

Lekce 5: sítě WLAN

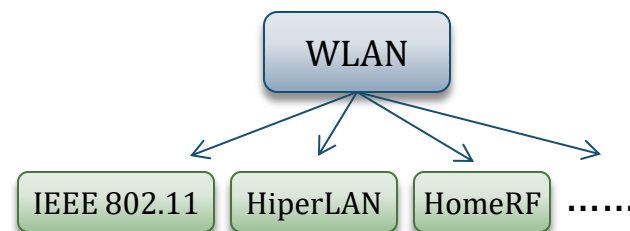
Jiří Peterka

co jsou sítě WLAN?

- **WLAN (Wireless LAN)** jsou obecně takové sítě, které:
 - „jsou bezdrátové (Wireless)“ – k přenosu využívají některou bezdrátovou technologii
 - typicky: jde o bezdrátové (rádiové) přenosy v **bezlicenčním pásmu** (nikoli licenčním) !!!
 - obvykle v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz
 - „jsou lokální (LAN)“ – mají rozsah a další atributy lokálních sítí (sítí LAN)
 - existují také WPAN (Wireless PAN), WMAN (Wireless MAN), WWAN (Wireless WAN) atd.
- **existuje více různých standardů pro WLAN**
 - a z nich vycházejících technologií i konkrétních produktů

budeme se zabývat podrobněji

– například:



- **standardy IEEE 802.11 (neformálně: Wi-Fi)**

- přesněji: konkrétní produkty, které úspěšně projdou certifikací a testy, mohou nést označení/nálepku Wi-Fi

- v Evropě: standardy HiperLAN (High Performance Radio LAN)

- standardy ETSI, měly konkurovat „americkým“ standardům IEEE

- v Evropě se místo WLAN (Wireless LAN) používal spíše termín RLAN (Radio Networks)
- tyto standardy nebyly úspěšné a do praxe se neprosadily

- v USA: standardy HomeRF (Home Radio Frequency)

- řešení, připravené skupinou firem v letech 1997-2003 (dnes „mrtvé“)

- využívalo pásmo 2,4 GHz, techniku FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) a DECT

-

co jsou bezlicenční pásma?

- **kmitočtová (frekvenční) pásma, k jejichž využití nepotřebujete licenci**
 - ve smyslu: nepotřebujete **individuální licenci** (dnes: **individuální oprávnění**)
- **princip:**
 - můžete je rovnou začít používat, nemusíte se dopředu nikoho ptát na jeho souhlas, či žádat něčí povolení
- **důležité:**
 - **rozhodně neplatí, že si v bezlicenčním pásmu můžete dělat, co vás napadne !!**
 - **musíte dodržovat předem daná pravidla pro využívání těchto pásem**
 - licenční pásma: tato pravidla jsou zakotvena v individuální licenci (individuálním oprávnění)
 - bezlicenční pásma: tato pravidla jsou zakotvena v tzv. generální licenci
 - dnes, dle platné terminologie, jde o tzv. **všeobecné oprávnění**
 - které vydává (národní) správce kmitočtového spektra (v ČR: ČTÚ)
 - např. všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12



Článek 2 Konkrétní podmínky				
Konkrétní podmínky týkající se § 10 odst. 1 písm. n) zákona jsou:				
a) stanici lze provozovat bez individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů;				
b) technické parametry stanic jsou:				
Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Maximální spektrální hustota e.i.r.p.	Další podmínky
a	2400,0–2483,5 MHz	100 mW e.i.r.p. ²⁾	10 mW/1 MHz	systemy s technikou DSSS ³⁾ nebo OFDM ³⁾
			100 mW/100 kHz	systemy s technikou FHSS ⁴⁾

principy využívání frekvenčních pásem

• licenční pásma

- též: licenční princip využití frekvenčních pásem

– uživatel je jen jeden

- je to pouze „ten, komu byla vydána *individuální licence*“
 - jako exkluzivní/výhradní
- nikdo jiný nesmí licenční kmitočty využívat
- držitel licence má právo na ochranu před zneužitím
 - pokud by „jemu přidělené“ kmitočty přeci jen využíval někdo jiný
 - měl by zasáhnout správce spektra
- využívání licenčních pásem je obvykle zpoplatněné

mohou to být i jiné technologie než WLAN, např. mikrovlnné trouby, meteoradary, ...

– důsledek

- v licenčních pásmech lze (snadno a jednoduše) poskytovat garantované služby
 - s garantovanou kvalitou

• bezlicenční pásma

- též: bezlicenční princip využití frekvenčních pásem

– uživatelů může být (a bývá) více

- může to být kdokoli
 - kdo dodrží pravidla všeobecného oprávnění
- „nově příchozí“ nemá zaručeno, že „pro něj bude ještě místo“
 - nemusí být k dispozici volné (nevyužívané) frekvenční kanály
 - v pásmu 2,4 GHz mnohdy již nejsou
- není zde ochrana před rušením
 - jen obecné pravidlo (ve všeobecném oprávnění): *kdo přijde jako poslední a začne rušit, měl by jako první odejít/přestat rušit*

– důsledek

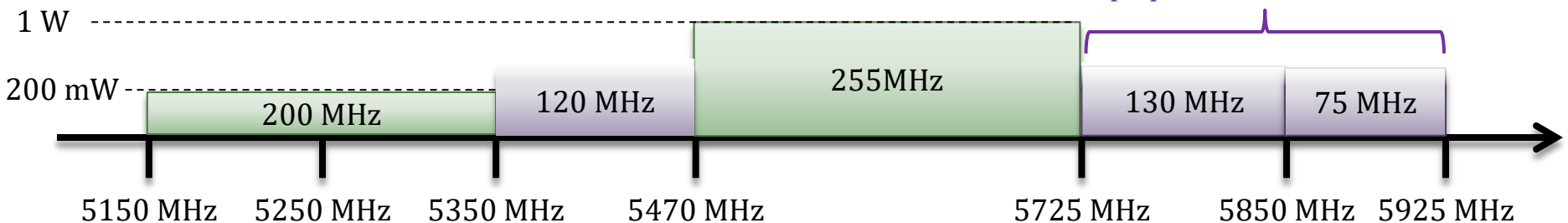
- v bezlicenčních pásmech je poskytování garantovaných služeb problematické
 - nikoli ale vyloučené

jaká jsou bezlicenční pásma?

- **situace je v různých zemích různá**
 - pásma, vyhrazená pro využití na bezlicenčním principu, nejsou všude stejná !!!!
 - největší shoda je u pásma 2,4 GHz – ale i zde se liší situace i mezi členskými zeměmi EU !!
- **situace v ČR (harmonizováno v celé EU)**
 - pro sítě WLAN (RLAN, FWA) jsou na bezlicenčním principu uvolněna pásma
 - 2,4 GHz (celkem 83,5 MHz, konkrétně 2.4000 - 2.4835 GHz)
 - vyzářený výkon max. 100 mW e.i.r.p.
 - 5 GHz (celkem 455 MHz)
 - 5150–5350 MHz (200 MHz): vyzářený výkon max. 200 mW e.i.r.p., pouze „indoor“ použití
 - 5470–5725 MHz (255 MHz): vyzářený výkon max. 1 W e.i.r.p., lze i „outdoor“
 - 57-66 GHz (celkem 9 GHz)
 - vyzářený výkon max. 40 dBm e.i.r.p., jen pro „indoor“ použití, např. IEEE 802.11ad (Wi-Gig)
- **očekávaný další vývoj:**
 - dojde k uvolnění dalších frekvencí v pásmu 5 GHz
 - a možnosti jejich využití na bezlicenčním principu

dnes není spojité !!!

existují ještě další bezlicenční pásma pro jiné technologie/sítě než WLAN



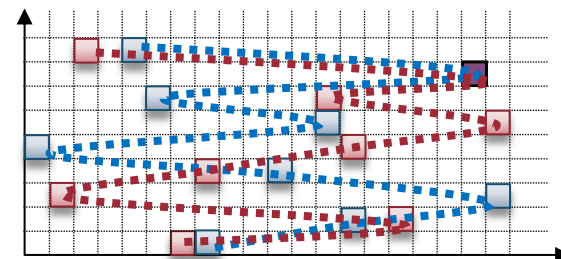
frekvenční kanály v pásmu 2,4 GHz

- bezlicenční pásmo 2,4 GHz využívá řada různých technologií a produktů

- například:

- Bluetooth (BT)

- pracuje s kanály o šířce 1 MHz
 - v pásmu 2,4 GHz (2400 až 2483,5 MHz) jich využívá 79
 - a přeskakuje mezi nimi 1600x za sekundu, pomocí techniky Frequency Hopping



- mikrovlnné trouby

- pracují (jakoby) jen s 1 kanálem šířky 100 MHz
 - „kolem“ frekvence 2450 MHz, která je vhodná pro ohřev vody a dalších látek
 - v rozsahu 2400 až 2500 MHz



- bezdrátové telefony

- WDCT (Worldwide Digital Cordless Telecommunications): 95 kanálů á 800 kHz,
 - odstup mezi 2 kanály 864 kHz, fakticky využíváno jen 75 kanálů (frequency hopping)
- DECT (Digital European Cordless Telecommunications): v pásmu 2,4 GHz jen v USA, v EU ne!!
- bezdrátové mikrofony, bezdrátové reproduktory,
- dětské chůvičky
-



jde o „sdílené“ pásmo
(sdílené více technologiemi)

připomenutí: pásmo 2,4 GHz
využívají i technologie IEEE 802.11
(Wi-Fi)

- nelze zabránit možnosti vzájemného rušení

- proto: musí být kladen velký důraz na robustnost a odolnost vůči rušení !!

frekvenční kanály v pásmu 2,4 GHz

- **pásmo 2,4 GHz využívá také technologie IEEE 802.11 (Wi-Fi)**

- rozděluje je na 14 kanálů šířky 22 MHz, které mají vzájemný odstup 5 MHz

- ale jsou širší, takže se vzájemně překrývají !!!

- 14. kanál má větší odstup: 12 MHz

- ne všude lze využívat všech 14 kanálů

- v ČR (a EU) jen prvních 13 kanálů !!!

- 1. kanál: 2401 až 2423 MHz

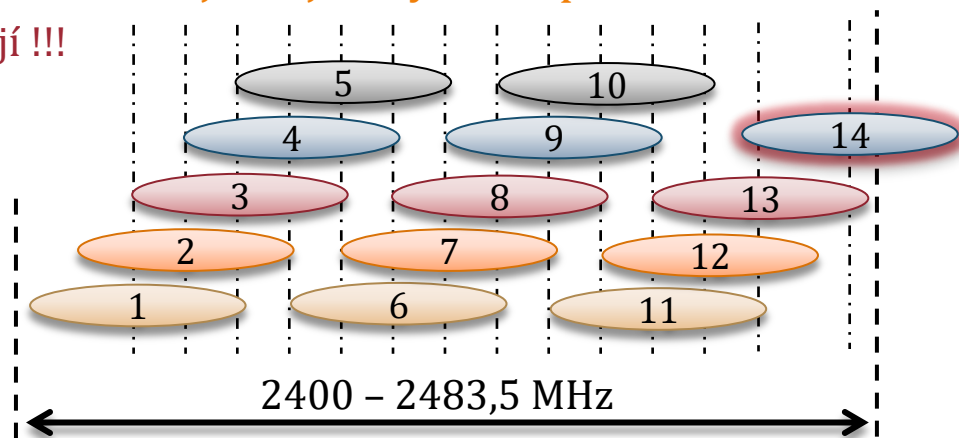
-

- 13. kanál: 2461 až 2483 MHz

- ~~14. kanál: 2473 až 2495 MHz~~ – již zasahuje mimo bezlicenční pásmo (v ČR a EU)

- v USA lze využívat jen prvních 11 kanálů

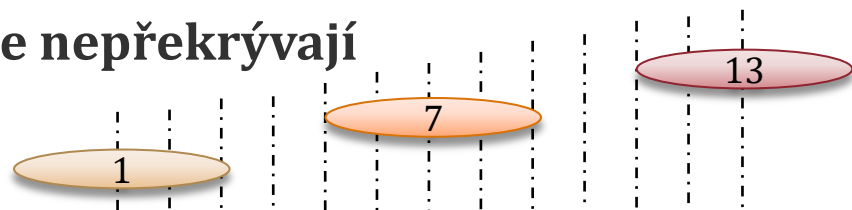
- v Japonsku lze využívat i 14. kanál (ale jen pro 802.11b)



- **v tomto pásmu jsou jen 3 kanály, které se nepřekrývají**

- v ČR/EU: kanály 1, 7 a 13

- v USA: 1, 6 a 11

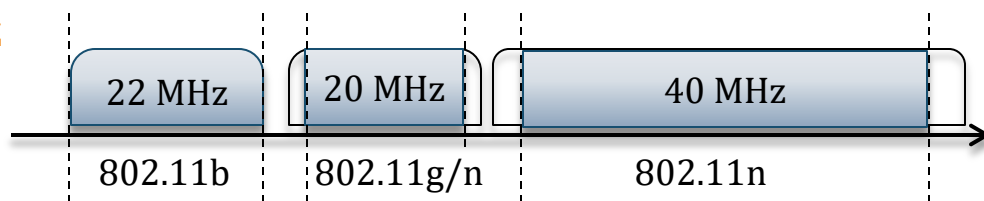


- **různé varianty technologií na bázi IEEE 802.11 využívají různé šířky kanálů**

- 802.11b (technika DSSS): šířka 22 MHz

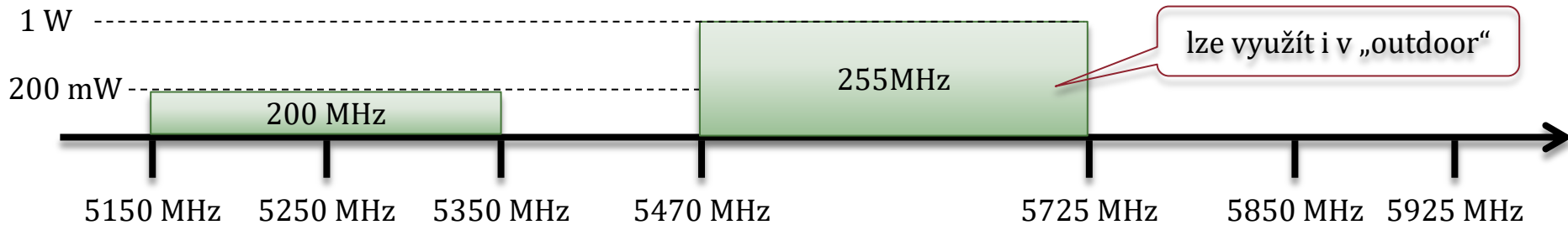
- 802.11g/n (OFDM): šířka 20 MHz

- 802.11n (OFDM): volitelně též 40 MHz



frekvenční kanály v pásmu 5 GHz

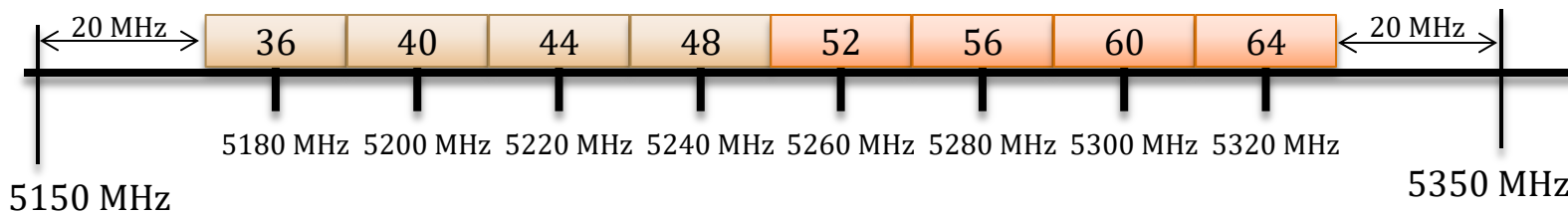
- **připomenutí: v pásmu 5 GHz jsou dnes k dispozici 2 nesouvislé bloky**



- **kanály v pásmu 5150 až 5350 MHz (celkem 200 MHz)**

– zde jsou 4+4 nepřekrývající se kanály (číslo 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64)

- o šířce 20 MHz a s rozstupem 20 MHz (tj. těsně na sebe navazují – kromě okrajů pásma)

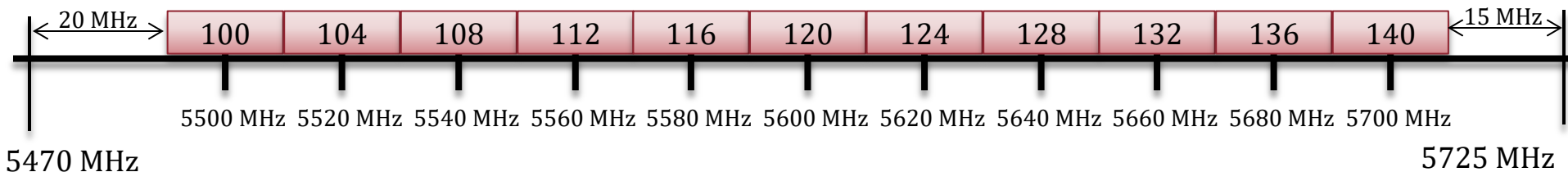


- **kanály v pásmu 5470 až 5725 MHz (celkem 255 MHz)**

– zde je celkem 11 nepřekrývajících se kanálů

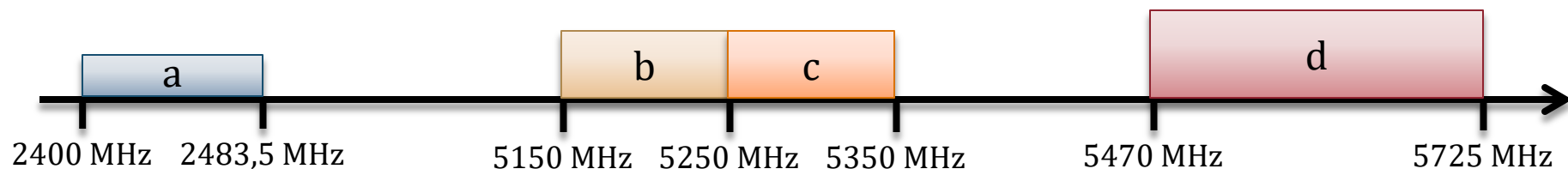
- také o šířce 20 MHz

připomenutí: v pásmu 2,4 GHz mají kanály šířku 22 MHz, v pásmu 5 GHz jen 20 MHz !!!



volba kanálu a regulace výkonu

- s využitím různých částí bezlic. pásem jsou spojeny konkrétní podmínky
 - definované v generální licenci (všeobecném oprávnění)



- **automatická regulace výkonu**

- TPC = Transmit Power Control
- uzel vysílá jen tak silně, jak je zapotřebí
 - aby zbytečně nezpůsobil rušení
 - sám omezuje „sílu“ svého vysílání
- povinné pro pásma c + d !!!!

- **vyzářený výkon**

- pásmo a: max. 100 mW střední e.i.r.p.
- pásmo b, c: max. 200 mW střední e.i.r.p.
- pásmo d: max. 1 W střední e.i.r.p.

- **dynamická volba kanálu**

- DFS = Dynamic Frequency Selection
- uzel sám vybírá vhodný kanál
 - ideálně: takový, který je volný
- **povinné pro pásma c + d !!!**

- **možnost využití (v ČR):**

- pásma b + c : jen „indoor“
 - uvnitř budov (i vlaků, busů, letadel, ...)
- pásma a + d: lze i „outdoor“
 - i vně budov
 - v EU: pásmo a jen „indoor“

odbočení: bodová anténa, e.i.r.p.

- **ideální bodová anténa:**

- byl by to bod, který vyzařuje do všech směrů stejně

- „tu energii, kterou má k dispozici, vyzařuje do všech směrů se stejnou intenzitou ...“

- ale takováto (ideální) bodová anténa v praxi **neexistuje !!!**

- **EIRP (e.i.r.p.) – Effective Isotropical Radiated Power**

- **efektivní izotropický vyzařený výkon**

- představuje výkon, vyzařovaný (ideální) bodovou anténou do všech směrů

- ale taková (bodová) anténa v praxi neexistuje

- **skutečná anténa:**

- **není nikdy bodová**

- nevyzařuje do prostoru rovnoměrně, ale některým směrem více a jiným méně

- „tu energii, kterou má k dispozici, vyzařuje nerovnoměrně“

- do některých směrů soustřeďuje více energie než do jiných

- **zisk antény:**

- kolikrát více vyzařuje v daném směru více, než izotropní anténa

- **v praxi:**

- požadavek na maximální výkon e.i.r.p. je požadavek na to, kolik smí (reálná) anténa vyzařovat v libovolném směru

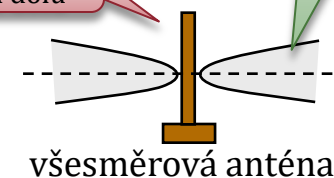
- jde hlavně o směr, ve kterém má anténa největší zisk (do kterého soustřeďuje nejvíce energie)

vyzařený výkon

ve smyslu: je to ta intenzita (výkon), kterou ideální bodová anténa vyzařuje do všech směrů

méně energie „nahoru a dolu“

více energie do horizontální roviny



druhy antén a jejich zisk

- antény mohou mít různá provedení

- mohou být parabolické, panelové, šterbinové, prutové, YAGI atd.



- každá anténa má svůj vyzařovací diagram

- který popisuje, jak (v kterých směrech) anténa vyzařuje a s jakou intenzitou (ziskem)

- podle způsobu vyzařování (a vyzařovacího diagramu) se antény dělí na:

- všesměrové

- vyzařují do všech směrů, ale jen v horizontální rovině!!

- typický zisk: 2 až 6 dBi, dosah max. 1 km

- sektorové

- vyzařují (v horiz. rovině) jen do určité výseče

- obvykle s úhlem 30 až 120 stupňů

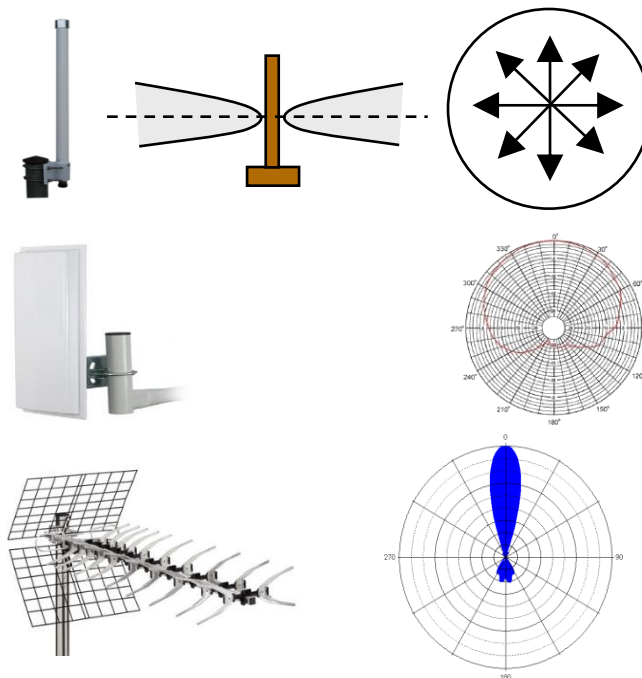
- typický zisk 10 až 20 dBi, dosah max. jednotky km

- směrové

- vyzařují (v horizontální rovině) do úzké výseče

- obvykle s úhlem 8 až 15 stupňů

- typický zisk od 13 dBi výše, větší dosah



vysílací a vyzářený výkon

- **vysílací výkon:**

- „to, co vystupuje ze zařízení“
 - z jeho síťové karty/síťového rozhraní
 - představuje celkové množství energie, které vysílací zařízení generuje

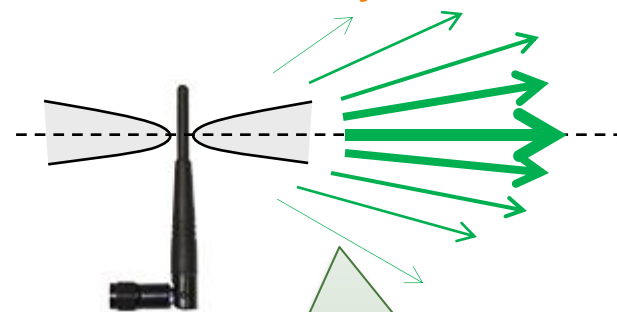


vysílací výkon je celkový (jen jeden),
nezávisí na směru ani anténě



- **vyzářený výkon:**

- „to, co je vyzářeno z antény“
- pozor: je to vztaženo ke konkrétnímu směru vyzařování

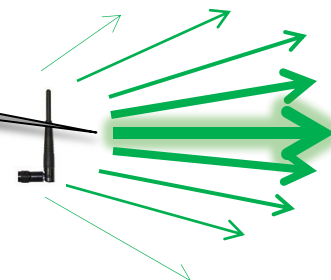


vyzářený výkon je v různých směrech různý
(podle zisku antény v daném směru)

- **důležité:**

- omezení výkonu v generální licenci (všeob. oprávnění) se týká **vyzářeného výkonu !!!!**
 - nikoli **vysílacího** výkonu
- **podstata omezení:**
 - vyzářený výkon nesmí v žádném směru překročit povolenou max. hodnotu
 - i kdyby se jednalo o sebevíce „úzký“ (úzce směrový) paprsek
 - jinými slovy: **kritický je ten směr, ve kterém má anténa největší zisk**

a: 100 mW, b+c: 200 mW, d: 1 W



jak vypočítat vyzářený výkon?

- **princip: stačí jednoduše sečíst**

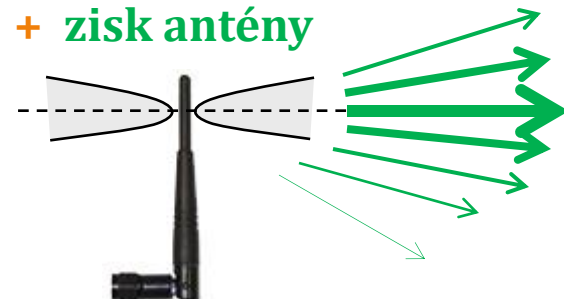
– vyzářený výkon = **vysílací výkon** + **útlum na kabeláži** + **zisk antény**



+



+



– podmínkou je vyjádření všech veličin v „poměrových“ jednotkách **dB (decibel)**

- jako poměr $10 * \log_{10}(P1 : P2)$

1,995:1

- příklad: 0 dB je poměr 1:1, 3 dB je (cca) 2:1, 10 dB je 10:1, -10 dB je 1:10

- u výkonů konkrétně v poměru k výkonu o velikosti 1 mW, v jednotkách **dBm** (dB milliwatt)

- u zisků antén v poměru k izotropnímu vyzářenému výkonu, v jednotkách **dBi** (dB isotropic)

– **maximální hodnoty dle generální licence:**

- pásmo a: max. 100 mW, odpovídá max. 20 dBm

- pásma b + c: max. 200 mW, odpovídá max. 23 dBm

- pásmo d: max. 1 W, odpovídá max. 30 dBm

– **vliv „komponent“**

- útlum na kabeláži, konektorech,

- je záporný, dle délky a provedení

- směrová anténa (tzv. síto)

- zisk např. 24 dBi

je nutná regulace (snížení) vysílacího výkonu !!

příklad:

- běžný domácí směrovač pro pásmo 2,4 GHz má vysílací výkon 19 mW
 - 12,8 dBm
- kabeláž má útlum - 7 dB
- je použita směrová anténa o zisku 24 dBi
- celkem: **12,8 dBm - 7 dB + 24 dBi = 29,8 dBm**
 - skoro 1 W (30 dBm)

!!! 10x překročený max. vyzářený výkon !!!!
!!! hrozí vysoká pokuta od ČTÚ !!!!

obecné vlastnosti frekvencí

- **obecně platí, že:**

- **čím nižší je frekvence (kmitočet), tím**
 - lépe proniká překážkami (např. zdí)
 - reálný dosah signálu je delší
- **čím vyšší je frekvence (kmitočet), tím**
 - bývá k dispozici „více místa“
 - větší šířka pásma
 - v podobě většího počtu (či větší šířky) frekvenčních kanálů
- **čím větší (širší) je frekvenční kanál**
 - tím větší přenosové rychlosti lze dosáhnout
 - viz Shannonův teorém
 - max. přenosová rychlost je lineárně závislá na šířce pásma
- **frekvence v bezlicenčních pásmech mohou mít více (současných) uživatelů**
 - ve smyslu: na stejných (blízkých, překrývajících se) frekvencích může probíhat více souběžných přenos, pomocí stejné WLAN technologie
- **frekvence v bezlicenčních pásmech jsou sdílené**
 - ve smyslu: na stejných (blízkých, překrývajících se) frekvencích mohou fungovat/být používány i jiné technologie
 - například: mikrovlnné trouby, meteoradary, Bluetooth atd.

otázka volby mezi pásmy 2,4 GHz a 5 GHz (resp. 60 GHz)

snaha využívat co nejširší kanály (40 MHz místo 20/22 MHz)

snaha využívat co nejfektivnější techniky rádiového přenosu

potřeba co největší robustnosti rádiových přenosů (odolnosti proti rušení)

techniky rádiového přenosu

- pro potřeby sítí WLAN, fungujících v bezlicenčních pásmech, se využívají metody a techniky rádiových přenosu, které:
 - zvyšují odolnost proti rušení
 - techniky rádiového přenosu, využívající „rozprostření do (širšího) spektra“
 - chtějí se tak vyhnout „úzkopásmovému“ rušení
 - FHSS: Frequency Hopping SS
 - DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
 - OFDM: Orthogonal FDM
 - PBCC: Packet Binary Convolution Coding
 -
 - „ekologické“ (šetřící) techniky
 - automatická regulace výkonu
 - TPC = Transmit Power Control
 - dynamická volba kanálu
 - DFS = Dynamic Frequency Selection
 - činí přenos více efektivním
 - zvyšují efektivnost využití dostupného přenosového pásma
 - zvyšují tzv. spektrální účinnost
 - techniky MIMO
 - Multiple Input, Multiple Output
 - „ více antén“
 - použito již v 802.11n
 - beamforming
 - „tvarování“ vysílaného signálu
 - použito v 802.11ac
 - beamsteering
 - použití směrových antén místo všesměrových
 - použito v 802.11ad
- konkrétní technologie pro WLAN pak různě kombinují pásma a techniky
 - 802.11a: pásmo 5 GHz, technika OFDM, volitelně (802.11h: povinně) TPC a DFS
 - 802.11b: pásmo 2,4 GHz, technika DSSS (802.11g: technika DSSS, OFDM, PBCC)
 -

připomenutí: Frequency Hopping

- **princip FHSS :**

- efektu rozprostření se dosahuje přeskakováním

- vysílač krátkou dobu vysílá na jednom (úzkém) frekvenčním kanálu, pak rychle přejde (přeskočí) na jiný kanál a zde pokračuje ve vysílání
 - posloupnost přeskoků je (pseudo)náhodná
 - příjemce jeho činnost napodobuje

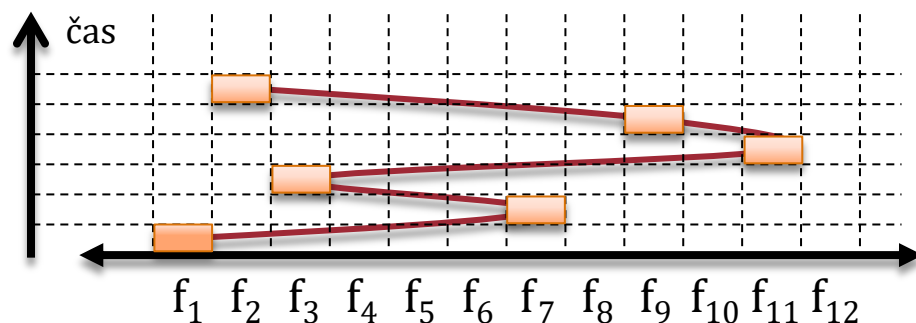
- **v praxi:**

- FHSS používá např. technologie Bluetooth

- přeskakuje se 1600x za 1 sekundu
 - kanály mají šířku 1 MHz
 - doba „setrvání“ na 1 kanálu: 625 μ s
- pro Bluetooth toto přeskakování současně plní roli přístupové metody
 - různé přenosy používají různé (pseudo)náhodné posloupnosti přeskoků
 - pravděpodobnost souběhu „v místě a čase“ je malá
 - a řeší se skrze zajištění spolehlivosti (pokud vůbec)

- FHSS používaly také první verze standardů IEEE 802.11 (ještě bez přípony)

- přeskakuje se 2,5x za 1 sekundu
 - kanály měly šířku 22 MHz
 - doba „setrvání“ na 1 kanálu: 400 ms
- vyšší verze standardů 802.11 již techniku FHSS nepoužívají



připomenutí: FDM a OFDM

- **představa:**

- místo přeskakování mezi různými frekvenčními kanály (jako u FHSS) se využijí všechny kanály současně

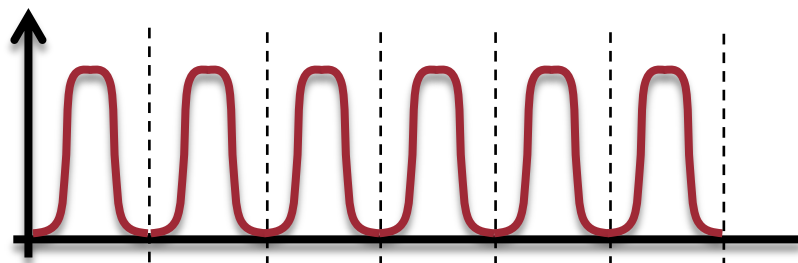
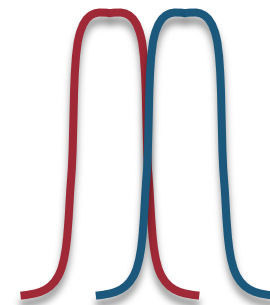
- každý z nich může být modulován samostatně – a nést tak „vlastní“ data
 - resp. část širšího toku dat

- **FDM: frekvenční multiplex**

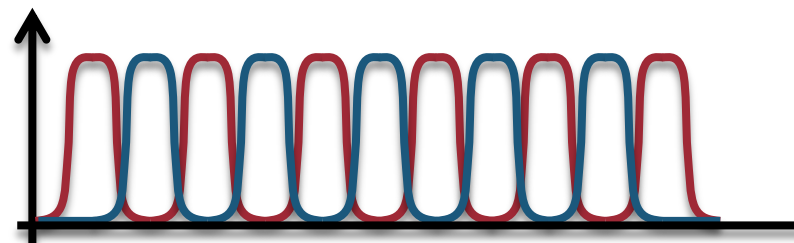
- Frequency Division Multiplexing
- jednotlivé nosné využívají vždy celý kanál a nepřekrývají se
- v praxi se už tolik nepoužívá
 - kvůli relativně velké režii na oddělení jednotlivých kanálů

- **OFDM: ortogonální FDM**

- Orthogonal FDM
- jednotlivé nosné jsou „nahuštěny“ tak, aby se maximum jedné nosné překrývalo s minimem druhé nosné
- výhoda: na stejnou šířku pásma se „vejde“ podstatně více nosných, a tím lze dosáhnout i podstatně vyšší propustnosti (přenosové rychlosti)
- používá se velmi často, například v rámci xDSL technologií, Wi-Fi apod.



stejná
šířka pásma



připomenutí: představa DSSS

• DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum

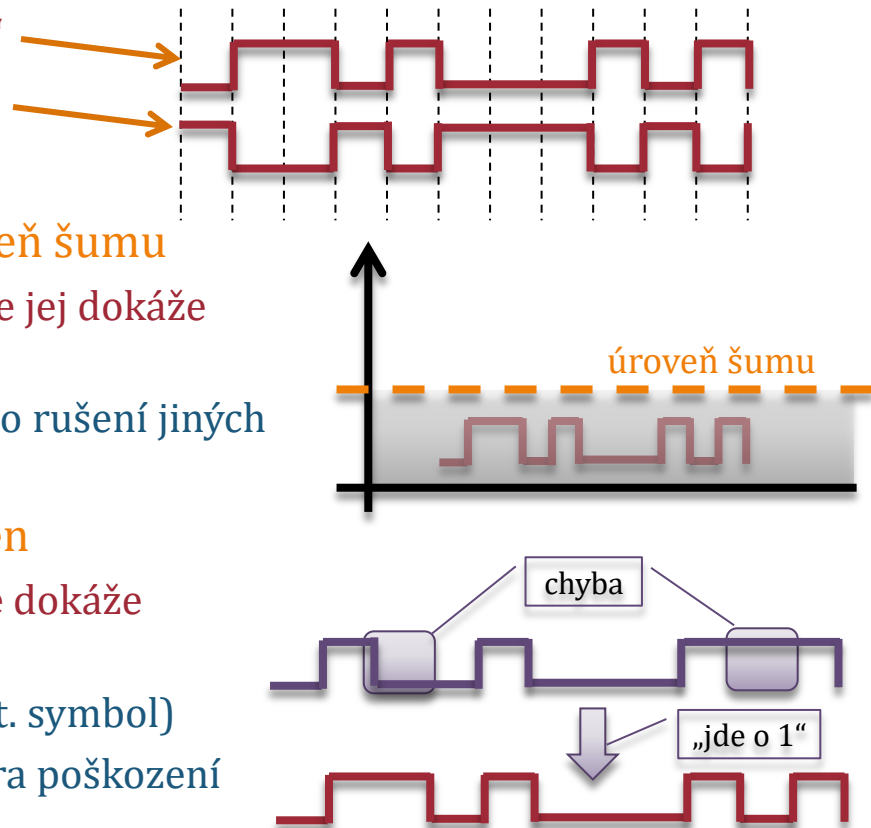
- technika přímo rozprostřeného spektra, rozprostírání přímou posloupností,
- využívá se například u IEEE 802.11b (Wi-Fi),

• podstata

- místo jednoho bitu se přenese celý **symbol** (jakýsi „vzorek“) předem známého tvaru, tvořený posloupností tzv. **chipů** („úlomků“)
- v případě hodnoty 1 se přenáší tento „vzorek“
- v případě hodnoty 0 jeho invertovaná podoba

• představa fungování

- symbol („vzorek“) nemusí přesahovat úroveň šumu
 - může být vysílán i s nižší „silou“ – ale příjemce jej dokáže rozpoznat díky tomu, že „ví, co má hledat“
 - dosahuje se efektu úspory energie / malého rušení jiných přenosů / utajení
- přijatý symbol (vzorek) může být i poškozen
 - příjemce hledá i „podobné“ vzorky, které ještě dokáže rozpoznat a odlišit od sebe
 - poznat, zda jde o 1 (symbol) nebo 0 (invert. symbol)
 - dosahuje se efektu robustnosti – určitá míra poškození symbolů (vzorků) nenaruší přenos

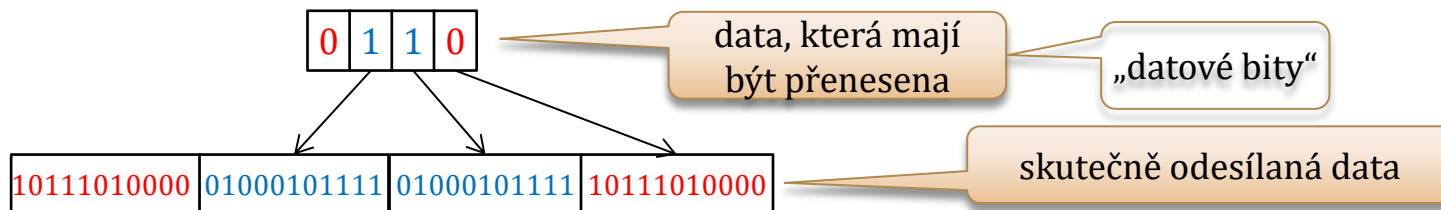


skutečné fungování DSSS v 802.11

• příklad: přenos rychlostí 1 Mbit/s

– jako „rozprostírací posloupnost“ (spreading code) je použit 11-bitový **Barkerův kód**

- 1 je nahrazena posloupností 11 čipů 01000101111, 0 posloupností 10111010000



– každý z bitů Barkerova kódu je kódován pomocí 2-stavové (fázové) modulace (DBSPK: Differential Binary Phase Shift Keying) a tvoří 1 čip (úlomek)

- 1 = fázový posun o 180° ; 0 = fázový posun o 0°

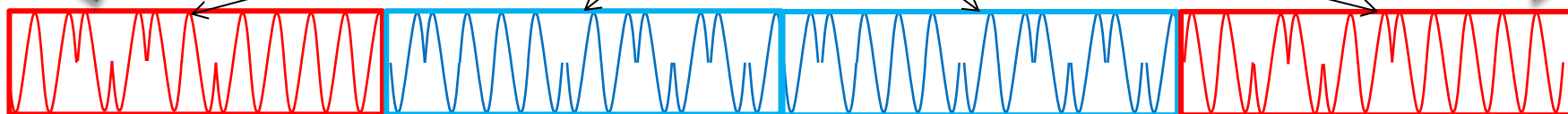
– 11 čipů (odpovídajících 11 bitům Barkerova kódu) tvoří **symbol (vzorek)**

- při této rychlosti existují 2 různé symboly, každý symbol reprezentuje 1 (datový) bit
- symboly se střídají s rychlostí 1 Msymbol/s (tzv. symbolová rychlost)

může být tolerováno až 9 chybných čipů v symbolu !!

10111010000 01000101111 01000101111 10111010000

(analogový)
symbol



1 symbol
= 1 (datový) bit

1 symbol
= 1 (datový) bit

1 symbol
= 1 (datový) bit

1 symbol
= 1 (datový) bit

z historie: bezdrátový Ethernet

- **sítě WLAN vděčí za svůj vznik snahám „zbavit Ethernet drátů“**
 - vytvořit bezdrátový Ethernet
- **nejprve se objevují (proprietární) firemní řešení**
 - **kolem let 1986-7: Proxim, Symbol**
 - problémy se vzájemnou kompatibilitou
 - roste potřeba společného standardu
 - **z iniciativy firmy NCR se aktivity ujímá IEEE**
 - NCR chtěla propojit bezdrátově své pokladny
- **1989-97: hledání technického řešení**
 - **1990: vzniká AT&T WaveLAN**
 - používá techniku DSSS
 - **1996: první čipset pro bezdrátový Ethernet**
 - Harris (Intersil): PRISM WLAN chipset
- **9/1990: založena prac. skupina IEEE 802.11**
- **1997: dosažena dohoda na společném standardu**
 - **označován jako standard IEEE 802.11**
 - též: IEEE 802.11 Prime

bez přípony



- **z počátku je celé řešení prezentováno jako „bezdrátový Ethernet“**
 - praktického dodržování standardů a testování kompatibility se ujala asociace **WECA** (1999)
 - Wireless Ethernet Compatibility Alliance
- **teprve později se začíná hovořit o Wi-Fi**
 - asociace WECA se přejmenovala na Wi-Fi Alliance (1.10.2002)



standard 802.11 Prime (1997)

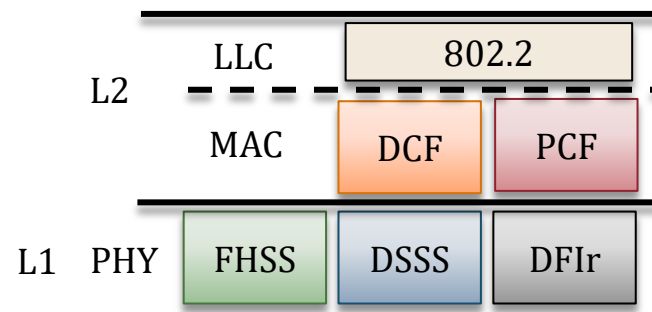
• pokrývá:

- fungování podvrstvy MAC (řízení přístupu) na principu CSMA/CA (viz lekce č. 7)
 - definuje přístupovou metodu PCF, včetně RTS/CTS
 - Point Coordination Function
 - přístupovou metodu DCF
 - Distributed Coordination Function
- fungování fyzické vrstvy (PHY)
 - zde předpokládá 3 možné varianty řešení rádiových přenosů, s rychlostí přenosu 1 či 2 Mbit/s
 - FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
 - v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz (2400 MHz až 2483,5 MHz)
 - 75 kanálů o šířce 1 MHz, přeskok 2,5x za sekundu,
 - rychlost přenosu 1 Mbit/s (volitelně i 2 Mbit/s)
 - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
 - v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz (2400 MHz až 2483,5 MHz)
 - 13 kanálů (v ČR) o šířce 22 MHz
 - rychlosti přenosu: 1 Mbit/s a 2 Mbit/s
 - DFIR (Diffused Infrared)
 - infračervené světlo v pásmu 300 - 428 GHz
 - je nutná přímá viditelnost !!!
 - v praxi se DFIR neprosadilo

implicitní (default)

volitelná možnost, nemusí
být implementována

tento standard nebyl
úspěšný a do praxe
se neprosadil



rozšíření 802.11a, 802.11b

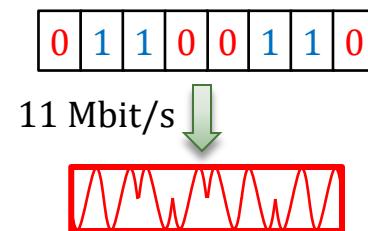
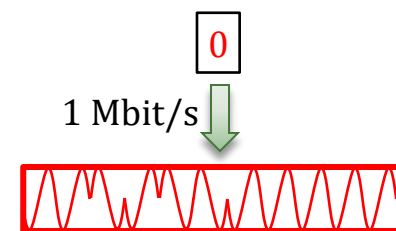
- **první standard IEEE 802.11 (Prime) byl zastaralý již v době svého přijetí**
 - velmi rychle (v září 1999) byl doplněn o dvě „rozšíření“
- **IEEE 802.11a**
 - „přechází do pásma 5 GHz“
 - důsledek:
 - (kvůli odlišným pásmům) není možná zpětná kompatibilita s 802.11 !!!!
 - dosahuje přenos. rychlosti až 54 Mbit/s
 - nominální rychlost je 72 Mbit/s
 - ale ¼ jde na zabezpečení:
 - zbývá 54 Mbit/s pro data
 - PHY využívá výlučně techniku OFDM
 - ortogonální FDM (frekvenční multiplex)
 - využívá 52 nosných (carriers)
 - 48 pro přenos dat, 4 pomocné
 - využívá různé způsoby kódování
 - které se dokáží přizpůsobit různým podmínkám pro přenos
 - a které dosahují různých rychlostí přenosu (do max. 54 Mbit/s)
- **IEEE 802.11b**
 - „zůstává v pásmu 2,4 GHz“
 - přidány 2 nové rychlosti: 5,5 a 11 Mbit/s
 - DSSS: menší velikost chipping kódu
 - jen 8 bitů, místo 11 bitů Barkerova kódu
 - DSSS: jiné (efektivnější) kódování
 - PHY využívá již jen techniku DSSS
 - DFIR se neosvědčila
 - nutná přímá viditelnost
 - FHSS se nedalo zrychlit
 - kvůli požadavkům regulátora (FCC)
 - důsledek:
 - !!! není zpětná kompatibilita s verzemi 802.11, které využívají FHSS a DFIR !!!
 - dynamické přizpůsobení rychlosti
 - technika dynamic rate shifting umožňuje změnu rychlosti podle aktuálních podmínek pro přenos (1 – 2 – 5,5 – 11 Mbit/s)

přenos dat v IEEE 802.11b

- rozšíření 802.11b nabízí celkem 4 rychlosti
 - 1 Mbit/s | 2 Mbit/s | 5,5 Mbit/s | 11 Mbit/s
 - mezi kterými se přechází automaticky, díky technice **dynamic rate shifting**
 - pokud se podmínky pro přenos zhorší, koncové zařízení samo přejde na nižší rychlost
 - a naopak: pokud se zlepší, koncové zařízení přejde na vyšší rychlost

- jak se dosahuje různých rychlostí?

- přenáší se (analogové) symboly
- rozdíl je v tom:
 - kolik je různých symbolů & kolik datových bitů každý symbol reprezentuje
 - kolik je čipů v rámci symbolu & kolik čipů reprezentuje kolik bitů
 - jak rychle se střídají jednotlivé symboly (jaká je symbolová rychlost)
- vždy stejná je naopak čipová rychlost
 - jak rychle se střídají jednotlivé čipy (úlomky)



přenosová rychlost	1 Mbit/s	2 Mbit/s	5,5 Mbit/s	11 Mbit/s
počet (datových) bitů na 1 symbol	1	2	4	8
počet různých symbolů	2	4	16	256
počet čipů v symbolu	11 (Barkerův kód)		8 (CCK, Complementary Code Keying)	
znázornění bitů pomocí čipů	1 bit - 11 čipů	2 bity - 11 čipů	1 bit - 2 čipy	1 bit - 1 čip
symbolová rychlost	1 Msymbol/s		1,375 Msymbol/s	
čipová rychlost	1M x 11 = 11 Mchip/s		1,375 M x 8 = 11 Mchip/s	

rámce IEEE 802.11

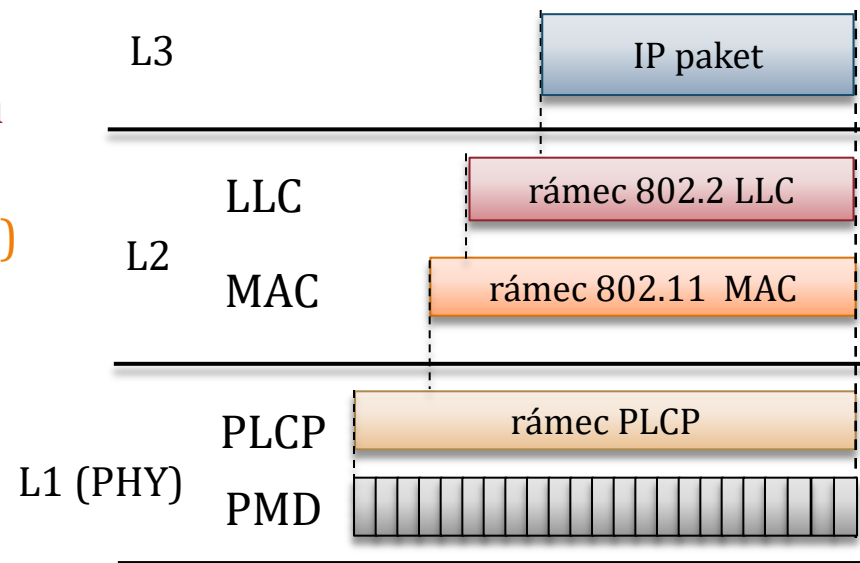
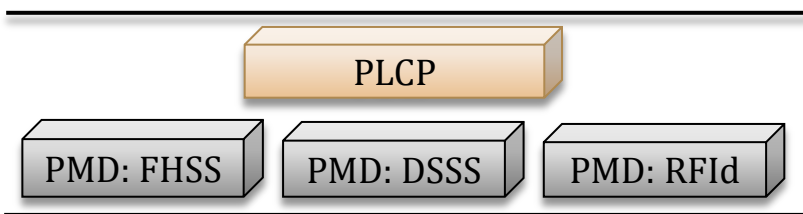
- již u standardu 802.11 se fyzická vrstva (PHY) rozpadla na dvě podvrstvy:

- PMD (Physical Media Dependent)

- řeší přenos jednotlivých bitů
- liší se pro jednotlivé druhy rádiového přenosu
 - FHSS, DSSS, DFIr

- PLCP (Physical Layer Convergence Protocol)

- přenáší celé bloky („fyzické“ rámce)



- **struktura rámce PLCP (pro DSSS u 802.11b)**

- je stejná pro všechny rychlostní varianty

- využívá se toho, že čipová rychlost je stále stejná (11 Mchip/s)
 - jde vlastně jen o „jemnost rozlišování“ toho, co jednotlivé čipy reprezentují (kolik bitů)

- hlavička PLCP rámce má vždy rychlost 1 Mbit/s (tj. 11 čipů reprezentuje 1 bit)

- jedna z položek hlavičky říká, jakou přenosovou rychlost používá nákladová část rámce

díky tomu je možné dynamicky měnit přenosovou rychlost



standard 802.11a

- využívá pásmo 5 GHz a techniku OFDM
 - kanály v tomto pásmu mají šířku 20 MHz
 - 802.11 pro OFDM využívá z 20 MHz jen 16,25 MHz (kvůli oddělení a minimalizaci přeslechů)
 - „ortogonální FDM“: používá 52 nosných (carriers), z toho 48 pro přenos dat, 4 pilotní
 - přenos bitů využívá redundanci skrze blokové kódování (konvoluční kódy)
 - v poměrech 1:2, 2:3 a 3:4 (na 3 datové bity jsou skutečně odeslány 4 bity)
 - používá se konstantní symbolová rychlost: 250 000 symbolů/s
 - 1 symbol trvá 3,2 μ s, odstup před dalším symbolem je 0,8 μ s (celkem „rozestup“ 4 μ s)
 - mění se způsob kódování a tím i počet bitů, které reprezentuje 1 symbol
 - tím se mění i přenosová rychlost, viz tabulka

kódování	bitů na symbol	konvoluce	datových bitů na symbol	Rychlost přenosu
BPSK	48	1:2	24	$24 * 250\ 000 = 6\ \text{Mbit/s}$
BPSK	48	3:4	36	$36 * 250\ 000 = 9\ \text{Mbit/s}$
QPSK	96	1:2	48	$48 * 250\ 000 = 12\ \text{Mbit/s}$
QPSK	96	3:4	72	$72 * 250\ 000 = 18\ \text{Mbit/s}$
16-QAM	192	1:2	96	$96 * 250\ 000 = 24\ \text{Mbit/s}$
16-QAM	192	3:4	144	$144 * 250\ 000 = 36\ \text{Mbit/s}$
64-QAM	288	2:3	192	$192 * 250\ 000 = 48\ \text{Mbit/s}$
64-QAM	288	3:4	216	$216 * 250\ 000 = 54\ \text{Mbit/s}$

standards 802.11a a 802.11h

- **standard IEEE 802.11a vznikl v USA (v roce 1999)**
 - podle tamních podmínek pro využívání pásma 5 GHz na bezlicenčním principu
- **rozdíly USA oproti ČR (a EU):**
 - v době vzniku standardu (do roku 2007) v USA nebyly vyžadovány „ekologické“ funkce
 - dynamická volba kanálu
 - DFS, Dynamic Frequency Selection
 - regulace vysílacího výkonu
 - TPC, Transmit Power Control
 - na bezlicenčním principu se mohly využít (trochu) jiné rozsahy frekvencí, než v ČR/EU
- **důsledek:**
 - zařízení, vycházející ze standardu 802.11a, se v ČR/EU nedala použít
 - bez nezbytných úprav
 - snížení vysílacího výkonu
- **řešení: nový standard IEEE 802.11h (z roku 2004)**
 - „Spectrum Managed 802.11a (5 GHz) for European compatibility (2004)“
 - hlavní rozdíl: zabudované „ekologické“ chování vůči bezlicenčním pásmům
 - **povinná podpora TPC a DFS**
 - DFS: když detekuje jiná zařízení na stejném frekvenčním kanále, přejde na jiný kanál
 - určeno hlavně pro „vyhýbání se“ radarům a podobným zařízením, která mohou využívat stejná pásma
 - TPC: umožňuje, aby se 2 zařízení vzájemně dohodla na „síle“ signálu pro vzájemnou komunikaci
 - s cílem minimalizovat energii signálu, a tím minimalizovat případná rušení jiných přenosů
 - původně vyvinuto v Evropě, pro HiperLAN2
 - ostatní charakteristiky obou standardů jsou shodné
 - například dosahované rychlosti atd.

standard 802.11g (2003)

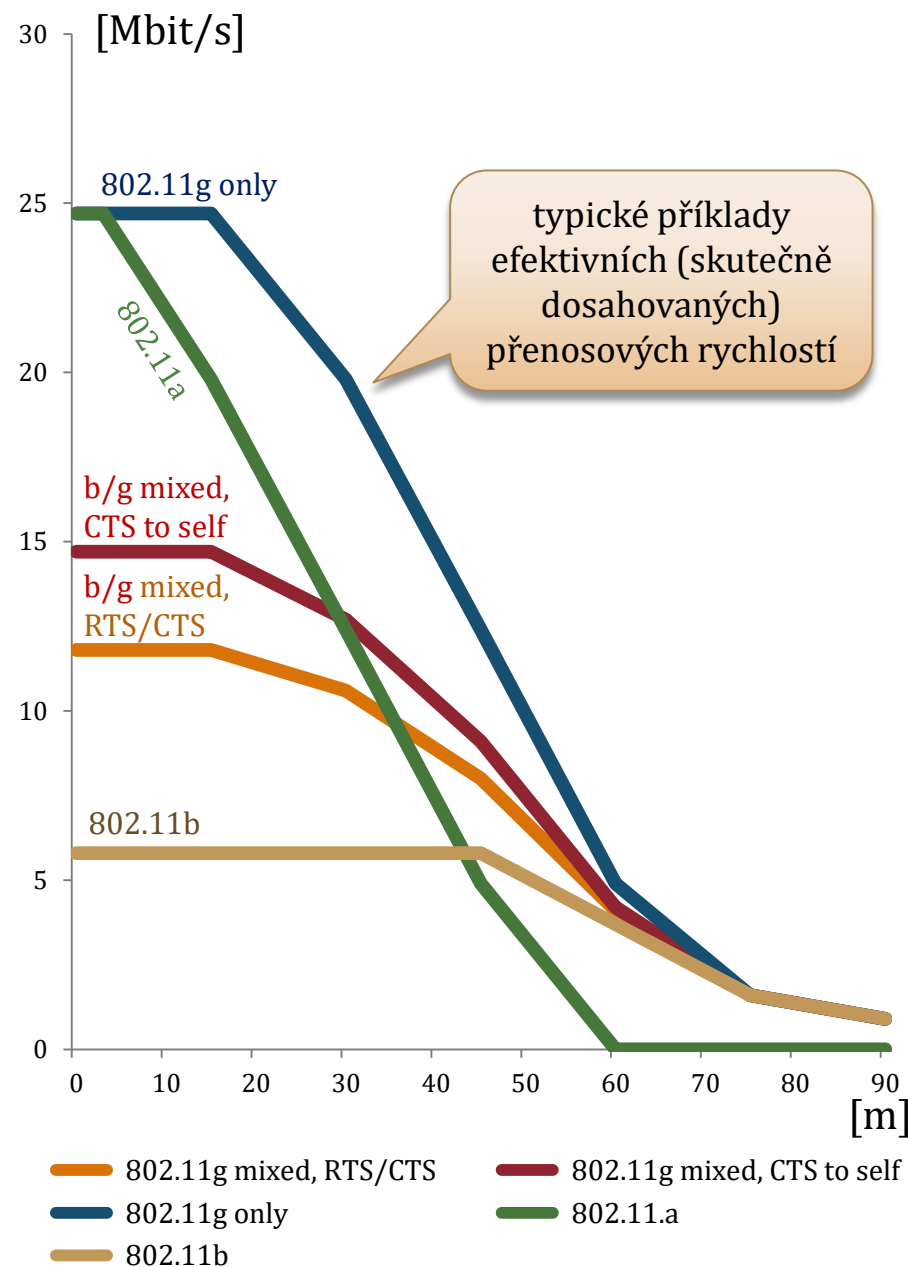
- **výsledek snahy dále zrychlit standard 802.11b**
 - tj. zůstat v pásmu 2,4 GHz, zajistit zpětnou kompatibilitu, ale dosahovat vyšší rychlost
 - záměr: dosahovat až 54 Mbit/s, stejně jako 802.11a (v pásmu 5 GHz)
- **řešení: použít nové (a efektivnější) techniky přenosu**
 - kvůli zpětné kompatibilitě:
 - DSSS (kompatibilita s 802.11b): rychlosti 1, 2, 5,5 a 11 Mbit/s
 - využívá frekvenční kanály o šířce 22 MHz
 - nové techniky: obecně ERP (Extended Rate PHY), inspirované řešením v 802.11a
 - OFDM (jako u 802.11a): rychlosti 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s
 - využívá frekvenční kanály o šířce 20 MHz (stejně jako OFDM v pásmu 5 GHz u 802.11a)
 - PBCC (nová technika přenosu): rychlosti 22 Mbit/s, 33 Mbit/s
 - Packet Binary Convolution Coding
 - používá jedinou nosnou v celém frekvenčním kanále o šířce 22 MHz, má 256 možných stavů
- **problém koexistence s 802.11b**
 - ve stejné síti (buňce) mohou fungovat zařízení na bázi „staršího“ 802.11b i „novějšího“ 802.11g
 - ale „starší“ zařízení neznají techniku OFDM (ani PBCC), nedokáží správně interpretovat probíhající vysílání
 - jsou nutná určitá opatření na ochranu „novějších“ zařízení před „staršími“ zařízeními
 - tzv. G Protection

metody „G protection“

- **připomenutí: jde o tzv. mixed mode**
 - kdy jedné síti (buňce) koexistují vedle sebe zařízení dle 802.11b a dle 802.11g
 - ve smyslu: jsou asociovány se stejným přístupovým bodem (AP, Access Point)
 - zařízení dle 802.11b „nerozumí“ zprávám, přenášených pomocí OFDM či PBCC
 - důsledek: narušují průběh komunikace a výrazně snižují celkovou propustnost
 - zařízení 802.11b mohou „skákat do řeči“ zařízením 802.11g
- **možná opatření:**
 - **používání zpráv RTS/CTS**
 - původně vyvinuto pro řešení problému předsunuté/skryté stanice, zde využito k jinému účelu
 - když chce nějaká stanice vysílat, nejprve vyšle zprávu RTS (pomocí DSSS), a čeká na odezvu v podobě zprávy CTS (DSSS)
 - ostatní stanice v dosahu to respektují a po dobu NAV (obsaženou v RTS/CTS) nevysílají
 - **používání zpráv „CTS to self“**
 - chybí zpráva RTS, uzel pomocí CTS povoluje vysílání sám sobě
 - ale ostatní uzly v dosahu „slyší“ vektor NAV ve zprávě CTS a po příslušnou dobu nevysílají
 - **úprava přístupové metody DCF (CSMA/CA)**
 - jde konkrétně o (velikost intervalu pro) náhodně volené doby čekání, a počty opakování
 - v rámci 802.11g jsou tyto hodnoty optimalizovány (zmenšeny) kvůli větší efektivnosti
 - v mixed módu se přizpůsobují (vrací) na úroveň hodnot z 802.11b

dosah a efektivní rychlosti

- **dosud uváděné přenosové rychlosti jsou nominální**
 - připomenutí: zahrnují i režii a vypovídají spíše o tom, jak dlouho trvá přenos 1 bitu
 - režie je u sítí WLAN významná a jde na vrub fungování přístupových metod, prodlevám, opakovaným přenosů, hlavičkám rámců atd., i nespolehlivosti přenosu
- **efektivní (skutečně dosahované) rychlosti závisí na:**
 - vzdálenosti mezi uzly
 - s rostoucí vzdáleností rychle klesají
 - podmínkách a dispozicích
 - například: přímá viditelnost vs. zeď
 - koexistenci mezi 802.11b/g
 - použitých mechanismech ochrany
 - účinku mechanismu dynamic rate shifting
 - pohybu koncových uzlů
 - použitých anténách
 -



standard 802.11n (2009)

- **výsledek snahy o další zrychlení přenosů, skrze:**
 - vylepšenou (a efektivnější) techniku OFDM
 - (volitelné) rozšíření frekvenčních kanálů: ze 20 na 40 MHz
 - může být problematické (lze jen tam, kde je to přípustné)
 - možnost použití obou pásem (2,4 GHz i 5 GHz)
 - základní variantou je 2,4 GHz, 5 GHz volitelně (dual band zařízení)
 - využití technik MIMO (Multiple Input, Multiple Output)
 - použití „více antén“ (a paprsků/proudů) současně, například:
 - 1x1, 2x2, 3x3, 4x4 – ale třeba také 2x3 atd.
 - agregace rámců
 -
- **maximální (nominální) rychlosti velmi záleží na použité kombinaci**
 - všech možností, hlavně ale stupně MIMO a kanálů šířky 20/40 MHz



MIMO	kanál 20 MHz	kanál 40 MHz
1x1	65-72 Mbit/s	150 Mbit/s
2x2	120-144 Mbit/s	300 Mbit/s
3x3	195-216 Mbit/s	450 Mbit/s
4x4	260-288 Mbit/s	600 Mbit/s

většina
zařízení
funguje takto

maximum na
1 paprsek/proud

inzerovány bývají
možnosti této
varianty

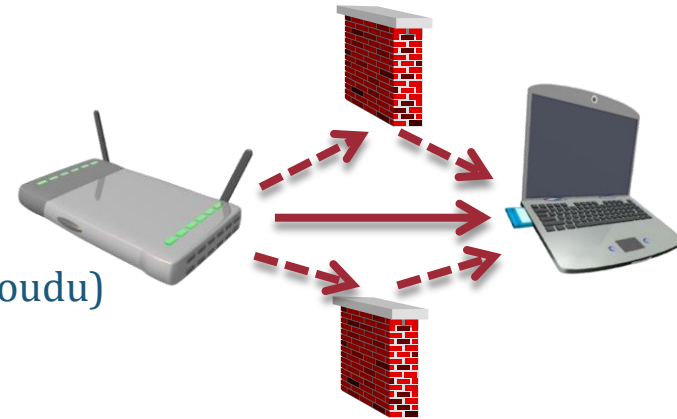
techniky MIMO

• zjednodušeně:

– signál (elektromagnetické vlnění) se nepřenáší jen jedním (nejkratším možným) směrem, ale i dalšími směry (paprsky, proudy) a odráží se od různých překážek

– přirovnání:

- u analogové TV takto vznikaly tzv. duchy
 - které zhoršovaly příjem obrazu
- u digitálních přenosů mohou být „duchy“ přínosem
 - protože mohou být „přičteny“ k hlavnímu paprsku (proudu)
 - a mohou zlepšovat (zvyšovat) celkovou propustnost



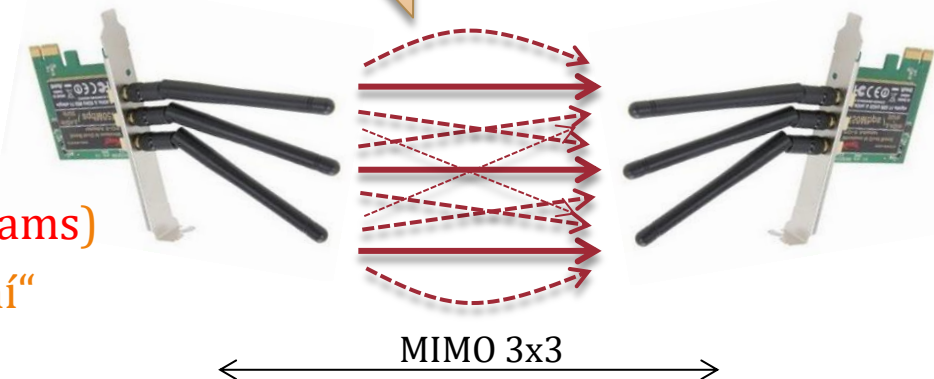
• technické provedení:

- vysílač má více antén (**MI: Multiple Input**), i příjemce (**MO: Multiple Output**)
 - a tyto antény jsou „rozmístěny v prostoru“
 - mají mezi sebou pevné rozestupy
 - na obou stranách nemusí být stejné počty antén
 - fungují i konfigurace např. 2x3

vstup (input) do „éteru“

• představa

- více antén umožňuje více samostatných přenosů (paprsků/proudů, beams/streams)
- pevné rozestupy antén umožňují „sčítání“ přímých i odražených paprsků



standard 802.11ac (leden 2014)

- přináší další zrychlení: teoreticky až **Gbit/s**, díky:

- přechodu do pásma **5 GHz**

- pásmo 2,4 GHz zde již nelze využít

- využití širších frekvenčních kanálů

- **minimálně 80 MHz**, volitelně 160 MHz

- použití více MIMO paprsků/proudů (současně)

- **až 8** (u 802.11n max. 4)

- technikám **beamforming**

- „tvarování“ paprsků/proudů (beams)

- umožňuje pracovat s nimi efektivněji

- lépe je „sčítat“ (jako u 802.11n), nebo je využívat samostatně

- **Multi User MIMO (MU-MIMO)**

- využití různých paprsků/proudů pro různé uživatele

- na downstreamu

- přístupový bod vysílá souběžně k různým stanicím - na stejném frekvenčním kanále, ale pomocí různých paprsků/proudů – různé stanice přijímají různé paprsky/proudy

- lepší (dokonalejší, efektivnější) modulaci: **QAM 256**

- u 802.11n jen 64 QAM

- vyšší spektrální účinnost: až 433 Mbit/s na 1 paprsek/proud, oproti 150 Mbit/s u 802.11n

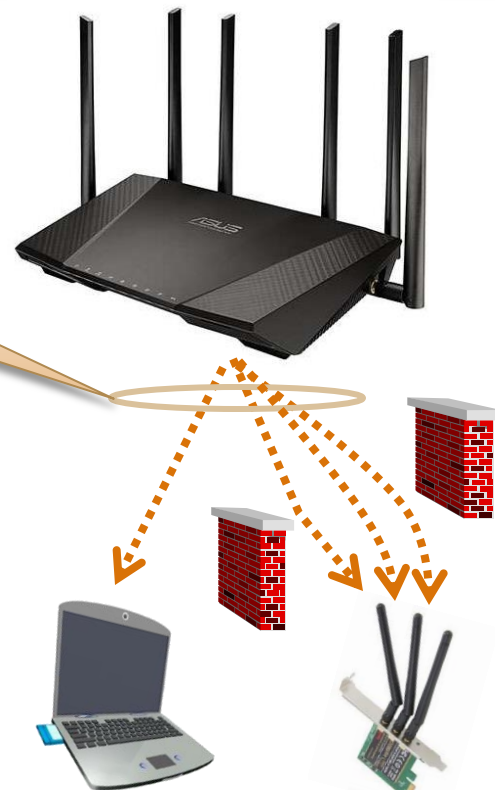
- „optimalizačním“ změnám v MAC rámcích

4 paprsky/proudy ve stejném frekvenčním kanále

teoreticky je k dispozici až 8x160 MHz

ale širší: 80 MHz

ale na užším kanále: 40 MHz



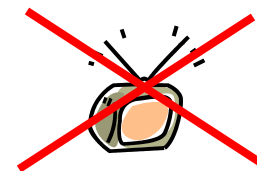
IEEE 802.11ad: WiGig (2013)

- **pracuje v bezlicenčním pásmu 60 GHz, dosahuje rychlostí až 7 Gbit/s**
 - **přesněji: 57-66 GHz, kde je k dispozici celkem 9 GHz (ale jen pro „indoor“ využití)**
 - je to obrovská šířka pásma, v jejím využití je tento standard **zatím „jen na začátku“**
 - „*ve využití tohoto pásma je 802.11ad asi stejně daleko, jako 802.11b v pásmu 2,4 GHz*“
 - 7 Gbit/s je „prozatímní“ max. rychlost, je pravděpodobné, že další standardy ji ještě výrazně zvýší
 - **jde o 3. pásmo pro Wi-Fi (vedle 2,4 GHz a 5 GHz)**
 - dokáže jej využít jen nová „**tri-band**“ zařízení, která podporují všechna pásma současně
 - **využívá většinu technik a vylepšení z 802.11ac:**
 - podporuje MIMO i MU-MIMO, s ještě větším počtem antén a paprsků/proudů: 16 či 32
 - na stejnou plochu, kterou zabírá 1 anténa pro 2,4 GHz, lze umístit 16 antén pro 60 GHz
 - beamforming: při větším počtu paprsků/proudů může být ještě efektivnější než v pásmech 2,4 a 5 GHz
 - **výhody:**
 - nízká energetická náročnost
 - minimální rušení (podporuje samostatné využití jednotlivých paprsků/proudů)
 - velký dosah (na přímou viditelnost), větší než technologie v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz
- **problém:**
 - **signály na frekvenci kolem 60 GHz (téměř) neprostupují zdi (ani lidmi), ale odráží se**
 - dosah vyžaduje přímou viditelnost, nebo alespoň „nějakou cestu“ s pomocí odrazů od vhodných překážek

v ČR lze využít – být jen „indoor“
díky VO-R/12/09.2010-12, max. 40 dBm e.i.r.p.

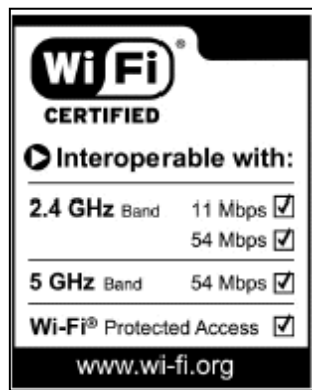
standard IEEE 802.11af (únor 2014)

- označovaný též jako **White-Fi** či **Super Wi-Fi**
 - pro využití v bezdrátových lokálních sítích (Wireless LAN, WLAN), do cca 1 km
 - existuje „podobný“ standard IEEE 802.22 pro WRAN (Wireless Regional Area Net.), do 100 km
- **802.11af** využívá tzv. bílá místa v televizních pásmech (54 až 790 MHz)
 - tj. frekvenční kanály, přidělené potřebám pozemského (terestrického) vysílání
 - ale které nejsou skutečně využívány (proto: bílá místa, white spaces)
 - jde o frekvenční kanály v rozsahu 8 MHz (Evropa, systém PAL/SECAM)
 - v USA (systém NTSC) jen 6 MHz (USA, NTSC)
 - 1 paprsek/proud v jednom 8 MHz kanále může dosáhnout přenos. rychlosti až 35.6 Mbit/s
 - lze pracovat až se 4 paprsky/proudy a využívat až 4 kanály současně, celkem max. 568.9 Mbit/s
- vyžaduje
 - znalost své polohy a „povolení“ k využití TV kanálů
 - přístupový bod si pomocí GPS zjistí svou polohu a dotáže se geolokační databáze (GDB)
 - kde se dozví, které TV kanály jsou v jeho lokalitě nevyužívané a jak dlouho
 - a dostane povolení použít konkrétní kanál na určitou dobu (v EU na 2 hodiny)
- používá tzv. **kognitivní rádio**
 - „chytré rádio“, jehož funkce jsou definovány skrze SW a lze je snadno a rychle měnit
 - a které se rychle přizpůsobuje měnícím se podmínkám
 - zde: aktuální dostupnosti využitelných kanálů, potřebě nerušit jiné přenosy,



musí provozovat „místní“ regulátor

shrnutí: generace IEEE / Wi-Fi



1. generace

- IEEE 802.11 (Prime)
 - 2,4 GHz
 - max 2 Mbit/s

2. generace

- IEEE 802.11b
 - 2,4 GHz
 - max 11 Mbit/s



3. generace

- IEEE 802.11g
 - 2,4 GHz
 - max 54 Mbit/s

4. generace

- IEEE 802.11n
 - 2,4 GHz nebo 5 GHz
 - max 600 Mbit/s

5. generace

- IEEE 802.11ac
 - 5 GHz
 - max 600 Mbit/s
- IEEE 802.11ad (WiGig)
 - 60 GHz
 - max 7 Gbit/s
- IEEE 802.11af (White-Fi)
 - 54 až 790 MHz
 - max 568.9 Mbit/s

1997

1999

2002

2007

2013/4