminal) – B „vidí“ A a C „vidí“ D, ale i sebe navzájem
- + **zabezpečení přenosu** – šíření signálu „kdekoliv“, příjem „kýmkoliv“, propojení s infrastrukturou → autentizace stanic (vůči base station nebo navzájem) a šifrování přenosu
- + **mobilita stanic** → „předávání“ (handoff) stanic mezi base station nebo sebou



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-11

Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-26



- IEEE, 1997, Wi-Fi Alliance – certifikace zařízení
- = bezdrátová LAN/MAN, (původně) vnitřní i vnější použití: počítače, spotřební elektronika, domácí spotřebiče (desítky až stovky m) / připojení k Internetu, hotspot (až jednotky km), jednotky Mb/s až Gb/s
- několik standardů (rozšíření): až po ax zpětná kompatibilita
 - (legacy)/b/g = Wi-Fi 0/1/3: 1997/1999/2003, 2,4 GHz, až 2/11/54 Mb/s (běžně cca polovina), FHSS/DSSS/OFDM
 - a/ac = 2/5: 1999/2013, 5 GHz, až 54 Mb/s/6,9 Gb/s, OFDM
 - n/ax = 4/6: 2008/2019, 2,4 a 5 GHz, až 0,6/9,6 Gb/s, OFDM
 - ax = 6E: 2020, 6 GHz, až 9,6 Gb/s, OFDMA
 - ad/ay = WiGig: 2012/2021, 60 GHz, až 7/40 Gb/s, OFDM
- bezlicenční pásma (ISM) 2,4–2,4895 GHz, 5,03–5,99 GHz, 57,24–70,20 GHz (V band)
- licencované pásmo 5,945–7,125 GHz
- infrastrukturní i ad hoc režim

Fyzická vrstva

- antény: všesměrové, (sektorové) směrové, různé polarizace signálu, vestavěné i venkovní (VF koax kabel a konektor SMA nebo N)
- MIMO: více vysílacích i přijímacích antén pro vícecestnou komunikaci (dvou účastníků na 1 kanálu, n/ac+ax+ad, 4/8), MU: více účastníků (ac+ax+ay)

Fyzická vrstva

- antény: všesměrové, (sektorové) směrové, různé polarizace signálu, vestavěné i venkovní (VF koax kabel a konektor SMA nebo N)
- MIMO: více vysílacích i přijímacích antén pro vícecestnou komunikaci (dvou účastníků na 1 kanálu, n/ac+ax+ad, 4/8), MU: více účastníků (ac+ax+ay)

Architektura (infrastrukturní)

- **basic service set (BSS)** = asociované stanice + případně base station (**access point, AP**), identifikovaná (B)SSID (adresa AP \neq „jméno sítě“!), frekvenční kanál
- **asociace stanice** (k AP): nutná, komunikace jen asociované
 - AP periodicky vysílá majákové (beacon) rámce s (volitelně) „jménem sítě“ a adresou AP (a info k zabezpečení, rychlostem/modulacím aj.)
 - stanice skenuje kanály, pasivně nebo aktivně (vyšle probe request rámec a od AP response), a vybere AP (nestandardizované, typicky s nejvyšším SNR) – association request k AP (nutné „jméno sítě“!) a od něj response
 - volitelně nutná autentizace stanice (jinak otevřená), pak až datové rámce, např. DHCP



CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)

- CSMA = **náhodný vícenásobný přístup** (multiple access) **k** broadcast sdílenému **médiu** (frekvenčnímu kanálu/pásmu)
 - **čekání na klid** (carrier sense) a vysílání
 - /CD (např. Ethernet) = při detekci kolize (collision detection) náhodná pauza a znovu vysílání – kolize na straně vysílajícího \Rightarrow nejvýše jedno současné vysílání

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)

- CSMA = **náhodný vícenásobný přístup** (multiple access) **k** broadcast sdílenému **médiu** (frekvenčnímu kanálu/pásmu)
 - **čekání na klid** (carrier sense) a vysílání
 - /CD (např. Ethernet) = při detekci kolize (collision detection) náhodná pauza a znovu vysílání – kolize na straně vysílajícího \Rightarrow nejvýše jedno současné vysílání
 - /CA = **předcházení kolizím** (collision avoidance): náročné/nemožné současně přijímat a vysílat \rightarrow poloduplexní přenos + problém skryté/vystavené stanice \Rightarrow kolize na straně příjemce!, možno více současných vysílání
 - **pozitivní potvrzování** (ACK, příjemcem) a případné znovuzaslání rámce
- 1 při klidu chvíle čekání (DIFS), jinak náhodná pauza – odpočítávaná při klidu!
 - 2 vyslání celého rámce, příjemce po chvíli od přijetí (SIFS) potvrdí, pokud do určité doby ne, znovu 1. (= iterace), po několika pokusech chyba

Obrázek z knihy
zdroj: KR 7.10

- /CA = **předcházení kolizím** (collision avoidance): náročné/nemožné současně přijímat a vysílat → poloduplexní přenos + problém skryté/vystavené stanice ⇒ kolize na straně příjemce!, možno více současných vysílání
- **pozitivní potvrzování** (ACK, příjemcem) a případné znovuzaslání rámce
- 1 při klidu chvíle čekání (DIFS), jinak náhodná pauza – odpočítávaná při klidu!
- 2 vyslání celého rámce, příjemce po chvíli od přijetí (SIFS) potvrdí, pokud do určité doby ne, znovu 1. (= iterace), po několika pokusech chyba

Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-25

- /CA = **předcházení kolizím** (collision avoidance): náročné/nemožné současně přijímat a vysílat → poloduplexní přenos + problém skryté/vystavené stanice ⇒ kolize na straně příjemce!, možno více současných vysílání
- **pozitivní potvrzování** (ACK, příjemcem) a případné znovuzaslání rámce
- 1 při klidu chvíle čekání (DIFS), jinak náhodná pauza – odpočítávaná při klidu!
- 2 vyslání celého rámce, příjemce po chvíli od přijetí (SIFS) potvrdí, pokud do určité doby ne, znovu 1. (= iterace), po několika pokusech chyba

Rezervace média

- volitelná pro delší vysílání stanice (ne AP)
- 1 **žádost** (RTS) AP s časem pro přenos dat a potvrzení (CSMA/CA 1.)
- 2 AP vyšle všem po chvíli (SIFS) **rezervaci média** (CTS) na čas pro stanici (CSMA/CA 1.)
- 3 vyslání dat a potvrzení (CSMA/CA 2., po SIFS), ostatní po čas nezkouší vysílat



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-27



Obrázek z knihy
zdroj: KR 7.12

- data až 2312 B (obvykle do 1500, LLC), CRC32 rámce
- před ním záhlaví fyzické vrstvy (rádia) – modulace (rychlost), frekvenční kanál aj.

Záhlaví

- až 4 **MAC adresy**: 1. přijímající stanice (R), 2. vysílající stanice (T)
 - 3. příjemce (D)/odesílatel (S) v infrastruktuře (nebo v ad hoc režimu): AP = (netransparentní) most = R/T, S/D = T/R, jinak AP (BSSID)
 - 4. $S \neq T = AP$ s D (3.) „u“ jiného k AP bezdrátově připojeného AP (nebo v ad hoc režimu): oba AP mosty = T + R – tzv. **(bezdrátový) distribuční systém ((W)DS)**
- čas „obsazení“ a rezervace média, pořadové číslo rámce (a ID fragmentu)
- řídicí pole: verze (00), typ a subtyp pro rozlišení **control** (ACK, RTS, CTS, bez dat), **management** (beacon, probe, association, autentizační) a **datových** rámců, od a do DS pro význam adres (3., 4.), indikace více fragmentů, opakování rámce, power management („spaní“), dalšího rámce, šifrování (dat) rámce



Obrázek z knihy
zdroj: KR 7.13



- ve **stejné IP síti** (zachování IP adresy aj.)
- mezi více **BSS se stejným „jménem sítě“** = **extended service set (ESS)** – AP v distribučním systému
- stanice při slábnoucím signálu od AP aktivně skenuje a reasociuje se k silnějšmu (handoff)
- infrastruktura? – např. na přepínači samoučení: rámec od stanice přes nový AP nebo (broadcast) od AP po asociaci se zdrojovou MAC stanice (hack!) nebo (WDS) protokol mezi AP

Adaptace rychlosti (rate adaptation)

= změna modulace dat do signálu dle SNR

- nestandardizované, např. při dvou rámcích bez potvrzení následující rámce nižší rychlostí, při 10 potvrzených nebo vypršení času od posledního snížení vyšší

Správa energie (power management)

- nestandardizované, minimalizace doby funkce stanice (ne AP), jinak „spí“
- 1 stanice nastaví power management bit v rámci k AP a spí dokud AP nepošle beacon rámec (má nastavený „budík“ těsně před)
- 2 AP rámce pro stanici ukládá do bufferu a v beacon rámci pošle seznam stanic, pro které má rámce
- 3 stanice v seznamu si rámce vyžádá, jinak případně opět spí
- APSD (n): ukládání rámců AP pro stanici a zaslání i po obdržení rámce od stanice, rozvrhování vysílání stanic AP (ax) aj.

Další:

- fragmenty = kratší rámce: nestandardizovaná délka, vysílány za sebou s potvrzením
- prioritizace provozu (QoS, různé IFS, TXOP, 802.11e), omezení vyzářeného výkonu (regionální) aj.

- původní specifikace **WEP** (Wired Equivalent Privacy, 1999) – „průšvih“, dočasné **WPA** (Wi-Fi Protected Access, 2002), pak **WPA2** (802.11i, 2004), **WPA3** (2018)

Autentizace – stanice vůči AP!

- **sdílené heslo (Personal)** – WEP: před asociací, až 4 40/104 b, šifrování a dešifrování náhodné výzvy!, WPA(2/3): generování pre-shared key (PSK) (\sim MK = PMK) z hesla 8 až 63 B a SSID
- **autentizační protokol (Enterprise)** – WPA(2/3), 802.11i: EAP (EAPoL/802.1X, volitelně šifrované, autentizace uživatele), může místo AP řešit **autentizační server** (RADIUS, DIAMETER, šifrované, AP relay pouze s ním), volitelná „předběžná“ k jinému AP (pro handoff, WPA2/3)
 - 1 dohoda na metodě
 - 2 (vzájemná) autentizace a vygenerování sdíleného master key (MK)
 - 3 vytvoření pairwise MK (PMK) z MK a předání AP ze serveru (**distribuce klíče**)



Obrázek z knihy
zdroj: KR 8.32



Šifrování – rámců (dat a CRC) mezi stanicí a AP

- proudová symetrická **šifra RC4** – WEP: klíč sdílené heslo + 24b IV za záhlavím, WPA = TKIP/WEP-fix: 128b klíče vytvářené z IV, pořadového čísla rámce, klíče relace (PTK) vytvořeného z PMK aj. + 64b kód integrity rámce (MIC) za šifrovanými daty
- bloková symetrická **šifra AES (Rijndael)** – WPA2/3 = CCMP: klíče jako u WPA, ale jen z PTK, kód integrity jako u WPA

Šifrování – rámců (dat a CRC) mezi stanicí a AP

- proudová symetrická **šifra RC4** – WEP: klíč sdílené heslo + 24b IV za záhlavím, WPA = TKIP/WEP-fix: 128b klíče vytvářené z IV, pořadového čísla rámce, klíče relace (PTK) vytvořeného z PMK aj. + 64b kód integrity rámce (MIC) za šifrovanými daty
- bloková symetrická **šifra AES (Rijndael)** – WPA2/3 = CCMP: klíče jako u WPA, ale jen z PTK, kód integrity jako u WPA

WPS (Wi-Fi Protected Setup)

- generování a distribuce „jména sítě“ a nastavení zabezpečení (nejvyšší metoda, sdílené heslo) z AP na stanice – PIN od AP stanici (nebo i opačně)

Obrázek z knihy
zdroj: KR 8.30

WPS (Wi-Fi Protected Setup)

- generování a distribuce „jména sítě“ a nastavení zabezpečení (nejvyšší metoda, sdílené heslo) z AP na stanice – PIN od AP stanici (nebo i opačně)

- Ericsson, 1994, + IBM, Intel, Nokia, Toshiba, 1998
- bezdrátové propojení (PAN) různorodých (mobilních) nízkoenergetických zařízení s malým dosahem (jednotky až desítky m) menší rychlostí (stovky kb/s až jednotky Mb/s): „počítačových“ (vč. mobilu) i „ne-počítačových“, např. periférie počítačů, komunikační aj. spotřební elektronika – „náhrada kabelů“
- verze: 1 (1999), 2 (2004, rychlejší přenosy), 3 (2009, kombinace s Wi-Fi), 4 (2010, nízkoenergetický provoz), 5 (2016, 2x rychlosti, větší dosah, IoT zařízení, lepší zabezpečení), 5.1 (2019)
- 2,4 GHz (pásmo ISM), TDM s FHSS (adaptivní s vyloučením využívaných pásem), 1 Mb/s basic rate, 2/3 Mb/s enhanced rate (od verze 2)



- **piconet**: propojená zařízení, až 8 aktivních (komunikujících), ostatních až 255 zaparkovaných (uspaných, nekomunikujících)
 - jedno **master**: řídí komunikaci v piconetu, např. počítač, mobil
 - ostatní **slave**: komunikace jen s master
 - **scatternet**: více propojených piconetů (přes slave v jednom a master v druhém – most), zařízení může být ve více piconetech
- **párování zařízení**: před propojením (vytvořením spoje), PIN nebo heslo od jednoho (i jen potvrzení zobrazeného)
- **profily**: různá použití (aplikace) a protokoly, 20+
 - základní (generic): zjištění služeb, správa spojů (links), výměna dat, emulace sériové linky aj.
 - HID (vstupní periferie), A/V (streaming, headset, hands-free, intercom), přenos souborů (speciálně obrázků), remote control, dial-up (připojení k telefonní síti přes modem), PAN (ad-hoc, připojení k jiné síti, např. Wi-Fi přes AP) aj.
- **vlastní protokolová architektura**: vrstvy radio ~ fyzická, link control (baseband) ~ MAC, link manager (správa spojů a energie, párování, šifrování) a L2CAP (rámce, jejich potvrzování a znovuzasílání, multiplexing pro profily, QoS) ~ LLC, profily využívající L2CAP nebo napříč vrstvami
 - host controller interface: rozhraní mezi Bluetooth čipem a zařízením, mezi link manager a L2CAP



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-31



- **spoje (links)**: synchronní spojované (SCO) pro real-time přenosy (A/V, až tři 64kb/s) a asynchronní nespojované (ACL) pro paketové přenosy (souborů, PAN aj., jen jeden)
- CSMA s rezervací média a pozitivním potvrzováním (a znovuzasláním) rámců, bez předcházení kolizím (TDM, sloty)
 - při klidu žádost (RTS) příjemci s časem pro přenos dat a potvrzení
 - příjemce vyšle všem rezervaci (CTS) na čas
 - vyslání dat a potvrzení, ostatní po čas nezkouší vysílat
- linkový rámec: více typů, data až 2744/8184 b basic/enhanced rate, volitelně šifrovaná (klíč vytvořený při spojování)
 - před nimi synchronizace a přístupový kód = ID master zařízení, záhlaví 3x opakovaně:
 - adresa (0 = broadcast), typ (SCO, ACL aj., délka, jaký samoopravný kód), bity flow (slave má plný buffer), ACK a seq (znovuzaslání), CRC-8
 - různé formáty dat dle spoje a rate – i jen např. 13% využití kapacity



Obrázek z knihy
zdroj: TFW 4-32



- = bezdrátové propojení (PAN) ještě méně-energetických zařízení než Bluetooth, s podobným dosahem (jednotky až desítky m), ale menší rychlostí (desítky až stovky kb/s), např. (domácí) senzory, ovladače spotřebičů apod.
- více režimů (architektur) sítě, zařízení plně funkční (\sim master u Bluetooth, může jich být víc) a redukovane funkční (\sim slave)
- CSMA/CA (\sim Wi-Fi) i TDM sloty, potvrzování (a znovuzasílání) rámců, střídání aktivních (vysílání) a neaktivních period (spaní) aj.