

1. Modulacijski postupak, multipleksiranje i frekvencijski spektar

- **Modulacijski postupak** se uvijek rabi kod bežičnog prijenosa
- **Modulacija**: postupak transformacije električnog signala, koji nosi informaciju, radi njegove prilagodbe za prijenos
 - **CILJ**: prenijeti korisnu informaciju (modulacijski signal) kroz određeni kanal uz ostvarivanje najbolje moguće kvalitete prijenosa – taj prijenos ostvariti uz što manje zauzeće RF spektra
- **Digitalna informacija** opisana je konačnim brojem binarnih znakova i predložuje se diskretnim električnim signalom. Zbog toga se u prijenosu koriste postupci diskretne modulacije sinusnog signala
- Brzina prijenosa simbola ili brzina signaliziranja jednaka je:

$$R_S = 1/T_0 \text{ [Bd]}$$

T_0 – trajanje simbola

- Brzina prijenosa bita jednaka je:

$$R_D = R_S \log_2 M \text{ [bit/s]}$$

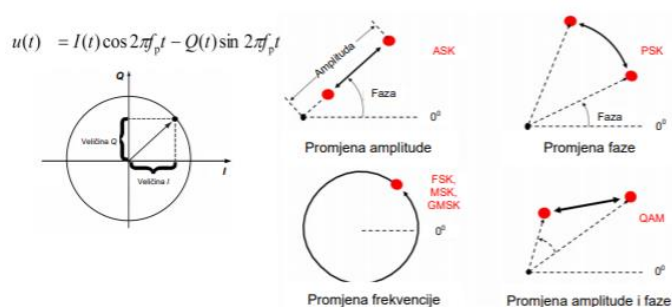
M – broj simbola

- **Kvaliteta prijenosa** mjeri se vjerojatnošću pogreške simbola **pEs** ili **SER** (Symbol Error Rate) odnosno vjerojatnošću pogreške bita **pEb** ili **BER** (Bit Error Rate)
- Ako se u slijedu od N bita nalazi n pogrešnih bitova onda je

$$BER = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right).$$

- ASK – diskretna modulacija amplitude
- FSK – diskretna modulacija frekvencije
- PSK – diskretna modulacija faze
- QAM (hibridni modulacijski postupci) – u ovisnosti o modulacijskom signalu, prijenosnom signalu se mijenjaju amplituda i faza

Dijagram stanja



Dijagram stanja – objašnjenje zapisa

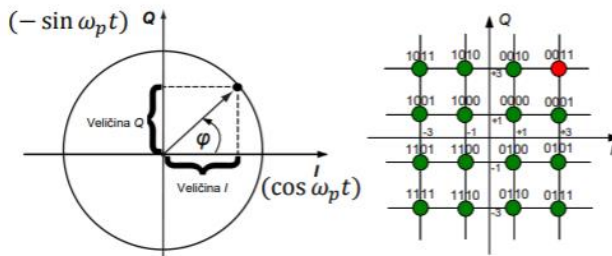
- Primjer (16-QAM):

- simbol $s(t)$ koji nosi bitove „0011” dobiva se kao

$$s(t)(\text{„0011"}) = 3 \cos(\omega_p t) + 3(-\sin(\omega_p t))$$

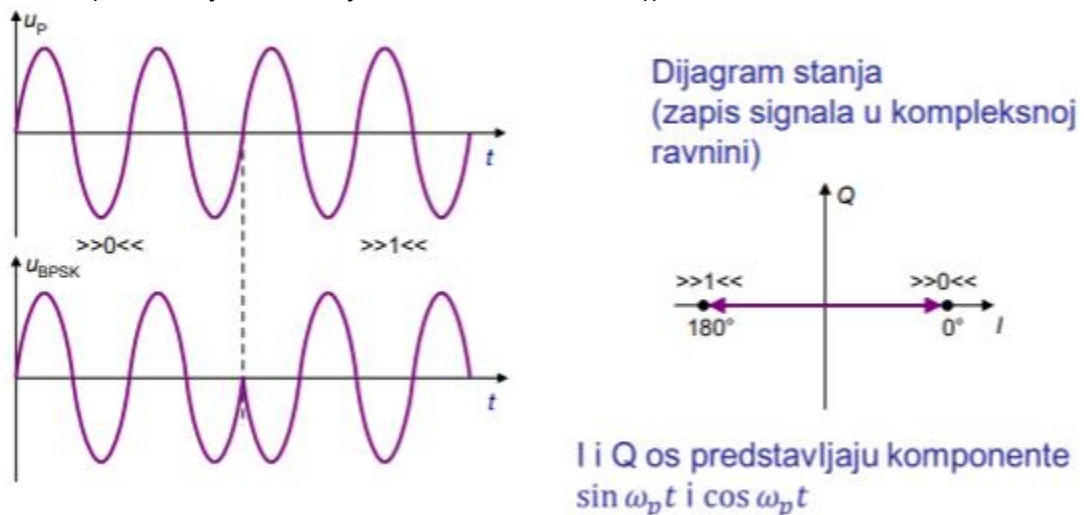
- Može se zapisati i kao:

$$s(t)(\text{„0011"}) = 3\sqrt{2} \cos(\omega_p t + 45^\circ)$$



MODULACIJSKI POSTUPAK BPSK – binarna diskretna modulacija faze

- dva stanja faze: 0° i 180° (Stvar je dogovora koji oblik signala predstavlja logičku nulu ili jedinicu (važno da je između njih fazni razmak od 180°))



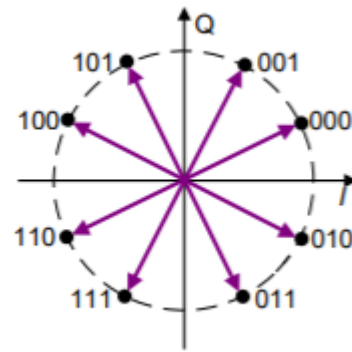
- **Spektralna učinkovitost**, koja odgovara broju prenesenih bita u sekundi po jedinici zauzete širine pojasa frekvencija, uz idealno Nyquistovo filtriranje, **iznosi 1 bit/s/Hz za BPSK**

MODULACIJSKI POSTUPAK QPSK – kvaterarna diskretna modulacija faze

- 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 pridružuju se dva bita - **dibit**)
- **Brzina prijenosa simbola** upola manja od brzine prijenosa binarnih znakova
- **Spektralna učinkovitost** idealno iznosi **2 bit/s/Hz**

MODULACIJSKI POSTUPAK 8-PSK

- osam je stanja faze i to: 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$ 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 pridružuju se tri bita - **tribit**)
- **Spektralna učinkovitost** idealno iznosi **3 bit/s/Hz**



Vrste signala s obzirom na pridruživanje informacije:

- **KOHERENTNI PSK-postupak**
 - informacija je sadržana u relativnoj fazi moduliranog signala
 - daje bolje rezultate
 - DEMODULACIJA – koherentnim postupcima (izravna usporedba faza moduliranog i referentnog signala)
- **DIFERENCIJALNI PSK - DPSK**
 - informacija se nalazi u promjeni faze moduliranog signala
 - jednostavnija od koherentne, ne radi se obnova nosioca
 - pri demodulaciji se faza simbola uspoređuje s fazom prethodnog simbola (utvrđuje se diferencijala faza)
- **pr. ulazni bitnovi: 010111 („1“ promjena prethodnog stanja)**
koherentno_(šalje se na modulator i ide van) 010111
diferentno_0011010

KVADRATURNNA MODULACIJA AMPLITUDE – QAM

- nastaje kad dva međusobno neovisna diskretna signala moduliraju amplitude dviju kvadraturnih komponenti sinusnoga prijenosnog signala
- 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 (**T₀ = 4τ**)
- spektralna učinkovitost za 16-QAM iznosi **4 bit/s/Hz**

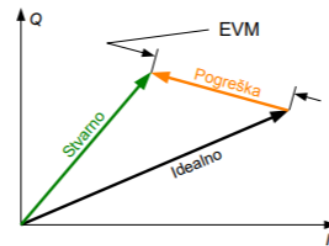
DISKRETNNA MODULACIJA FREKVENCije – FSK

- simboli odgovaraju sinusnim titrajima različitih diskretnih frekvencija
- BFSK koristi dva simbola (dvije frekvencije)
- Indeks modulacije jednak je: **mfsk = Δf/RS**, Δf – razmak diskretnih frekvencija

GAUSSOVA DISKRETNA MODULACIJA FREKVENCIJE – GFSK

- nakon filtriranja modulacijskih signal gubi diskretna obilježja i postaje kontinuirana funkcija vremena
- Zbog ograničavanja širine pojasa dolazi do proširenja impulsa modulacijskog signala što je uzrokom **interferencije među simbolima**
- Normirana **širina pojasa filtra** jednaka je $B \cdot T_0$, odnosno $B \cdot \tau$ u binarnih modulacija

- Kao mjera kvalitete modulacije uzima se “veličina vektora pogreške”, **EVM** (Error Vector Magnitude).
- **Smetnja** mijenja položaj vrha vektora moduliranog signala koji prikazuje stanje simbola moduliranog signala
- **QPSK** je osjetljiviji na smetnje od **BPSK** (stanja signala nalaze se na manjoj udaljenosti)
- **8-PSK** još manja udaljenost -> veća vjerojatnost pogreške bita
- **Diferencijalni** postupci PSK **osjetljiviji** su na smetnje od odgovarajućih **koherentnih** postupaka.

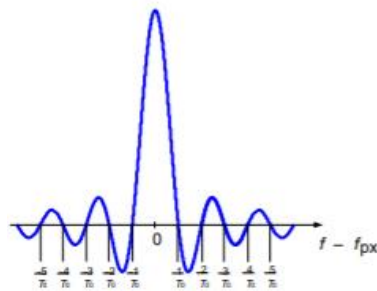


OFDM (Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca)

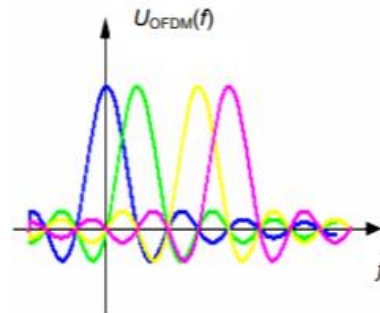
- prijenos velike količine podataka, brzine $> 10 \text{ Mbit/s}$
- potrebno skratiti vrijeme trajanja simbola
 - T_s ($R_s = 1/T_s$, $R_b = R_s \log 2M$)
- Broj diskretnih stanja M u praktičnim sustavima ograničen je osjetljivošću na djelovanje šuma, dok je trajanje simbola ograničeno mogućnošću ujednačavanja (ekvalizacije) kanala
- umjesto serijskog odašiljanja simbola šaljemmo paralelni slijed podataka (dužeg trajanja, a time i veće otpornosti na djelovanje kanala) pomoću više nosilaca (podnosilaca) – OFDM (frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca)
- **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, produljeno trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu
- **FDM** -> podkanali se ne smiju preklapati
 - između susjednih kanala postoji zaštitni pojas
 - nekoherentna demodulacija podkanala
- **OFDM** -> dopušta se određeno preklapanje podkanal
 - zbog ortogonalnosti (međusobna neovisnost, min. razmak frekvencija: $\Delta f = 1/T_0$; $f_0 = 1/T_0$) podnosilaca ne dolazi do međudjelovanja podkanala
 - koherentna demodulacija
- za prijenos podataka u podkanalima najčešće se koriste modulacijski postupci PSK ili QAM (visoka spektralna učinkovitost)
- **SPEKTAR OFDM-signal**

- **nultočke** nalaze se **na višekratnicima od $1/T_0$** (T_0 =trajanje simbola moduliranog signala u podkanalu)

1 modulirani podnosilac



više moduliranih ortogonalnih nosilaca



- nema interferencije među nosiocima u pojedinim podkanalima

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)
- 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
- **FDMA** (Frequency Division Multiple Access) – **svaki čvor radi na svojoj frekvenciji** (kanalu)
 - Prikladan za simetrični prijenos podataka

2. Radijske pristupne tehnologije

- nove usluge zahtijevaju prijenosne kapacitete puno veće od onih u PSTN (Public switched telephone network)
- Pristupna mreža dio je cjelokupne telekomunikacijske mreže koji služi krajnjem korisniku za **pristup osnovnoj mreži**
- nuditelj usluge -> nuditelj mrežnog pristupa -> korisnička strana
- **ZAHTJEVI**: prijenos podataka što većom brzinom, prijenos podataka na što veću udaljenost, što manja potrošnja električne energije iz baterije

WPAN – radijska mreža za osobne potrebe

- manje područje pokrivanja, 10m

- manje brzine (do 100kbit/s)
- lokalne periferne jedinice (oko računala)
- pr. Bluetooth – nadomješta kablsku vezu
 - nelicencirani frekvencijski pojas 2.4GHz
- ZigBee – manje brzine prijenosa, nadzor i upravljanje
 - nelicencirani frekvencijski pojas 2.4GHz

WLAN – radijska lokalna mreža

- srednje veličine pokrivanja područja (100m oko pristupne točke) – pr. fakultetska mreža
- srednje brzine prijenosa (do 300Mbit/s)
- pr. WiFi (nelicencirano područje 2.4GHz i licencirano 5GHz). HiperLAN (licencirano područje 5GHz, do 54Mbit/s)

WMAN – radijska mreža gradskog područja

- IEEE 802.16
- fiksno dvosmjerno radijsko povezivanje i prijenos širokopojsnih usluga na veće udaljenosti uz upotrebu point-to-multipoint mreža
- domet: 1.5 do 3 km
- brzina: do 75Mbit/s
- frekvencije: 3.4-3.6 GHz ili 24.5-26.5 GHz
- pr. WiMAX, HIPERMAN, HIPERACCESS

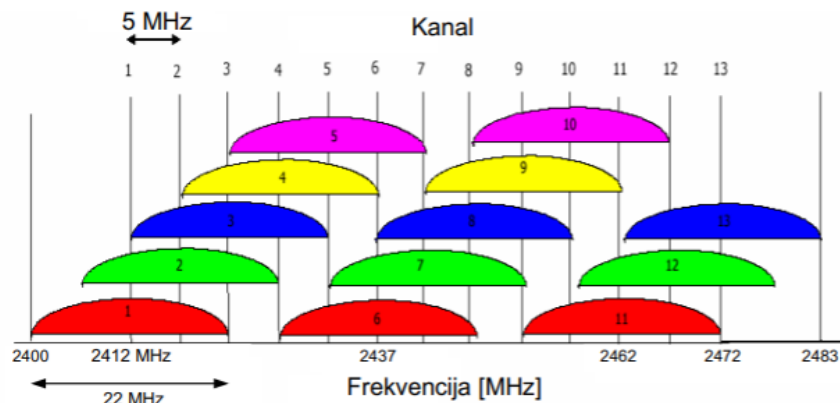
WWAN – radijska mreža šireg područja

- namijenjena mobilnim korisnicima, potrebe usluga temeljenih na TCP/IP tehnologiji

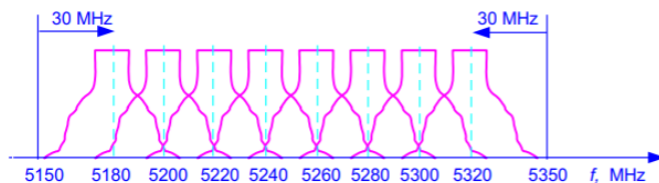
UVODNO O WLAN-u

- vrsta lokalnih mreža koje za prijenos informacije između mrežnih čvorova rabe elektromagnetske valove u radijskom ili infracrvenom frekvencijskom području
- krajnji korisnici pristupaju WLAN mreži preko WLAN mrežnih kartica, koje su sastavni dio osobnih računala te pristupnih točaka (AP, access point)
- AP služe za povezivanje radijske i fiksne LAN mreže na fiksnoj lokaciji koristeći standardni Ethernet kabel
- **AD HOC POVEZIVANJE:** najjednostavnije povezivanje, proizvoljno povezivanje neovisnih radijskih mrežnih čvorova koji ravnopravno komuniciraju (peer to peer)
 - pr. povezivanje računala u konferencijskim dvoranama
- javna mreža – parica, vlakna
- uredski prostori – LAN
- **NAJČEŠĆE KORIŠTENE FKSNE MREŽNE INFRASTRUKTURE NA KOJE SE VEŽU RADIJSKE MREŽE :**
 - javna telefonska mreža
 - Internet

- hibridni kabelski distribucijski sustavi izvedeni koaksijalnim i optičkim kabelima
- WLAN – osigurava širokopojasne usluge na pojedinim odabranim lokacijama
 - podržavaju multimedijски prijenos
- WPAN – povezuje osobne uređaje
- 3G, 4G – multimedijске usluge
- **FREKVENCIJSKA PODRUČJA**
 - **nelicencirana, ISM (Industrial, Scientific and Medical): 2.4-2.48 GHz, 5.725-5.875GHz**
 - **licencirana: 5.15-5.35GHz, 5.47-5.725GHz**
- frekvencijsko područje WLAN-a u Europi: 2.4-2.5GHz
- **raspored kanala**, svaka mreža radi samo na jednom kanalu



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



- povećanjem širine kanala, sve manje dostupnih -> ponavljaju se (bitno ih je što dalje razmjestiti)

ARHITEKTURA RADIJSKIH LOKALNIH MREŽA

- **PROIZVOLJNO POVEZIVANJE (ad hoc)**
 - mrežni čvorovi izravno komuniciraju
 - fleksibilna, jeftina
 - bez AP
 - pr. učionica, knjižnica
- **INFRASTRUKTURNO POVEZIVANJE**
 - mrežni čvorovi povezuju se s **AP** (mrežni uređaj koji obavlja funkciju premošćivanja između radijske i fiksne mreže)
 - Distribucijski sustav **DS** – logička komponenta koja omogućuje komunikaciju između AP radi praćenja kretanja mobilnog mrežnog čvora, Ethernet mrežna topologija
 - radijski prijenos – prijenosni medij koriste se radijski valovi
 - mrežni čvorovi (postaje) – BSS -> direktni prijenos, i. skup
 - ESS -> posrednici za prijenos podataka u susjedstvu

- računalo istovremeno može biti povezano samo na jednu AP
- prijelazi u mreži ili između mreže:
 - kretanje bez prijelaza (zadržavanje u okviru jednog BSS)
 - prijelazi između BSS segmenata ESS mreže
 - prijelaz između različitih ESS mreža
- smanjenjem snage svake AP (manji domet) i korištenjem dodatnih AP bolje se pokriva željeni prostor

GRANICE MREŽE

- preklapanje područja pokrivanja BSS segmenata ESS mreže (povećavamo neprimjetni prijelaz između BSS)
- 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) obavljaju funkciju komutatora (bridge) između radijskog i fiksnog dijela mreže
- **Topologija s pristupnom točkom** - koristi se kad je potrebno proširiti pokrivanje postojeće fiksne infrastrukture
- **Topologija s pretvaračem (gateway)** –manje uredske mreže
- **Topologija s računalom kao pristupnom točkom** –kućni sustavi, računalo ima dvije mrežne kartice: pristupna mreža, WLAN
- **Udaljeno radijsko povezivanje preko usmjerenih (point-to-point) ili zvjezdastih (point-to-multipoint)**
- Topologija point-to-point s usmjerenim antenama

POVEZIVANJE WLAN-UMTS/GPRS topologije

- USKO POVEZIVANJE – na isti način kao i druge UMTS radijske pristupne tehnologije (UTRAN, GERAN,...)
- SLOBODNO POVEZIVANJE – preko operatorske IP mreže
 - server AAA ->provjeriti vjerodostojnost svakog pojedinog korisnika, naplata korištene usluge

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

WLAN-LTE topologije

- **sulocirani elementi mreže** - kada su integrirani na istoj lokaciji eNB (eNodeB) i WLAN AP (Access Point)

- **dislocirani elementi mreže** – kada eNB i AP nisu na istoj lokaciji i s istim zamrežjem (backhaul)

VEZA WLAN-a S FIKSNOM JAVNOM MREŽOM

- umjesto HCF (kao pristupne mreže) mogu biti:
 - DSL – pristupne tehnologije po bakrenim paricama
 - FITL – optičke pristupne mreže
 - WLL – radijske pristupne tehnologije

3. Norme za WLAN

- 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*)

OSI referentni model (nastavak)

802.11 mreže u OSI modelu



- **SLOJ VEZE**
 - 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
 - **mehanizam odgađanja sudara**
- **FIZIČKI SLOJEVI**
 - FHSS
 - DSSS
 - sloj temeljen na OFDM tehnici
 - IR
 - sloj temeljen na prijenosu korištenjem MIMO-OFDM

802.11

- brzine prijenosa do 2Mbit/s
- frekvencijsko područje 2.4GHz, uporaba tehnologije proširenog spektra
- **FHSS**
 - fizički sloj
 - koristi Gaussovu diskretnu modulaciju frekvencije (GFSK)
 - filtriranje podataka u niskopropusnom filtru, širina pojasa $B \cdot T_0 = 0.5$
 - skakanje frekvencije na temelju računalno generirano pseudoslučajnog koda
 - najmanji razmak frekvencija između kojih se skače je 6 kanala
 - 10 do 15 kanal
 - manje osjetljiv na smetnje i višestazno prostiranje
- **DSSS**
 - brzina prijenosa podataka 1 ili 2 Mbit/s, mogu se postići veće brzine od FHSS
 - Barkerov kod (+1, -1) od 11 podimpulsa -> frekvencija podimpulsa 11Mchip/s
 - 13 kanala u pojasu, max 3
 - kvar kvalitete nastupa naglo

802.11a

- područje 5GHz
- brzine prijenosa do 54Mbit/s (ovisno o modulacijskom postupku)
- modulacijski postupak: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- širina kanala 20MHz
- max. 8 frekvencija u preklapajućoj topologiji
- Pri velikoj gustoći terminala, uz korištenje velikih brzina, "a" mreža može dati zadovoljavajuću propusnost u odnosu na "b" mrežu

802.11b

- područje 2.4GHz
- brzine prijenosa do 11Mbit/s uz korištenje **CCK** (oblik proširenog spektra, DSSS tehnike)
 - Za proširenje se umjesto binarnoga 11-chipnog Barkerovog koda koristi skup od 64 8-chipnih kodnih riječi
 - 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)
 - zadnja dva bita određuju rotaciju u QPSK postupku
- Pri konačnoj brzini od 11 Mbit/s zauzima se pojas jednog kanala od 22 MHz
- 802.11b dobro je koristiti ako je potrebno postići pokrivanje **većeg područja** tj. kad nije moguće gusto postaviti pristupne točke
- jeftinija zbog manjeg broja AP-ova

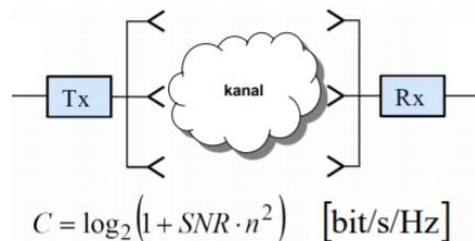


802.11g

- Norma je zadržala sva obilježja tehnologije iz 802.11a, a koristi frekvencijsko područje rada 802.11b (2,4 GHz)
- 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
- **prednosti**
 - 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
 - bolje je pokrivanje nego kod 802.11a uz istu brzinu podataka
- **nedostaci**
 - ISM pojas – izvor smetnji
 - povećana potrošnja energije
 - visoka početna ulaganja

MIMO SUSTAVI

- prijamnik i odašiljač imaju više od jedne antene
- u istom kanalu omogućava se prijenos nezavisnih tokova podataka
- ukupni kapacitet M puta veći od SISO
- povećava brzinu
- prijenosnu matricu potrebno je dijagonalizirati kako bi mogli ostvariti maksimalnu brzinu prijenosa



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

SISO SUSTAVI

- spektralna učinkovitost, tj. kapacitet kanala u klasičnim sustavima s jednom antenom definiran je **Shannonovom formulom**:
C- omjer brzine prijenosa i širine kanala (spektralna učinkovitost)
 $C = \log_2(1 + SNR) \quad [\text{bit/s/Hz}]$
- odnos signal/šum moguće je mijenjati povećanjem snage odašiljača, gdje kapacitet raste logaritamski
- za povećanje spektralne učinkovitosti s 1 bit/s/Hz na 10 bit/s/Hz potrebno je povećati snagu odašiljača ~1000 puta
- **diverzit** – povećava pouzdanost
 - jedni te isti podaci idu na antenu (kod mimo se šalju različiti)
 - redundancija i zalihost
- **prostorno multileksiranje** – povećanje kapaciteta kanala
 - podaci se podijele na manje slijedove, a svaki slijed se odašilje drugom antenom u istom kanalu

- broj antena na prijamniku i odašiljaču ograničava maksimalni broj sljedova koji se mogu stvoriti

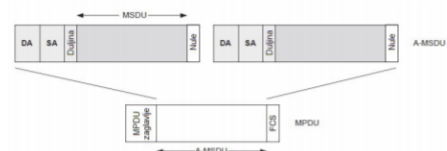
$$C = n \cdot \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{n} \right) \quad [\text{bit/s/Hz}]$$

○

802.11n (WiFi 4)

- cilj: povećanje brzine prijenosa u WLAN mrežama
- max. teorijska brzina 600Mbit/s
- kanali širine 40MHz
- upotreba u frekvencijskom pojasu 2.4GHz i 5GHz
- korištenje diverziti načina odašiljanja i prijama signala
- modulacijske tehnike: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- ako su uvjeti u kanalu povoljni, koristit će se modulacijski postupak s većom spektralnom korisnošću (65-QAM)
- manja spektralna korisnost – veća otpornost na pogreške, manja brzina
- norme **a, g, n – OFDM** postupak multipleksiranja
 - svaki podnosioc moduliramo zasebno i šaljemo unutar određenog kanala
- u 20 MHz-nom kanalu smještaju se 64 podnosioca, a u 40 MHz-nom 128 podnosioca
- shema za opisivanje MIMO sustava u kojima su navedeni svi bitni parametri može se napisati u sljedećem obliku:
 - izraz oblika **a × 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 2×3:2 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 2×2:2, 2×3:2 i 3×3:2
 - dopuštena uporaba svih smislenih konfiguracija do 4×4:4
- promjene na MAC sloju (u svrhu povećanja brzine prijenosa)
 - skraćeno vrijeme između okvira(RIFS)
 - potpunim uklanjanjem razmaka između okvira postiže se brzina propusnosti do 370 Mbit/s
 - prikupljanje okvira
 - slanje više okvira u jednom prijenosu
 - 2 tipa prikupljanja okvira:
 - implicitni zahtjev potvrde bloka
 - umjesto potvrde svakog okvira, potvrđuje se prijam cijelog bloka
- brzina prijenosa digitalnog komunikacijskog sustava općenito ovisi o modulacijskoj tehnici i širini kanala (20MHz i 40MHz)

- MSDU - MAC Service Data Unit
- MPDU - MAC Protocol Data Unit



- najviša brzina prijenosa postiže se uz četiri paralelna slijeda podataka, 40 MHz-nu širinu kanala i 64-QAM modulacijski postupak

802.11ac (WiFi 5)

- brzina veća od 1 Gbit/s
- frekvencijski pojas 5GHz
- širine kanala od 20MHz do 160MHz (80MHz standardno)
- modulacijski postupci do 256-QAM, povećava se spektralna učinkovitost
- MIMO u silaznoj vezi – više uređaja može slati i primati podatke
 - koristi usmjeravanje zrake (točno prema korisniku)
- **izmjene na MAC sloju**
 - veličina okvira 11000 bajta
 - control polje počinje sa 1 (tip VHT- sadrži info o prijenosu kako bi se ostvarile najbolje brzine)
 - sve MSDU jedinice se skupljaju i šalju kao MPDU

802.11ax (WiFi 6)

- brzina do 10Gbit/s
- rad u 2.4 i 5GHz frekvencijskom području
- MIMO
- širine kanala 20-160MHz
- **OFDMA te 1024-QAM**, a više-korisnički MIMO može imati do 8 klijenata (u odnosu na 4 kod 802.11ac)
- **višekorisnički OFDMA** – dijeli se u grupe (npr. 4 bloka), omogućuje balansiranje prometa

	802.11n (Wi-Fi 4)	802.11ac Wave 2 (Wi-Fi 5)	802.11ax (Wi-Fi 6)
Norma objavljena	2009	2013	2019
Frekvencijski pojasevi	2,4 GHz & 5 GHz	5 GHz	2,4 GHz & 5 GHz, moguće buduće proširenje na 1 GHz – 7 GHz
Širine kanala	20 MHz, 40 MHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz & 160 MHz	20 MHz/ 40 MHz @ 2,4 GHz, 80 Hz, 80+80 MHz & 160 MHz @ 5 GHz
Razmak podnosioca	312,5 kHz	312,5 kHz	78,125 kHz
Trajanje OFDM simbola	3,6 ms (kratki zaštitni interval) 4 ms (dugi zaštitni interval)	3,2 ms (0,4 / 0,8ms ciklički prefiks)	12,8 ms (0,8/ 1,6/ 3,2 ms ciklički prefiks)
Najveća modulacija	64-QAM	256-QAM	1024-QAM
Brzine prijenosa	Od 54 Mbit/s do 600 Mbit/s (max. 4 toka podataka)	433 Mbit/s (80 MHz, 1 tok podataka) 6933 Mbit/s (160 MHz, 8 tokova podataka)	600 Mbit/s (80 MHz, 1 tok podataka) 9607,8 Mbit/s (160 MHz, 8 tokova podataka)
SU/MU-MIMO-OFDM/A	SU-MIMO-OFDM	SU-MIMO-OFDM Wave 1, MU-MIMO-OFDM Wave 2	MU-MIMO-OFDMA

HiperLAN

- norme nisu kompatibilne sa IEEE
- frekvencijsko područje 5GHz
- **HiperLAN1** – brzine prijenosa 2 do 23 Mbit/s

- **HiperLAN2** – brzine prijenosa 54 Mbit/s
 - namijenjen je i za fleksibilnu aplikaciju unutar poslovnih prostora i mjesta stanovanja osiguravajući pri tome multimedijски prijenos do 54 Mbit/s
 - OFDMA tehnologija
 - podržava nezavisno pridjeljivanje kvalitete usluge (QoS) i radnih frekvencija
- implementiran postupak **dinamičkog odabira frekvencije (DFS)**

4. Tipične primjene WLAN mreža i usluge u WLAN mreži

- mogućnost uspostavljanja veze, mobilnost
- za korištenje WLAN-a potrebno je:
 - računalo s mrežnom karticom
 - AP
- **DJELOKRUG WLAN-a:**
 - širokopojasni pristup
 - javni WLAN
 - kućno umrežavanje
- **primjena u uredu/tvrtki:**
 - pr. višekatni prostor
 - nema potrebe za kablovima, ljudi se mogu slobodno kretati
 - interakcija fiksnog i radijskog (za manje urede)
- **primjena u vanjskim aktivnostima (gradilište)**
 - dislocirana mreža
- WLAN – moguće povezati puno uređaja
- AP- nekoliko računala se veže na istu AP
- **javni WLAN** - javna mjesta veće koncentracije prometa
- **sveučilišni WLAN** – pokriva cijeli kampus
 - kompleksne aplikacije
- **PLANIRANJE POKRIVANJA WLAN-om** - Između pristupnih točaka, koje rade na istom kanalu, mora se u svim smjerovima nalaziti barem jedna pristupna točka koja radi na nekom drugom kanalu
 - **pr. mala kavana** – jedna AP
 - **pr. kongresni centar** – velik broj AP

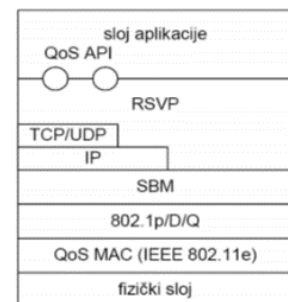
USLUGE U MREŽI

- **USLUGE ZA PRIJENOS U STVARNOM VREMENU**
 - prijenos govora, pokretne slike, ...
- **USLUGE ZA PRIJENOS INFORMACIJE RASPOLOŽIVOM BRZINOM**
 - klasični prijenos podataka, elektronička pošta, pretraživanje int., ...
 - Kvaliteta ovih usluga češće se mjeri raspoloživošću poslužitelja (servera) nego pruženom brzinom prijenosa
- **pristup Internetu**
 - najrasprostranjenija javna usluga, najjednostavnija implementacija
 - usluge za prijenos informacija raspoloživom brzinom
 - korisniku se preko DHCP-a dodjeljuje IP-adresa
- **prijenos govora**

- **VoWLAN**
- snimanje, kompresija, odašiljanje, primanje, dekompresija, reprodukcija
- tri oblika:
 - prijenos govora koji nije namijenjen reprodukciji u stvarnom vremenu
 - prijenos govora s dopuštenim kašnjenjem
 - prijenos govora u stvarnom vremenu
- **VoIP**
- **multimedijske usluge- vrste prometa**
 - **najbolji mogući (best effort)** - nije pogodno za multimedijski prijenos (ne može se jamčiti brzina niti vrijeme čekanja), mreža će učiniti najbolje moguće da se podaci dostave do odredišta
 - **audiosignali** – zahtijeva srednje brzine prijenosa te je vrlo osjetljiva na pogreške
 - **videosignali** – velike brzine prijenosa, osjetljivi na kašnjenje
 - **interaktivne igre** – niske brzine prijenosa, osjetljiva na kašnjenje
- **zvuk, VoIP, videokonferencije** – niske do srednje brzine prijenosa, osjetljiva na dvosmjerno kašnjenje s kraja na kraj prijenosnog puta

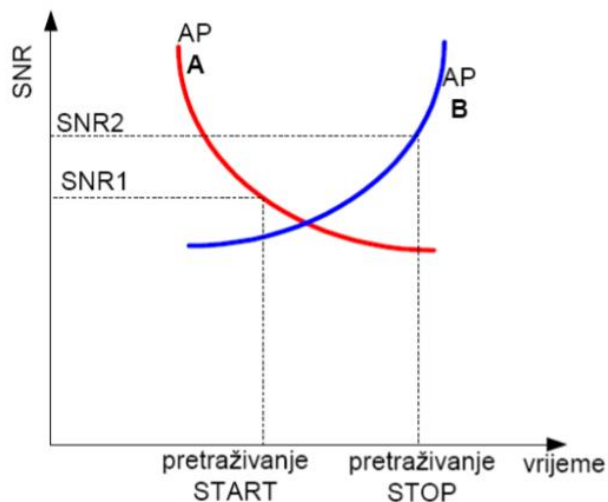
QoS

- opisivanje svega što se zbiva između aplikacije i mreže
- propusnost, kašnjenje, promjenjivost kašnjenja, gubici paketa
- **RSVP (Resource Reservation Protocol)**
 - rezerviranje resursa mreže te dodjeljivanje različitih razina usluge različitim korisnicima
 - koristi se u svrhu razlikovanja vremenski kritičnih aplikacija kod izravnog dodjeljivanja resursa mreže
 - **nije transportni protokol**, tj. ne prenosi korisničke informacije, ali radi usporedno s protokolima TCP ili UDP
- **DiffServ**
 - Provodi razlučivost usluga kako bi podržao QoS zahtjeve usmjerene na prometne vrste
 - Ideja se temelji na izmještanju klasifikatora prometa na rub mreže te brzom prometnom usmjeravanju unutar temeljne mreže
 - definiran je za sve inačice protokola IP (IPv4 i IPv6)
 - Korištenje **IP zaglavlja** za definiranje prioriteta prometa predstavlja najveću razliku između protokola **RSVP i DiffServ**
- **SBM**
 - način preslikavanja između QoS protokola viših slojeva i QoS protokola na sloju podatkovne veze
 - Signalizacijski protokol koji provodi komunikaciju i koordinaciju između Internet protokola (npr. RSVP) i protokola sloja podatkovne veze
- Sloj aplikacije mora osigurati provedbu kvalitete usluge i biti u stanju koristiti QoS pristupne točke (API, Access Point Interfaces)



Roaming

- WLAN ne podržava strogo gledajući "nevidljivi" (seamless) prijelaz iz područja jedne pristupne točke u područje jedne od susjednih pristupnih točaka
- WLAN ne podržava strogo gledajući "nevidljivi" (seamless) prijelaz iz područja jedne pristupne točke u područje jedne od susjednih pristupnih točaka
- prijelaz iz jedne ćelije u drugu - prekapčanje
- **CDT (prag detekcije nosioca)** – razina prijenosnog signala ispod koje uređaj ne može funkcionirati
- Za **pravilno prekapčanje** između pojedinih pristupnih točaka postoji potreba stalnog određivanja odnosa signal/šum.
- Ako se pretraživanjem utvrdi da jedna od susjednih pristupnih točaka nudi višu razinu signala, potrebno je postojeću vezu preusmjeriti na tu pristupnu točku.



- **naplata usluga:**
 - pretplata
 - naplata opterećenja koje korisnik generira
- Temelj za uvođenje naplate jest **autorizacija i provjera vjerodostojnosti** pristupa (authentication)
- **osnova za naplatu usluge:**
 - po količini podataka
 - po vremenu
 - po tzv. sesiji
- **SMJEROVI RAZVOJA WLAN TEHNOLOGIJA:**
 - poslovni segment – tvrtke
 - javni segment
 - kućni segment

5. WLAN – planiranje i projektiranje, primjeri iz prakse

- pri planiranju mreže prvo treba definirati usluge koje želimo koristiti, koja razina kvalitete mora biti zadovoljena, koliko korisnika se očekuje
 - dimenzioniranje kapaciteta – svaka AP ima određeni kapacitet

- **Ključni parametri usluga (aplikacija)** koji se razmatraju kod planiranja bežične lokalne mreže su:
 - aplikacijski zahtjevi
 - istodobno korištenje više usluga
 - relativni omjeri korištenja video, govorne i podatkovne usluge
 - očekivani prometni zahtjevi
- **QoS zahtjevi**, s kraja na kraj mreže: **kašnjenje, varijacija kašnjenja, gubici paketa**
- faktori koji utječu na QoS: fizički faktori mreže i korisničke opreme
- interaktivne podatkovne aplikacije imaju dobre performanse ako je kašnjenje s kraja na kraj mreže ispod 150ms
- Kako bi se ostvarili zahtjevi za QoS potrebno je definirati pokrivanje prostora adekvatnim radijskim signalom:
 - odrediti min. razinu signala koju je potrebno ostvariti
 - zahtijevati određeni omjer signal-šum
- Da bi aplikacije uspješno radile potrebno je ostvariti određenu brzinu prijenosa na fizičkom sloju - brzina prijenosa na fizičkom sloju je **oko 2 puta veća**
- **MIMO tehnika** – povećavamo brzinu prijenosa na fizičkom sloju
- **PROPUSNOST** – brzina prijenosa podataka na određenom sloju (paketski prijenos dobro funkcionira dok je velika zalihost)
- omjer **signal-šum** na mjestu prijema određuje brzinu (**usko grlo**)
- pomoću prijemnog signala možemo izračunati odnos signal-šum
- programska podrška za izračun pokrivanja – Ekehou (tlocrt, razina prijamnog signala, odnos signal-šum, propusnost na fizičkom sloju)
- **AP** mora omogućiti prekapčanje bez prekida komunikacije pri prelasku s jedne AP na drugu
- **KONTROLER** – upravljanje AP, automatsko otkrivanje i podešavanje
- **pristupni čvor (L2 komutator)** objedinjuje sve fizičke poveznice od pristupnih točaka te osigurava izlaz prema Internetu preko usmjeritelja ili modema koji je u vlasništvu Internet pružatelja usluge (ISP)
- **Mrežna arhitektura:**
 - **upravljačka** – kvaliteta usluge, sigurnost, prijava i otklanjanje problema u mreži
 - **kontrolna** - mrežna topologija, prosljeđivanje paketa
 - **podatkovna**
 - odvajanje kontrolne i podatkovne ravnine u bežičnim lokalnim mrežama postignuto je **uvođenjem kontrolera**

KONTROLERI

- **s tuneliranjem prometa**
 - sav promet svih AP šalje se do kontrolera
- **s podijeljenim prometom**
 - samo dio prometa šalje se do kontrolera (lokalni promet se ne šalje do kontrolera)
- **FUNKCIONALNOSTI KONTROLERA**
 - upravljanje AP
 - poslužitelj DHCP
 - autentikacija
 - nadzor mreže

6. Radijske mreže gradskih područja – uvod, norme, frekvencijska područja rada i načela dodjele frekvencija

- **WMAN**
 - prijenos podataka – radijsko sučelje
 - proširenje i prilagodba WLAN tehnologije
 - **TEHNOLOŠKE REALIZACIJE WMAN** razlikuju se po kapacitetu, načinu pristupa, načinu realizacije istodobnog dvosmjernog prijenosa, simetričnost/nesimetričnost prijenosa za silaznu i uzlaznu vezu

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

- najzastupljenija tehnologija unutar WMAN-a
- varijabilni kapacitet
- OFDM, OFDMA
- TDD/FDD način dupleksnog rada
- TDMS FDMA višestruki pristup
- **NAMJENA FREKVENCIJSKOG PODRUČJA:**
 - **širokopojasne usluge** – povezivanje na Internet, prijenos govora, prijenos videotelefonskih signala, prijenos podataka
 - **infrastruktura mobilnih mreža**

FREKVENCIJSKA PODRUČJA

- **3.5GHz**
 - propagacija je općenito ograničena na približnu optičku vidljivost
 - prijenosna udaljenost iznosi do 20 km
 - uz fiksni pristup predviđena je mogućnost korištenja i mobilnog pristupa
- **24.5GHz**
 - propagacija je ograničena samo na optičku vidljivost, gušenje zbog kiše
 - prijenosna udaljenost iznosi do 10 km
 - raspoloživa je veća širina frekvencijskog pojasa pa su moguće veće brzine prijenosa
- sustavi koji rade u **3,5 GHz** području koristit će se kao **pristupne mreže**, dok će sustavi u **24,5 GHz** području biti više upotrebljavani kao **povezne mreže** (backhaul)

NORME ZA WMAN – ETSI

- **HiperAccess**
 - Fizički sloj je prilagođen frekvencijskom području
 - Isključivo nepokretne mreže
 - prijenos se temelji na TDD i FDD tehnici
 - **silazni smjer:** QPSK, 16-QAM i 64- QAM
 - **uzlazni smjer:** QPSK i 16-QAM
 - **višestruki pristup:** TDMA
 - širina kanala: 28MHz
- **HiperMAN**
 - fizički sloj i sloj za upravljanje podacima
 - **fizički sloj:** OFDM modulacijska tehnika, modulacija podnositelja: QPSK, 16-QAM i 64- QAM
 - definira samo jedan način rada fizičkog sloja i to: OFDM, FFT s 256 točaka
 - TDD i FDD način rada

NORME ZA WMAN – IEEE

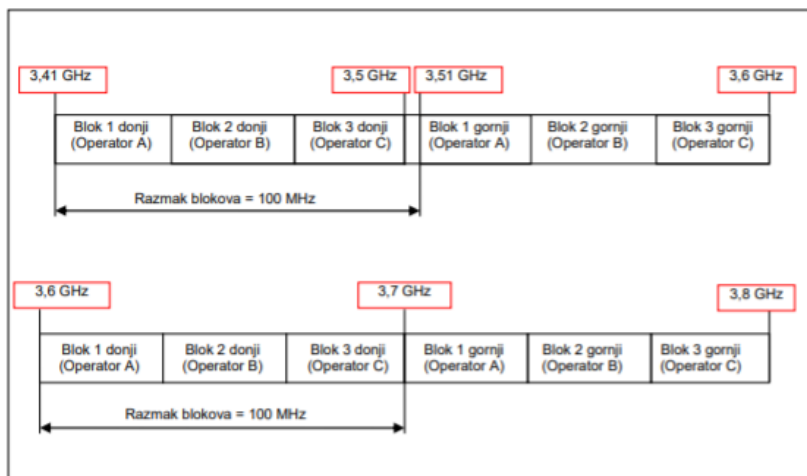
- tri frekventijska područja: 2 – 11 GHz, 10 – 66 GHz i frekventijsko područje 5 – 6 GHz za čiju uporabu se ne plaća naknada

WiMAX Forum

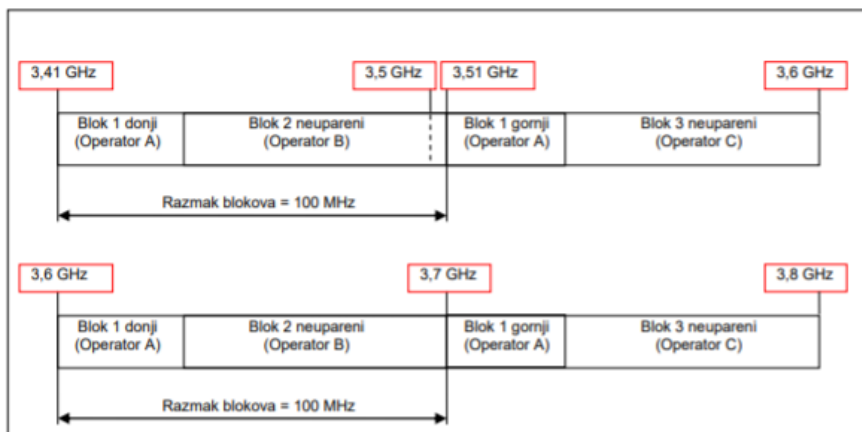
- međunarodna udruga
- ispitivanje kompatibilnosti i omogućavanje zajedničkog rada uređaja različitih proizvođača koji rade u skladu s IEEE 802.16 normama
- **WiMAX oznaka** - uređaj ima mogućnost zajedničkog rada s drugim WiMAX uređajima

NAČELA DODJELE FREKVENCIJE

- u uparene blokove (razmak blokova 100 MHz)



- u neuparene blokove (razmak blokova 100 MHz)



- **U Hrvatskoj:** upareni blokovi, između blokova kanal razmaka 3.5 MHz

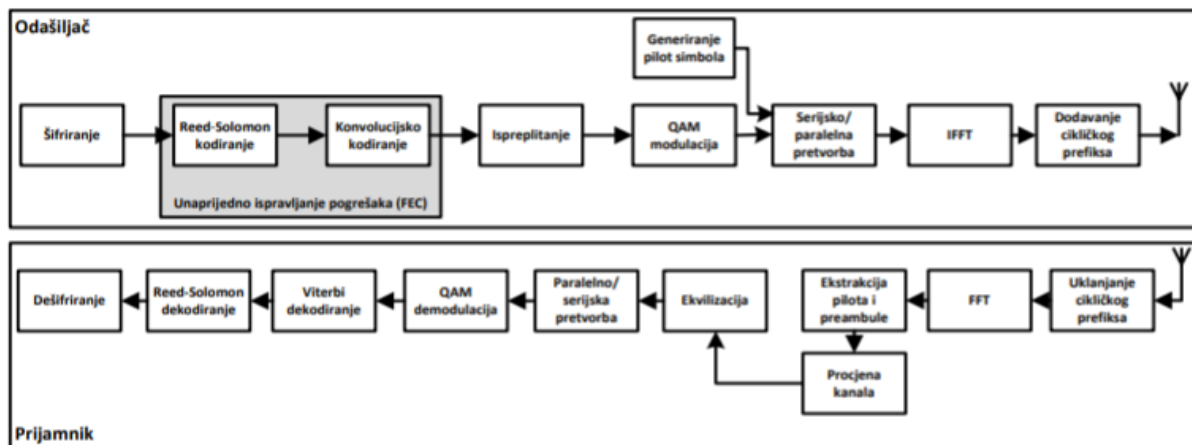
7. Osobitosti tehnologije WiMAX, obilježja norme IEEE 802.16-2004 – OFDM radijsko sučelje

- WiMAX – odnosi se a sve što je pokriveno normama 802.16-2004 (nepokretne mreže) i 802.16e (mobilne mreže)

NORMA IEEE 802.16-2004

- obuhvaćena dva sloja: sloj upravljanja pristupa i fizički sloj
- **sloj upravljanja pristupa mediju:**
 - **podslaj konvergenije usluga** – osigurava transformaciju i preslikavanje podataka iz vanjske mreže iz i prema MAC CPS kroz **pristupne točke usluga**
 - omogućena komunikacija sloja upravljanja pristupa prema vanjskoj telekomunikacijskoj mreži
 - **zajednički MAC podslaj** – osigurava funkcionalnost pristupa sustavu, dodjelu pojasa, ostvarivanje i održavanje veze
 - **sigurnosni podslaj** – osigurava autorizaciju usluga, razmjenu sigurnosnih ključeva i šifrirano kodiranje podataka radi zaštite od neovlaštenog pristupa
- Protokolna podatkovna jedinica iz višeg sloja (**PDU**, Protocol Data Unit) povezana s odgovarajućom MAC vezom uključuje se u podatkovnu jedinicu usluga (**SDU** – Service Data Unit) zaduženu za komunikaciju između slojeva
- **Klasificiranjem MAC SDU** (MAC SDU, Medium Access Control Service Data Unit) paket se preslikava u oblik za prijenos u mreži (**odredišna IP adresa, prioritet prijenosa, CID**)
- **MAC sloj** omogućava korištenje pe različitih radijskih sučelja na fizičkom sloju
 - **2-11 GHz OFDM PHY**

OFDM RADIJSKO SUČELJE



- OFDM simbol sastoji se od velikog broja moduliranih podnosilaca, koji su nastali inverznom diskretnom Fourierovom transformacijom
- U WiMAX-u se koristi fiksni broj od 256 nosilaca.
- Svaki od podnosioca (**podatkovni (192), pilotski (8), potisnuti**) je moduliran (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM)
- Svrha **potisnutih podnosilaca** je osiguravanje zaštitnog pojasa prema susjednom kanalu na frekvencijskoj osi
- **fdd i tdd** dupleksni način rada - FDD je bolji za simetričnu vrstu prijenosa, dok je TDD bolji za asimetrični način prijenosa podataka
- parametri OFDM simbola:
 - **BW** – nominalna širina kanala
 - **Nfft** – ukupni broj OFDM podnosioca (256)
 - **Nused** – broj podatkovnih podnosioca (200, 8 pilota)
 - **n** – faktor uzrokovanja
 - **G** – omjer trajanja zaštitnog intervala i korisnog vremena simbola