

Bezdrátové sítě LAN, Wireless LAN, Wi-Fi

O čem přednáška je?

2

- Obecné rysy bezdrátových sítí
- Protokoly 802.11
 - ▣ PHY, Fyzická vrstva
 - ▣ MAC, řízení přístupu
 - ▣ 802.11a/b/g/n/ac

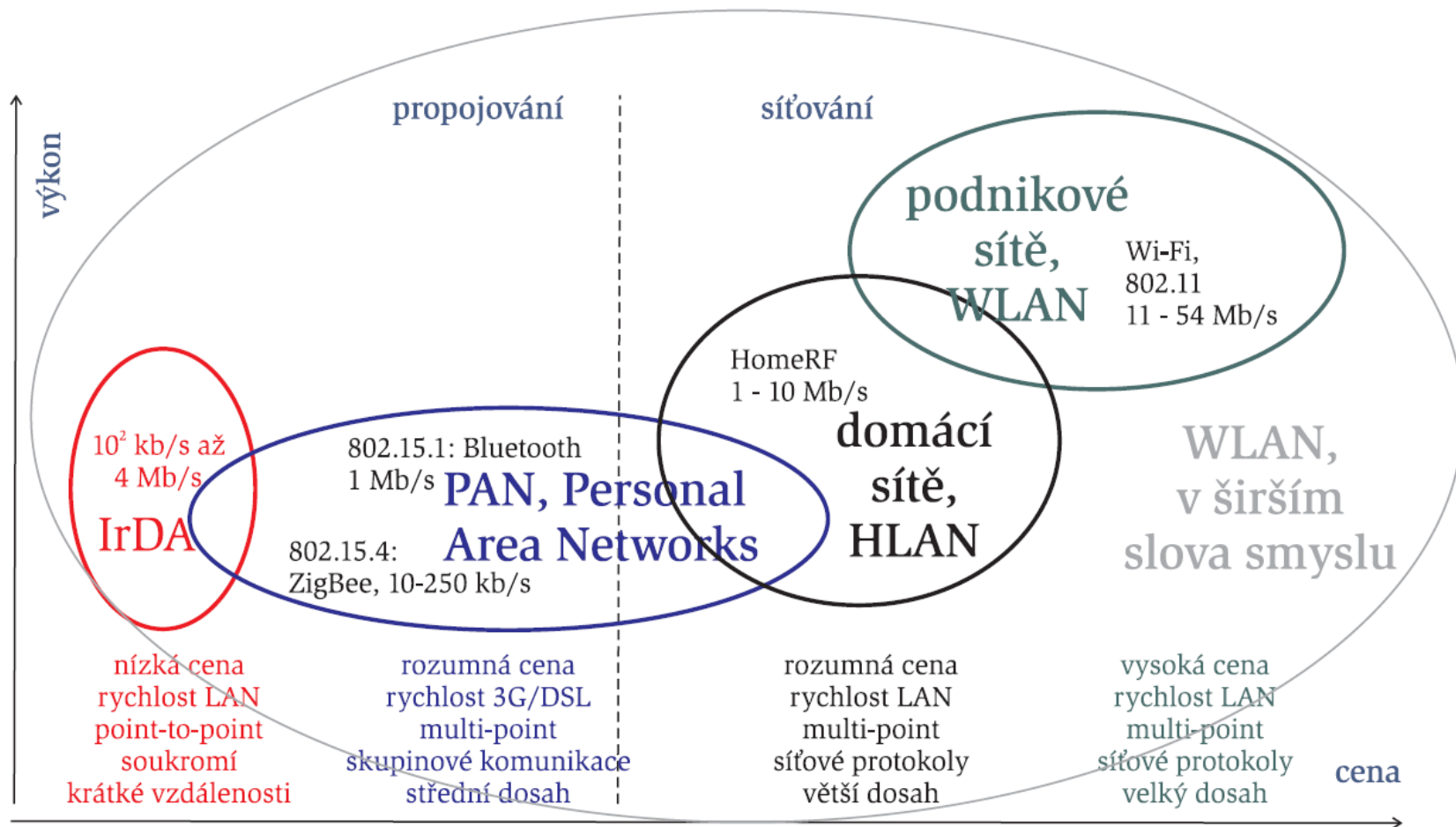
Cíle návrhu WLAN

3

- Bezdrátová síť musí umožnit globální bezešvý provoz účastníků včetně jejich automatického předávání
- Zařízení v bezdrátové síti musí být schopna pracovat na bateriové napájení po dostatečně dlouhou dobu
- Vysílací výkony musí být minimalizovány z hlediska jejich dopadu na člověka a životní prostředí
- Pásmo, ve kterém operují zařízení, musí být použitelné bez přidělování licencí
- Bezdrátová technologie musí být robustní a odolná vůči rušení
- Návrh musí počítat s jednoduchou reflexivní kooperací zařízení např. na mítincích
- Bezpečnost a soukromí dat budou součástí návrhu
- Bezdrátová síť musí být transparentní pro všechny aplikace vyšších vrstev

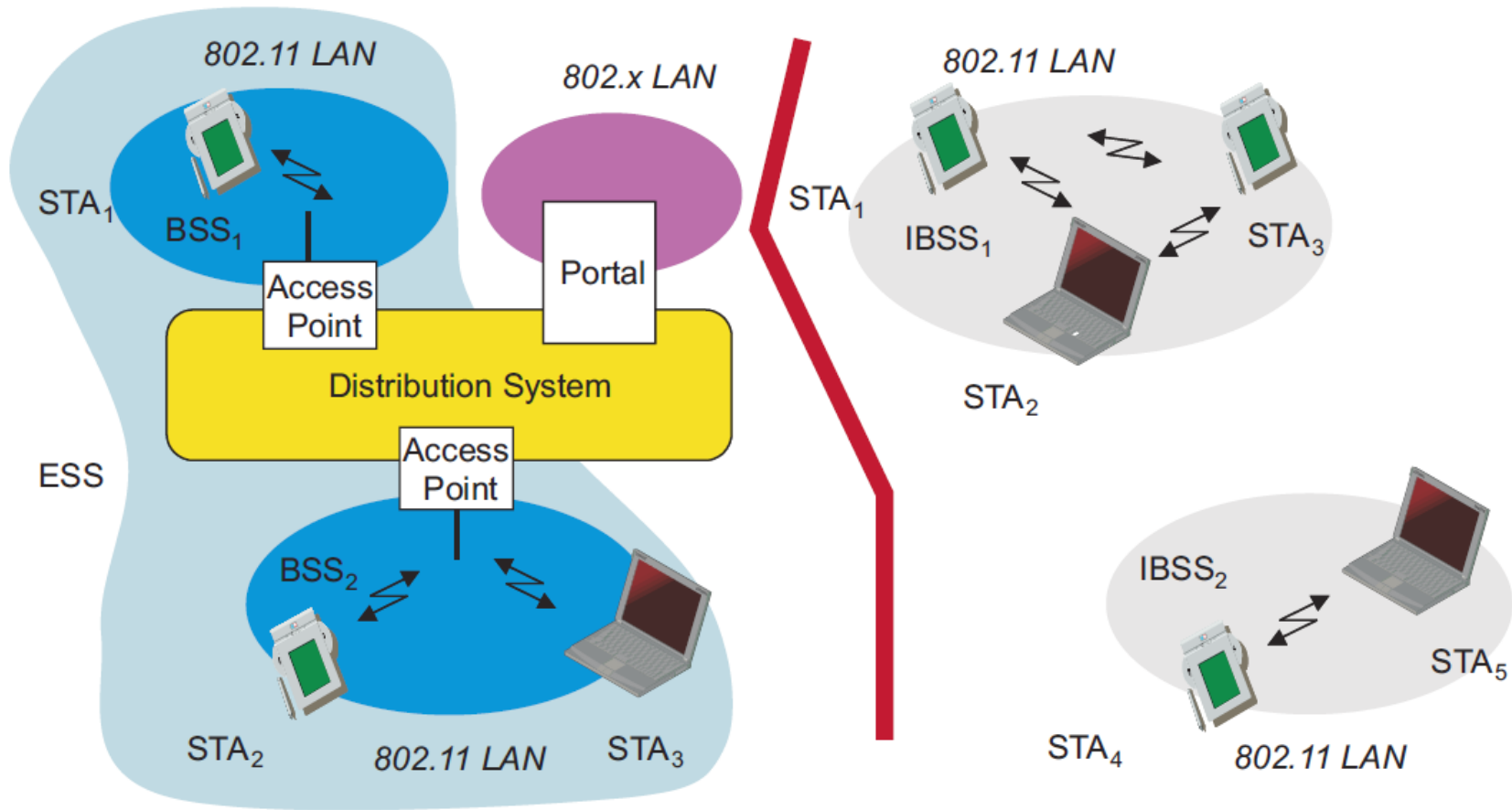
Přehled všech systémů WLAN

4



Režimy provozu

5



Služby Distribučního systému

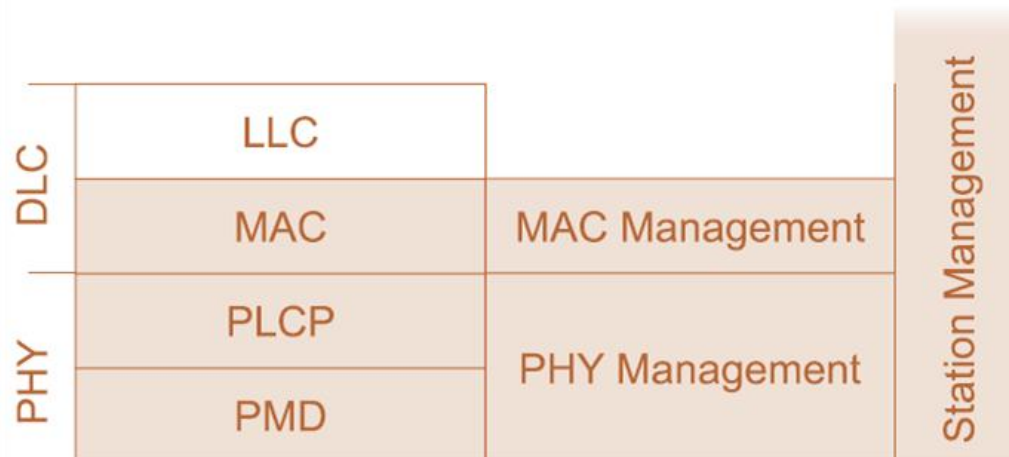
6

- Implementaci DS standard 802.11 nedefinuje
- **Station Services (SS)**
 - ▣ Authentication
 - ▣ Deauthentication
 - ▣ Privacy
 - ▣ Data Delivery
- **Distribution Services (DS)**
 - ▣ Association
 - ▣ Disassociation
 - ▣ Reassociation
 - ▣ Distribution
 - ▣ Integration

802.11 – vrstvy a funkce

7

- **PMD** (Physical Medium Dependent)
 - ▣ Modulace, kódování
- **PLCP** (Physical Layer Convergence Protocol)
 - ▣ Detekce nosné frekvence
- **MAC** (Medium Access Control)
 - ▣ Přístup k médiu, fragmentace, šifrování
- **MAC Management**
 - ▣ Synchronizace, roaming
- **PHY Management**
 - ▣ Výběr kanálů



802.11 – Physical Layer, původní definice

8

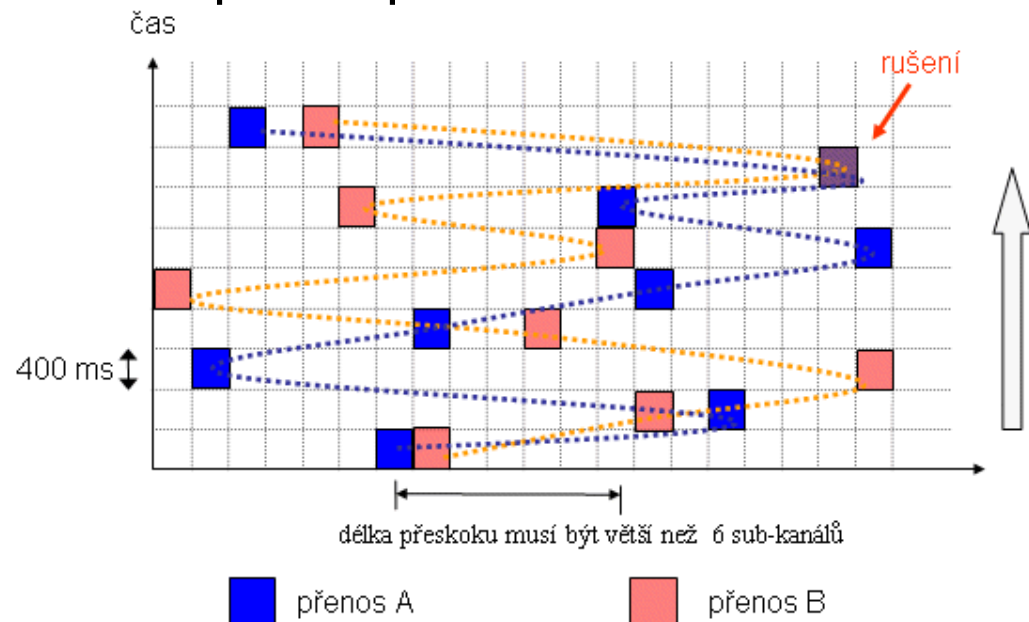
- Původní verze 802.11 definuje dvě různé metody modulace
- **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum)
 - ▣ náhodné přeskokování po kanálech
 - ▣ jen v první verzi 802.11, dnes použitelné jen jako rušička
- **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum)
 - ▣ použito v 802.11b
 - ▣ jeden bit se kóduje do sekvence bitů

FHSS

Frequency Hopping Spread Spectrum

9

- Úzkopásmový vysílač/přijímač s centrální frekvencí přeskakující v rozsahu 76 MHz, celkem 75 kanálů
- Interference a degradace výkonu na konkrétní frekvenci ovlivní pouze malou část přenosu
- Vysílač a přijímač si dohodnou jedinečný přeskakovací vzorek, data se vysílají relevantní posloupností kanálů
- Pravděpodobnost shody současně používaných vzorků je minimální



FHSS

Frequency Hopping Spread Spectrum

10

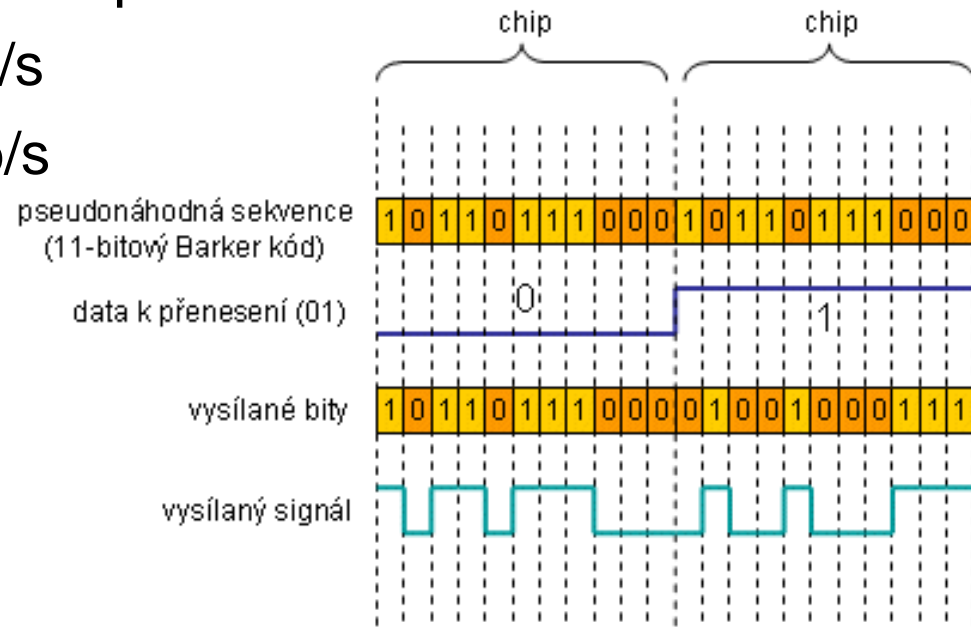
- Šířka kanálu 1 MHz omezuje rychlost na 2 Mb/s
- Modulace DBPSK pro 1 Mb/s
- Modulace DQPSK pro 2 Mb/s
- V rámci BSS se volí 1 ze 3 přeskokových skupin kanálů
 - 0,3,6,9... nebo 1,4,7,10... nebo 2,5,8,11...
 - To umožňuje provozovat v jednom místě 3 sítě
 - Propustnost oblasti je 6 Mb/s

DSSS

Direct Sequence Spread Spectrum

11

- Pásmo se dělí na 14 kanálů po **22 MHz**
- Rozprostření v kanále – kompenzace šumu
- Rozprostřovací posloupnost – Barkerův kód
- Náhrada jednoho bitu tzv. **chipem**
 - 10110111000 pro 0, inverze pro 1
- Modulace DBPSK pro 1 Mb/s
- Modulace DQPSK pro 2 Mb/s
- Preambule a záhlaví se vysílá vždy rychlostí 1Mb/s

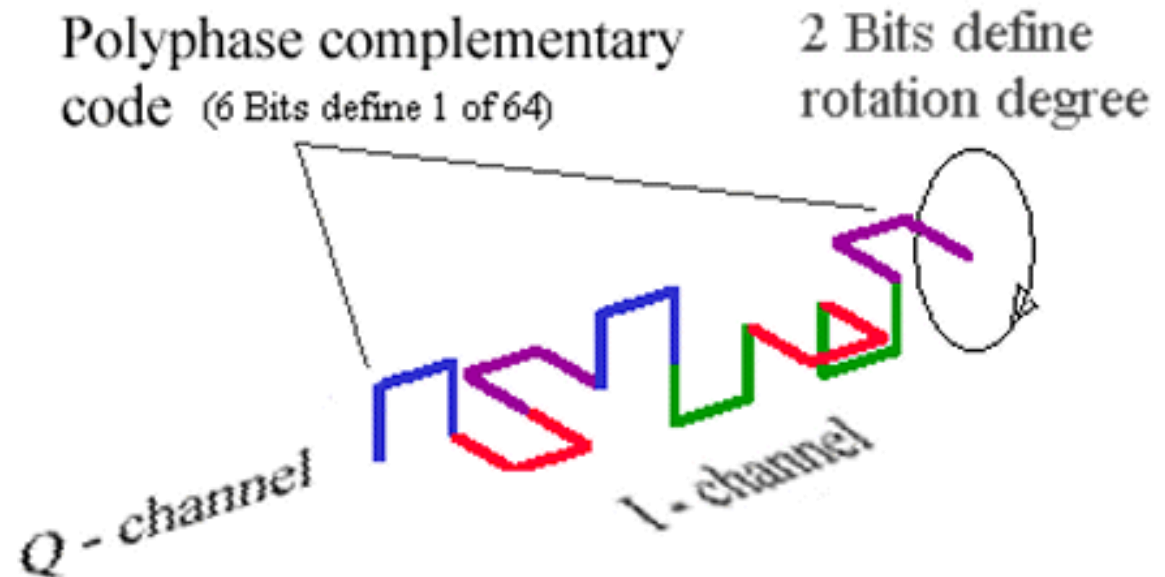


Vylepšení DSSS – CCK

Complementary Code Keying

12

- Zvýšení přenosové rychlosti bez zvýšení modulační rychlosti
 - ▣ Vstupní proud se rozdělí na **6bitové** symboly
 - ▣ Přidají se **2 bity** definující rotaci znaku
 - ▣ Každý bit **8bitového** znaku je modulován BPSK/QPSK modulací
 - ▣ Rozbití stejných posloupností - scrambler x^7+x^4+1

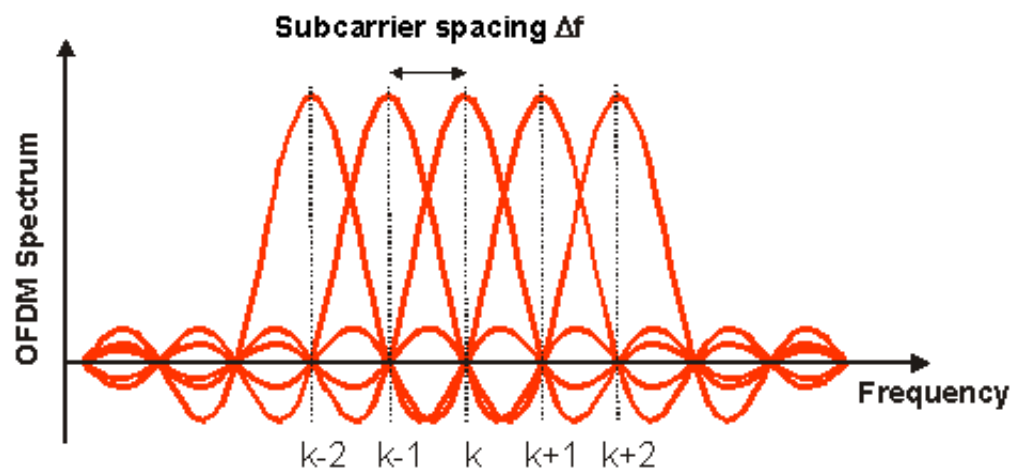


Modulace OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing

13

- Frekvenční pásmo je rozděleno na subpásma
 - ▣ Každá část má vlastní nosnou frekvenci, na níž je modulována část přenášených dat
- 802.11ag dělí **20 MHz** pásmo na 52 subpásem
 - ▣ Jen 48 z nich používá pro přenos dat
 - ▣ Subpásma se překrývají (u FDM jsou oddělené)
 - ▣ Maximum každé nosné se překrývá s minimy ostatních
 - ▣ Neovlivňují se



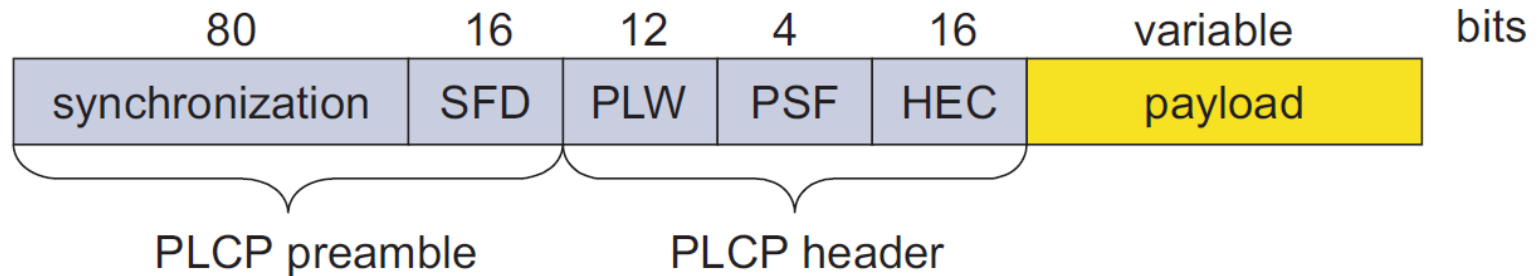
Porovnání DSSS a OFDM

14

- DSSS je odolnější proti rušení
 - ▣ Jeden bit je přenášen jako víc bitů, i když se několik z nich poškodí, lze původní bit rekonstruovat
 - ▣ OFDM zabere skutečně celý kanál (nosných frekvencí je mnoho), DSSS používá jednu nosnou frekvenci, nejvyšší výkon je uprostřed kanálu, směrem k okrajům klesá
- Vyšší přenosová rychlost OFDM vyžaduje vyšší výkon
 - ▣ Větší odstup signálu od šumu (Shannonův teorém)
 - ▣ Asi 10dB, a přesně o tolik víc je povoleno v pásmu 5 GHz

Formát rámce PHY při používání FHSS

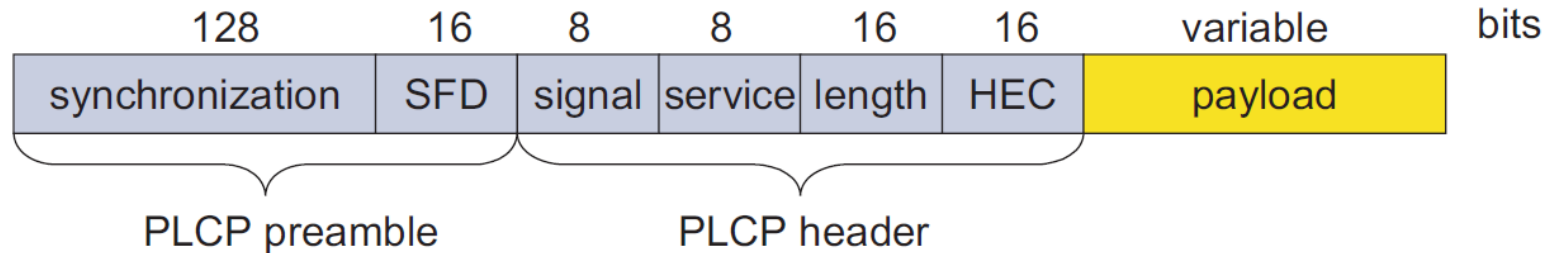
15



- synchronizace — vzorek 010101
- **SFD** (*Start Frame Delimiter*) – 0000110010111101
- **PLW** (*PLCP PDU Length Word*) –
 délka dat (*payload*) vč. 32 b CRC, $PLW < 4096$
 PLCP – *Physical layer Convergence Protocol*
- **PSF** (*PLCP Signaling Field*) – data (1 nebo 2 Mb/s)
- **HEC** (*Header Error Check*) – CRC s $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

Formát rámce PHY při používání DSSS

16



- synchronizace — detekce energie, kompenzace posunu frekvence, nastavení zisku, synchronizace
- **SFD** (*Start Frame Delimiter*) – 1111001110100000
- **Signal** – rychlost přenosu dat (*payload*)
(0A: 1 Mb/s DBPSK; 14: 2 Mb/s DQPSK)
- **Length** – délka (*payload*)
- **Service** – rezerva, 00: rámec vyhovující 802.11
- **HEC** (*Header Error Check*) – ochrana polí *signal*, *service*, *length* pomocí CRC s $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

802.11 MAC

Přístupové metody

17

- Existují dvě metody přístupu na médium
- **Asynchronous Data Service – ADS**
 - Povinná služba – výměna dat na bázi best-effort
 - Doručení dat bez záruky
 - Implementace pomocí Distributed Coordination Function (**DCF**)
- **Time-Bounded Service – TBS**
 - Volitelná služba – přenos hlasu a videa
 - Implementace pomocí Point Coordination Function (**PCF**)
 - Pouze v infrastrukturní síti
 - Idea řízení – vyzývání

802.11 MAC

CSMA/CA

18

- Nedeterministická distribuovaná metoda CSMA/CA
 - ▣ přenosové médium je sdílené, vysílat mohou všichni
 - budou-li vysílat dva najednou, data se poškodí
 - nelze detekovat kolizi jako na Ethernetu
 - ▣ není garantováno, za jak dlouho bude paket odeslán
 - založeno jen na statistice a pravděpodobnosti
 - ▣ AP komunikaci neřídí, je s klienty rovnocenné
 - ▣ Předpokládá se, že stanice slyší vysílání všech ostatních
 - to u našich Wi-Fi sítí vždy neplatí!
 - ▣ snaží se zabránit kolizím, ale není 100%
 - v případě kolize je rámeček posílán znovu

802.11 MAC

Základní verze CSMA/CA

19

- Na vyslaný rámec musí vysílající stanice získat ACK od přijímající stanice
- Vysílač chce vyslat data
 - ▣ Pokud je médium volné po **dostatečnou** dobu, odmlčí se na **jistou** dobu a pokud je médium pořád volné, odešle data
- Pokud vysílač nepřijme ACK do limitu, tak data zopakuje
- **Dostatečná** doba je definována **typem** rámce
- **Jistá** doba se vypočítá pomocí **Exponencial Backoff algoritmu**

802.11 MAC

Mezirámcové mezery

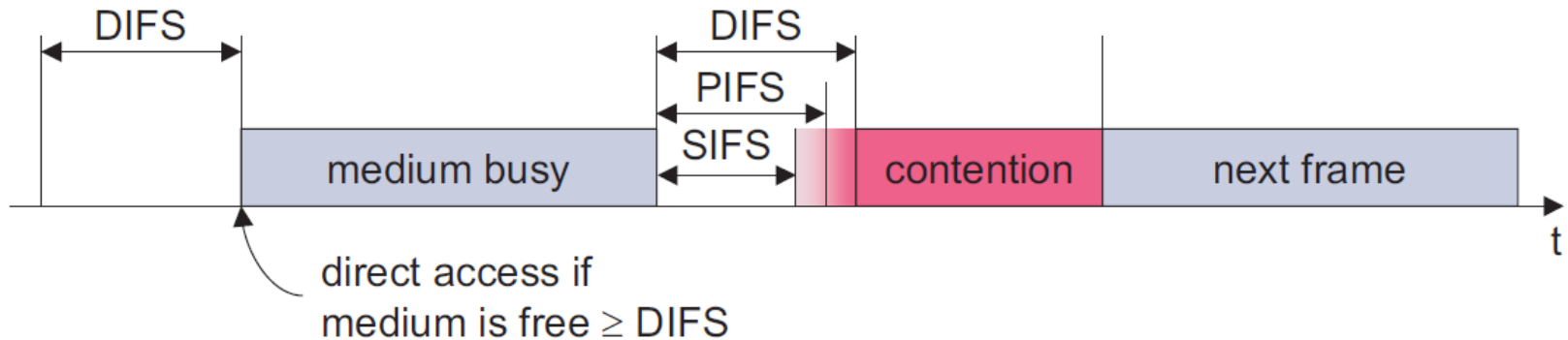
20

- Právo vysílat se odvozuje od **délky doby čekání** před pokusem o získání práva k přístupu k médiu
- Zda je médium volné se prokáže trváním klidu v médiu po stanovenou dobu IFS (**Inter Frame Space**)
 - ▣ Vysílání řídicích rámců má přednost před daty, IFS před jejich vysíláním musí být kratší
- Náhodnost doby je definována jako násobek časového dílu
 - ▣ Je odvozený od doby šíření signálu médiem
 - ▣ **DSSS = 20 μ s, FHSS = 50 μ s**

802.11 MAC

Doby čekání

21



- **SIFS** (Short Inter Frame Space) – řídicí funkce
 - ▣ DSSS = 10 μ s, FHSS = 28 μ s
- **PIFS** (PCF IFS) – režim vyzývání
 - ▣ SIFS + 1 časový díl
- **DIFS** (DCF IFS) – CSMA/CA
 - ▣ SIFS + 2 časové díly

802.11 MAC

Exponencial Backoff algoritmus

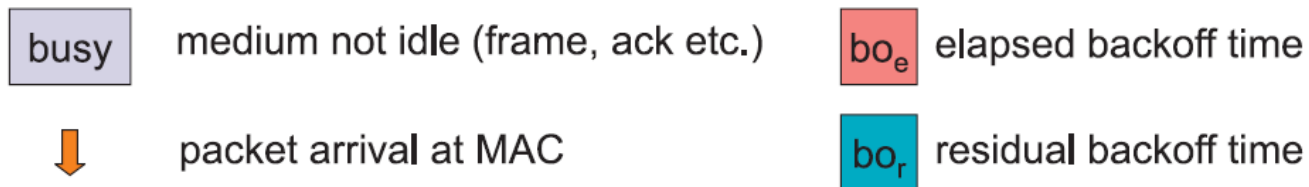
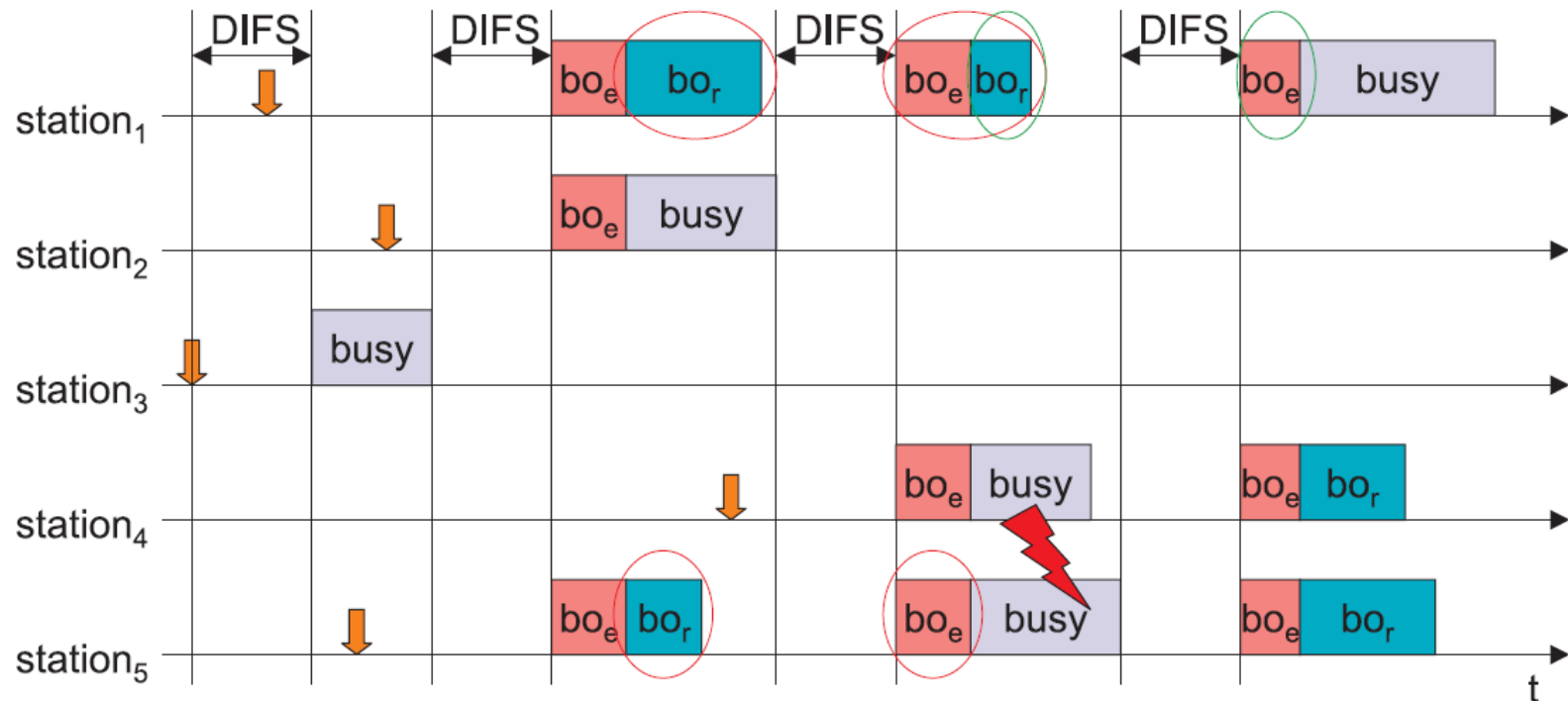
22

- Aby nedošlo k hromadnému vysílání všech stanic po uvolnění média, počká stanice ještě **jistou** dobu
- Stanice vygeneruje náhodné číslo z intervalu **0-CWmin** a čeká tolik slotů
 - ▣ Pokud bylo po tu dobu pásmo volné, začne vysílat
 - ▣ Dojde-li ke kolizi, čas se zvyšuje exponenciálně až do **CWmax**
 - $CW_{new} = (CW_{old} + 1) * PF - 1$, PF (Persistence Factor = 2)
 - ▣ Začne-li vysílat někdo jiný, bude pak čekat jen zbytek času
 - ▣ Hodnoty jsou závislé na fyzické vrstvě

802.11 MAC

Exponential Backoff algorithm

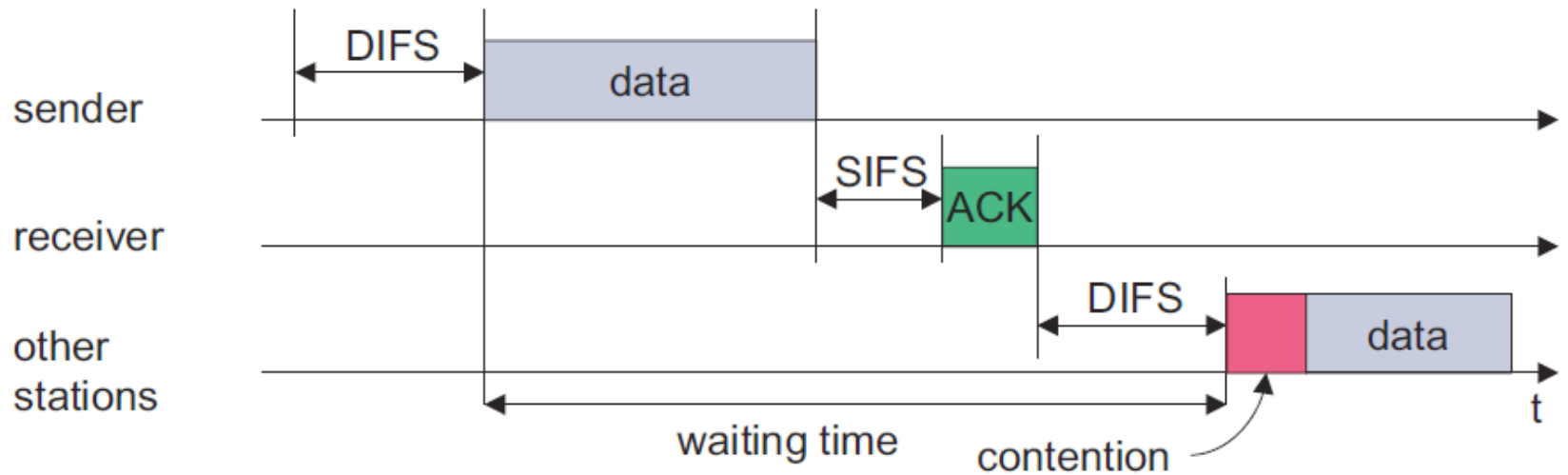
23



802.11 MAC

Základní verze CSMA/CA

24



802.11 MAC

CSMA/CA + RTS/CTS

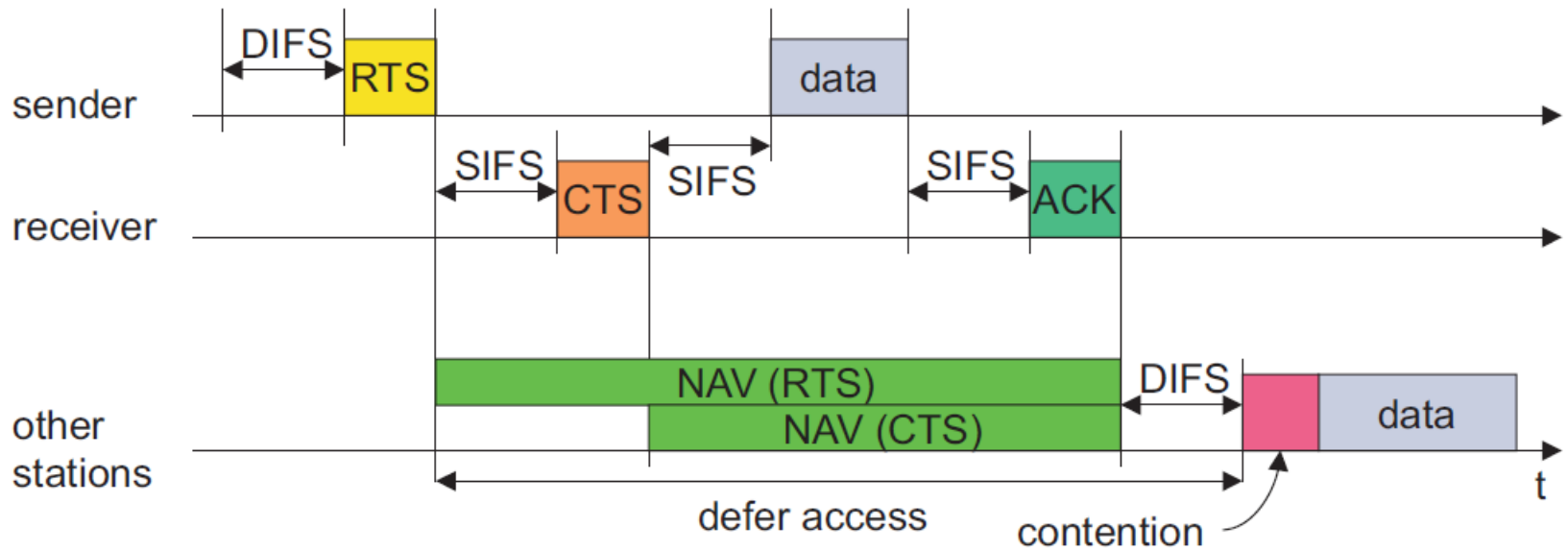
25

- Řešení problému skrytých terminálů
 - ▣ 2 stanice v 1 oblasti slyší AP, ale ne sebe navzájem
- Stanice nejdříve vyšle rámeček RTS (**Request To Send**), ten přijme AP
- Stanice čeká na potvrzení od AP CTS (**Clear To Send**)
 - ▣ Více stanic může vyslat RTS současně
 - ▣ CTS přijmou všechny stanice
 - ▣ Stanice indikovaná v CTS zahájí přenos
 - ▣ Ostatní stanice se odmlčí na dobu **NAV** stanovenou v CTS

802.11 MAC

CSMA/CA + RTS/CTS

26



802.11 MAC

PCF

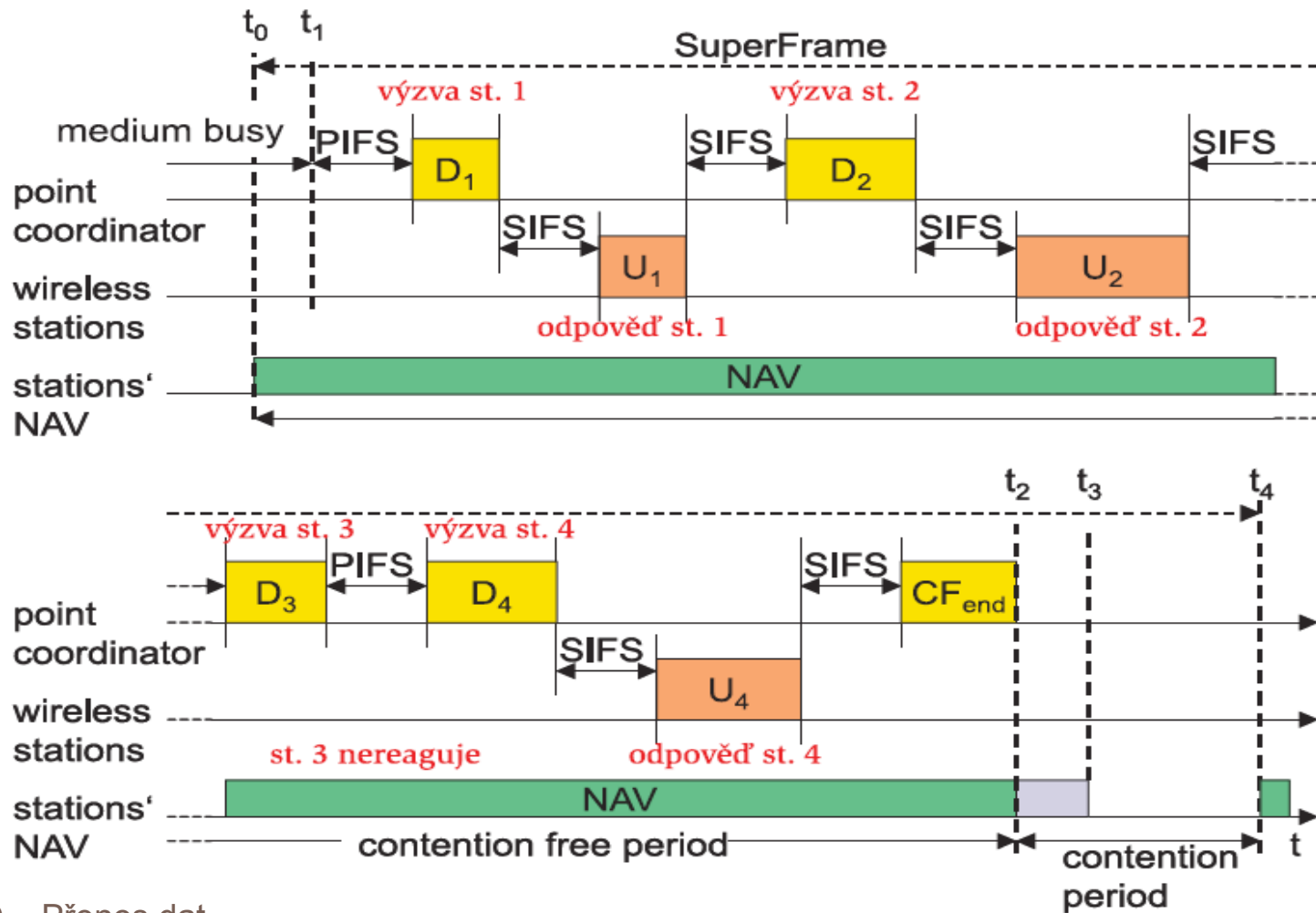
27

- Centralizovaná metoda řízení
- CP (**Contention Period**) – DCF přístup
- CFP (**Contention Free Period**) – PCF přístup
 - ▣ Je přímo určeno s právem vysílat
 - ▣ Ostatní mají vysílat zakázáno

802.11 MAC

PCF

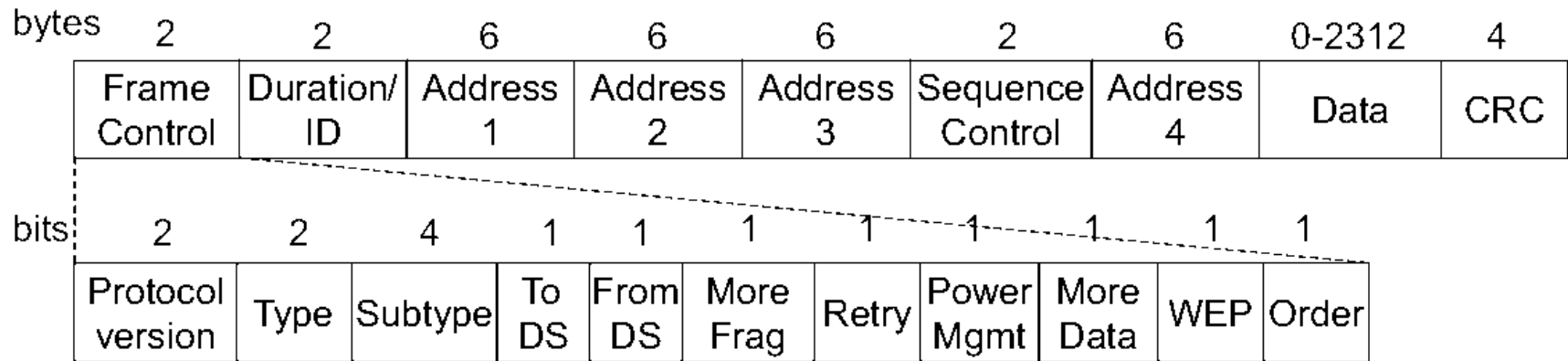
28



802.11 MAC

Formát rámce

29



- Typy rámců – řídicí, správní, datové
- Pořadové čísla – důležité při ztrátě dat
- Adresy – rozlišení směru příjmu
- Ostatní – doba vysílání, kontrolní součet

802.11 MAC Adresy

30

Scénář	k DS	z DS	Adresa1	Adresa2	Adresa3	Adresa4
Ad-hoc síť	0	0	DA	SA	BSSID	-
Infrastrukturní síť, z AP	0	1	DA	BSSID	SA	-
Infrastrukturní síť, k AP	1	0	BSSID	SA	DA	-
Infrastrukturní síť, uvnitř DS	1	1	RA	TA	DA	SA

IEEE 802.11b

31

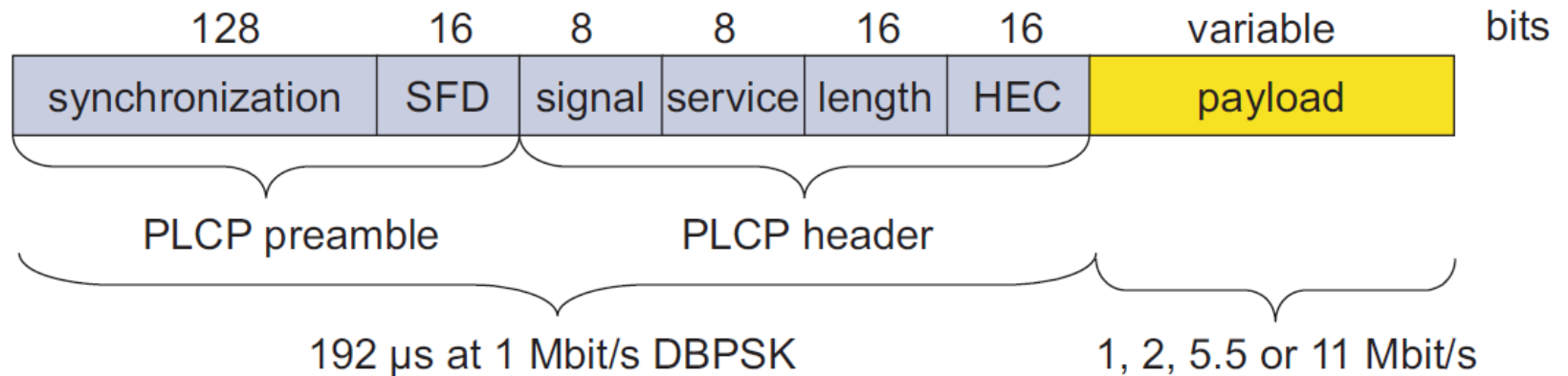
- 2,400 – 2,4835 GHz (83,5 MHz)
 - ▣ max. výkon 100 mW EIRP
 - ▣ 13 kanálů s odstupem 5 MHz
 - ▣ kanál má šířku 22 MHz
- Rychlost 1 a 2 Mb/s – DSSS
- Rychlost 5,5 a 11 Mb/s - CCK
- 30 – 40 % kapacity tvoří režie
 - ▣ CSMA/CA + RTS/CTS

IEEE 802.11b

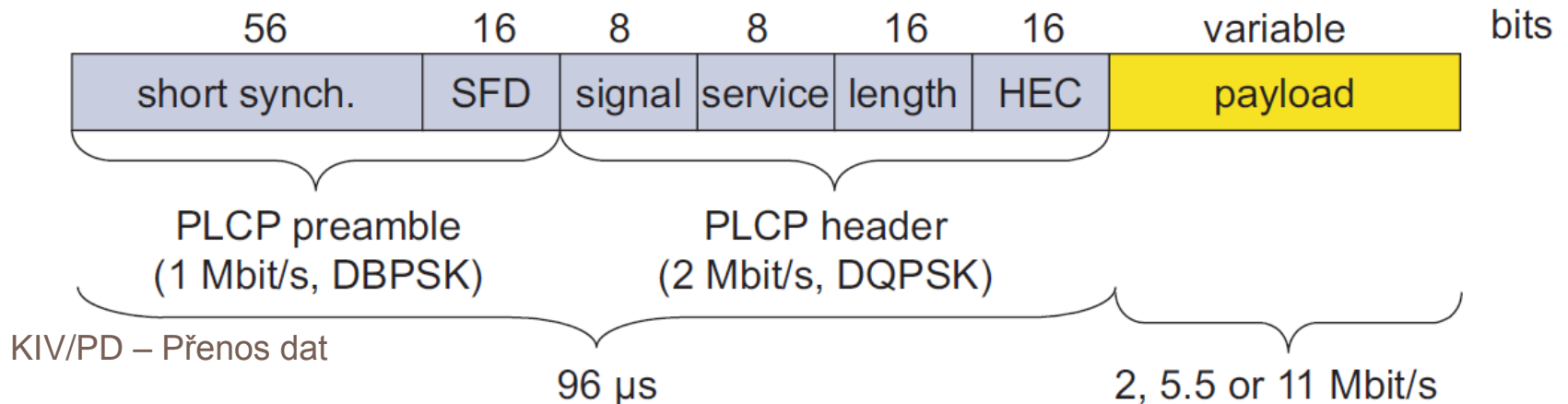
Formát rámce

32

Long PLCP PDU format



Short PLCP PDU format (optional)



IEEE 802.11a

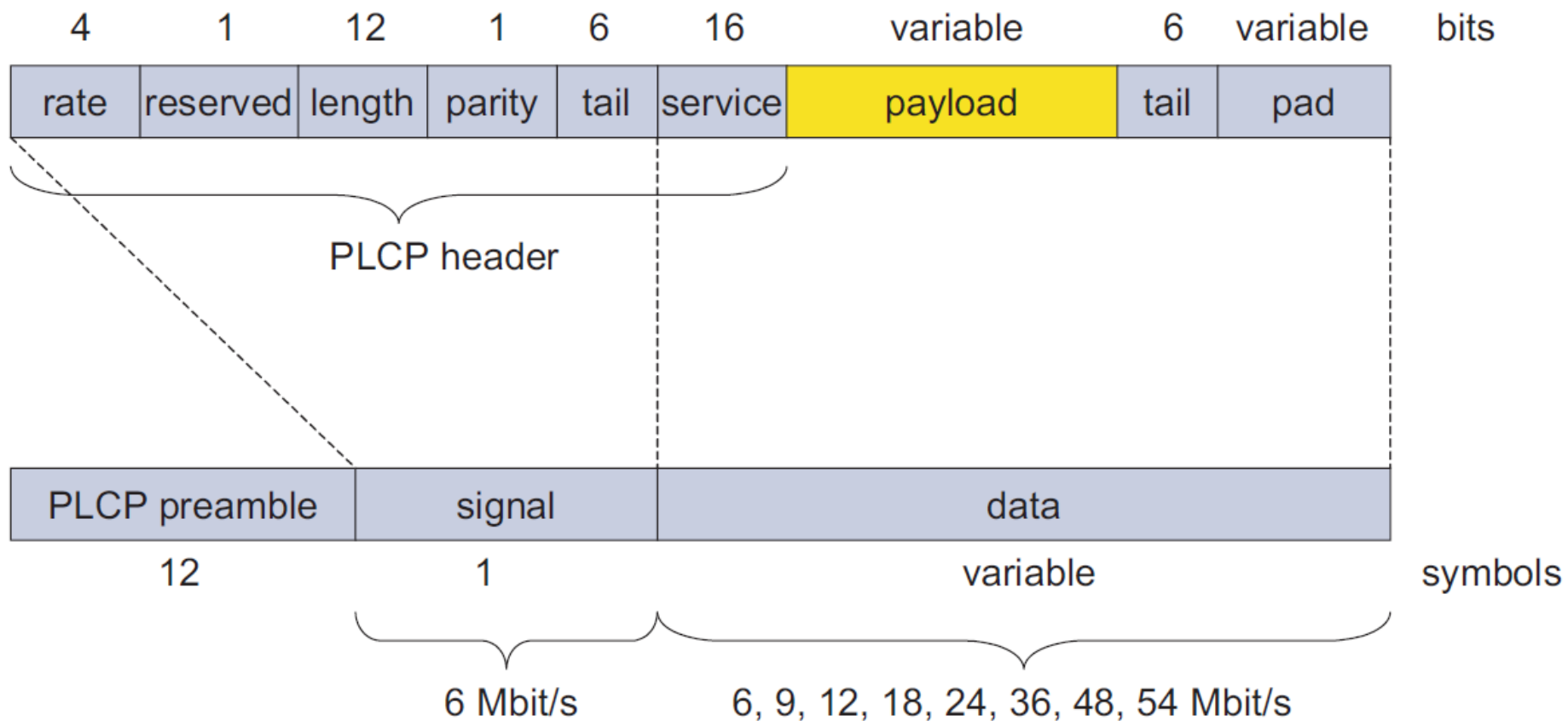
33

- 5,150 – 5,875 GHz (725 MHz)
 - ▣ **UNII lower band** - 5150-5250 MHz
 - použití pouze uvnitř budov, maximální vyzářený výkon je **200 mW EIRP**
 - ▣ **UNII middle band** - 5250-5350 MHz
 - použití pouze uvnitř budov, maximální vyzářený výkon je **200 mW EIRP**
 - automatická regulace výkonu na polovinu
 - vyhnutí se frekvenci meteorologického radaru
 - ▣ **UNII middle band extended** - 5470-5725 MHz
 - použití uvnitř i vně budov, maximální vyzářený výkon je **1 W EIRP**
 - automatická regulace výkonu na polovinu
 - vyhnutí se frekvenci meteorologického radaru
 - ▣ **UNII upper band** - 5725-5875 GHz
 - použití uvnitř i vně budov, maximální vyzářený výkon je **25 mW EIRP**
- Kanály s odstupem 20 MHz
- Rychlosti 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, 6 Mb/s
- OFDM + BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM

IEEE 802.11a

Formát rámce

34



IEEE 802.11g

35

- 13 kanálů s odstupem 5 MHz
 - ▣ Šířka kanálu 22 MHz (DSSS) nebo 20 MHz (OFDM)
- Max. rychlost 54 Mb/s
 - ▣ OFDM + 16-QAM - 54, 48, 36, 24 Mb/s
 - ▣ OFDM + QPSK - 18, 12 Mbit/s
 - ▣ OFDM + BPSK - 9, 6 Mbit/s
 - ▣ DSSS 11, 5,5, 2, 1 Mbit/s
- Zachování kompatibility s 802.11b
- Možné zrychlení pomocí CTS-to-self (vysíláno 1Mb/s pomocí DSSS)

Stručná historie 802.11n

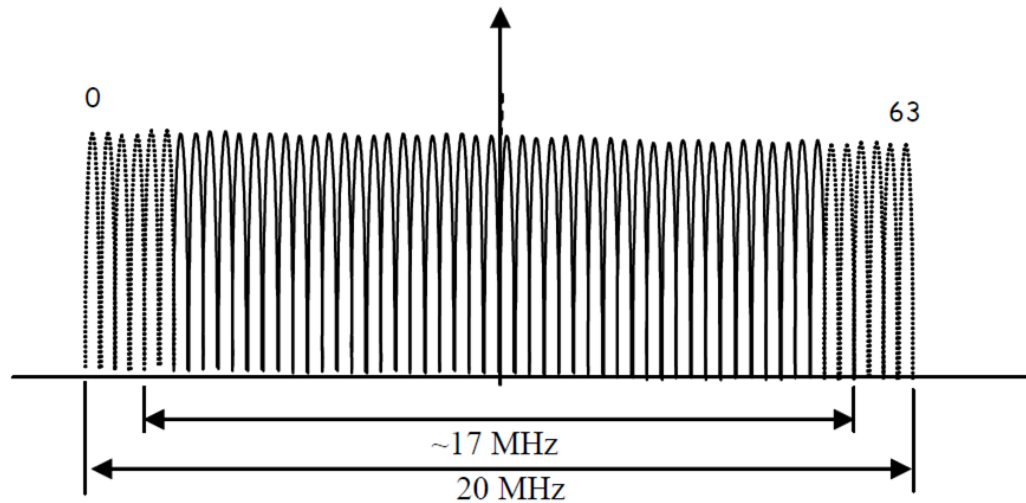
36

- 2004 – Pracovní skupina 802.11 TGn
 - ▣ Cíl: 270 Mbps přenosová rychlost za použití 2 MIMO spatial streams
- 2005 – Konkurenční návrhy skupin TGn, WWiSE a MITMOT se spojují
 - ▣ Výhled na dokončení standardu Q2 2009
- 2006 – Draft 1.0
 - ▣ 12 000 připomínek, není schválen k postupu
- 2007 – Draft 2.0
 - ▣ Schválen k postupu
 - ▣ Wi-Fi Alliance certification program
- Listopad 2008 – Draft 7.0
- Březen 2009 – Draft 8.0
- Duben 2009 – Draft 9.0
- Květen 2009 – Draft 10.0
- Říjen 2009 – vydán nový standard **IEEE 802.11n-2009**

Jak dosáhnout 600 Mbps

Úprava OFDM – více subpásem

37



- 802.11g OFDM rozděluje 20MHz kanál na 48 datových subpásem, výsledná rychlost je 54 Mbps
- 802.11n používá **52 datových subpásem**
- Maximální přenosová rychlost se zvýší na **58,5 Mbps**

Jak dosáhnout 600 Mbps Forward Error Correction

38

- **Forward Error Correction** (FEC) je mechanismus, který zavádí do vysílaných dat redundanci, která umožňuje v případě částečného poškození dat jejich rekonstrukci
- 802.11g používá pro nejvyšší rychlost FEC schéma 3:4, tzn. pro 3 datové bity vyše 4 s redundancí
- 802.11n používá schéma 5:6, tzn. na každých 5 datových bitů vyše 6 s redundancí
- 802.11n používá **Low Density Parity Check** (LDPC)
 - ▣ starý 50 let, NP-úplný problém, dosud nepoužívaný
 - ▣ velká výpočetní složitost, používají se jednodušší aproximace
- Maximální přenosová rychlost se zvýší na **65 Mbps**

Jak dosáhnout 600 Mbps

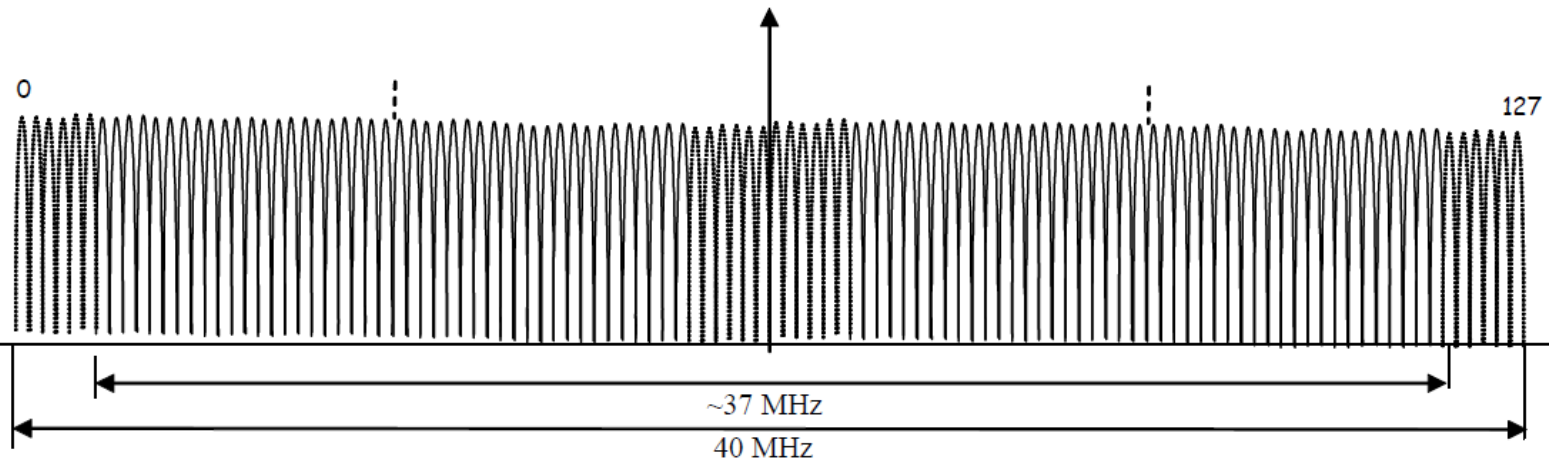
Úprava OFDM – guard interval

39

- Mezi vysíláním jednotlivých symbolů v OFDM se dělají **ochranné intervaly** (guard intervals), aby k příjemci v této pauze stihly doputovat různé odrazy, které se ignorují (nebo využívají v případě MIMO)
- 802.11a má tento guard interval 800 ns
- 802.11n zavádí volitelně možnost tento interval zkrátit na **400 ns**
- Maximální přenosová rychlost se zvýší na **72,2 Mbps**

Jak dosáhnout 600 Mbps 40 MHz kanály

40

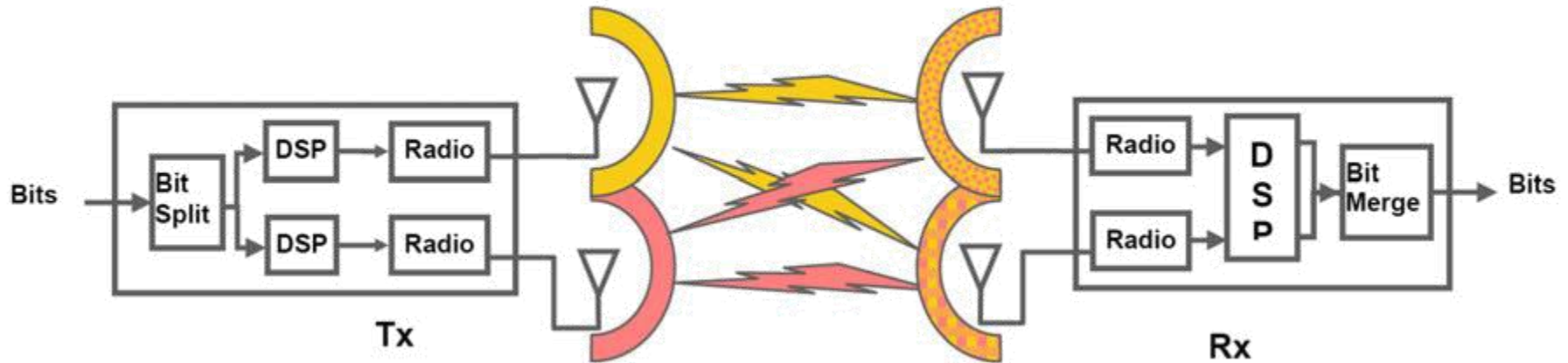


- Zatím se stále využívaly 20MHz kanály, které dále dělí pomocí OFDM 52 datových dílčích částí
- 802.11n umožňuje využít dva přilehlé 20MHz kanály, čímž vytvoří **jeden 40 MHz kanál**, který pak pomocí OFDM rozdělí na 108 datových dílčích částí
- Maximální přenosová rychlost se zvýší na **150 Mbps**

Jak dosáhnout 600 Mbps

MIMO – Spatial multiplexing (1)

41

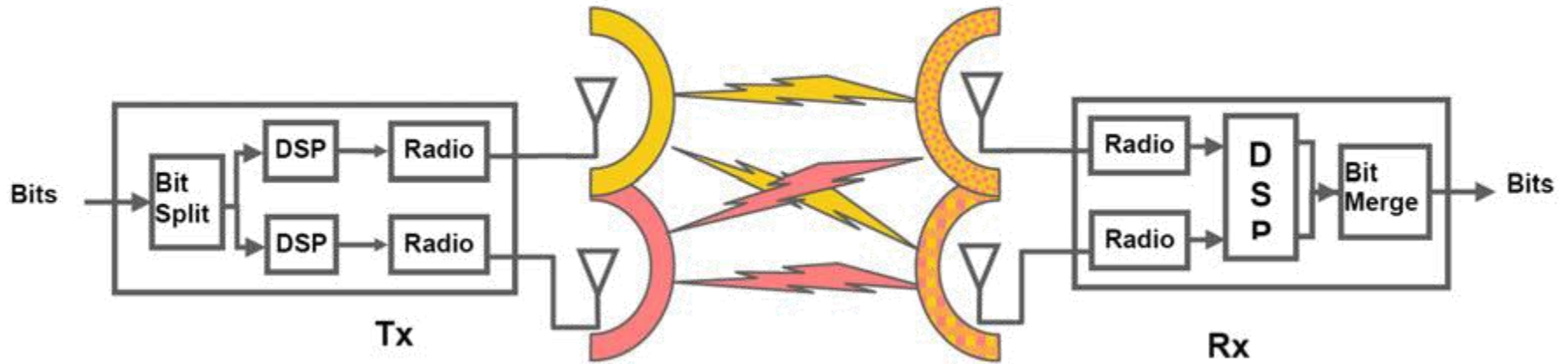


- Spatial multiplexing využívá MIMO k vyslání **více nezávislých signálů** v jednom frekvenčním kanálu
- Každá anténa vysílá jiný signál s jinou „prostorovou signaturou“, příjemce je pak schopen tyto signály opět rozlišit
- Gerard. J. Foschini - [Bell Laboratories Layered Space-Time \(BLAST\)](#)

Jak dosáhnout 600 Mbps

MIMO – Spatial multiplexing (2)

42

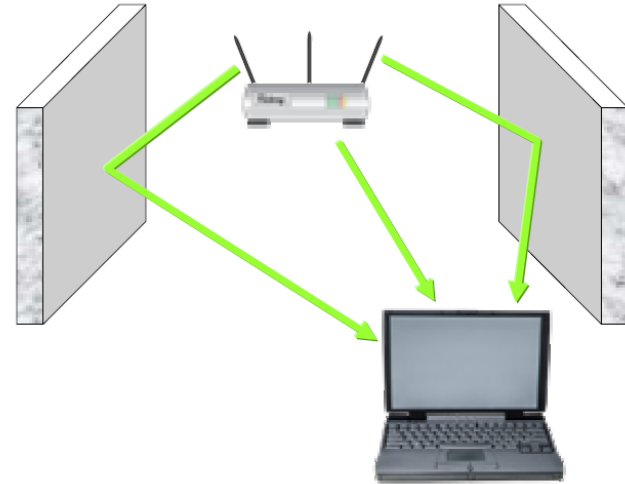
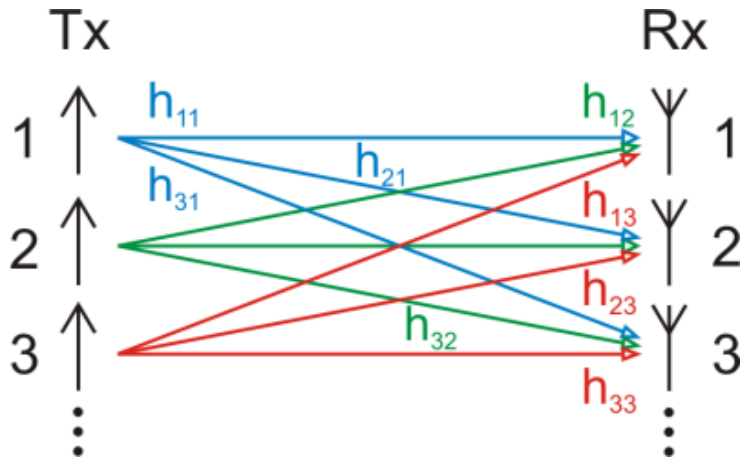


- Možnosti daného zařízení se dají označit notací **AxB:C**
- **A** – počet vysílacích antén (modulů)
- **B** – počet přijímacích antén (modulů)
- **C** – počet nezávislých signálů (spatial streams), které umí zařízení zpracovat

Jak dosáhnout 600 Mbps

MIMO – Spatial multiplexing (3)

43

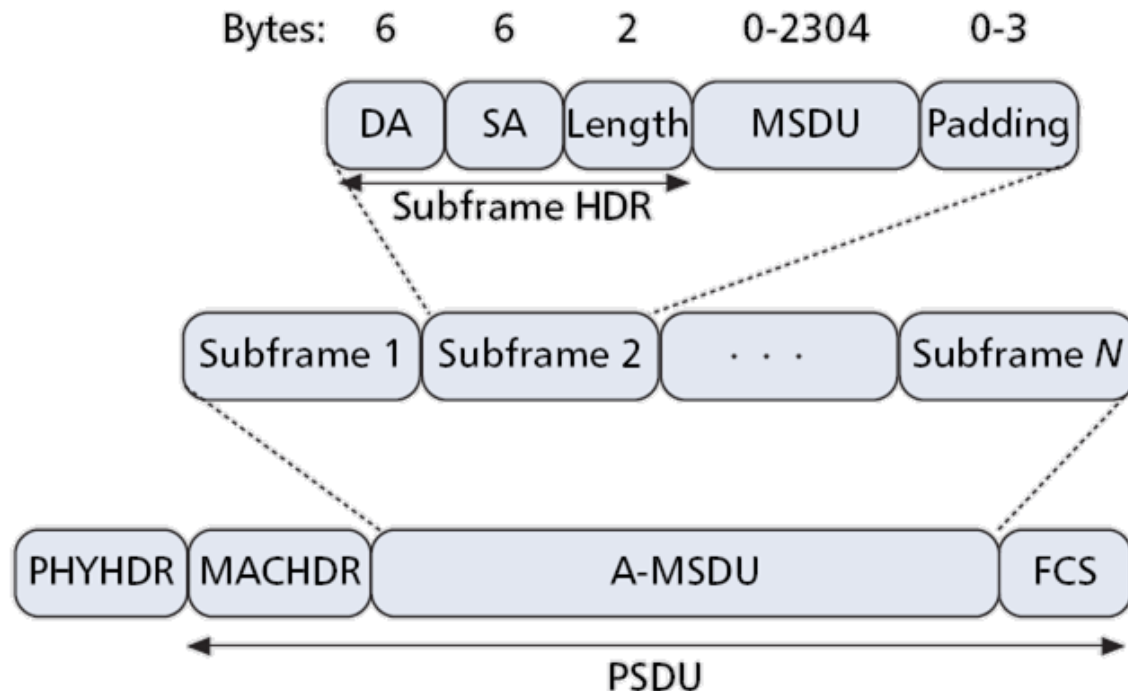


- Dnešní 802.11n zařízení zvládají 4x4:3, tedy maximálně 3 nezávislé signály, na čtyřech anténách.
- Odtud dnešní maximální přenosová rychlost 450 Mbps
- 802.11n umožňuje až 4x4:4
- Maximální přenosová rychlost se zvýší až na 600 Mbps

Agregace rámců

MAC Service Data Units (MSDU)

44

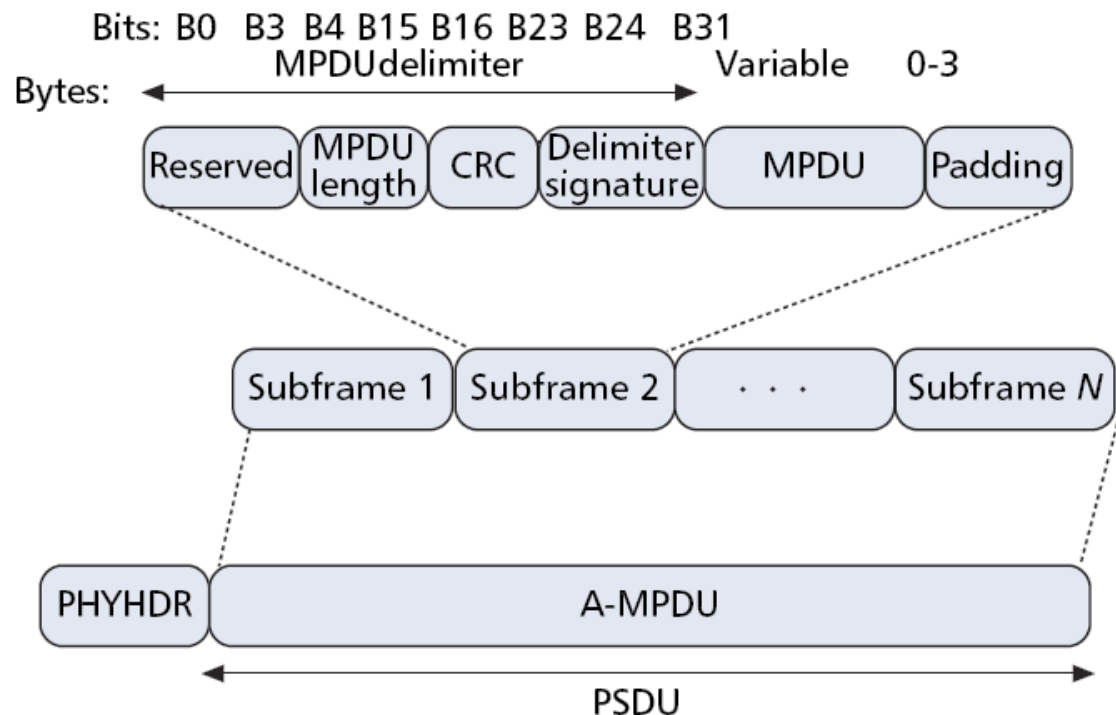


- **Agregace ethernetových rámců** snižuje overhead a zvyšuje propustnost pro uživatele (TCP/IP)
- Nutnost stejné cílové adresy a QoS
- Délka rámce až 8 kB

Agregace rámců

MAC Protocol Data Units (MPDU)

45

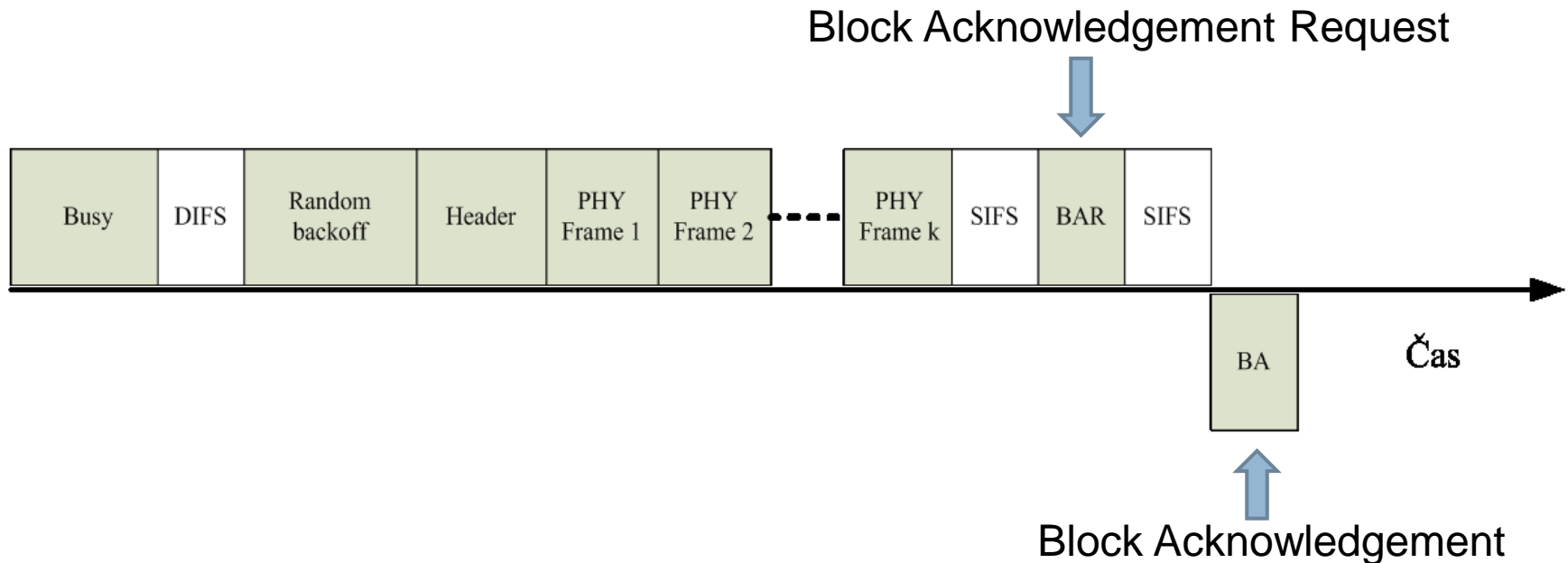


- Agregace 802.11 rámců do 802.11n rámce
- Nutnost stejné cílové adresy a QoS
- Délka rámce až 64 kB

Agregace rámců

MPDU Block Acknowledgement

46



- MPDU agregace vyžaduje použití **Block Acknowledgement** (BlockAck), který byl zaveden v 802.11e a vylepšen v 802.11n

Space-Time Block Coding (STBC)

47

- Malá zařízení jako mobilní telefony, PDA... mají výjimku, mohou mít jednu anténu
 - ▣ ostatní 802.11n zařízení musí mít nejméně 2
 - ▣ snižování spotřeby energie
 - ▣ ztrácí se výhody více antén
 - ▣ pouze jeden spatial stream
- STBC MIMO technika umožňuje využít i v tomto případě výhody více antén na AP
 - ▣ vyšší dosah
 - ▣ vyšší rychlost v závislosti na vzdálenosti

Zpětná kompatibilita

48

- Koexistence se staršími zařízeními 802.11abgh se řeší na fyzické a MAC vrstvě
- **Fyzická vrstva**
 - **Mixed Mode** (L-SIG TXOP Protection): Každý 802.11n přenos je vložen do 802.11a nebo 802.11g přenosu
 - Pro 20 MHz kanály stačí pro ochranu před 802.11a, 802.11g
 - Zařízení 802.11b navíc potřebují ochranu pomocí CTS
 - Přenosy ve 40 MHz kanálech v přítomnosti klientů 802.11a nebo 802.11g vyžadují ochranu pomocí CTS na obou 20 MHz polovinách
- **MAC Vrstva**
 - **RTS/CTS domluva** nebo vyslání CTS rámce rychlostmi odpovídajícími 802.11a nebo 802.11g zajistí ochranu následného 802.11n přenosu
- I s těmito opatřeními je velký rozdíl v propustnosti mezi „**green-field**“ a „**mixed-mode**“ sítí