

Radijske pristupne mreže

Izv. prof. dr. sc. Gordan Šišul

Modulacijski postupak, multipleksiranje i frekvencijski spektar

Osnovni pojmovi o diskretnoj modulaciji

- Radijske lokalne mreže pripadaju skupini digitalnih komunikacijskih sustava, tj. one služe za prijenos digitalnog oblika informacije.
- Digitalna informacija opisana je konačnim brojem binarnih znakova i predočuje se diskretnim električnim signalom. Zbog toga se u prijenosu koriste postupci diskretne modulacije sinusnog signala.
- Svakoj diskretnoj razini modulacijskog signala odgovara jedno diskretno stanje amplitude, frekvencije ili faze moduliranog signala ili pak neka njihova kombinacija.
- *Simbolom* se naziva dio moduliranog signala s jednim stanjem moduliranog parametra.
- Modulirani je signal predočen slijedom simbola.

Osnovni pojmovi o diskretnoj modulaciji

- Binarni postupci rabe samo dva simbola. Svakom od njih pridružuje se jedan bit.
- Kad ima više simbola (njihov broj je neka potencija broja 2) onda se svakom od njih pridružuje više bita.
- *Brzina prijenosa simbola ili brzina signaliziranja* jednaka je:

$$R_s = 1/T_0 \text{ [Bd]}, \quad T_0 - \text{trajanje simbola}$$

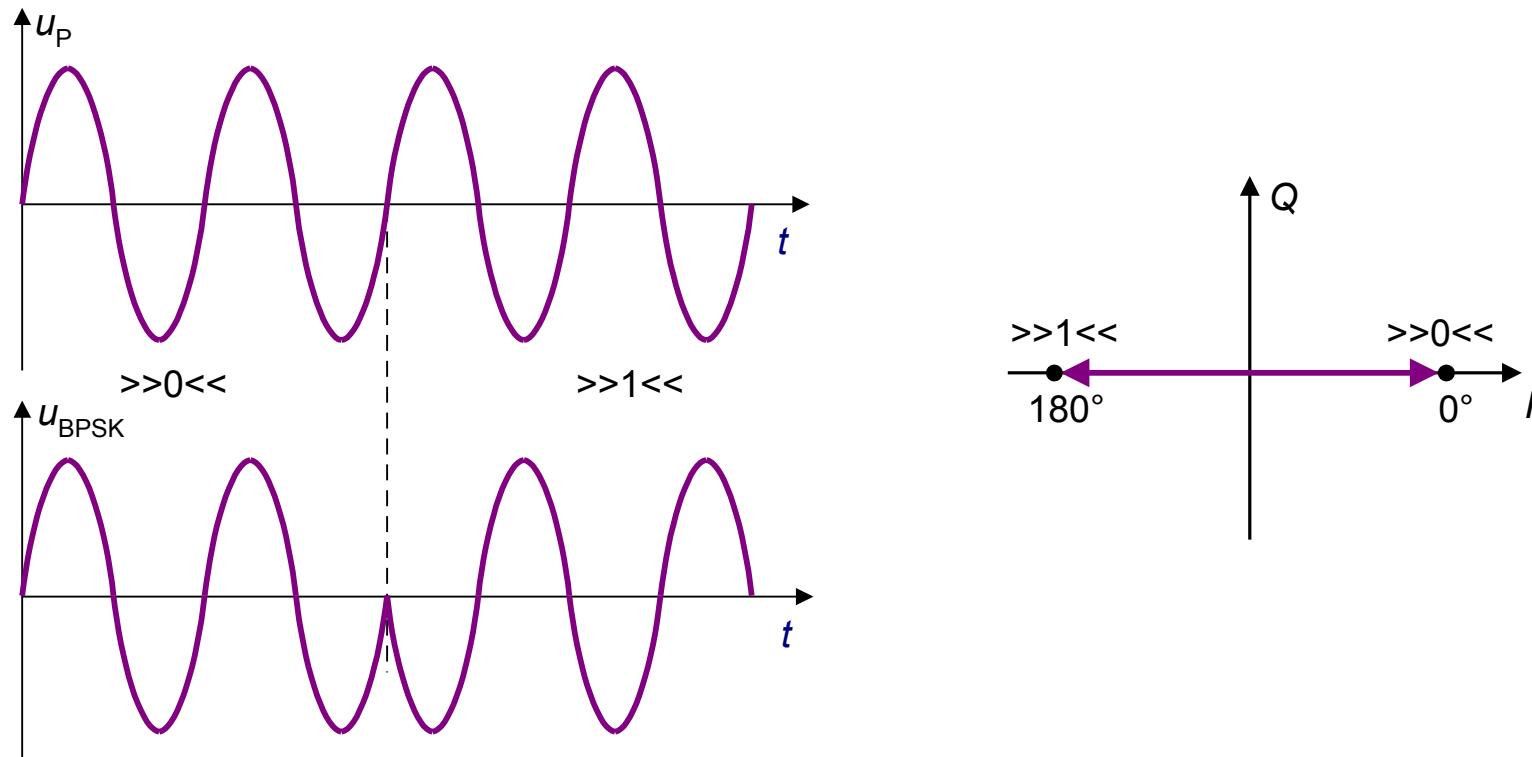
- *Brzina prijenosa bita* jednaka je:

$$R_D = R_s \log_2 M \text{ [bit/s]}, \quad M - \text{broj simbola}$$

- Kvaliteta prijenosa mjeri se *vjerojatnošću pogreške simbola* p_{Es} ili SER (Symbol Error Rate) odnosno *vjerojatnošću pogreške bita* p_{Eb} ili BER (Bit Error Rate).

Modulacijski postupak BPSK

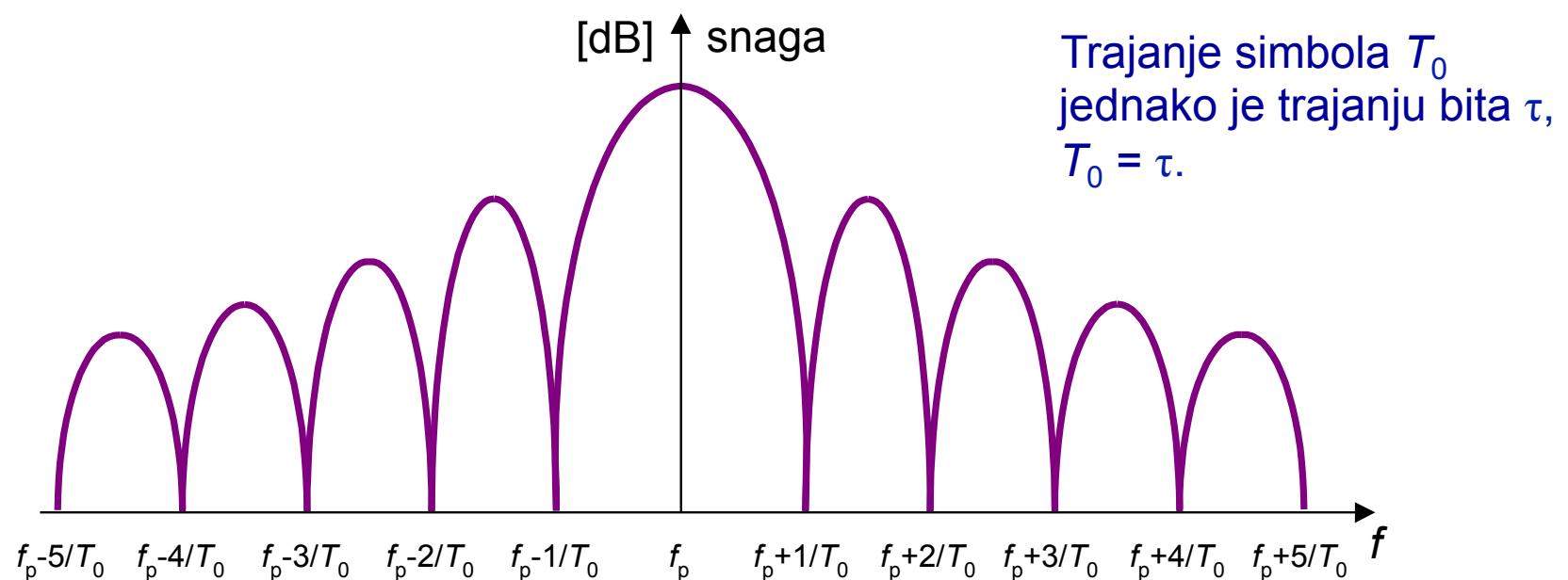
- Binarna diskretna modulacija faze (BPSK, Binary Phase Shift Keying)* rabi samo dva stanja faze: 0° i 180° .



Modulacijski postupak BPSK (nastavak)

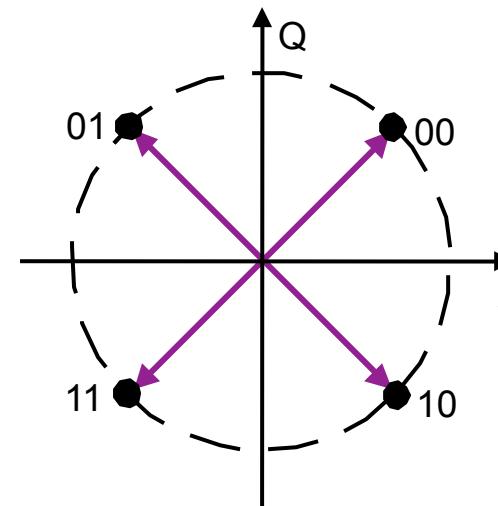
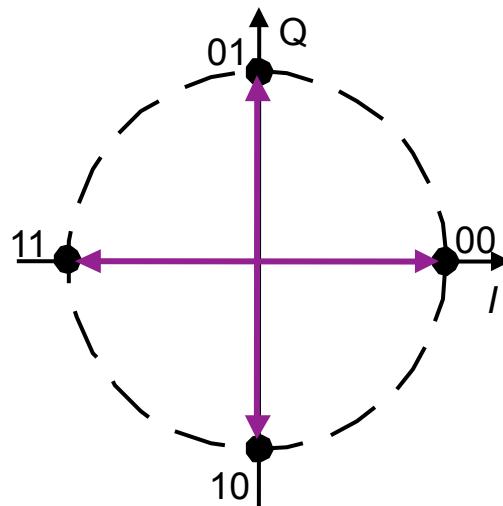
- Spektralna učinkovitost*, koja odgovara broju prenesenih bita u sekundi po jedinici zauzete širine pojasa frekvencija, uz idealno Nyquistovo filtriranje, iznosi 1 bit/s/Hz za BPSK.

ovojnica spektra snage BPSK-signala



Modulacijski postupak QPSK

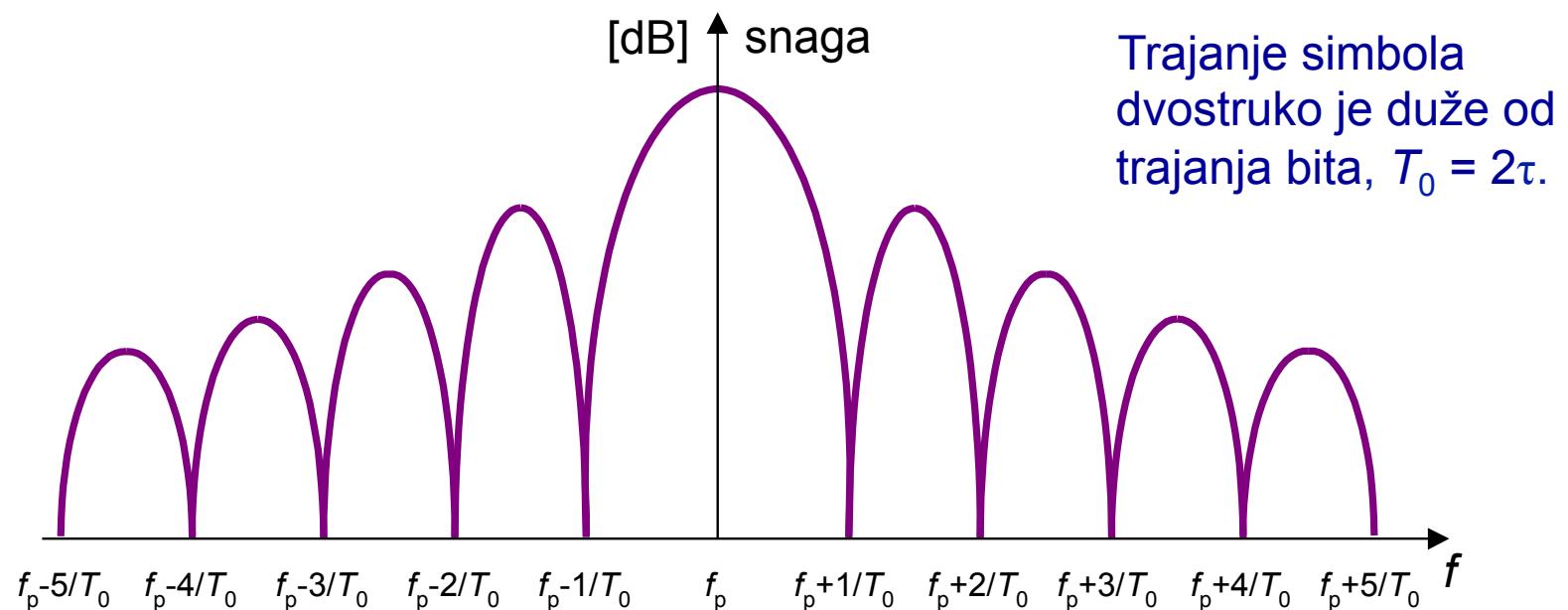
- Kvaterarna diskretna modulacija faze (Quaternary Phase Shift Keying ili Quadriphase PSK) rabi četiri stanja faze:
 - 0° , $\pm 90^\circ$ i 180° u jednoj varijanti ili,
 - $\pm 45^\circ$ i $\pm 135^\circ$ u drugoj varijanti.
- Broj simbola iznosi $M = 4$. Svakom simbolu (stanju faze) pridružuju se dva bita odnosno *dibit*.



Modulacijski postupak QPSK (nastavak)

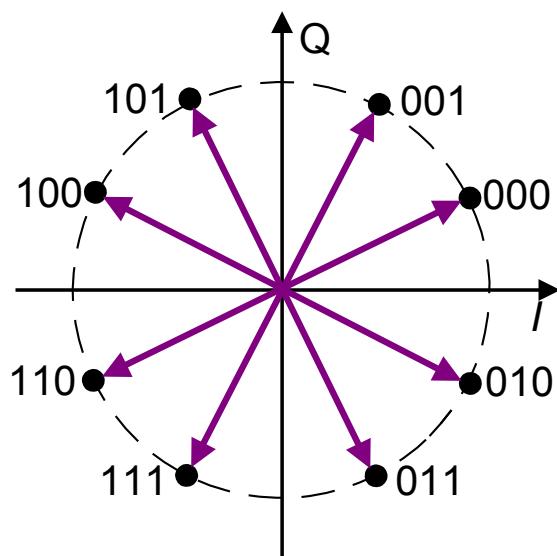
- Brzina prijenosa simbola upola manja od brzine prijenosa binarnih znakova.*
- Spektralna učinkovitost idealno iznosi 2 bit/s/Hz.*

ovojnica spektra snage QPSK-signala



Modulacijski postupak 8-PSK

- U modulacijskom postupku 8-PSK osam je stanja faze i to:
 - $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ$ i 180° u jednoj varijanti ili,
 - $\pm 22,5^\circ, \pm 67,5^\circ, \pm 112,5^\circ$ i $\pm 157,5^\circ$ u drugoj varijanti.
- Broj simbola iznosi $M = 8$. Svakom simbolu (stanju faze) pridružuju se tri bita odnosno *tribit*.



- *Spektralna učinkovitost* idealno iznosi 3 bit/s/Hz.
- Ovojnica spektra snage odgovara onoj u BPSK ili QPSK s tim da je $T_0 = 3\tau$.
- Postupak 16-PSK jako je osjetljiv na smetnje – rijetko se koristi.

Diferencijalna PSK — DPSK

- Dvije su temeljne vrste PSK-signala s obzirom na način pridruživanja informacije:
 - Kod *koherentnih PSK-popstupaka*, npr. CBPSK (*Coherent BPSK*) ili CQPSK (*Coherent QPSK*) informacija je sadržana u relativnoj fazi moduliranog signala.
 - Demodulacija se može obavljati samo koherentnim postupcima tj. izravnom usporedbom faza moduliranoga i referentnog signala.
 - Zahtjev za poznavanjem faze referentnog signala iz odašiljača predstavlja poteškoću u uvjetima mobilnog odašiljača i/ili prijamnika.
 - U diferencijalnim postupcima informacija nalazi u promjeni faze moduliranog signala.
 - Pri demodulaciji se faza simbola uspoređuje s fazom prethodnog simbola, drugim riječima utvrđuje se diferencijalna faza.
 - Odgovarajući se postupci onda nazivaju *diferencijalnom PSK* (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*).

Diferencijalna PSK — DPSK (nastavak)

- Kvantitativne promjene faze diferencijalnih postupaka uzimaju se jednakima absolutnim vrijednostima faze kod koherentnih postupaka.

Pravilo pridruživanja promjena faze simbola

Modulacijski postupak	Binarni znakovi	Promjena faze
DBPSK	0	0
	1	π
DQPSK	00	0
	01	$\pi/2$
	11	π
	10	$3\pi/2$

Diferencijalna PSK — DPSK (nastavak)

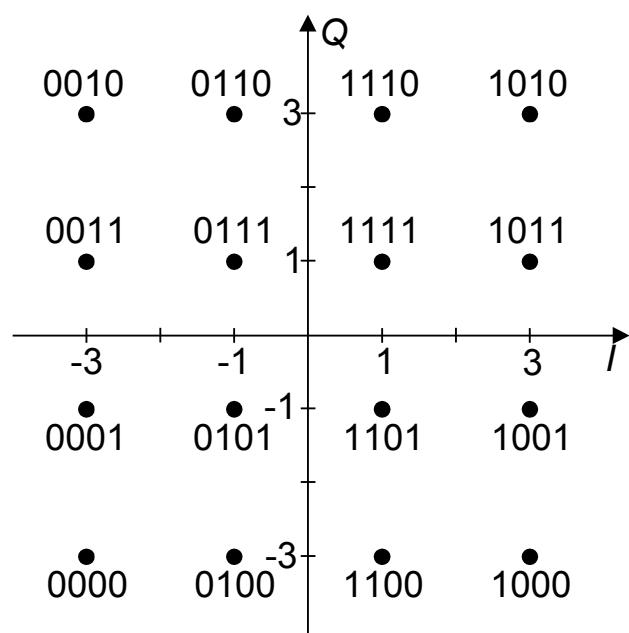
Faze simbola koherentnoga i diferencijalnog PSK-signala za jedan primjer niza binarnih znakova

Niz binarnih znakova	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Faza CBPSK-signala	π	0	π	π	0	0	0	π	0	0
Faza DBPSK-signala	π	0	0	π	0	0	0	π	π	π

Niz binarnih znakova	10	11	00	01	00
Faza CQPSK-signala	$3\pi/2$	π	0	$\pi/2$	0
Faza DQPSK-signala	0	$3\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	π

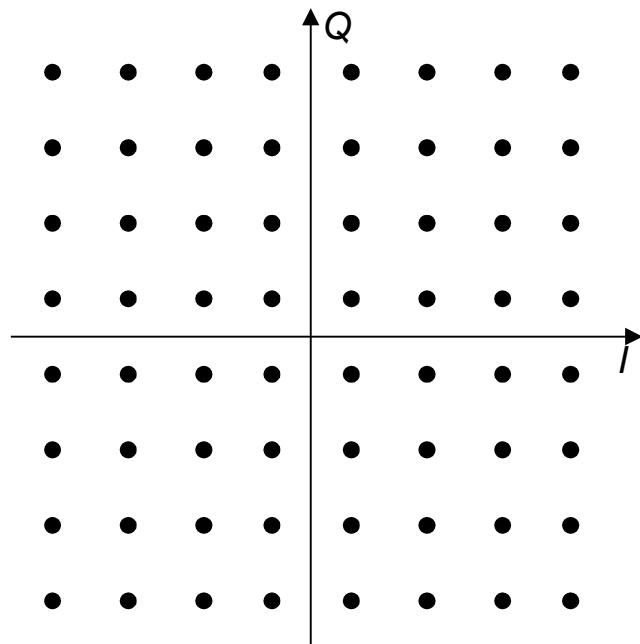
Kvadraturna modulacija amplitude – QAM

- *Kvadraturna modulacija amplitude* (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) nastaje kad dva međusobno neovisna diskretna signala moduliraju amplitude dviju kvadraturnih komponenti sinusnoga prijenosnog signala.
 - QAM pripada skupini tzv. hibridnih modulacijskih postupaka kod kojih se modulacijom mijenjaju dva parametra nosioca: amplituda i faza.



- 4-QAM u potpunosti je istovjetan QPSK.
- Svakome od šesnaest simbola 16-QAM postupka pridružuje se po četiri bita, pa je trajanje simbola četiri puta dulje od trajanja bita ($T_0 = 4\tau$).
- Najviši teorijski iznos spektralne učinkovitosti za 16-QAM iznosi 4 bit/s/Hz.

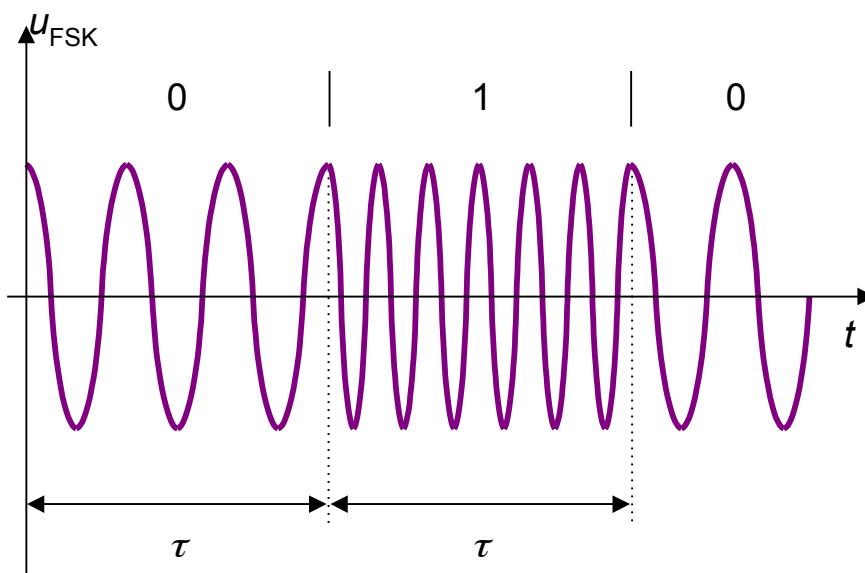
Kvadraturna modulacija amplitude – QAM



- Još se veća spektralna učinkovitost postiže pridruživanjem po šest bitova svakom simbolu QAM-signala što bi idealno dalo 6 bit/s/Hz. Za ostvarenje toga potreban je modulacijski postupak s 64 različita simbola. 64-QAM jedan je od takvih postupaka.
- Pri dalnjem povećanju broja simbola moduliranog signala (postupak 256-QAM npr.) raste spektralna učinkovitost, ali i osjetljivost na smetnje.
- Povećani zahtjevi na odnos signala i šuma ograničavaju najveći mogući broj stanja QAM-signala.

Diskretna modulacija frekvencije – FSK

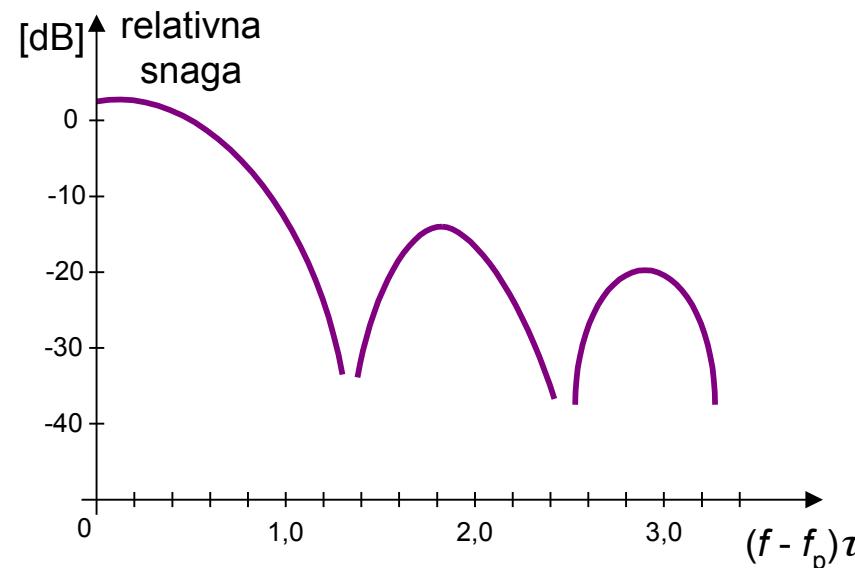
- Simboli FSK-signala (FSK, *Frequency Shift Keying*) odgovaraju sinusnim titrajima različitih diskretnih frekvencija.
 - Osim koherentnima FSK-signal se može demodulirati i nekoherentnim postupcima.
 - Binarna diskretna modulacija frekvencije (BFSK, *Binary Frequency Shift Keying*) rabi dva simbola odnosno dvije frekvencije.



- Indeks modulacije jednak je: $m_{\text{fsk}} = \Delta f / R_S$, Δf – razmak diskretnih frekvencija.
- Modulacijski postupci M -FSK koriste M simbola, odnosno M frekvencija.
Primjer: *Kvaternarna FSK*, 4-FSK, sadrži četiri simbola odnosno frekvencije.

Diskretna modulacija frekvencije – FSK

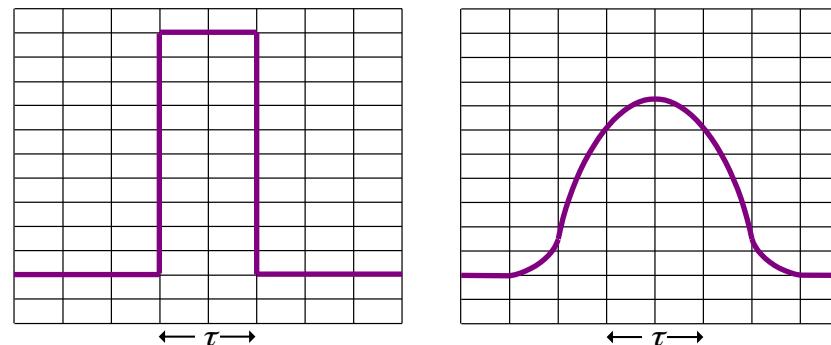
Ovojnica spektra snage BFSK-signala za $m = 0,25$



- Radi smanjenja širine zauzetog pojasa frekvencija filtriranjem se oblikuju impulsi diskretnoga modulacijskog signala. Koriste se niskopropusni filtri:
 - filtri s kosinusno zaobljenom frekvencijskom karakteristikom,
 - Gaussovi filtri u kojih impulsni odziv filtra odgovara Gaussovoj funkciji.

Gaussova – GFSK

- Gaussova diskretna modulacija frekvencije (GFSK, *Gaussian FSK*) primjenjuje Gaussov niskopropusni filter.
 - Nakon filtriranja modulacijski signal gubi svoja diskretna obilježja i on postaje kontinuirana funkcija vremena.



- Zbog ograničavanja širine pojasa dolazi do proširenja impulsa modulacijskog signala što je uzrokom interferencije među simbolima (ISI, *Inter-Symbol Interference*).
- Normirana širina pojasa filtra jednaka je $B \cdot T_0$, odnosno $B \cdot \tau$ u binarnih modulacija. S B označena je tzv. 3-dB širina pojasa Gaussovog filtra. Kod jedne vrste WLAN-a koriste se filtri s $B \cdot T_0 = 0,5$.

Kvaliteta modulacije

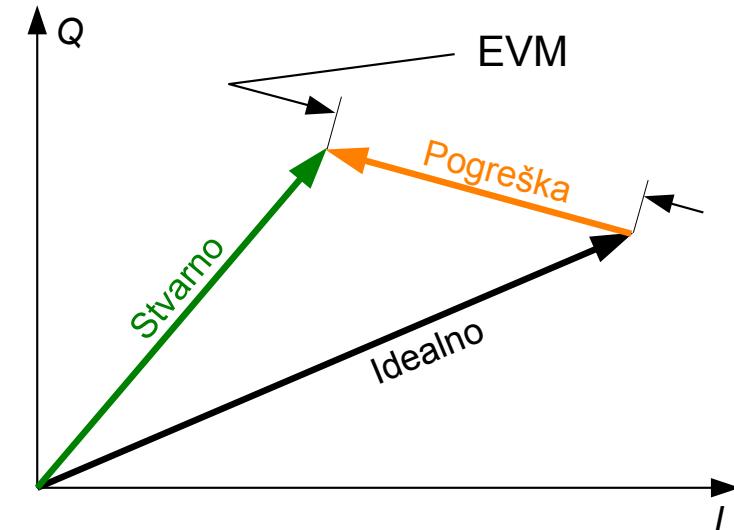
- Pogreške su uzrokom promjena parametara simbola moduliranog signala.

– Izvori pogrešaka su:

- aditivni šum,
- nelinearna izobličenja,
- linearna izobličenja,
- fazni šum,
- sporedne emisije (*spurious*),
- ostale pogreške modulacije

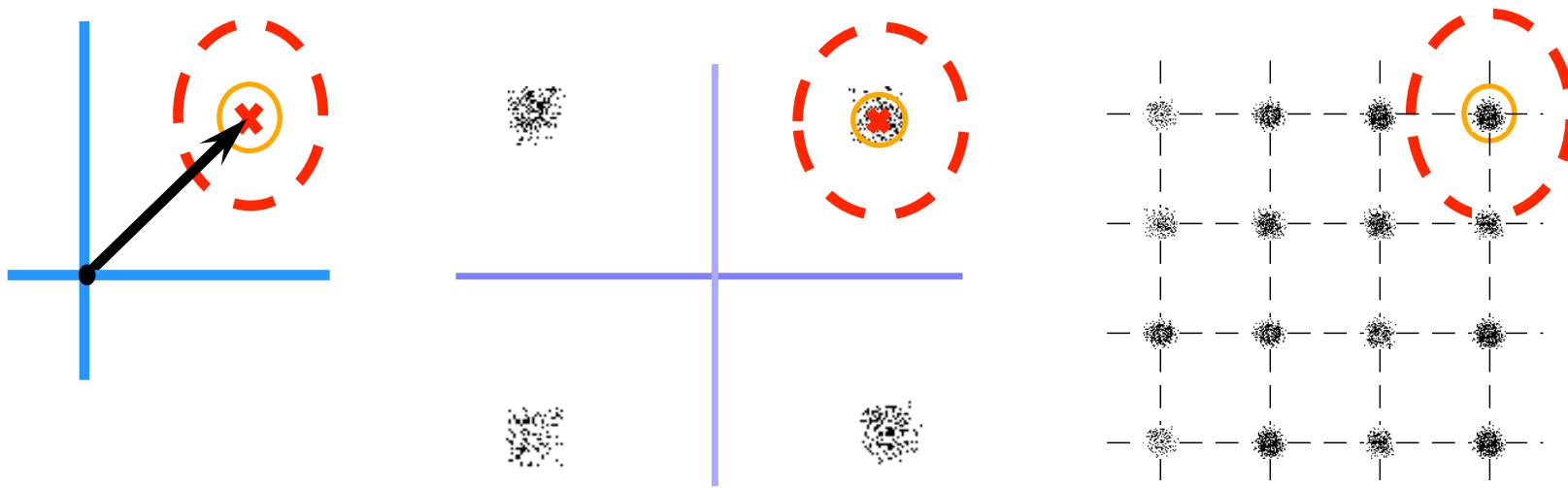
– Kao mjera kvalitete modulacije uzima se “veličina vektora pogreške”, EVM (*Error Vector Magnitude*).

- Svaki simbol ima svoj vektor pogreške.
- EVM se uzima kao efektivna vrijednost preko većeg broja simbola (običajeno je uzimati 1000 simbola).



Smetnje, šum i vjerojatnost pogreške

- Smetnja mijenja položaj vrha vektora moduliranog signala koji prikazuje stanje simbola moduliranog signala.
 - Stanje simbola se rasipa oko mesta na kojem bi on trebao biti.
 - Pri višoj razini smetnje povećava se površina po kojoj se on rasipa.
 - Kad superponirana smetnja prebaci vrh vektora moduliranog signala u susjedni kvadrant dijagrama stanja, kod PSK npr., doći će do pogrešnog prepoznavanja simbola što rezultira pogreškom u demodulaciji bita.



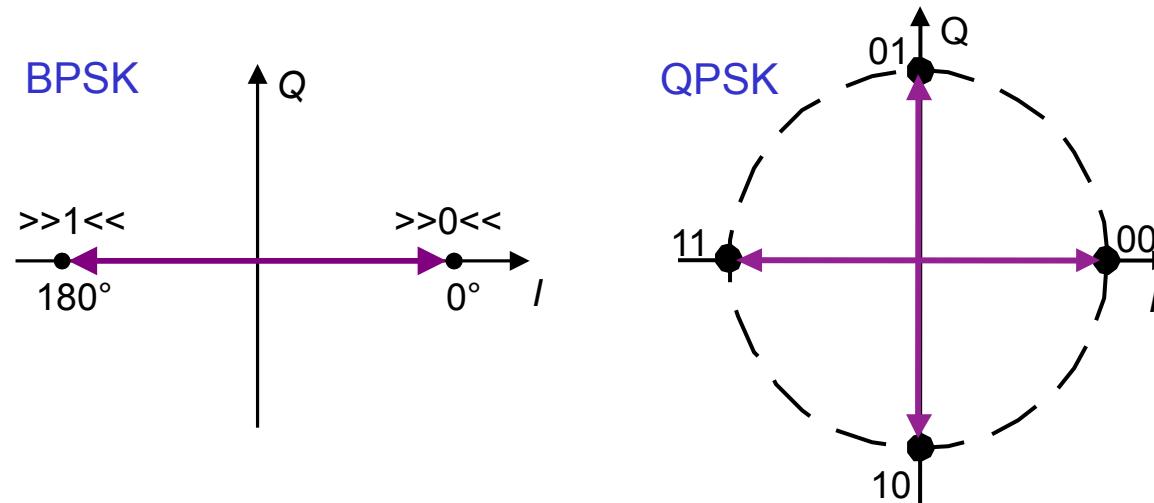
Smetnje, šum i vjerojatnost pogreške

(nastavak)

- Stanja BPSK-signala nalaze se na $\sqrt{2}$ puta većoj udaljenosti u ravnini I–Q u odnosu na odgovarajuća stanja QPSK-signala.
 - To pokazuje da je QPSK osjetljiviji na smetnje. Može se pokazati da je:

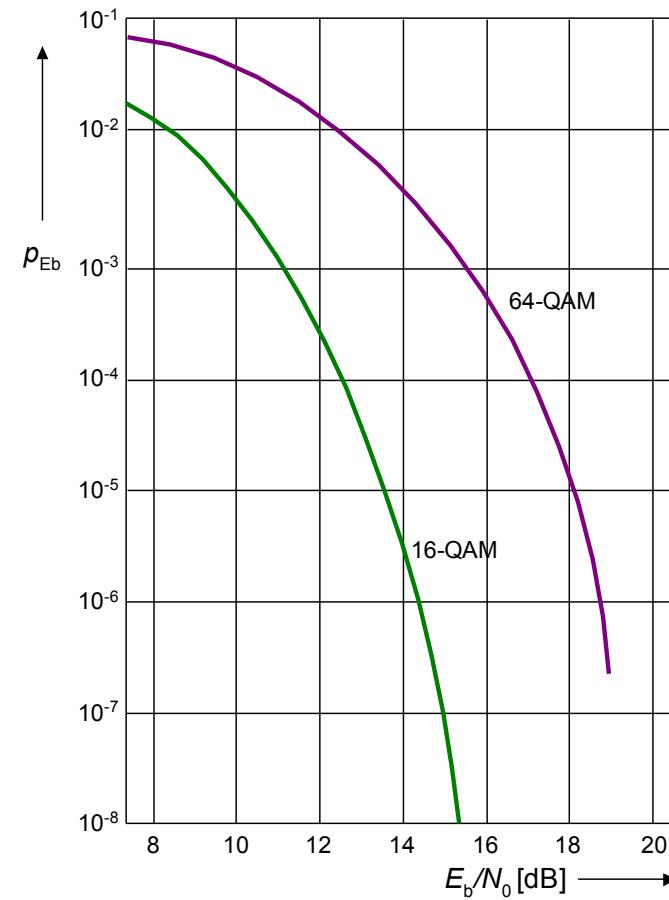
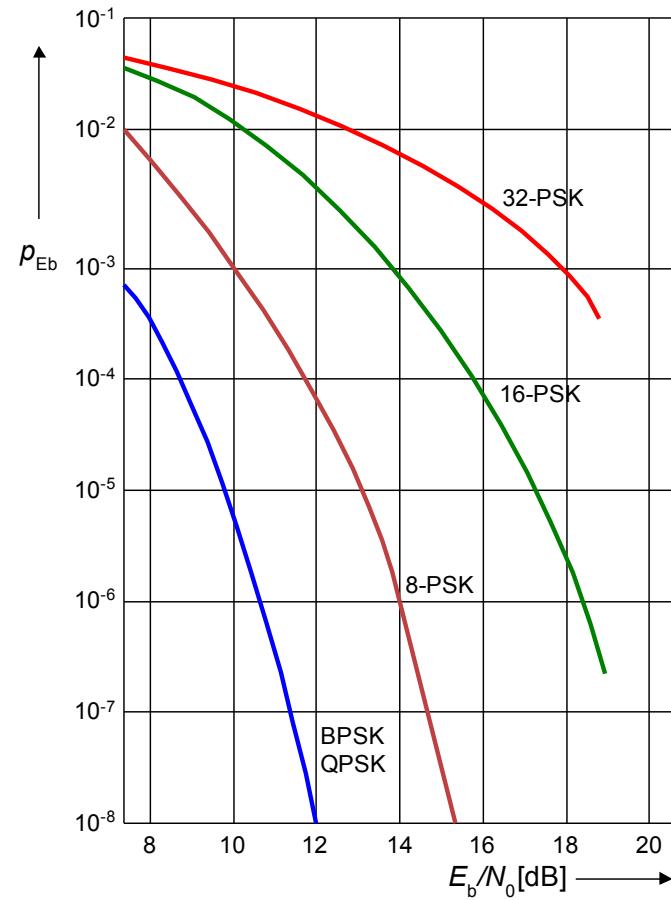
$$p_{\text{Es(QPSK)}} = 2 \cdot p_{\text{Es(BPSK)}}$$

- Stanja 8-PSK-signala nalaze se na još manjoj udaljenosti. Zato je 8-PSK još osjetljiviji na smetnje, tj. veća je vjerojatnost pogreške simbola.



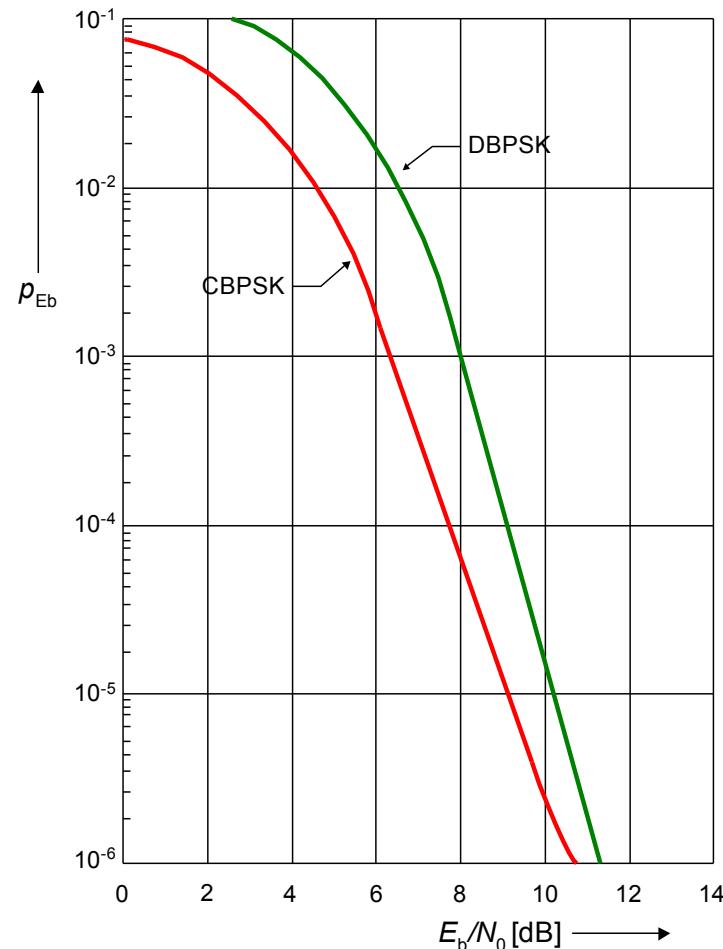
Vjerojatnost pogreške prijenosa

Vjerojatnost pogreške bita u M -PSK- i u M -QAM-sustavima

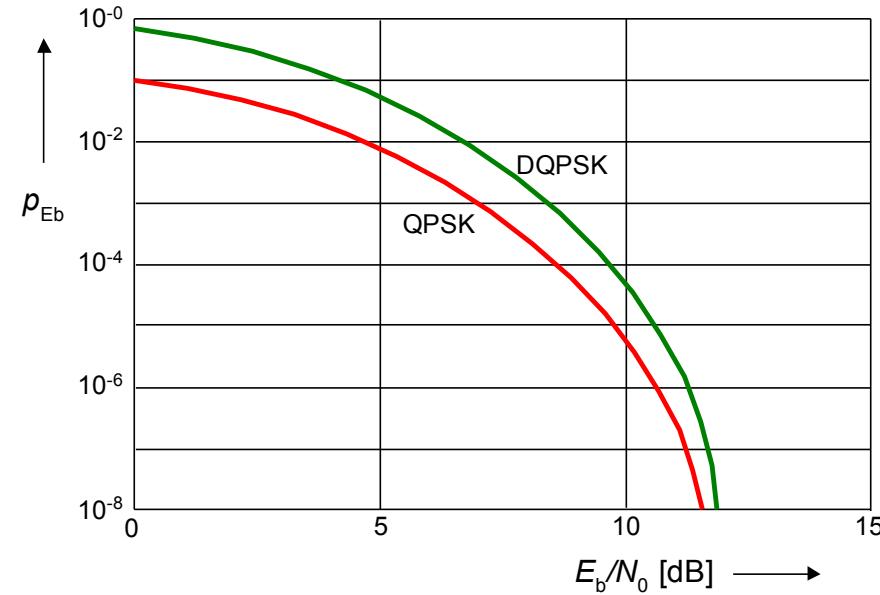


Vjerojatnost pogreške prijenosa (nastavak)

Vjerojatnost pogreške u koherentnim i diferencijalnim sustavima

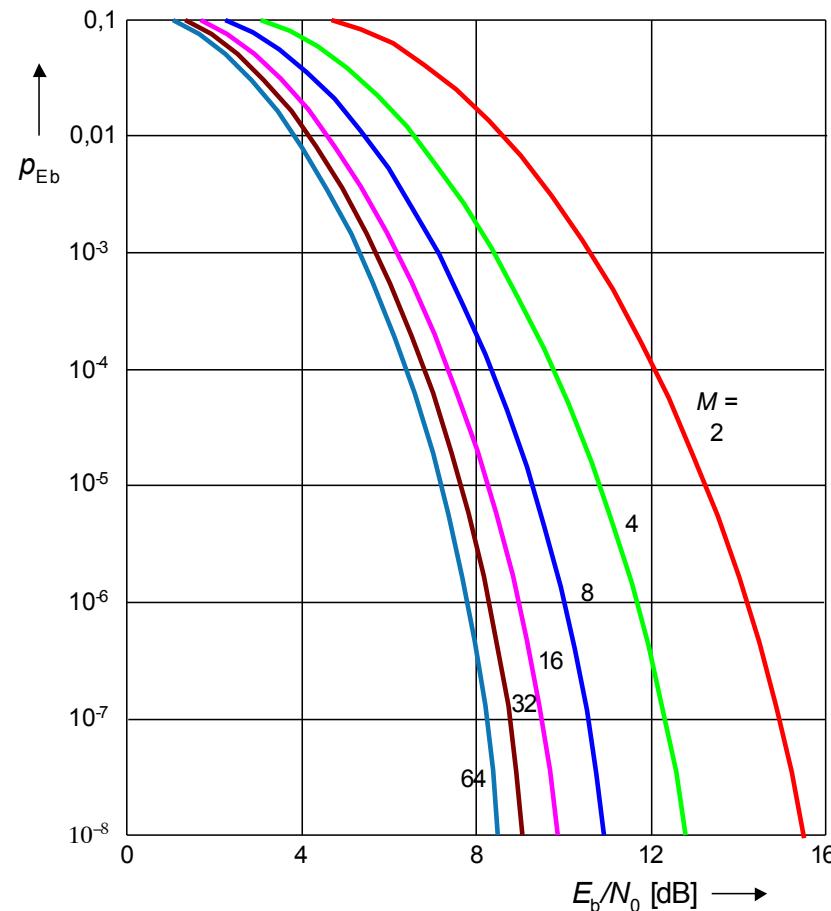


Diferencijalni postupci PSK osjetljiviji su na smetnje od odgovarajućih koherentnih postupaka.



Vjerojatnost pogreške prijenosa (nastavak)

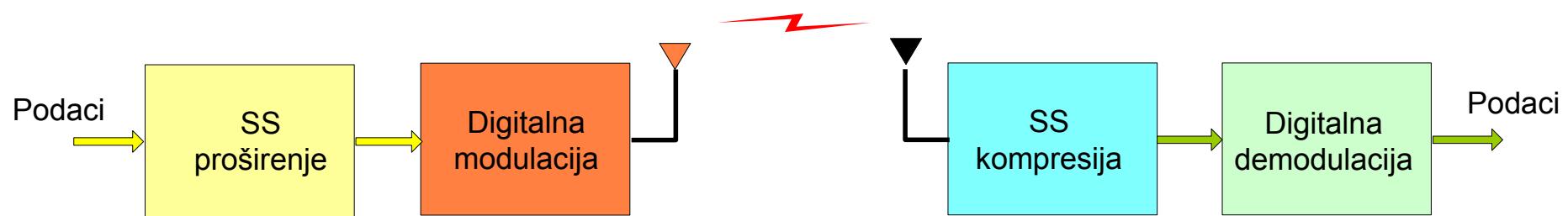
Vjerojatnost pogreške bita u nekoherentnom M -FSK-sustavu



- Sustavi s nekoherentnom demodulacijom pokazuju veću osjetljivost na smetnje od sustava koji rabe koherentni postupak.
- Usprkos tome, nekoherentna se demodulacija znatno češće susreće zbog jednostavne izvedbe odgovarajućih sklopova.

Tehnike proširenog spektra

Osnovna blok shema sustava s proširenim spektrom



- Kod sustava s proširenim spektrom (*SS, Spread Spectrum*) širina zauzetog RF pojasa neovisna je o informaciji u osnovnom pojasu. Ona je mnogo veća od minimalno potrebne širine pojasa za prijenos informacije određene kvalitete.

Tehnike proširenog spektra (nastavak)

- Proširenje pojasa može se realizirati na dva načina:
 - Postupak s *izravnim slijedom* DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).
 - Svaki informacijski impuls osnovnog pojasa proširi se nizom mnogo užih impulsa (podimpulsi, u stranoj literaturi oni se označuju kao *chip*).
 - Niz podimpulsa dio je tzv. PN-slijeda (*Pseudorandom Numerical*) određene duljine.
 - PN-slijed bi trebao imati karakteristike šuma tj. ciklus ponavljanja bi trebao težiti ka neizmjernom.
 - Postupak sa *skakanjem frekvencije* FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)
 - Pojedini dijelovi osnovne informacije prenose se nosiocima različitih frekvencija.
 - PN-slijed upravlja frekvencijama nosilaca. Zauzeti pojas najčešće je širi nego što je uobičajeno koristi kod DSSS sustava.

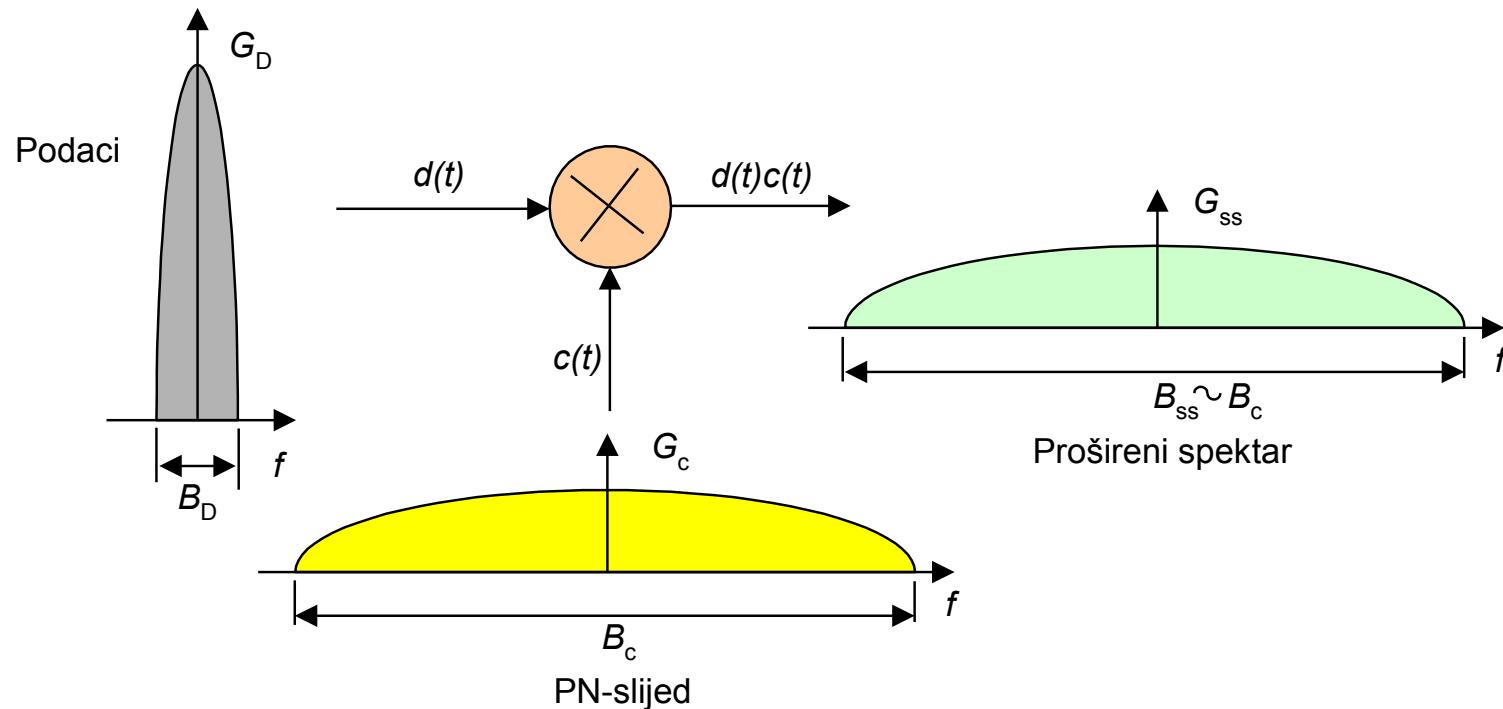
Sustavi s izravnim slijedom – DSSS

- Postoji mogućnosti održavanja veze u uvjetima slaboga prijamnog signala (mali SNR) te uz prisutnost uskopojasnih ili širokopojasnih smetajućih signala.
 - Procesni dobitak grubo pokazuje koliko pri ovoj tehnici SNR (*Signal to Noise Ratio*) može biti manji u odnosu na SNR kod klasičnih modulacija, a da se ostvari jednaka kvaliteta prijamnog signala.
 - *Procesni dobitak* G_p se pri DSSS određuje:
 - u vremenskom području kao omjer širine podatkovnog impulsa T_D i širine podimpulsa T_c koji se nalazi u PN-slijedu,
 - u frekvencijskom području kao omjer konačnog RF pojasa B_{SS} i pojasa informacijskog signala B_D (veličina B_D se često izražava kao brzina protoka informacijskih bita R_D što su u potpunosti kompatibilne veličine).

Red veličine ostvarivih procesnih dobitaka leži u rasponu od 10 do 1000 (10 do 30 dB). IEEE 802.11 radna grupa utvrdila je da za potrebe WLAN-a minimalna vrijednost procesnog dobitka mora iznositi barem 11.

Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

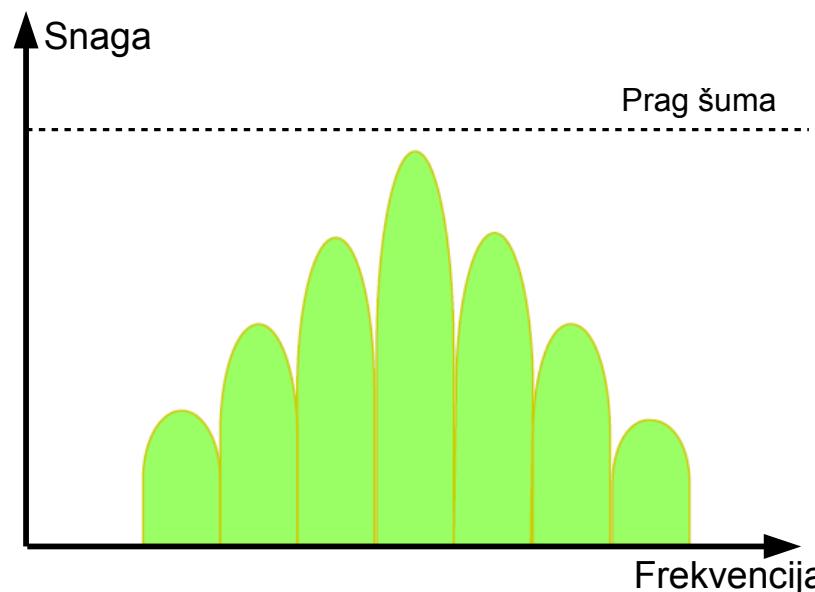
Obrada signala u odašiljaču



- Proširenje spektra se postiže množenjem svakog podatkovnog impulsa slijedom podimpulsa određenog trajanja.

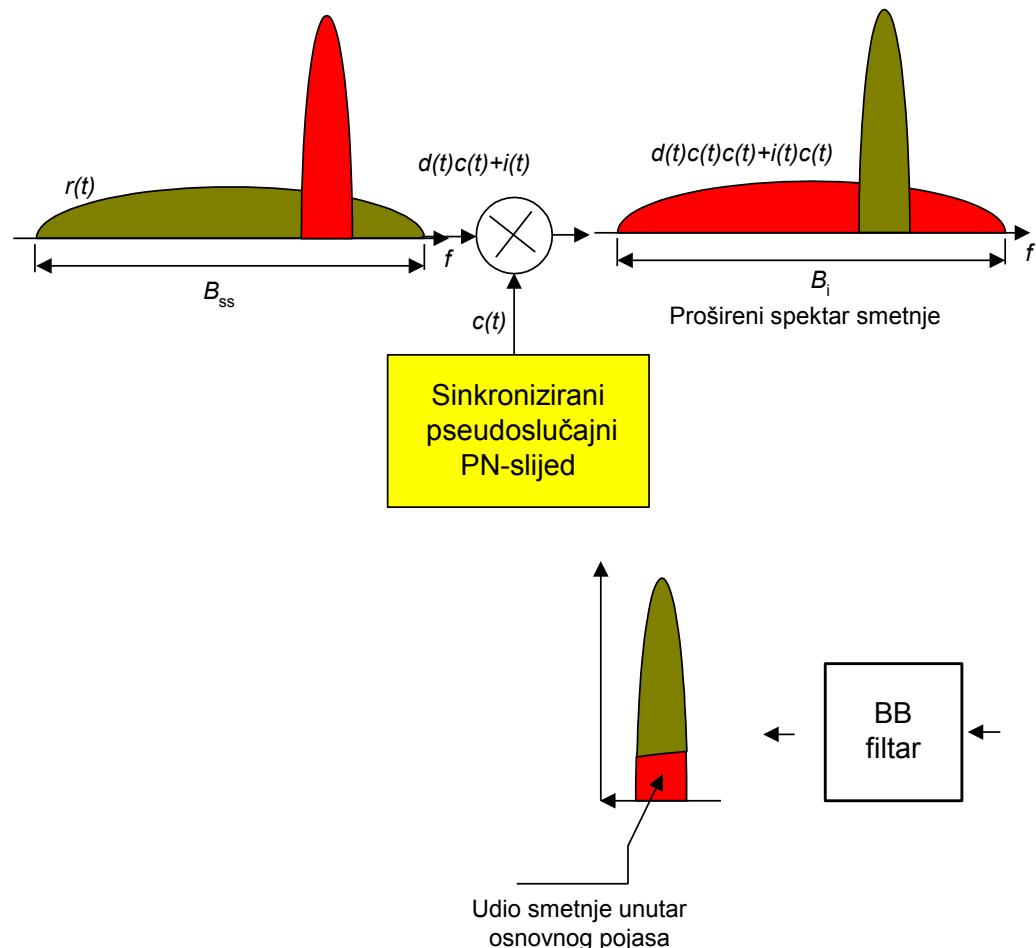
Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

- Signali nastali proširenjem spektra u frekvencijskom području izgledaju kao šum. Razina DSSS-signala pada ispod praga šuma bez gubitka informacije.
- Za prijamnike izvan sustava DSSS-signal predstavlja širokopojasni šum male snage. Takav signal nema utjecaja na većinu uskopojasnih prijamnika.



Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

Obrada signala u prijamniku



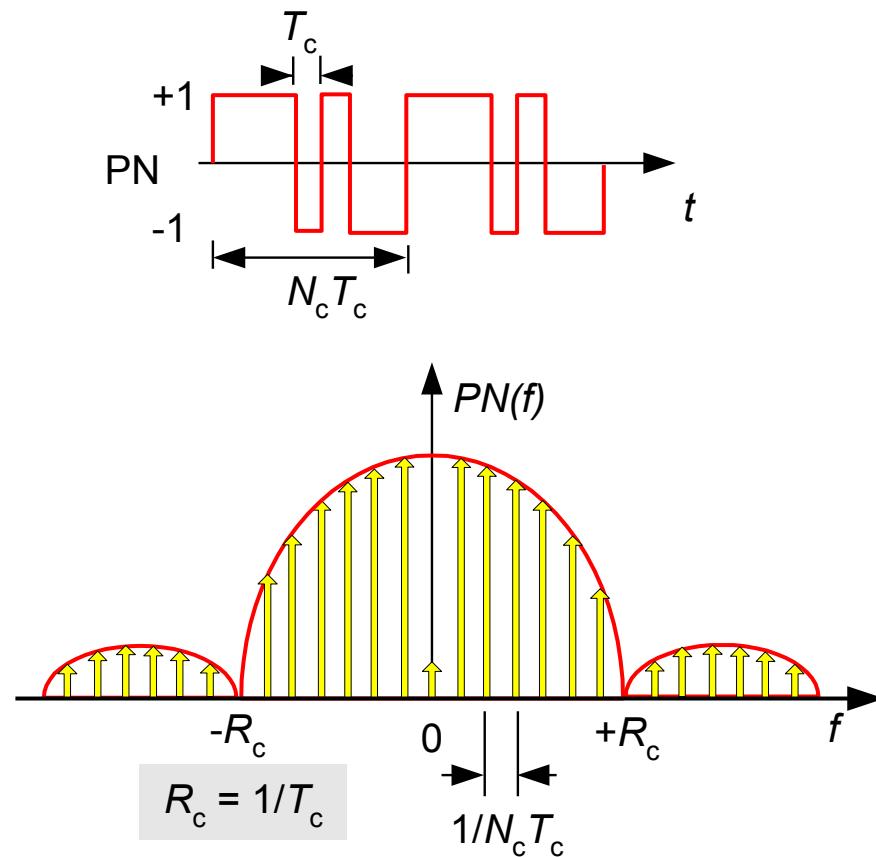
- Prošireni korisni signal sažima se na prijašnju širinu B_D , dok se sve smetnje (posebno one uskopojasne) proširuju.
- Na ovaj se način smanjuje gustoća spektra snage smetajućeg signala u pojasu B_D i poslije filtriranja od smetnje ostaje samo vrlo mali ekcesni šum.

BB-filtar (*Baseband*), filter u osnovnom pojasu frekvencija.

Sustavi s izravnim slijedom – DSSS (nastavak)

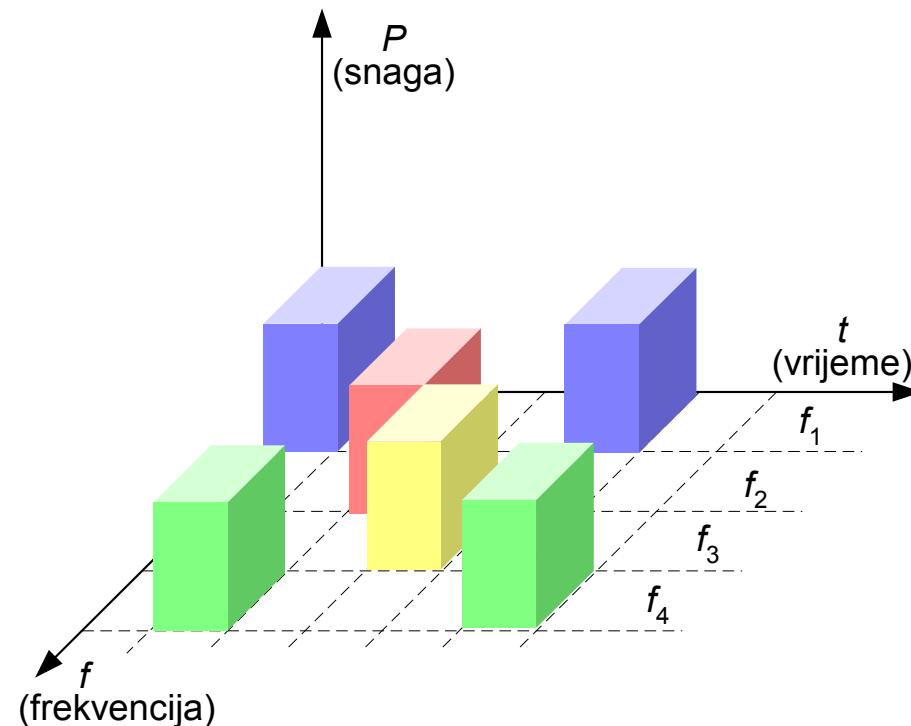
- Za proširenje podatkovnog informacijskog bita koristi se cijeli niz kodova čija svojstva umnogome određuju sveukupna svojstva cijelog DSSS sustava.
- Jednu grupu čine pseudoslučajni ili PN-kodovi. Oni se koriste i kod DSSS i kod FHSS.
- Neki zahtjevi na PN-kodove:
Udio «1» i «0» trebao bi biti ujednačen tako da se energija jednoliko raspodjeli preko cijelog frekvencijskog pojasa (svojstva bijelog šuma).
Mora imati izrazito nisku križnu korelaciju u odnosu na ostale korištene kodove. To je vezano uz razlučivost korisnika.

Primjer PN-slijeda od 7 podimpulsa



Sustavi sa skakanjem frekvencije – FHSS

- Radna frekvencija (frekvencija nosioca) skokovito se mijenja unutar određenoga frekvencijskog područja koje može biti čak za red veličine šire od onoga u DSSS.
- Promjenama frekvencije upravlja neki kod, najčešće PN-slijed.
- Za moduliranje nosioca skokovite promjene frekvencije najčešće se koristi postupak *M-FSK*.

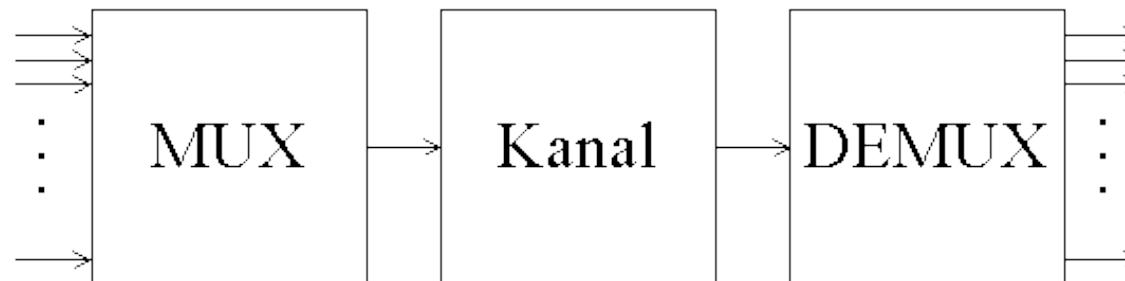


FHSS-sustavi (nastavak)

- FHSS-sustavi dijele se prema veličini dijela informacijskog slijeda koji se prenosi u jednom skoku.
 - *Sustavi sa sporim frekvencijskim skakanjem SFH (Slow Frequency Hopping)* prenose barem jedan M-FSK simbol (ili više njih) u intervalu između dva skoka frekvencije.
 - *Sustavi s brzim frekvencijskim skakanjem FFH (Fast Frequency Hopping)* između dva skoka frekvencije prenosi se dio jednog M-FSK simbola.
- Radna frekvencija svakoga komunikacijskog kanala mijenja se po drugom kodu.
 - Potrebno je sinkrono skakanje radne frekvencije odašiljača i prijamnika po istom kodu.
 - *Ortogonalni kodovi* nikad ne koriste iste frekvencije u isto vrijeme.

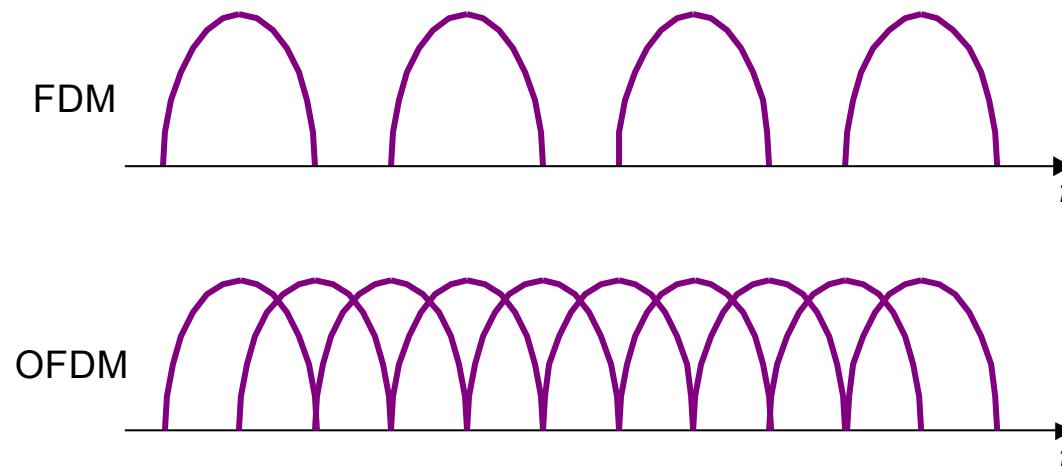
Što je OFDM?

- OFDM je akronim za *Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca* (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*).
- OFDM je u osnovi jedna tehnika multipleksiranja.
- OFDM se dobiva digitalnom obradom simbola moduliranog signala i naknadnom modulacijom.
- OFDM dijeli kanal na veći broj podpojaseva, podkanala.
- Digitalna informacija velike brzine raspodjeljuje se na podkanale gdje modulira podnosioce.
- Brzina prijenosa u svakom podkanalu je mala → prodljeno je trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu.



FDM i OFDM

- FDM** → Podkanali se ne smiju preklapati.
 Između susjednih kanala postoji zaštitni pojas.
 Koristi se nekoherentna demodulacija podkanala.
- OFDM** → Dopušta se određeno preklapanje podkanala.
 Ne dolazi do međudjelovanja podkanala zbog *ortogonalnosti* podnositaca.
 Koristi se koherentna demodulacija podkanala.



Što znači pojam *ortogonalan*?

- *Ortogonalnost* je svojstvo koje se pridružuje jedinkama koje su međusobno neovisne. Matematički to znači da se ni jedna od njih ne može se prikazati kao linearна kombinacija ostalih.
 - Podnosioci sinusnog oblika su ortogonalni na intervalu trajanja T_0 ako je:

$$\int_0^{T_0} \cos(2\pi f_v \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_z \cdot t) dt = \begin{cases} 0, & \text{za } f_v \neq f_z \\ \neq 0, (= T_0) & \text{za } f_v = f_z \end{cases}$$

- Uvjet " $= 0$ " bit će ispunjen samo ako se ova dva podnosioca na intervalu T_0 razlikuju za cijeli broj perioda \rightarrow frekvencije f_v i f_z moraju biti višekratnici iste temeljne frekvencije f_0 .

$$f_v = v \cdot f_0 \quad ; \quad f_z = z \cdot f_0$$

Što znači pojam *ortogonalan?* (nastavak)

- Najmanji razmak frekvencija dvaju podnosilaca Δf , a da oni budu ortogonalni, je onaj kad se podnosioci na intervalu T_0 razlikuju za jednu periodu.

$$\Delta f = \frac{1}{T_0} \quad ; \quad f_0 = \frac{1}{T_0}$$

- U OFDM-sustavima frekvencije podnosilaca odabiru se kao višekratnici temeljne frekvencije f_0 .

Modulacijski postupci u podkanalima

- Za prijenos podataka u podkanalima najčešće se koriste modulacijski postupci PSK ili QAM.
 - PSK i QAM su linearnih osobina → visoka spektralna učinkovitost.

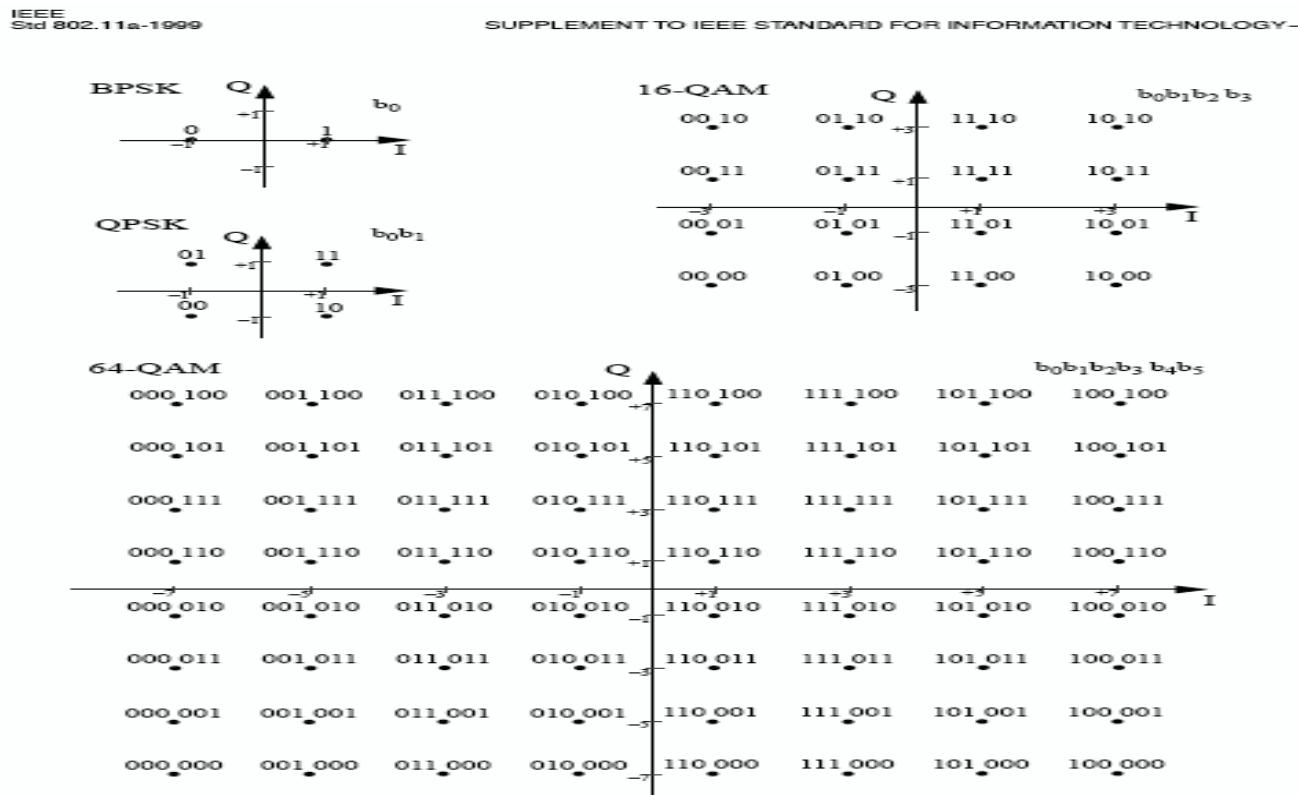


Figure 116—BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM constellation bit encoding

Modulacijski postupci u podkanalima

(nastavak)

IEEE
Std 802.11a-1999

SUPPLEMENT TO IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY—

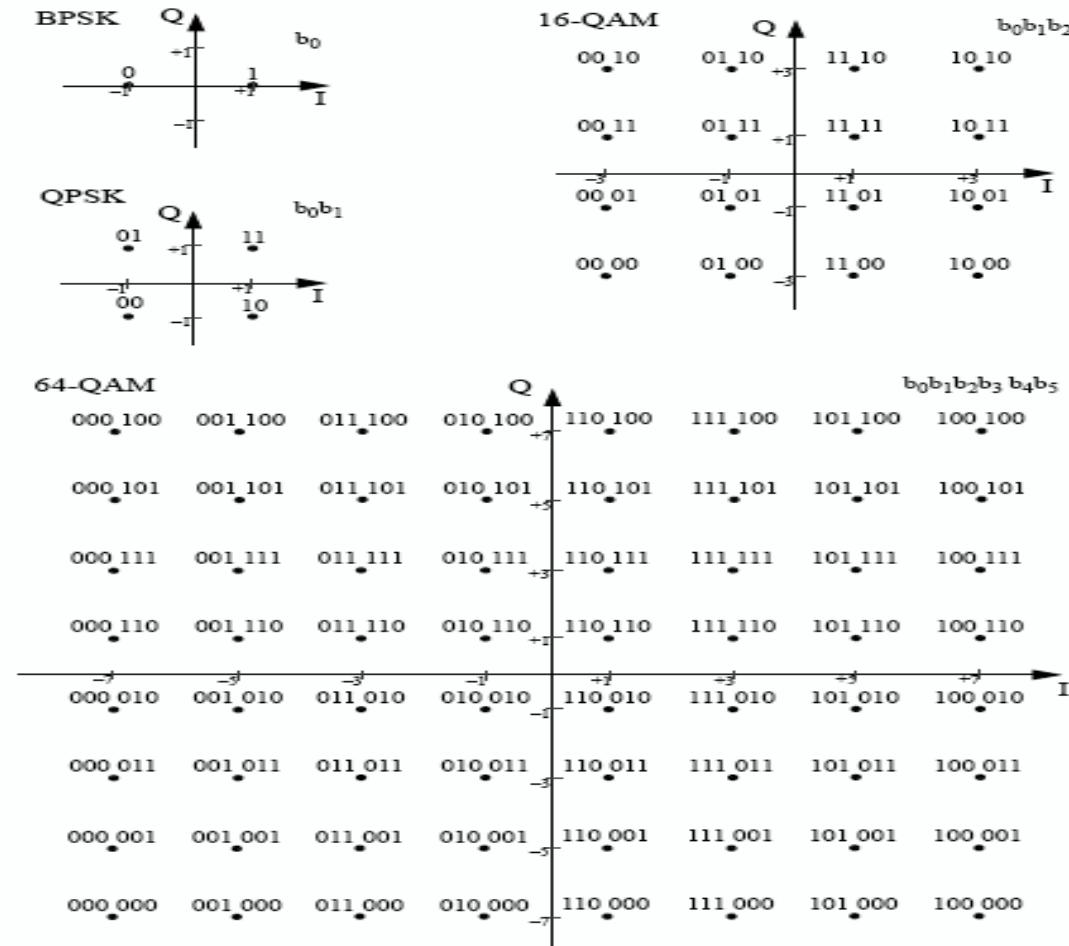
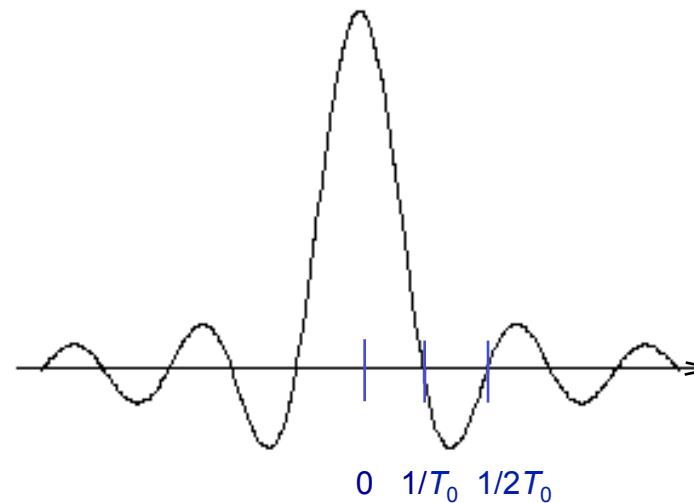


Figure 116—BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM constellation bit encoding

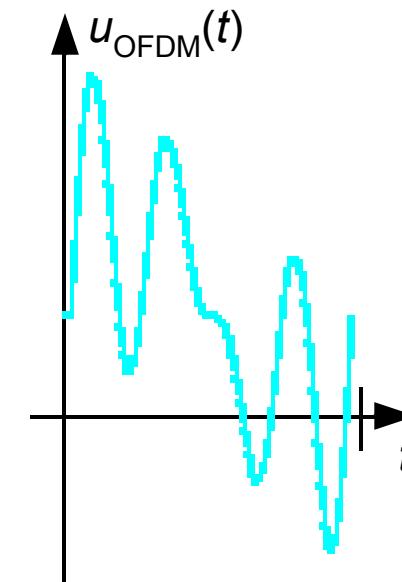
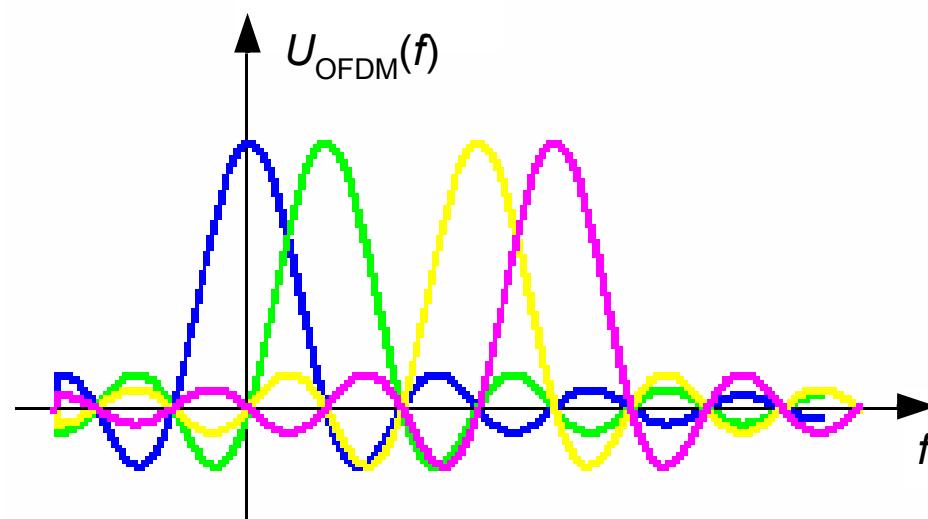
Spektar OFDM-signala

- U PSK- ili QAM-postupcima modulacijski su signali pravokutnog oblika.
- Ovojnica spektra takvih signala zato slijedi oblik funkcije $(\sin x)/x$.
- Nultočke ovojnice spektra nalaze se na višekratnicima od $1/T_0$ gdje je T_0 trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu.

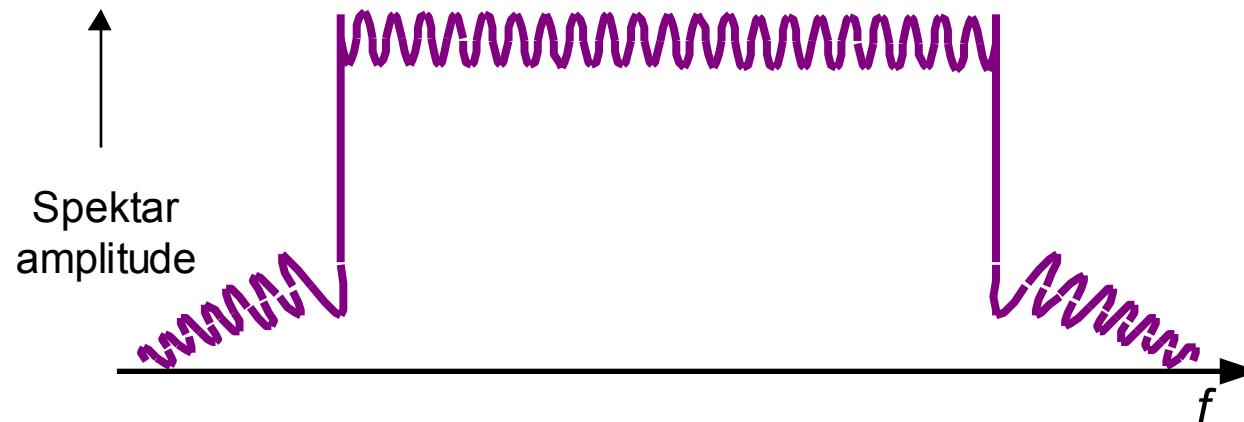


Spektar OFDM-signala (nastavak)

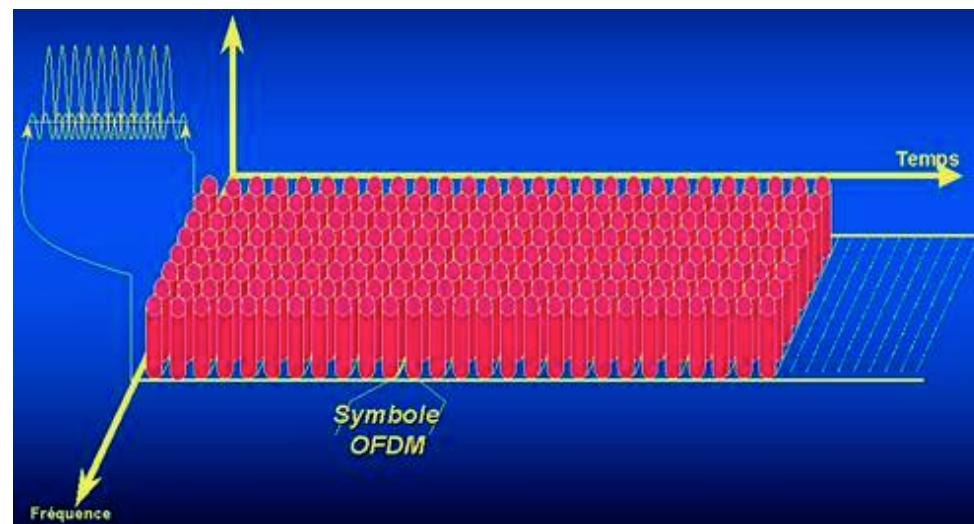
- Podnosioci u OFDM-kanalu su ortogonalni → nalaze se na razmaku $1/T_0$ na frekvencijskoj osi.
- Svaki od podnosioca dolazi u nultu točku spektra ostalih moduliranih podnosioca → nema *interferencije među nosiocima* u pojedinim podkanalima (ICI, *Inter-Carrier Interference*).



Spektar OFDM-signala (nastavak)



Vremensko-frekvencijski prikaz OFDM-simbola



Tehnika dobivanja OFDM-a

- Uzorci simbola moduliranog signala svakog podkanala nastaju tako da se uzorci funkcije svakog podnosioca (uzorci funkcija oblika $e^{j\omega_0 t}$), koji su predviđeni odgovarajućima kompleksnim brojevima, pomnože s odgovarajućima kompleksnim brojevima na temelju dijagrama stanja PSK- odnosno QAM-signala, a koje određuje skupina binarnih znakova podataka.
- Uzorci simbola moduliranih signala svih podkanala na intervalu trajanja T_0 čine *simbol OFDM-signala* koji se sastoji od niza kompleksnih brojeva.
- Ti kompleksni brojevi simbola OFDM-signala onda moduliraju nosioc cijelog OFDM-kanala, koji je oblika $e^{j\omega_p t}$ i koji se nalazi na sredini OFDM-signala dodijeljenog pojasa frekvencija.
- Matematički se OFDM-signal, nastao iz N moduliranih OFDM-podkanala, može opisati kao:

$$\dot{U}_{\text{OFDM}_r} = \left[\sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_{r,i} e^{j2\pi f_i t_0} \right] e^{j2\pi a f_0 t} \quad \begin{array}{l} \text{prijenosni signal} \\ \text{modulacijski signal } \dot{g}(t) \\ \text{modulacijski simbol podnosioca} \end{array}$$

Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)

- OFDM-signal nastaje, dakle, kad modulacijski signal $\dot{g}(t)$, a koji se naziva OFDM-simbolom, modulira sinusni prijenosni signal $e^{j2\pi f_p t}$.
- Modulacijski signal zapisan u kontinuiranoj vremenskoj domeni glasi:

$$\dot{g}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_{r,i} e^{j2\pi i t / T_0}$$

- Jedan OFDM simbol $\dot{g}(t)$ definiran je unutar vremenskog okvira T_0 tj. $rT_0 \leq t \leq (r+1)T_0$, gdje je r neki cijeli broj
- Ako se uzme N uzoraka jednog OFDM simbola $\dot{g}(t)$ (diskretizacija u vremenu) u vremenskim trenucima $t_k = k \cdot T_0/N$ onda su uzorci signala $\dot{g}(t)$ oblika:

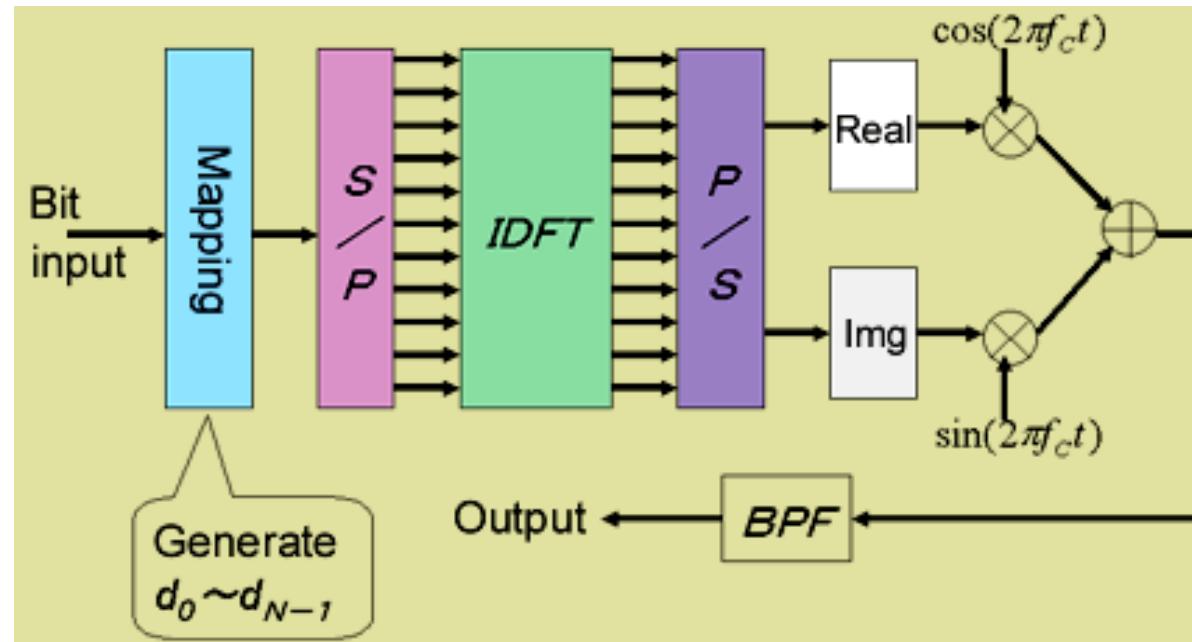
$$\dot{g}(t_k) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_i e^{j2\pi i t_k / T_0}, k \in [0, 1, 2, \dots, N-1]$$

$$\dot{g}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_i e^{j2\pi i \frac{k}{N}} = N \cdot \text{IDFT}(\dot{d}_i)$$

Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)

- S obzirom na strukturu simbola OFDM-signal-a izlazi da se on može dobiti postupkom *inverzne diskrete Fourierove transformacije* (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*).
- Inverzna diskretna Fourierova transformacija (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) realizira se algoritmima inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*).

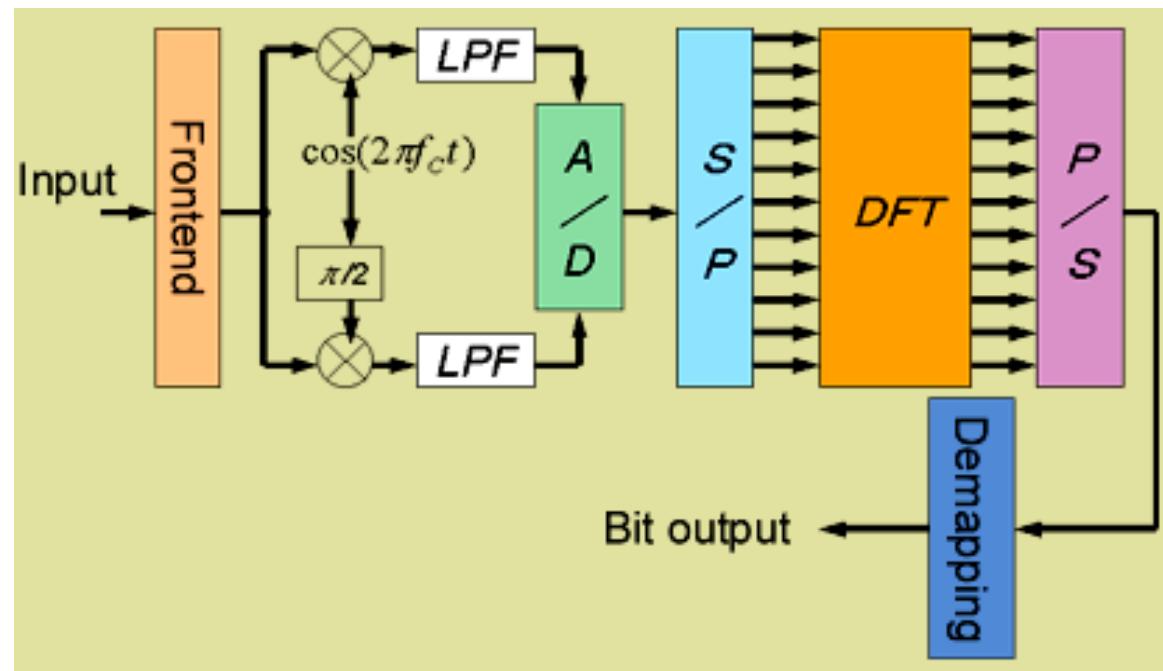
Tehnika dobivanja OFDM-a (nastavak)



- Zbog osobitosti IFFT-postupka zahtjeva se broj ulaznih podataka u IFFT-algoritam bude neka potencija od broja 2, dakle oblika 2^n .
- IDFT-proces obavlja DSP-čip (DSP, *Discrete Signal Processing*).

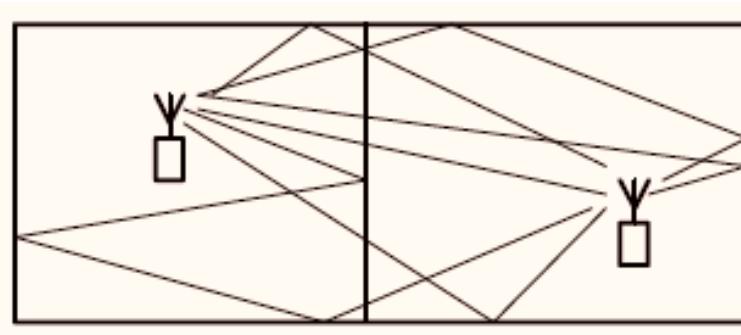
Obrada OFDM-signala u prijemu

- Na prijamnoj se strani uz pomoć postupka diskretne Fourierove transformacije (DFT, *Discrete Fourier Transform*) regeneriraju simboli (kompleksni brojevi) koji odgovaraju dijagramima stanja polaznih PSK- ili QAM-signala.
- Koriste se algoritmi brze Fourierove transformacije (FFT, *Fast Fourier Transform*).



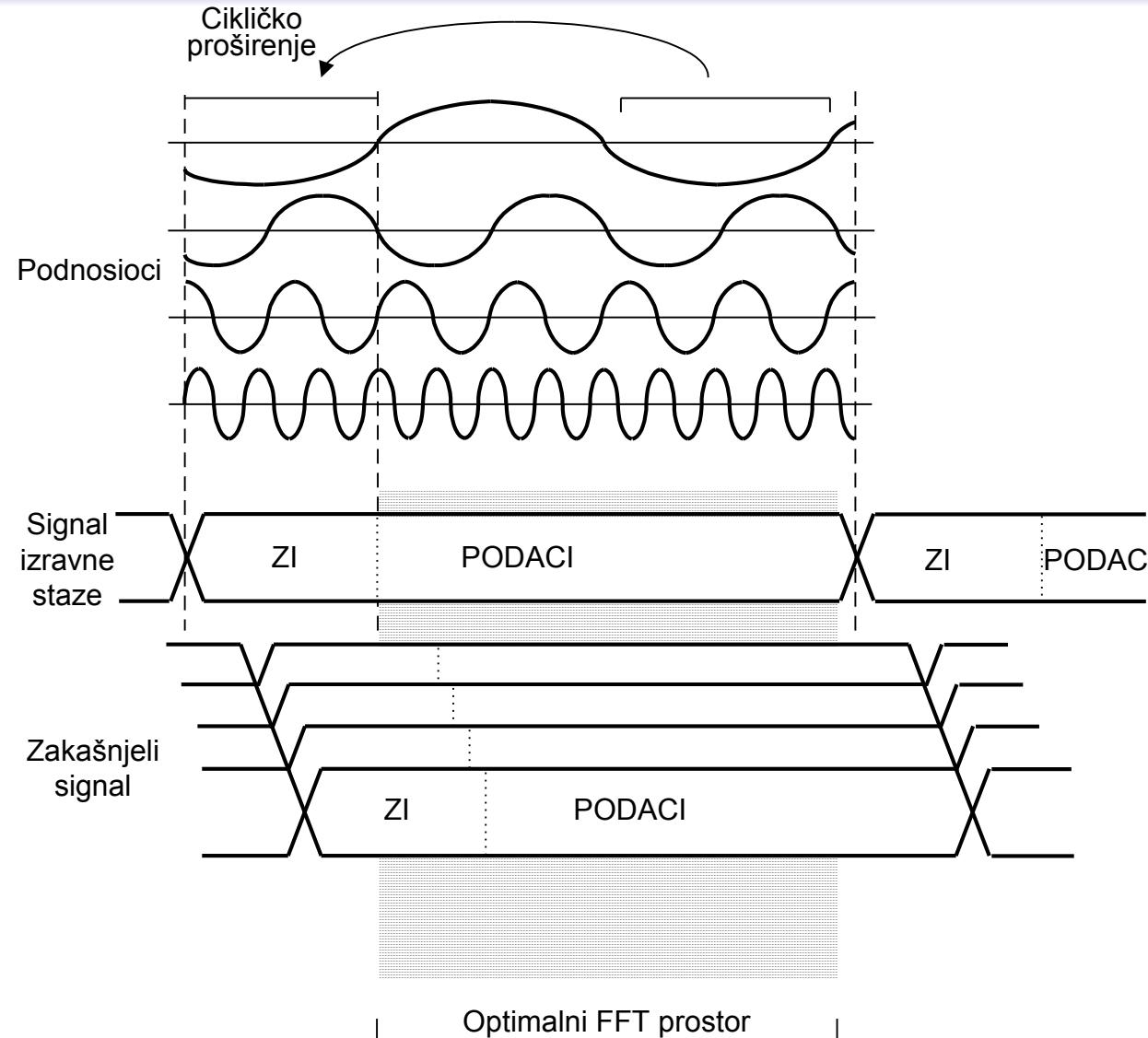
Utjecaj višestaznog prostiranja

- Kašnjenje primljenog signala, koji je stigao nekom neizravnom stazom, uzrokom je smetnji kod sustava s jednim nosiocem.



- U OFDM-sustavima produljeno trajanje simbola moduliranih signala u podkanalima ukazuje na povećanu otpornost na smetnje nastale od višestaznog prostiranja. Kašnjenja su tada manji dio trajanja simbola.
- Nepovoljne učinke kašnjenja pojedinih signala uklanja se dodavanjem tzv. *zaštitnog intervala* na početak OFDM-simbola.

Zaštitni interval i cikličko proširenje

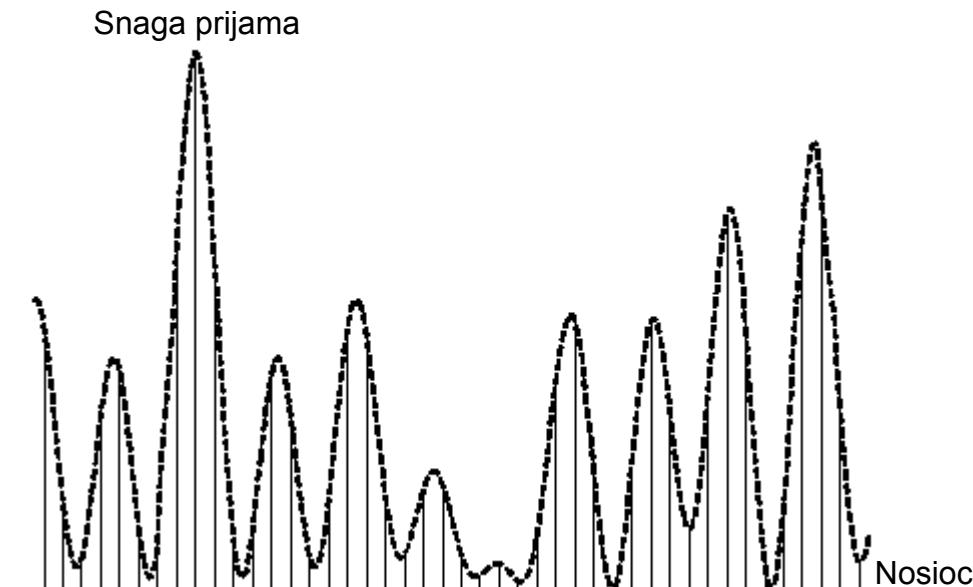


Obilježja OFDM-a u pogledu smetnji

- Zaštitni se interval dobiva cikličkim proširenjem signala. To se proširenje naziva *cikličkim prefiksom* OFDM-simbola.
- Veličina zaštitnog intervala uzima negdje do oko $T_0/4$ odnosno do oko četvrtine trajanja OFDM-simbola.
- Kad je kašnjenje signala manje od veličine zaštitnog intervala onda ne nastaju smetnje pri prijenosu.
- OFDM-pokazuje povoljne osobine i u uvjetima kad su smetnje koncentrirane na uski pojas unutar pojasa OFDM-signala (selektivni feding). Tad su «napadnuti» samo neki od podkanala odnosno mali dio cijelokupnog OFDM-simbola pa je mali broj pogrešno demoduliranih bita.
- OFDM je otporniji na uskopojasne smetnje od sustava s jednim nosiocem.

Obilježja OFDM-a u pogledu smetnji (nastavak)

Zbog višestaznog prostiranja različito je prigušenje pojedinih podkanala



- Pogreške prijenosa se koncentriraju na određene skupine bitova. To čini postupke zaštitnog kodiranja neučinkovitim.
- Zbog toga se prije modulacije bitovi ispremiješaju (*interleaving*) po nekom pravilu kako bi se nakon inverzne permutacije u prijamniku postigao slučajni karakter položaja pogrešnih bitova.

Kodirani OFDM – COFDM

- COFDM prilagođen je za uvjete izraženoga višestaznog prostiranja i kao posljedice izraženih selektivnih osobina radijskog kanala te smetnji u obliku sinusnog signala ili analognog TV-signala.
- COFDM primjenjuje postupke zaštitnog kodiranja (FEC, *Forward Error Correction*) koji se osnivaju na unošenju zalihosti (redundancije) u signal.
- Zaštitno se kodiranje obavlja uz pomoć blokovskih (npr. Reed-Solomon) ili konvolucijskih kodova.
- Korisnost koda (*code rate*) iznosi k/n ($k/n < 1$) ako se svakom bloku od k bita dodaje $n - k$ zalihosnih bitova.
- Alternativna metoda umjesto bitova za zaštitno kodiranje koristi simbole moduliranih podnositelaca → tehnika kodirane modulacije i primjena tzv. "rešetkastih kodova" (*Trellis Codes*; TCM, *Trellis Coded Modulation*).

Parametri OFDM-a u WLAN-u

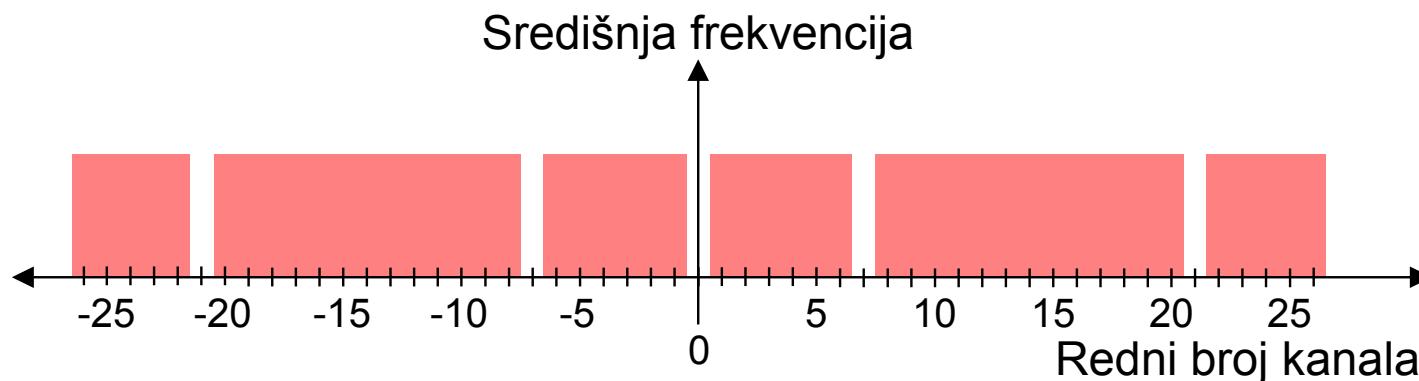
Temeljni parametri OFDM-sustava u WLAN-u prema IEEE normi 802.11a i IEEE normi 802.11g

Parametar	Vrijednost
Brzina prijenosa	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54 Mbit/s
Modulacijski postupak	BPSK; QPSK; 16-QAM; 64-QAM
Korisnost koda (FEC)	1/2; 2/3; 3/4
Broj podkanala	52
Broj pilotskih kanala	4
Broj informacijskih kanala	48
Trajanje OFDM-simbola	4 µs
Zaštitni interval – trajanje	800 ns
Razmak podnositaca	312,5 kHz
-3 dB širina pojasa	16,56 MHz
Širina OFDM-kanala	20 MHz

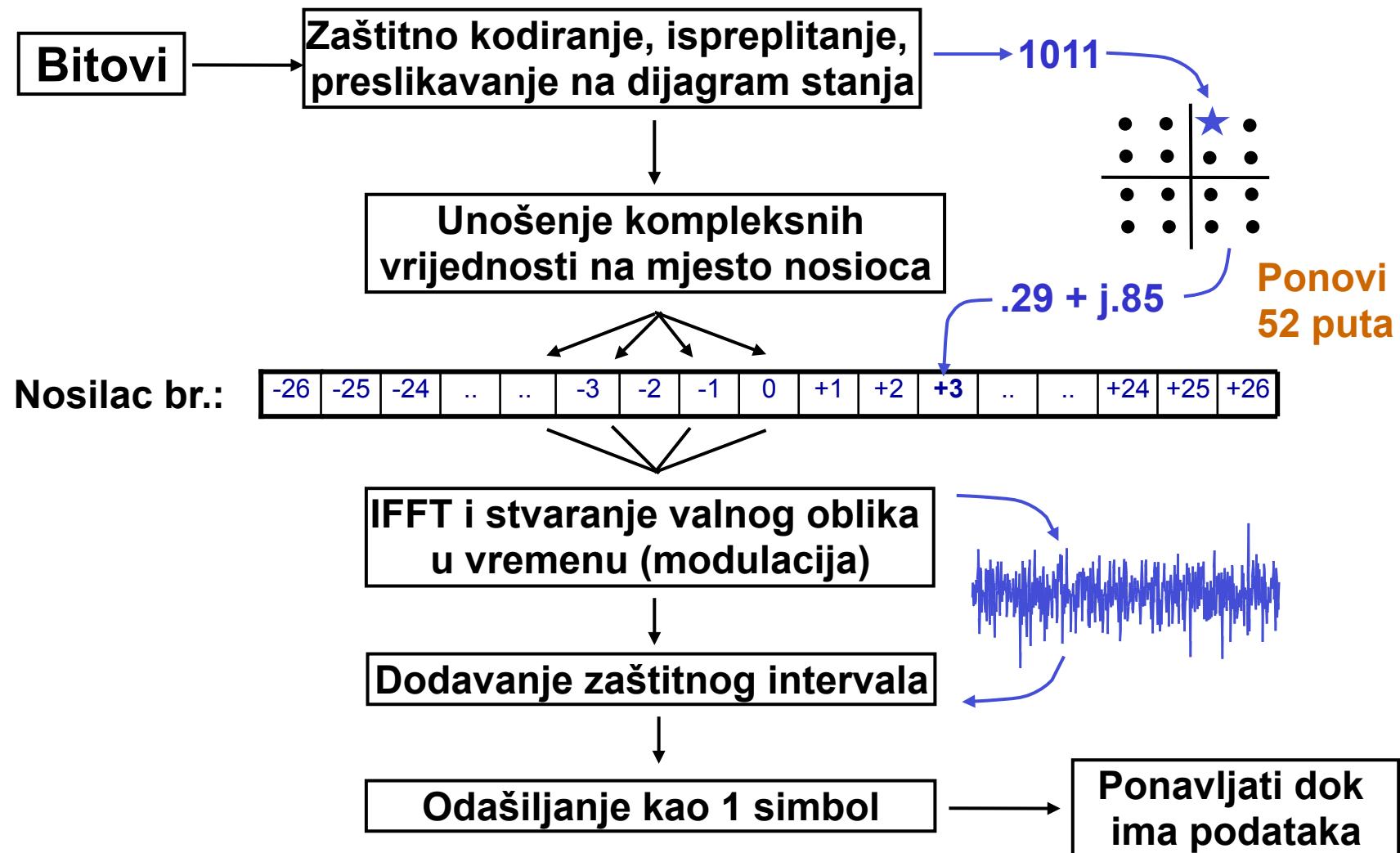
WLAN po IEEE normi 802.11g može raditi i u tehnici proširenog spektra.

Struktura OFDM-kanala u WLAN-u

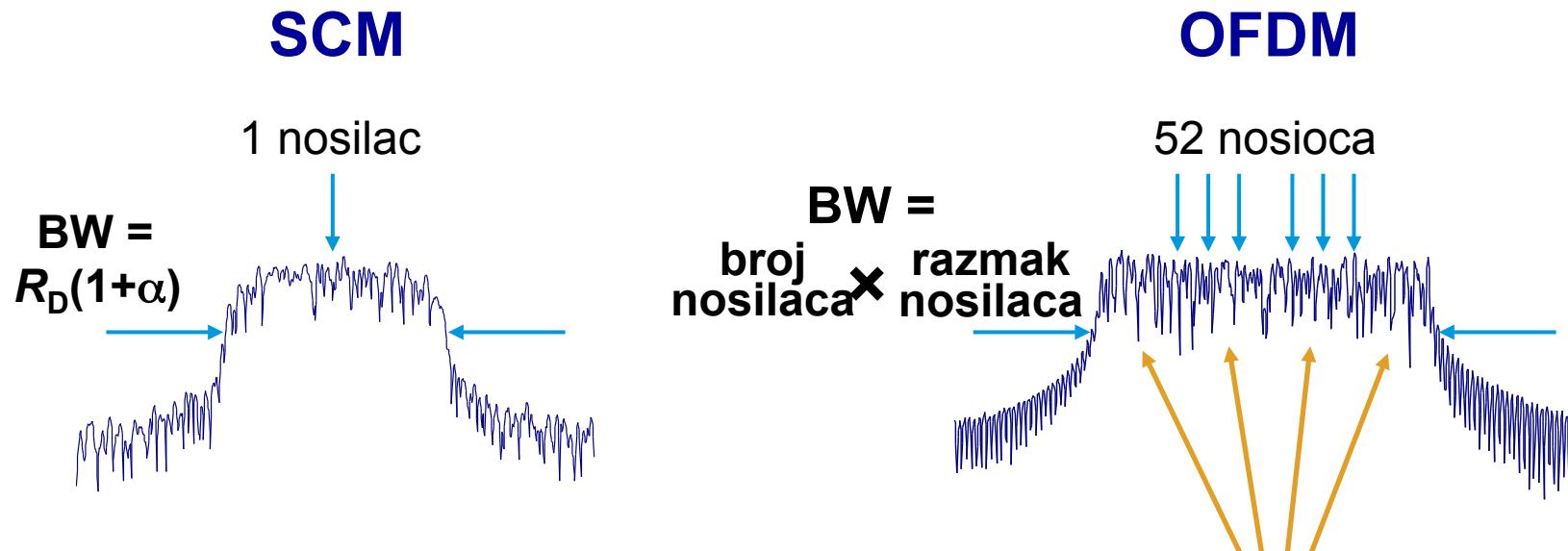
- Odabране vrijednosti parametara pokazuju se povoljnima posebno za zatvorene prostore.
 - Kako je zaštitni interval $T_{ZI} = 0,8 \mu\text{s}$ i trajanje OFDM-simbola $T_0 + T_{ZI} = 4 \mu\text{s}$ izlazi da je razmak frekvencija podnosiča onda jednak $1/T_0 = 312,5 \text{ kHz}$.
 - FFT-postupak je reda 64.
 - Sustav ima 52 podkanala od kojih se njih 48 koristi za prijenos informacije, a u preostala 4 podkanala su pilotski signali.
 - Podkanal broj 0 ne koristi se za prijenos. Pilotski se signali smještaju u podkanale br. -21; -7; +7 i +21 i oni se moduliraju fiksnim slijedom bitova.



Ilustracija dobivanja OFDM-a u WLAN-u



Obilježja OFDM-signala u WLAN-u



SCM — *Single Carrier Modulation*

- Uz pomoć pilotskih kanala prati se tijek promjena amplitude i faze unutar OFDM simbola.

Pilotski kanali

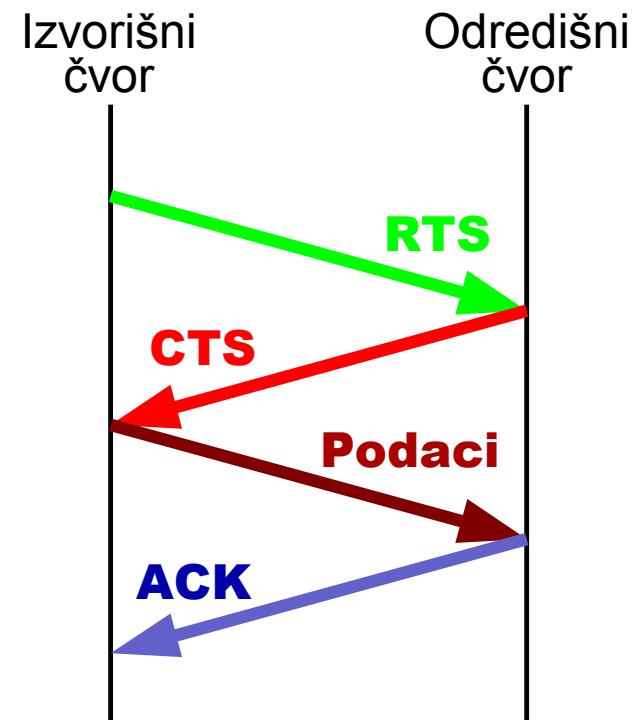
- -21, -7, +7, +21
- uvijek BPSK
- stalna amplituda i 2 faze
- koriste se kao referenca za demodulaciju

Metode višestrukog pristupa

- Postupci upravljanja pristupom prijenosnom mediju rješavaju problem kad dva ili više mrežnih čvorova žele odašiljati podatke u isto vrijeme. Oni u određenom trenutku dopuštaju samo jednom čvoru da pristupi mreži.
 - U fiksnim (žičanim) LAN-ovima rabe se dva načina upravljanja pristupom prijenosnom mediju:
 - višestruki pristup detekcijom nosioca i detekcijom sudara (CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect)*
U CSMA/CD mrežni čvor, koji želi odašiljati podatke, "osluškuje" rabi li trenutno neki drugi čvor mrežu. Ako ne, započinje odašiljati podatke. Nakon završetka odašiljanja ponovno "osluškuje" kako bi otkrio je li došlo do sudara zbog toga što je drugi čvor istodobno odašiljao. Kada dođe do sudara, svaki pojedini čvor čeka slučajno odabrano vrijeme prije nego započne ponovno odašiljanje.
 - prosljeđivanje pristupne riječi (token passing).*

CSMA/CA metoda višestrukog pristupa

- U radijskoj mreži mrežni čvor ne može znati je li došlo do sudara (*Collision Detection*) negdje u radijskom mediju. Zato čvorovi pretpostavljaju da uvijek dolazi do sudara osim kad su posebno obaviješteni da do toga nije došlo.
 - U radijskim Ethernet mrežama rabi se *višestruki pristup s detekcijom nosioca i izbjegavanjem sudara* (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).
 - Mrežni čvorovi rabe postupak usklađivanja u četiri koraka radi izbjegavanja sudara. Ako ne stigne konačna potvrda (ACK) o uspješnom prijemu podataka emisija se ponavlja.
 - Ponavljanje emisije razlogom je smanjenja propusnosti WLAN-a na oko 50% kapaciteta kanala.



Višestruki pristup TDMA, FDMA

- Svakome mrežnom čvoru koji koristi isti RF kanal dodjeljuje se određeni vremenski odsječak (**TDMA**, *Time Division Multiple Access*).
 - Čvor odašilje samo u dodijeljenom vremenskom odsječku u specificiranom RF kanalu.
 - TDMA je posebno prikladan za:
 - interaktivne govorne ili personalne komunikacije kao što su: razgovor, telefax, podaci, SMS i sl.
 - za aplikacije koje zahtijevaju veće širine pojasa npr: multimedija i videokonferencije.
- **FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*) – svaki čvor radi na svojoj frekvenciji (kanalu)
 - Prikladan za simetrični prijenos podataka.

Radijske pristupne mreže

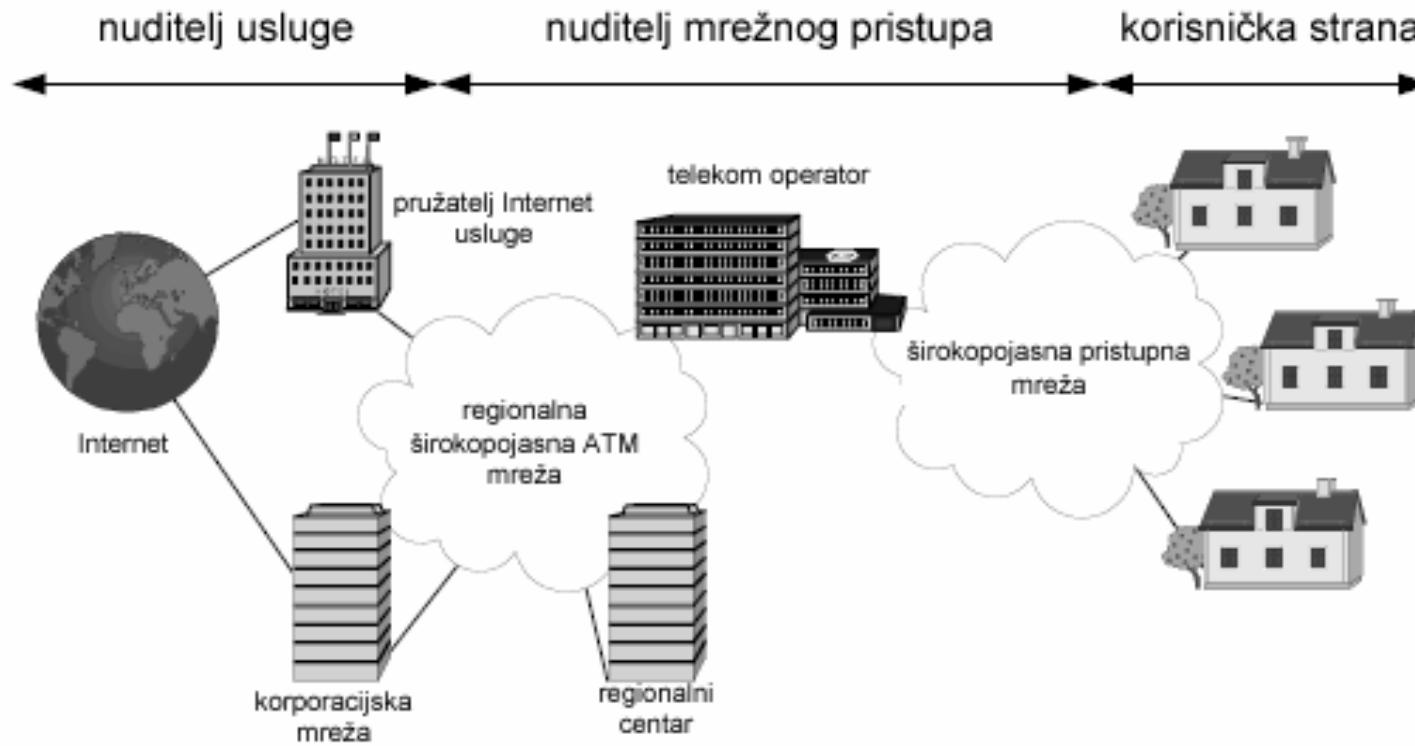
dr. sc. Jelena Božek

Radijske pristupne tehnologije

- razvoj Interneta donio je revoluciju u cijeloj telekomunikacijskoj mreži pa tako i u njezinom pristupnom segmentu
- Nove usluge zahtijevaju prijenosne kapacitete koji su puno veći od onih u PSTN (*Public Switched Telephone Network*)
- Primjenom metoda kompresije (JPEG, MPEG, ...) stvorena je lepeza usluga koje se temelje na prijenosu videosignal-a:
 - videokonferencije (dodatna usluga standardnoj govornoj usluzi),
 - telemedicina – davanje stručne ocjene na daljinu,
 - teleedukacija – učenje na daljinu,
 - prijenos digitalnog videosignal-a,
 - mrežne igre itd.

Pristupna mreža u telekomunikacijskom sustavu

- Pristupna mreža dio je cjelokupne telekomunikacijske mreže koji služi krajnjem korisniku za pristup osnovnoj mreži



Radijska lokalna petlja

- Radijska preplatnička linija (WLL, *Wireless Local Loop*) je pojam koji se rabi za radiokomunikacijsku vezu koja predstavlja zadnju fizičku vezu (*last mile*) putem koje se telekomunikacijskim korisnicima pruža pristup do fiksne telefonske mreže (POTS, *Plain Old Telephone Service*) ili širokopojasnog Interneta
- Postoji veliki broj WLL sustava i tehnologija
- Ostali pojmovi koji su izravno vezani uz WLL sustave su:
 - *Broadband Wireless Access* (BWA),
 - *Radio In The Loop* (RITL),
 - *Fixed-Radio Access* (FRA),
 - *Fixed Wireless Access* (FWA)

Radijske pristupne tehnologije

- Temeljni zahtjevi na radijske tehnologije:
 - prijenos podataka što većom brzinom,
 - prijenos podataka na što veću udaljenost,
 - što manja potrošnja električne energije iz baterije
- Koncept radijskih pristupnih mreža (*Wireless Area Networks*):
 - Radijska mreža za osobne potrebe (WPAN, *Wireless Personal Area Network*); IEEE norma 802.15

Služi za povezivanje prijenosnih i mobilnih uređaja (osobna računala, printeri, mobilni telefoni, zvučnici, ...) na ograničenom području.

Podržavaju prijenos govora i podataka. Manje je područje pokrivanja (tipično do 10 metara). Niže su brzine prijenosa (tipično 19,2-100 kbit/s, najviše oko 800 kbit/s (neke tehnologije i više)). Mrežni uređaji su malih dimenzija i imaju malu potrošnju.

Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

Najpoznatije tehnologije iz WPAN skupine:

- *Bluetooth* — nadomješta kabelsku vezu (domet do 10 m), koristi nelicencirani frekvencijski pojas na 2,4 GHz i brzine prijenosa reda veličine stotina kbit/s do 24 Mbit/s (Bluetooth 3.0 + HS), 4.0 low energy



Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

- *Radijski USB (Wireless USB)* — radijska nadogradnja klasične USB fiksne (žične) tehnologije, ultra širokopojasna tehnologija (brzine prijenosa 480 Mbit/s za udaljenosti do 3 m i 110 Mbit/s za udaljenosti do 10 m). Smještena je u frekvencijski pojas od 3,1 – 10,6 GHz



- *ZigBee* — predviđa se korištenje nelicenciranih pojaseva oko 2,4 GHz ili 900 MHz, domet od 10 do 75 m, brzine prijenosa su niže nego kod Bluetooth tehnologije, namijenjen je ponajprije za nadzor i upravljanje
- *HIPERPAN (High Performance Personal Area Network)* — Europska norma

Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

- Radijska lokalna mreža (WLAN, *Wireless Local Area Network ili RLAN, Radio Local Area Network*)
 - Ostvaruje srednje veličine područja pokrivanja (tipično 100 m oko pristupne točke) i srednje brzine prijenosa (11, 54 pa do 300 Mbit/s) na račun nešto veće potrošnje energije. Služi za pristup već postojećima kabelskim Ethernet mrežama.

Najpoznatije tehnologije su:

- Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) — odnosno ostale verzije IEEE norme 802.11. Predviđen je rad u nelicenciranom području frekvencija od 2,4 GHz i u licenciranom području oko 5 GHz.
- HiperLAN (*High Performance Radio Local Area Network*) — je norma Europskog instituta za telekomunikacijske standarde (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) u okviru projekta BRAN (*Broadband Radio Access Networks*). Predviđen je rad u licenciranom području frekvencija od 5 GHz uz brzine prijenosa do 54 Mbit/s.



Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

- Usporedba nekoliko digitalnih RF sustava

Norma	Radijski USB 1.0	Bluetooth 3.0 + HS	IEEE norma 802.11n	Bluetooth 2.0 + EDR
Frekvencijsko područje	3,1 - 10,6 GHz	2,4 / 5 GHz	2,4 / 5 GHz	2,4 GHz
Brzina prijenosa	480 / 110 Mbit/s	Najviše 24 Mbit/s	300 - 600 Mbit/s	Najviše 3 Mbit/s
Udaljenost	3 / 10 m	10 m	do 100 m	1 - 100 m
Vrsta modulacije	MB-OFDM	GFSK	DSSS, DBPSK, DQPSK, CCK, OFDM	GFSK

Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

- Radijska mreža gradskog područja (WMAN, *Wireless Metropolitan Area Network*); skupina IEEE normi 802.16 - WirelessMAN
 - Poslužit će kao nadomjestak kabelskome, ISDN ili DSL modemu.
 - Omogućuje fiksno dvosmjerno radijsko povezivanje i prijenos širokopojasnih usluga na veće udaljenosti uz uporabu *point-to-multipoint* mreža.
 - Predviđeni su dometi od oko 1,5 do 3 km, a u višem području frekvencija i manje.
 - Podržava prijenos brzinom od oko 20 do oko 75 Mbit/s.
 - Područja frekvencija rada obično su 3,4 – 3,6 GHz ili 24,5 – 26,5 GHz.
 - Neke zemlje dopuštaju rad i u još nekim frekvencijskim područjima.

Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

WMAN tehnologije:

- WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) — komercijalni je naziv za tehnologiju po IEEE normi 802.16 Dodatak normi (2005.) koji podržava pokretljivost unutar mreže omogućio je da pokretna WiMAX tehnologija postane komplementarna pokretnim 3G mrežama. 3G mreže imaju znatno veći domet, ali manju propusnost (tipično oko 400 kbit/s). U usporedbi s Wi-Fi mrežama WiMAX postiže slične brzine prijenosa, ali uz znatno veći domet.
- HIPERMAN (*High Performance Radio Metropolitan Area Network*) — ETSI norma. Mreže su predviđene za rad u području od 2 – 11 GHz (većina Europskih zemalja namijenila je pojas od 3,4 – 3,6 GHz, a neke i u području od 10 GHz).
- HIPERACCESS (*High Performance Radio Access*) — ETSI norma. Mreže su predviđene za rad u području iznad 11 GHz.

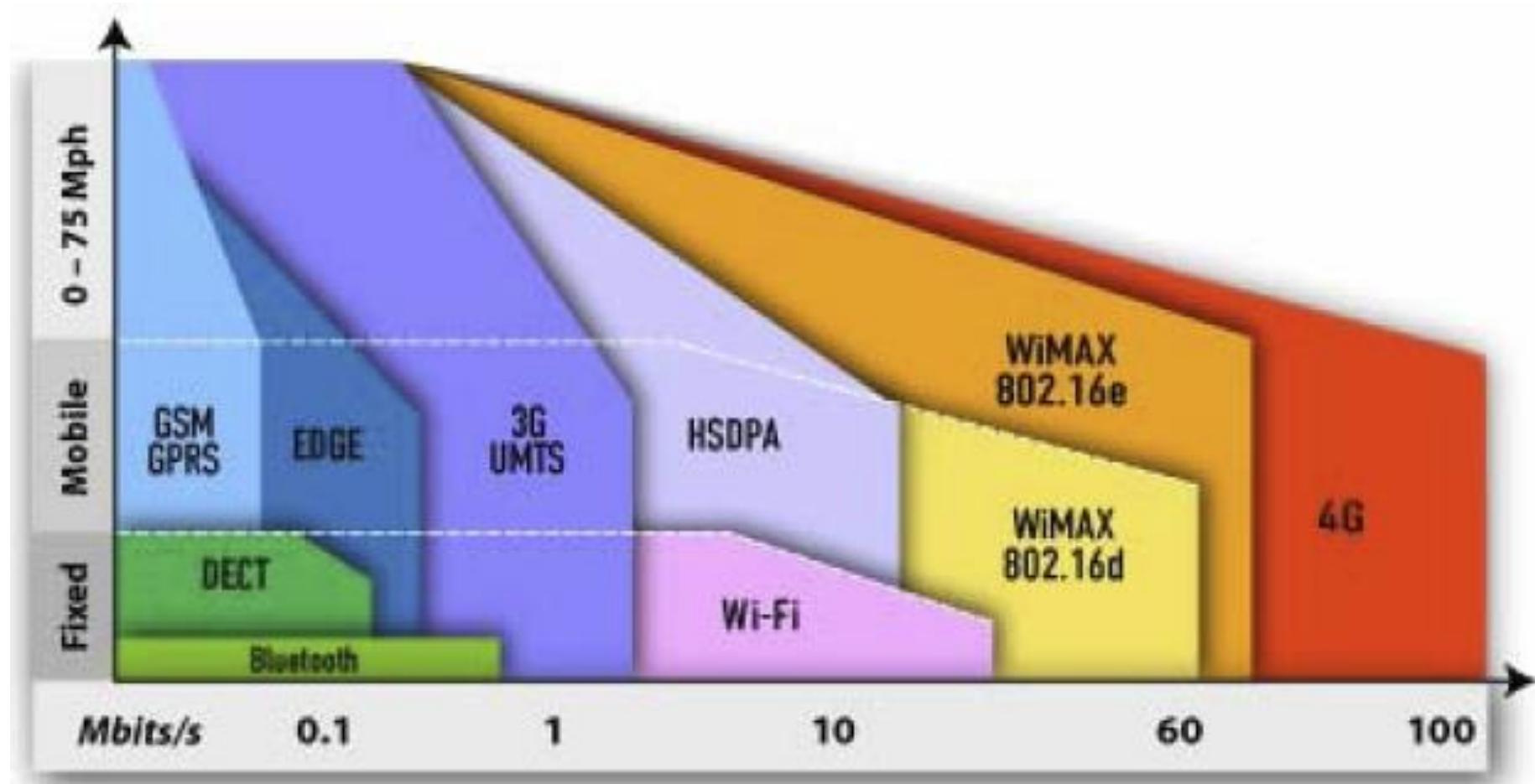
Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

- Radijska mreža šireg područja (WWAN, *Wireless Wide Area Network*)

Širokopojasna radijska tehnologija namijenjena ponajprije mobilnim korisnicima. 2002. godine osnovana je IEEE radna skupina *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA) s ciljem definiranja norme za radijsko sučelje paketskog sustava za potrebe usluga temeljenih na TCP/IP tehnologiji.

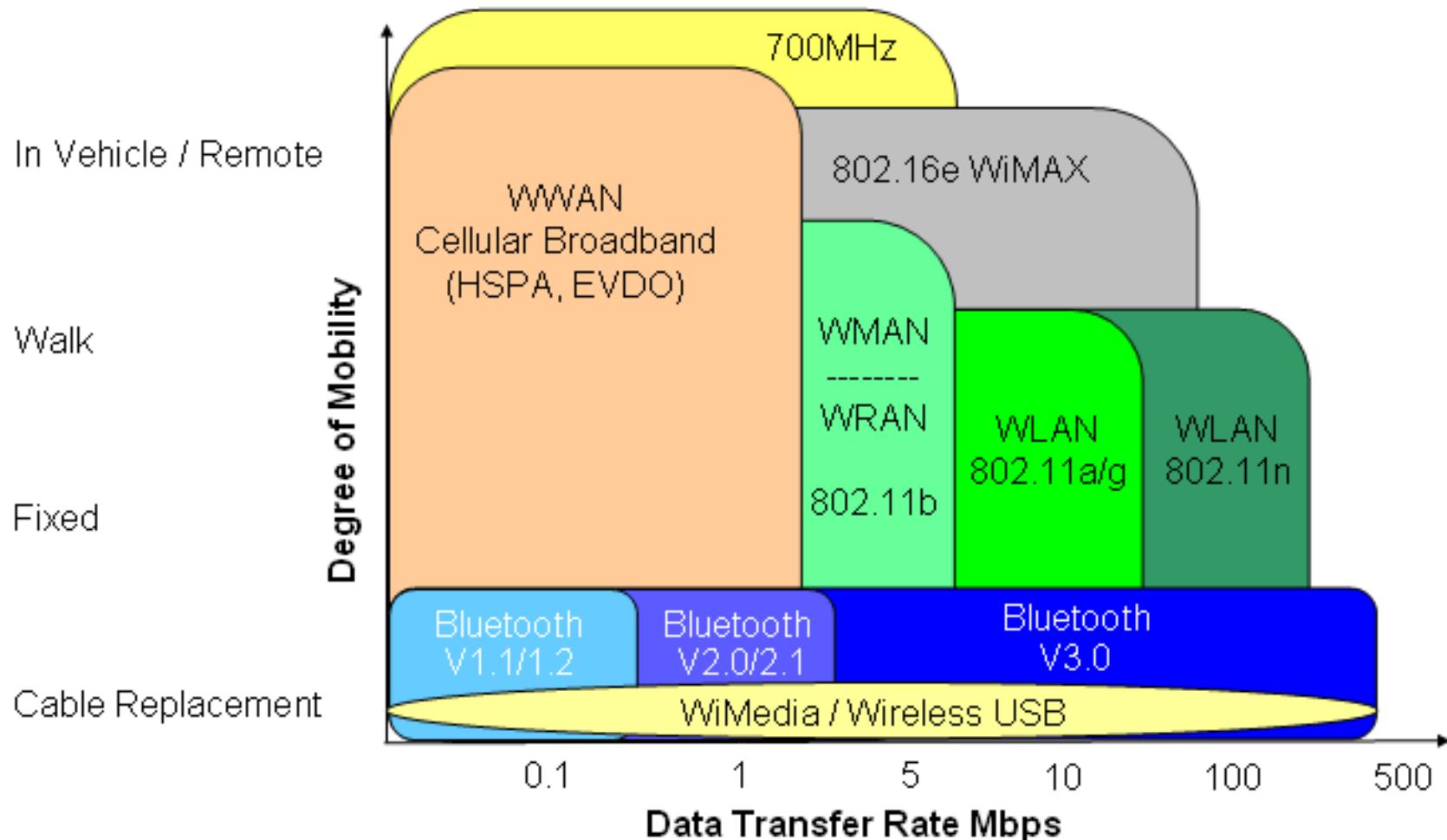
Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

Pregled tehnologija s obzirom na brzine prijenosa i pokretljivost korisnika



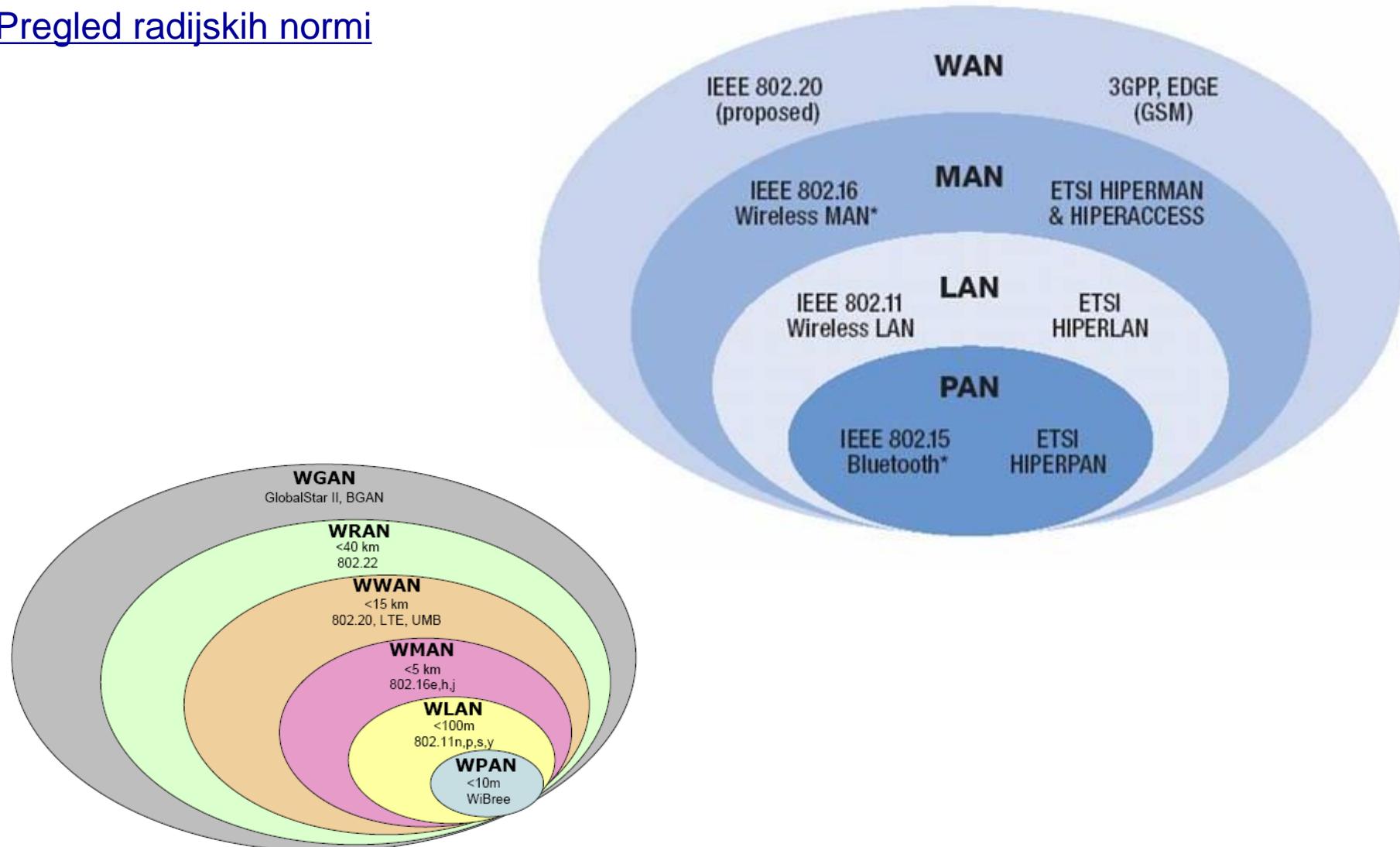
Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

Pregled tehnologija s obzirom na brzine prijenosa i pokretljivost korisnika



Radijske pristupne tehnologije (nastavak)

Pregled radijskih normi



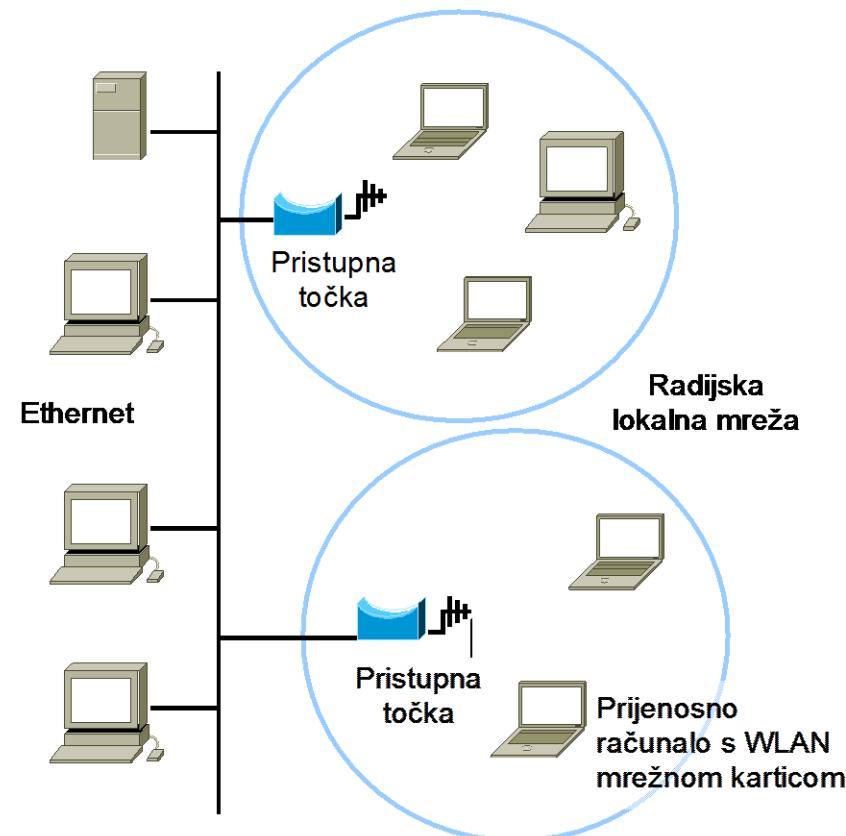
Uvodno o WLAN-u

Što je i čemu služi WLAN?

- Lokalne mreže (LAN, *Local Area Network*) su mreže računala koje pokrivaju relativno malo geografsko područje, a služe za međusobno povezivanje radnih postaja, osobnih računala, printer-a, poslužitelja, telefona, periferne opreme, osjetila i drugih sličnih uređaja na određenoj lokaciji
- Radijske lokalne mreže (WLAN) su vrsta lokalnih mreža koje za prijenos informacija između mrežnih čvorova rabe elektromagnetske valove u radijskom ili infracrvenom frekvencijskom području
- WLAN je fleksibilni sustav za prijenos podataka koji se može rabiti kao proširenje fiksne lokalne mreže ili njezina alternativa na ograničenom manjem području

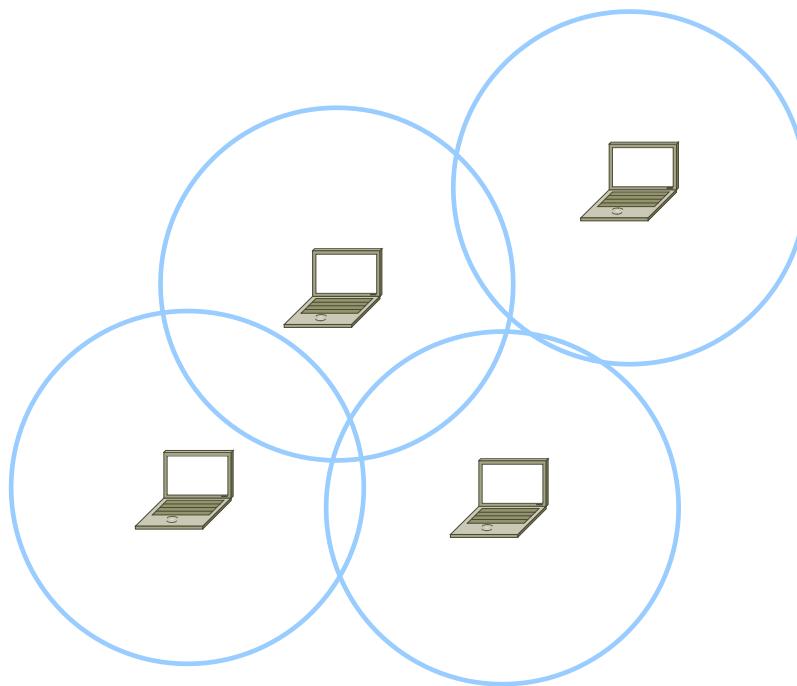
Tipična konfiguracija WLAN-a

- Krajnji korisnici pristupaju WLAN mreži preko WLAN mrežnih kartica (NIC, *Network Interface Card*), koje su sastavni dio osobnih računala, te pristupnih točaka (AP, *Access Point*)
 - WLAN mrežne kartice predstavljaju radijsko mrežno sučelje i omogućavaju povezivanje mrežnog operacijskog sustava (NOS, *Network Operating System*) korisnika i radiofrekvencijskih valova (preko antene)
 - pristupne točke služe za povezivanje radijske i fiksne LAN mreže na fiksnoj lokaciji koristeći standardni Ethernet kabel



Ad hoc povezivanje i radijski Ethernet

- Najjednostavniji način povezivanja mrežnih postaja u WLAN mreži je proizvoljno (*ad hoc*) povezivanje neovisnih radijskih mrežnih čvorova koji ravnopravno komuniciraju (*peer-to-peer*)



- **Radijski Ethernet** je pojam koji se rabi kao sinonim za WLAN po IEEE normi 802.11

Optički LAN (IrDA)

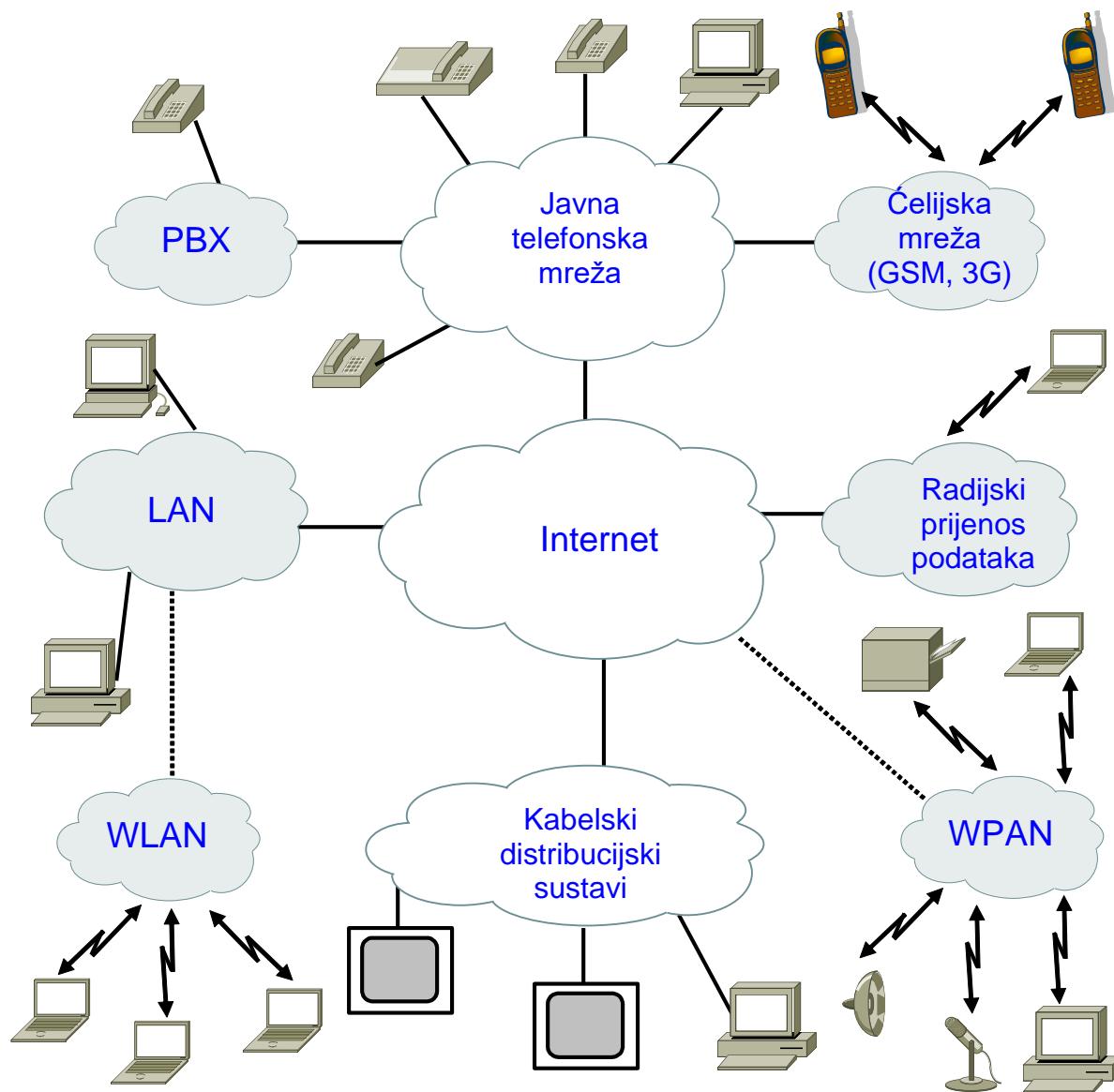
- Dva osnovna prijenosna medija koja se koriste kod WLAN-a:
 - optički – infracrveni dio spektra,
 - radijski
- Jedinice za infracrveni WLAN su tehnički jednostavni uređaji (prema tome i jeftini)
 - IrDA 1.1 (*Infrared Data Association*) komunikacijski sustav podržava brzine prijenosa od 2,4 kbit/s do 16 Mbit/s
 - Tvrтka Microsoft uključila je podršku za IrDA normu u svoj glavni proizvod MS Windows, omogućujući time vezu između PC-a i perifernih komponenata po vrlo niskoj cijeni
 - Potencijalno su vrlo jake smetnje od djelovanja sunčeve svjetlosti ili pak fluorescentnih svjetiljki. U takvim uvjetima odnos signal/smetnja može postati jako loš.



Pristup fiksnoj mrežnoj infrastrukturi

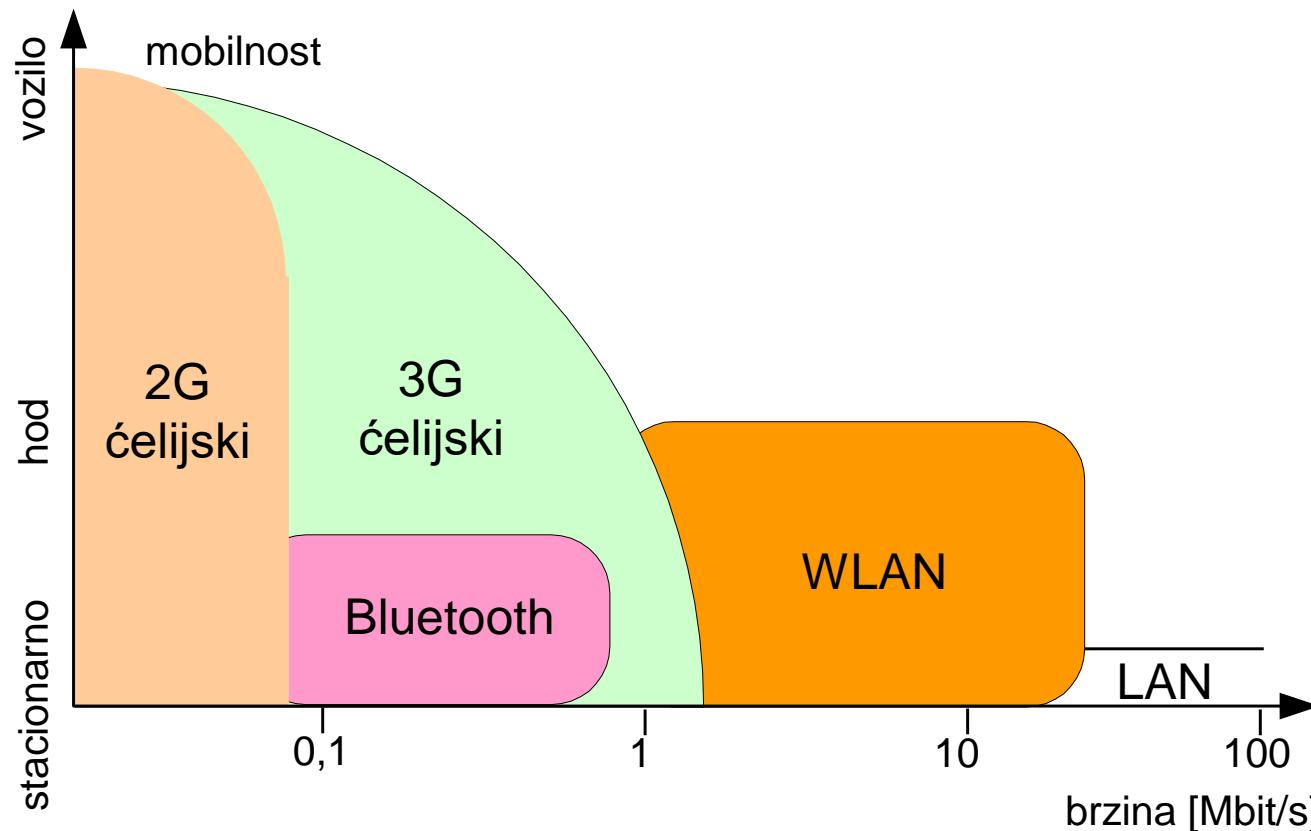
- Najčešće korištene fiksne mrežne infrastrukture na koje se vežu radijske mreže su:
 - javna telefonska mreža (PSTN, *Public Switched Telephone Network*), izvorno namijenjena prijenosu govora,
 - Internet, izvorno namijenjen prijenosu podataka, te
 - hibridni kabelski distribucijski sustavi izvedeni koaksijalnim i optičkim kabelima (HFC, *Hybrid Fiber Coax*), izvorno namijenjeni prijenosu televizijskih signala (kabelska televizija)
- Pristup Internetu ostvaruje se:
 - u domovima korisnika – rabeći javnu telefonsku mrežu ili kabelske distribucijske sisteme,
 - u uređima – izgradnjom LAN mreža. Radijski LAN se obično povezuje na Internet preko fiksnih LAN mreža

Pregled mrežnih tehnologija

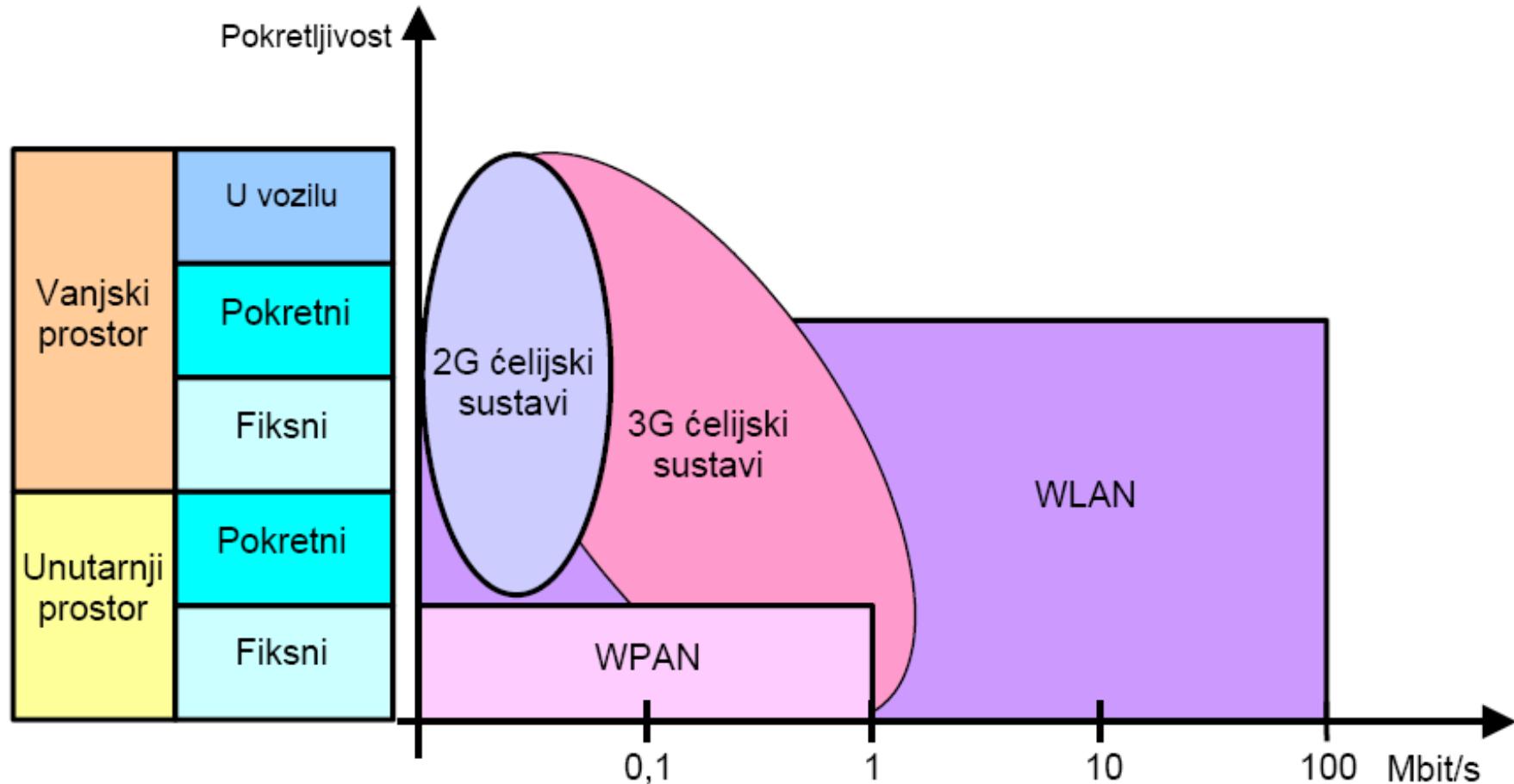


WLAN u odnosu na ćelijske tehnologije

- 3G sustavi osiguravaju multimedejske usluge korisnicima bez obzira gdje se oni nalazili
- WLAN osigurava širokopojasne usluge na pojedinim odabranim lokacijama
- WPAN povezuje osobne uređaje



WLAN u odnosu na ćelijske tehnologije



WLAN u svijetu pristupnih tehnologija

Karakteristične veličine WLAN-a prema ostalim tehnologijama

Norme		Teorijska najveća brzina prijenosa	Najveći domet [km]	Najveća iskoristivost spektra [bit/s/Hz]	Brzine kretanja kod prekapčanja [km/h]
WLAN	802.11a	54 Mbit/s	0,1	2,7	Hod
BWA	802.16a	70 Mbit/s	50	5	-
	802.16e	70 Mbit/s	50	5	<150
	802.20	> 1 Mbit/s	6 – 7	5	<250
	WiBro	50 Mbit/s	5	5	<60
2,5G	GPRS	115 kbit/s	35	0,8	<250
	EDGE	384 kbit/s	35	2,4	<250
	CDMA2000 1xRTT	144 kbit/s	35	0,33	<250
3G	WCDMA	2 Mbit/s	28	0,21	<250
	CDMA2000 1xEV-DO	2 Mbit/s	35	0,6	<250

Temeljna obilježja WLAN tehnologija

Upotreba i osnovne značajke WLAN-a

- Radijske lokalne mreže (WLAN) kombiniraju radijski (bežični) pristup mreži i mobilno računarstvo
 - One omogućavaju prijenos podataka visokim brzinama, najčešće u nelicenciranim frekvencijskim pojasevima radijskog spektra, za koje ne treba plaćati naknadu za uporabu frekvencije (noviji WLAN sustavi rabe i licencirane frekvencijske pojaseve za koje je potrebno pribaviti dozvolu)
 - Radijske lokalne mreže podržavaju multimedijski prijenos, jer pored prijenosa podataka, omogućavaju prijenos govora i videosignalova
 - WLAN se mogu rabiti kao pristupne mreže u fiksnoj i mobilnoj javnoj telekomunikacijskoj mreži, postajući dio globalne informacijske infrastrukture

Tehnički zahtjevi za pojedine primjene

QoS parametri usmjereni na tehnologiju

Kategorija	Parametar	Opis
Vrijeme (<i>Timeliness</i>)	Kašnjenje (<i>Delay</i>)	Vrijeme potrebno za slanje informacije plus propagacijsko kašnjenje
	Promjenjivost kašnjenja (<i>Jitter</i>)	Promjenjivost kašnjenja
Širina pojasa (<i>Bandwidth</i>)	Propusnost (<i>Throughput</i>)	Zahtijevana ili raspoloživa brzina prijenosa u bit/s
	Vjerojatnost pogreške bita (<i>BER, Bit Error Rate(io)</i>)	Zajamčena vjerojatnost pogreške bita koju pruža sustav
Pouzdanost (<i>Reliability</i>)	Srednje vrijeme rada sustava (<i>MTtF, Mean Time to Failure</i>)	Vrijeme rada sustava između ispada
	Srednje vrijeme oporavka sustava (<i>MTtR, Mean Time to Repair</i>)	Vrijeme između ispada sustava do povratka u normalno stanje
	Srednje vrijeme između ispada sustava (<i>MTBF, Mean Time Between Failures</i>)	$MTBF = MTtF + MTrR$
	Postotak vremena raspoloživosti	$MTtF/(MTtF+MTtR)$

QoS — *Quality of Service*

Tehnički zahtjevi za pojedine primjene

Osnovni QoS zahtjevi za neke usluge

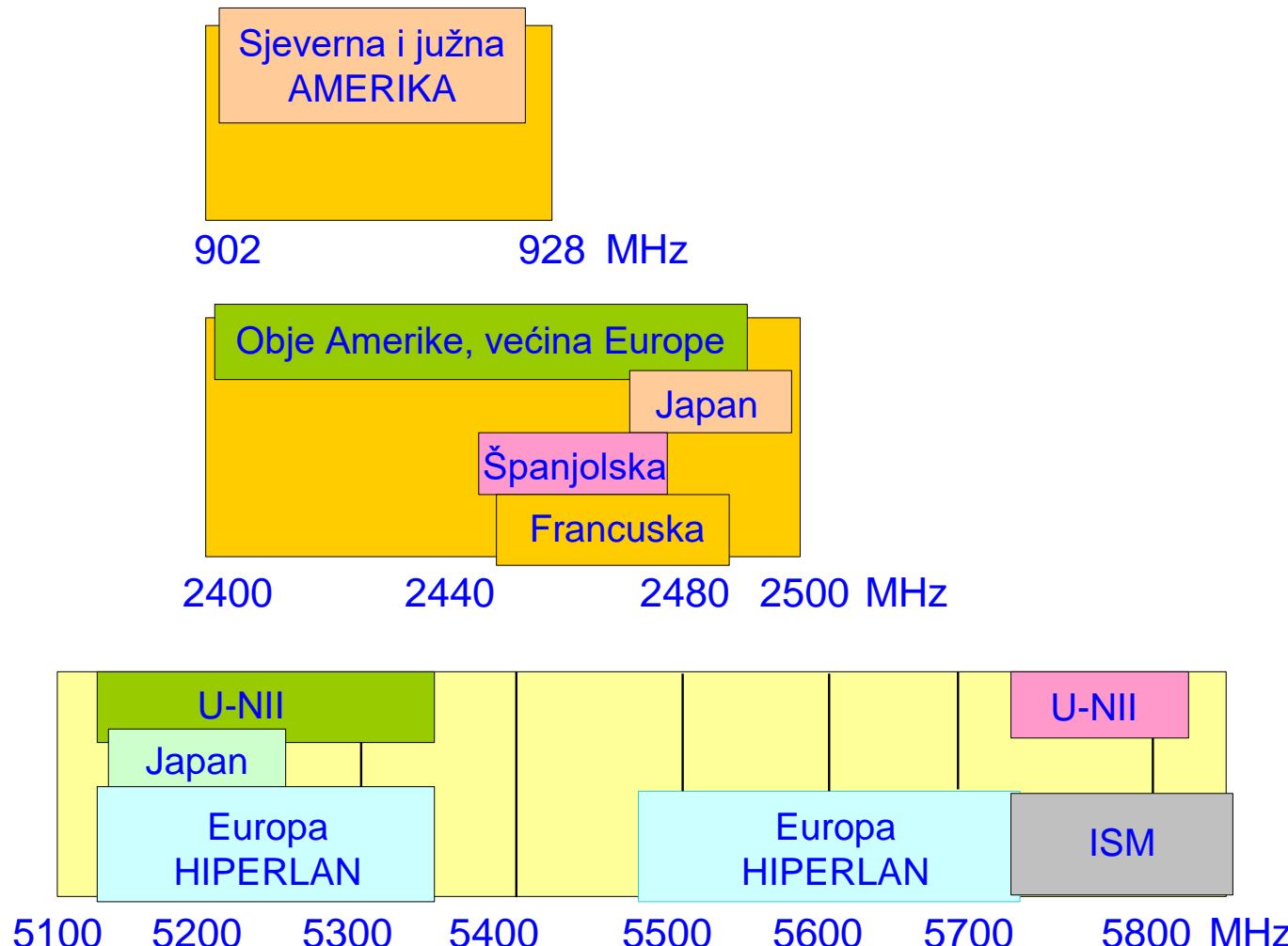
Usluga \ QoS parametar	Maksimalno kašnjenje [s]	Maks. varijacija kašnjenja [ms]	Propusnost [Mbit/s]	BER
Govor	0,25	10	0,054	$< 10^{-3}$
Komprimirani videozapis	0,25	100	2 – 10	$< 10^{-6}$
Prijenos slike	1	-	1 – 10	$< 10^{-6}$
Prijenos datoteka	1	-	1 – 100	-
Rad u stvarnom vremenu (npr. upravljanje sustavom)	0,001 – 1	-	< 10	-

Frekvencijska područja rada WLAN-a

- Nelicencirana ili ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) frekvencijska područja:
 - 2400 – 2483,5 MHz (mreže u ovom pojasu neke administracije označuju kao RLAN),
 - 5,725 – 5,925 GHz (rijetko se koristi za WLAN u Europi)
 - U SAD postoji još dva nelicencirana pojasa u području 5 GHz i to su:
 - 5,150 – 5,350 GHz i
 - 5,725 – 5,825 GHz
- Oni nose oznaku U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*)
- Licencirana frekvencijska područja:
 - 5150 – 5350 MHz,
 - 5470 – 5725 MHz,
 - 17,1 – 17,3 GHz

Frekvencijsko područje rada WLAN-a

Okvirna podjela frekvencijskih područja za WLAN u svijetu



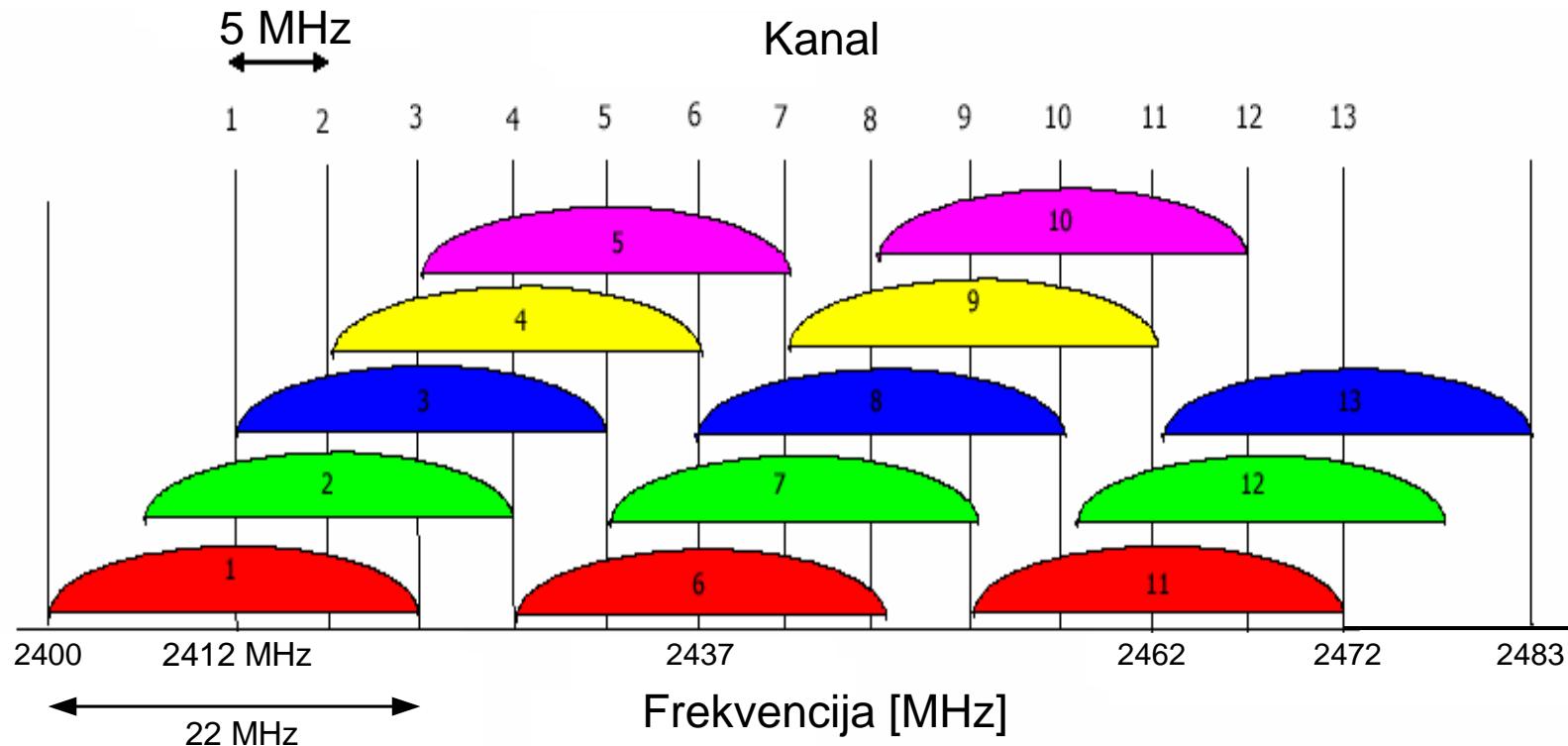
Frekvenčijsko područje rada WLAN-a

Frekvenčijska područja za rad RLAN i HiperLAN

Frekvenčijsko područje	Snaga	ERC odluka	Primjedbe
2400 – 2483,5 MHz	100 mW EIRP	ERC DEC (01)07	gustoća snage je ograničena na: -20 dBW / 1 MHz za DSSS, -10 dBW / 100 kHz za FHSS
5150 – 5350 MHz	200 mW srednja EIRP	ERC DEC (99)23	samo za uporabu u zatvorenim prostorima
5470 – 5725 MHz	1 W srednja EIRP	ERC DEC (99)23	
17,1 – 17,3 GHz	100 mW EIRP		

Raspored kanala u ISM pojasu 2,4 GHz

- Pojas širine 83,5 MHz podijeljen je u Europi na 13 kanala širine 22 MHz (drugdje 11 kanala)
- Svaka mreža radi samo na jednom kanalu



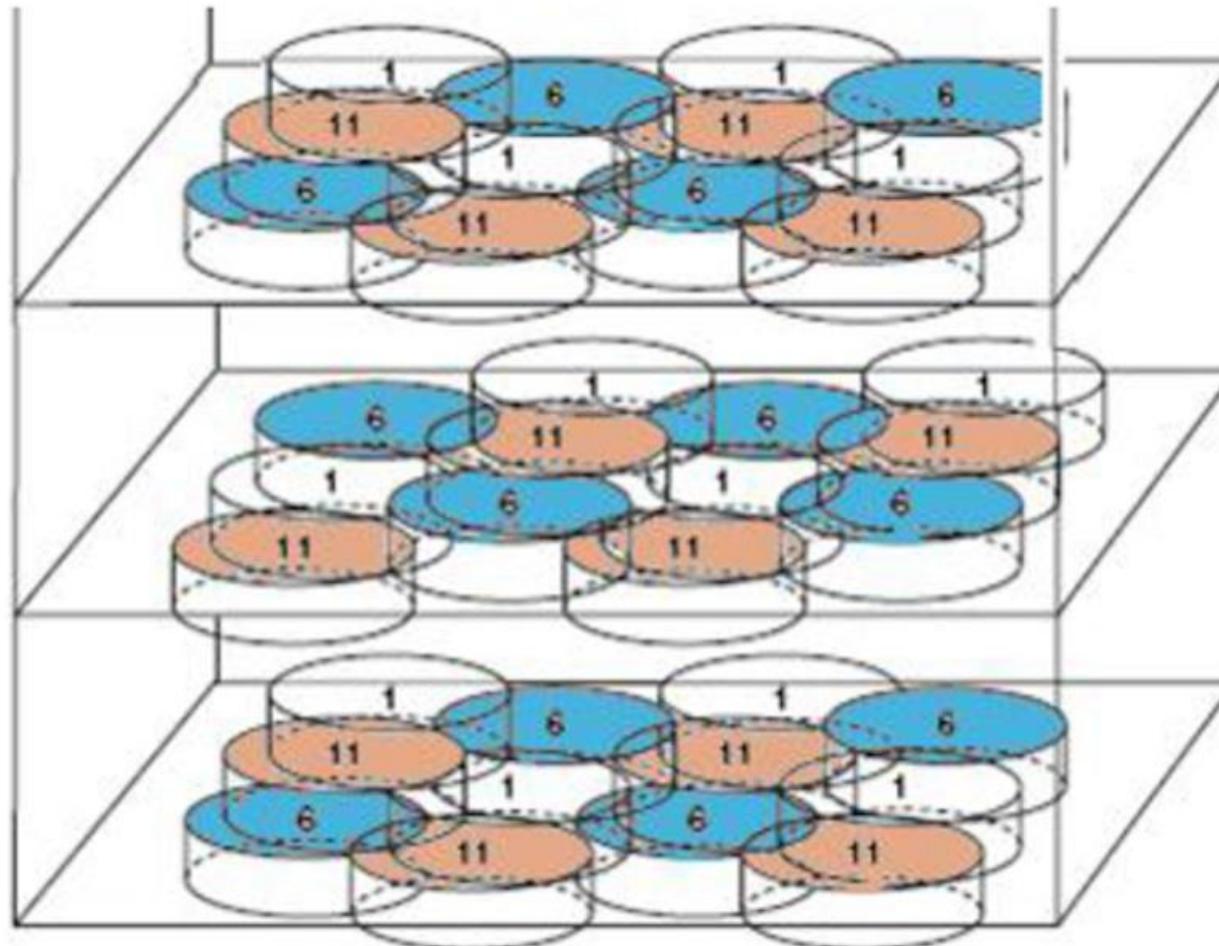
Raspored kanala u ISM pojasu 2,4 GHz

- Radi izbjegavanja mogućih smetnji u jednom se prostoru može istodobno koristiti najviše 3 kanala (kanali rednog broja: 1; 7 i 13)

Radni kanali koji se koriste u Europi (osim Francuske i Španjolske)

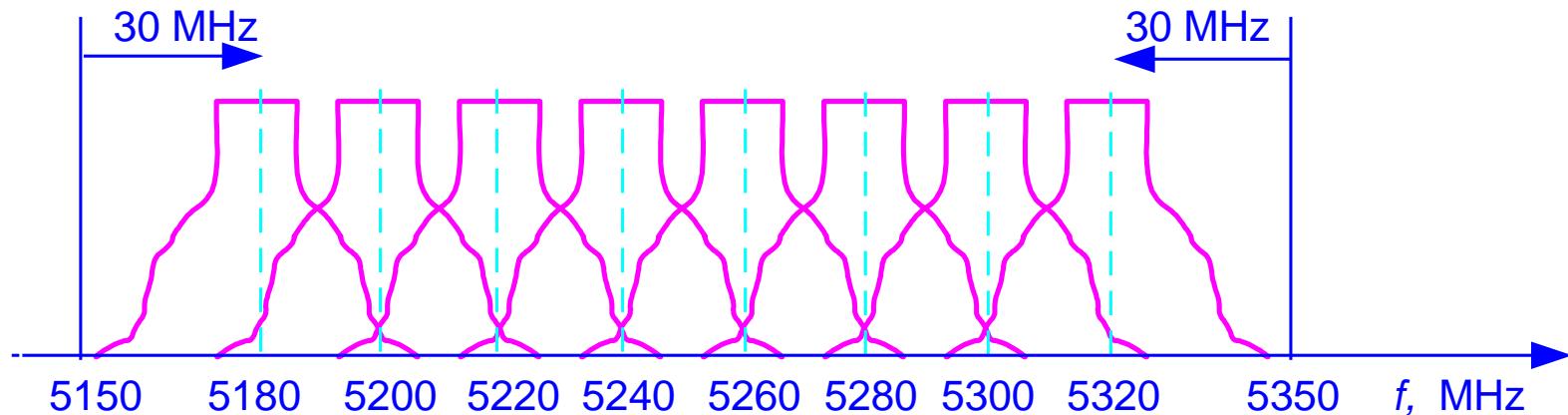
Skup	Broj kanala	Redni brojevi DSSS kanala
1	3	1, 7, 13
2	4	1, 5, 9, 13
3	7	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13

Primjer planiranja rasporeda kanala u 2,4 GHz području (više katova)

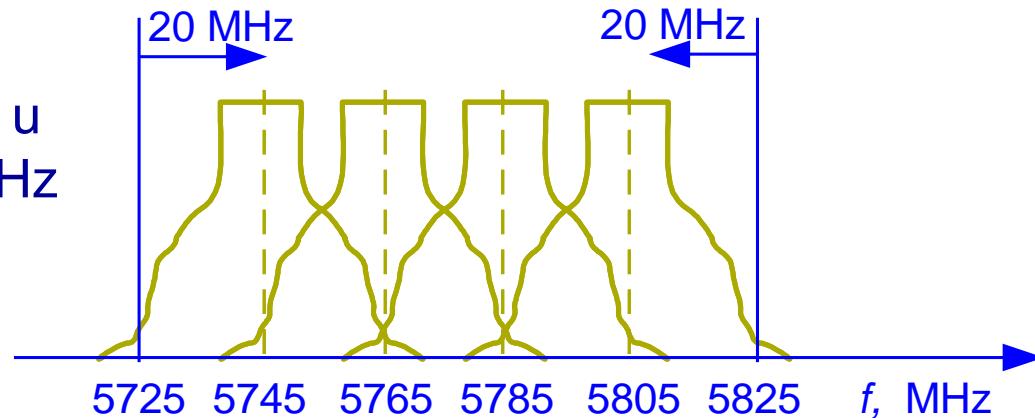


Raspored kanala u 5 GHz području

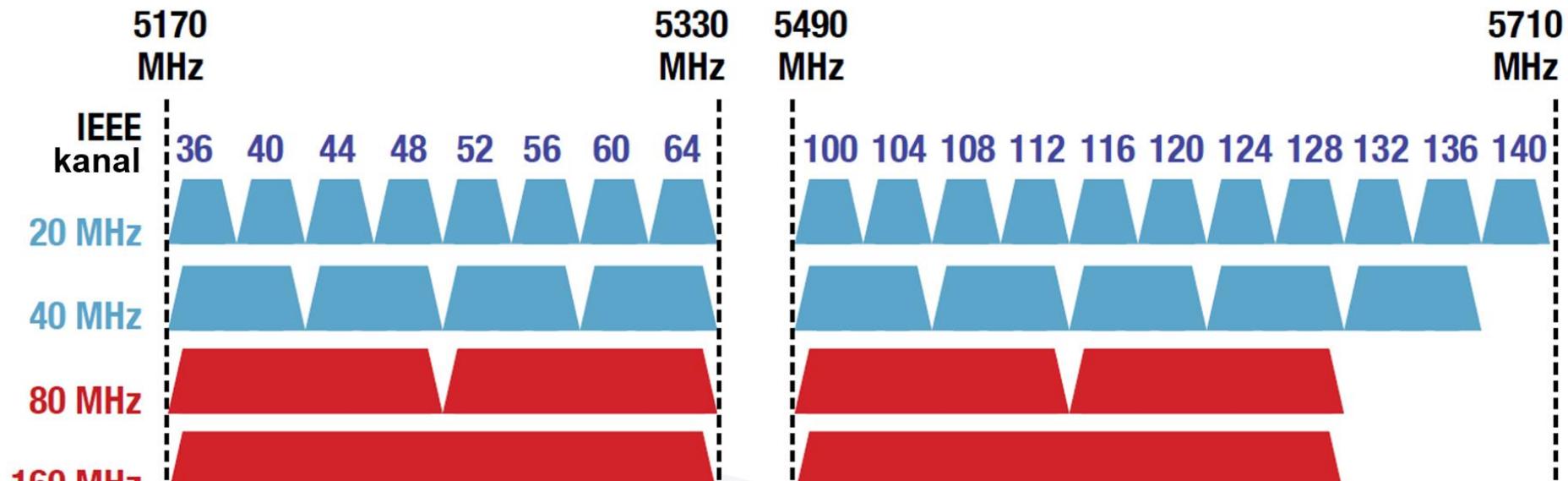
- U pojasu od 5,150 – 5,350 GHz smješteno je 8 kanala na razmaku od po 20 MHz. Rubni kanali odmaknuti su 30 MHz od ruba pojasa



- U SAD postoji još 4 kanala u pojasu od 5,725 – 5,825 GHz

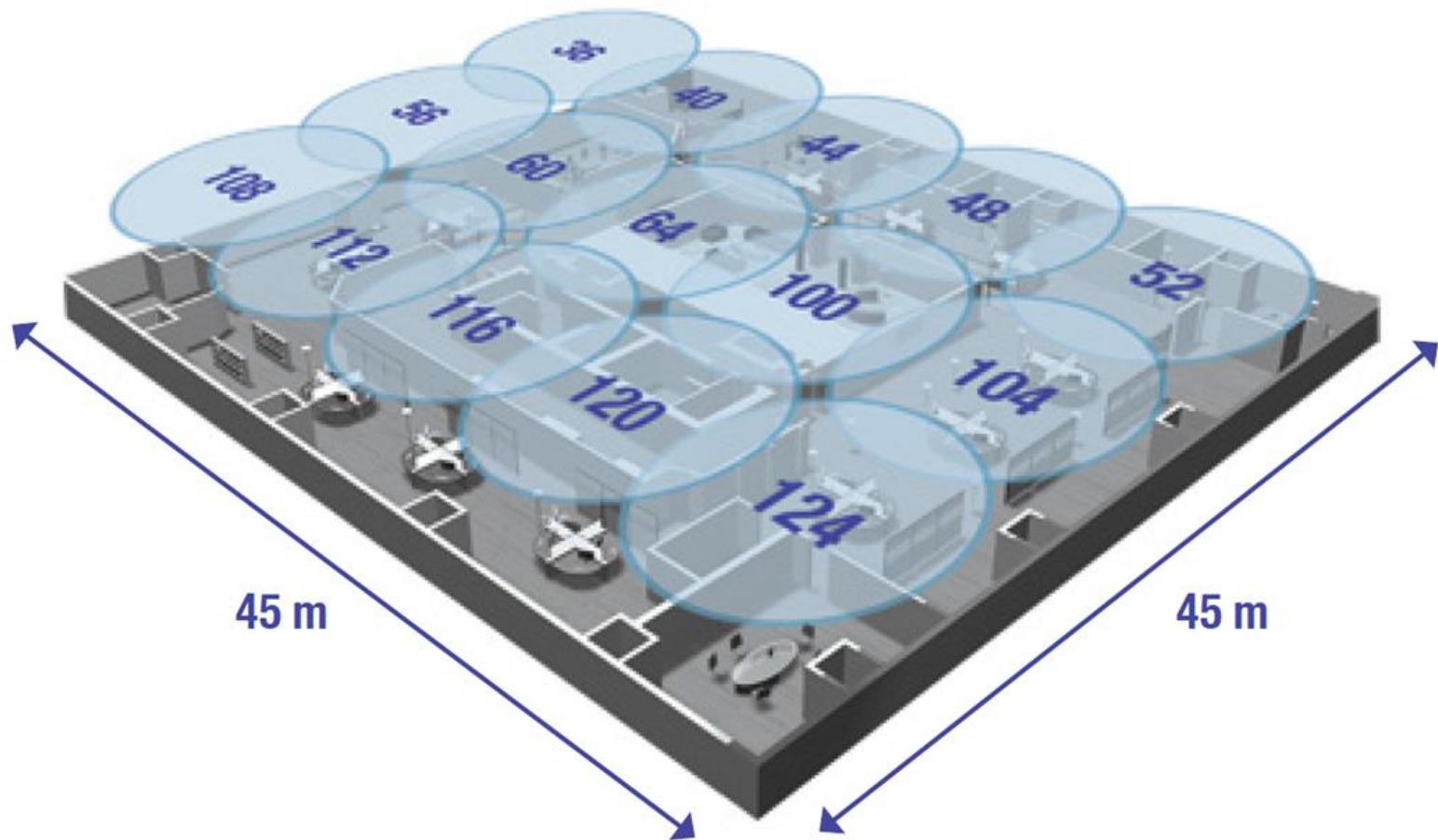


Raspored kanala u 5 GHz području



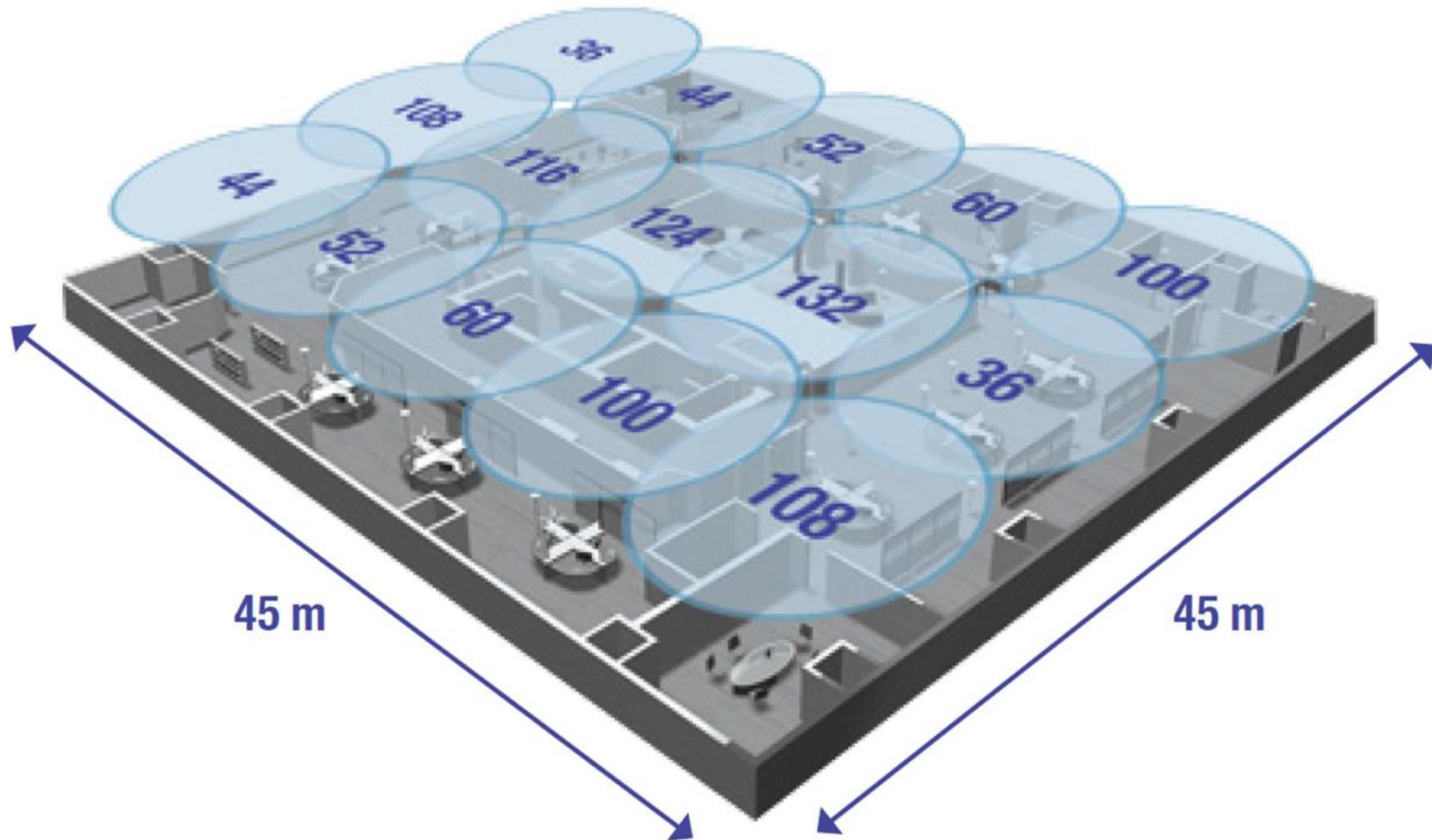
Raspored WLAN kanala u Europi u 5 GHz području

Primjer planiranja rasporeda kanala u 5 GHz području



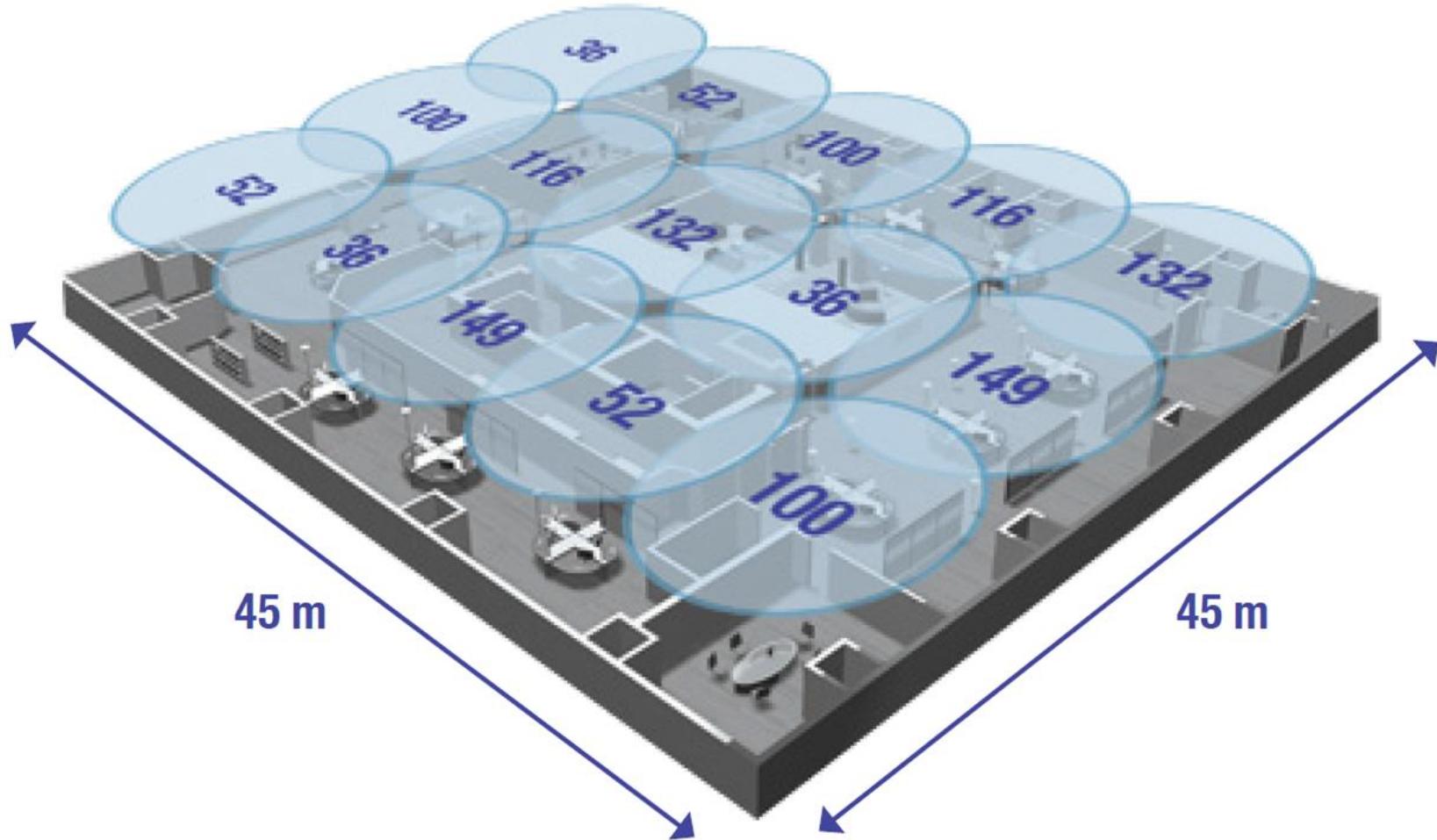
Primjer planiranje rasporeda WLAN kanala u 5 GHz području (širina kanala 20 MHz, 19 mogućih kanala)

Primjer planiranja rasporeda kanala u 5 GHz području



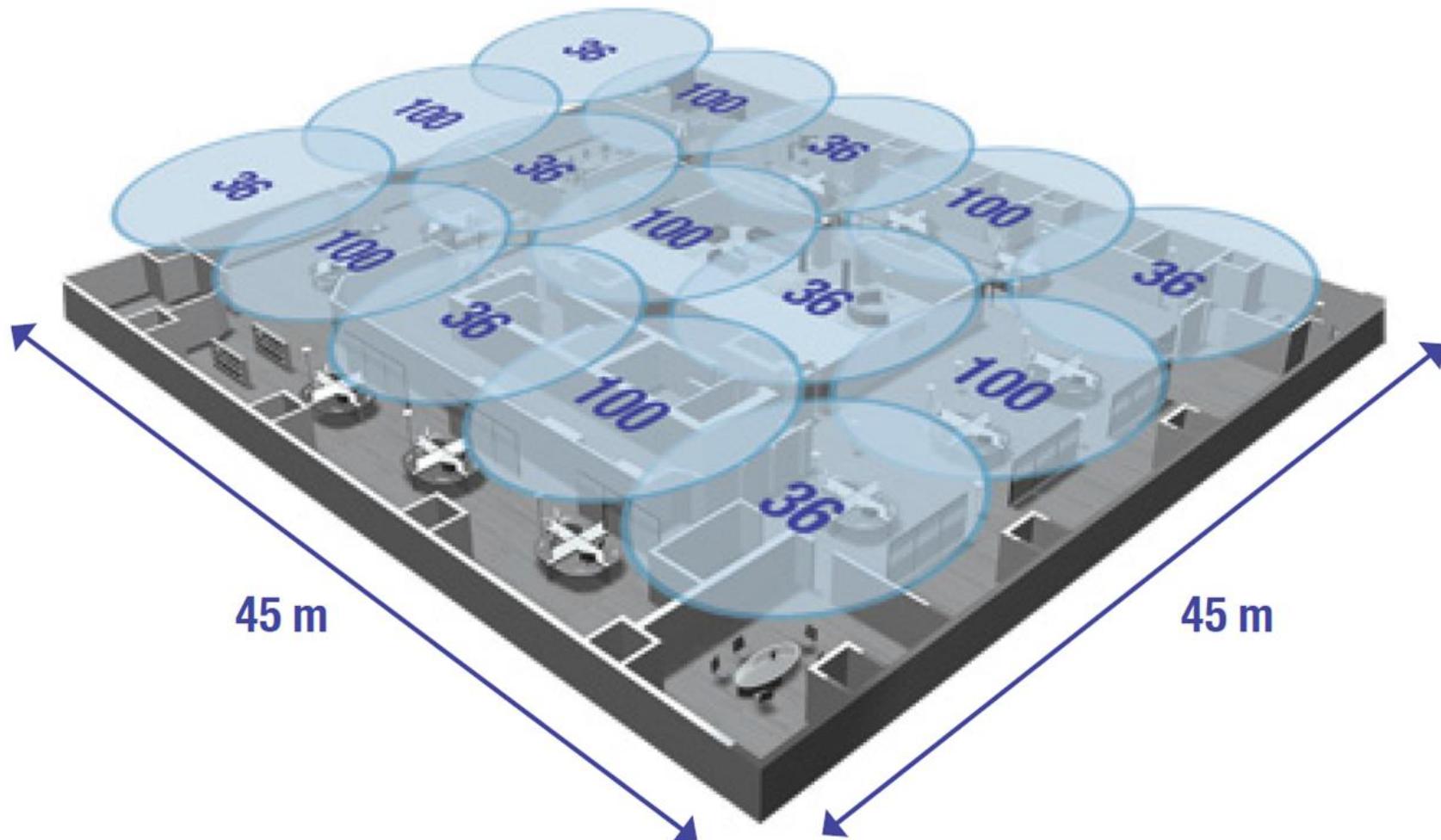
Primjer planiranje rasporeda WLAN kanala u 5 GHz području (širina kanala 40 MHz, 9 mogućih kanala)

Primjer planiranja rasporeda kanala u 5 GHz području



Primjer planiranje rasporeda WLAN kanala u 5 GHz području (širina kanala 80 MHz, 4 moguća kanala)

Primjer planiranja rasporeda kanala u 5 GHz području

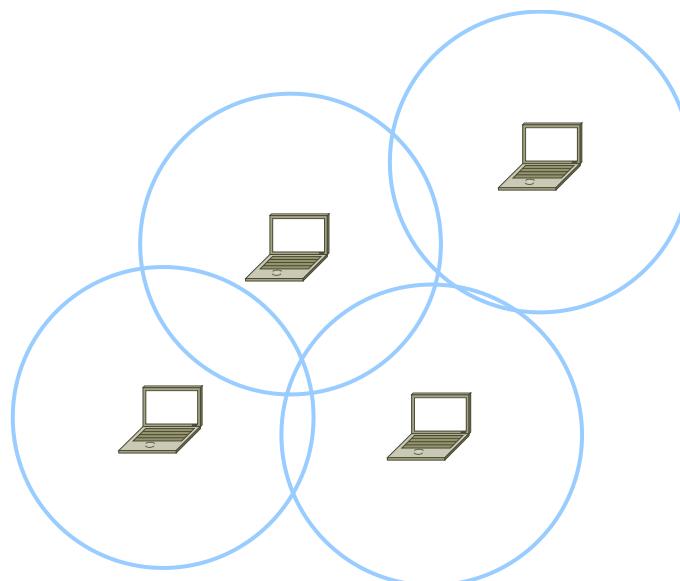


Primjer planiranje rasporeda WLAN kanala u 5 GHz području (širina kanala 160 MHz, 2 moguća kanala)

Arhitekture radijskih lokalnih mreža

- U radijskim lokalnim mrežama rabe se dvije temeljne arhitekture:
 - Proizvoljno povezivanje (*ad hoc*) neovisnih radijskih mrežnih čvorova koji ravnopravno komuniciraju (*peer-to-peer*)

Ad hoc WLAN mreža

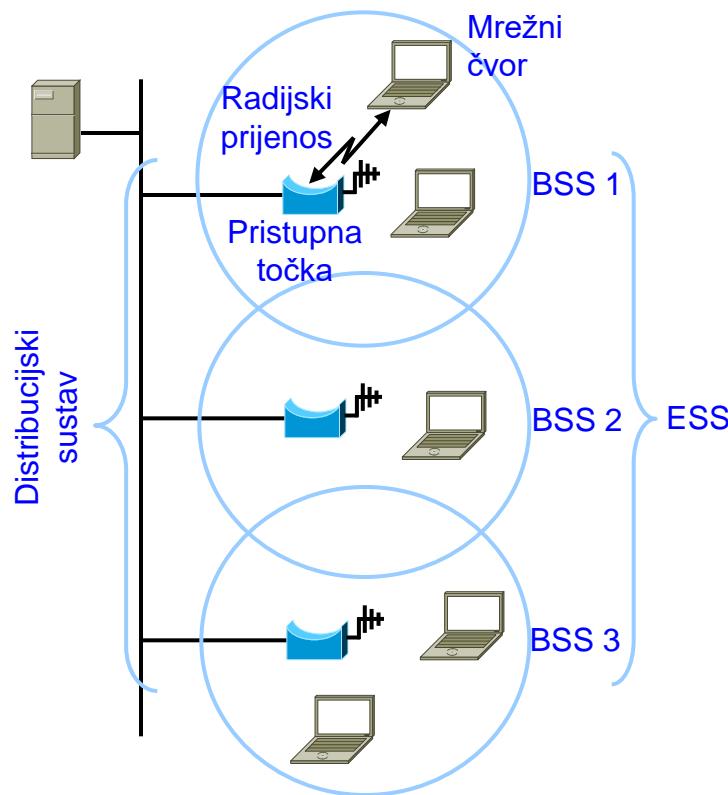


Kod *ad hoc* povezivanja, mrežni čvorovi izravno komuniciraju. Svaki čvor može uspostaviti vezu s bilo kojim drugim čvorom koji mu je u dometu. Mreža nema posebnu strukturu i topologiju.

Arhitekture radijskih lokalnih mreža (nastavak)

- Infrastrukturno povezivanje, u kome se radijski mrežni čvorovi povezuju s pristupnom točkom

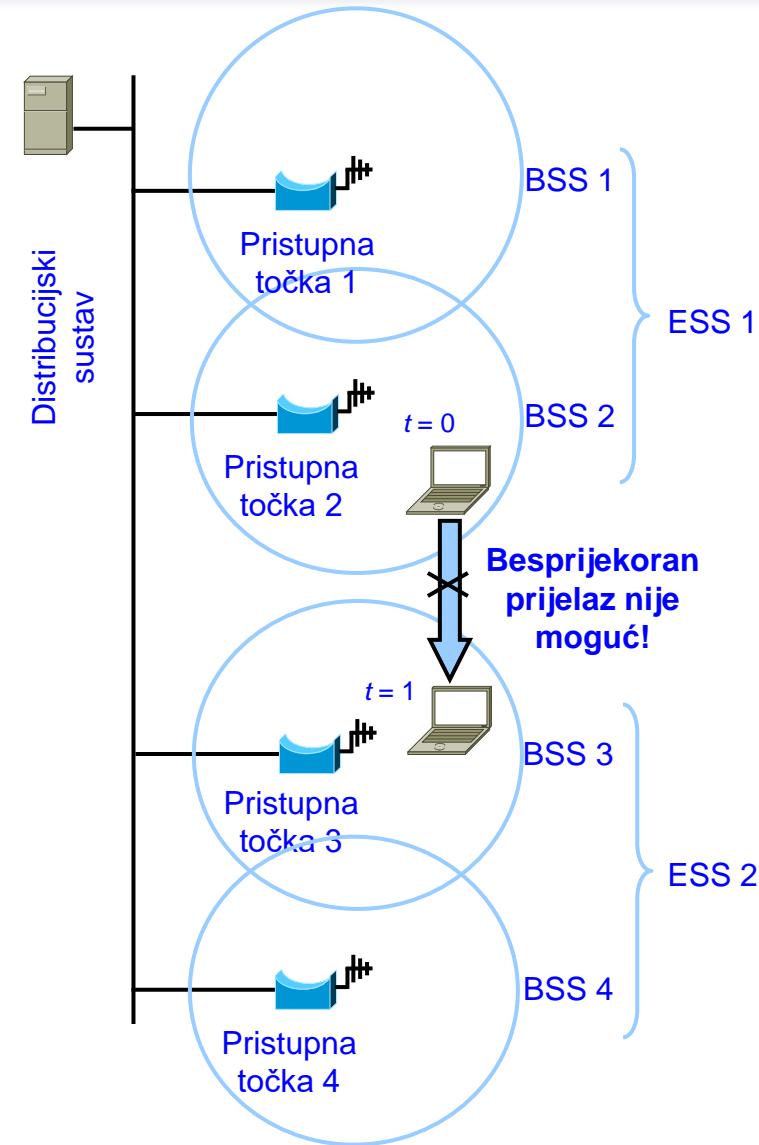
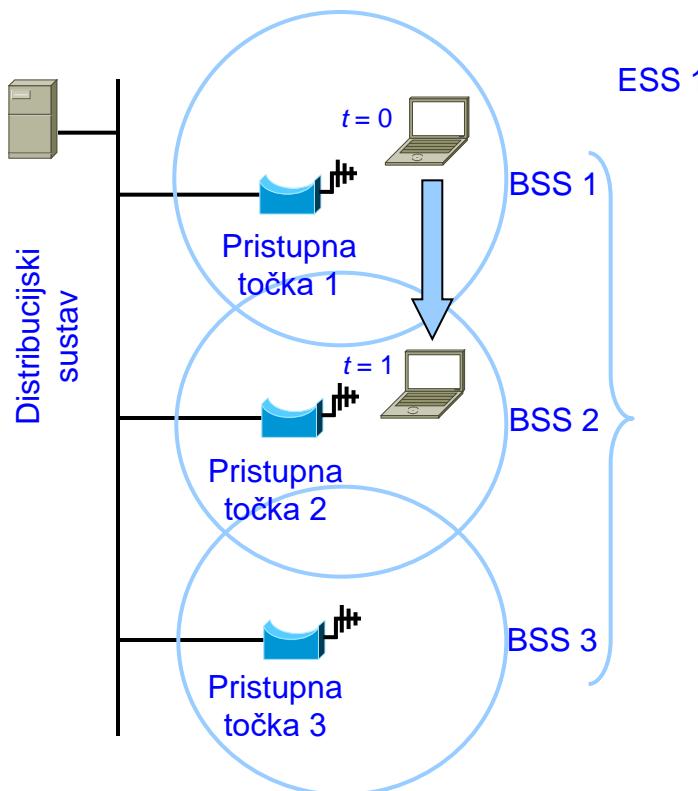
Infrastrukturna WLAN mreža



- *Pristupna točka* – mrežni uređaj koji obavlja funkciju premošćivanja između radijske i fiksne mreže
 - *Distribucijski sustav (DS)* – logička komponenta mreže koja omogućuje komunikaciju između pristupnih točaka radi praćenja kretanja mobilnog mrežnog čvora (mobilne postaje). Za DS se obično rabi Ethernet mrežna tehnologija.
 - *Radijski prijenos* – kao prijenosni medij rabe se radijski valovi
 - *Mrežni čvorovi ili mrežne postaje* – prijenosna ili stolna računala opremljena radijskim mrežnim sučeljem.
- BSS – Basic Service Set
 ESS – Extended Service Set

Arhitekture radijskih lokalnih mreža (nastavak)

Primjeri prijelaza između BSS segmenta
ESS mreže i između dvije ESS mreže



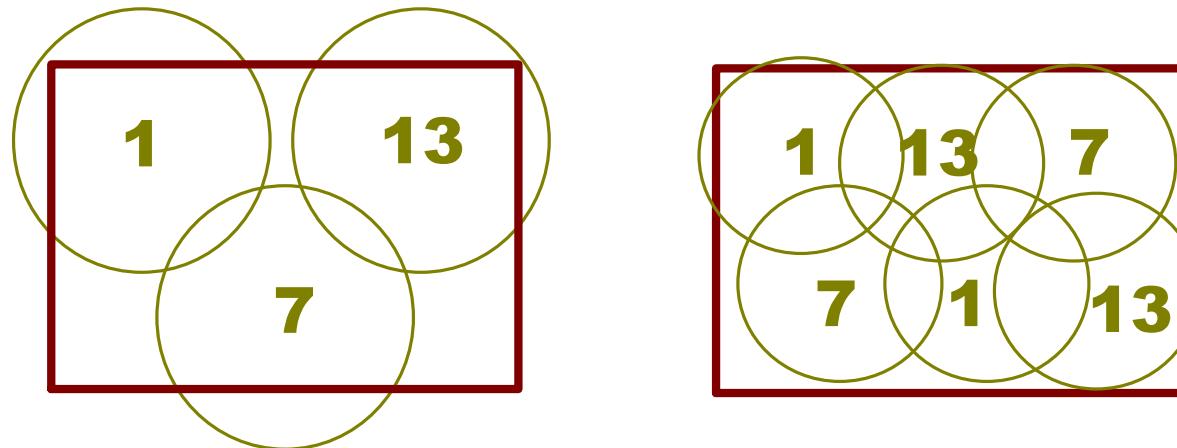
Lociranje pristupnih točaka i pokrivanje

- Mrežne postaje mogu se kretati za vrijeme dok su povezane na mrežu i tijekom kretanja mogu odašiljati podatke. Tri su moguće vrste prijelaza u mreži ili između mreža:
 - kretanje bez prijelaza, tj. zadržavanje u okviru jednog BSS,
 - prijelazi između BSS segmenta ESS mreže,
 - prijelazi između različitih ESS mreža

Lociranje pristupnih točaka i pokrivanje (nastavak)

- Pristupna točka na odabranoj lokaciji mora dobro pokrivati željeni prostor
 - Pokrivanje lokacija i izvan željenog prostora stvara probleme radu drugih RF sustava i stvara mogućnost neovlaštene uporabe mreže korisnicima kojima nije namijenjena

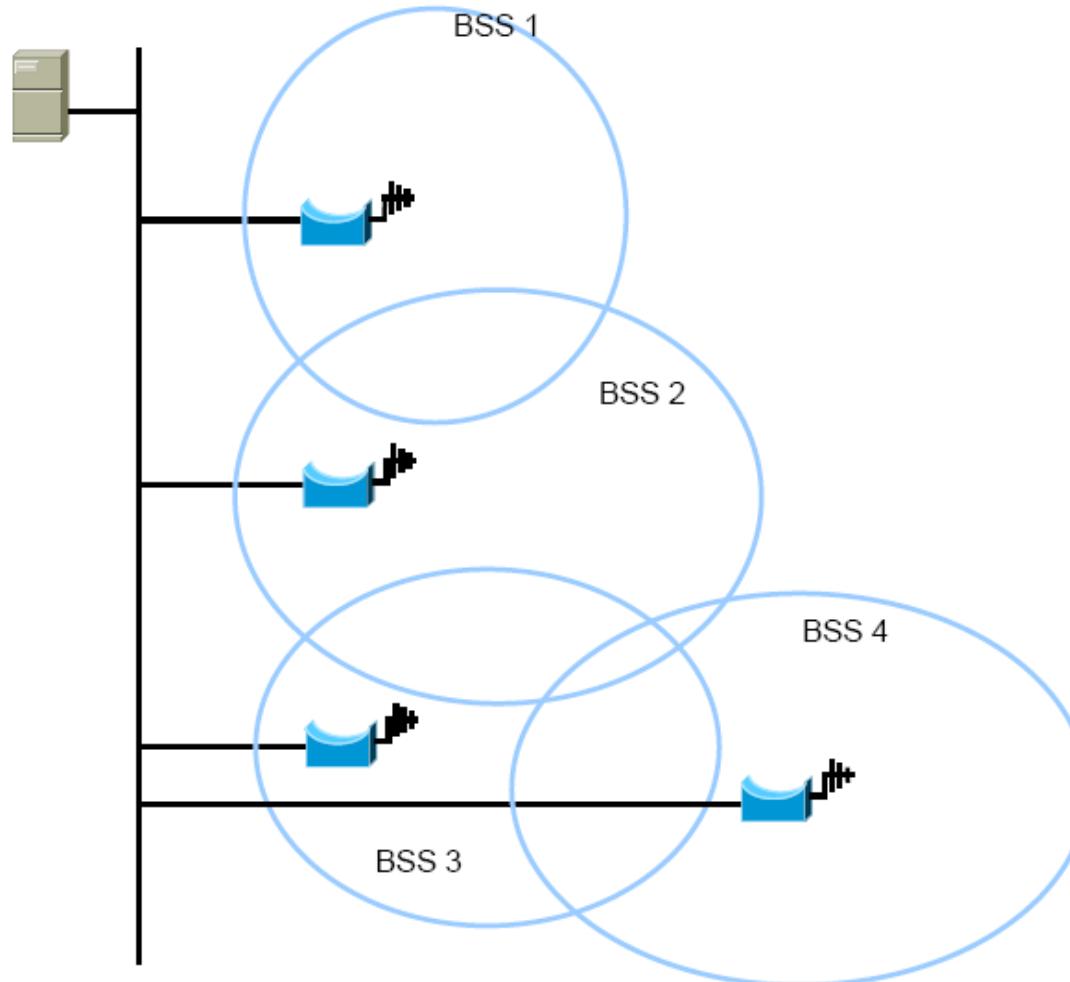
Primjer pokrivanja s 3 kanala u ISM pojasu od 2,4 GHz



- Smanjenjem snage i uporabom više AP bolje se pokriva željeni prostor

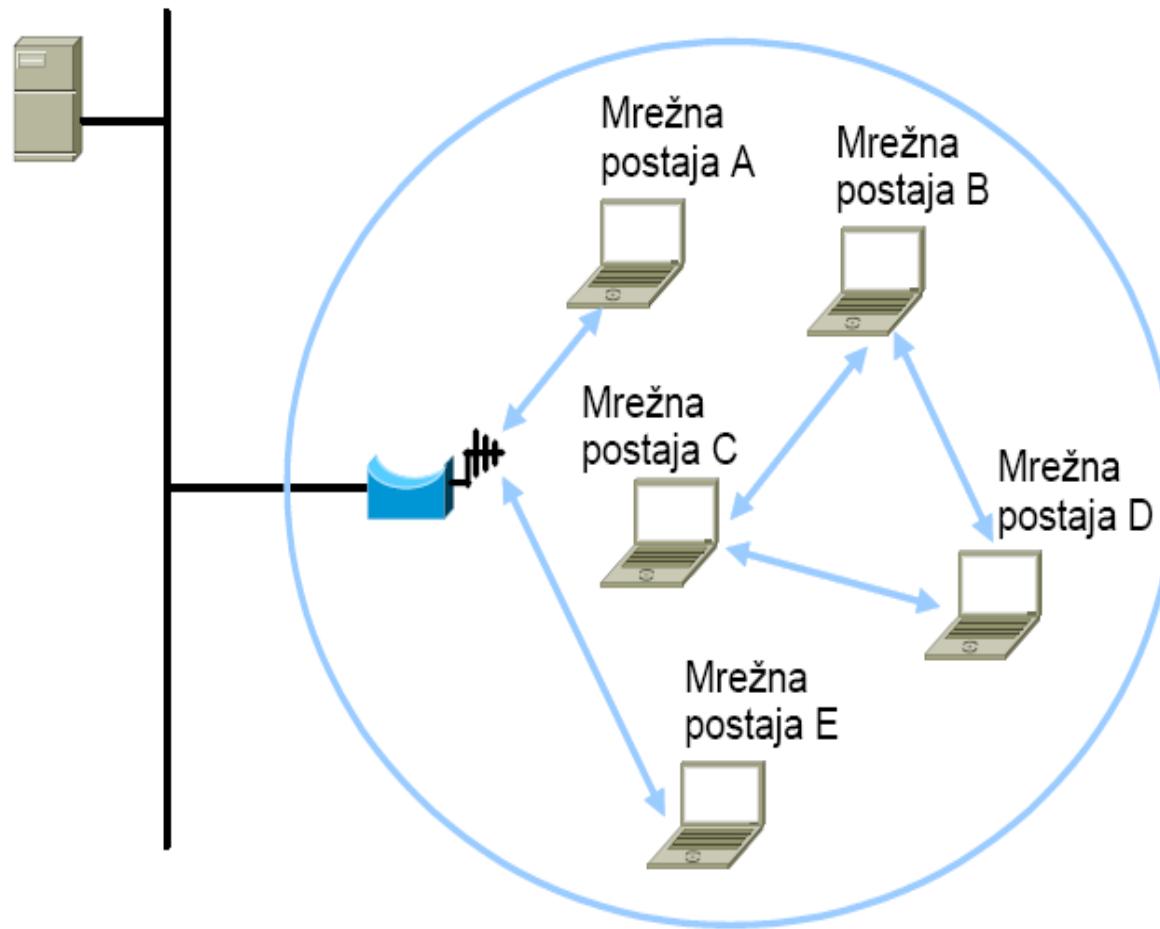
Granice mreže

- Preklapanje područja pokrivanja BSS segmenata ESS mreže



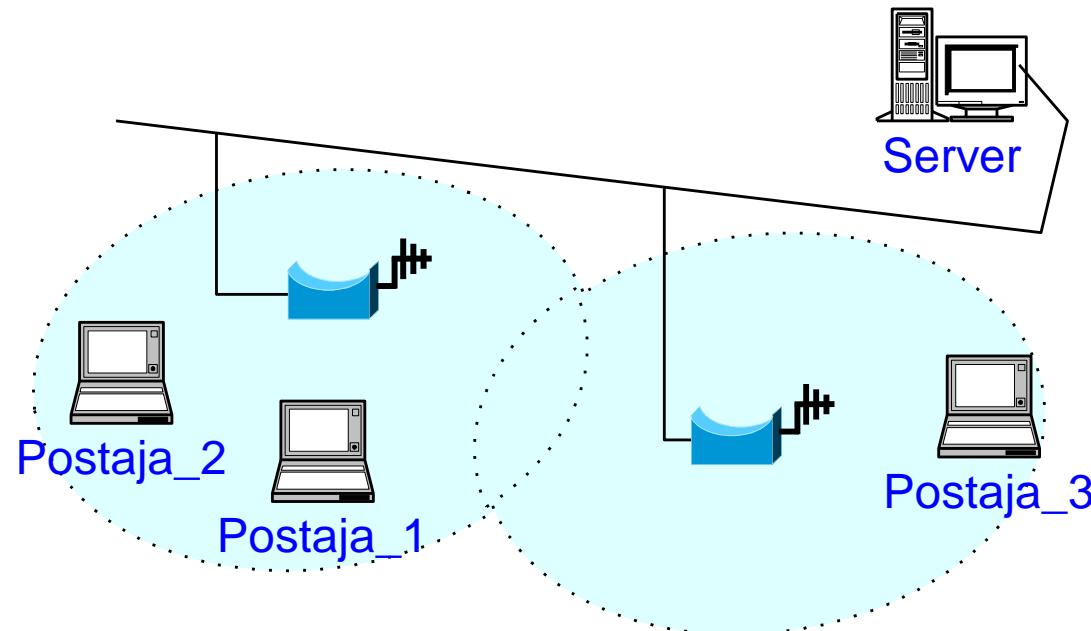
Granice mreže

- Preklapanje područja pokrivanja različitih vrsta mreža



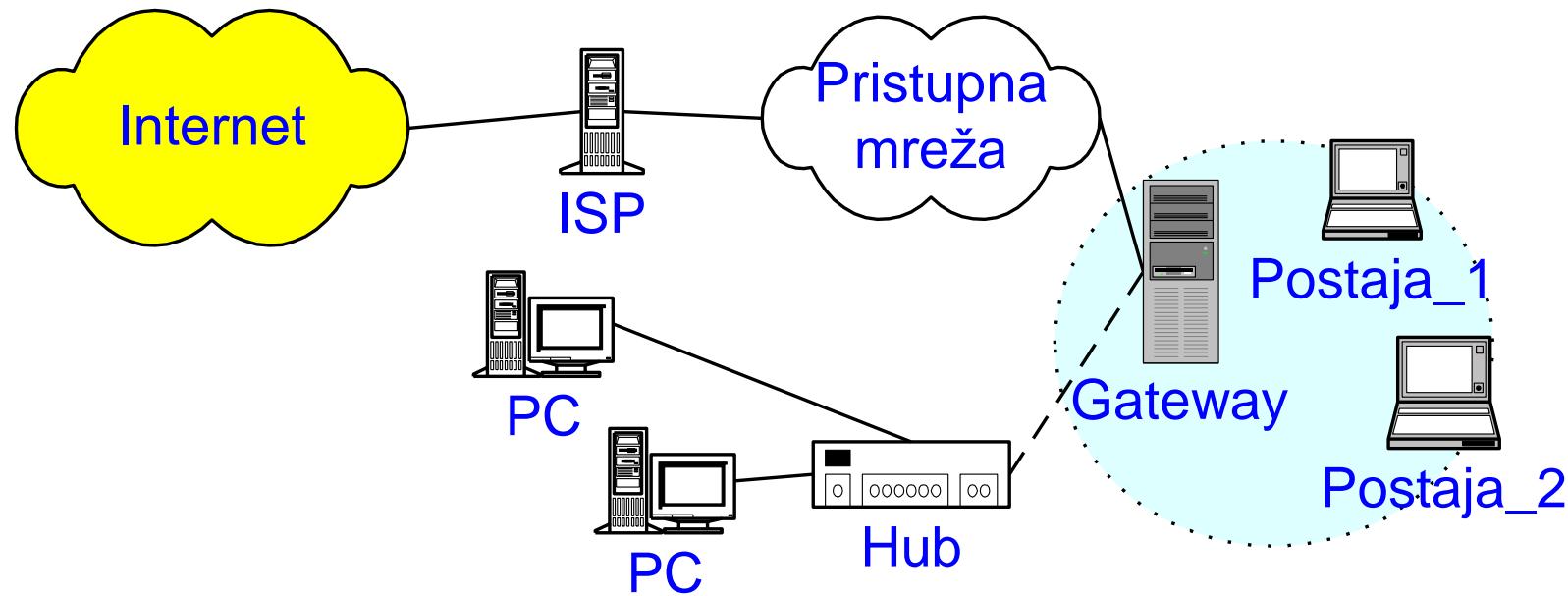
WLAN – LAN topologije

- WLAN se povezuje na fiksni (žični) LAN najčešće u poslovnim objektima, školama i sveučilišnim kampusima. Pristupne točke (AP, Access Points) onda obavljaju funkciju komutatora (*bridge*) između radijskog i fiksnog dijela mreže.
 - *Topologija s pristupnom točkom* koristi se kad je potrebno proširiti pokrivanje postojeće fiksne infrastrukture



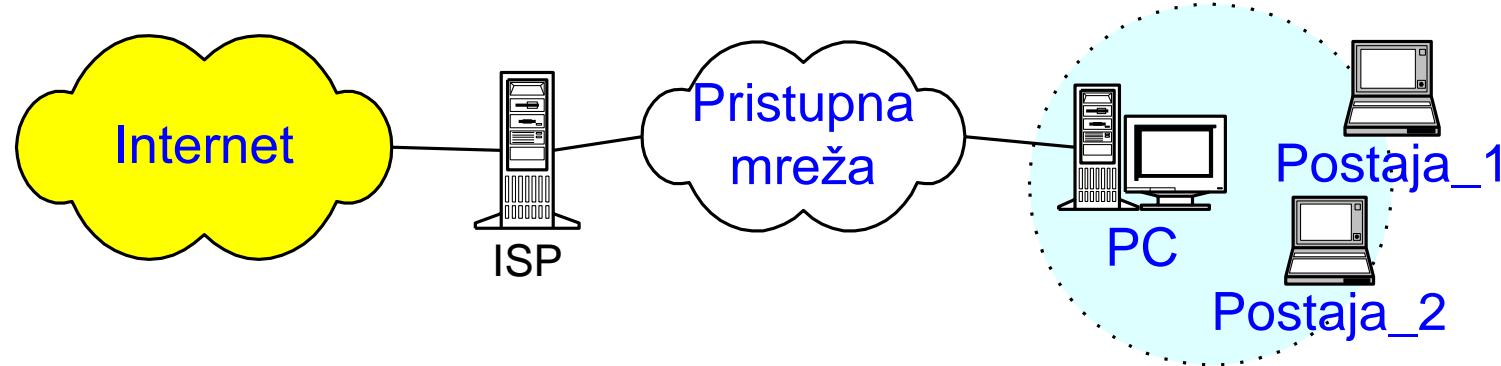
WLAN – LAN topologije (nastavak)

- *Topologija s pretvaračem (gateway)* karakteristična je za manje uredske mreže
 - Pretvarač osigurava povezivanje WLAN-a preko pristupne fiksne mreže (ISDN/POTS, *Integrated Services Digital Network/Plain Old Telephone Service*; ADSL, *Asymmetric DSL*; CATV, *Cable Television*, itd.) s mrežom pružatelja internetskih usluga (ISP, *Internet Service Provider*) ili prema intranetu



WLAN – LAN topologije (nastavak)

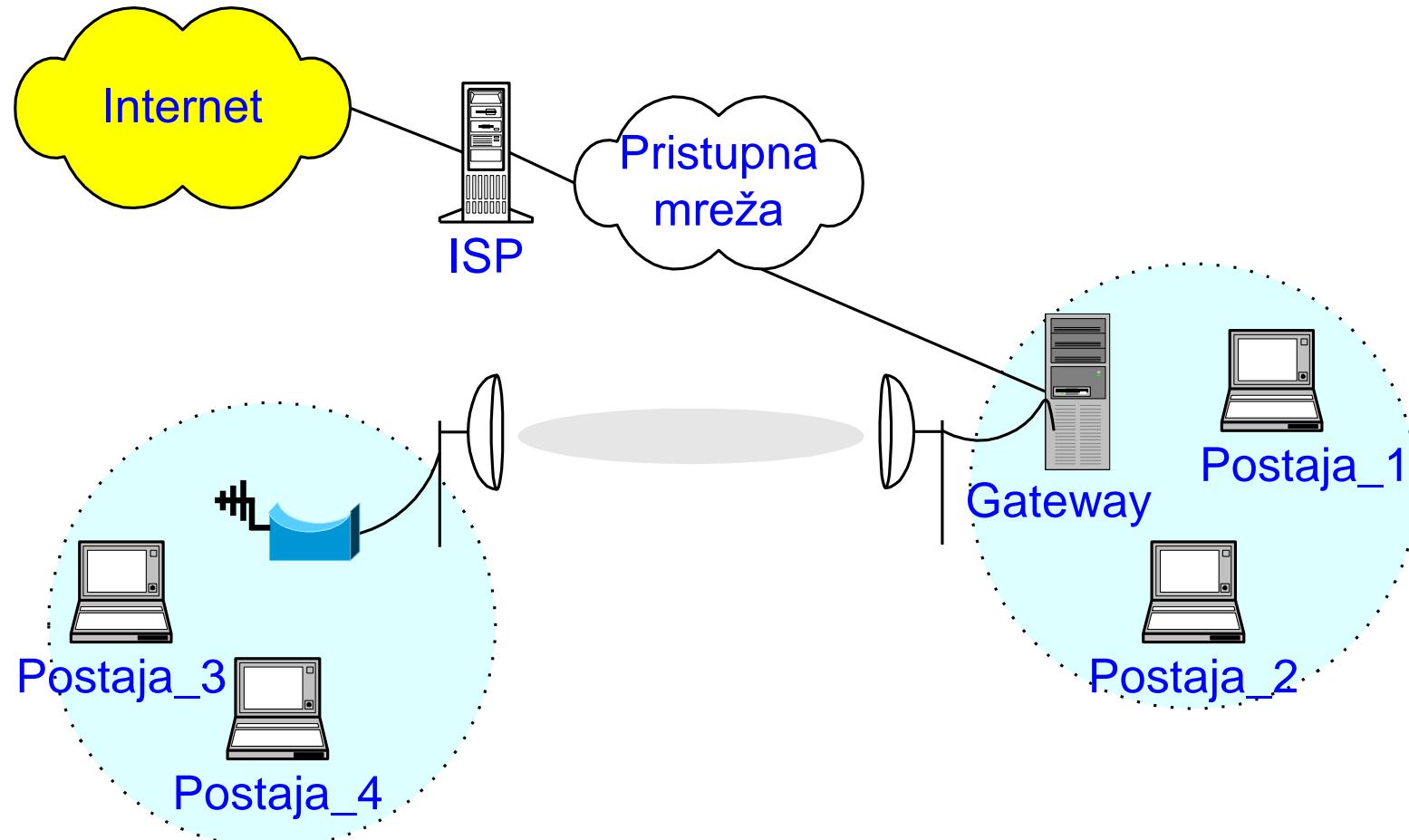
- *Topologija s računalom kao pristupnom točkom* karakteristična je za kućne sustave (SOHO, Small Office Home Office)
 - Računalo je opremljeno s dvije mrežne kartice - jedna za pristupnu mrežu, a druga za WLAN. Osobno računalo obavlja funkcije gatewaya



- *Udaljeno radijsko povezivanje* preko usmjerenih (*point-to-point*) ili zvjezdastih (*point-to-multipoint*) veza koristi se kod povezivanja LAN mreža koje se nalaze u neposrednoj blizini, na primjer u zgradama, kampusima, itd.
 - *Gateway* ili pristupna točka moraju biti opremljeni dodatnim odašiljačko-prijamnim sustavima

WLAN – LAN topologije (nastavak)

- Topologija point-to-point s usmjerenim antenama

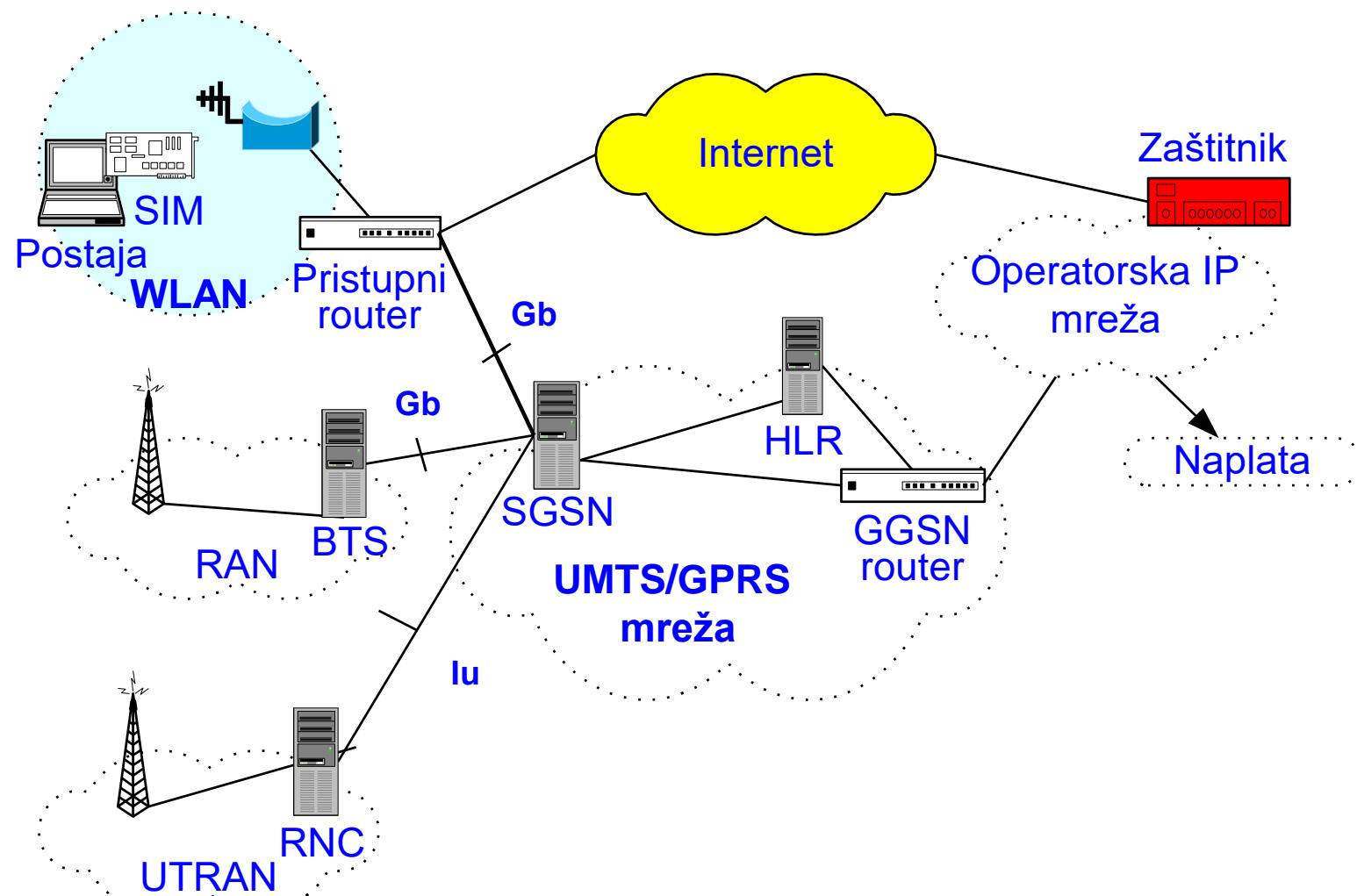


WLAN – UMTS/GPRS topologije

- Dva su različita pristupa povezivanju
 - *Usko povezivanje (Tight Coupling)* kod kojeg je WLAN mreža povezana na UMTS/GPRS mrežu na isti način kao i druge UMTS radijske pristupne tehnologije (UTRAN, GERAN, ...)
 - Usko povezivanje zahtjeva posebnu mrežnu pristupnu opremu, kao i izmjene na WLAN postajama koje se odnose na postojanje posebnih modula, tzv. SIM kartica (*Security Identity Module*), nužnih za reguliranje pristupa, naplate i pokretljivosti između ćelijske (UMTS/GPRS) i WLAN mreže

WLAN – UMTS/GPRS topologije (nastavak)

Usko povezivanje

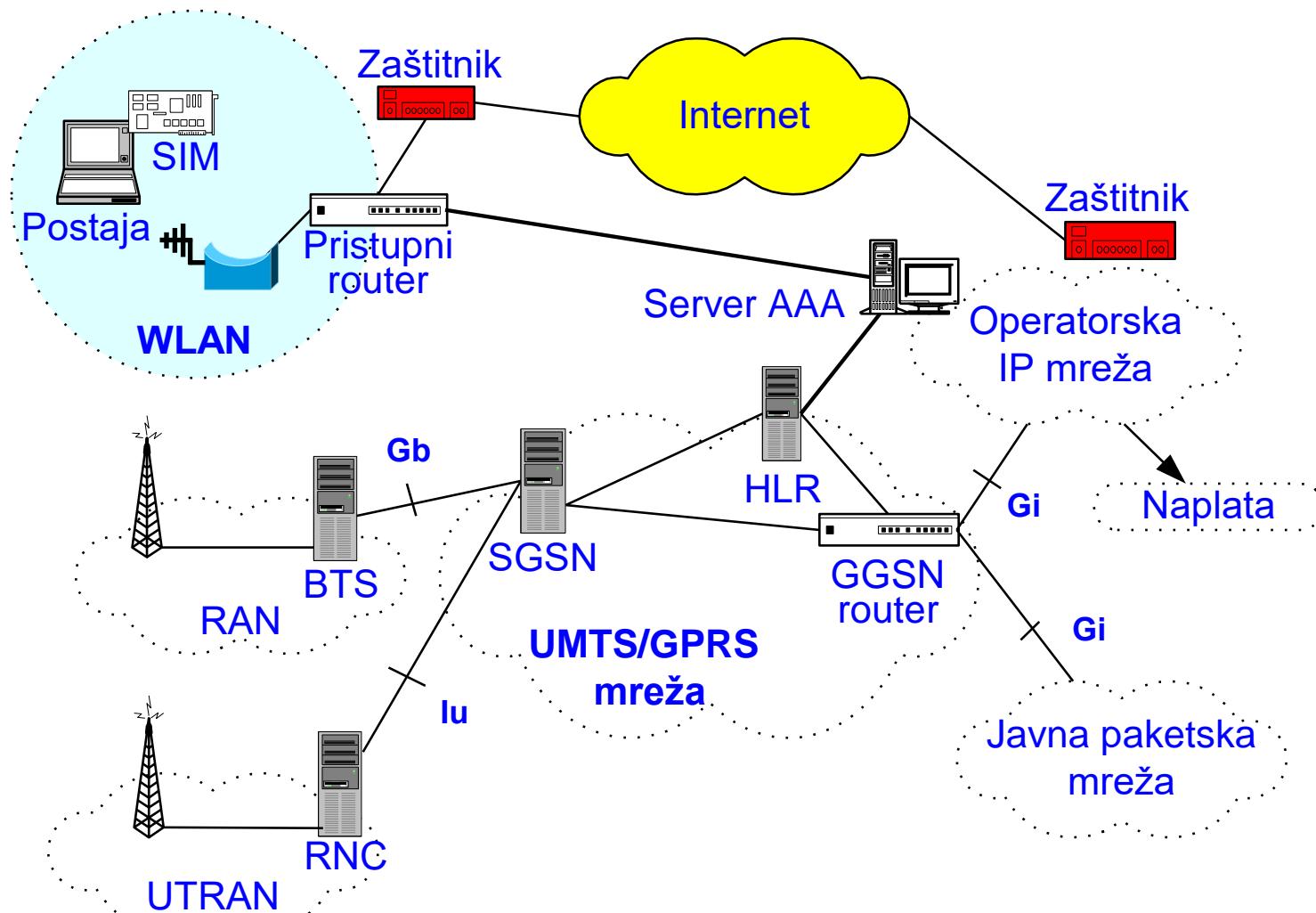


WLAN – UMTS/GPRS topologije (nastavak)

- *Slobodno povezivanje (Loose Coupling)* provodi se preko operatorske IP mreže
 - Između operatorske UMTS/GPRS mreže i radijske LAN mreže nalazi se server AAA (*Authentication, Authorization and Accounting*) koji provjerava vjerodostojnjost prijave pojedinog korisnika
 - Namjena HLR (*Home Location Register*) elementa je spremanje trenutne lokacije pokretnog korisnika i popisa usluga koje korisnik koristi
 - Predložena topologija uključuje naplatu korištene usluge (*billing*) od WLAN korisnika
 - Prednost navedene metode povezivanja u odnosu na metodu uskog povezivanja očituje se u jednostavnosti povezivanja postojeće WLAN opreme s UMTS/GPRS mrežom bez nekih bitnih ograničenja

WLAN – UMTS/GPRS topologije (nastavak)

Slobodno povezivanje



WLAN – UMTS/GPRS topologije

GPRS i WLAN elementi mreže

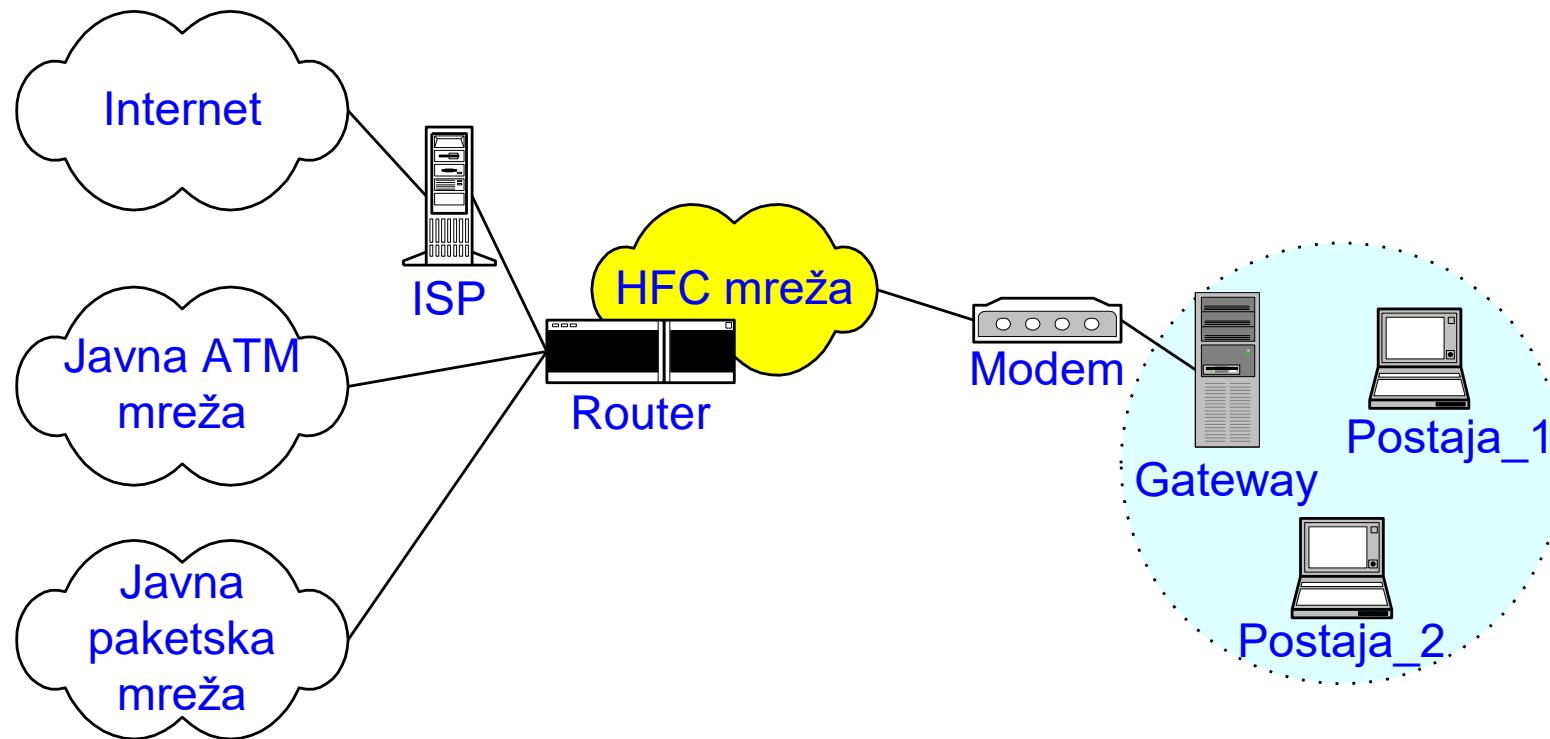
WLAN	GPRS	Namjena
Server AAA	SGSN	Provjera vjerodostojnosti prijave korisnika i pristup naplati usluge
Pristupni router	GGSN	Usmjeravanje IP prometa
Pristupna točka (AP)	BTS	Radijski dio mreže
Mrežna postaja	Pokretni telefon	Krajnji korisnički uređaj

- Oba pristupa su prihvaćena iz sljedećih razloga:
 - neovisni su o pristupnoj tehnologiji (mogu biti implementirani u mreže temeljene na različitim tehnologijama),
 - temeljeni su na IP (*Internet Protocol*) tehnologiji,
 - zahtijevaju male nadopune u postojećoj normizaciji,
 - podržavaju rad s postojećom WLAN tehnologijom

Veza WLAN-a s fiksnom javnom mrežom

- Načini povezivanja WLAN-a s drugim mrežama mogu se iskoristiti i u svrhu povezivanja s fiksnom (paketskom ili ćelijskom) operatorskom mrežom

Primjer vezivanja WLAN-a na fiksnu operatorsku mrežu
i Internet preko HFC (Hybrid Fiber Coax) pristupne mreže



Veza WLAN-a s fiksnom javnom mrežom

- Na mjestu HFC mreže, kao pristupne mreže, mogu biti mreže temeljene na različitim naprednim mrežnim tehnologijama kao što su:
 - pristupne tehnologije po bakrenim paricama (DSL, *Digital Subscriber Line*),
 - optičke pristupne tehnologije (FITL, *Fiber in the Loop*),
 - radijske pristupne tehnologije (WLL, *Wireless Local Loop*), itd.

Radijske pristupne mreže

dr. sc. Jelena Božek

Norme za WLAN

Normizacija u svijetu

- IEEE 802 je skupina IEEE normi koja propisuje tehnologije mreža kako slijedi:
 - IEEE 802.11 WLAN (*Wireless Local Area Network*)
 - IEEE 802.15 WPAN (*Wireless Personal Area Network*)
 - IEEE 802.16 WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*)
 - IEEE 802.18 RR TAG (*Radio Regulatory Technical Advisory Group*)
 - IEEE 802.20 MBWA (*Mobile Broadband Wireless Access*)
 - IEEE 802.21 *Media Independent Handoff Working Group*
 - IEEE 802.22 WRAN (*Wireless Regional Area Network*)
- BRAN (*Broadband Radio Access Networks*) je radna grupa ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*). Norme za mreže:
 - HiperLAN2
 - HiperACCESS
 - HiperMAN
 - HiperLINK

OSI referentni model

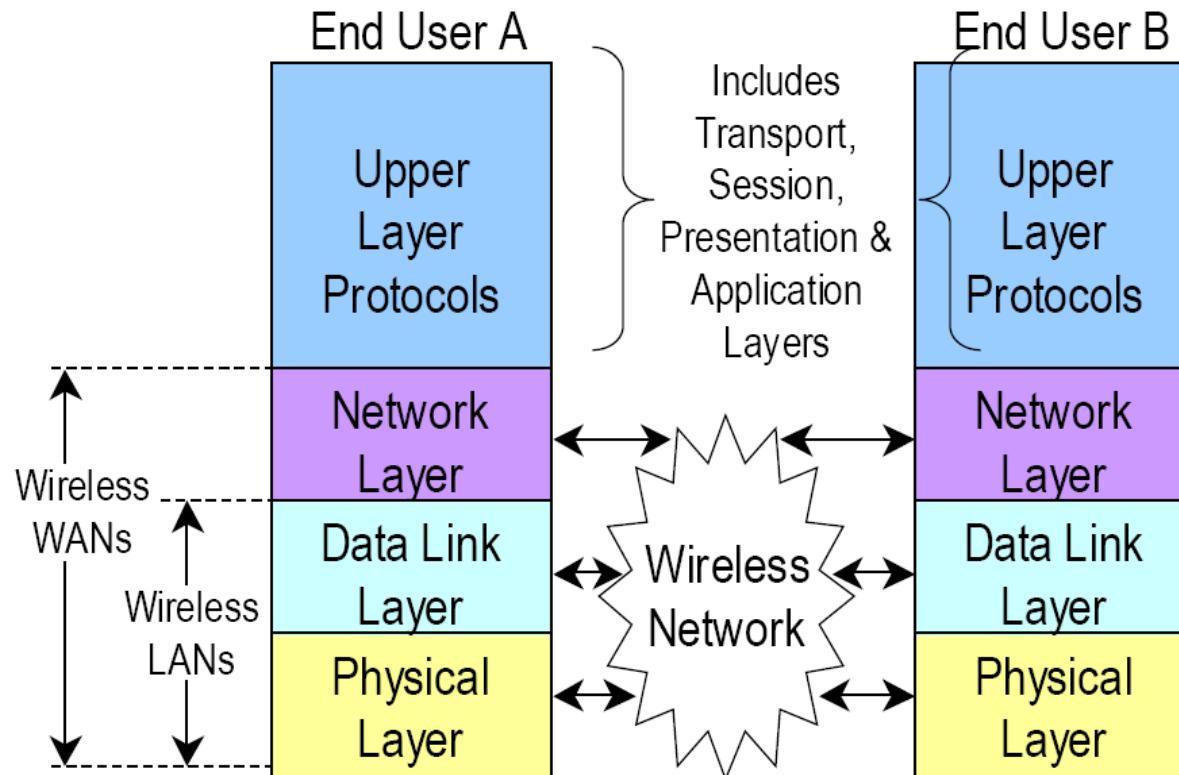
- Referentni model za povezivanje otvorenih sustava (OSI, *Open System Interconnection*) definira funkcije neophodne za povezivanje jednog ponajprije računalskog sustava s drugim bez obzira na njihovu različitost
- Model je 1977. godine razvila Međunarodna organizacija za normizaciju (ISO, *International Organization for Standardization*), a 1983. godine model je postao ISO norma 7498
- ISO model sastoji se od sedam slojeva:
 - Fizički sloj
 - osigurava prijenos bita komunikacijom preko medija ili kanala i definira električne, mehaničke i proceduralne specifikacije

OSI referentni model (nastavak)

- Sloj veze
 - osigurava upravljanje pogreškama i sinkronizacijom između sudionika povezivanja
 - sastoji se od dva podsloja:
 - Podsloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju* (MAC, *Medium Access Control*) uključuje funkcije autentikacije, *roaminga*, ponovnog prijenosa i višestrukog pristupa
 - Podsloj za upravljanje logičkom vezom* (LLC, *Logical Link Control*) uključuje funkcije sigurnosti, upravljanja snagom itd.
- Sloj mreže
 - osigurava usmjeravanje (*routing*) paketa podataka od izvora do odredišta preko usmjerivača (*router*)
 - protokoli, kao npr. IP, funkcioniraju na ovom sloju
- Povezivanje radijskih sustava obavlja se na razinama prva tri sloja, dok se kod WLAN-a koriste samo prva dva sloja

OSI referentni model (nastavak)

U povezivanju radijskih sustava sudjeluju funkcije prva tri sloja OSI modela



OSI referentni model (nastavak)

802.11 mreže u OSI modelu



WLAN u OSI modelu

- LLC podsloj je zajednički za sve LAN-ove obuhvaćene IEEE normama 802 i opisan je u IEEE normi 802.2
- MAC podsloj specifičan je za WLAN i normu 802.11
 - MAC podsloj mreže određuje pravila za pristupanje zajedničkom radijskom prijenosnom mediju uključujući prioritete i određivanje frekvencije kanala
 - Funkcije MAC protokola zajedničke su za sve vrste fizičkog sloja koje su predviđene normom IEEE 802.11 i neovisne su o brzinama prijenosa
 - Kao dio mehanizma izbjegavanja sudara, koji je dio IEEE 802.11 MAC-a, mrežni čvorovi odgađaju odašiljanje svojih podataka sve dok prijenosni medij ne postane slobodan
 - Različiti razmaci između okvira omogućuju uspostavljanje različitih razina prioriteta za različite vrste prometa

WLAN u OSI modelu

- U IEEE normi 802.11 mogu se rabiti pet različitih fizičkih slojeva (PHY, *Physical Layer*):
 - PHY koji se temelji na tehnici proširenog spektra uz primjenu skakanja frekvencija (FHSS)
 - PHY koji se temelji na tehnici proširenog spektra uz primjenu izravnog slijeda (DSSS)
 - PHY koji se temelji na OFDM tehnici
 - PHY koji se temelji na prijenosu u infracrvenom području (IR, *Infrared*)
 - PHY koji se temelji na prijenosu korištenju MIMO (Multiple Input – Multiple Output) – OFDM

IEEE 802.11

- 1997. godine IEEE norma 802.11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*
 - Brzine prijenosa do 2 Mbit/s i rad u ISM frekvencijskom području od 2,4 GHz uz uporabu tehnologije proširenog spektra
- 1999. godine dva dodatka IEEE normi 802.11-1999:
 - IEEE 802.11a: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*
 - IEEE 802.11b: *Supplement to 802.11-1999, Wireless LAN MAC and PHY Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band*
- 2003. godine IEEE norma 802.11g:
 - *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*

IEEE 802.11 (nastavak)

- 2009. godine IEEE norma 802.11n:
 - Uporabom do 4 MIMO (*Multiple-input multiple output*) antena i kanala širine 40 MHz te 64-QAM modulacije moguće su brzine prijenosa do 600 MBit/s
- 2014. godine IEEE norma 802.11ac:
 - Uporabom do 8 MIMO (*Multiple-input multiple output*) antena i kanala širine 160 MHz te 256-QAM modulacije moguće su brzine prijenosa do 1 GBit/s

802.11 a, b i g

IEEE 802.11 FHSS

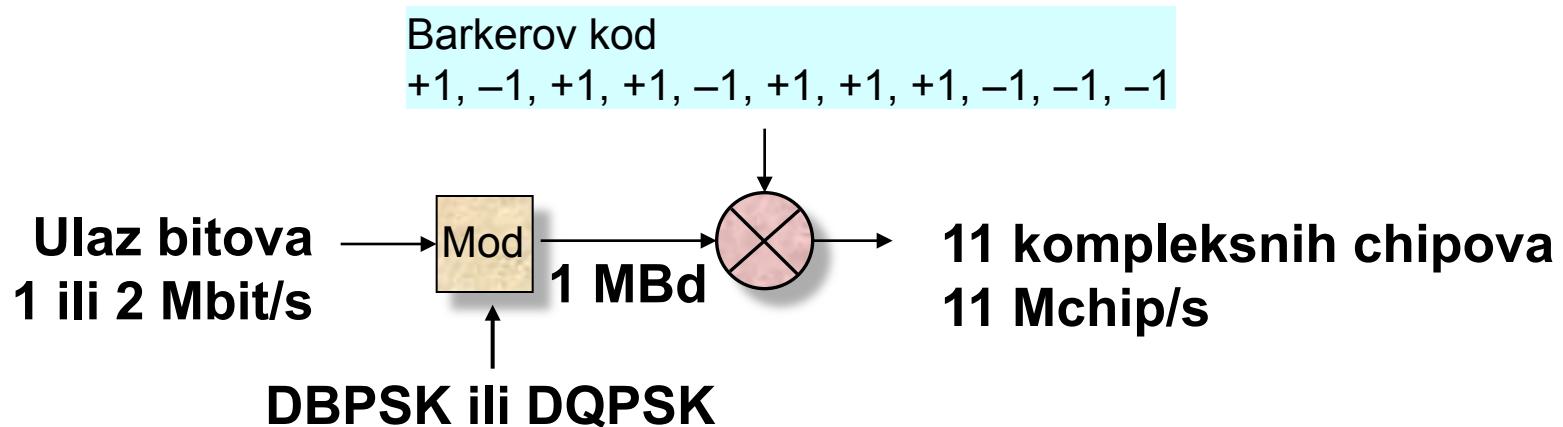
- IEEE 802.11 FHSS radi u području 2,4 GHz i na fizičkom sloju koristi Gaussovnu diskretnu modulaciju frekvencije (GFSK):
 - 2-GFSK, za prijenos podataka brzinama 1 Mbit/s
 - 4-GFSK, za prijenos podataka brzinama 2 Mbit/s
 - Brzina signaliziranja je onda u oba slučaja jednaka i iznosi $R_s = 1 \text{ MBd}$
 - Signali podataka u formatu NRZ (*Non Return to Zero*) filtriraju se u niskopropusnom Gaussovom filteru normirane širine pojasa $B \cdot T_0 = 0,5$
 - Kako je $T_0 = 1/R_s = 1 \mu\text{s}$, slijedi da upotrijebljeni Gaussov filter mora imati 3-dB širinu pojasa propuštanja od 500 kHz

IEEE 802.11 FHSS (nastavak)

- Sheme skakanja frekvencije obilježava:
 - skakanje na temelju računalom generiranog pseudoslučajnog koda u kojem se nalazi do 79 frekvencija
 - najmanji razmak frekvencija između kojih se skače je 6 kanala
 - 79 shema skakanja podijeljena su u tri skupa s 26 u svakom skupu
- Europske norme ETS EN 300-328 i ETS EN 300-339 određuju parametre FHSS sustava. Navodimo samo neke od njih:
 - frekvencijsko područje: 2400 – 2483,5 MHz
 - najmanje 20 frekvencija skakanja
 - najviše 100 mW EIRP

IEEE 802.11 DSSS

- Podaci o fizičkom sloju IEEE 802.11 DSSS:
 - brzina prijenosa podataka: 1 ili 2 Mbit/s (modulacija: DBPSK za 1 Mbit/s, a DQPSK za 2 Mbit/s)
 - brzina signaliziranja: 1 MBd
 - frekvencija podimpulsa: 11 Mchip/s (Barkerov kod od 11 podimpulsa)
 - 13 kanala u pojasu 2,4 do 2,4835 GHz



Usporedba verzija s FHSS i DSSS

Tehnologija na PHY sloju	Frekvenčijsko područje [MHz]	Modulacijski postupak	Brzina prijenosa [Mbit/s]
DSSS	2400 – 2483,5	DBPSK	1
		DQPSK	2
		2-GFSK	1
FHSS		4-GFSK	2

- FHSS je manje osjetljiv na smetnje i višestazno prostiranje
- Kvaliteta FHSS se postepeno kvari, dok kod DSSS to nastupa naglo
- S FHSS može se imati 10 do 15 kanala, dok su kod DSSS moguća najviše 3 kanala
- S DSSS mogu se postići znatno veće brzine prijenosa od 2 Mbit/s, a to je maksimum za FHSS
- Kod DSSS, pravilo je da faktor proširenja bude jednak 11 kako bi se ispunio uvjet o potrebnom procesnom dobitku

IEEE 802.11b

- Sustavi po normi 802.11b na tržištu su postali poznati kao Wi-Fi (*Wireless Fidelity*)
 - U početku se oznaka Wi-Fi odnosila samo na IEEE normu 802.11b, ali kasnije se termin proširio na bilo koju vrstu IEEE mreže 802.11
- Proširena norma 802.11b u 2,4 GHz području omogućava brzine:
 - 1 Mbit/s i 2 Mbit/s kao i izvorna IEEE norma 802.11
 - 5,5 Mbit/s i 11 Mbit/s kao dodatne mogućnosti
- IEEE sustav 802.11b povratno je kompatibilan s ranijim proizvodima rađenim na temelju izvorne IEEE norme 802.11

CCK postupak u IEEE 802.11b

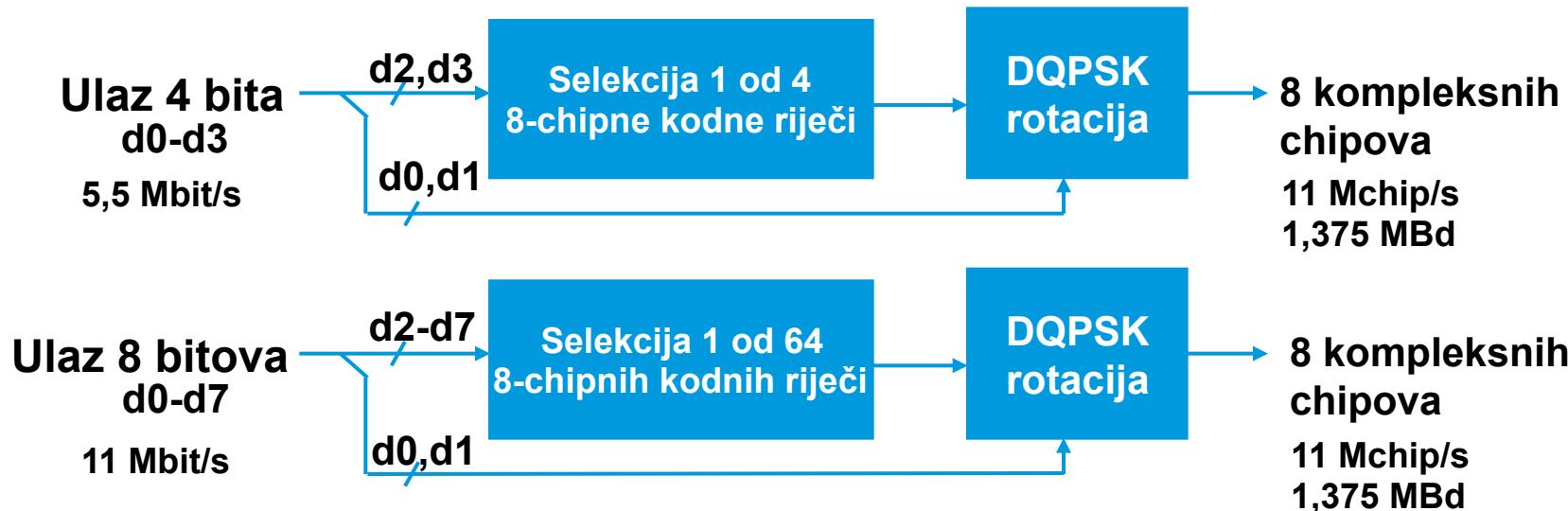
- IEEE norma 802.11b koristi CCK-tehniku (CCK, *Complementary Code Keying*) na fizičkom sloju za brzine od 5,5 i 11 Mbit/s
 - CCK je oblik tehnike proširenog spektra (DSSS tehnike) koja združuje DSSS postupak proširenja spektra i modulaciju
 - Radi postizanja brzina od 5,5 i 11 Mbit/s u istom rasteru kanala širine 22 MHz treba smanjiti faktor proširenja s 11 na 8. Zbog toga se povećava brzina signaliziranja s 1 MBd na 1,375 MBd.
 - Za postizanje $R_D = 5,5 \text{ Mbit/s}$ uz $R_S = 1,375 \text{ MBd}$ potrebno je prenositi $5,5/1,375 = 4 \text{ bit/simbol}$. Za 11 Mbit/s potrebno je onda 8 bit/simbol
- Zašto CCK?
- Zato jer ga je lako integrirati s DSSS-om za brzine od 1 i 2 Mbit/s iz izvorne verzije IEEE 802.11. Osim toga CCK povećava propusnost mreže

Što je CCK?

- CCK je napredna tehnika kodiranja
 - Za proširenje se umjesto binarnoga 11-chipnog Barkerovog koda koristi skup od 64 8-chipnih kodnih riječi
 - Elementi tih 8-chipnih kodnih riječi su kompleksni (kofazna I i kvadraturna Q arhitektura koristi se za prikaz kodnih riječi) nasuprot realnim vrijednostima elemenata Barkerovog koda (elementi koda su: +1 i -1)
 - Kodne riječi u skupu od njih 64 su ortogonalne. Na temelju tog svojstva one se međusobno mogu razlikovati i u uvjetima jake prisutnosti šuma odnosno izraženoga višestaznog prostiranja (refleksije od zidova)
 - Uz proširenje spektra kod obje se brzine prijenosa koristi modulacijski postupak QPSK. Zbog osobina samog postupka CCK modulacijski postupak ima obilježja diferencijalnog QPSK, odnosno DQPSK

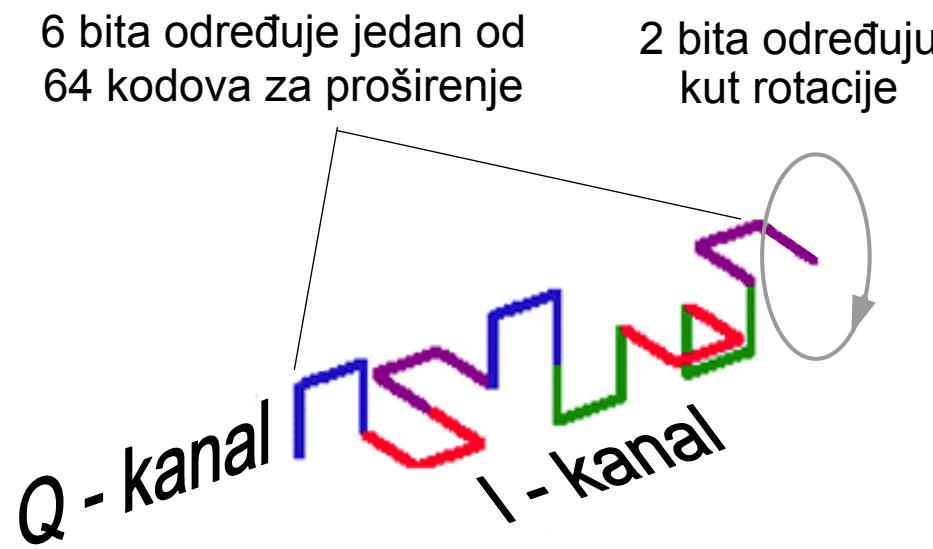
Temeljna obilježja postupka CCK

CCK postupak za brzine 5,5 i 11 Mbit/s



- Za brzinu od 11 Mbit/s modulator koristi 6 bita iz svakog bajta za odabir jedne od 64 ortogonalne 8-chipne kodne riječi
- Preostala 2 bita iz bajta koristi se u QPSK postupku (I-Q-modulator) za dodatnu rotaciju cijele kodne riječi u kompleksnoj ravnini za 0° , 90° , 180° ili 270°
- Kod brzine od 5,5 Mbit/s moguć je odabir samo između četiri 8-chipnih kodnih riječi. Za to služe 2 bita, a preostala su 2 bita za QPSK rotaciju

Temeljna obilježja postupka CCK (nastavak)



- CCK-modulatoru se u oba slučaja privode podaci brzine 1,375 MBd
- Nakon odabira 8-chipne kompleksne riječi realni i imaginarni dio te riječi 11 milijuna puta u sekundi privodi se kofaznom, ili I-ulazu, odnosno kvadraturnom, ili Q-ulazu QPSK modulatora (I–Q-modulator)
- U tom modulatoru množe se kompleksne kodne riječi za proširenje s odgovarajućim kompleksnim brojem koji odgovara stanju faze QPSK, a kojeg određuju preostala dva bita

Tehnologije na fizičkom sloju 802.11b

Pregled mogućih režima rada sustava IEEE 802.11b

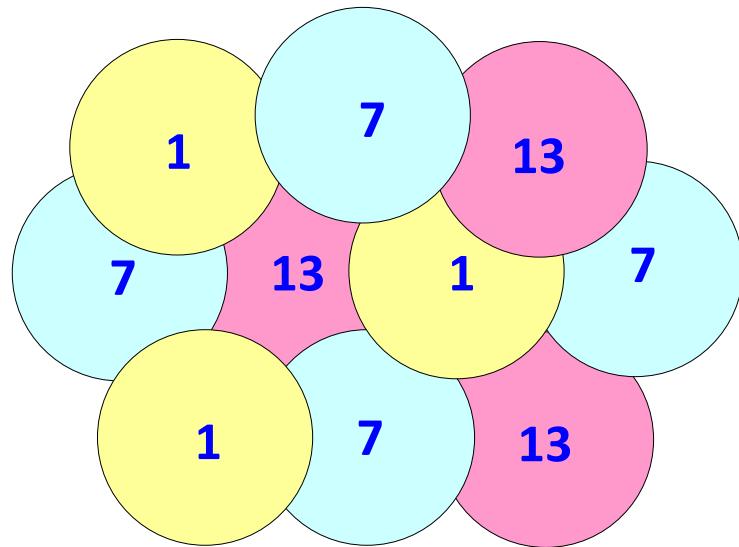
Brzina prijenosa [Mbit/s]	Broj podimpulsa	Modulacijski postupak	Brzina signaliziranja [MBd]	Bit/simbol
1 Mbit/s	11 (Barker kod)	BPSK	1	1
2 Mbit/s	11 (Barker kod)	QPSK	1	2
5,5 Mbit/s	8 (CCK)	(D)QPSK	1,375	4
11 Mbit/s	8 (CCK)	(D)QPSK	1,375	8

Upotreba raspoloživih kanala za 802.11b

- Pri konačnoj brzini od 11 Mbit/s zauzima se pojas jednog kanala od 22 MHz
 - CCK može koegzistirati s izvornim 802.11 DSSS
 - CCK može raditi u postojećoj shemi kanala u području 2,4 GHz
 - 13 kanala u Europi (ETSI) od 2412 MHz do 2472 MHz na razmaku od po 5 MHz (U USA raspoloživo je samo prvih 11 kanala)
 - Postoje samo 3 – 4 nepreklapajuća kanala (USA: 1, 6 i 11; ETSI: 1, 5, 9 i 13)
 - U nekim europskim zemljama preporuča se koristiti samo 3 kanala (1, 7 i 13)
- U planiranju pokrivanja WLAN sustavima koriste se ćelije koje se preklapaju za razliku od uobičajenog ćelijskog sustava
 - Ako se pri normi 802.11b želi osigurati izolacija kanala, tada se mogu u jednoj topologiji istodobno koristiti samo tri frekvencije

Planiranje topologije mreže

Primjer frekvencijskog plana za 802.11b



- Preklapajuće ćelije nose sa sobom povećanu mogućnost interferencije i smanjenu propusnost na obje frekvencije
- Istodobno one osiguravaju vrlo fleksibilni razmještaj pristupnih točaka koji je najčešće uvjetovan okolinom (prostorije, hodnici)
- Sustavi po 802.11b trpe interferenciju i od drugih komunikacijskih i nekomunikacijskih sustava i uređaja s kojima dijele frekvencijski pojas
- Izvorna norma 802.11 potiskivanje susjednog kanala temelji na razmaku od 30 MHz. Kod "b" verzije norme, a kada se koristi 4 kanala, problem je još izraženiji s obzirom na razmak kanala od 20 MHz (u USA 25 MHz već kod 3 kanala)

IEEE 802.11a

- Sustavi po IEEE normi 802.11a rade u području 5 GHz
 - Središnja frekvencija f_{ch} i redni broj kanala n_{ch} za područje od 5 – 6 GHz povezani su izrazom:
$$f_{\text{ch}} = 5000 + 5 n_{\text{ch}} \text{ [MHz]}, \quad n_{\text{ch}} = 0, 1, \dots, 200.$$
- Na fizičkom sloju koristi se OFDM-postupak uz sljedeće parametre prijenosa:
 - brzina prijenosa: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 i 54 Mbit/s
 - modulacijski postupak: BPSK, QPSK, 16-QAM i 64-QAM
 - širina kanala: 20 MHz

IEEE 802.11a (nastavak)

Dopuštena izračena snaga odašiljača



REPUBLIKA HRVATSKA

HRVATSKA AGENCIJA ZA POŠTU I
ELEKTRONIČKE KOMUNIKACIJE

OPĆA DOZVOLA ZA RADIJSKU POSTAJU

Broj OD – 85

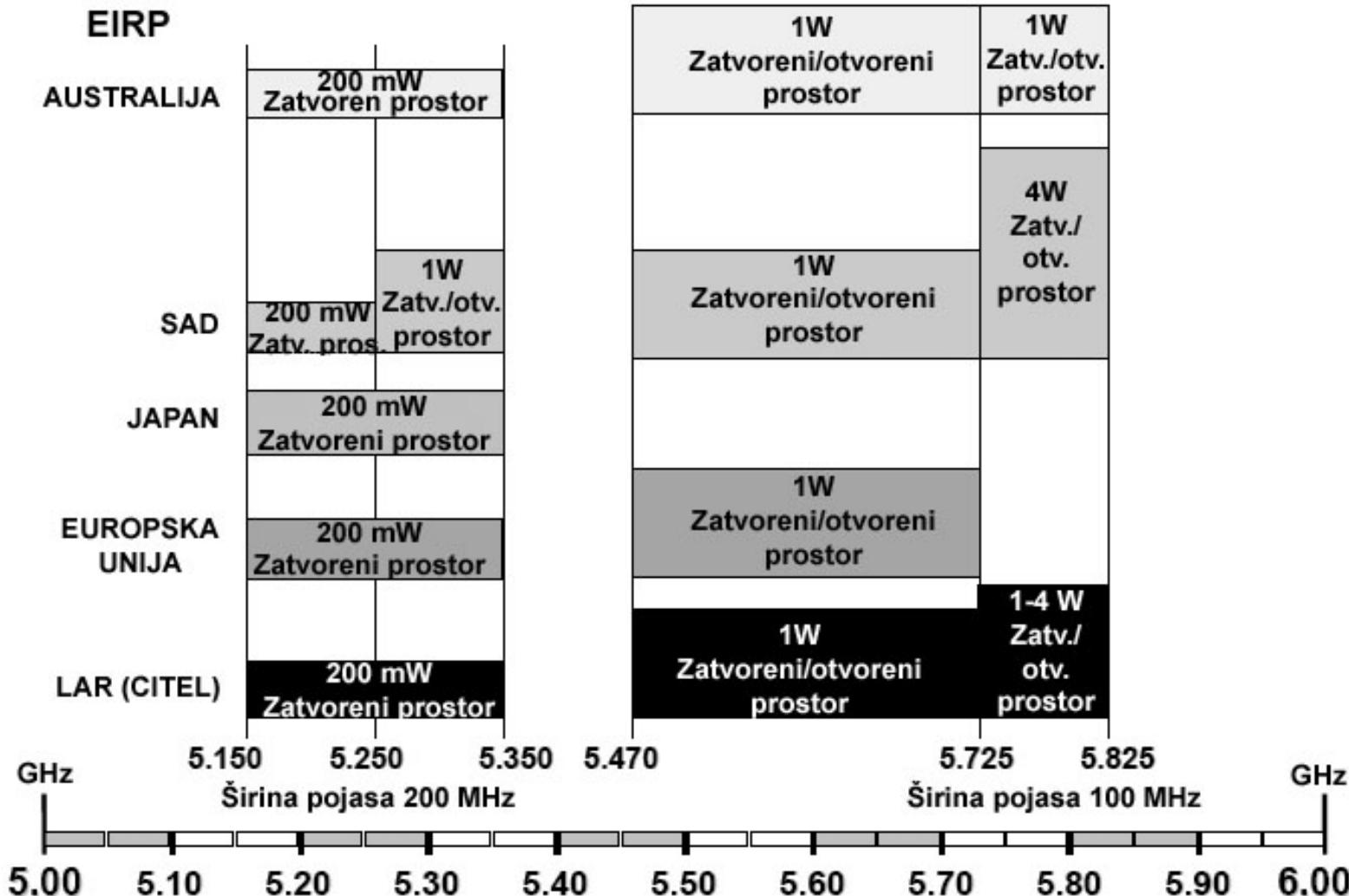
OPĆI PODACI O RADIJSKOJ POSTAJI	
1.1. Vrsta radijske postaje (uredaja)	SRD WAS/RLAN
1.2. Oznaka radijske postaje (uredaja)	-
1.3. Odluka CEPT-a o izuzeću od izdavanja pojedinačne dozvole za radijsku postaju	ERC/REC 70-03
1.4. Odgovarajuće CEPT-ove preporuke, odluke i/ili izvješća	ERC/REC 70-03 Annex 3, ECC/DEC/(04)08
1.5. Odgovarajuće harmonizirane norme	EN 301 893
1.6. Razred uredaja prema Direktivi 1999/5/EC	2
UPORABA FREKVENCIJE	
2.1. Frekvenčni pojas (MHz)	5150 - 5250
2.2. Razmak kanala i širina kanala (kHz/MHz)	-
2.3. Duplexni razmak i upareni radiofrekvenčni spektar	-
2.4. Vrsta radiokomunikacijske službe	Pokretna služba
UREĐAJ	
3.1. Dopuštena snaga odašiljača (mW/W)	-
3.2. Najveća efektivna izračena snaga - EIRP	200 mW maksimalna srednja efektivna izotropno izračena snaga (e.i.r.p.)
3.3. Dopuštena vrsta emisije	-
3.4. Brzina prijenosa (kbit/s)	-
3.5. Dopuštena vrsta antene	-

LOKACIJA RADIJSKE POSTAJE	
4.1. Naziv lokacije i oznaka županije	-
4.2. Zemljopisna duljina i širina	-
4.3. Nadmorska visina (m)	-
4.4. Zemljopisno područje uporabe radijske postaje	Republika Hrvatska
OPĆI I POSEBNI UVJETI UPORABE RADIJSKE POSTAJE	
5.1. Opći uvjeti uporabe radijske postaje	Isključivo uporaba u zatvorenim prostorima. Maksimalna srednja e.i.r.p. gustoća je ograničena na 0.25 mW/25 kHz u bilo kom pojasu od 25 kHz.
5.2. Posebni uvjeti uporabe radijske postaje	
5.3. Posebni uvjeti uvoza i stavljanja na tržište radijske postaje	
NAPOMENE	
6.1. Ova Opća dozvola za rad SRD WAS/RLAN uređaja ne jamči zaštitu od mogućih smetnji uzrokovanih od radijskih postaja iste ili drugih radijskih službi.	
<u>Dozvola vrijedi na neodređeno vrijeme.</u> M.P. ČLAN VIJEĆA <i>Miljenko Krvišek, dipl.ing.el., v.r.</i> Zagreb, 30.04.2008.	

Obrazac AG030401-OD

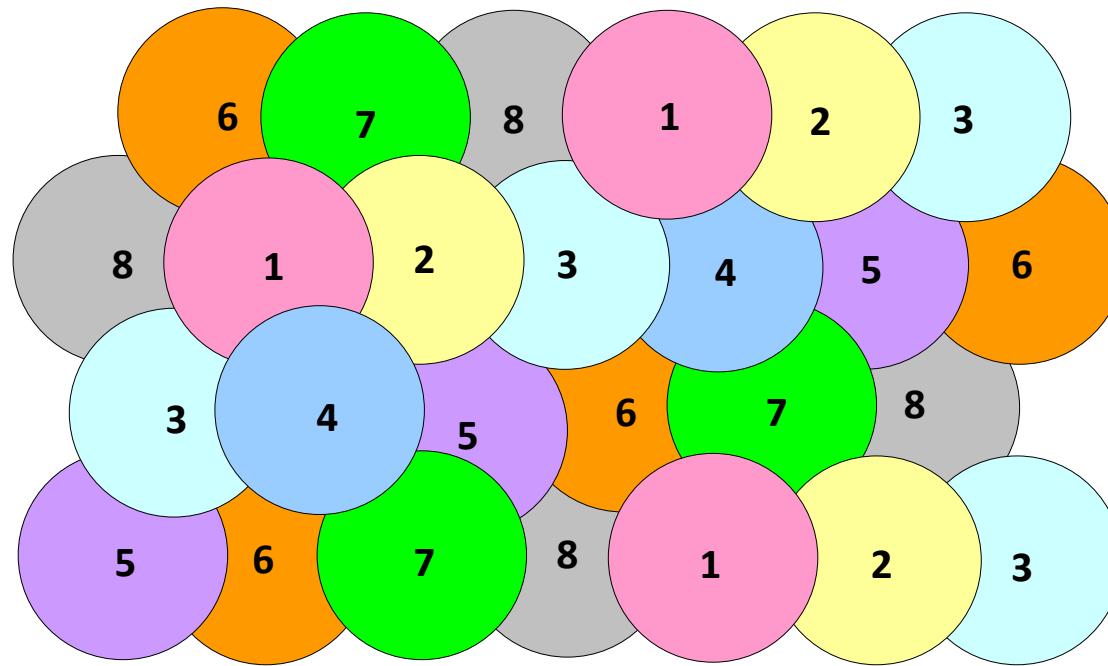
IEEE 802.11a (nastavak)

Dopuštena izračena snaga odašiljača



Planiranje topologije mreže

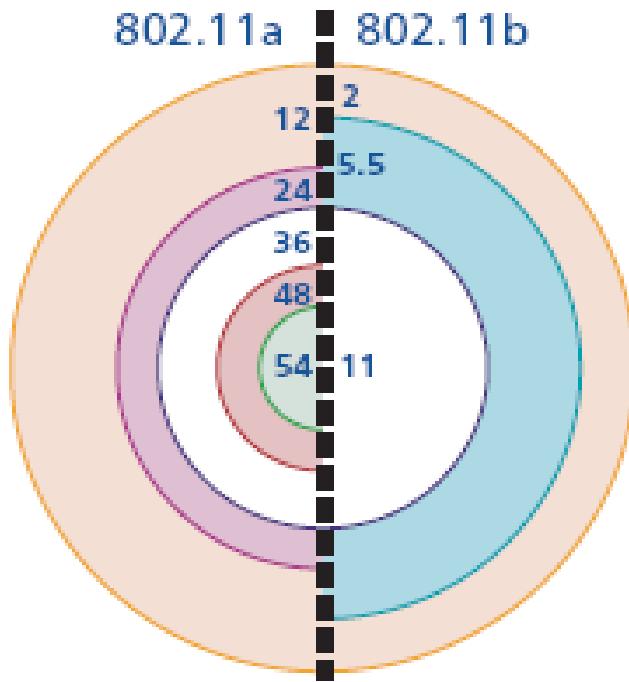
Primjer frekvencijskog plana za 802.11a



- Moguće je koristiti 8 frekvencija u preklapajućoj topologiji (što je osjetno više od 3 kanala kod 802.11b) u pojasu od 5,150 do 5,350 GHz

Usporedba IEEE 802.11b i 802.11a

Domet i ostvarive brzine



- 802.11b dobro je koristiti ako je potrebno postići pokrivanje većeg područja tj. kad nije moguće gusto postaviti pristupne točke
- Gleda li se na trošak, "b" je jeftinija, jer ima manji broj pristupnih točaka na nekoj površini

- Smetnje u ISM području 2,4 GHz (Bluetooth ili drugih radijskih sustava, industrijski izvori) smanjuju propusnost
- Pri velikoj gustoći terminala, uz korištenje velikih brzina, jedino "a" mreža može dati zadovoljavajuću propusnost

IEEE 802.11g

- Norma je zadržala sva obilježja tehnologije iz 802.11a, a koristi frekvencijsko područje rada 802.11b (2,4 GHz)
- 802.11g potpuno je povratno kompatibilna s 802.11b,
 - za brzine od 1, 2, 5,5 i 11 Mbit/s koristi se DSSS tehnologija i CCK ili QPSK/BPSK modulacijska shema (potpuno jednako kao i kod 802.11b)
 - za brzine od 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 i 54 Mbit/s koristi se OFDM tehnologija s 52 podnosioca i modulacijska shema ovisna o brzini
 - Omogućen je prijelaz iz mreže koja zahtijeva veliku širinu prijenosnog pojasa i visoku brzinu prijenosa u mrežu u kojoj se rabe niže brzine prijenosa, bez prekidanja usluge
 - Korisnici opremljeni 802.11b uređajima mogu se kretati i koristiti usluge pristupnih točaka "g" mreže (uz brzinu od 11 Mbit/s) kao da su u području s pristupnom "b" točkom

IEEE 802.11g (nastavak)

– Prednosti mreže po normi 802.11g:

- zadržana brzina protoka jednakom onoj u 802.11a
- moguć je neprimjetni prijelaz (*roaming*) između 802.11g i 802.11b
- postojeći korisnici sustava po normi 802.11b mogu koristiti pristupne točke mreže 802.11g
- korisnici 802.11g mreže mogu se vezati na pristupne točke 802.11b mreže (najviše uz brzinu od 11 Mbit/s)
- bolje je pokrivanje nego kod 802.11a uz istu brzinu podataka
- koristi se u cijelom svijetu

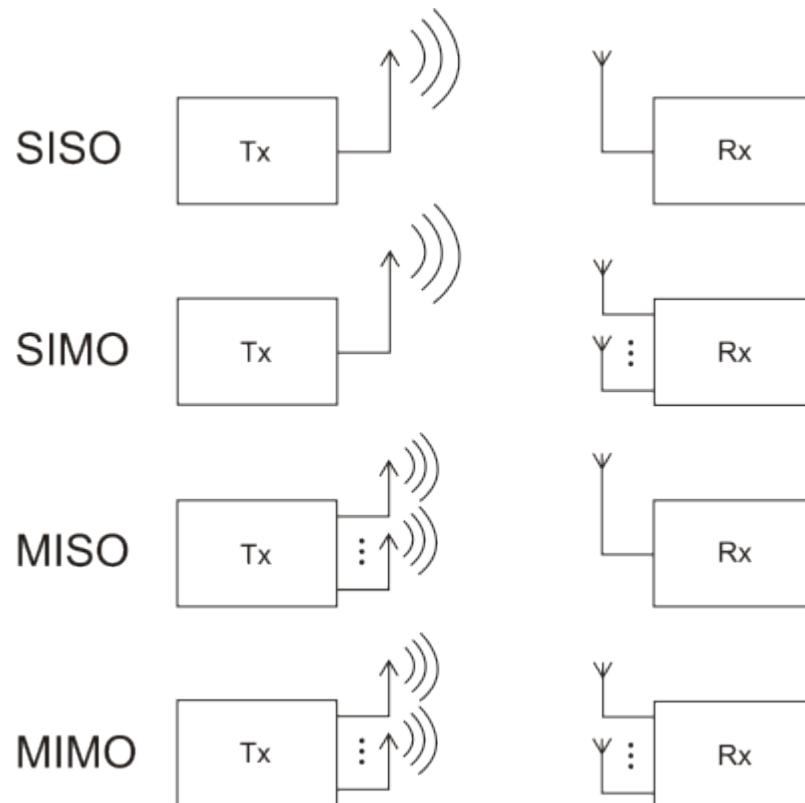
– Nedostaci mreže po normi 802.11g:

- isti su izvori smetnji kao i kod sustava po 802.11b (ISM pojas)
- povećana je potrošnja snage
- visoka su početna ulaganja

MIMO sustavi

MIMO sustavi

- postoji nekoliko osnovnih sustava odašiljanja i prijama radiosignala
- razlika među njima je u drugačijim svojstvima kanala koja nastaju zbog uporabe odašiljača i prijamnika s jednom ili više antena



S = *single*

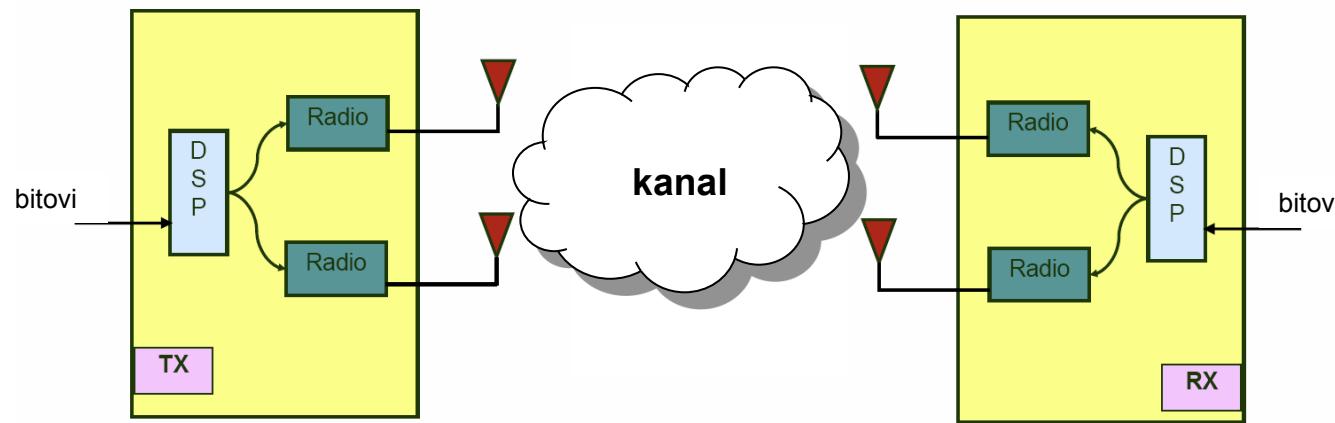
M = *multiple*

I = *input*

O = *output*

MIMO sustavi

- **MIMO – Multiple Input Multiple Output**



- prijamnik i odašiljač imaju više od jedne antene
- u istom kanalu omogućava se prijenos nezavisnih tokova podataka
- digitalni procesor signala (DSP) rekonstruira primljeni signal

SISO sustavi

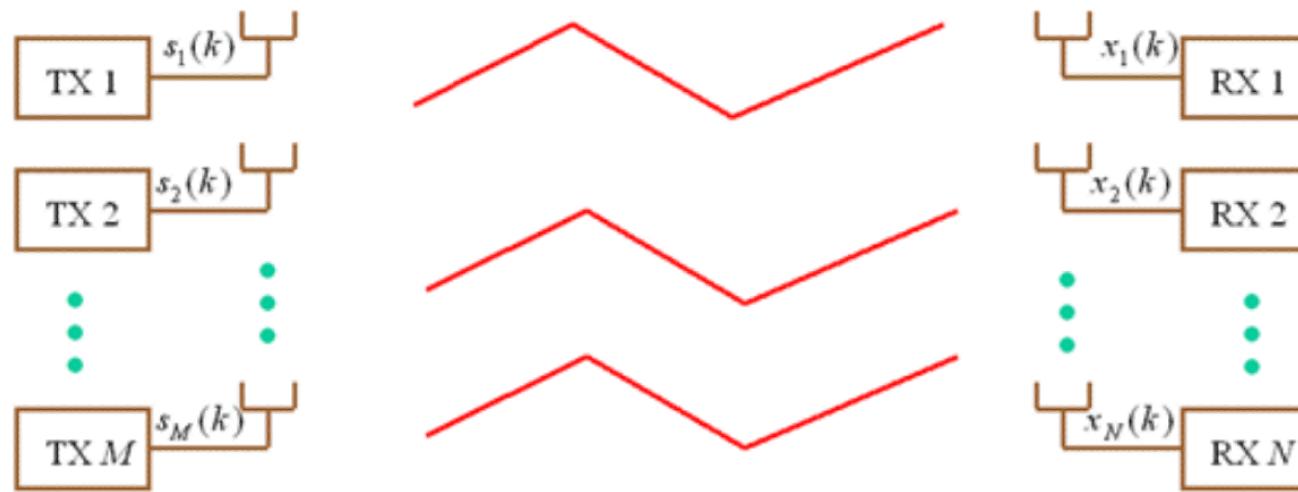
- kapacitet kanala u klasičnim sustavima s jednom antenom definiran je Shannonovom formulom:

$$C = \log_2(1 + SNR) \text{ [bit/s/Hz]}$$

- vidljivo je da je kapacitet veze ograničen odnosom signal/šum
- odnos signal/šum moguće je mijenjati povećanjem snage odašiljača, gdje kapacitet raste logaritamski
- primjer: za povećanje kapaciteta s 1 bit/s/Hz na 10 bit/s/Hz, potrebno je povećati snagu odašiljača cca. 1000 puta
- nemoguće u WLAN-u!

MIMO sustavi (nastavak)

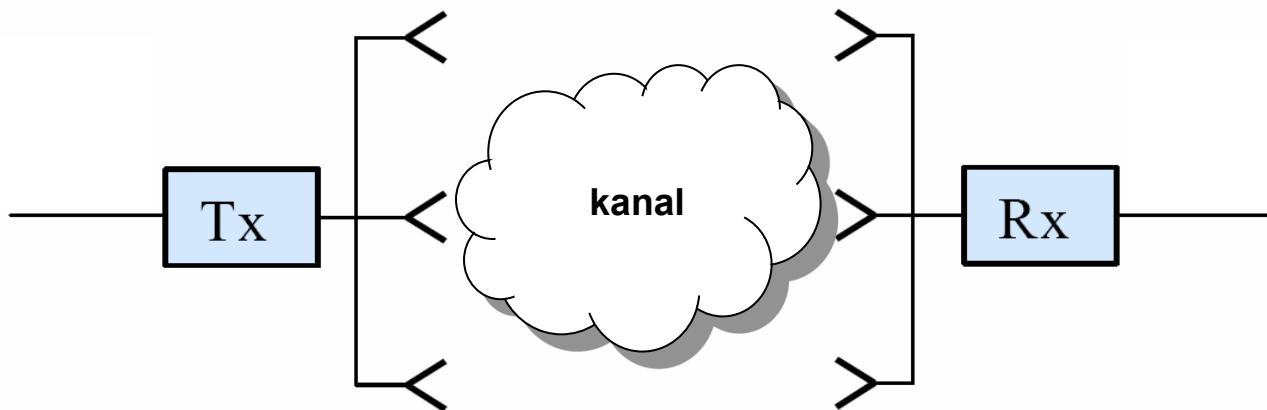
- paralelni prijenos između M odašiljača i prijamnika povećava kapacitet kanala



- kad bi kanali bili međusobno nezavisni (informacija o jednom kanalu sadržana je samo o njemu), ukupni kapacitet bio bi M puta veći od onog definiranog Shannonovom formulom

MIMO sustavi (nastavak)

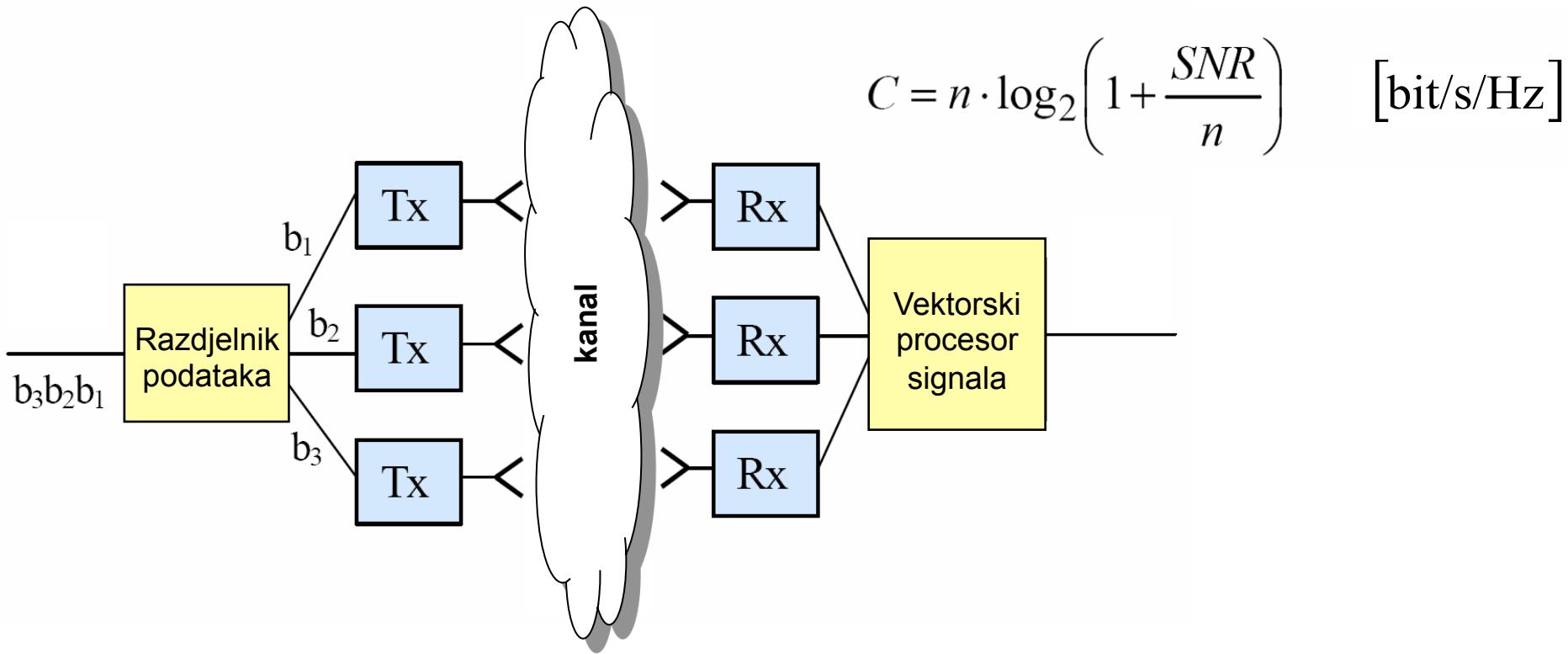
- MIMO sustavi oslanjaju se na više paralelnih sljedova podataka
- prva izvedba datira iz perioda od 1995. do 1997. godine (Bell Labs)
- SISO sustavi su jednostavniji za konstrukciju, ali problemi koji se javljaju su feeding i relativno nizak tok podataka (Shannon)
- mogućnost povećanja kapaciteta kanala uporabom diverziti prijama
 - problem: i dalje malo povećanje brzine prijenosa – djeluje se samo na odnos signal/šum, a i dalje postoji samo jedan tok (slijed) podataka



$$C = \log_2 (1 + SNR \cdot n^2) \quad [\text{bit/s/Hz}]$$

MIMO sustavi (nastavak)

- broj antena na prijamniku i odašiljaču ograničava maksimalni broj sljedova koji se mogu stvoriti
- standardno označavanje takvih sustava je 2×2 , 3×2 , 4×4
 - prva brojka označava broj odašiljačkih, a druga broj prijamnih antena



MIMO sustavi (nastavak)

- prijenosnu matricu potrebno je dijagonalizirati kako bi mogli ostvariti maksimalnu brzinu prijenosa
- to nije sasvim moguće kod koreliranih kanala
 - povećava se feding
 - smanjuje se kapacitet

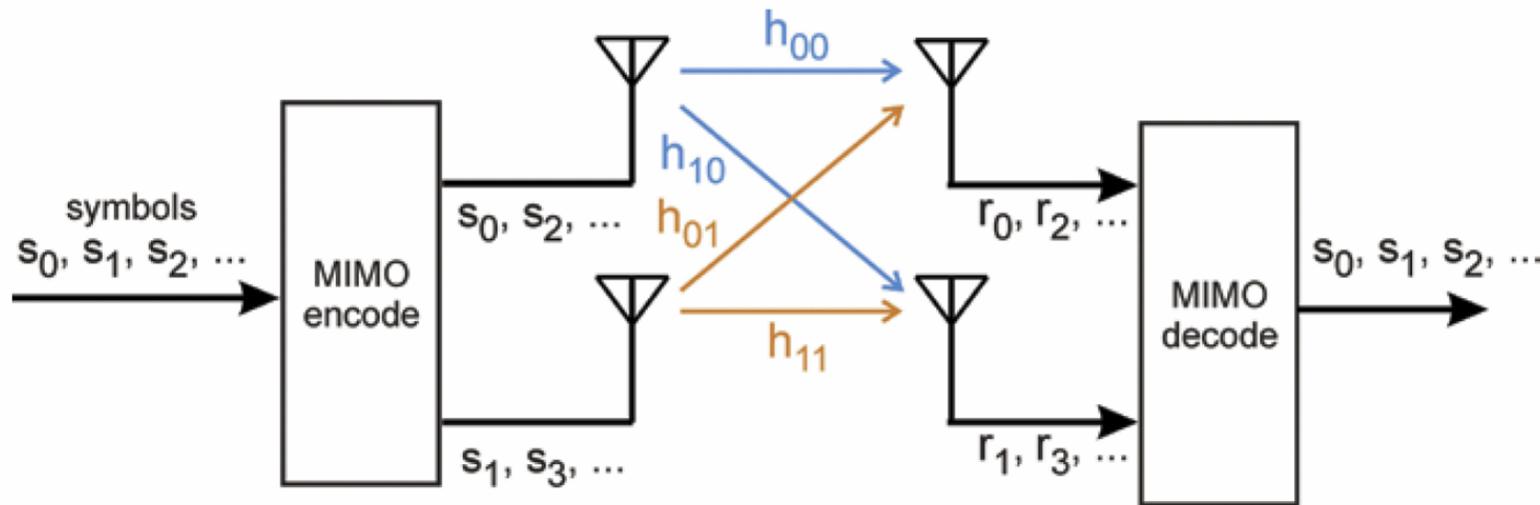
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{32} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 \\ 0 & h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

MIMO sustavi (nastavak)

- princip slanja i dekodiranja simbola u MIMO sustavu



$$r_0 = h_{00}s_0 + h_{01}s_1$$

$$s_0 = B(h_{11}r_0 - h_{01}r_1)$$

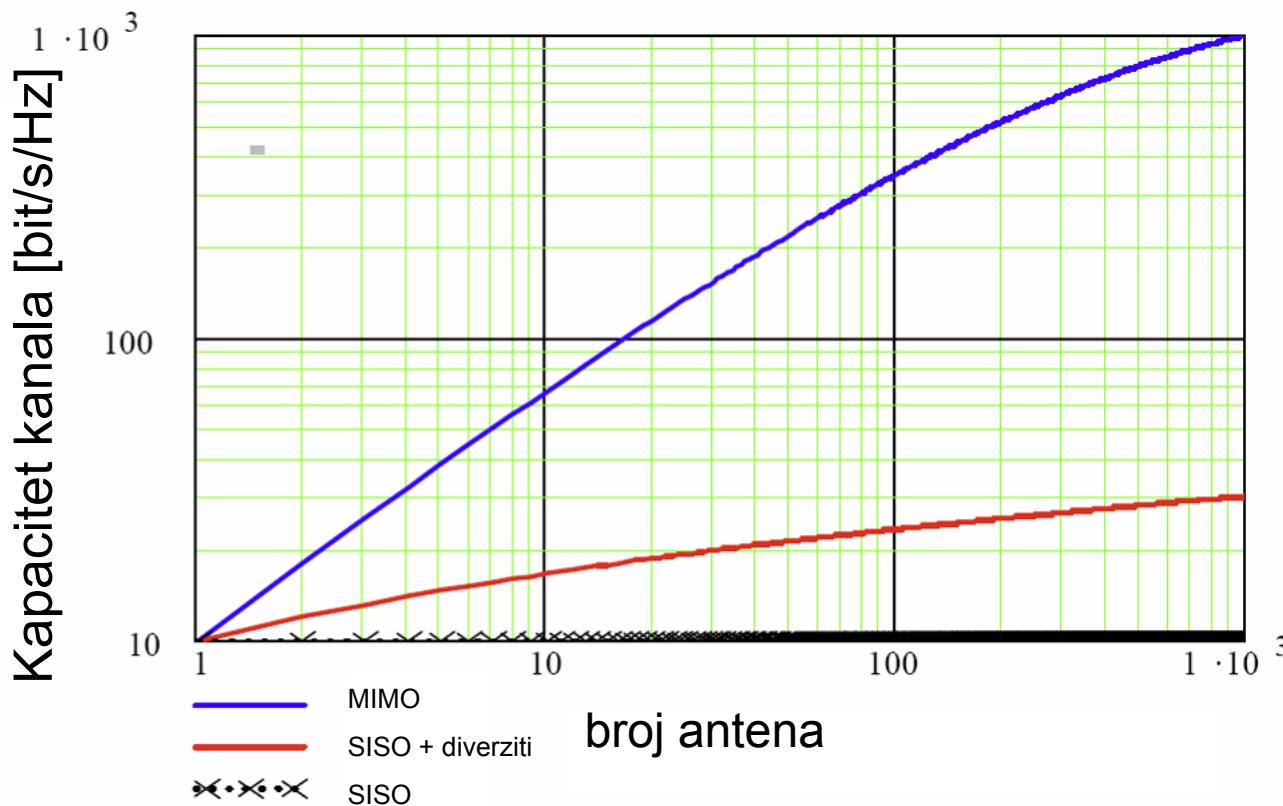
$$s_1 = B(-h_{10}r_0 + h_{00}r_1)$$

$$r_1 = h_{10}s_0 + h_{11}s_1$$

$$B = \frac{1}{h_{00}h_{11} - h_{01}h_{10}}$$

MIMO sustavi (nastavak)

- spektralna učinkovitost (kapacitet kanala) pojedinih sustava



IEEE 802.11n

IEEE 802.11n

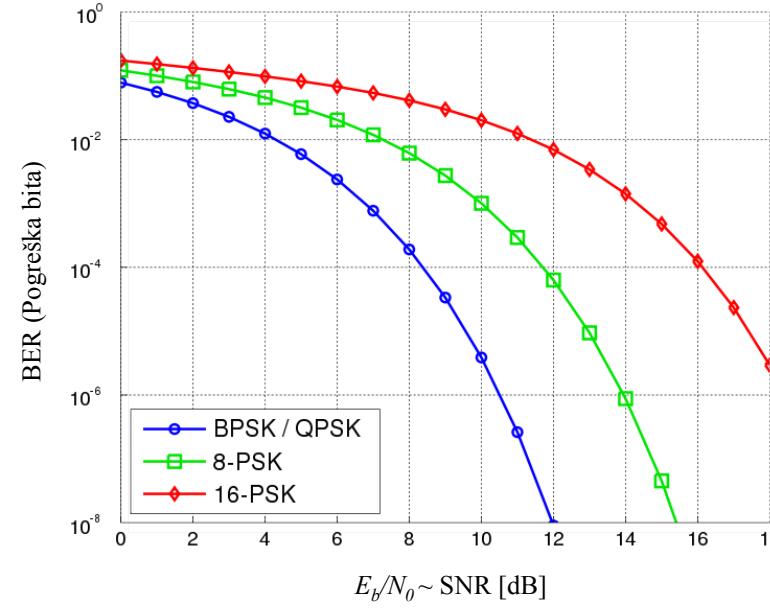
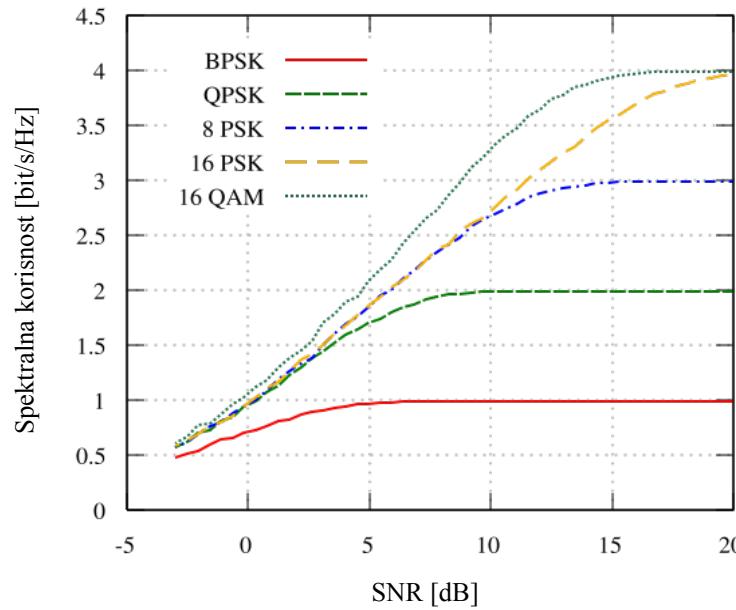
- cilj razvoja 802.11n je povećanje brzine prijenosa u WLAN mrežama
- maksimalna teorijska brzina prijenosa IEEE 802.11n je 600 Mbit/s
- koristi kanale širine 40 MHz, za razliku od kanala širine 20 MHz koliki se koriste u prijašnjim WLAN normama
- omogućena uporaba u pojasu od 2,4 GHz i 5 GHz
- glavna značajka koju je norma 802.11 n uvela je korištenje diverziti načina odašiljanja i prijema signala (*diversity*)
 - dvije ili više antena koriste se u svrhu poboljšanja kvalitete i korisnosti radijske veze

IEEE 802.11n modulacijske tehnike

- u normi 802.11 n koriste se slijedeće modulacijske tehnike koje u idealnom slučaju imaju navedene spektralne korisnosti:
 - BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), 1 bit/s/Hz
 - QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 2 bit/s/Hz
 - 16-QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*), 4 bit/s/Hz
 - 64-QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*), 6 bit/s/Hz
- ovisno o propusnosti kanala, WLAN odašiljač i prijamnik sami odabiru koji modulacijski postupak će koristit
- ako su uvjeti u kanalu povoljni, koristit će se modulacijski postupak s većom spektralnom korisnošću, a ako su lošiji s manjom
- razlog za to je veća otpornost na pogrešku modulacijskog postupka s manjom spektralnom korisnošću

IEEE 802.11n modulacijske tehnike (nastavak)

- dijagrami prikazuju spektralnu korisnost pojedinog modulacijskog postupka i otpornost na pogrešku za neki odnos signal/šum
- veća spektralna korisnost = veća brzina = manja otpornost na pogrešku



IEEE 802.11n modulacijske tehnike (nastavak)

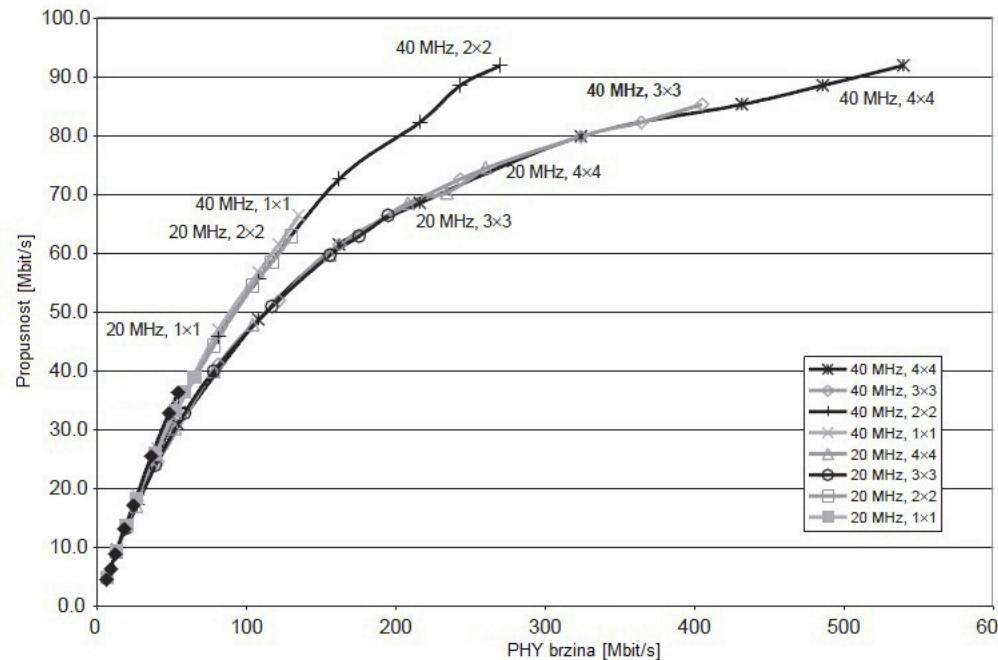
- norme IEEE 802.11 a, g i n koriste OFDM postupak multipleksiranja (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)
- svaki podnosilac modulira se nekim od ranije navedenih modulacijskih postupaka, nakon čega se podnosioci primjenom inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT) multipleksiraju unutar unaprijed određenog kanala
- svaki podnosilac zasebno nosi manje dio ukupne informacije koju želimo prenijeti, pa njegov gubitak lakše nadomještamo nego u slučaju da izgubimo cijelu informaciju
- ovakav postupak modulacije i multipleksiranja otporniji je na smetnje koje mogu nastati zbog propagacije signala kroz i oko zidova i namještaja, što je tipično za rad WLAN mreža
- u 20 MHz-nom kanalu smještaju se 64 podnosioca, a u 40 MHz-nom 128 podnosioca

IEEE 802.11n prostorni diverziti

- shema za opisivanje MIMO sustava u kojima su navedeni svi bitni parametri može se napisati u sljedećem obliku:
 - izraz oblika $a \times b : c$ u sebi sadrži tri parametra koja opisuju neki MIMO sustav
 - a = broj odašiljačkih antena
 - b = broj prijamnih antena
 - c = broj različitih sljedova podataka koji se prenose
 $c \leq \min(a, b)$
- primjer sustava $2 \times 3 : 2$ nam govori da sustav ima dvije odašiljačke i 3 prijamne antene kojima se prenose dva slijeda podataka
- najčešće korištene prijenosne sheme unutar 802.11n standarda su $2 \times 2 : 2$, $2 \times 3 : 2$ i $3 \times 3 : 2$
- dopuštena uporaba svih smislenih konfiguracija do $4 \times 4 : 4$

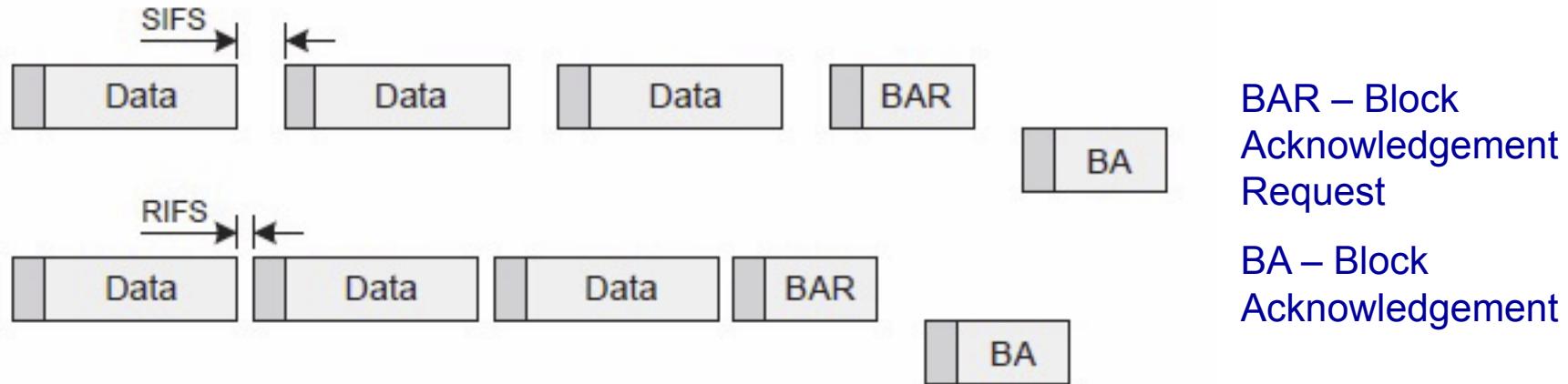
Izmjene na MAC sloju

- u 802.11n standardu potrebno je bilo uvesti izmjene u MAC sloju u svrhu povećanja brzine prijenosa
- uvedene su sljedeće izmjene:
 - skraćeno vrijeme između okvira
 - prikupljanje okvira
 - implicitni zahtjev potvrde bloka

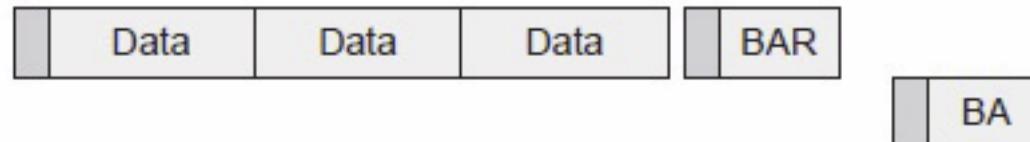


Izmjene na MAC sloju (nastavak)

- skraćeno vrijeme između okvira, RIFS (*Reduced Inter-Frame Space*) u odnosu na SIFS (*Standard Inter-Frame Space*)

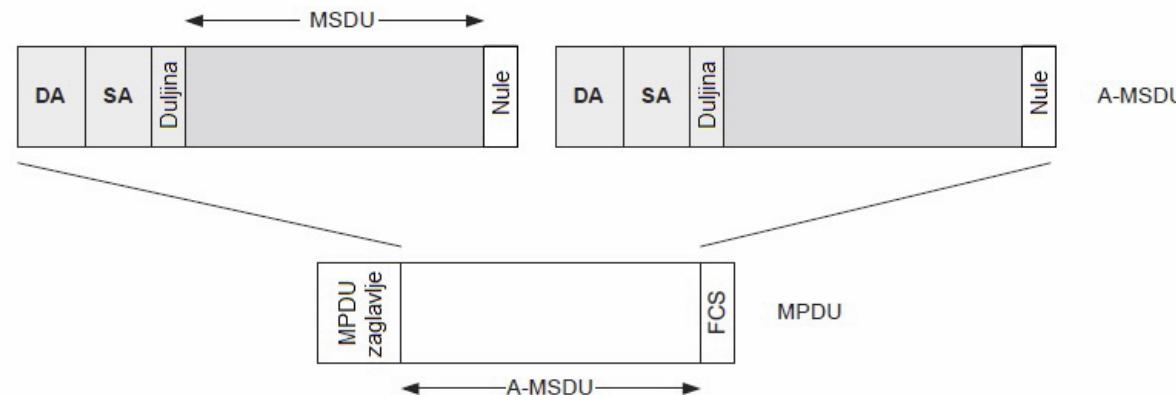


- idući stupanj je potpuno uklanjanje razmaka među okvirima
- postiže se brzina propusnosti do 370 Mbit/s



Izmjene na MAC sloju (nastavak)

- prikupljanje okvira
 - slanje više okvira u jednom prijenosu
 - smanjuje se vrijeme čekanja da prijenosni medij bude slobodan
- 2 tipa prikupljanja okvira
 - MSDU - *MAC Service Data Unit*
 - MPDU - *MAC Protocol Data Unit*



- implicitni zahtjev potvrde bloka
 - umjesto potvrde svakog okvira, potvrđuje se prijam cijelog bloka

IEEE 802.11n brzina prijenosa

- brzina prijenosa digitalnog komunikacijskog sustava općenito ovisi o modulacijskoj tehnici i širini kanala
- u WLAN-u primjenjuju se dvije širine kanala: 20 MHz i 40 MHz
- IEEE 802.11n omogućava uporabu obje širine kanala također uz četiri slijeda podataka uporabom prostornog divrzonitija
- postoji nekoliko modova u kojima IEEE 802.11n može raditi:
 - LM (*Legacy Mode*) – ekvivalentno a i g standardu
 - HT-Mode (*High Throughput*) – uređaji mogu raditi s 20 MHz i 40 MHz širinom kanala uz prijenos od 4 slijeda podataka
 - Dvostruki LM – 40 MHz širina kanala koji je sastavljen od dva kanala širine 20 MHz, paketi se šalju u IEEE802.11a formatu u svakom 20 MHz-nom kanalu
 - Gornji mod – podaci se šalju gornjim podkanalom od 20 MHz unutar 40 MHz-nog kanala
 - Donji mod – podaci se šalju donjim podkanalom od 20 MHz unutar 40 MHz-nog kanala

IEEE 802.11n brzina prijenosa (nastavak)

- s obzirom na prijenosnu shemu, širinu kanala (mod prijenosa) i korištenu modulaciju, 802.11n standard može imati maksimalne teorijske brzine od 6,5 Mbit/s do 600 Mbit/s
- najniža brzina postiže se uz jedan slijed podataka, 20 MHz-nu širinu kanala i BPSK modulacijski postupak
- za ostvarenje najveće brzine prijenosa koristi se modulacijski postupak s najvećom korisnošću i omjerom koda od 5/6
- uz te uvjete brzina po jednom slijedu je teoretski jednaka 150 Mbit/s
- najviša brzina prijenosa postiže se uz četiri paralelna slijeda podataka, 40 MHz-nu širinu kanala i 64-QAM modulacijski postupak

IEEE 802.11n brzina prijenosa (nastavak)

Broj slijedova podataka	Modulacijski postupak	Zaštitni bitovi/ ukupni bitovi	Brzina prijenosa [Mbit/s]			
			20 MHz-ni kanal		40 MHz-ni kanal	
			ZI: 800ns	ZI: 400ns	ZI: 800ns	ZI: 400ns
1	BPSK	1/2	6,50	7,20	13,50	15,00
1	QPSK	1/2	13,00	14,40	27,00	30,00
1	QPSK	3/4	19,50	21,70	40,50	45,00
1	16-QAM	1/2	26,00	28,90	54,00	60,00
1	16-QAM	3/4	39,00	43,30	81,00	90,00
1	64-QAM	2/3	52,00	57,80	108,00	120,00
1	64-QAM	3/4	58,50	65,00	121,50	135,00
1	64-QAM	5/6	65,00	72,20	135,00	150,00
2	BPSK	1/2	13,00	14,40	27,00	30,00
2	QPSK	3/4	39,00	43,30	81,00	90,00
2	16-QAM	3/4	78,00	86,70	162,00	180,00
2	64-QAM	5/6	130,00	144,40	270,00	300,00
3	BPSK	1/2	19,50	21,70	40,50	45,00
3	QPSK	1/2	39,00	43,30	81,00	90,00
3	16-QAM	3/4	117,00	130,70	243,00	270,00
3	64-QAM	5/6	195,00	216,70	405,00	450,00
4	64-QAM	5/6	260,00	288,90	540,00	600,00

ZI = zaštitni interval u OFDM-u

IEEE 802.11n prednosti i nedostaci

- prednosti:
 - velika teorijska brzina prijenosa (mnogo manja u praksi)
 - kompatibilnost s prijašnjim standardima (a, b, g)
 - uporaba 20 MHz-nih i 40 MHz-nih kanala
 - rad na 2,4 GHz i 5 GHz
- nedostaci:
 - potreban je novi hardver
 - za postizanje veće brzine potrebno je više od jedne antene, više predajnih i prijamnih lanaca (razlika u odnosu na 802.11g standard nije značajna)
 - uporaba 40 MHz-nog kanala na 2,4 GHz nije često moguća zbog velike okupiranosti drugim sustavima koji koriste slobodni ISM pojas

Budućnost n-standarda

- IEEE 802.11n koristi većinu modernih sustava za modulaciju i prijenos podataka
- maksimalna podržana brzina je dovoljna za većinu primjena
- spektralna korisnost 64-QAM modulacijskog postupka predstavlja dobar omjer između otpornosti na pogreške i brzine prijenosa u uvjetima bolje razine signala u odnosu na šum
- širina kanala od 40 MHz je maksimum koji se može koristiti na 2,4 GHz
- moguće je proširenje kanala na frekvenciji od 5 GHz, ali to se još ne razmatra jer nema potrebe za povećanjem brzine
- trenutna verzija koja se primjenjuje je IEEE 802.11n-2009
- IEEE 802.11n predstavlja osnovu za WLAN mreže koja se neće temeljno mijenjati 10-ak godina, ako promatramo vrijeme potrebno za stvaranje standarda od prijedloga tog standarda

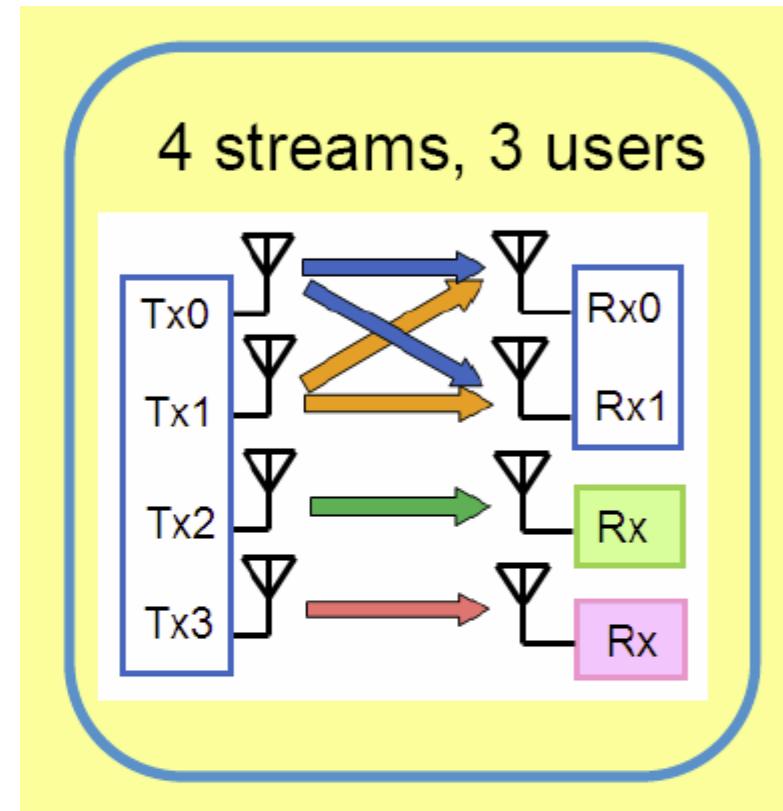
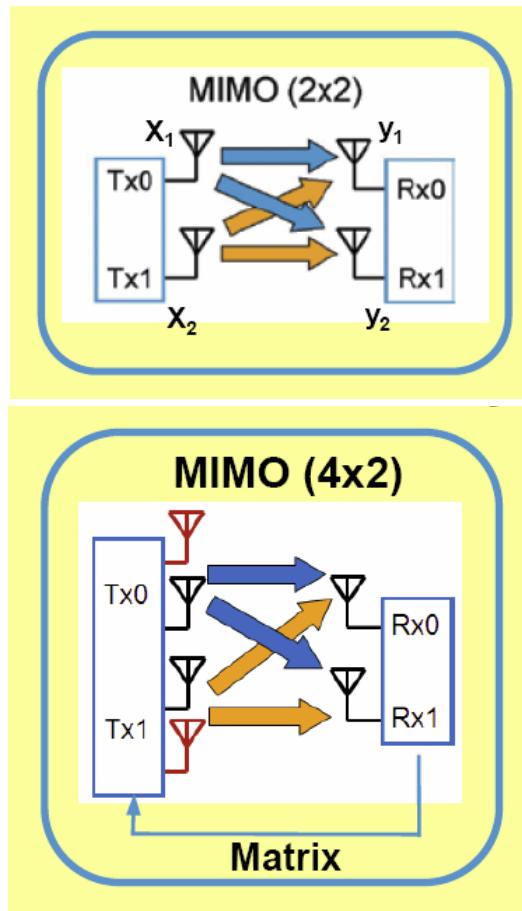
IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac

- norma odobrena u siječnju 2014.
- zahtjev za brzinom većom od 1 Gbit/s (maksimalno 6,93 Gbit/s)
- rad isključivo u pojasu 5 GHz, ali podržava rad u 2,4 GHz pojasu (kompatibilnost s 802.11n)
- širine kanala od 20 MHz do 160 MHz (80 MHz standardno)
- modulacijski postupci do 256-QAM
- više paralelnih sljedova podataka (do 8)
- više-korisnički MIMO (*Multi-user MIMO*)

IEEE 802.11ac

- primjer izgleda više-korisničkog MIMO sustava
- 4 slijeda podataka i 3 korisnika u istom sustavu



IEEE podnorme 802.11 grupe

- **IEEE norma 802.11e** definira uspostavu usluge zagarantirane kvalitete preko Wi-Fi mreža
- **IEEE norma 802.11h** unosi poboljšanja 802.11 MAC sloja i 802.11a fizičkog sloja za rad u licenciranom frekvencijskom području od 5 GHz u europskim zemljama
- **IEEE norma 802.11i** uvela je dodatna poboljšanja sigurnosnih karakteristika radijskih mreža korištenjem AES (*Advanced Encryption Standard*) sigurnosnog protokola
- **IEEE norma 802.11p** - *Wireless Access for the Vehicular Environment* (WAVE) bavi se poboljšanjima osnovne norme za potrebe *Intelligent Transportation Systems* (ITS)
- **IEEE norma 802.11r** ili *Fast BSS Transition* (FT) omogućuje brzo i sigurno prekapčanje između baznih postaja za sustave koja se kreću velikom brzinom
- **IEEE norma 802.11s** bavi se dodavanjem *mesh* funkcionalnosti osnovnoj normi
- **IEEE 802.11T** ili projekt *Wireless Performance Prediction* (WPP) i pripadajuća radna grupa bave se metodama testiranja i mjerena sustava

HiperLAN

Europska norma HiperLAN

- U Europi su razvijene HiperLAN/1 i HiperLAN/2 norme (*High Performance Radio Local Area Network*)
 - Koristi se frekvencijsko područje 5 GHz
 - Norme HiperLAN nisu kompatibilne s IEEE normom 802.11a
- HiperLAN/1 i HiperLAN/2 razvijene su unutar Europskog instituta za telekomunikacijske norme (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) u okviru projekta BRAN (BRAN, *Broadband Radio Access Network*)

HiperLAN/1

- HiperLAN/1 prva je ETSI norma za WLAN:
 - podržava brzine prijenosa od 2 do 23 Mbit/s
 - radno područje frekvencija: 5150 – 5300 MHz
 - koristi uskopojasne modulacijske postupke
 - nije u komercijalnoj uporabi

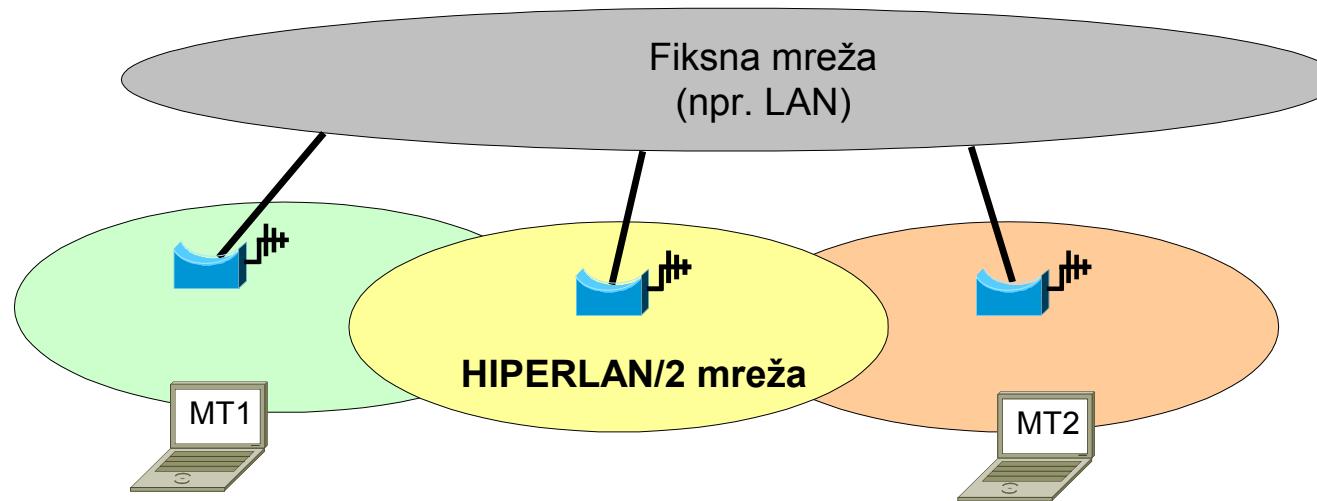
Frekvencijsko područje	5150 – 5300 MHz
Snaga	10 – 1000 mW
Osjetljivost prijamnika	-50 do -70 dBm
Broj kanala	5
Širina pojasa	23,5294 MHz
Maksimalna brzina korisnika	1,4 m/s (5 km/h)
Modulacija	HBR – GMSK LBR – FSK
Propusnost	HBR – 23,5294 Mbit/s LBR – 1,47060 Mbit/s
Maksimalno trajanje vremenskog odsječka	1 ms

HBR — *High Bit Rate*,

LBR — *Low Bit Rate*

HiperLAN/2

- HiperLAN/2 služi za pristup ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), IP (*Internet Protocol*) i UMTS-mrežama (*Universal Mobile Telecommunications System*)
 - HiperLAN/2 namijenjen je i za fleksibilnu aplikaciju unutar poslovnih prostora i mjesta stanovanja osiguravajući pri tome multimedijijski prijenos do 54 Mbit/s



HiperLAN/2 (nastavak)

- Norme HiperLAN/2 i IEEE 802.11a su na fizičkom sloju gotovo jednake
 - obje koriste OFDM tehnologiju i jednake brzine prijenosa
 - razlika je u višim slojevima mreže koji su u IEEE normi 802.11a prilagođeni Ethernet mrežama, a u normi HiperLAN/2 ATM mrežama, UMTS-u i dr.
- Glavna obilježja HiperLAN/2 mreže:
 - podržava nezavisno pridjeljivanje kvalitete usluge (QoS, *Quality of Service*) svakoj vezi
 - automatsko pridjeljivanje radnih frekvencija
 - podržava protokole za siguran rad (provjera vjerodostojnosti i šifriranje)
 - podržava protokole za mobilnost
 - rad neovisan o mreži i aplikaciji (primjeni)
 - podržava način rada s uštedom snage (*power save*)

Načela dodjele frekvencija za HiperLAN

- HiperLAN mreža ima implementiran postupak dinamičkog odabira frekvencije (DFS, *Dynamic Frequency Selection*)
 - Pomoću DFS mreža dinamički prilagođava rad lokalnim uvjetima interferencije
 - svakoj pristupnoj točki dodjeljuje se dinamički određena frekvencija (kanal) u smislu optimizacije iskorištenja kanala i smanjenja smetnji
 - HiperLAN ima mogućnost raspršenja odašiljačke snage na raspoloživi broj frekvencijskih kanala. Time se smanjuje mogućnost koncentriranja snage na jednom određenom kanalu, koji bi u tom slučaju djelovao kao izražena smetnja radu drugih sustava.

Radijske pristupne mreže

Leonard Novosel, mag. ing.

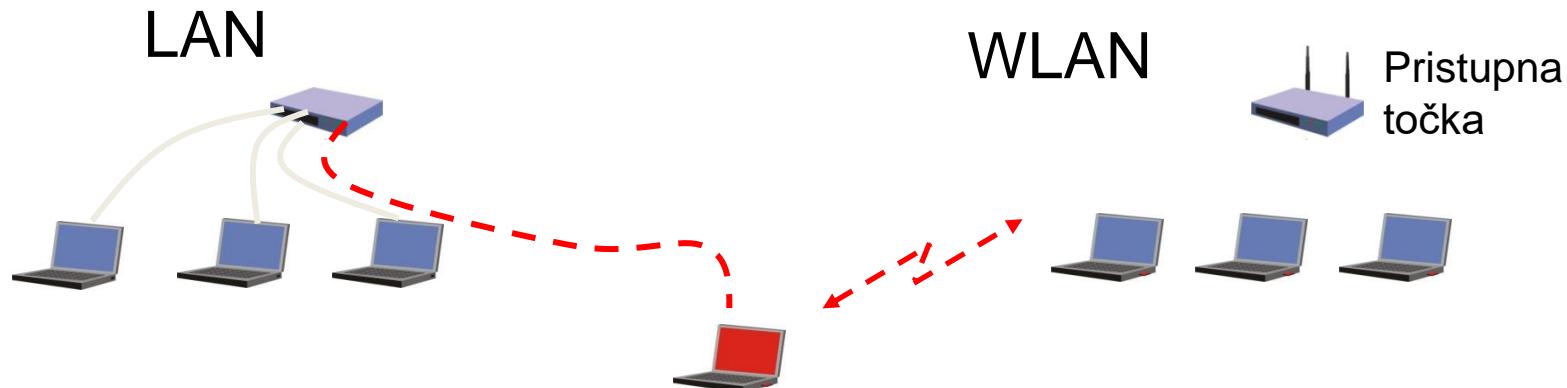
Sigurnost u WLAN-u

Sadržaj

- Uvod
- Kriptografija
- Osnovni sigurnosni standardi u radijskim mrežama
 - WEP
 - WPA(2)
- Zaštita WLAN mreža
 - MAC filtriranje
 - SSID skrivanje
- Napad na WLAN mreže

Uvod

- IEEE 802.11 je skupina IEEE normi koja definira radijske (bežične) računalne mreže
- prednosti WLAN mreža u odnosu na LAN mreže su:
 - jednostavnost spajanja na mrežu
 - mobilnost
- glavni nedostaci WLAN mreža u odnosu na LAN mreže su:
 - manja brzina prijenosa podataka
 - **SIGURNOST !!!**



Kriptografija

- “*Cryptography is the art of keeping messages secure*”, Bruce Schneier
- Pojmovi:
 - kriptografija: znanstvena disciplina koja se bavi skrivanjem podataka ili njihovom izmjenom u neki neprepoznatljiv oblik
 - obični tekst: originalna poruka
 - šifrirani tekst: poruka nakon šifriranja
 - šifriranje: kodiranje originalne poruke u svrhu skrivanja njenog značenja
 - dešifriranje: vraćanje originalne poruke iz šifrirane

Kriptografija (nastavak)

- većina današnjih sustava za prijenos podataka oslanja se na neki oblik šifriranja podataka u svrhu njihove zaštite
- zaštite WLAN mreža uglavnom koriste ključeve i certifikate pomoću kojih se šifriraju podaci i o(ne)mogućava pristup pojedinoj mreži
- samo šifriranje izvedeno je primjenom operacije isključivo ILI (XOR) nad podacima koje želimo sakriti
- drugi operand koji se koristi u toj operaciji je ključ ili se operand stvara od ključa i dodatnih podataka

Osnovni sigurnosni standardi u radijskim mrežama

- osnovni sigurnosni algoritmi koji se koriste u zaštiti radijskih mreža su:
 - **WEP** (*Wired Equivalent Privacy*)
 - **WPA** (*Wi-Fi Protected Access*)
 - **WPA2/RSN** (*Robust Secure Network*)
- iako većina moderne mrežne opreme podržava sve od navedenih sigurnosnih protokola, razina sigurnosti koju oni pružaju se uvelike razlikuje
- WEP algoritam u odnosu na WPA/WPA2 pruža mnogo manju razinu sigurnosti – probijanje WEP zaštite ne predstavlja veliki problem
- važno je naglasiti da nijedan algoritam za zaštitu ne može štititi mrežu od radijskog ometanja koje izaziva uskraćivanje usluge **DoS** (*Denial-of-Service*)

WEP (*Wired Equivalent Privacy*)

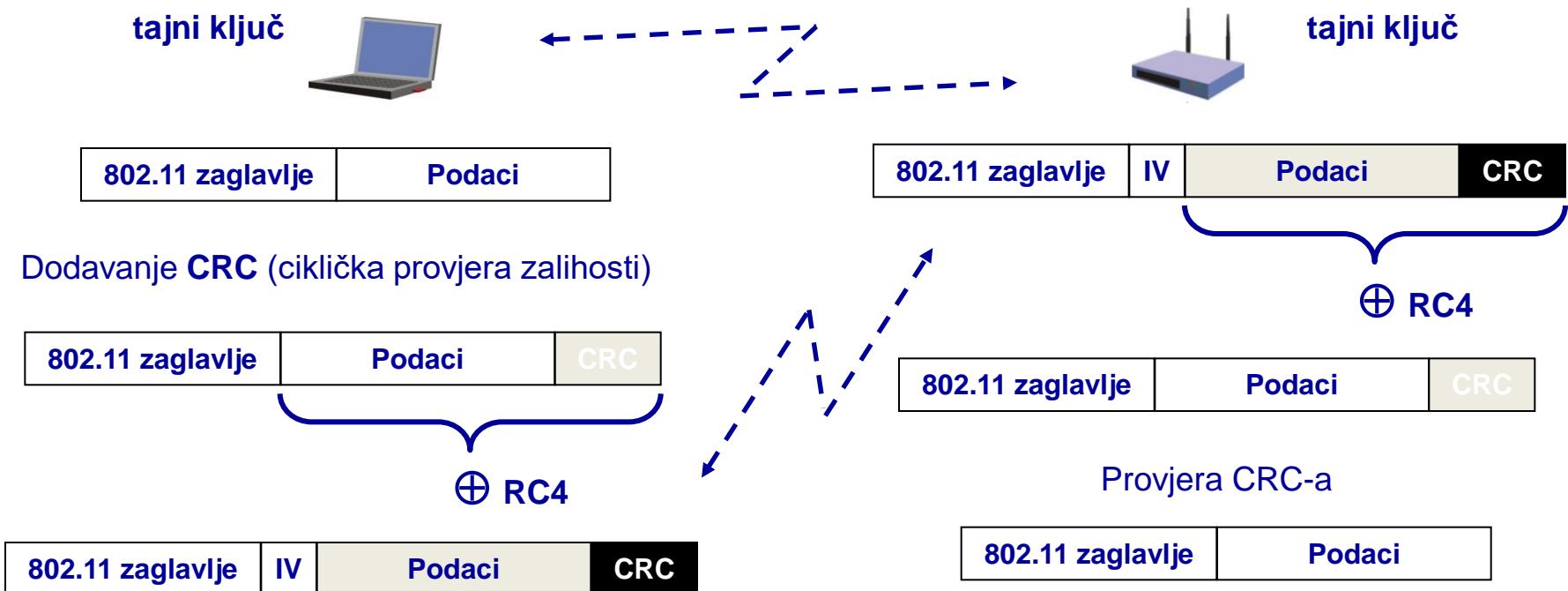
- prvi sustav zaštite 802.11 mreža
- predstavljen je 1997. godine
- cilj je bio pružiti zaštitu radijskih mreža sumjerljivu klasičnim, žičnim mrežama
- WEP nudi tri bitna zaštitna servisa:
 - tajnost/povjerljivost podataka (*Confidentiality*)
 - integritet podataka (*Integrity*) – provjera duljine primljenog okvira u svrhu detekcije promjene podataka u prijenosu
 - kontrola pristupa (*Authentication*) – omogućavanje pristupa samo korisnicima koji posjeduju odgovarajući tajni ključ

WEP (nastavak)

- WEP algoritam koristi slijednu šifru (*stream cipher*) zasnovanu na **RC4** enkripcijskom algoritmu
- RC4 (Rivest Cipher 4) osmislio je Ron Rivest 1987. iz RSA Security
- RC4 slijedna šifra dobiva se pomoću tajnog ključa i inicijalizacijskog vektora (**IV**)
- pomoću slijedne šifre šifriraju se podaci uporabom **XOR** (isključivo ILI) operatora
- na prijamnoj strani, podaci se inverznim postupkom dešifriraju
- primjenjivo je na podatke različite duljine
- nedostatak je nezaštićenost nepodatkovnih okvira, pa je moguća analiza prometa bez posjedovanja šifre

WEP (nastavak)

- Postoji nekoliko vrsta WEP standarda:
 - 64-bit WEP (40 bitni tajni ključ + 24 bitni IV)
 - 128-bit WEP (104 bitni tajni ključ + 24 bitni IV)
 - WEP2, 256 bita (232 bitni tajni ključ + 24 bitni IV)



WEP (nastavak)

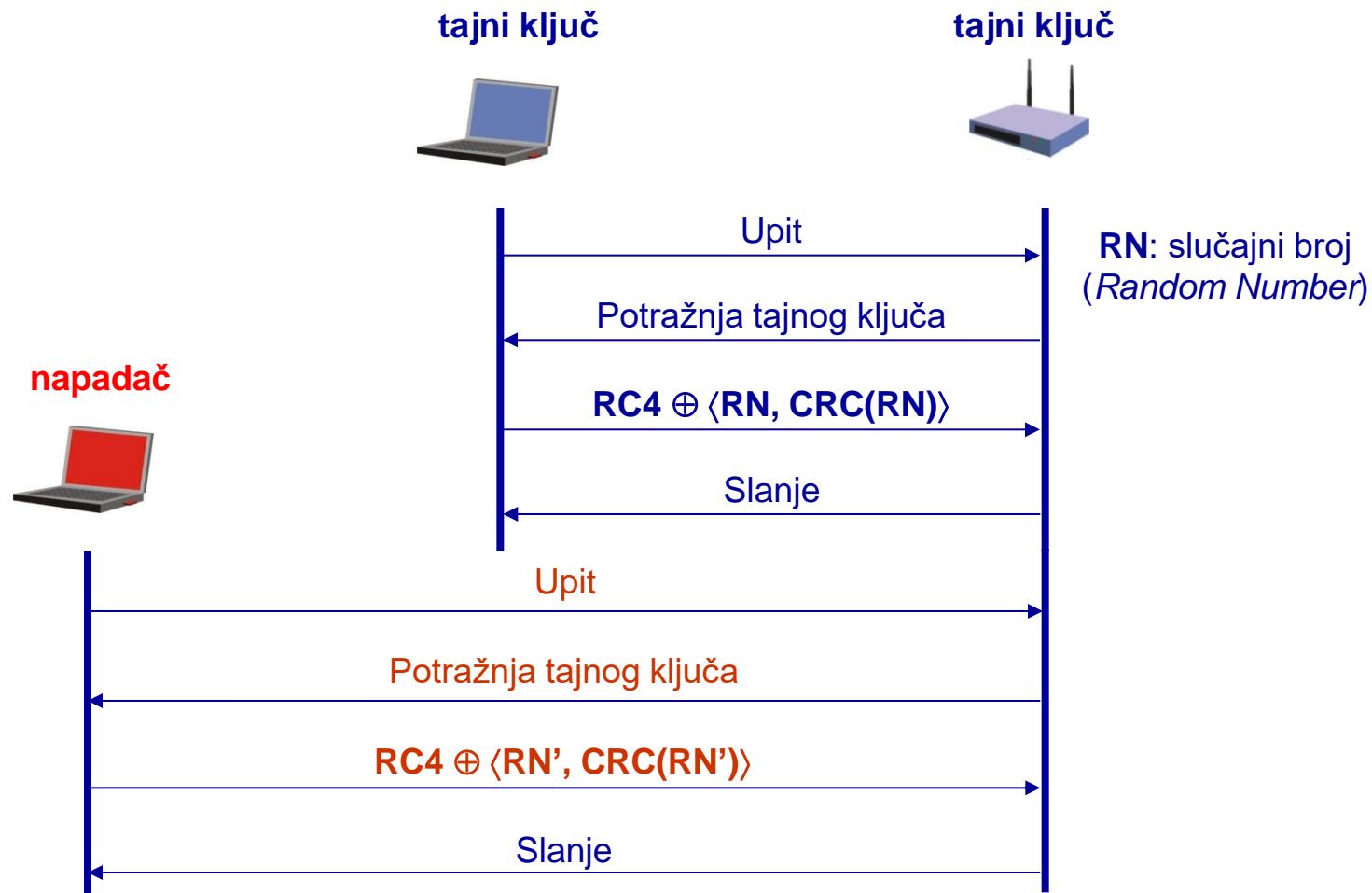
- Glavni nedostaci WEP standarda:
 - isti IV se koristi više od jednom
 - 24 bitni IV daje 1677216 kombinacija (norma IEEE 802.11)
 - koriste se stalni, a ne privremeni tajni ključevi
 - većina korisnika ne mijenja svoje tajne ključeve
- IV se mijenja za svaki odaslan paket
- ako se IV generira na slučajan način, dva paketa će imati istu vrijednost nakon manjeg broja paketa nego da se IV generira po redu, to se naziva “*birthday paradox*”
- ako se IV jednostavno uvećava, dva računala koja odašilju stalno će stvarati pakete sa istom vrijednošću IV-a

WEP (nastavak)

- Primjer napada na sustav zaštićen WEP algoritmom:
 - ako je 24 bitni IV implementiran kao rastući brojač
 - ako pristupna točka odašilje brzinom od 11 Mbit/s
 - svi IV će biti iskorišteni unutar otprilike **5 sati**
 - napadač prikuplja sav promet
 - napadač traži dvije poruke s istim IV
 - otkriva se tekst poruke koji je zaštićen
 - tekst poruke \oplus tajni ključ = RC4
 - s obzirom na generator pseudoslučajnih brojeva, nije potrebno prikupljati sav promet

WEP (nastavak)

- Primjer napada na sustav zaštićen WEP algoritmom:



WEP (nastavak)

- WEP je unatoč ne baš kvalitetnom početnom rješenju doživio unaprjeđenja s kojima je postignuta dovoljna razina sigurnosti
 - 802.1X pruža kontrolu pristupa korisnika i upravljanje ključevima (predstavljen 2001.)
 - 802.11i bavi se tajnošću i integritetom podataka
- Upotreba RC4 zaštite zamijenjena je AES-om (*Advanced Encryption Standard*)

WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*)

- otklanja nedostatke WEP algoritma
- omogućava korištenje postojećeg hardvera (WPA)
- WPA implementira glavninu norme 802.11i
- Pojmovi vezani uz WPA:
 - **TKIP** - *Temporal Key Integrity Protocol*
 - **MIC** - *Message Integrity Code* (zamjenjuje CRC)
 - **AES** - *Advanced Encryption Standard*
 - **PSK** - *Pre-Shared Key mode*
 - **TLS** - *Transport Layer Security*
 - **EAP** - *Extensible Authentication Protocol*
 - **LEAP** - *Light EAP* (Cisco)
- WPA2 zahtjeva promjenu postojećeg hardvera
- nova oprema mora biti kompatibilna s WPA2

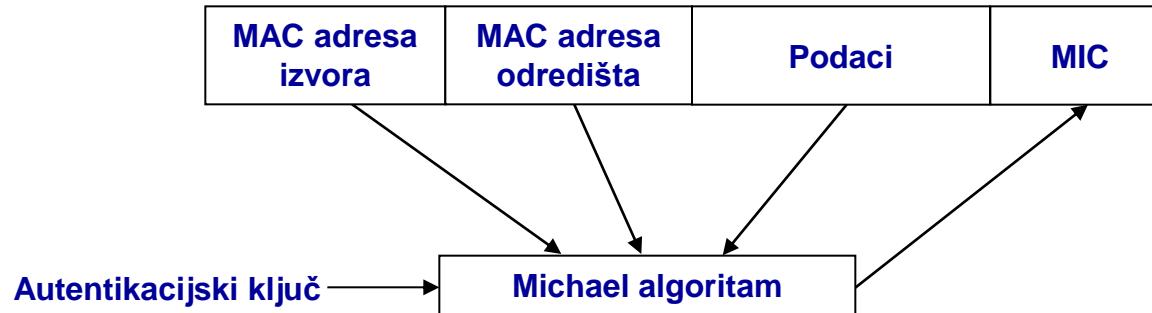


WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **TKIP** - *Temporal Key Integrity Protocol*
 - izrađen unutar 802.11i grupe
 - koristi tri nove značajke u cilju poboljšanja sigurnosti u WEP mrežama
 - povećava incijalizacijski vektor na 48 bita
 - koristi sekvencijski brojač za zaštitu od napada ponavljanjem poruke “replay”
 - koristi novi 64-bitni mehanizam za zaštitu integriteta (MIC, *Message Integrity Check*) “Michael”

WPA(2) (Wi-Fi Protected Access (II)) (nastavak)

- **MIC** - *Message Integrity Code* (8 okteta)
 - autentikacijski ključ dobiva se iz **PTK** (*Pairwise Transient Key*)
 - posljednjih 16 okteta PTK tvore autentikacijski ključ (128 bita)
 - 8 okteta služi za izračun MIC-a za pakete koje šalje pristupna točka
 - 8 okteta služi za izračun MIC-a za pakete koje šalje korisnik



WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **AES** - *Advanced Encryption Standard*
 - šifriranje pomoću simetričnog ključa
 - postao standardom 2002. (NIST - *National Institute of Standards and Technology*)
 - duljina bloka je 128 bita, a duljina ključa može biti 128, 192 ili 256 bita
 - ovisno o duljini ključa ulazna poruka se šifrira određeni broj puta zamjenom bitova i permutacijom redaka i stupaca
 - 10 puta za 128-bitni ključ
 - 12 puta za 192-bitni ključ
 - 14 puta za 256-bitni ključ
 - neobavezno korištenje u WPA, obavezno u WPA2

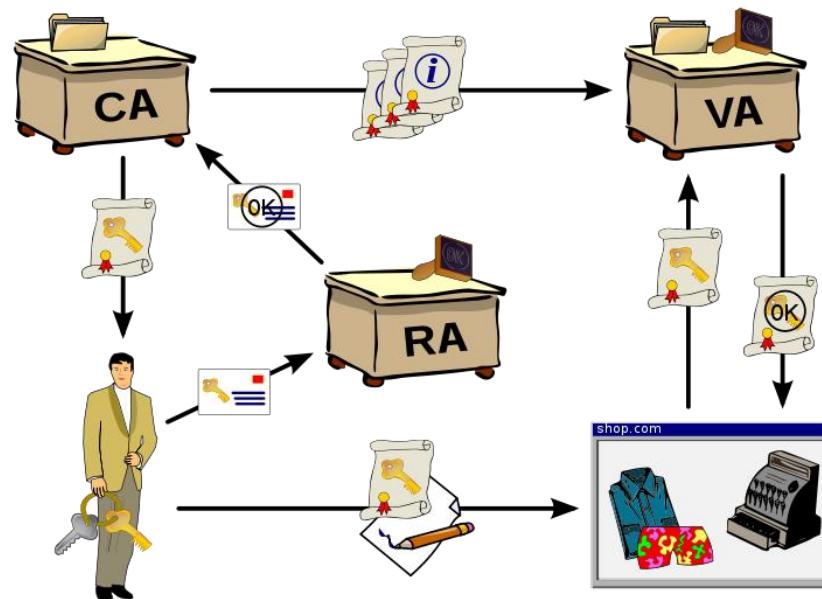
WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **PSK - Pre-Shared Key mode**
 - dizajn za kućne i uredske mreže
 - svaka mreža koristi svoj 256 bitni ključ
 - nema potrebe za korištenjem poslužitelja za provjeru vjerodostojnosti kao kod 802.1X
 - ključ može biti niz od 64 heksadecimalne znamenke ili šifra od 8 do 63 ASCII znaka

WPA(2) (Wi-Fi Protected Access (II)) (nastavak)

- **PKI – Public Key Infrastructure**

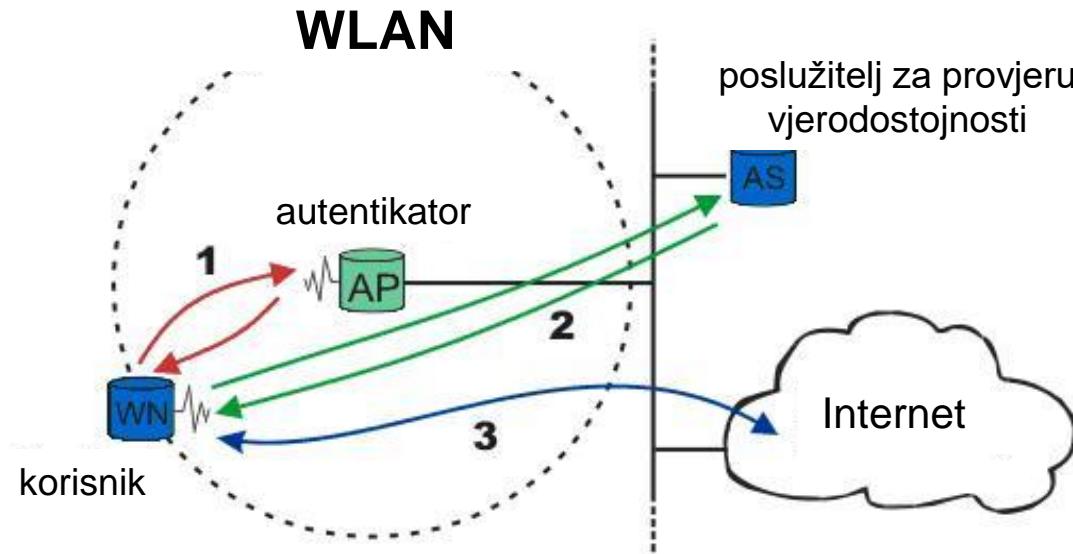
- povezivanje javnih ključeva s korisničkim identitetima
- **CA – Certificate Authority** je izdavač certifikata
- **RA – Registration Authority** je verifikator certifikata
- **VA – Validation Authority** se brine o ispravnosti certifikata klijenta



WPA(2) (Wi-Fi Protected Access (II)) (nastavak)

- **EAP - Extensible Authentication Protocol**

- koristi se unutar norme 802.1X
- koristi se poslužitelj RADIUS (*Remote Authentication Dial In User Service*) za provjeru vjerodostojnosti korisnika
- autentikator (pristupna točka) služi kao most između korisnika i poslužitelja za provjeru vjerodostojnosti
- postoji oko 40 vrsta EAP protokola (EAP-TLS, EAP-TTLS, EAP-PEAP, EAP-LEAP,...)



WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **EAP - Extensible Authentication Protocol**

- ako se pojavi novi klijent u mreži autentikator mu otvorí port, koji je u neautoriziranom stanju
- autentikator pošalje EAP zahtjev prema korisniku
- korisnik odgovara EAP odgovorom
- autentikator prosljeđuje EAP odgovor prema poslužitelju za autentikaciju
- ako poslužitelj za provjeru vjerodostojnosti prihvati zahtjev, autentikator njegov port stavlja u stanje dozvoljenog pristupa
- kada korisnik dobije pristup, dozvoljen mu je normalan promet

WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **EAP-TLS – EAP Transport Layer Security**
 - izvorno zamišljeno kao dio Windows XP operacijskog sustava
 - cilj je osiguravanje sigurne komunikacije između klijenta i servera
 - umjesto šifri oslanja se na uporabu certifikata
 - problem certifikata je fizička krađa uređaja i njihova uporaba bez poznavanja šifre, a prednost je veća sigurnost pri pokušaju napada
- **EAP-TTLS – EAP Tunneling Transport Layer Security**
 - zahtijeva se provjera vjerodostojnosti poslužitelja prije provjere vjerodostojnosti klijenta
 - sigurni “tunel” stvara se na transportnom sloju u komunikaciji između korisnika i poslužitelja uporabom TLS-a
 - provjera vjerodostojnosti se obavlja preko uspostavljenog zaštićenog tunela

WPA(2) (*Wi-Fi Protected Access (II)*) (nastavak)

- **EAP-PEAP – Protected Extensible Authentication Protocol**

- izgovara se "peep"
- razvili su ga Cisco, Microsoft i RSA Security
- sličan je EAP-TTLS-u jer također stvara tunel prilikom provjere vjerodostojnosti
- koristi PKI certifikat koji se nalazi na serveru
- 2 podvrste od 2005. godine:
 - **PEAPv0/EAP-MSCHAPv2:** najčešći oblik PEAP-a
 - **PEAPv1/EAP-GTC:** kreirao ga je Cisco, ne podržava ga Windows operacijski sustav

Zaštita WLAN mreža

- možemo govoriti o različitom stupnju zaštite za kućne i korporacijske WLAN mreže
- kod kućnih WLAN mreža najčešće se potrebno zaštititi od napadača koji imaju za cilj “besplatan” pristup Internetu, a rijetko krađu osobnih podataka
 - dovoljno je korištenje WPA(2) sustava
 - MAC filtriranje također je česta opcija
 - SSID skrivanje još je jedan od učinkovitih načina zaštite
- kod korporacijskih WLAN mreža, napadači često žele doći do povjerljivih podataka, pa sam sustav zaštite mora biti robustniji
 - najčešće se koristi WPA(2) poslužiteljem RADIUS za provjeru vjerodostojnosti

MAC filtriranje

- **MAC – Media Access Control**
 - MAC adresa je jedinstven identifikator mrežnog sučelja
 - zapisana je u ROM uređaja
 - sastoji se od 6 parova heksadecimalnih znamenki (48 bita)
 - teoretski je moguće adresirati 2^{48} uređaja (281.474.976.710.656)
 - primjer MAC adrese je: 00-0C-F1-56-98-AD
 - 00-0C-F1 označavaju proizvođača (Intel)
 - 56-98-AD dodjeljuje proizvođač
- pristup ograničavanjem na određene MAC adrese nije naročito učinkovit način zaštite mreža
- ovakav tip zaštite predstavlja problem kod mreža s čestom izmjenom računala, jer je potrebno dodavati nove adrese u MAC tablice pristupa

SSID skrivanje

- **SSID – Service Set Identifier**
 - ime koje određuje pojedinu WLAN mrežu
 - može imati do 32 znaka (okteta)
 - korisnik s administratorskim ovlastima može kreirati proizvoljni SSID
 - omogućeno je da dvije ili više pristupnih točki odašilju isti SSID ukoliko pripadaju istoj mreži
- skrivanje SSID-a, odnosno naziva mreže, pomaže kao dodatni zaštitni mehanizam
- prvenstveno se smanjuje vjerojatnost napada onih koji ne znaju da ta mreža postoji
- napadač koji zna za mrežu, bez obziran na skrivanje SSID-a s jednakom vjerojatnošću će ostvarit cilj svog napada kao da se SSID odašilje

Napad na WLAN mreže

- ometanje radijskim signalom postiže se pomoću odašiljača ometača (*jammer*) koji radi na istoj frekvenciji kao i radijska mreža
- princip na kojem odašiljač ometač radi je maskiranje korisnog signala smetajućim – uskraćivanje usluge bez krađe podataka



Odašiljač za ometanje WLAN i
Bluetooth signala koji radi na
frekvenciji od 2,4 GHz

Napad na WLAN mreže

- napad na slabo zaštićene WLAN mreže u svrhu korištenja usluga ili pristupa informacijama ostvariv je ovisno o stupnju zaštite mreže
- uglavnom je moguće probijanje samo WEP zaštite
- postoji mnogo alata koji omogućavaju probijanje
 - primjer **Kali Linux**



Zaštita kućnih WLAN mreža - zaključak

- teže je štititi WLAN od LAN mreža
- WEP je prvi algoritam zaštite radijske mreže od napada
- velik broj kućnih mreža i danas je zaštićen WEP-om iz razloga što je WEP postavio davatelj usluge kao tvorničku postavku
- IEEE 802.11i je standard zaštite koji objedinjuje autentikacijske protokole, upravljanje ključevima za kontrolu pristupa i algoritme za kriptiranje podataka
- WPA(2) zaštita daje gotovo potpunu sigurnost
- problem koji ostaje neriješen je ometanje odašiljačem koji radi na frekvenciji na kojoj je propisano korištenje WLAN-a, pri čemu ne dolazi do krađe podataka, već do onemogućavanja korištenja sustava