

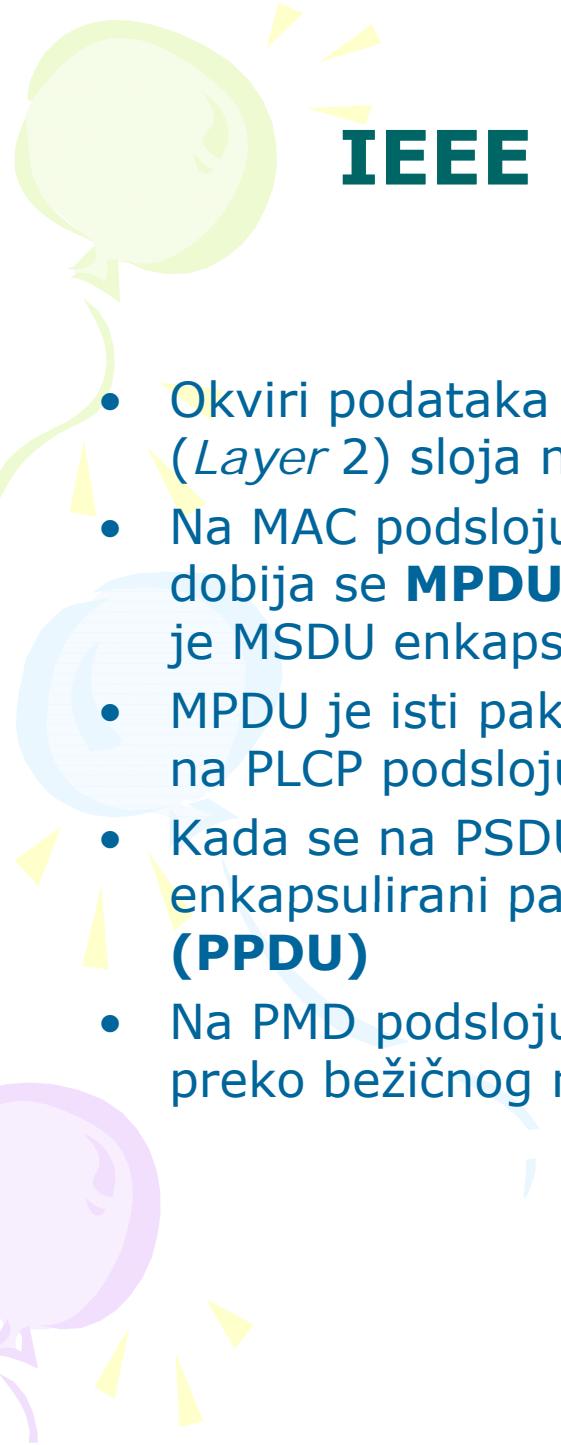
# **WLAN**

## **Poboljšanja na fizičkom i MAC sloju**

**Predmet: OPTIČKE I BEŽIČNE MREŽE**  
**Prof. dr Nataša Nešković**

# IEEE 802.11 PHY (fizički sloj)

- IEEE 802.11 standard definiše nekoliko specifikacija za fizički sloj, odnosno nekoliko PHY signalizacionih tehnika i interfejsa koji su pod kontrolom MAC podsloja
- PHY sloj sastoji se iz dva podsloja:
  - **PLCP** (*Physical Layer Convergence Procedure*) podsloja
    - implementira funkcije za mapiranje MPDU (*Mac Protocol Data Unit*) u odgovarajući format za prenos i prijem paketa preko bežičnog medijuma
    - obezbeđuje mehanizam za razmenu MPDU-ova između dve ili više stanica preko PMD podsloja
  - **PMD** (*Physical Medium Dependent*) podsloja
    - obezbeđuje slanje i prijem podataka preko bežičnog medijuma
    - definiše šemu prenosa koja zavisi od tipa fizičkog sloja
- Treći funkcionalni entitet fizičkog sloja je **PLME** (*Physical Layer Management Entity*) ⇒ odgovoran za upravljanje lokalnim PHY funkcijama u spremi sa upravljačkim entitetom MAC podsloja - MLME (*MAC Layer Management Entity*)
- PLCP predstavlja vezu između MAC okvira i prenosa preko bežičnog medijuma i omogućava minimalnu zavisnost MAC podsloja od fizičkog sloja
- Podacima koje prima sa MAC sloja, **PLCP dodaje preambulu i zaglavlje**, koja se razlikuje za svaku specifikaciju fizičkog sloja

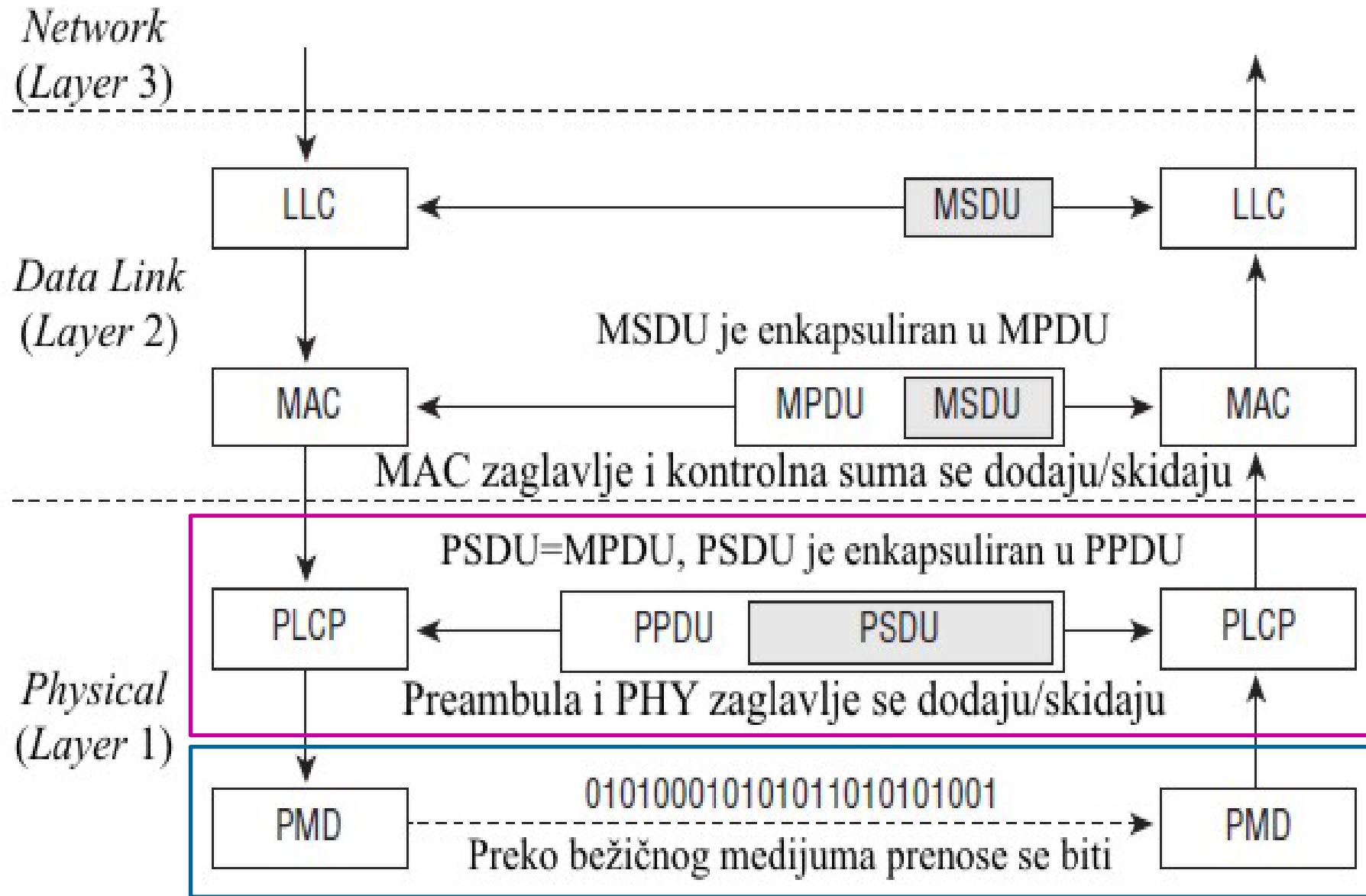


# IEEE 802.11 PHY (fizički sloj)

- Okviri podataka na *Logical Link Control* (LLC) podsloju *Data Link* (Layer 2) sloja nazivaju se **MAC Service Data Unit (MSDU)**
- Na MAC podsloju, na MSDU dodaju se zaglavlje i kontrolna suma i dobija se **MPDU (Mac Protocol Data Unit)**, što zapravo znači da je MSDU enkapsuliran u MPDU
- MPDU je isti paket kao **Physical Service Data Unit (PSDU)**, ali na PLCP podsloju on dobija novo ime
- Kada se na PSDU dodaju preambula i zaglavlje dobija se enkapsulirani paket koji se naziva **Physical Protocol Data Unit (PPDU)**
- Na PMD podsloju PPDU se prevodi u niz nula i jedinica i prenosi preko bežičnog medijuma



# Tipovi paketa na *Data Link* i fizičkom sloju



# Tipovi paketa na *Data Link* i fizičkom sloju

LLC

MSDU

MSDU

MAC



PLCP

PSDU = MPDU



- **PLCP preambula** ↳ detekcija signala i sinhronizacija
- **PLCP zaglavlje** ↳ generalno nosi informaciju o tome koliko je potrebno vremena da se prenese PSDU (zavisno od specifikacije fizičkog linka prenosi se: tip modulacije i/ili dužina PSDU u broju okteta i/ili brzina prenosa PSDU)

# Opseg 2.4 GHz

- Nelicencirani 2.4 GHz *Industrial, scientific, and medical* (ISM) opseg je izdeljen na radio **kanale širine 22 MHz (za Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM tehniku prenosa potreban kanal širine 20MHz; po 1MHz zaštite sa obe strane)**, sa rastojanjem od 5 MHz između centralnih učestanosti susednih kanala

Kanal ID	Frekv. [MHz]	Regulatorni domeni						
		FCC*	IC**	ETSI***	Španija	Francuska	Japan	Kina
1	2412	×	×	×	-	-	-	×
2	2417	×	×	×	-	-	-	×
3	2422	×	×	×	-	-	-	×
4	2427	×	×	×	-	-	-	×
5	2432	×	×	×	-	-	-	×
6	2437	×	×	×	-	-	-	×
7	2442	×	×	×	-	-	-	×
8	2447	×	×	×	-	-	-	×
9	2452	×	×	×	-	-	-	×
10	2457	×	×	×	×	×	-	×
11	2462	×	×	×	×	×	-	×
12	2467	-	-	×	-	×	-	×
13	2472	-	-	×	-	×	-	×
14	2484	-	-	-	-	-	×	-

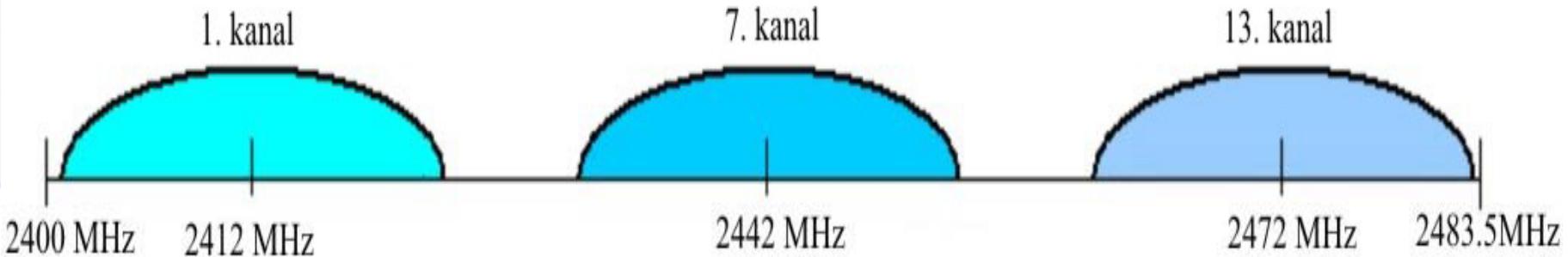
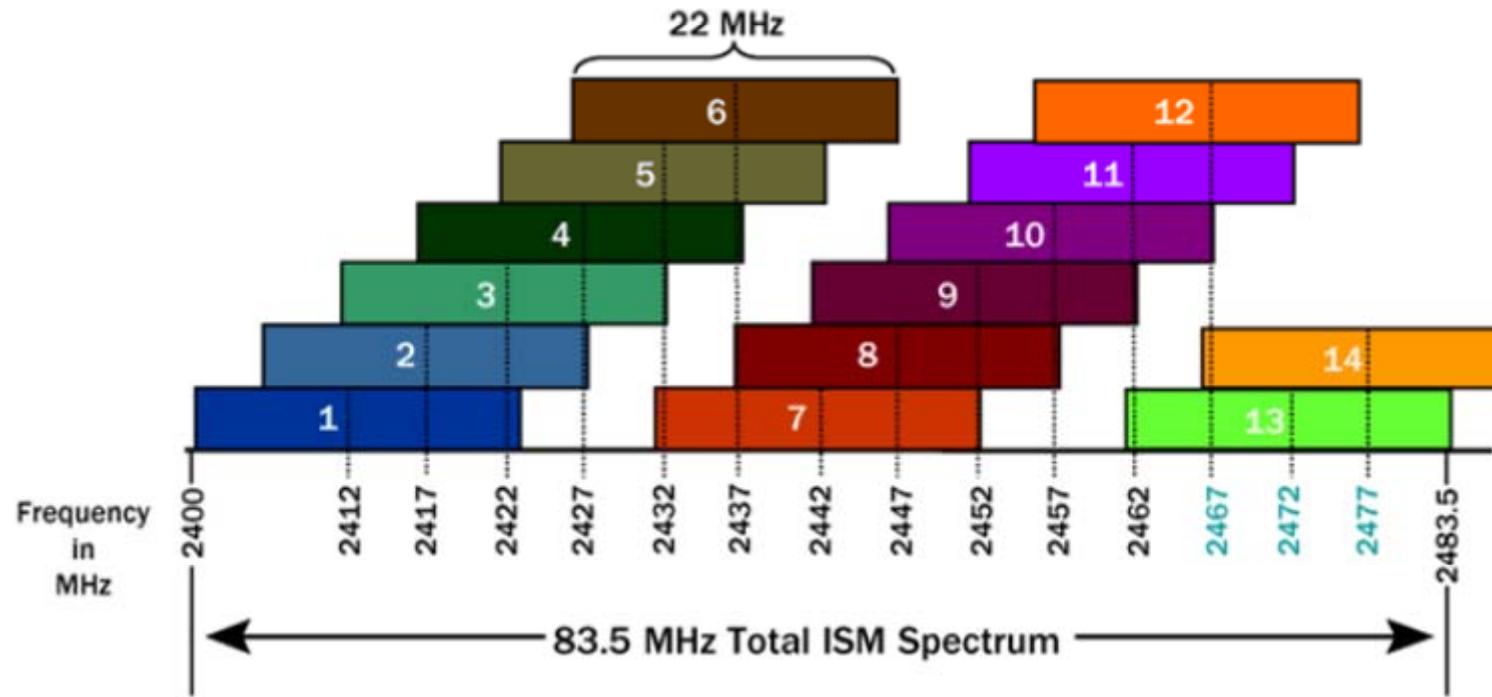
\* FCC - Federal Communications Commission (USA)

\*\* IC - Industry Canada

\*\*\* ETSI - European Telecommunications Standards Institute

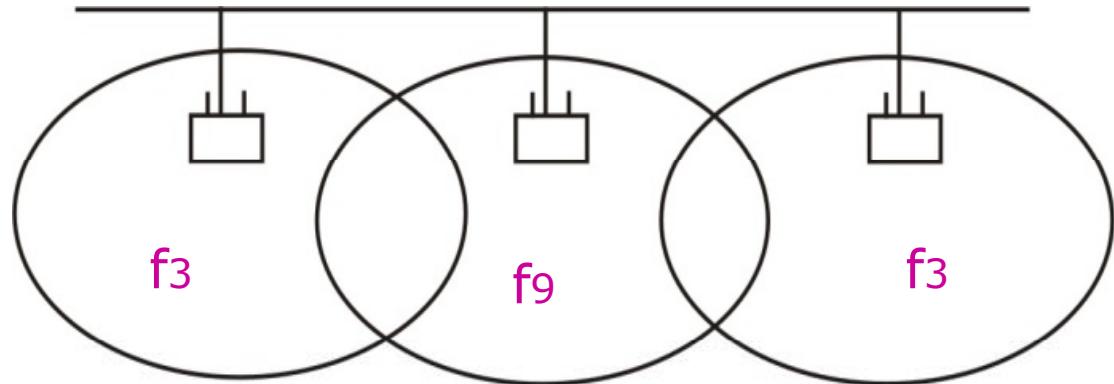
# Opseg 2.4 GHz

- **Susedni kanali se preklapaju**, a da bi se u okviru jedne mreže mogao koristiti veći broj kanala **poželjno je** (ali ne i obavezno) **izabrati nepreklapajuće kanale** (npr. u Evropi kanali 1, 7 i 13)

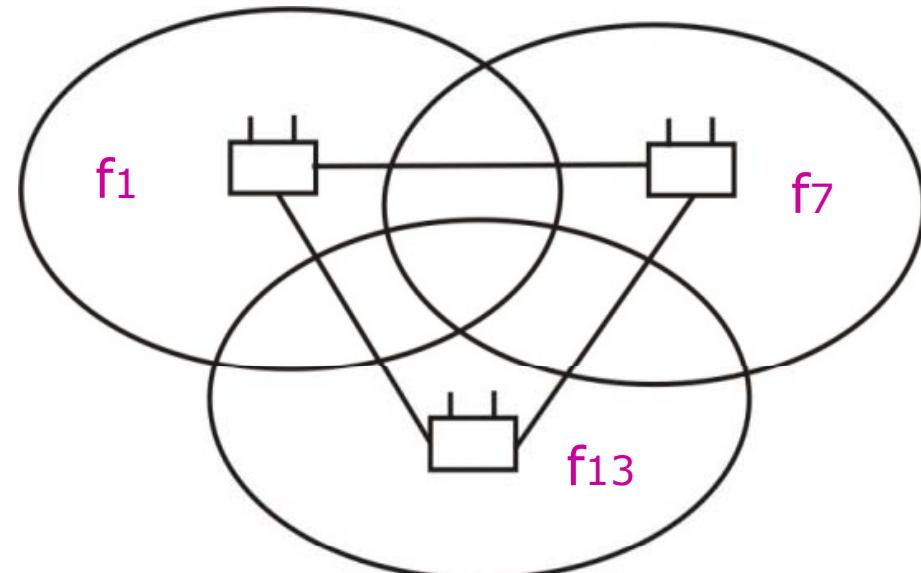


## Opseg 2.4 GHz

- Primer 1: Potrebna 2 nepreklapajuća kanala

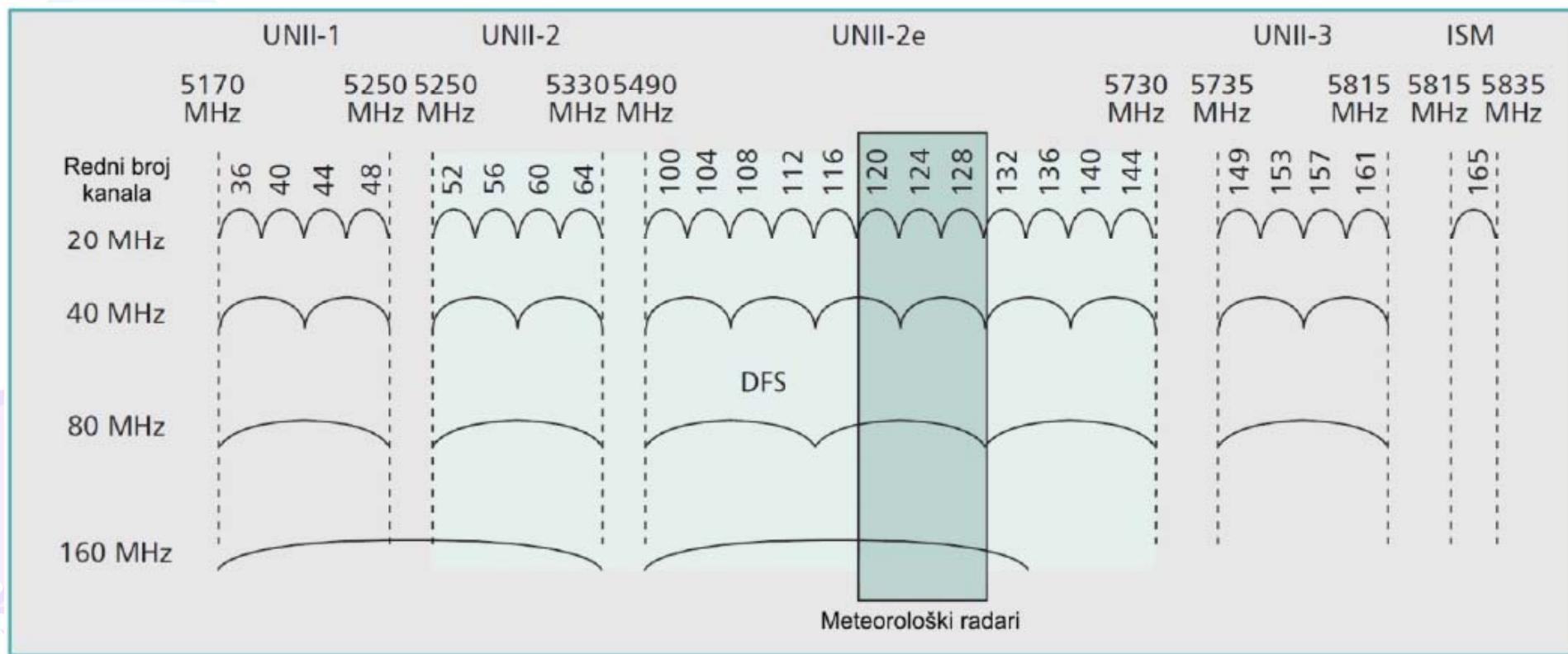


- Primer 2: Potrebna 3 nepreklapajuća kanala



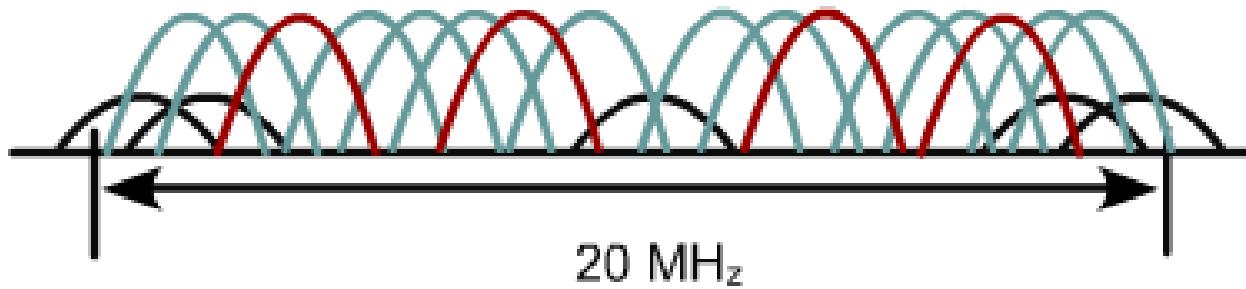
# Opseg 5 GHz

- Frekvencijski opseg 5 GHz sastoji se od nekoliko podopsega koji uključuju *Unlicensed National Information Infrastructure* (U-NII) opsege: 1, 2, 2e i 3
- Podrška dinamičkom izboru frekvencija (*Dynamic Frequency Selection* - DFS) obavezna je u UNII - 2 i 2e opsezima
- DFS je mehanizam koji obezbeđuje da AP izbegava kanale koje koriste radari u ovim opsezima i emitovanu energiju širi po celom kanalu izbegavajući na taj način interferenciju



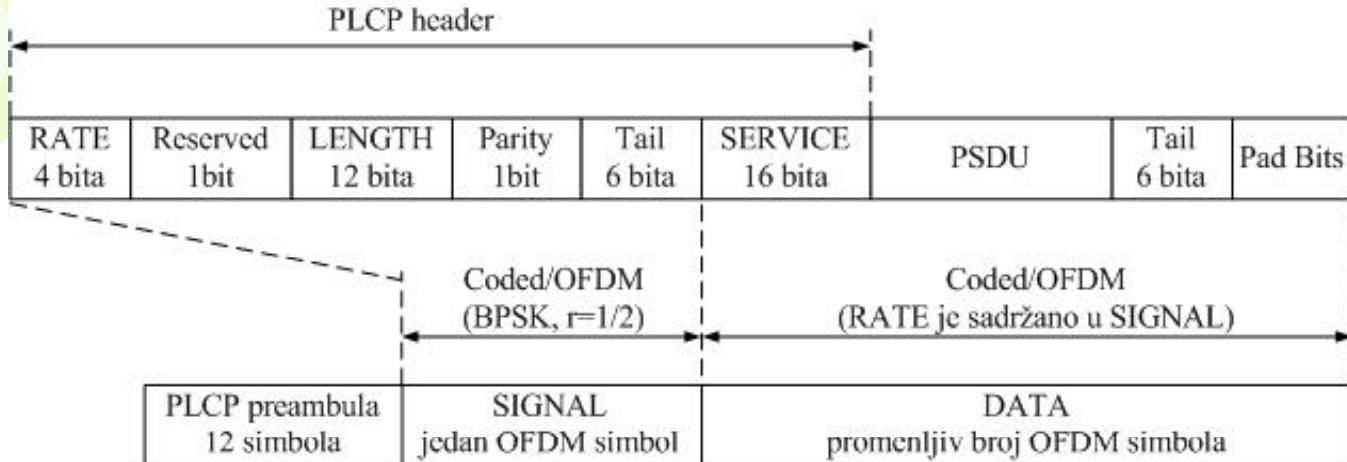
# OFDM specifikacija fizičkog sloja

- Koristi kanal širine 20 MHz koji se deli na 64 podkanala širine 312.5 kHz
  - 48 podkanala se koristi za prenos podataka
  - 4 podkanala koriste se za korekciju grešaka (synchronizaciju prijemnika)
  - 12 podkanala se ne koriste



- Na 48 podkanala za prenos podataka koristi se neka od sledećih modulacija: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256QAM

# Format PPDU okvira za OFDM



- PLCP preambula služi za sinhronizaciju, vremenskog trajanja  $16 \mu\text{s}$
- PLCP zaglavlje obuhvata polja:
  - *RATE* nosi informaciju o protoku korisničkih podataka
  - *LENGTH* se odnosi na dužinu polja *DATA* (u oktetima)
  - Rezervisani bit trenutno nije u upotrebi
  - *Parity* je bit pozitivne parnosti
  - *Tail* biti postavljaju se na 0
- Polje *DATA* čine polja:
  - Neki od bita *SERVICE* polja koriste se za izvesne potrebe sinhronizacije prijemnika, dok su drugi rezervisani
  - *Tail* biti postavljaju se na 0 i služe za povratak konvolucionog kodera u početno stanje
  - *Pad* biti se dodaju kako bi polje *DATA* predstavljalo celobrojni 11 umnožak kodiranih bita u jednom OFDM simbolu



## Poređenje standarda

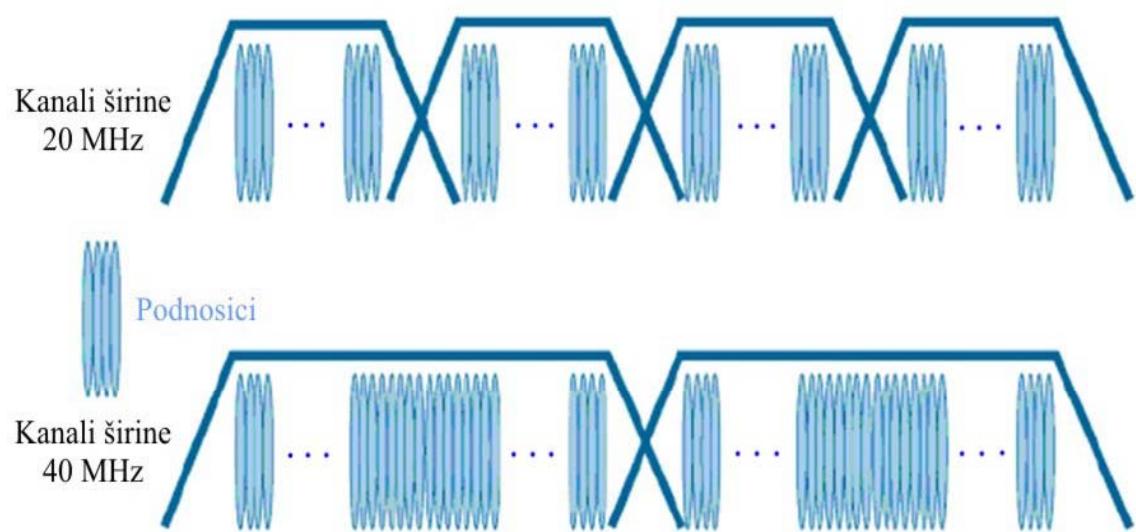
Karakteristika	Standard			
	802.11b	802.11g/a	802.11n	802.11ac
Maksimalni protok po prostornom toku [Mb/s]	11	54	> 100	> 500 (pretpostavljajući kanal širine 80 MHz)
Frekvencijski opseg [GHz]	2.4	2.4/5	2.4 i 5	5
Širina kanala [MHz]	20	20/20	20 i 40 (40 je opcionala)	20, 40, 80, 160 i 80+80 (poslednje dve su opcione)
Tehnika prenosa	DSSS	DSSS i OFDM	OFDM	OFDM

### DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*

- 802.11n, .11ac i .11ad uvode brojne izmene kako na fizičkom sloju, tako i na MAC podsloju
- 802.11ac i 802.11ad - *Multi-Gigabit WIFI (Wireless Fidelity)*
- 802.11ad – realizacija u frekvencijskom opsegu 60 GHz (širina kanala 2.16 GHz)

## *Channel Bonding*

Povezivanje dva susedna nepreklapajuća kanala širine 20 MHz u jedan kanal širine 40 MHz



- **802.11n** povećava broj podnosilaca na svakom kanalu širine 20MHz sa 48 na 52
- Svaki kanal širine 20 MHz ima izvestan mali broj podkanala (podnosioca) na početku i na kraju opsega koji su rezervisani (tj. ne koriste se) kako bi se smanjila interferencija između susednih kanala
- Prednost korišćenja kanala širine 40 MHz - za prenos podataka moguće je korišćenje i rezervisanog dela spektra
- Postižu se više nego duplo veći protoci, tj. brzine signalizacije na fizičkom sloju
- Efikasniji kada se implementira u frekvencijskom opsegu 5 GHz<sup>13</sup>

## 802.11n standard

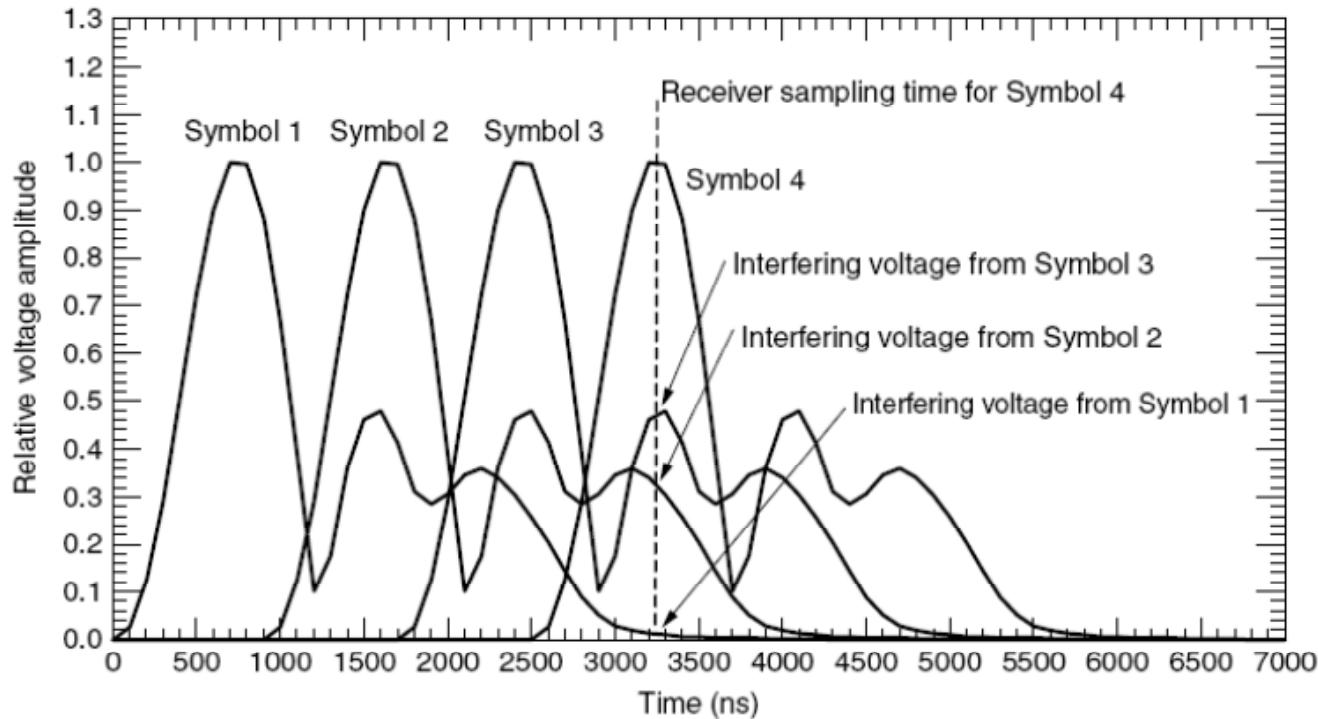
Modulacija	Kodni količnik	Brzina signalizacije na fizičkom sloju [Mb/s] na kanalu širine 20 MHz			
		1 <sup>*</sup>	2 <sup>*</sup>	3 <sup>*</sup>	4 <sup>*</sup>
BPSK	1/2	6.5	13	19.5	26
QPSK	1/2	13	26	39	52
QPSK	3/4	19.5	39	58.5	78
16QAM	1/2	26	52	78	104
16QAM	3/4	39	78	117	156
64QAM	2/3	52	104	156	208
64QAM	3/4	58.5	117	175.5	234
64QAM	5/6	65	130	195	260
Modulacija	Kodni količnik	Brzina signalizacije na fizičkom sloju [Mb/s] na kanalu širine 40 MHz			
		1 <sup>*</sup>	2 <sup>*</sup>	3 <sup>*</sup>	4 <sup>*</sup>
BPSK	1/2	13.5	27	40.5	54
QPSK	1/2	27	54	81	108
QPSK	3/4	40.5	81	121.5	162
16QAM	1/2	54	108	162	216
16QAM	3/4	81	162	243	324
64QAM	2/3	108	216	324	432
64QAM	3/4	121.5	243	364.5	486
64QAM	5/6	135	270	405	540

\* - broj prostornih tokova

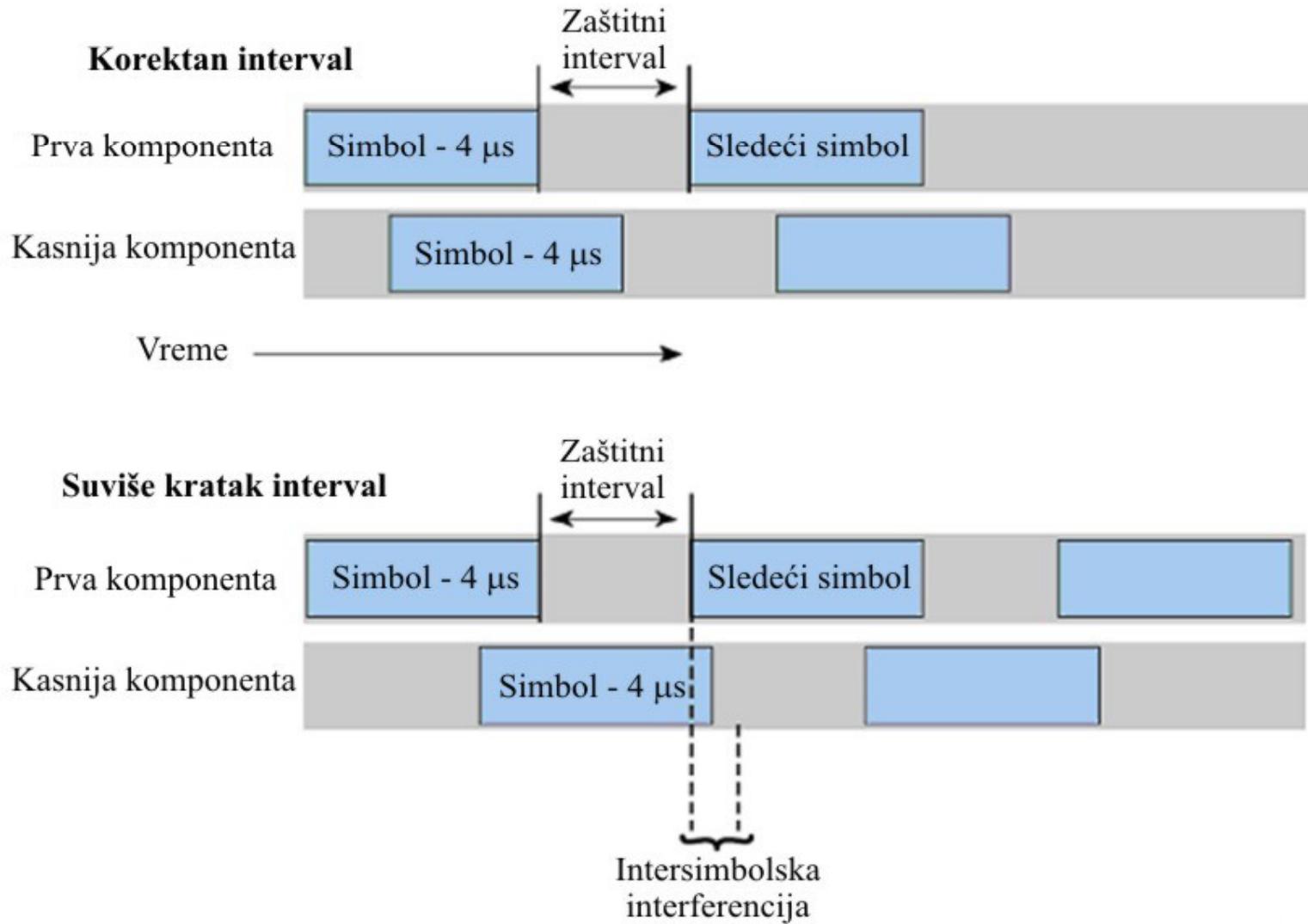
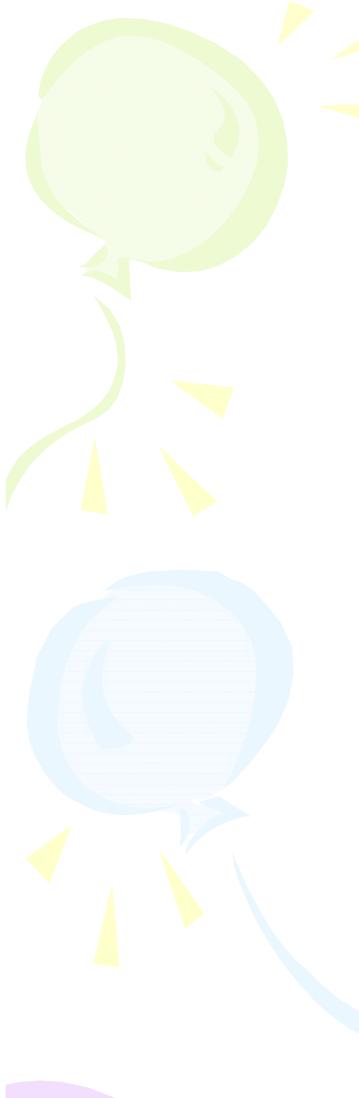
Napomena: vrednosti su date za zaštitni (guard) interval = 800ns

# Kraći zaštitni interval

- Zaštitni interval predstavlja **period vremena koji se koristi za minimiziranje intersimbolske interferencije** ➡ posledica *multipath* propagacije, pri kojoj na mesto prijema stiže više komponenti jednog istog OFDM simbola koje prelaze različite putanje između predajnika i prijemnika



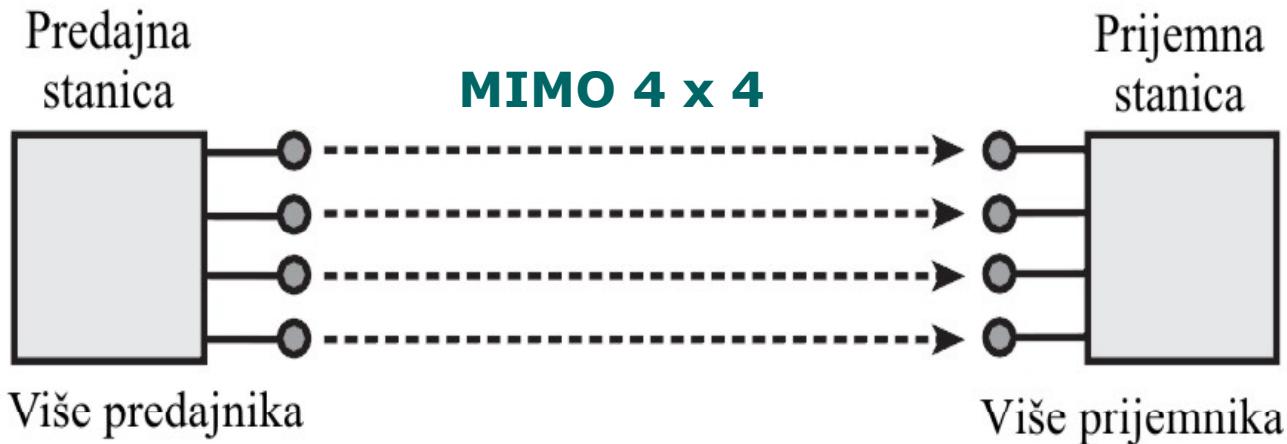
- Zaštitni interval je **period neaktivnosti između emitovanja dva uzastopna OFDM simbola** koji obezbeđuje da i *multipath* komponenta koja je prešla najduži put, a pripada prvo poslatom simbolu, stigne pre prve komponente narednog simbola
- Zaštitni interval od 800 ns dozvoljava putnu razliku koju prelaze različite *multipath* komponente od oko 240 m



- **Max brzine prenosa ako se koristi kraći zaštitni interval – 400 ns:**

- 20 MHz kanal, za 1, 2, 3 i 4 prostorna toka su: 72 , 144 , 216 i 288 Mb/s, respektivno
- 40 MHz kanal, za 1, 2, 3 i 4 prostorna toka su : 150, 300, 450 i 600 Mb/s, respektivno

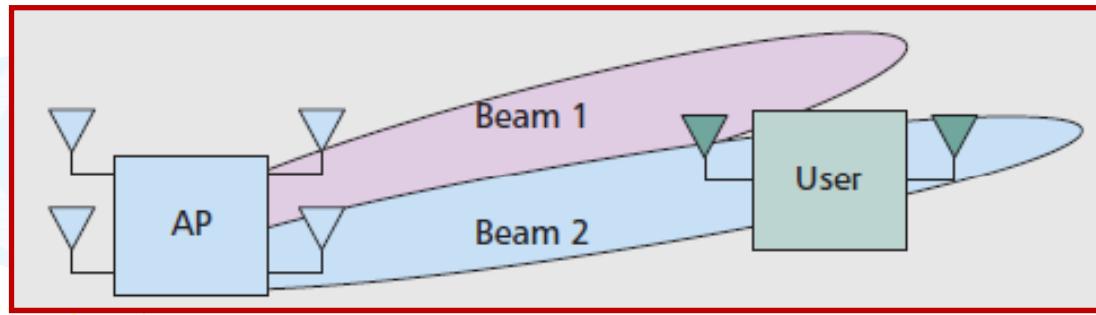
# MIMO (*Multiple input – Multiple output*) koncept – prostorno multipleksiranje



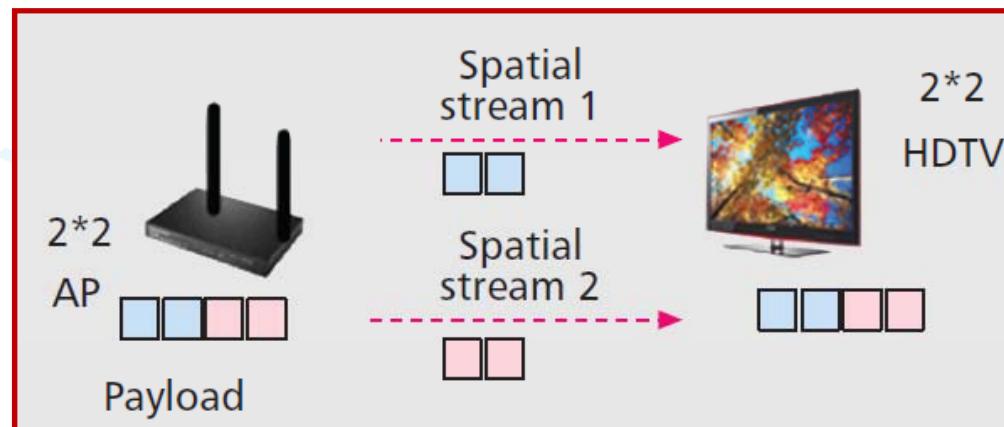
- Svaki par predajnik/prijemnik funkcioniše nezavisno
- Konfiguracijom 4x4 obezbeđuje se maksimalan broj prostornih tokova (četiri) koji podržava 802.11n standard
- Cena uređaja raste sa povećanjem broja primopredajnika/antena
- Uređaji sa 3 ili 4 primopredajnika su opcioni
- Uređaj sa dva primopredajnika je obavezan samo za AP

# Single-User (SU) MIMO

- Metod kojim **AP** u jednom trenutku može emitovati višestruke nezavisne prostorne tokove sa namerom da **opslužuje samo jednog korisnika**
- Oprema koja radi po 802.11n specifikaciji fizičkog sloja može da koristi samo SU-MIMO



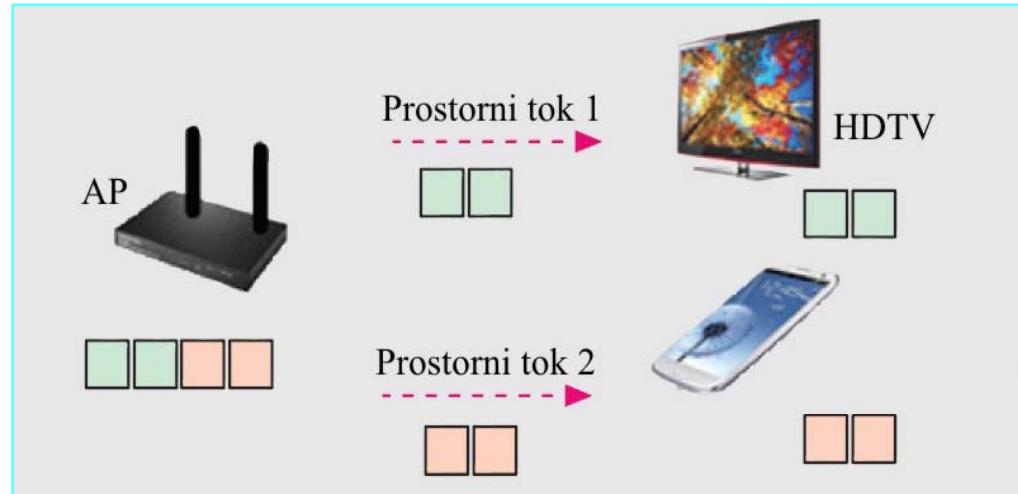
**SU-MIMO se može koristiti i za downlink i za uplink!!!**



# Multi-User (MU) MIMO

- Metod kojim **AP** u jednom trenutku može emitovati višestruke nezavisne prostorne tokove sa namerom da **opslužuje više korisnika**

**MU-MIMO kojim AP sa dva prostorna toka opslužuje dva korisnika**



- Savremeni korisnički uređaji tipično imaju jedan primopredajnik (odnosno antenu), dok AP-ovi imaju više primopredajnika
- MU-MIMO se može koristiti samo za *downlink*** (smer veze od AP ka korisniku), pri čemu se performanse sistema značajno popravljaju. S druge strane, kompleksnost uređaja na strani korisnika je minimalna, jer koriste samo jedan primopredajnik



Modulation	Code rate	PHY data rate (Mb/s)					Spatial streams	Standard
		20 MHz channel	40 MHz channel	80 MHz channel	160 MHz channel	2.16 GHz channel		
BPSK	1/2	6.5	13.5	—	—	—	1	802.11n <sup>2</sup>
QPSK	3/4	19.5	40.5	—	—	—	1	802.11n
16-QAM	3/4	26	81	—	—	—	1	802.11n
64-QAM	5/6	65	135	—	—	—	1	802.11n
64-QAM	5/6	260	540	—	—	—	4	802.11n
BPSK	1/2	6.5	13.5	29.3	58.5	—	1	802.11ac <sup>2</sup>
QPSK	3/4	19.5	40.5	87.8	175.5	—	1	802.11ac
16-QAM	3/4	39	81	175.5	351	—	1	802.11ac
64-QAM	5/6	65	135	292.5	585	—	1	802.11ac
256-QAM	5/6 <sup>1</sup>	78	180	390	780	—	1	802.11ac
256-QAM	5/6 <sup>1</sup>	312	720	1560	3120	—	4	802.11ac
256-QAM	5/6 <sup>1</sup>	624	1440	3120	6240	—	8	802.11ac
p/2-BPSK	1/2	—	—	—	—	385	1	802.11ad
p/2-BPSK	3/4	—	—	—	—	1155	1	802.11ad
p/2-QPSK	3/4	—	—	—	—	2310	1	802.11ad
p/2 16-QAM	3/4	—	—	—	—	4620	1	802.11ad
64-QAM	13/16	—	—	—	—	6756.75	1	802.11ad

<sup>1</sup> Code rate of 3/4 for 20 MHz channel width.

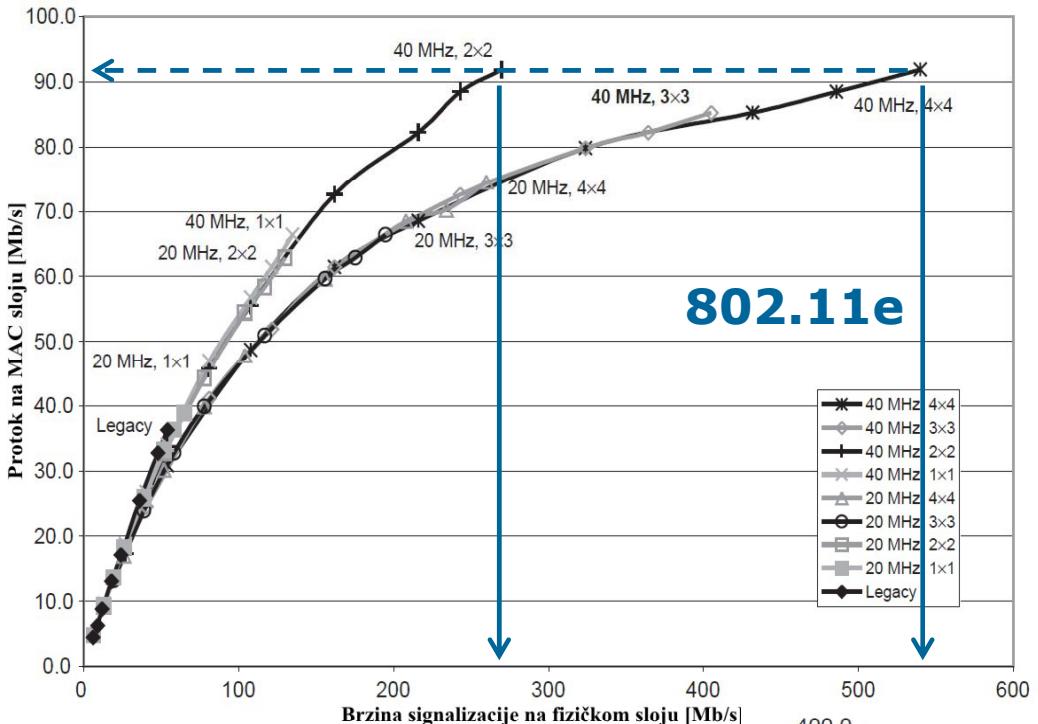
<sup>2</sup> Guard interval = 800 ns.

**Spatial streams – prostorni tokovi**



## Poboljšanja na MAC posloju

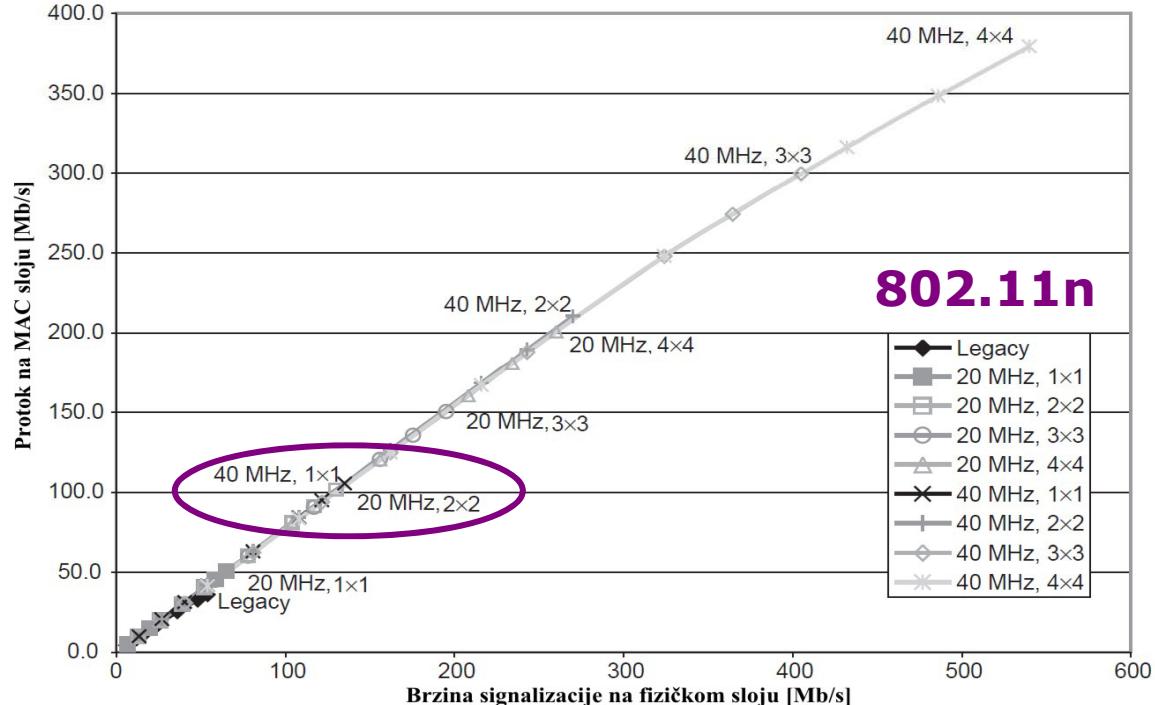
- 802.11 standard - Efikasnost MAC podsloja je često veoma loša
- Svaki okvir za prenos zahteva zaglavje na fizičkom sloju (*header*), kao i *overhead* (preamble, potvrda okvira)
- *Overhead* je posebno izražen za kratke okvire, kada je za prenos *overhead-a* potrebno relativno više vremena nego što je potrebno za deo okvira kojim se prenose korisnički podaci
- Efikasnost radio kanala je poboljšana kroz primenu:
  - **agregacije okvira** - kombinovanjem nekoliko malih okvira u jedan relativno veliki okvir poboljšava se odnos podaci/*overhead*
  - **BlockAck mehanizma** - uklanjanjem potrebe za potvrdom svakog pojedinačnog okvira smanjena je količina zahtevanog *overhead-a* za ACK

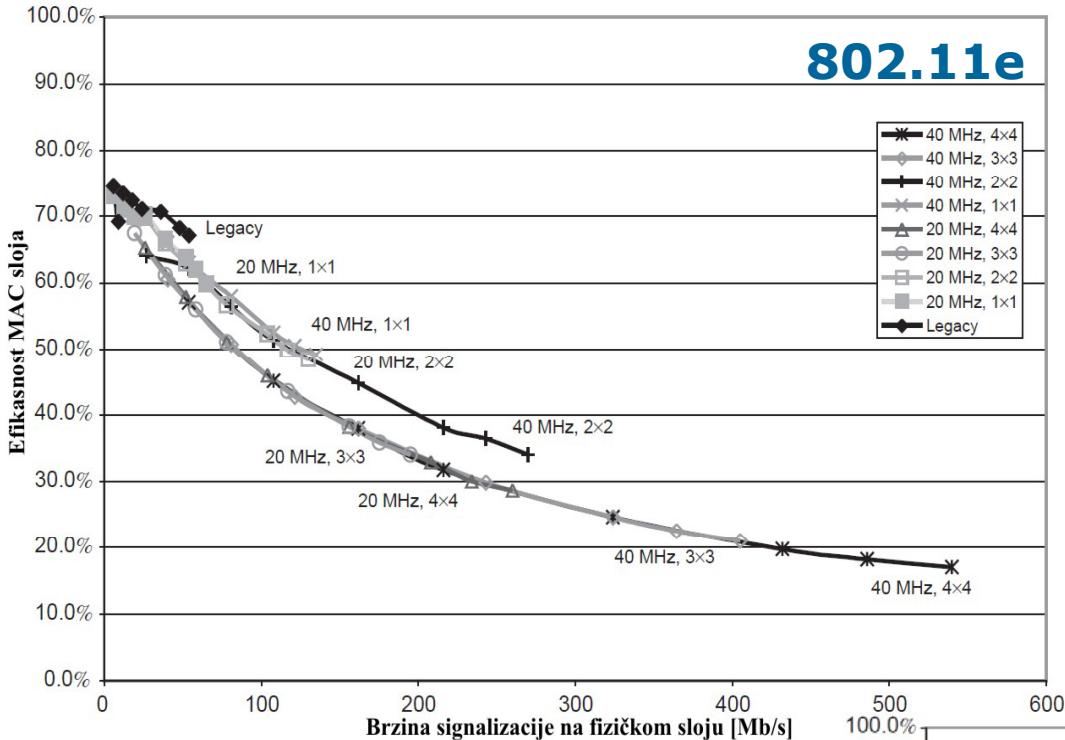


**Zavisnost protoka na MAC  
podsloju od brzine  
signalizacije na fizičkom sloju  
(slanje unicast paketa,  
*TXOP limit = 3 ms, PER  
(packet error rate)=10%,  
koristi se BlockAck  
mehanizam)***

Na kanalu širine 40 MHz  
isti protok na MAC  
podsloju za MIMO 2x2  
sistem i MIMO 4x4 sistem

Protok od 100 Mb/s na MAC  
podsloju je sada jednostavno  
dostići uz brzinu signalizacije  
od približno 130 Mb/s koja se  
može obezbediti na kanalu  
širine 20 MHz uz MIMO 2x2 ili  
na kanalu širine 40 MHz sa  
jednim prostornim tokom

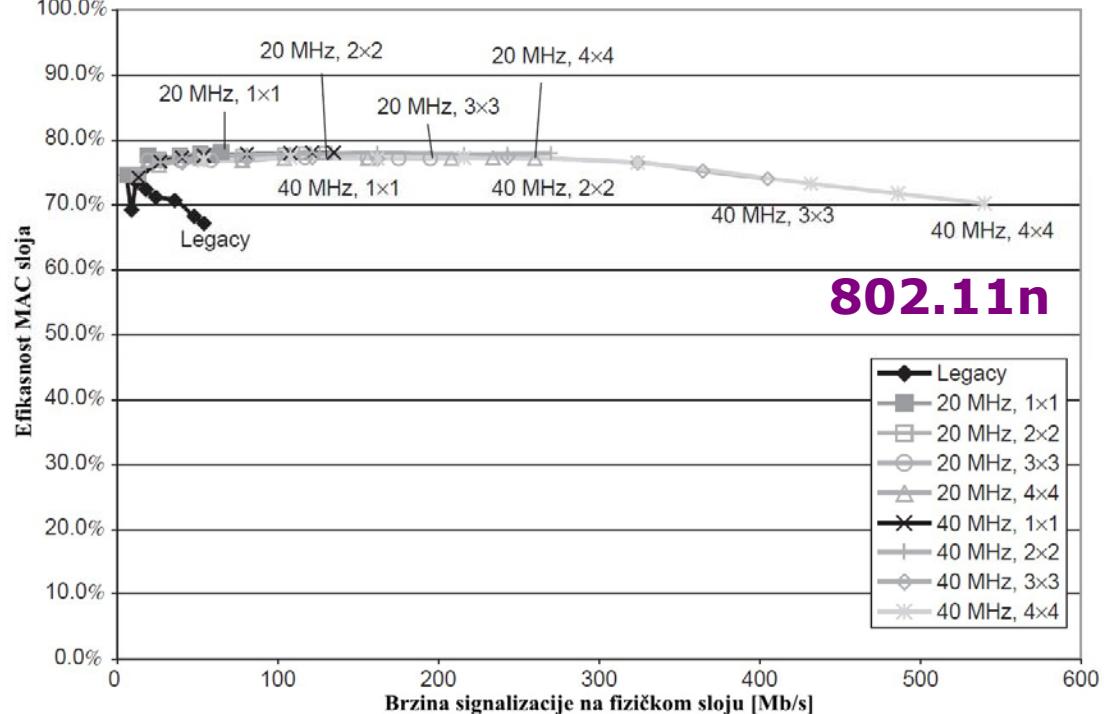




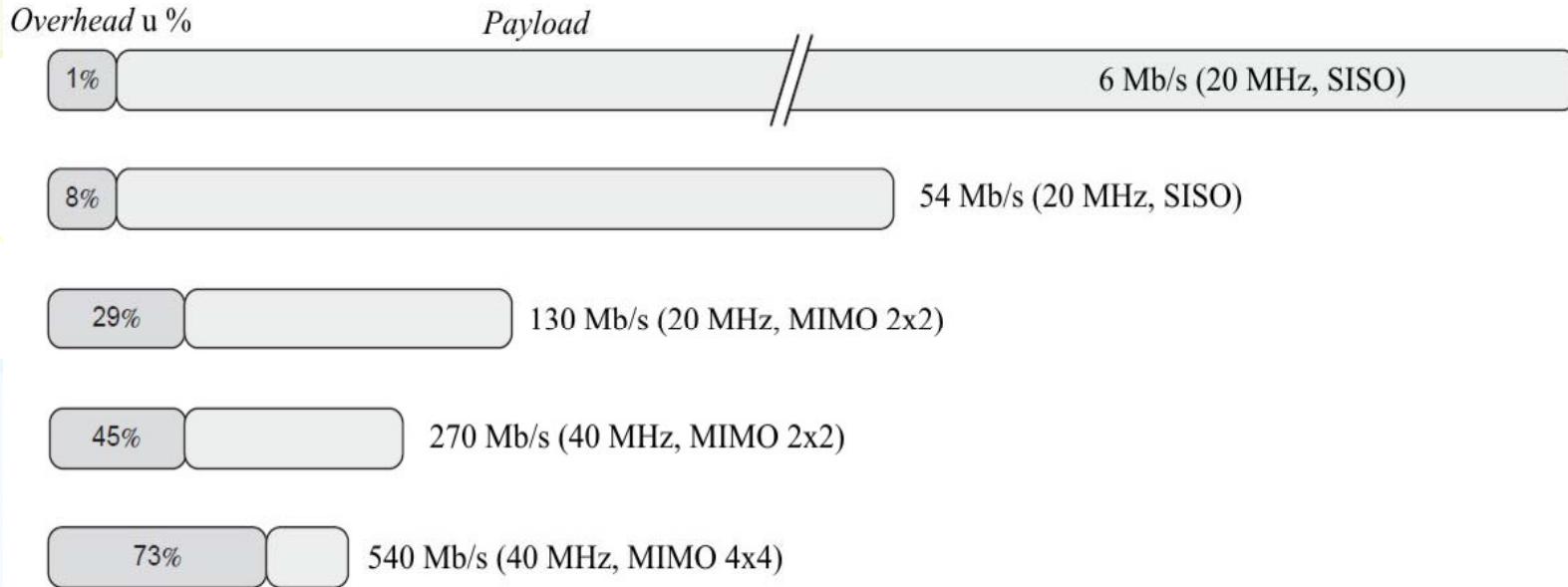
- Efikasnost MAC podsloja se zadržava u opsegu između 70 i 80% preko celog opsega brzina signalizacije na fizičkom sloju

## Zavisnost efikasnosti MAC podsloja od brzine signalizacije na fizičkom sloju (TXOP limit = 3 ms, PER=10%, koristi se *BlockAck* mehanizam)

- Pad efikasnosti rezultat je fiksног *overhead-a* u preambuli i *inter frame space* perioda
- Za višestruke tokove podataka neophodna je duža preambula

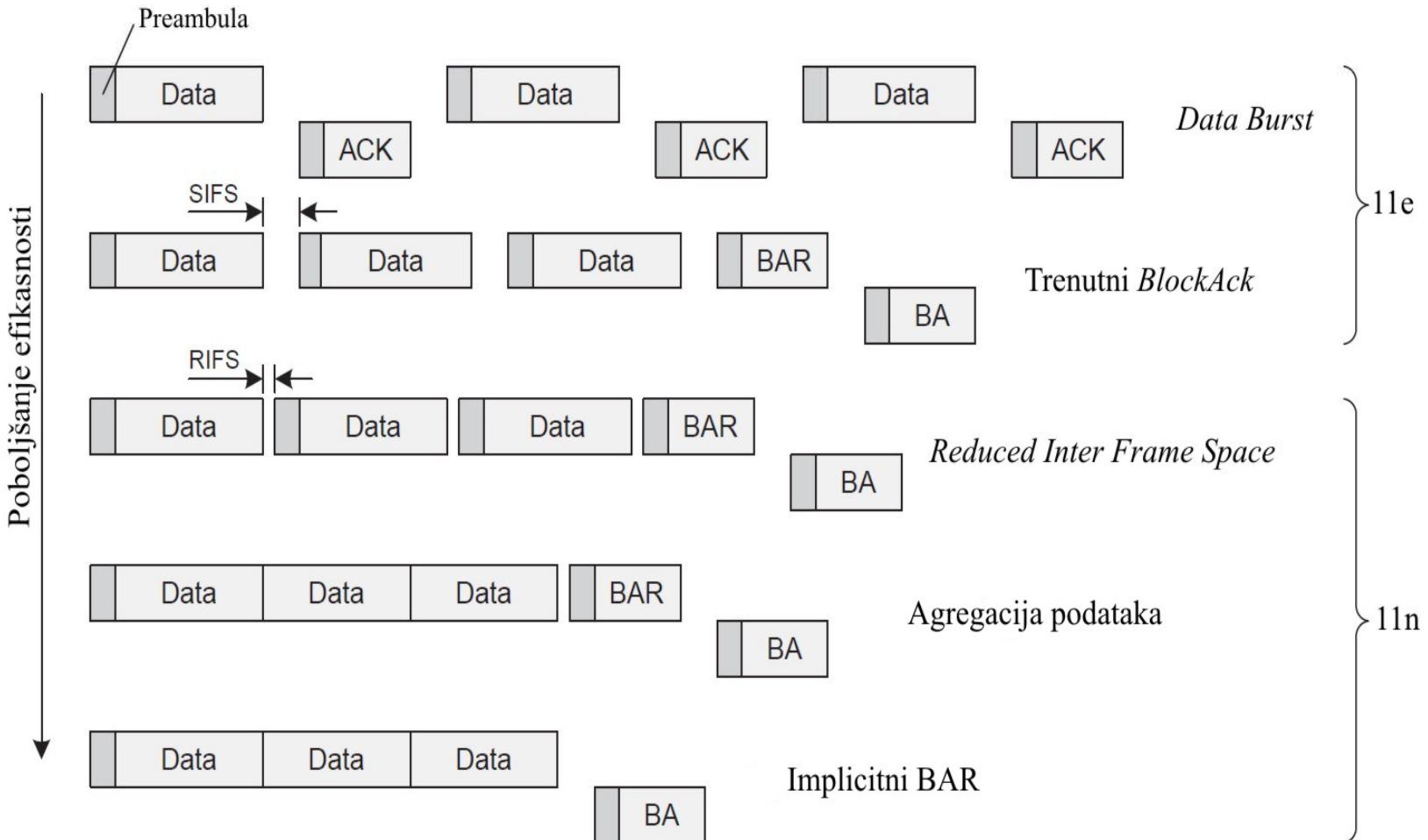


## Relativni *overhead* za izabrani skup brzina signalizacije na fizičkom sloju (paket veličine 1500 bajtova)

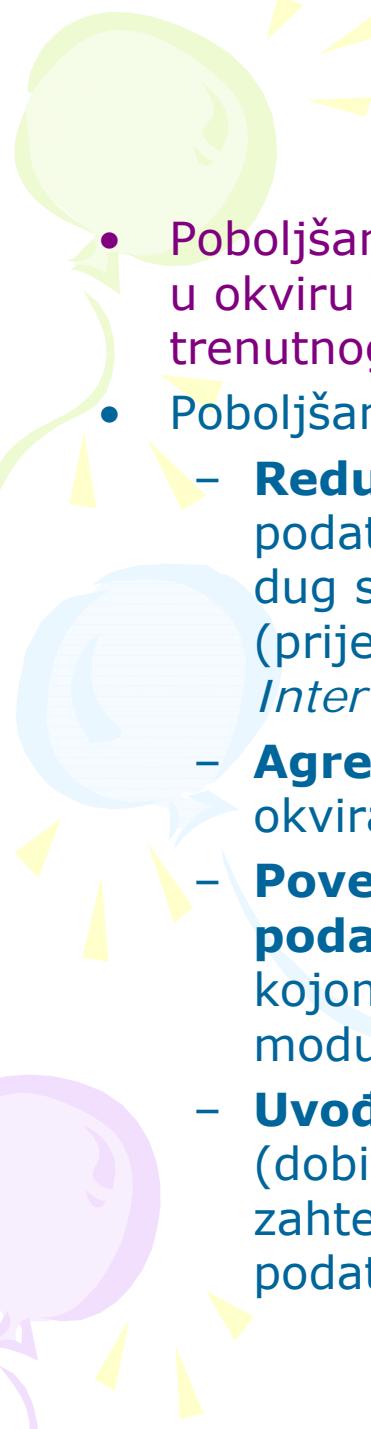


- Značajan pad efikasnosti sa porastom brzine signalizacije rezultat je fiksног *overhead*-a u preambuli i *inter frame space* perioda. Da bi se podržali višestruki tokovi podataka koji obezbeđuju veću brzinu signalizacije neophodna je duža preambula, a to znači dodatni fiksni *overhead*

## U odnosu na 802.11e standard, 802.11n standard uveo je brojna jednostavna poboljšanja na MAC podsloju povećavajući mu značajno efikasnost



**BAR - BlockAck Request, BA - BlockAck**

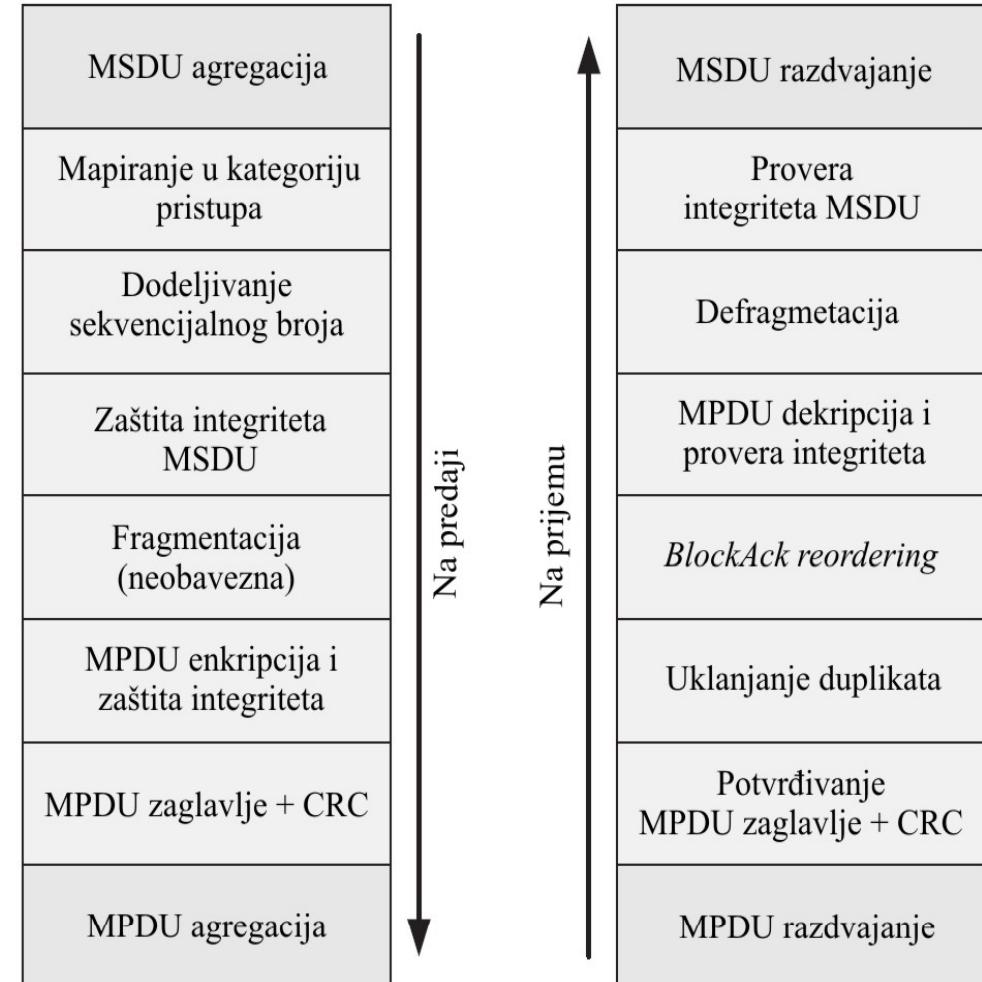


## Poboljšanja na MAC podsloju

- Poboljšanja uvedena 802.11e standardom - *bursting* bez nadmetanja u okviru TXOP intervala za slučaj korišćenja normalnog ACK i trenutnog *BlockAck* mehanizma
- Poboljšanja uvedena 802.11n standardom:
  - **Redukovanje *inter frame space (IFS)* perioda** između okvira podataka koji se šalju jedan za drugim; IFS treba da je dovoljno dug samo da prilagodi prijemnik za prijem novog signala (prijemnik koristi podatke iz preamble); dovoljan je *Reduced Inter Frame Space (RIFS)* period
  - **Agregacija** - eliminacija IFS perioda i preamble i grupisanje okvira podataka u jedan jedinstveni okvir
  - **Povezivanje *BlockAck Request (BAR)* okvira sa okvirima podataka** - BAR se prenosi na kraju grupnog prenosa, brzinom kojom se prenose podaci, a ne korišćenjem robusnijih modulacionih šema kojima se obično prenose kontrolni okviri
  - **Uvođenje **Implicitnog BAR-a**** - funkcija koju ima BAR okvir (dobiti BA), može se izvršiti i dodavanjem jednog bita, kojim se zahteva potvrda prijema, na svaki od pojedinačnih okvira podataka koji zajedno čine grupni okvir

- Na vrhu MAC podsloja, kao prvi korak u formiranju MAC *Protocol Data Unit* (MPDU) radi se A-MSDU (MAC Service Data Units (MSDU) agregacija (ili A-MSDU))
- Na dnu MAC podsloja sprovodi se MPDU agregacija (ili A-MPDU) kojom se na predaji grupiše više MPDU-ova Postojeći MAC tako da formiraju Physical Service Data Unit (PSDU) kome će na fizičkom sloju biti dodata preamble i zaglavje i do prijemne stanice će stići jedan okvir
- Reverzne funkcije koje se odvijaju na prijemnoj strani su MPDU i MSDU razdvajanje, na istim pozicijama u odnosu na druge MAC funkcije, kao i na predaji

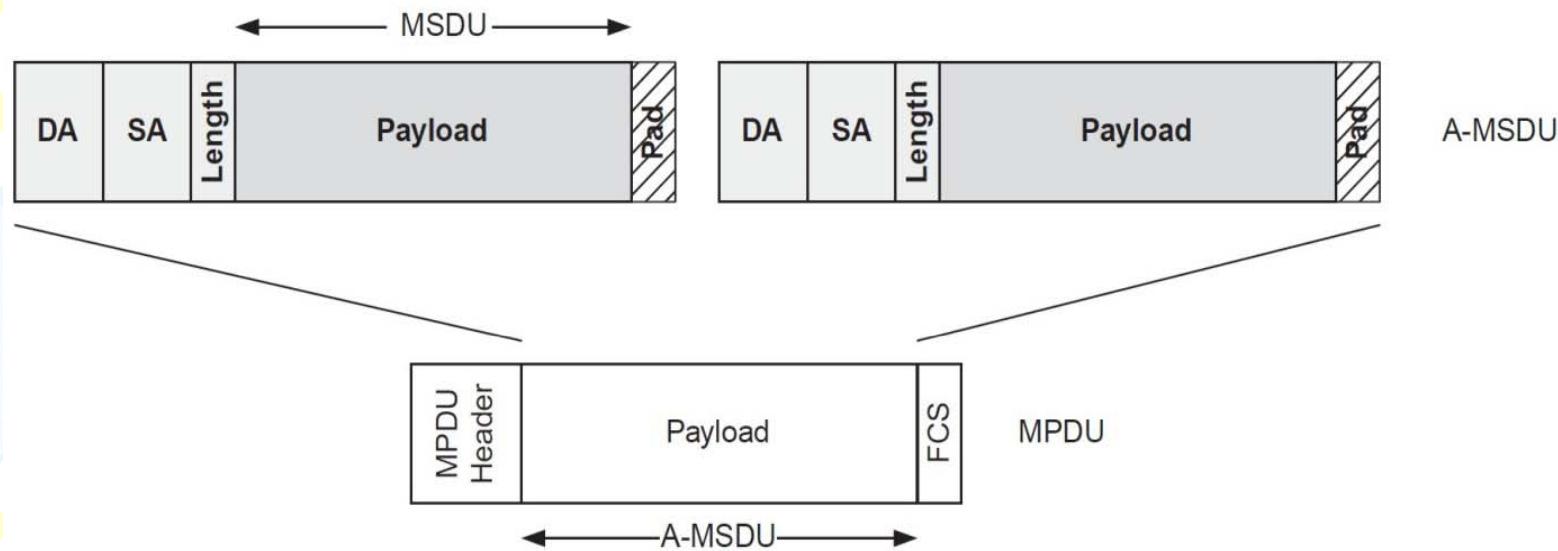
# Agregacija



**Pozicije A-MSDU i A-MPDU na predaji, i MPDU i MSDU razdvajanje na prijemu u odnosu na druge MAC funkcije**

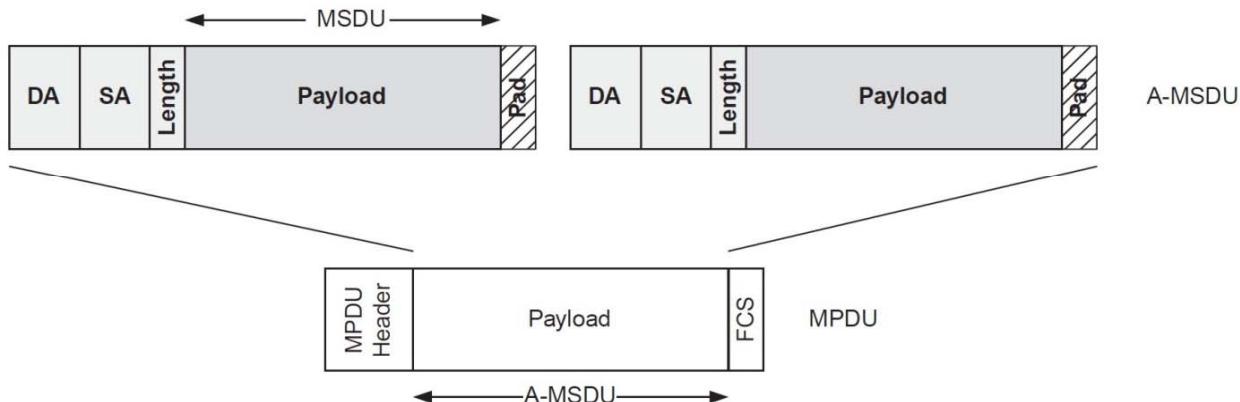
# MAC Service Data Units agregacija

- Više MSDU primljenih sa LLC sloja, koji imaju isto odredište i prenose istu kategoriju saobraćaja, mogu biti grupisani i enkapsulirani u jedan MPDU



- MSDU ima zaglavje (*header*) koje se sastoji od:
  - adrese odredišta (*destination address - DA*),
  - adrese pošiljaoca okvira (*source address - SA*), i
  - polja unutar koga je definisana dužina (*length*) SDU u bajtovima
- Zaglavje zajedno sa SDU dopunjeno sa od 0 do 3 bajta dugačkim *pad* poljem čini podokvir

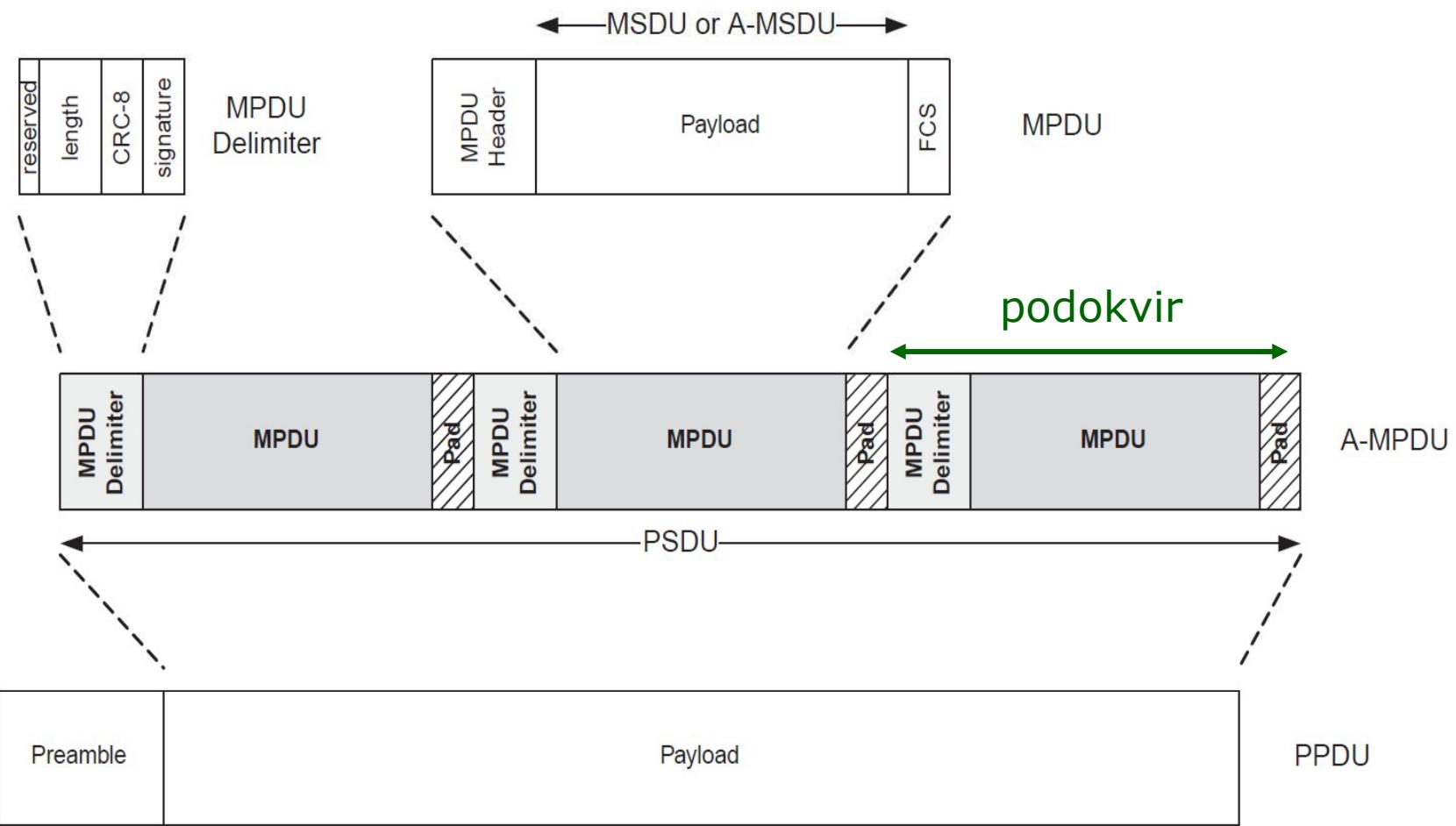
# MAC Service Data Units agregacija



- Više MSDU podokvira mogu biti grupisani zajedno tako da formiraju okvir podataka (*payload*) definisanog QoS profila, pri čemu ukupna dužina okvira ne sme prevazići maksimalnu veličinu MPDU
- Maksimalna dužina agregiranog MSDU je 3839 ili 7935 bajtova i mora biti unapred definisana
- Pravila pristupa medijumu za slučaj QoS *data* MPDU koji sadrži agregirani MSDU su ista kao da je u pitanju *data* MPDU koji prenosi MSDU iste kategorije saobraćaja

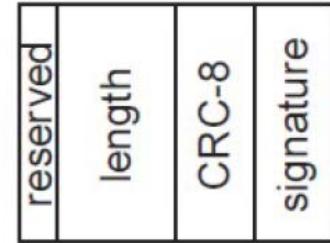
# MAC Protocol Data Unit agregacija

- MPDU agregacijom kompletno formirani MPDU-ovi se grupišu na dnu MAC podsloja
- Kratak MPDU delimiter se dodaje ispred svakog pojedinačnog MPDU-a i tako formirani okvir se prenosi do fizičkog sloja kao PSDU da bi se preneo u jednom *Physical Protocol Data Unit* (PPDU) preko fizičkog medijuma



# MAC Protocol Data Unit agregacija

- MPDU *delimiter* je dužine 32 bita i sastoji se od:
  - 4 rezervisana bita
  - 12 bita koji daju informaciju o dužini MPDU okvira koji sledi (polje *length*)
  - 8-bitni CRC služi kao potvrda integriteta nad poljima zaglavlja (za prethodnih 16 bita)
  - 8-bitno polje *signature* koje je setovano na ASCII karakter „N“ (uveđeno je kao pomoć softverskoj implementaciji razdvajanja pojedinih MPDU-ova u okviru agregiranog MPDU)
- Prijemnik je tako koncipiran da u okviru agregiranog MPDU-a koristi informaciju iz polja *length* u okviru *delimiter*-a da izvuče naredni MPDU
- **Svi MPDU-ovi u okviru agregiranog MPDU-a imaju isto odredište i prenose istu kategoriju saobraćaja!!!**



MPDU  
Delimiter



## **MSDU, MPDU, *BlockAck***

- **MSDU agregacija može biti korišćena u kombinaciji sa MPDU agregacijom** što se ostvaruje međusobnim dogovorom između stanica
- **Agregirani MSDU** okvir se potvrđuje na isti način na koji bi se potvrdio bilo koji 802.11 okvir
- **Korišćenje MPDU agregacije podrazumeva da svaki od individualnih podokvira mora biti potvrđen** i zato je neophodno koristiti *BlockAck* mehanizam ➡ formira se jedan okvir potvrde koji primalac vraća pošiljaocu
- Omogućena je brza primena selektivne retransmisije samo onih podokvira koji nisu potvrđeni



***Kraj WLAN\_Poboljšanja na fizičkom i MAC sloju***