



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb

RADIJSKE TEHNOLOGIJE ZA ŠIROKOPOJASNI NEPOKRETNI PRISTUP I MJERENJA



Zagreb, 2008.

Ugovor:

Ugovor o izradi studije: *Radijske tehnologije za širokopolasni nepokretni pristup i mjerenja* zaključen je 30. lipnja 2008. godine pod brojem: HAT - 16/08, klasa 740-06/08-04/11; urbr. 25167/312-08/1 (FER), između Hrvatske agencije za telekomunikacije (sad Hrvatska agencija za poštu i elektroničke komunikacije), kao naručitelja i Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Unska 3 kao izvršitelja.

Odgovorna osoba Izvršitelja:

prof.dr.sc. Borivoj Modlic

Ekspertska skupina Fakulteta elektrotehnike i računarstva:

prof.dr.sc. Borivoj Modlic
prof.dr.sc. Sonja Grgić
prof.dr.sc. Tomislav Kos
prof.dr.sc. Mislav Grgić
doc.dr.sc. Gordan Šišul

Ni jedan dio ove studije ne smije se umnažati, fotokopirati niti na bilo koji način reproducirati bez pisanog dopuštenja Naručitelja.

Izvod iz ponude za izradu studije: RADIJSKE TEHNOLOGIJE ZA ŠIROKOPOJASNI NEPOKRETNI PRISTUP I MJERENJA

Hrvatska agencija za telekomunikacije, kao nezavisni regulator telekomunikacija u Republici Hrvatskoj, ima i zadaću razvijanja telekomunikacijskog tržišta. U okviru tih aktivnosti Agencija je ispravno prepoznala potencijal širokopojasnoga radijskog nepokretnog pristupa kao sredstva za ispunjavanje dijela ciljeva iz *Strategije razvoja širokopojasnog pristupa Internetu u Republici Hrvatskoj* i *Akcijskog plana provedbe Strategije razvoja širokopojasnog pristupa internetu u Republici Hrvatskoj* koji je donijela Vlada Republike Hrvatske.

Radijski pristup nema konkurencije za komunikacije u mobilnima ili izrazito nomadskim uvjetima, a predstavlja i ekonomično rješenje za neka ruralna područja u kojima je gospodarski neisplativa izgradnja fiksne telekomunikacijske strukture za navedene svrhe. Veliki broj različitih mreža na nekom području usložnjava problematiku upravljanja radiofrekvencijskim spektrom kao i nadzora nad njegovim korištenjem. U tom pogledu javljaju se nova rješenja koja omogućuju učinkovitije korištenje spektra, a raste i značaj praktičnih mjernih metoda za brzu provjeru načina korištenja dodijeljenog spektra i dodijeljenih parametara mreže.

U okviru toga studija mora dati odgovore na sljedeća pitanja:

- ◆ Postupci umrežavanje računala:
 - referentni model za povezivanje otvorenih sustava,
 - kratki pregled radijskih tehnologija za nepokretni i nomadski pristup.
- ◆ Radijske lokalne mreže:
 - temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WLAN,
 - pregled normi za radijske lokalne mreže,
 - arhitekture mreže,
 - lociranje pristupnih točaka,
 - načela dodjele frekvencija,
 - učinkovita dodjela frekvencija i kompatibilnost sustava,
 - tipične aplikacije s primjerima,
 - mjerenja radijskih parametara.
- ◆ Radijske mreže gradskih područja – tehnologija WiMAX:
 - temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WiMAX,
 - pregled normi za radijske mreže gradskih područja,
 - osobitosti tehnologije WiMAX,
 - arhitekture mreže,
 - lociranje baznih postaja,
 - načela dodjele frekvencija,
 - učinkovita dodjela frekvencija i kompatibilnost sustava,
 - tipične aplikacije s primjerima,
 - mjerenja radijskih parametara
- ◆ Razvoj i nove tehnologije:
 - razvoj mobilnih podatkovnih mreža prema 4G tehnologijama (IMT Advanced, konvergencija WiMAX i UMTS, divergencija UMTS LTE, 802.20, očekivani tehnološki razvoj i prevladavajuće tehnologije), performanse WLAN-a i WiMAX-a u odnosu na ostale radijske tehnologije za širokopojasni pristup,
 - napredne metode dodjele i planiranja spektra,

- inteligentne antene i MIMO sustavi,
- poništavanje interferencija,
- UWB mreže,
- SDR i spoznajni radio,
- tehnologije širokopolasnih pristupa u frekvencijskom području 1785-1805 MHz i njihova koegzistencija s postojećim sustavima,
- fleksibilnost upravljanja spektra – tehnološki neutralna dodjela frekvencija (WAPECS).

Prilikom razrade pojedinih cjelina vodit će se računa i o stanju u zemljama Europske unije i položaju hrvatskih regulatornih rješenja u okviru odgovarajućih globalnih rješenja. Zaključno studija će naznačiti očekivane smjerove razvoja novih rješenja u okviru postojećih mreža ili pak potpuno novih mreža za širokopolasni radijski pristup.

Sadržaj

1. Umrežavanje računala.....	1
1.1. Mreže računala	1
1.2. Referentni modeli slojevite arhitekture mreže	2
1.2.1. Referentni model za povezivanje otvorenih sustava	3
1.2.2. Referentni model TCP/IP	9
1.3. Kratki pregled radijskih tehnologija za nepokretni i nomadski pristup	12
1.3.1. WLAN tehnologije.....	13
1.3.2. WMAN tehnologije.....	15
2. Radijske lokalne mreže	19
2.1. Temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WLAN	19
2.1.1. Osnovne namjene radijskih lokalnih mreža	19
2.1.2. Frekvencijska područja rada WLAN-a	20
2.1.3. Usluge u mreži	24
2.2. Pregled normi za radijske lokalne mreže	28
2.2.1. Norme iz skupina IEEE 802.11 i HIPERLAN.....	28
2.2.2. Obilježja mreža po izvornoj normi IEEE 802.11	31
2.2.3. IEEE 802.11b inačica norme	34
2.2.4. IEEE 802.11a inačica norme	37
2.2.5. IEEE 802.11g inačica norme	39
2.2.6. IEEE 802.11n inačica norme	41
2.2.7. Norme iz skupine HIPERLAN.....	43
2.3. Arhitekture mreže.....	44
2.4. Lociranje pristupnih točaka	54
2.5. Načela učinkovite dodjele frekvencija	57
2.6. Kompatibilnost sustava	59
2.7. Tipične aplikacije – primjeri.....	60
2.7.1. Javne radijske lokalne mreže – PWLAN	60
2.7.2. Korporativna mreža	63

2.7.3.	Kućno umrežavanje.....	66
2.8.	Mjerenja radijskih parametara od interesa za nacionalnog regulatora.....	68
2.8.1.	Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika uređaja koji rade u području 2,4 GHz.....	68
2.8.2.	Mjerenje osnovnih parametara jedinica radijske lokalne mreže na 2,4 GHz.....	70
2.8.3.	Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika HiperLAN uređaja.....	75
2.8.4.	Mjerenje osnovnih parametara jedinica HiperLAN-a	78
2.8.5.	Točnost modulacije i kvaliteta prijenosa	81
2.8.6.	Potrebna obilježja mjernog instrumentarija	85
3.	Radijske mreže gradskih područja – tehnologija WiMAX	87
3.1.	Temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WMAN	87
3.1.1.	Frekvencijska područja rada	89
3.2.	Pregled normi za radijske mreže gradskih područja	92
3.2.1.	Norme nastale u okviru ETSI BRAN projekta	92
3.2.1.1.	HiperAccess	93
3.2.1.2.	HiperMan.....	95
3.2.2.	Norme nastale u okviru IEEE	98
3.2.2.1.	Povijesni razvoj.....	98
3.2.2.2.	Trenutno stanje normizacije.....	99
3.3.	Osobitosti tehnologije WiMAX.....	101
3.3.1.	Obilježja norme IEEE 802.16-2004	101
3.3.1.1.	OFDM radijsko sučelje.....	104
3.3.1.2.	OFDMA radijsko sučelje	107
3.3.2.	Obilježja norme IEEE 802.16e	113
3.3.3.	Usporedba najčešće korištenih radijskih sučelja	116
3.4.	Arhitekture mreže.....	118
3.5.	Lociranje baznih postaja	124
3.5.1.	Izračun prosječne veličine ćelije u području 3,4–3,8 GHz prema europskim preporukama	127
3.5.2.	Izračun područja pokrivanja u području 24,5–26,5 GHz	129
3.5.3.	Kapacitet sustava (brzina prijenosa podataka).....	130
3.5.4.	Ispitna mjerenja	131

3.5.5.	Korištenje programske podrške.....	132
3.6.	Načela dodjele frekvencija i učinkovita dodjela frekvencija.....	134
3.6.1.	Frekvencijsko područje 3,4–3,8 GHz.....	134
3.6.2.	Frekvencijsko područje 5725–5875 MHz	138
3.6.3.	Frekvencijsko područje 10,15–10,30 GHz i 10,50–10,65 GHz	138
3.6.4.	Frekvencijsko područje 24,5–26,5 GHz.....	139
3.6.5.	Frekvencijsko područje 27,5–29,5 GHz.....	142
3.6.6.	Današnje stanje zauzeća frekvencijskih pojaseva u RH i dodijeljene koncesije	142
3.7.	Kompatibilnost sustava i interoperabilnost.....	146
3.7.1.	Kompatibilnost sustava	146
3.7.1.1.	Kompatibilnost između BWA sustava i nepokretnih linkova vrste točka–točka.....	147
3.7.1.2.	Kompatibilnost između BWA sustava i ENG/OB sustava	148
3.7.1.3.	Kompatibilnost između BWA sustava i FSS sustava	148
3.7.1.4.	Kompatibilnost između BWA i radiolokacijskih sustava	149
3.7.2.	Kompatibilnost između FWA sustava različitih operatora na susjednom području.....	149
3.7.3.	Interoperabilnost	151
3.8.	Tipične aplikacije – primjeri.....	152
3.9.	Mjerenja radijskih parametara od interesa za nacionalnog regulatora.....	155
3.9.1.	Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika uređaja koji rade u području 3,5 GHz.....	155
3.9.2.	Mjerne metode	160
3.9.2.1.	Mjerenje snage	160
3.9.2.2.	Mjerenje spektralnih obilježja.....	162
3.9.3.	Mjerni instrumentarij.....	164
3.9.4.	Korisne napomene	167
4.	Daljnji razvoj i nove tehnologije	168
4.1.	Razvoj mobilnih podatkovnih mreža prema 4G tehnologijama.....	168
4.1.1.	IMT Advanced	170

4.1.2.	Konvergencija WiMAX i UMTS mreža.....	171
4.1.3.	Divergencija UMTS LTE meža	174
4.1.4.	Mobile-Fi (IEEE 802.20).....	178
4.1.5.	IEEE 802.21	179
4.1.6.	Performanse WLAN-a i WiMAX-a u odnosu na ostale radijske tehnologije za širokopojasni pristup....	180
4.1.7.	Očekivani tehnološki razvoj i prevladavajuće tehnologije.....	183
4.2.	Inteligentne antene i MIMO sustavi.....	185
4.2.1.	Inteligentne antene.....	185
4.2.1.1.	O inteligentnim antenama općenito	185
4.2.1.2.	Inteligentne antene s preklapanjem glavnog snopa	189
4.2.1.3.	Inteligentne antene s prilagodljivima antenskim nizovima	191
4.2.1.4.	Obilježja inteligentnih antena — sažetak	193
4.2.2.	MIMO-sustavi	195
4.2.2.1.	Arhitektura i načela rada MIMO-sustava.....	195
4.2.2.2.	Komunikacijski kanal MIMO-sustava	198
4.2.2.3.	Prostorno multipleksiranje	200
4.2.2.4.	Prostorno-vremenski diverziti	201
4.2.2.5.	Temeljne jedinice MIMO-sustava	203
4.2.2.6.	MIMO u višekorisničkoj okolini.....	205
4.3.	Poništavanje smetnji	209
4.3.1.	Postupci poništavanja smetnje.....	210
4.3.1.1.	Postupci temeljeni na filtriranju	210
4.3.1.2.	Transformacijski postupci	210
4.3.1.3.	Zajednička detekcija / višekorisnička detekcija	211
4.3.1.4.	Periodičnost statističkih svojstava	212
4.3.1.5.	Neuronske mreže	212
4.3.1.6.	Statistika višeg reda i odvajanje izvora	214
4.3.1.7.	Prostorna obrada	214
4.3.1.8.	Analogne tehnike	214
4.3.2.	Primjene poništavanja smetnje	214

4.3.2.1.	Evolucija sustava GSM.....	215
4.3.2.2.	Ćelijski GSM/GSM.....	215
4.3.2.3.	Širokopojasni fiksni radijski pristup.....	215
4.3.2.4.	Fiksna veza	215
4.3.2.5.	Radarski sustavi	216
4.3.2.6.	WLAN	216
4.3.2.7.	Radiodifuzija	216
4.4.	UWB mreže	217
4.4.1.	Osobitosti UWB signala.....	221
4.4.2.	UWB u osnovnom pojasu frekvencija.....	221
4.4.3.	Ostali načini stvaranja UWB signala.....	224
4.4.4.	Komercijalne primjene UWB tehnologije	225
4.4.5.	Frekvencijski plan za UWB u Europi	227
4.4.6.	Zaključak	229
4.5.	Softverski radio	229
4.5.1.	Arhitektura SDR-a	232
4.5.1.1.	Ravnina implementacije radija.....	232
4.5.1.2.	Ravnina mrežnog operatora	235
4.5.2.	Koncepti softverskog radija	235
4.5.3.	Realizacija SDR-a zahtjeva novu tehnologiju	237
4.5.4.	Karakteristike i prednosti softverskog radija	237
4.5.5.	Načela projektiranja SDR-a.....	239
4.6.	Spoznajni radio i napredne metode dodjele i planiranja spektra	240
4.6.1.	Uvodni pojmovi.....	240
4.6.2.	Načini dodjele radijskih frekvencija.....	245
4.6.3.	Spoznajni radio	246
4.6.4.	Zaključna razmatranja.....	251
4.7.	Tehnologija iBurst	252
4.7.1.	Temeljne značajke tehnologije iBurst.....	252
4.7.2.	Uklapanje iBursta u današnje mreže.....	255
4.7.3.	Koegzistencija sustava iBurst s postojećim sustavima	256
4.8.	Tehnološki neutralna dodjela frekvencija.....	257

4.8.1.	Tržišna i tehnička analiza	259
4.8.2.	Referentni WAPECS sustavi	260
4.8.3.	Modeli za definiranje najmanje ograničavajućih tehničkih uvjeta	260
4.8.4.	Analiza scenarija pri pojavi smetnje	261
4.8.5.	Analiza pojaseva	262
4.8.5.1.	Analiza pojasa 3,4 – 3,8 GHz	262
4.8.5.2.	Analiza pojasa 2,5 – 2,69 GHz	263
4.8.5.3.	Analiza pojaseva 880 – 915 MHz / 925 – 960 MHz	263
4.8.5.4.	Analiza pojaseva 1710 – 1785 MHz / 1805 – 1880 MHz	264
4.8.5.5.	Analiza pojaseva 1900 – 1980 MHz / 2010 – 2025 MHz / 2110 – 2170 MHz	264
4.8.5.6.	Analiza pojasa 470 – 862 MHz	264
5.	Zaključak	266

1. Umrežavanje računala

1.1. Mreže računala

Mreže računala omogućavaju međusobno povezivanje računala radi prijenosa i razmjene podataka, te povezivanje računala s uređajima za obradu podataka i komunikacijskim uređajima na međudržavnoj razini, unutar pojedine zemlje, grada, u industrijskom postrojenju, poslovnim zgradama ili u jednom uredu.

Ovisno o udaljenostima, koje prilikom umrežavanja treba premostiti, na raspolaganju su različite tehnologije umrežavanja i vrste medija za prijenos podataka. S obzirom na veličinu područja pokrivanja, mreže dijelimo na nekoliko osnovnih skupina:

- regionalne mreže ili mreže širokih područja (WAN, *Wide Area Network*),
- gradske mreže (MAN, *Metropolitan Area Network*),
- lokalne mreže (LAN, *Local Area Network*),
- osobne mreže (PAN, *Personal Area Network*).

Mreže širokih područja povezuju komunikacijske čvorove koji se nalaze na udaljenim lokacijama u istoj državi, na istom kontinentu ili na više kontinenta. One mogu rabiti visokorazvijenu satelitsku tehnologiju koja omogućava povezivanje bilo koje dvije točke na Zemlji, radiokomunikacijski prijenos te fiksne instalacije na kopnu i u moru (koaksijalni ili optički kabeli).

Gradske mreže su mreže koje pokrivaju područje jednog grada. Primjeri takvih mreža su mreže za kabelsku televiziju (CATV, *Cable Television*) te radijske MAN mreže (WMAN, *Wireless MAN*) koje omogućavaju fiksni širokopojasni radijski pristup (FBWA, *Fixed Broadband Wireless Access*). Mreže za kabelsku televiziju omogućavaju distribuciju velikog broja televizijskih programa te pristup Internetu putem koaksijalnog ili optičkog kabela. WMAN mreže omogućavaju povezivanje korisnika radijskim putem na javnu ili privatne mreže, a služe za dvosmjerni

prijenos podataka visokim brzinama. Najpoznatija WMAN tehnologija je WiMAX.

Lokalne mreže su mreže koje pokrivaju relativno malo zemljopisno područje, a služe za povezivanje osobnih računala i radnih postaja radi razmjene podataka između korisnika mreže (elektronička pošta, prijenos datoteka i sl.), te radi raspodjele i zajedničkog korištenja namjenske programske podrške, uređaja i opreme (npr. printera, poslužitelja i sl.). To su mreže računala u uredima, poslovnim zgradama i industrijskim postrojenjima gdje se povezuju računala smještena u jednoj zgradi ili više susjednih zgrada. Najčešće korištene LAN tehnologije su Ethernet za fiksne LAN mreže i WiFi za radijske LAN mreže (WLAN, *Wireless LAN*).

Osobne mreže su mreže za prijenos podataka koje se rabe za komunikaciju između uređaja namijenjenih jednoj osobi. Domet mreže je nekoliko metara. Primjer takve mreže je *Bluetooth* mreža koja npr. omogućava radijsko povezivanje računala s mišem, tipkovnicom i printerom.

Svaka skupina mreža dijeli se na podskupine koje se razlikuju po vrsti medija za prijenos signala, brzinama prijenosa, mrežnim tehnologijama i protokolima koje rabe, kao i vrsti mrežnih operacijskih sustava.

1.2. Referentni modeli slojevite arhitekture mreže

Zadatak komunikacijske mreže je omogućiti razmjenu informacija između uređaja na izvoru i odredištu komunikacijskog sustava. U prijenosu informacije između izvora i odredišta posreduju mrežni čvorovi. Mrežni čvor je aktivni dio sustava koji ima sposobnost prijama, obrade i slanja informacije. Ako se komunikacijska mreža sastoji od velikog broja mrežnih čvorova omogućavanje razmjene informacija između izvora i odredišta može postati složen zadatak i njegovo ispunjavanje zahtijeva visoki stupanj suradnje između mrežnih čvorova. Suradnja se postiže kroz obvezivanje strana uključenih u komunikaciju da se pridržavaju protokola za komunikaciju. Protokol je skup pravila i dogovora koji se rabe pri komunikaciji mrežnih čvorova različitih sustava.

Složenost zadatka koji treba ispuniti komunikacijska mreža može se smanjiti njezinom vertikalnom podjelom na slojeve pri čemu svaki sloj provodi točno definirane funkcije, a za svaki sloj definiraju se usluge sloja, sučelja sa susjednim slojevima i protokoli. Pojedini sloj u takvom konceptu pruža uslugu višem sloju (viši sloj rabi uslugu nižeg sloja) ne opterećujući ga detaljima njezine realizacije. Prilikom komunikacije mrežnih čvorova različitih sustava odgovarajući protokol upravlja komunikacijom ravnopravnih entiteta (entiteta koji se nalaze na istom sloju u

različitim sustavima). Slojevitom arhitekturom mreže postiže se odjeljivanje usluga i protokola. Usluga je pri tome skup osnovnih operacija koje niži sloj pruža višem sloju unutar jednog sustava. Definira se preko sučelja između slojeva pri čemu je niži sloj davatelj usluge, a viši sloj korisnik usluge. Sloj provodi određene operacije za korisnika ali je način njihove provedbe korisniku potpuno skriven. Protokol se odnosi na realizaciju usluge i nije vidljiv korisniku usluge. Protokoli se mogu promijeniti u skladu s potrebama ali pri tome mora biti ispunjen uvjet da usluge vidljive korisnicima ostanu nepromijenjene (korisnik ne smije uočiti promjenu protokola). Uvođenjem slojevite arhitekture mreže olakšano je projektiranje mreža jer se mreža projektira po slojevima pri čemu treba slijediti pravila odgovarajućeg protokola. Također je olakšana rekonstrukcija mreže jer se u slučaju promjena unutar sloja od nove inačice sloja zahtijeva samo da sloju iznad sebe ponudi isti skup usluga kao i ranije.

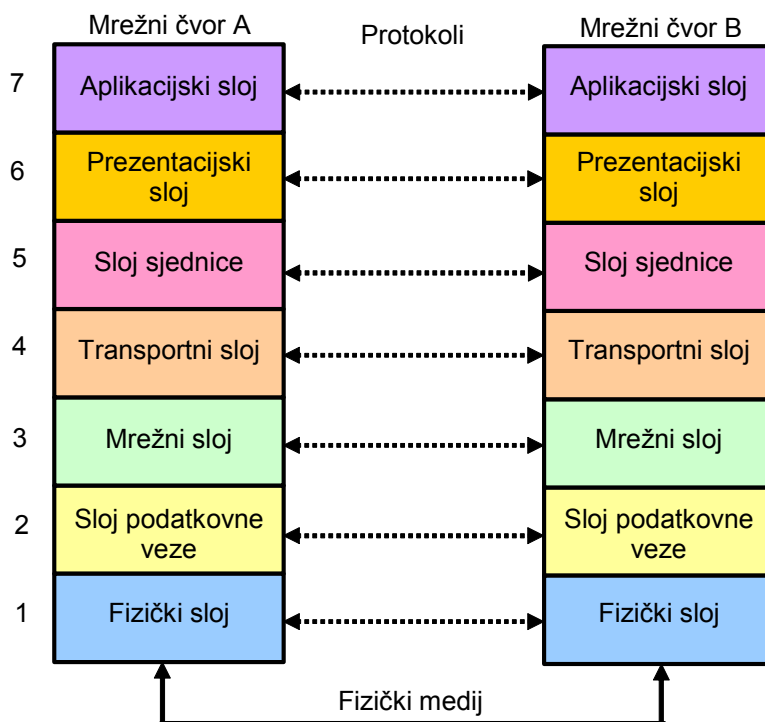
Kako bi se omogućilo povezivanje i zajednički rad mreža računala u kojima se rabe različite mrežne tehnologije i različiti protokoli razvijeni su referentni modeli slojevite arhitekture mreže koji definiraju koncepte i postavljaju norme te utvrđuju pravila povezivanja sustava u mrežu i mreža međusobno. Uporabom referentnog modela omogućava se stvaranje otvorenih rješenja, neovisnih o proizvođaču opreme ili mrežnom operatoru. Osnovni modeli su je referentni model za povezivanje otvorenih sustava (OSI, *Open System Interconnection*) i referentni model TCP/IP, tzv. internetski model koji nosi naziv prema dvama najvažnijim protokolima koji se u modelu rabe: protokolu za upravljanje prijenosom (TCP, *Transmission Control Protocol*) i internetskom protokolu (IP, *Internet Protocol*).

1.2.1. Referentni model za povezivanje otvorenih sustava

Referentni model za povezivanje otvorenih sustava definira funkcije neophodne za povezivanje jednog računalnog sustava s drugim bez obzira na različitosti tih sustava. Taj model je 1977. godine razvila Međunarodna organizacija za normizaciju (ISO, *International Organization for Standardization*), tehnički odbor 97 (TC97, *Technical Subcommittee 97*), a 1983. model je postao ISO norma 7498. OSI referentni model predstavlja samo okvir za bolje razumijevanje procesa komuniciranja i formiranja konkretnih mrežnih protokola, jer definira slojeve mreže i funkcije koje se provode u pojedinim slojevima. Na njemu se temelje LAN, MAN i WAN mreže te je prije razmatranja bilo koje mrežne tehnologije potrebno razmotriti osnovne postavke OSI modela i njegove slojeve.

Slika 1.1. prikazuje temelj referentnog modela OSI koji uključuje izvorišni čvor i odredišni čvor (mrežni čvor A i mrežni čvor B),

kao i njihove međusobne veze. U OSI referentnom modelu komunikacijske funkcije su smještene u sedam slojeva. Na taj način se komunikacijske funkcije izoliraju jedna od druge što sustav čini otvorenim, tj. spremnim za komunikaciju s drugim sustavom, bilo da prima ili odašilje podatke. Prvi najniži sloj je fizički sloj (*Physical Layer*) koji omogućava fizičko povezivanje sa susjednim čvorom, drugi sloj je sloj podatkovne veze (*Data Link Layer*), treći sloj je mrežni sloj (*Network Layer*), četvrti sloj je transportni sloj (*Transport Layer*), peti sloj je sloj sjednice (*Session Layer*), šesti sloj je prezentacijski sloj (*Presentation Layer*), a najviši sedmi sloj je aplikacijski sloj ili sloj primjene (*Application Layer*). Spoj između pojedinih slojeva u istom čvoru naziva se sučelje. Važno je uočiti da npr. mrežni sloj čvora A komunicira s mrežnim slojem čvora B, transportni sloj čvora A komunicira s transportnim slojem čvora B, itd. što znači da se OSI referentnim modelom određuje način komunikacije između ravnopravnih ("peer") slojeva mreže. U konkretnoj izvedbi komunikacijske mreže, prema predlošku OSI referentnog modela potrebno je definirati protokole koji će omogućiti komunikaciju između istih slojeva u mreži.



Slika 1.1. Referentni model OSI

Fizički sloj omogućava prijenos signala fizičkim vezama i definira mehaničke, električke/optičke, funkcijske i proceduralne karakteristike sučelja za pristup prijenosnom mediju. Značajke

prijenosnog medija nisu dio fizičkog sloja. Fizički sloj je neovisan o vrsti signala koji se njime prenosi.

Sloj podatkovne veze omogućava komunikaciju između dva izravno povezana čvora u mreži i osigurava pouzdani prijenos informacije podjelom ulaznih podataka na okvire podataka (*data frame*) koji se šalju jedan za drugim. Ako je usluga pouzdana, primatelj potvrđuje prijam svakog okvira šaljući pošiljatelju okvir za potvrdu prijama (*acknowledgement frame*). Osnovne funkcije ovog sloja su prijenos okvira, upravljanje pogreškama i upravljanje tokom podataka. Na kraju okvira obično se definira posebno područje koje se provjerava na prijamnoj strani. Na temelju toga može se utvrditi da li je došlo do pojave pogreške u prijenosu te zatražiti ponovni prijenos okvira.

Vrste usluga koje sloj podatkovne veze pruža mrežnom sloju su:

- nespojne usluge bez potvrde prijama (*unacknowledged connectionless service*),
- nespojne usluge s potvrdom prijama (*acknowledged connectionless service*),
- spojne usluge s potvrdom prijama (*acknowledged connection-oriented service*).

Kod nespojnih usluga bez potvrde prijama izvor šalje neovisne okvire bez prethodnog uspostavljanja veze između izvora i odredišta, a odredište ne potvrđuje prijam okvira. Zbog postojanja smetnji moguć je gubitak okvira. Ova usluga rabi se za prijenos podataka u mrežama gdje je vjerojatnost pogreške bita mala (npr. LAN) te za komunikaciju u stvarnom vremenu. Za realizaciju nespojne usluge s potvrdom prijama izvor šalje neovisne okvire bez prethodnog uspostavljanja veze između izvora i odredišta, a odredište potvrđuje prijam svakog okvira. Ako izvor ne primi potvrdu prijama u zadanom vremenskom intervalu, ponovno šalje okvir. Gubitak potvrde može izazvati višestruko odašiljanje (i prijam) istog okvira. Ova vrsta usluge pogodna je za sustave s izraženim smetnjama (npr. radijske sustave). Za spojne usluge s potvrdom prijama vrijedi da se prije razmjene informacije uspostavlja izravna veza između izvora i odredišta, svaki okvir označava se brojem, a sloj podatkovne veze jamči da će svaki okvir biti primljen samo jednom te da će svi okviri biti primljeni u redoslijedu kojim su odaslani. Ovakva usluga rabi se u sustavima gdje je zahtijevana visoka pouzdanost.

Mrežni sloj osigurava višim slojevima neovisnost o tehnologijama prijenosa i komutacije podataka. Razlika u odnosu na sloj podatkovne veze je ta da sloj podatkovne veze osigurava vezu između dva izravno povezana (susjedna) čvora, ali ako se između dvaju čvorova pojavljuju međučvorovi mora se aktivirati mrežni sloj. Osnovne funkcije ovog sloja su uspostava, održavanje i

raskidanje veza, usmjeravanje jedinica podataka (npr. paketa) od izvora prema odredištu, upravljanje pogreškama, upravljanje tokom podataka te povezivanje heterogenih mreža.

Transportni sloj osigurava pouzdan i transparentan prijenos podataka između izvora i odredišta (s kraja na kraj mreže). Osnovne funkcije transportnog sloja su:

- definiranje transportnih usluga koje se nude sloju sjednice (npr. prijenos od točke do točke s ispravljanjem pogrešaka i održavanjem redoslijeda ili prijenos izoliranih poruka bez jamčenja redoslijeda pristizanja),
- upravljanje pogreškama s kraja na kraj,
- upravljanje tokovima podataka s kraja na kraj.

Transportni sloj se rabi kada se u jednom čvoru javlja potreba za uspostavljenjem višestrukih veza. Tada je sloj prijenosa odgovoran za multipleksiranje različitih veza. On mora osigurati uspostavljanje pouzdane veze između udaljenih procesa, npr. između dva programa na udaljenim računalima. Ovaj sloj je zadužen i za pouzdanost u prijenosu podataka koji moraju na odredište doći bez pogreške, u slijedu u kome su poslani i bez dupliciranja. U sloju prijenosa se razlažu veliki blokovi podataka, pristigli iz viših slojeva mreže u niže, te sastavljaju mali blokovi podataka u velike na prijamoj strani.

Sloj sjednice usklađuje sustave koji međusobno komuniciraju i omogućava korisnicima različitih sustava da međusobno uspostave sjednicu. Osnovne funkcije ovog sloja su uspostavljanje, upravljanje i raskidanje veza (sjednica) između aplikacija koje međusobno surađuju te pružanje usluga kao što su: upravljanje dijalogom između aplikacija radi određivanja čiji je red za slanje poruka, dodjela prava za komuniciranje radi onemogućavanja sudionika da istodobno pokrenu istu operaciju i sinkronizacija koja se provodi provjeravanjem dugih nizova podataka kako bi se u slučaju prekida komunikacije, komunikacija mogla nastaviti od točke prekida. Ovaj sloj proširuje funkcije transportnog sloja na funkcije koje ovise o stvarnoj izvedbi sustava, npr. operacijskom sustavu u slučaju komunikacije između računala. Sloj sjednice nadzire prometne putove, definira početak i završetak komunikacije između dva procesa te obnavlja neplanirano prekinute veze.

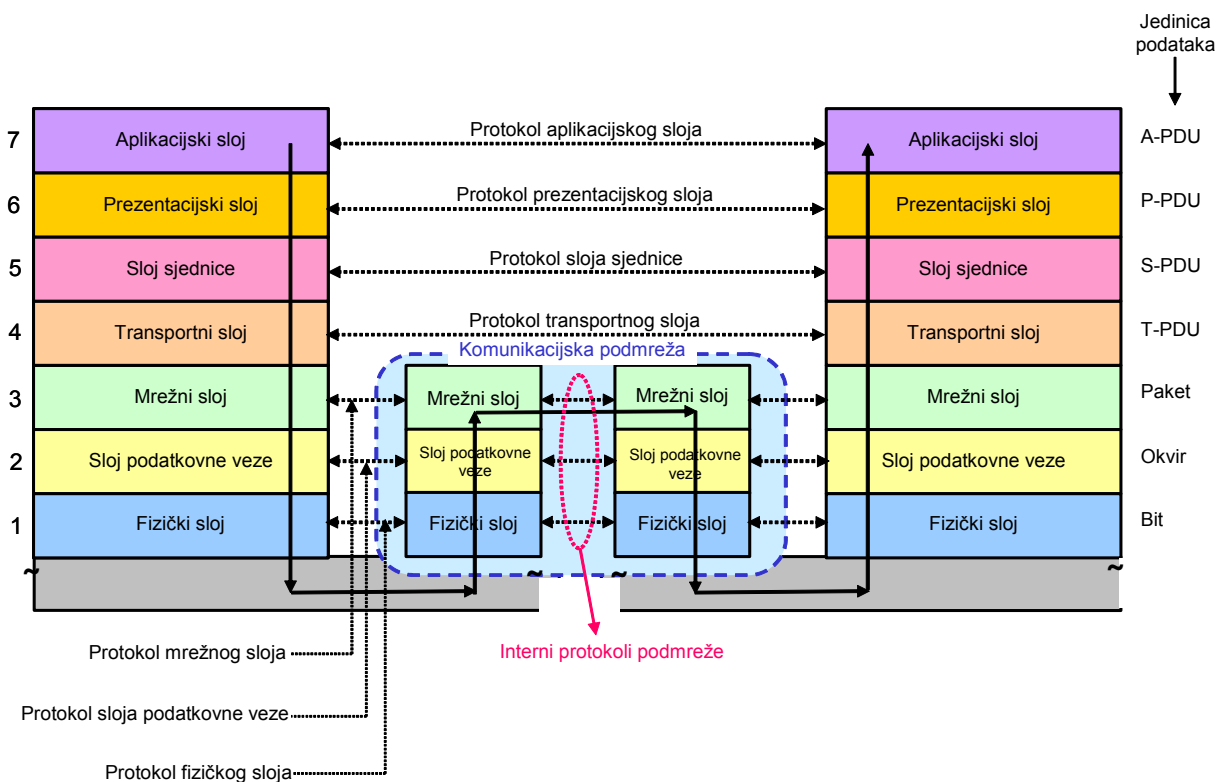
Prezentacijski sloj omogućava aplikacijskim procesima neovisnost o razlikama u načinu prikaza podataka (sintaksi). Osnovne funkcije ovog sloja su:

- obrada apstraktnih struktura podataka nastalih kodiranjem, kompresijom i šifriranjem,

- omogućavanje promjene formata podataka koji se prenose čime se stvara temelj za komunikaciju između sustava različitih svojstava.

Aplikacijski sloj definira usluge i protokole po kojima komuniciraju aplikacijski programi., omogućava korisnicima pristup okruženju OSI i stvara uvjete za realizaciju usluga.

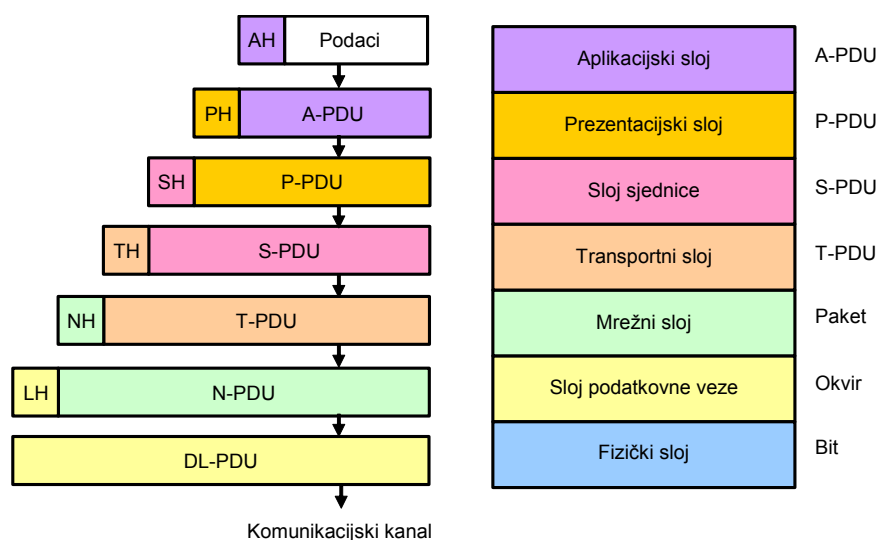
Komunikacija između dva sustava, Slika 1.2., teče tako da aplikacijski sloj jednog sustava poziva aplikacijski sloj drugog sustava koji treba primiti podatke i s njim uspostavlja ravnopravan odnos rabeći protokol sloja 7. Protokol sloja 7 zahtijeva od sloja 6 potrebne usluge tako da sloj 6 uspostavlja ravnopravan odnos (*peer-to-peer*) s drugim istim slojem uz pomoć protokola sloja 6. Protokol sloja 6 zahtijeva potrebne usluge od sloja 5, itd., sve do fizičkog sloja na kome dolazi do razmjene podataka. Protokoli slojeva 4–7 protežu se izravno između ravnopravnih slojeva jednog i drugog sustava. Na slojevima 1–3 protokoli se lančano vežu jedan na drugi, tako da veza između odgovarajućih ravnopravnih slojeva nije izravna.



Slika 1.2. Komunikacija između slojeva u referentnom modelu OSI

Podaci se stvaraju na razini aplikacije i prilikom slanja i prijama prolaze kroz cijeli protokolni složaj. U aplikacijskom sloju dodaje se aplikacijsko zaglavlje (AH, *Application Header*) te se tako

stvorena aplikacijska protokolna jedinica (A-PDU, *Application - Protocol Data Unit*) dostavlja prezentacijskom sloju. Prezentacijski sloj dodaje svoje zaglavlje (PH, *Presentation Header*) čime nastaje prezentacijska protokolna jedinica (P-PDU). Sloj sjednice dodaje svoje zaglavlje (SH, *Session Header*) čime nastaje protokolna jedinica sjednice (S-PDU), a transportni sloj dodaje svoje zaglavlje (TH, *Transport Header*) čime nastaje transportna protokolna jedinica (T-PDU). Na mrežnom sloju oblikuju se paketi (N-PDU) dodavanjem mrežnog zaglavlja (NH, *Network Header*) na T-PDU. Na sloju podatkovne veze paketi (N-PDU) smještaju se u podatkovno polje okvira podataka, dodaju se zaglavlja (LH, *Link Header*) čime nastaju okviri (DL-PDU) koji se šalju mrežom kao strukturirani slijed bita, Slika 1.3.



Slika 1.3 Oblikovanje protokolnih jedinica podataka za odašiljanje

Model OSI uspostavio je jasne granice između usluge, sučelja i protokola. Svaki sloj obavlja usluge za sloj iznad sebe, a definicija usluge odnosi se samo na ono što sloj treba obaviti (ne definira kako to obavlja). Sučelje ukazuje entitetima gornjeg sloja kako pristupiti donjem sloju, koje parametre rabiti i kakvi se rezultati mogu očekivati (ne ovisi o tome kako donji sloj radi). Protokoli određenog sloja odnose se samo na taj sloj, a sloj može rabiti bilo kakve protokole sve dok obavlja predviđene zadatke (obavlja usluge). To je općeniti model koji se može rabiti za različite skupove protokola i za opisivanje različitih mreža. Nedostatak modela OSI je to da je izuzetno složen, a protokoli se teško implementiraju i nedjelotvorni su u radu. Raspodjela funkcija slojeva je neujednačena tako da su sloj podatkovne veze i mrežni sloj jako opterećeni, a sloj sjednice i prezentacijski sloj gotovo prazni.

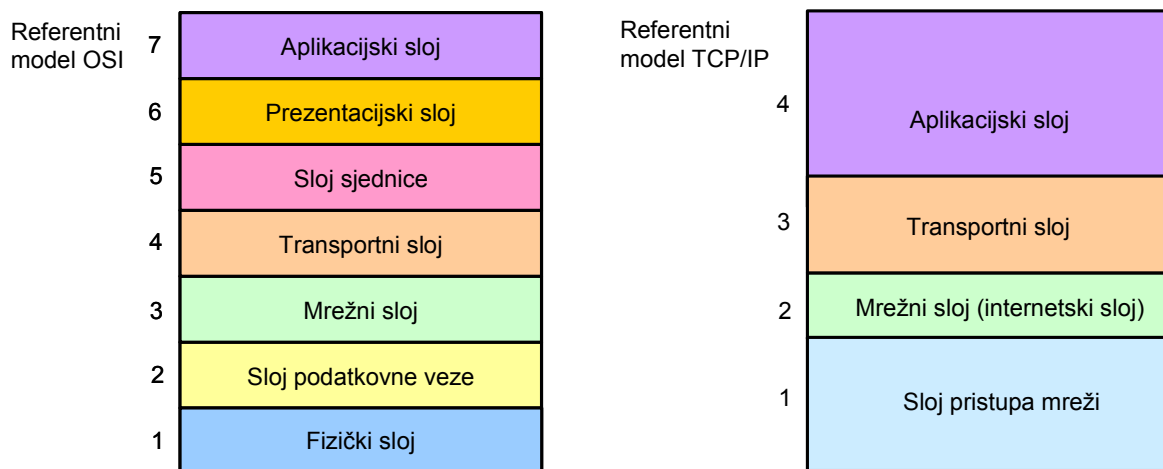
U mrežnom sloju model OSI podražava spojne i nespojne usluge, ali u transportnom sloju podržava samo spojne usluge (transportnu uslugu vide i korisnici, koji u tom slučaju nemaju izbor vrste usluge). Neke funkcije (adresiranje, upravljanje tokom podataka, upravljanje pogreškama) ponavljaju se u svakom sloju i na taj način opterećuju rad mreže. Sve to je dovelo do potrebe za razvojem novog referentnog modela koji će biti jednostavniji i koji će na djelotvorniji način opisivati funkcioniranje mreže.

1.2.2. Referentni model TCP/IP

Referentni model TCP/IP sastoji se od četiri sloja:

- sloj pristupa mreži,
- mrežni sloj,
- transportni sloj,
- aplikacijski sloj.

Oni pokrivaju iste funkcije kao i referentni model OSI, ali se raspodjela funkcija po slojevima razlikuje u odnosu na referentni model OSI. Model se odnosi se na mreže s komutacijom paketa gdje se svaki paket usmjerava zasebno (komutacija datagrama). Slojevi modela TCP/IP u odnosu na slojeve referentnog modela OSI prikazani su Slikom 1.4.



Slika 1.4. Odnos referentnih modela OSI i TCP/IP

U modelu TCP/IP sloj pristupa mreži nije posebno obrađen i može se temeljiti na bilo kojoj normi. Taj sloj uključuje funkcije fizičkog sloja i sloja podatkovne veze referentnog modela OSI. Sloj pristupa mreži omogućava razmjenu podataka između krajnjeg čvora i mreže ali pri tome protokol za povezivanje s mrežom nije definiran i mijenja se od čvora do čvora i od jedne mreže do druge.

Mrežni/internetski sloj (*Network/Internet Layer*) temelji se na internetskom protokolu (IP) i definira format paketa i adresiranje. Ovaj sloj usmjerava pakete prema odredištu ili u drugu mrežu te omogućava međusobno povezivanje mreža i podmreža (*internetworking*). Osim temeljnog protokola IP uključuje i upravljačke protokole, protokole za usmjeravanje, protokole za preslikavanje između IP adresa i fizičkih adresa sučelja.

Transportni sloj osigurava pouzdani i transparentni prijenos paketa između izvora i odredišta (s kraja na kraj mreže). U njemu su definirana dva protokola koji se spajaju od kraja do kraja: protokol za upravljanje prijenosom (TCP) i protokol za korisničke datagrame (UDP, *User Datagram Protocol*). Protokol za upravljanje prijenosom (TCP) je pouzdani protokol s uspostavljanjem izravne veze (spojna usluga) koji omogućava prijenos bez pogrešaka u nepromijenjenom redoslijedu. Početni tok podataka dijeli se na zasebne poruke i svaka se prosljeđuje mrežnom sloju. Protokol TCP na odredištu prima poruke i od njih ponovno stvara početni tok podataka. Protokol TCP upravlja tokom podataka tako da brzi pošiljatelj ne može zagušiti sporog primatelja velikim brojem poruka. Protokol za korisničke datagrame (UDP, *User Datagram Protocol*) je nepouzdan protokol bez uspostavljanja izravne veze i očuvanja redoslijeda datagrama. Namijenjen je aplikacijama koje same (umjesto protokola TCP) uređuju pakete i upravljaju tokom podataka. Rabi se za aplikacije gdje brzina isporuke i malo kašnjenje ima prednost pred točnošću (prijenos govora ili videosignala).

Aplikacijski sloj sadrži aplikacijske protokole koji pružaju uslugu korisniku uporabom korisničkih protokola i protokola sustava. Primjeri korisničkih protokola su:

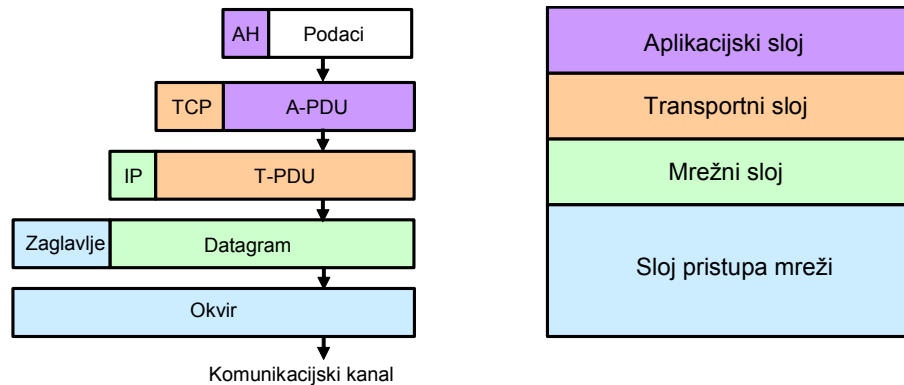
- SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) za elektroničku poštu,
- HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*) za preuzimanje stranica s WWW (*World Wide Web*).

Primjeri protokola sustava su:

- DNS (*Domain Name System*) sustav za imenovanje domena radi preslikavanja imena računala u njegovu mrežnu adresu,
- SNMP (*Simple Network Management Protocol*) za upravljanje mrežom.

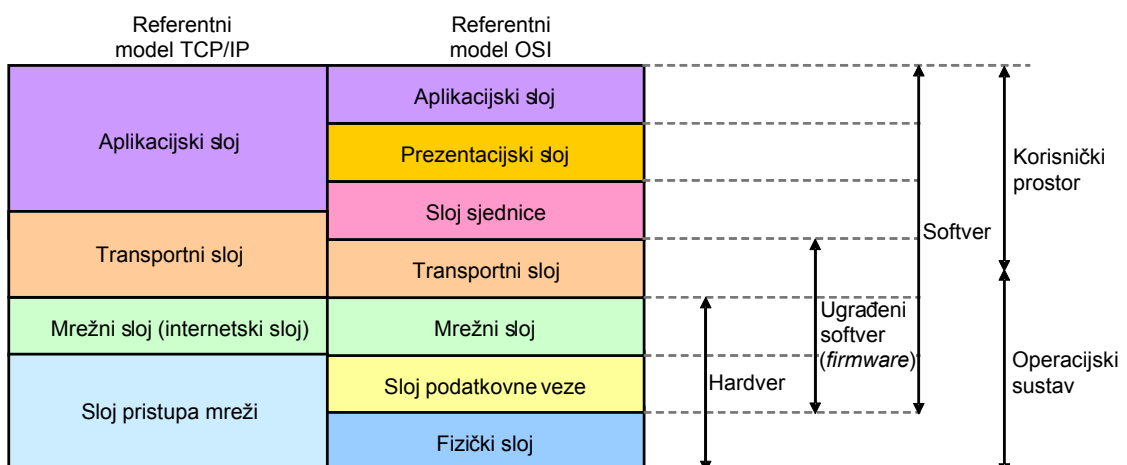
Oblikovanje protokolnih jedinica podataka obavlja se na slični način kao u referentnom modelu OSI, Slika 1.5. U aplikacijskom sloju dodaje se aplikacijsko zaglavlje (AH) čime nastaje aplikacijska protokolna jedinica (A-PDU), koja se dostavlja transportnom sloju. Transportni sloj dodaje svoje zaglavlje (npr. zaglavlje protokola TCP) i time nastaje transportna protokolna jedinica (T-PDU). Na mrežnom sloju dodaje se zaglavlje protokola IP te nastaje IP datagram. Na sloju pristupa mreži datagram se

smješta u podatkovno polje okvira podataka sloja pristupa mreži, dodaje se zaglavlje (LH, *Link Header*) čime nastaju okviri koji se prenose mrežom.



Slika 1.5. Oblikovanje protokolnih jedinica podataka protokola TCP/IP

Odnos referentnih modela TCP/IP i OSI s označenim načinom implementacije pojedinih slojeva prikazan je Slikom 1.6. Sloj pristupa mreži i mrežni sloj u modelu TCP/IP te fizički sloj, sloj podatkovne veze i mrežni sloj modela OSI implementirani su uz pomoć odgovarajuće sklopovske podrške (hardvera). Ugrađeni softver (*firmware*) rabi se u modelu OSI iznad fizičkog sloja do transportnog sloja, a u modelu TCP/IP u mrežnom sloju te djelomično u sloju pristupa mreži i transportnom sloju. U svim slojevima osim fizičkog sloja za implementaciju određenih funkcija rabi se softver.



Slika 1.6. Implementacija slojeva u referentnim modelima TCP/IP i OSI

Prednosti modela TCP/IP u odnosu na model su jednostavnost i bolja prilagođenost izvedbama stvarnih mreža. Protokoli TCP i IP su pažljivo projektirani i izvrsno prilagođeni samom referentnom modelu. U transportnom sloju model TCP/IP podržava spojne i nespojne usluge nudeći korisnicima izbor vrste usluge. Nedostatak modela TCP/IP je u tome što model nije povukao jasnu granicu između usluge, sučelja i protokola pa su otežane promjene unutar mreže, do kojih dolazi napretkom tehnologije. Model je nastao je nakon pojave odgovarajućih protokola, tako da uklapanje modela u drugi skup protokola nije izvedivo. Loša strana modela TCP/IP je i u tome što sloj pristupa mreži nije dovoljno precizno definiran, a fizički sloj i sloj podatkovne veze nisu dio modela što model čini nepotpunim. Zaključno se može reći da se model OSI bez sloja sjednice i prezentacijskog sloja pokazao izuzetno korisnim u razmatranju komunikacijskih mreža. Nasuprot tome slojevi modela TCP/IP se gotovo uopće ne rabe, ali su zato njegovi protokoli u širokoj uporabi.

1.3. Kratki pregled radijskih tehnologija za nepokretni i nomadski pristup

Radijski pristupni sustavi (WAS, *Wireless Access System*) su radijski sustavi koji se mogu rabiti izvan ili unutar građevina na zemljopisno ograničenim područjima. Pod pojmom radijski pristup (WA, *Wireless Access*) smatra se radijsko povezivanje krajnjeg korisnika na jezgru mreže pri čemu jezgra mreže može biti javna telefonska mreža (PSTN, *Public Switched Telephone Network*), digitalna mreža integriranih usluga (ISDN, *Integrated Services Digital Network*), Internet, radijska lokalna mreža (WLAN), radijska gradska mreža (WMAN), mreža kabela televizije (CATV) i druge vrste mreža. Širokopojasni radijski pristup (BWA, *Broadband Wireless Access*) je radijski pristup koji omogućava brzine prijenosa veće od primarne brzine prijenosa (2,048 Mbit/s). Tehnologije koje omogućavaju radijski pristup se u odnosu na mobilnost korisnika dijele na tri temeljne skupine:

- nepokretni ili fiksni radijski pristup (FWA, *Fixed Wireless Access*),
- nomadski radijski pristup (NWA, *Nomadic Wireless Access*),
- mobilni radijski pristup (MWA, *Mobile Wireless Access*).

U fiksnom radijskom pristupu su lokacije krajnjeg korisnika i mrežne pristupne točke (ili bazne postaje), na koju se povezuje korisnik, fiksne. U slučaju nomadskog radijskog pristupa korisnik može biti na različitim lokacijama, ali kada se poveže na mrežu njegova lokacija treba stacionarna ili se može mijenjati na ograničenom području, čija veličina je određena pokrivanjem mrežne pristupne točke ili bazne postaje. To područje naziva se

ćelija. Ako korisnik mijenja svoj položaj na način da prijeđe u susjednu ćeliju, komunikacija može biti prekinuta i tada korisnik mora ponovno uspostaviti komunikaciju s novom mrežnom pristupnom točkom ili baznom postajom. Da bi se proveo za korisnika neprimjetni prijelaz iz jedne ćelije u drugu potrebno je u sustavu implementirati podršku za prekapčanje (*handover*) veze na granici dviju ćelija. U mobilnom radijskom pristupu korisnik se može slobodno kretati unutar sustava bez prekida komunikacije. Primjeri mobilnih komunikacijskih sustava su globalni sustav mobilnih komunikacija (GSM, *Global System for Mobile Communications*) i sveobuhvatni sustav mobilnih telekomunikacija (UMTS, *Universal Mobile Telecommunication System*). U ovim sustavima komunikacija neće biti prekinuta kada korisnički mobilni uređaj prelazi iz jedne ćelije u drugu, jer je za korisnika neprimjetan prijelaz iz jedne ćelije u drugu omogućen izvedbom sustava. Iz ovoga razmatranja nameće se zaključak da su mogućnost prekapčanja veze na velikim područjima (na regionalnoj ili državnoj razini) i brzina kretanja korisnika temeljni kriteriji za razlikovanje nomadskih i mobilnih sustava.

Postojeće tehnologije za WLAN i WMAN mreže omogućavaju fiksni i nomadski radijski pristup. U takvim mrežama mobilnost korisnika je ograničena. Korisnik se radijskim putem povezuje na mrežu putem prijenosnog korisničkog uređaja bez obzira na to da li je u svom domu, na poslu ili izvan svog doma ili radnog mjesta (hoteli, konferencijska središta, željezničke postaje, aerodromi, bolnice i sl.) što znači da korisnik bilo gdje i bilo kada ima pristup mreži, ali kada pristupi mreži više ne može mijenjati svoju lokaciju (ili je može mijenjati u malom rasponu udaljenosti) ako želi imati neprekinutu komunikaciju. Nedavno su se pojavile inačice WMAN koje omogućuju mobilnost i koje su time stekle osobine mreža vrste WWAN.

1.3.1. WLAN tehnologije

Radijske lokalne mreže su vrsta lokalnih mreža koje za prijenos informacije između mrežnih čvorova rabe elektromagnetske valove u radijskom ili infracrvenom frekvencijskom području. Osnovna namjena radijskih LAN mreža je omogućavanje pristupa mreži mobilnim korisnicima s prijenosnim računalima na određenome ograničenom području. Pored toga namjena radijskih lokalnih mreža može biti proširenje fiksne lokalne mreže na područjima gdje je izgradnja fiksne LAN mreže nedopuštena ili neisplativa te međusobno povezivanje fiksnih LAN mreža na različitim lokacijama (npr. povezivanje dvije LAN mreže u različitim objektima).

WLAN mreže kombiniraju radijski (bežični) pristup mreži i mobilno računarstvo, omogućavajući prijenos podataka visokim brzinama, najčešće u nelicenciranim frekvencijskim područjima

radijskog spektra namijenjenih industriji, znanosti i medicini (ISM, *Industrial, Scientific and Medical Applications*).

Na povećanje broja korisnika WLAN mreža djelovalo je i snižavanje cijena uređaja i opreme potrebne za radijski pristup mreži te sve veća dostupnost prijenosnih računala, kojima snaga i kvaliteta rastu, a cijene padaju. Radijske lokalne mreže podržavaju multimedijски prijenos, jer pored prijenosa podataka, omogućavaju prijenos govora i videosignala. Atraktivnost WLAN mreža raste i zbog toga što se one mogu rabiti kao pristupne mreže u fiksnoj i mobilnoj javnoj telekomunikacijskoj mreži, postajući dio globalne informacijske infrastrukture.

Prva komercijalna oprema za WLAN mreže pojavila se na tržištu 1990. godine iako je konceptijski WLAN bio poznat nekoliko godina prije. Veliki utjecaj na razvoj i primjenu WLAN sustava imao je proces normizacije proveden u okviru IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) odbora IEEE 802. Odbor IEEE 802 utemeljen je u veljači 1980. godine radi definiranja normi za LAN i MAN. Norme IEEE 802 odnose se na mreže u kojima se prenose okviri promjenjive veličine, a usluge i protokoli sadržani u normama IEEE 802 zauzimaju prva dva sloja ISO /OSI modela: fizički sloj i sloj podatkovne veze. U mrežama, normiranim u okviru IEEE 802, podaci se prenose adresiranim okvirima po jednom prijenosnom mediju. Više mrežnih postaja ne može istodobno komunicirati putem mreže te je u sloju podatkovne veze potrebno rabiti postupke upravljanja pristupom prijenosnom mediju radi rješavanja problema koji se pojavljuju kada dvije ili više mrežnih postaja trebaju odašiljati podatke u isto vrijeme. Sloj podatkovne veze podijeljen je na dva podsloja, Slika 1.7.:

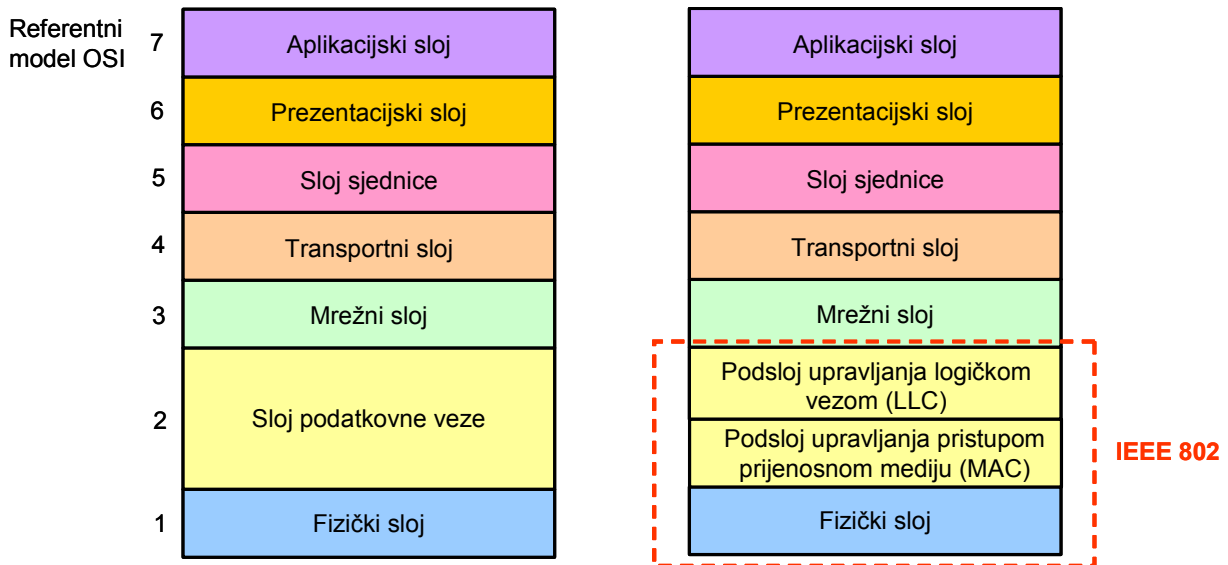
- podsloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju (MAC, *Medium Access Control*), koji provodi dodjelu prijenosnog medija mrežnoj postaji radi odašiljanja podataka,
- podsloj za upravljanje logičkom vezom (LLC, *Logical Link Control*), koji omogućava razmjenu jedinica podataka između dvije mrežne postaje.

LLC podsloj je zajednički za sve vrste IEEE 802 mreža, dok MAC podsloj ovisi o vrsti prijenosnog medija i tehnici prijenosa na fizičkom sloju.

1990. godine IEEE je započeo rad na normizaciji WLAN sustava, a rezultat je bio usvajanje IEEE 802.11 norme 1997. godine, koja je obuhvaćala tri različite međusobno nekompatibilne tehnologije. Predviđena je uporaba pet vrsta fizičkog sloja, a svaka vrsta fizičkog sloja popraćena je vlastitim MAC podslojem.

Norme IEEE 802 definiraju samo tehnologiju i ne brinu o kompatibilnosti i interoperabilnosti uređaja i opreme. Stoga je 1999. godine utemeljena tzv. WiFi (*Wireless Fidelity*)

međunarodna udruga proizvođača WLAN uređaja sa zadatkom ispitivanja mogućnosti zajedničkog rada WLAN uređaja različitih proizvođača temeljenih na 802.11 normama. U početku se oznaka WiFi odnosila samo na IEEE 802.11b normu (vidi odjeljak 2.2.3), ali kasnije se termin proširio na bilo koju vrstu IEEE 802.11 mreže. WiFi uređaji za određeno frekvencijsko područje imaju mogućnost zajedničkog rada s drugim WiFi uređajima u istom frekvencijskom području, čak i ako se radi o opremi različitih proizvođača, što je imalo veliki utjecaj na porast prodaje WLAN uređaja i izgradnje WLAN mreža.



Slika 1.7. Norme IEEE 802 u odnosu na referentni model OSI

U Europi su za implementaciju WLAN sustava razvijene norme pod nazivom Lokalne radijske mreže visokih performansi (*High Performance Radio Local Area Network*), tzv. HIPERLAN/1 i HIPERLAN/2 norme, vidi odjeljak 2.2.7.

1.3.2. WMAN tehnologije

Fiksni radijski pristup u WMAN sustavima može biti omogućen uporabom tehnologija koje se temelje na četiri skupine arhitektura mreže:

- mreže vrste "od točke do točke" (P2P, *point-to-point*),
- mreže vrste "od točke do više točaka" (P2MP, *point-to-multipoint*),
- ćelijske (*cell*) mreže,
- mreže vrste "od više točaka do više točaka" (*mesh*), (MP2MP, *multipoint-to-multipoint*).

P2P mreže imaju najjednostavniju arhitekturu u kojoj se pojedina fiksna točka radijski izravno povezuje s drugom fiksnom točkom uporabom usmjerenih antena, pri čemu između dviju točaka koje se povezuju treba postojati optička vidljivost (LOS, *Line-of-Sight*) ili približna optička vidljivost (NLOS, *Near Line-of-Sight*). U P2MP mrežama više krajnjih fiksnih točaka povezuje se na jedan mrežni čvor koji se naziva bazna postaja. P2MP mreže najčešće su korištena tehnologija za realizaciju WMAN mreža. Ovakve sustave često rabe davatelji usluga pristupa Internetu za povezivanje velikog broja krajnjih korisnika na Internet putem jednog mrežnog čvora, pri čemu krajnji korisnik može biti pojedinac, poduzeće ili telekomunikacijski sustav. Povezivanjem više P2MP sustava na istu okosnicu nastaje ćelijska mreža. MP2MP arhitektura mreže je arhitektura u kojoj se svaki mrežni čvor može povezati s bilo kojim drugim mrežnim čvorom u području pokrivanja mreže.

WMAN sustavi vrste P2MP, koji se temelje na zemaljskome radijskom pristupu (*terrestrial wireless access*), rade u frekvencijskom području između 3 GHz i 29,5 GHz u frekvencijskim pojasevima namijenjenima nepokretnoj radiokomunikacijskoj službi.

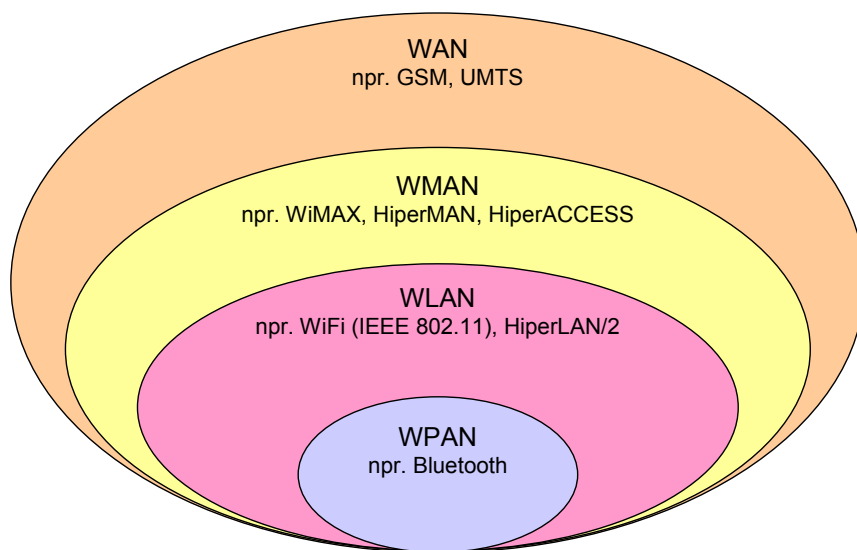
U prethodnom desetljeću normizacijska tijela u Europi i SAD započela su rad na P2MP radijskim sustavima koji će omogućiti širokopojasne interaktivne usluge korisnicima u mrežama gradskih područja (MAN). Ove mreže se mogu smatrati proširenjem i prilagodbom WLAN tehnologija kako bi se omogućila zemljopisno veća područja pokrivanja i veće brzine prijenosa. Norme na radijske MAN mreže razvijaju se u okviru IEEE radne skupine 802.16 i ETSI/BRAN projekta.

U travnju 2001. godine utemeljena je međunarodna udruga proizvođača 802.16 uređaja, tzv. WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum*), koja danas ima preko stotinu članova. Cilj djelovanja ove udruge je ispitivanje kompatibilnosti i omogućavanje zajedničkog rada uređaja različitih proizvođača koji rade u skladu s IEEE 802.16 normama. Iz više predviđenih načina rada u pojedinoj IEEE 802.16 normi, WiMAX definira jedan način rada, koji proizvođači uređaja smatraju optimalnim. Nakon toga provodi se ispitivanje mogućnosti zajedničkog rada 802.16 uređaja različitih proizvođača za određeno frekvencijsko područje. Ako pojedini uređaj na zadovoljavajući način prođe takva ispitivanja, dobiva oznaku "WiMAX", koja znači da određeni uređaj ima mogućnost zajedničkog rada s drugim WiMAX uređajima u određenome frekvencijskom području. WiMAX trenutno definira dva različita profila sustava: jedan koji se temelji na normi IEEE 802.16-2004 i naziva se profilom za fiksne sustave i drugi koji se temelji na normi IEEE 802.16e i naziva se profilom za mobilne sustave.

U okviru ETSI/BRAN projekta se, pored HIPERLAN normi, razvijaju još tri norme:

- HIPERACCESS (*High Performance Radio Access*),
- HIPERMAN (*High Performance Radio Metropolitan Area Networks*),
- HIPERLINK – norma koja će biti namijenjena za P2P prijenos na kraće udaljenosti (do 150 m) visokim brzinama (do 155 Mbit/s) u frekvencijskom području 17 GHz radi povezivanja HIPERMAN i HIPERACCESS sustava.

Odnos vrsta mreža i radijskih mrežnih tehnologija prikazan je na Slici 1.8.



Slika 1.8. Vrste mreža i radijske pristupne tehnologije

Karakteristike WiMAX tehnologije su:

- mogućnost postizanja vrlo visokih brzina prijenosa do 75 Mbit/s,
- podesivost širine pojasa i brzine prijenosa kojom se omogućava prilagodba brzine prijenosa raspoloživoj širini kanala,
- primjena prilagodljivih modulacijskih postupaka i naprednih tehnika zaštite od pogrešaka u prijenosu kojima se, na temelju uvjeta u kanalu i korisničkih zahtjeva, omogućava prilagodba parametara modulacije i zaštitnog kodiranja,
- pouzdanost prijenosa koja se postiže podržavanjem automatskog zahtjeva za ponovnim prijenosom (ARQ, *Automatic Retransmission Request* – realizira se na način da prijamna strana mora potvrditi prijam svakog paketa, a ako

odašiljačka strana ne primi potvrdu prijama, ponovno odašilje isti paket),

- fleksibilnost u upravljanju kvalitetom usluge u odnosu na vrstu usluge i zahtjeve pojedinog korisnika,
- sigurna komunikacija i zaštita korisničkih podataka,
- referentna mrežna arhitektura temeljena na IP platformi,
- uporaba najnovijih tehnoloških rješenja (prilagodljivi modulacijski postupci, napredne pristupne tehnologije, inteligentne antene i sl.).

2. Radijske lokalne mreže

2.1. Temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WLAN

2.1.1. Osnovne namjene radijskih lokalnih mreža

Lokalne mreže (LAN, *Local Area Network*) su mreže računala koje pokrivaju relativno malo zemljopisno područje, a služe za međusobno povezivanje radnih postaja, osobnih računala, printera, poslužitelja, telefona, periferne opreme, osjetila i drugih sličnih uređaja na određenoj lokaciji. To su mreže računala u uredima, poslovnim zgradama i industrijskim postrojenjima gdje se povezuju računala smještena u jednoj zgradi ili više susjednih zgrada. U LAN mrežama se kao prijenosni medij rabe tanki i debeli koaksijalni kabeli, upletene parice (*twisted pair*) ili optički kabeli. Različite vrste prijenosnog medija unose različito gušenje signala tako da je vrsta prijenosnog medija, uz brzinu prijenosa signala, jedan od temeljnih parametara koji određuje maksimalnu veličinu mreže.

Radijske lokalne mreže (WLAN, *Wireless Local Area Network* ili RLAN, *Radio Local Area Network*) su vrsta lokalnih mreža koje ostvaruju radijski prijenos informacije između mrežnih čvorova.

Prednosti radijske lokalne mreže u odnosu na fiksne lokalne mreže su u mobilnosti korisnika mreže, brzjoj i jednostavnoj instalaciji, fleksibilnosti i ekonomičnosti u izvedbi mreže.

U radijskim lokalnim mrežama korisnici mreže mogu pristupiti željenim informacijama bez obzira na to gdje se nalaze u mreži. Instaliranje WLAN mreža je pojednostavljeno u odnosu na fiksne LAN mreže jer nema potrebe za povlačenjem kabela kroz zidove i stropove, a pristup mreži je omogućen i na mjestima gdje povlačenje kabela nije moguće ili nije dopušteno (npr. u građevinama koje su spomenici kulture) tako da ni pristup fiksnoj LAN mreži ne bi bio moguć.



Slika 2.1. Načela povezivanja računalnih uređaja pomoću WLAN-a

Iako je početna investicija u izgradnju WLAN mreže viša nego početna investicija u izgradnju fiksne LAN mreže, ako se razmotre i cjelokupni troškovi održavanja mreže tijekom njenog životnog ciklusa, WLAN mreže se pokazuju ekonomski isplativije, jer im je lakše mijenjati konfiguraciju i priključiti nove korisnike.

Radijske LAN mreže mogu imati različite topologije i na taj način se mogu prilagoditi posebnim primjenama i potrebama korisnika. Konfiguracija mreže se može jednostavno mijenjati u rasponu od neovisne mreže za mali broj korisnika do infrastrukturne mreže s tisućama korisnika koji se mogu kretati u širokom području pokrivanja mreže.

2.1.2. Frekvencijska područja rada WLAN-a

U Republici Hrvatskoj je za rad WLAN mreža predviđeno ISM frekvencijsko područje oko 2,4 GHz. U nekim zemljama, uglavnom izvan Europe, koristi se i ISM frekvencijsko područje oko 5,8 GHz. U nastavku su precizni podaci o granicama tih frekvencijskih područja.

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 nekim zemljama korištenje za WLAN nije dopušteno).

U SAD postoje još dva nelicencirana pojasa u području 5 GHz, koja nose oznaku U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) i to su:

- 5,150 – 5,350 GHz i
- 5,725 – 5,825 GHz.

Za ISM frekvencijsko područje nije potrebno ishoditi posebne dozvole za rad niti plaćati naknade za uporabu frekvencije, ali je strogo ograničena najviša dopustiva efektivne izračena snaga uređaja.

Tablica 2.1. Dopuštene snage u WLAN sustavu u području 2400 – 2483,5 MHz

Maksimalna izlazna snaga	Lokacija	Dokument
1000 mW	SAD	FCC 15.247
100 mW (EIRP)	Europa	ETS 300-328
100 mW (EIRP)	Hrvatska	ETS 300-328

(EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*)

ISM frekvencijsko područje je područje u kojem bez posebne dozvole djeluju i drugi korisnici kao: radioamateri, neke industrijske aplikacije (npr. mikrovalne pećnice) ili pak srodni komunikacijski radijski sustavi, tako da je razina smetnji u ISM području vrlo visoka. WLAN sustavi koji rade u ISM području djeluju u izrazito nepovoljnoj okolini. Stoga noviji WLAN sustavi rabe i licencirane frekvencijske pojaseve za koje je potrebno pribaviti dozvolu, ali u kojima su smetnje daleko niže, tako da je pouzdanost i kvaliteta rada sustava poboljšana.

Licencirana se frekvencijska područja za WLAN nalaze nešto iznad 5 GHz i iznad 17 GHz ili točnije to su pojasevi:

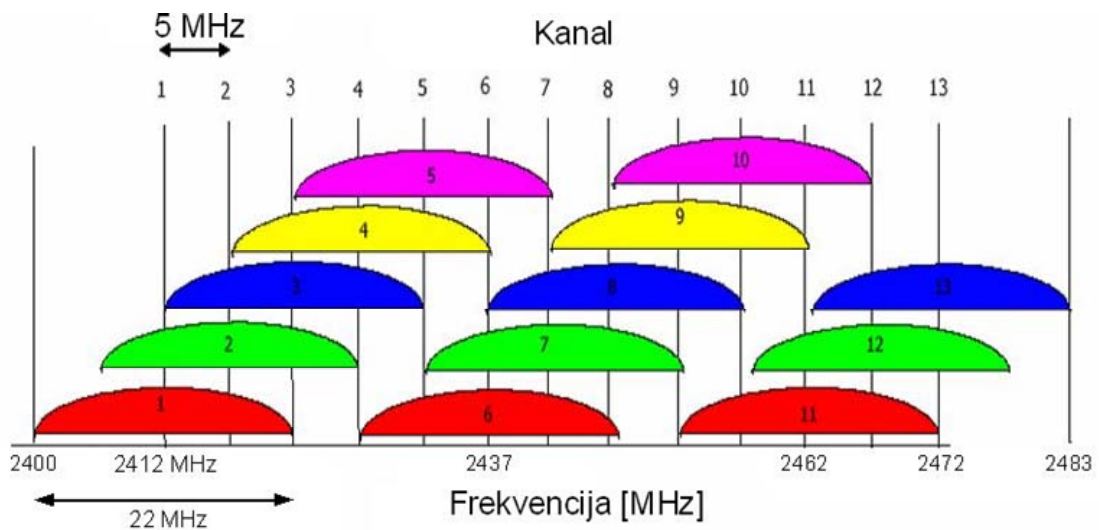
- 5150 – 5350 MHz,
- 5470 – 5725 MHz,
- 17,1 – 17,3 GHz.

Neke zemlje, npr. Republika Slovenija, dopuštaju rad WLAN-a u naznačenim područjima oko 5 GHz bez obveze za prethodno pribavljanje dozvole za radijsku postaju. Ta se područja za potrebe WLAN-a tretiraju kao nelicencirana područja.

Tablica 2.2. Dopuštene snage u WLAN sustavu u licenciranim područjima frekvencija

Frekvencije	Snaga	ERC odluka	Primjedbe
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		

Upravo je to što većina radijskih lokalnih mreža rabi frekvencijske pojaseve za koje ne treba plaćati naknadu za uporabu frekvencije, imalo utjecaj na njihov ubrzani razvoj.



Slika 2.2. Raspored kanala u ISM pojasu na 2,4 GHz

ISM pojas na 2,4 GHz je širine 83,5 MHz i on je u Europi podijeljen na 13 preklapajućih kanala širine 22 MHz (drugdje 11 kanala). Radi izbjegavanja mogućih smetnji u jednom se prostoru može istodobno koristiti najviše 3 kanala (kanali rednog broja: 1; 7 i 13). To su jedini kanali koji se ne preklapaju. Kako svaka mreža na nekom prostoru koristi jedan kanal (frekvenciju) to znači da je moguće postavljanje do najviše tri mreže na nekom prostoru u nelicenciranom području od 2,4 GHz. Europska regulativa definira primjenu tri skupine kanala prema Tablici 2.3. Samo kod kanala iz prve skupine nema međusobnog prekrivanja među kanalima.

Tablica 2.3. Radni kanali koji se koriste u Europi

Skup	Broj kanala	Kanali br.
1	3	1, 7, 13
2	4	1, 5, 9, 13
3	7	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13

Rad u frekvencijskom području 2400–2483,5 MHz pobliže je opisan u CEPT/ERC odluci ERC/DEC/(01)07 pod naslovom: ERC odluka od 12. ožujka 2001. o harmoniziranim frekvencijama, tehničkim značajkama i o izuzeću od individualne dozvole za uređaje kratkog doseg za RLAN mreže koji rade u frekvencijskom pojasu 2400–2483,5 MHz (*ERC Decision of 12 March 2001 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Short Range Devices used for Radio Local Area Networks (RLANs) operating in the frequency band 2400 – 2483.5 MHz*).

Rad u frekvencijskim područjima 5150 MHz – 5350 MHz i 5470 MHz – 5725 MHz pobliže je opisan u CEPT/ERC odluci ERC/DEC/(99)23 pod naslovom: ERC odluka od 29. studenog 1999. o harmoniziranim frekvencijskim pojasevima namijenjenim za uvođenje HIPERLAN mreža (*ERC Decision of 29 November 1999 on the harmonised frequency bands to be designated for the introduction of High Performance Radio Local Area Networks (HIPERLANs)*). Za rad u navedenim frekvencijskim područjima plaća se naknada za dodjelu i uporabu radijskih frekvencija.

U frekvencijskom području od 5150 MHz do 5350 MHz, prva nazivna frekvencija nositelja je 5180 MHz, a zadnja je 5320 MHz. U frekvencijskom području od 5470 MHz do 5725 MHz, prva nazivna frekvencija nositelja je 5500 MHz, a zadnja je 5700 MHz. Kanali su smješteni u rasteru 20 MHz, što znači da su uzastopne nazivne frekvencije nositelja smještene na udaljenostima 20 MHz. Nazivna frekvencija je ona frekvencija oko koje je koncentrirana izračena snaga. Prema tome, u licenciranim područjima za WLAN na 5 GHz postoji 8 nepreklapajućih kanala u frekvencijskom području od 5150 MHz do 5350 MHz i 11 nepreklapajućih kanala u frekvencijskom području od 5470 MHz do 5725 MHz.

2.1.3. Usluge u mreži

Za pružatelje usluga jedna od važnih stavki je procjena prirode širokopojsnih usluga i način ponude istih korisnicima. Isto tako, pružatelj usluge mora podržati različite razine usluge u slučaju nepredviđenih promjena nekih od karakteristika prijenosnog sustava (npr. pojas prijenosa).

Nove generacije širokopojsnih radijskih pristupnih sustava (BWA, *Broadband Wireless Access*), u odnosu na ranije sustave, osiguravaju pružateljima usluga mnoge pogodnosti, kao na primjer: IP (*Internet Protocol*) spojivost uz velike prijenosne brzine, nema zahtijeva za izravnom optičkom vidljivošću između odašiljačke i prijamne strane, dopuštaju nomadsko umrežavanje, jednostavnost postavljanja opreme i niska cijena opreme na korisničkoj strani, itd.

Prijenos govora protokolom IP (VoIP, Voice over IP)

Obzirom da je većina WLAN sustava primarno namijenjena prijenosu širokopojsnih usluga, to ideja prijenosa govora koristeći protokol IP (VoIP) izgleda prilično jednostavna. Pored toga, prijenos govora radijskim vezama uvodi nekoliko problema praktične prirode koji se odnose na kašnjenje (*delay*) i varijaciju kašnjenja (*delay jitter*). Jednostavna arhitektura protokola VoIP na podatkovno orijentiranim radijskim IP vezama rezultira neekonomičnošću sustava. Prvo, govor je loše kvalitete, što rezultira složenošću definiranja cijene usluge. Drugo, obzirom da sustav mora biti preopterećen kako bi postigao zadovoljavajuću kvalitetu usluge, cijena usluge bit će jako visoka. Iz svega navedenog može se zaključiti da podrška kvaliteti usluge govornog prometa u WLAN sustavima mora biti podržana na svakom segmentu prijenosnog sustava, kao i na svakom sloju komunikacijskog protokolnog složaja.

Ključni izazov kod podrške kvalitete usluge za govorni promet je održavanje kašnjenja s kraja na kraj komunikacije unutar prihvatljivih granica (200 ms), uzimajući pri tome kašnjenje koje nastaje u koderima, paketizacijsko kašnjenje, kašnjenje u repu čekanja na posluživanje, modemsko kašnjenje, vremensko čekanje radio okvira, vrijeme prijenosa, kašnjenje uslijed usmjeravanja u IP usmjerivačima, varijaciju kašnjenja na prijamnoj strani, kao i kašnjenje u javnoj telefonskoj mreži. Jedan od razloga složenosti podrške kvaliteti usluge govornog prometa preko IP temeljenih WLAN sustava leži u činjenici da komponente koje tvore takvu mrežu imaju različite karakteristike u odnosu na komponente koje se nalaze u klasičnoj (žičnoj) IP mreži. Radijska veza ima jako veliki iznos vjerojatnosti pogreške bita (BER, *Bit Error Ratio*) i unosi kašnjenje u prijenosu koje je puno veće u odnosu na žične veze.

Ograničenje kašnjenja s kraja na kraj veze na prihvatljivu vrijednost zahtijeva provedbu optimizacijskih metoda na svakom sloju komunikacijskog složaja. Na fizičkom sloju potrebno je koristiti odvojene kanale za govorni promet i također mora se osigurati podrška podatkovnim kanalima za razaslanje (BDC, *Broadcast Data Channels*). Odvojeni govorni kanali osiguravaju manje kašnjenje s kraja na kraj veze i lakšu provedbu zahtijevane kvalitete usluge. Međutim, sustav, koji jedino podržava govorni promet, sigurno ne podržava najbolje prijenos podatkovnog IP prometa. To slijedi iz činjenice što govorni kanali nemaju dostatan kapacitet koji bi jamčio prijenos širokopojsnih podatkovnih usluga. S druge strane, sustavi koji koriste jedino BDC kanale ne podržavaju najbolje prijenos govora, jer isti funkcioniraju na principu natjecanja unoseći pri tome dodatno kašnjenje.

Hibridni pristup, tj. podrška odvojenim govornim kanalima i BDC kanalima, najbolje je rješenje. Dolazni smjer komunikacije (od bazne postaje prema korisnicima) za slučaj hibridnog rješenja zahtijeva: veliki broj pristupnih modemskih uređaja u baznoj postaji u cilju podrške dodatnim kanalima; sustav upravljanja radijskim resursima (RRM, *Radio Resource Management*). RRM sustav osigurava postavljanje i raskidanje govornih kanala, kao i dinamičko povećanje broja BDC kanala u cilju osiguravanja dodatnog kapaciteta za podatkovni promet.

Na sloju IP od velike je važnosti korištenje neke od politika upravljanja repom čekanja. Politika WFQ (*Weighted Fair Queueing*) prihvatljivo je rješenje za podatkovne pakete, ali nije dobro za govorne. Govorni paketi trebali bi imati prioritet nad podatkovnim paketima. Ovakav pristup zahtijeva razdvajanje govornog od podatkovnog prometa na sloju IP.

Prijenos podataka

Prijenos podatkovnog prometa u silaznom smjeru (od pristupne točke prema korisnicima) odvija se kroz prethodno navedene BDC kanale, dok je u uzlaznom smjeru (od korisnika prema baznoj postaji) pristup kanalima moguć koristeći pristupnu metodu multipleksiranja po vremenu (TDMA, *Time Division Multiple Access*).

Pristup Internetu

Pristup Internetu pomakao se od nekadašnjih sporih modemskih tehnologija (*dial-up*) prema brzim širokopojsnim tehnologijama. Pored toga što ova usluga postavlja najskromnije zahtjeve na mrežne resurse ona je ujedno i najjednostavnija za implementaciju.

U Tablici 2.4. pregledno su dane različite vrste usluga kao i obilježja.

Tablica 2.4. Lista mogućih usluga i njihovih obilježja

Usluge	Pouzdanost	Kašnjenje	Promjena kašnjenja	Pojas prijenosa
Telefonija	Mala	Veliko	Velika	Mali
Web Internet	Velika	Srednje	Mala	Srednji
Elektronička pošta	Velika	Malo	Mala	Mali
Prijenos datoteka	Velika	Malo	Malo	Srednji
Udaljeni rad	Velika	Srednje	Srednja	Mali
Video konferencija	Mala	Veliko	Velika	Veliki
Video na zahtjev	Mala	Malo	Velika	Veliki

Specifikacija i upravljanje kvalitetom usluge (QoS, *Quality of Service*) od velikog je značaja za radijske mreže, posebno za one koje podržavaju multimedijske aplikacije. Kvaliteta usluge očituje se u sposobnosti aplikacije da dobije zahtijevanu kvalitetu usluge, od mreže, u cilju uspješnog rada. Jedna od ključnih razlika između radijskih i žičnih sustava je u tome što radijski sustavi moraju biti u stanju prilagoditi se promjenama kvalitete usluge nastalim uslijed promjena u radijskom mediju.

U Tablici 2.5. predočeni su glavni QoS parametri usmjereni na tehnologiju.

Općenito gledano, kašnjenje, varijacija kašnjenja, propusnost (prijenosna brzina) i BER su osnovni QoS parametri.

Prijenos u WLAN sustavima odvija se u slobodnom prostoru tako da je širokopojasni prijenosni signal podvrgnut različitim utjecajima. Mehanizmi pristupa mediju na podsloju kontrole pristupa mediju (MAC, *Medium Access Control*) u takvim mrežama moraju osigurati razlučivost kvalitete usluge u cilju zadovoljenja različitih potreba nastalih od različitih aplikacija. Na

primjer, govorni i video promet zahtijevaju malo kašnjenje, pri tome dopuštajući postojanje neke vjerojatnosti pogreške u prijenosu. Suprotno tome, izvorne podatkovne aplikacije ne dopuštaju postojanje pogreške u prijenosu, dok kašnjenje nije od presudnog značaja.

Tablica 2.5. QoS parametri usmjereni na tehnologiju

Kategorija	Parametar	Opis
Vrijeme (<i>Timeliness</i>)	Kašnjenje (<i>Delay</i>)	Vrijeme potrebno za slanje informacije + propagacijsko kašnjenje.
	Varijacija kašnjenja (<i>Jitter</i>)	Varijacija kašnjenja.
Pojas prijenosa (<i>Bandwidth</i>)	Propusnost (<i>Throughput</i>)	Zahtijevani ili raspoloživi pojas prijenosa u bit/s.
	Vjerojatnost pogreške bita (BER, <i>Bit Error Ratio</i>)	Zajamčena vjerojatnost pogreške bita od strane sustava.
Pouzdanost (<i>Reliability</i>)	Srednje vrijeme rada sustava (MTtF, <i>Mean Time to Failure</i>)	Vrijeme rada sustava između ispada.
	Srednje vrijeme oporavka sustava (MTtR, <i>Mean Time to Repair</i>)	Vrijeme između ispada sustava do povratka u normalno stanje.
	Srednje vrijeme između ispada sustava (MTBF, <i>Mean Time Between Failures</i>)	$MTBF = MTtF + MTtR$
	Postotak vremena raspoloživosti	$MTtF / (MTtF + MTtR)$

Podsloj MAC osigurava prilagodljivost sljedećim klasama kvalitete usluge:

- Usluge vrste dodjeli/trazi (*Grant/Request*). Navedene klase usluge osiguravaju stalnu prijenosnu brzinu (CBR, *Constant Bit Rate*).
- Usluga promjenjive brzine prijenosa u stvarnom vremenu (*Real Time Variable Bit Rate*). Navedena klasa usluge namijenjena je aplikacijama čiji prometni tok pokazuje svojstvo promjenljivosti (npr. MPEG video).

- Usluga promjenjive brzine prijenosa koja nije u stvarnom vremenu (*Non Real Time Variable Bit Rate*).
- Najbolja moguća usluga (*Best Effort*). Podrška navedenoj klasi usluge najčešće se koristi kod pretraživanja (*surfing*) Interneta.

Dobitak koji se ostvaruje podrškom navedenih klasa usluge očituje se u podršci:

- aplikacijama koje su osjetljive na kašnjenje (TDM govor, VoIP),
- aplikacijama koje zahtijevaju promjenljivu brzinu prijenosa (video),
- aplikacijama koje zahtijevaju prioritet pri prijenosu podatkovnog prometa.

2.2. Pregled normi za radijske lokalne mreže

2.2.1. Norme iz skupina IEEE 802.11 i HIPERLAN

Rad na normama za radijske lokalne mreže odvijao se u okviru IEEE projekta 802 unutar kojega je utemeljena radna skupina IEEE 802.11 za WLAN norme. Radna skupina IEEE 802.11 imala je za cilj definirati norme za fizički sloj i za sloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju (MAC) u WLAN mrežama. Prvi rezultat rada radne skupine IEEE 802.11 bio je usvajanje norme IEEE 802.11 Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža (*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*) 1997. godine, koja je predviđala brzine prijenosa do 2 Mbit/s i rad u ISM frekvencijskom području od 2,4 GHz uz uporabu tehnologije proširenog spektra. Ova norma poznata je pod nazivom izvorna IEEE 802.11 norma. ISO/IEC inačica norme IEEE 802.11 objavljena je 1999. godine pod oznakom ISO/IEC 8802-11:1999 (IEEE 802.11-1999).

1999. godine usvojena su dva dodatka normi IEEE 802.11-1999:

- IEEE 802.11a: Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža - amandman 1: Fizički sloj za visoke brzine prijenosa u frekvencijskom području 5 GHz (*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: Dodatak normi 802.11-1999, Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža: proširenje fizičkog sloja za više brzine prijenosa u području 2,4 GHz (*Supplement to 802.11-*

1999, Wireless LAN MAC and PHY Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band).

Norma 802.11a omogućava brzine prijenosa do 54 Mbit/s u frekvencijskom području 5 GHz. Razlog za promjenu frekvencijskog područja je problem smetnji koje se pojavljuju u ISM frekvencijskom području 2,4 GHz. Svrha norme IEEE 802.11b bila je omogućavanje viših brzina prijenosa u frekvencijskom području 2,4 GHz te osiguranje mogućnosti zajedničkog rada opreme različitih proizvođača. Rabi se tehnologija proširenog spektra i omogućavaju se brzine prijenosa do 11 Mbit/s.

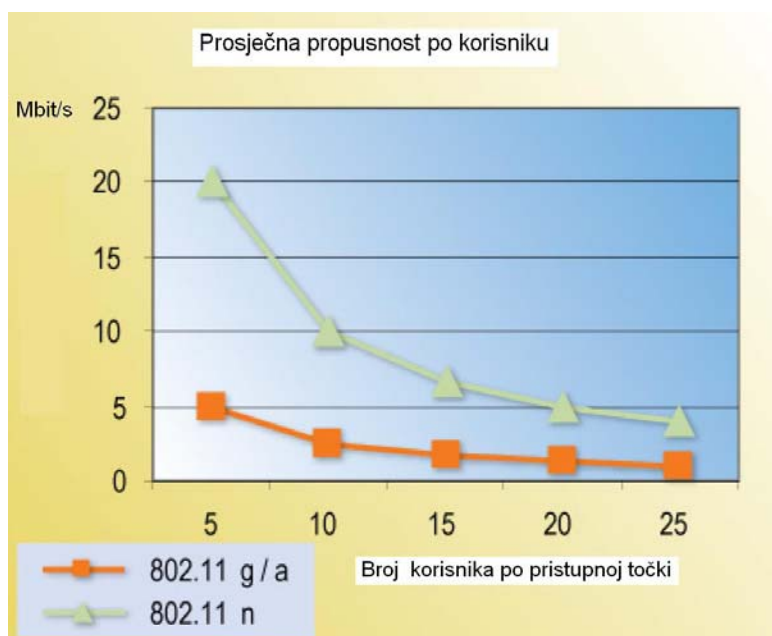
2001. godine objavljena je norma IEEE 802.11d: Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža: specifikacija za rad u dodatnim regulatorskim područjima (*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Specification for Operation in Additional Regulatory Domains*), kao amandman normi IEEE 802.11-1999. Norma IEEE 802.11-1999 predviđa rad u samo nekoliko regulatorskih područja u odnosu na uporabu frekvencijskog spektra. Norma IEEE 802.11d definira zahtjeve koje moraju ispuniti WLAN uređaji za rad u onim zemljama i na onim tržištima koja nisu obuhvaćena postojećim normama.

2003. godine usvojene su norme:

- IEEE 802.11F: IEEE preporučeni način rada za omogućavanje zajedničkog rada pristupnih točaka različitih proizvođača uvođenjem protokola za komunikaciju između pristupnih točaka u distribucijskom sustavu koji podržava IEEE 802.11 djelovanje (*IEEE Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation*),
- IEEE 802.11g: Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža - amandman 4: dodatno proširenje fizičkog sloja za više brzine prijenosa u području 2,4 GHz (*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*),
- IEEE 802.11h: Specifikacije fizičkog sloja i sloja za upravljanje pristupnom mediju radijskih lokalnih mreža: proširenja spektra i upravljanja prijenosnom snagom u području 5 GHz u Europi (*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz band in Europe*).

Norma IEEE 802.11F određuje potrebne informacije koje se razmjenjuju između pristupnih točaka kako bi bile podržane funkcije distribucijskog sustava. Distribucijski sustav nastaje povezivanjem područja pokrivanja više pristupnih točaka. Implementacijom ove norme omogućuje se da u jednom distribucijskom sustavu budu korištene pristupne točke različitih proizvođača WLAN uređaja. 802.11g norma predviđa daljnja povećanja brzine prijenosa do 54 Mbit/s i rabi tehnologiju frekvencijskog multipleksa ortogonalnih podnosilaca (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplex*) u frekvencijskom području 2,4 GHz. Norma IEEE 802.11h unosi poboljšanja 802.11 MAC sloja i 802.11a fizičkog sloja za rad u licenciranom frekvencijskom području 5 GHz na području europskih zemalja. Ova preporuka uključuje mehanizme dinamičkog odabira kanala i upravljanja snagom uređaja.

U pripremi je nova inačica norme, koja nosi oznaku IEEE 802.11n. Očekuje se usvajanje norme polovicom 2009. godine, ali na tržištu se već pojavljuje oprema s mogućnošću rada po toj normi. Mreže po IEEE 802.11n mogu raditi u području 2,4 GHz i u području 5 GHz. Obilježava ih znatno viša propusnost i veći domet u odnosu na mreže po ostalim inačicama norme.



Slika 2.3. Usporedba prosječnih propusnosti za korisnika IEEE 802.11g/a i IEEE 802.11n mreža

Znatno povećanje kapaciteta mreže ostvareno je uporabom tzv. tehnike MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*), pri kojoj se koristi više antena i za odašiljanje i za prijam u cilju poboljšanja performansi komunikacije, kao i korištenjem RF kanala širine 40 MHz.

Uz navedene čitav je niz podnormi iz skupine IEEE 802.11 koje rješavaju pojedina obilježja mreža izgrađenih po ovdje navedenim normama.

U Europi su za implementaciju WLAN sustava razvijene norme pod nazivom lokalne radijske mreže visokih performansi (*High Performance Radio Local Area Network*) tzv. HIPERLAN/1 i HIPERLAN/2 norme koje rabe frekvencijsko područje 5 GHz i nisu kompatibilne s IEEE 802.11a normom. HIPERLAN/1 i HIPERLAN/2 su razvijene unutar Europskog instituta za telekomunikacijske norme (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) u okviru Projekta za širokopojasne radijske pristupne mreže (BRAN, *Broadband Radio Access Network*). HIPERLAN/1 nije u komercijalnoj primjeni, a zamišljen je kao širokopojasna i fleksibilna WLAN mreža koja se može povezivati s drugim LAN mrežama. HIPERLAN/2 je namijenjen omogućavanju pristupa mrežama s asinkronim načinom prijenosa (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*), mrežama s Internet protokolom (IP, *Internet Protocol*) i općim sustavima mobilnih telekomunikacija (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*). HIPERLAN/2 rabi OFDM tehnologiju, a brzine prijenosa su do 54 Mbit/s. 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 normi IEEE 802.11.a prilagođeni Ethernet mrežama, a u normi HIPERLAN/2 ATM mrežama.

2.2.2. Obilježja mreža po izvornoj normi IEEE 802.11

U normi IEEE 802.11 mogu se rabiti četiri različita fizička sloja:

- fizički sloj koji se temelji na tehnici proširenog spektra uz primjenu skakanja frekvencija (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*),
- fizički sloj koji se temelji na tehnici proširenog spektra uz primjenu izravnog slijeda (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*),
- fizički sloj koji se temelji na OFDM tehnici,
- fizički sloj koji se temelji na prijenosu u infracrvenom području (IR, *Infrared*).

FHSS i DSSS pripadaju u tehnologije proširenog spektra u kojima se prenošena informacija raspršuje preko šireg frekvencijskog područja. Ulazni podaci se kodiraju, a u postupku kodiranja rabi se nositelj kako bi se proizveo uskopojasni analogni signal smješten oko određene središnje frekvencije. Taj signal se proširuje u frekvencijskom području u modulatoru, koji rabi slijed pseudoslučajnih brojeva. Na prijarnom kraju, isti slijed se rabi u postupku demodulacije iza kojega se smješta kanalni dekodirer koji

obnavlja izvorne digitalne podatke. Prednost tehnologija proširenog spektra je otpornost na fading u prijemu. Fading nastaje zbog višestruke refleksije radijskih valova (prepreke, zidovi i sl.) i posebno je izražen prilikom širenja elektromagnetskog vala u zatvorenim prostorima gdje je broj prepreka veliki.

Tehnika proširenog spektra uz primjenu skakanja frekvencije temelji se na prijenosu signala uz pomoć pseudoslučajno odabranog skupa frekvencijskih kanala pri čemu se u konstantnim vremenskim intervalima skače s frekvencije na frekvenciju. Vrijeme provedeno na svakoj frekvenciji naziva se *chip*. Prijamnik uspostavlja sinkronizaciju s odašiljačem i obnavlja jednaki slijed skakanja frekvencija. FHSS sustavi su otporni na uskopojasnu interferenciju i u istom zemljopisnom području može raditi više FHSS WLAN sustava ako se u njima rabe ortogonalni sljedovi skakanja frekvencija.

IEEE 802.11 FHSS fizički sloj rabi Gaussovu diskretnu modulaciju frekvencije (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying*) za prijenos podataka u 2,4 GHz području. Upotrebljava se modulacijski postupak,

- 2-GFSK, $h_2=0,34$; za prijenos podataka brzinama 1 Mbit/s ili,
- 4-GFSK, $h_4=0,45$; $h_2=0,15$; za prijenos podataka brzinama 2 Mbit/s.

Brzina signaliziranja je onda u oba slučaja jednaka i iznosi $R_S = 1$ MBd. Signali podataka u formatu NRZ (*Non Return to Zero*) filtriraju se u niskopropusnome Gaussovom filtru normirane širine pojasa $B \cdot T_0 = 0,5$. Kako je $T_0 = 1/R_S = 1$ s, slijedi da upotrijebljeni Gaussov filter mora imati 3-dB širinu pojasa propuštanja od 500 kHz.

Shema skakanja frekvencije obilježava,

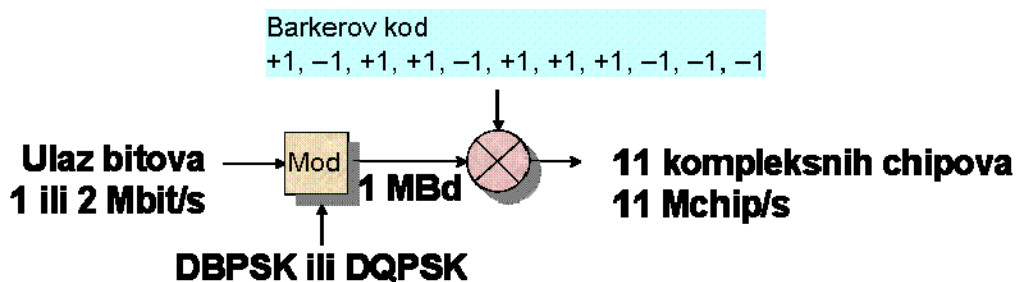
- skakanje na temelju računalom generiranog pseudoslučajnog koda u kojem se nalazi do 79 frekvencija,
- najmanji razmak frekvencija između kojih se skače je 6 kanala,
- 79 shema skakanja podijeljena su u tri skupa sa 26 u svakom skupu.

Europske norme ETS EN 300-328 i ETS EN 300-339 određuju parametre FHSS sustava kako slijedi,

- frekvencijsko područje: 2400 – 2483,5 MHz,
- minimalno 20 frekvencija skakanja,
- najviše 100 mW EIRP.

U DSSS tehnici svaki bit izvornog signala se prikazuje uz pomoć određenog broja bita proširenog signala. To se provodi binarnim

množenjem izvornih podataka s pseudoslučajnim slijedom podataka s višom brzinom prijenosa, koja se naziva PN-slijed (*chipping code*). Brzina prijenosa signala, koja nastaje binarnim množenjem, jednaka je brzini prijenosa PN-slijeda (*chip rate*). Podaci nastali množenjem uvode se u modulator koji ih pretvara u analogni oblik signala pogodan za prijenos. Omjer između brzine prijenosa PN-slijeda i izvornih podataka naziva se faktor proširenja i ima tipične vrijednosti između 10 i 100.



Slika 2.4. Postupak proširenja spektra izravnim slijedom u izvornoj normi IEEE 802.11 DSSS

Tehnika proširenog spektra uz primjenu izravnog slijeda (DSSS) koristi se u izvornoj normi IEEE 802.11 u ISM pojasu na 2,4 GHz za brzine prijenosa podataka od 1 do 2 Mbit/s. Raspoloživo frekvencijsko područje se dijeli na potkanale širine 11 MHz, a brzina prijenosa PN-slijeda za proširenje svakog simbola je 11 Mbit/s (Barkerov kod od 11 podimpulsa). Za prijenos brzinama 1 Mbit/s rabi se binarna diskretna modulacije faze (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*), a za prijenos brzinama 2 Mbit/s rabi se kvaternarna diskretna modulacija faze (QPSK, *Quaternary Phase Shift Keying*), gdje svaki simbol sadrži dva bita. U oba slučaja brzina signaliziranja iznosi 1 MBd. Može se koristiti 13 kanala u pojasu 2,4 do 2,4835 GHz.

DSSS signal je otporan na šum i interferenciju. Otpornost na interferenciju manja mu je nego što je to otpornost FHSS signala. Kvaliteta veze s FHSS se postepeno kviri, dok kod DSSS to nastupa naglo. Više IEEE 802.11 DSSS sustava ima mogućnost zajedničkog rada na istom zemljopisnom području pri čemu svaki sustav treba rabiti samo dio raspoloživog frekvencijskog područja. Te mogućnosti su slabije u odnosu na FHSS sustav. S FHSS može se upotrebljavati 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 (*vidi* inačice izvorne norme prikazane u nastavku), a to je maksimum za mreže s FHSS.

Kod DSSS, pravilo je da faktor proširenja bude jednak 11 kako bi se ispunio uvjet o potrebnom procesnom dobitku. Procesni dobitak u tehnici proširenja spektra izravnim slijedom 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. IEEE 802.11 radna grupa utvrdila je da za potrebe WLAN-a minimalna vrijednost procesnog dobitka mora iznositi barem 11.

Tablica 2.6. Usporedba inačica s FHSS i DSSS

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

2.2.3. IEEE 802.11b inačica norme

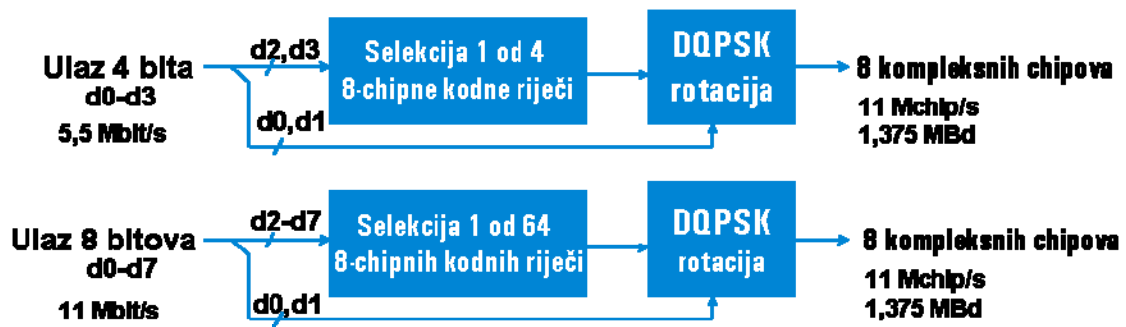
Norma IEEE 802.11b je WLAN norma koja je predviđena ponajprije za aplikacije na prijenosnim računalima. Proširena norma 802.11b u 2,4 GHz području omogućava brzine prijenosa od:

- 1 Mbit/s i 2 Mbit/s kao i izvorna IEEE 802.11 norma,
- 5,5 Mbit/s i 11 Mbit/s kao dodatne mogućnosti.

IEEE 802.11b sustav povratno je kompatibilan s ranijim proizvodima rađenim na temelju izvorne IEEE 802.11 norme.

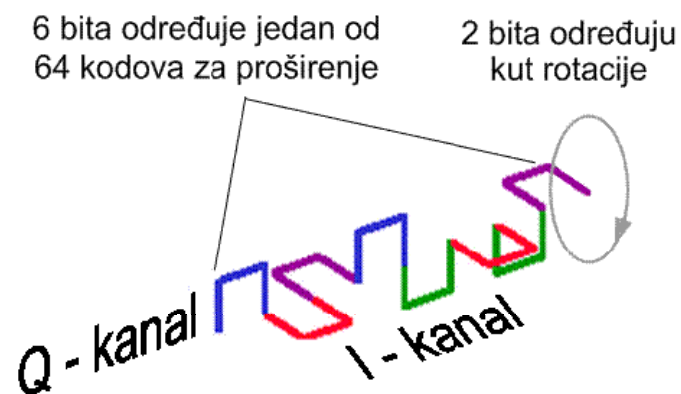
Norma IEEE 802.11b koristi tzv. CCK-tehniku (CCK, *Complementary Code Keying*) na fizičkom sloju kojima postiže brzine od 5,5 i 11 Mbit/s. CCK je oblik tehnike proširenog spektra (DSSS tehnike) koja združuje DSSS postupak proširenja spektra i modulaciju.

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 brzine prijenosa bita od 5,5 Mbit/s uz brzinu signaliziranja (brzinu prijenosa simbola) od 1,375 MBd potrebno je prenositi $5,5/1,375 = 4$ bit/simbol. Kad se želi ostvariti dvostruko viša brzina prijenosa bita, tj. 11 Mbit/s, potrebno je onda koristiti postupak koji će osigurati prijenos 8 bita po simbol. U te se svrhe koristi tehnika CCK, ne samo zato što povećava propusnost mreže, već i zato jer ju je lako integrirati s DSSS-om za brzine od 1 i 2 Mbit/s iz izvorne verzije IEEE 802.11.



Slika 2.5. CCK postupak za brzine prijenosa od 5,5 odnosno 11 Mbit/s

CCK je u osnovi 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 kompleksnog karaktera (kofazna I i kvadratura 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 moraju biti ortogonalne. Na temelju tog svojstva one se međusobno mogu razlikovati i u uvjetima jake prisutnosti šuma odnosno izraženoga višestaznog prostiranja (refleksije od zidova).



Slika 2.6. Ilustracija principa proširenja signala izravnim slijedom korištenjem kompleksnih chipova za proširenje

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.

Pri brzini prijenosa 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 koriste 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.

CCK-koderu 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-signala, a kojeg određuju preostala dva bita.

Pri konačnoj brzini od 11 Mbit/s zauzima se pojas jednog kanala širine 22 MHz. Prema tome mreže po IEEE 802.11b mogu raditi u postojećoj shemi kanala u području 2,4 GHz (Slika 2.1.), a to je 13 kanala u Europi (ETSI) od 2412 MHz do 2472 MHz na razmaku od po 5 MHz. U Americi raspoloživo je samo prvih 11 kanala. Postoje samo 3 – 4 nepreklapajuća kanala, (USA: kanali br. 1, 6 i 11 / ETSI: kanali br. 1, 5, 9 i 13). Neke europske zemlje preporučaju korištenje samo 3 kanala, (kanali br. 1, 7 i 13).

CCK može koegzistirati s izvornim 802.11 DSSS.

Tablica 2.7. Pregled mogućih režima rada IEEE 802.11b sustava

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)	QPSK	1,375	4
11 Mbit/s	8 (CCK)	QPSK	1,375	8

U planiranju pokrivanja WLAN sustavima koriste se ćelije koje se preklapaju za razliku od uobičajenog ćelijskog sustava gdje se takva pojava nastoji izbjeći (preklapanje ustvari uvijek postoji zbog prirode širenja elektromagnetskog vala). Preklapajuće ćelije nose sa sobom povećanu mogućnost smetnji i smanjenu propusnost na obje frekvencije koje se rabe u ćelijama koje se preklapaju, no istodobno osiguravaju vrlo fleksibilni razmještaj pristupnih točaka. To je povoljno, jer je razmještaj pristupnih točaka najčešće uvjetovan okolinom (prostorije, hodnici). Ako se pri normi 802.11b želi

osigurati izolacija kanala, tad se mogu u jednoj topologiji od mogućih 11 frekvencija istodobno koristiti samo tri frekvencije.

Sustavi po normi 802.11b ne trpe samo dodatnu smetnju sa strane susjednih ćelija već i od drugih sustava s obzirom da dijele frekvencijski pojas s drugima komunikacijskim i nekomunikacijskim sustavima i uređajima.

Potrebno je osigurati da susjedni kanali budu razmaknuti na frekvencijskoj osi za iznos nekoga cjelobrojnog višekratnika od 5 MHz. Potiskivanje susjednog kanala osnovna norma temelji na razmaku nosilaca od 30 MHz. Kod "b" verzije norme, a kad se koristi 4 kanala, problem je još izraženiji s obzirom na razmak kanala od 20 MHz (u USA 25 MHz već kod 3 kanala). Iz toga izlazi činjenica da u cijelom skupu kanala postoje samo tri kanala koji su izrazito dobro frekvencijski izolirana.

2.2.4. IEEE 802.11a inačica norme

Mreže po normi IEEE 802.11a osnivaju se na OFDM tehnologiji i smještene su u područje 5 GHz. Predviđeni su sljedeći parametri prijenosa,

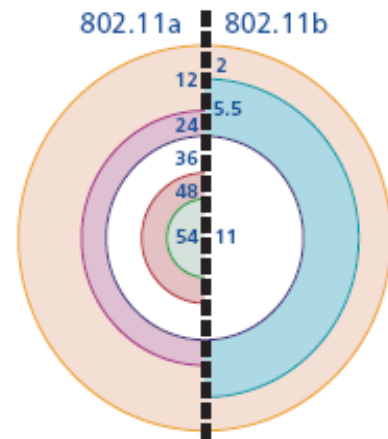
- brzina prijenosa: 6; 9; 12; 18; 24; 36; 48 i 54 Mbit/s,
- modulacijski postupak: BPSK, QPSK, 16-QAM i 64-QAM,
- širina kanala: 20 MHz.

Tablica 2.8. Načini rada prema normi IEEE 802.11a

Mod. postupak	Korisnost koda	Bit/podnosilac	Kodir. bita/OFDM-simb.	Inf. bita/OFDM-simb.	Nom. brzina [Mbit/s]	Brzina prijenosa informacije [Mbit/s]
BPSK	1/2	1	48	24	6	3,00
BPSK	3/4	1	48	36	9	6,75
QPSK	1/2	2	96	48	12	6,00
QPSK	3/4	2	96	72	18	13,50
16-QAM	1/2	4	192	96	24	12,00
16-QAM	3/4	4	192	144	36	27,00
64-QAM	2/3	6	288	192	48	32,00
64-QAM	3/4	6	288	216	54	40,50

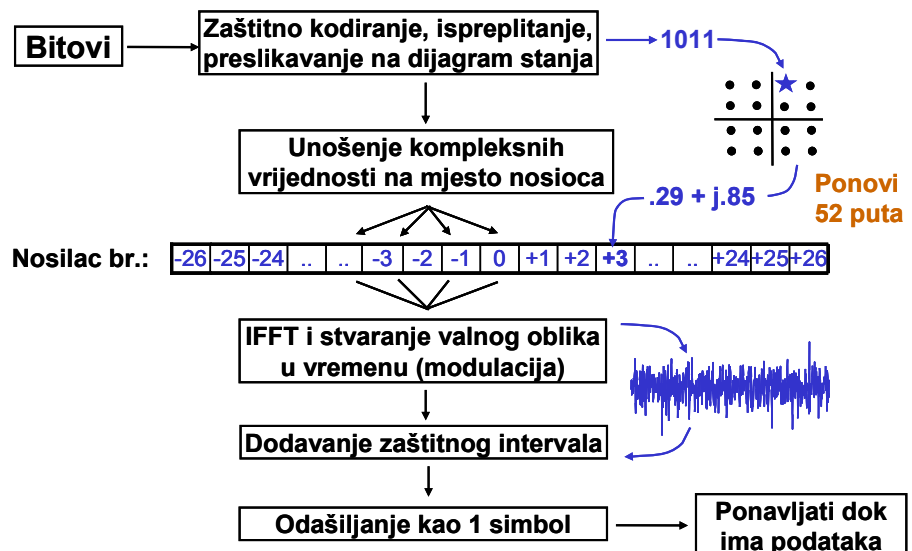
U Tablici 2.8. je pregled svih načina rada koji uz modulacijski postupak uključuje i parametre zaštitnog kodiranja kao i ostvarive brzine prijenosa.

Može je koristiti 8 odnosno 11 frekvencija (što je osjetno više od 3 kanala kod 802.11b) ovisno u kojem dijelu pojasa se radi.



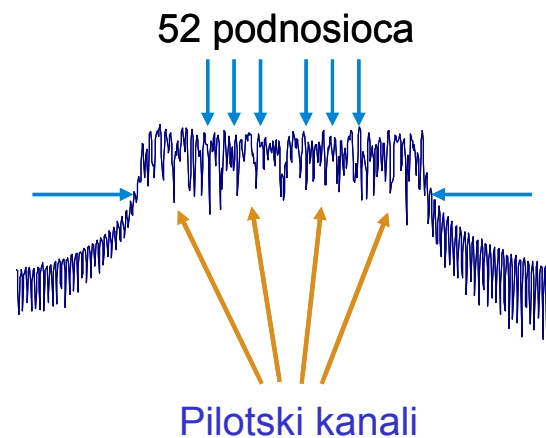
Slika 2.7. Ostvarive brzine i domet u 802.11a sustavu u usporedbi s 802.11b

Koristi se OFDM tehnologija s 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 koristeći isključivo BPSK modulacijski postupak. Uz pomoć pilotskih kanala prati se tijekom promjena amplitude i faze unutar cijelog OFDM-bursta.



Slika 2.8. Ilustracija dobivanja OFDM-a u WLAN-u po 802.11a

Slika 2.9. prikazuje spektralne osobine signala u kanalu mreže po 802.11a koji je nastao OFDM postupkom s 52 podnosioca. U spektru se ističu pilotski podnosioci.



Slika 2.9. Tipični oblik spektra jednog OFDM kanala u WLAN-u po IEEE 802.11a

2.2.5. IEEE 802.11g inačica norme

Norma IEEE 802.11g je zadržala sva obilježja tehnologije iz inačice 802.11a, a koristi se frekvencijsko područje rada inačice 802.11b (2,4 GHz). 802.11g potpuno je povratno kompatibilan 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), a za brzine: 6; 9; 12; 18; 24; 36; 48 i 54 Mbit/s koristi se OFDM tehnologija 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 kao da su u području s pristupnom "b" točkom.

"g" inačica norme IEEE 802.11 na neki je način hibrid "b" i "a" inačice i vrlo je raširena u svijetu. Obilježavaju ju prednosti i nedostaci inačica iz kojih je nastala. Glavnina prijenosnih računala bila je do sad opremljena sučeljem za radijski rad po IEEE 802.11b/g. Takvi terminali mogu najbolje iskoristiti mogućnosti postavljene radijske lokalne mreže ovisno o tome da li se ona osniva na "b" ili "g" inačici. U Tablici 2.10. je pregled temeljnih osobina pojedinih inačica norme 802.11.

Tablica 2.9. 802.11g: Brzine prijenosa, tehnologija i modulacijske sheme

Brzina prijenosa [Mbit/s]	Tehnologija na PHY sloju	Modulacijski postupak
54	OFDM	64 QAM
48	OFDM	64 QAM
36	OFDM	16 QAM
24	OFDM	16 QAM
18	OFDM	QPSK
12	OFDM	QPSK
11	DSSS	CCK
9	OFDM	BPSK
6	OFDM	BPSK
5.5	DSSS	CCK
2	DSSS	QPSK
1	DSSS	BPSK

Nazočnost terminala po "b" inačici u području pokrivanja pristupne točke po "g" inačici znatno smanjuje propusnost te pristupne točke, jer ona mora signalizirati ostalim "g" korisnicima da uključe zaštitne mehanizme kako ne bi ometali rad "b" korisnika prijavljenih na istu pristupnu točku. Zbog toga se smanjuje propusnost i za "g" korisnike, ali je ona viša nego kod "b" mreža.

Kad se "g" korisnik nađe u području pokrivanja "b" pristupne točke onda on s pristupnom točkom uspješno komunicira po pravilima "b" inačice norme i on ostvaruje uobičajenu propusnost za tu vrstu mreže.

Tablica 2.10. Glavna obilježja normi iz IEEE 802.11 skupine koje su do sad u uporabi

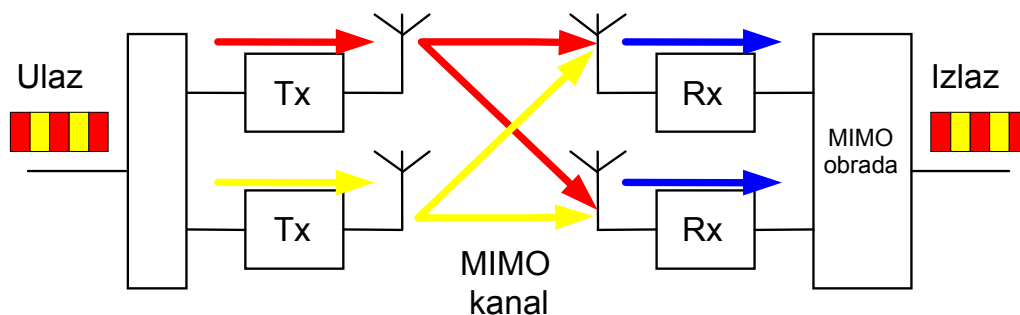
	802.11b	802.11a	802.11g	
Norma prihvaćena	07/1999	07/1999	06/2003	
Najveća brzina [Mbit/s]	11	54	54	
Modulacijski postupak	CCK	OFDM	OFDM i CCK	
Brzine prijenosa [Mbit/s]	1; 2; 5,5; 11	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54	CCK: 1; 2; 5,5; 11 OFDM: 6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54	
Radna područja frekvencija [MHz]	2400 – 2483,5	5150 – 5350 5470 – 5725	2400 – 2483,5	
Približna propusnost [Mbit/s]	6	25	8 kad ima 802.11b korisnika u ćeliji	22 kad nema 802.11b korisnika u ćeliji

2.2.6. IEEE 802.11n inačica norme

IEEE 802.11n izgrađena je na temeljima prethodnih inačica norme 802.11. Na fizičkom je sloju (PHY) upotrijebljena MIMO-tehnika i omogućeno je objedinjavanje da RF kanala standardne širine od 20MHz u jedan kanal širine 40 MHz. MIMO-tehnika osniva se na uključivanju prostorne dimenzije u radijski kanal pored frekvencijske i vremenske dimenzije. Ona se ostvaruje uporabom više antena kako na odašiljačkoj tako i na prijamoj strani radijskog sustava. Obilježja MIMO-sustava prikazana su u odjeljku 4.2.2. ove studije.

Uobičajeno je MIMO-arhitekturu označavati sa tri broja u obliku: $a \times b : c$, gdje a označuje najveći broj odašiljačkih antena, b označen je najveći broj prijamnih antena, dok c predstavlja najveći

broj prostornih snopova (tijekova) podataka. Norma IEEE 802.11n predviđa uporabu konfiguracije $4 \times 4: 4$. U zadnjem nacrtu norme 2.0 (802.11n Draft 2.0: *Taking Wi-Fi to the Next Level*, May 2007) navedene su samo situacije sa dva prostorna snopa i to su situacije oblika: $2 \times 2: 2$, $2 \times 3: 2$ i $3 \times 2: 2$. One ostvaruju brzine prijenosa od oko 250 Mbit/s. Očekuje se da će se potpunom konfiguracijom sa četiri prostorna snopa postizati onda dvostruko više brzine, tj. one će biti oko 500 Mbit/s.



Slika 2.10. Osnove MIMO-arhitekture u WLAN-u po normi IEEE 802.11n

Poboljšanje prijenosnih obilježja postignuto je zahvatom u podsloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju (MAC podsloj) u koje je uključena funkcija združivanja podataka koja rezultira sažimanjem količine informacije koju mreža treba prenijeti. Utvrđene su dvije vrste združivanja:

1. združivanje podataka o uslugama MAC podsloja (MSDUs, *MAC Service Data Units*), a koje se nalaze na vrhu tog podsloja (označuje se kao A-MSDU združivanje),
2. združivanje podataka MAC protokola (MPDUs, *MAC Protocol Data Units*) odnosno združivanje okvira, a koje se nalaze na kraju tog podsloja (označuje se kao A-MPDU združivanje).

Sažimanjem u MAC podsloju bolje se iskorištavaju mogućnosti fizičkog sloja koje pruža 802.11n, a u konačnici tako se dobiju visoke brzine prijenosa podataka u mreži. One su čak više od uobičajenih 100 Mbit/s kod vezivanja na fiksni LAN. Potpuno iskorištenje mogućnosti pristupnih točaka može se očekivati samo kad se one vežu na gigabitnu Ethernet mrežu.

Potvrda za potvrđivanjem ispravnosti prijama svakog paketa, slanjem ACK poruke, u znatnoj mjeri povećava promet u mreži na račun ostvarive propusnosti. Norma 802.11n uključuje mogućnost potvrđivanja prijama blokova paketa slanjem samo jedne poruke Block-Ack (*Block-Acknowledge*).

Mreže po normi IEEE 802.11n mogu raditi u oba frekvencijska područja za WLAN, dakle, u području 2,4 GHz i u području 5 GHz.

Na temelju dobrih iskustava s povratnom kompatibilnošću inačice IEEE 802.11g s 802.11b ostvarena je povratna kompatibilnost ne samo s 802.11b/g već i s 802.11a. Mreža, koja se osniva na "n" inačici, može prihvatiti korisnike koji su opremljeni uređajima izrađenima po ranijim inačicama (izvorni 802.11, inačice: b, a i g). Pri radu u tzv. miješanom modu (međusobni rad uređaja koji su izvedeni po različitim inačicama norme) potrebno je u 802.11n uređaj ugraditi zaštitne mehanizme za uređaje po ranijim inačicama, jer oni nisu unaprijed kompatibilni s 802.11n. Drugim riječima, bez uporabe tih zaštitnih mehanizama u 802.11n, uređaji po 802.11a/b/g bi rad uređaja po 802.11n interpretirali kao smetnju. Zaštitni mehanizmi smanjuju propusnost za najmanje oko 25 % ako se radi o miješanom modu rada 802.11g mreže s korisnicima koji koriste 802.11a/g s obzirom da se sve tri inačice osnivaju na OFDM tehnologiji. Znatno veće su degradacije propusnosti u radu 802.11n mreže s korisnikom 802.11b, jer on koristi DSSS odnosno CCK postupak.

Iako norma IEEE 802.11n formalno još nije odobrena, na tržištu se mogu naći uređaji koji rade po propozicijama iz nacрта norme. Provedeno je i certificiranje uređaja za RF kanale širine 20 MHz i one širine 40 MHz za najveće propusnosti od 130 Mbit/s za slučaj užeg kanala odnosno 300 Mbit/s za širi kanal. Za sad se predviđa rad s kanalom širine 40 MHz samo u području 5 GHz.

2.2.7. Norme iz skupine HIPERLAN

U Europi su za implementaciju WLAN sustava razvijene norme pod nazivom lokalne radijske mreže visokih performansi (*High Performance Radio Local Area Network*) tzv. HIPERLAN/1 i HIPERLAN/2 norme, koje rabe frekvencijsko područje 5 GHz i nisu kompatibilne s IEEE 802.11a normom. HIPERLAN/1 prva je norma nastala pod okriljem paneuropske normizacije 1995. godine. HIPERLAN/1 nije u komercijalnoj primjeni, a zamišljen je kao širokopojasna i fleksibilna WLAN mreža koja se može povezivati s drugim LAN mrežama. Brzine prijenosa bile su do 23,5 Mbit/s.

HIPERLAN/2 je namijenjen omogućavanju pristupa mrežama s asinkronim načinom prijenosa, mrežama s Internet protokolom i općim sustavima mobilnih telekomunikacija. HIPERLAN/2 rabi OFDM tehnologiju, a brzine prijenosa su do 54 Mbit/s. Obrada signala osniva se na OFDM-tehnici uz primjenu zaštitnog kodiranja. Radno područje frekvencija je od 5,15 do 5,35 GHz odnosno od 5,470 do 5,725 GHz. Najveći dopušteni EIRP za prvo frekvencijsko područje iznosi 200 mW (primjenjuje se isključivo

unutar zgrada) te 1000 mW za drugo frekvencijsko područje (za vanjske prostore) odnosno 200 mW (za zatvorene prostore).

HIPERLAN/2 i IEEE 802.11a jednake su na fizičkom sloju (OFDM, 52 podkanala, RF kanal širine 20 MHz, modulacijski postupci, zaštitno kodiranje). Razlike nastupaju na višim slojevima i to ove norme čini nekompatibilnima. Postupci pristupa prijenosnom mediju kod svih inačica norme IEEE 802.11 osnivaju se na CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) postupku, dok U HiperLAN/2 normi protokol MAC sloja (*Medium Access Control*) je dinamički TDMA/TDD (*Time Division Multiple Access / Time Division Duplex*).

Ovdje valja još spomenuti da HIPERLAN/2 mreža omogućuje upravljanje kvalitetom usluge uporabom mehanizama za upravljanje kašnjenjem u mreži.

2.3. Arhitekture mreže

WLAN mreža se sastoji od WLAN mrežnih kartica (NIC, *Network Interface Card*), koje su sastavni dio osobnih računala i predstavljaju radijsko mrežno sučelje, te pristupnih točaka (AP, *Access Point*), koje služe za povezivanje radijske i fiksne LAN mreže. Krajnji korisnici pristupaju WLAN mreži preko WLAN mrežnih kartica koje omogućavaju povezivanje mrežnog operacijskog sustava (NOS, *Network Operating System*) korisnika i radiofrekvencijskih valova (preko antene). Pristupna točka prima, pohranjuje i odašilje podatke između radijske i fiksne mrežne infrastrukture. Jedna pristupna točka može podržati malu skupinu korisnika i funkcionira unutar raspona od manje od tridesetak metara do preko stotinu metara. Pristupna točka može biti programska podrška na poslužitelju ili poseban uređaj. Jednom kada je povezana na mrežu, djeluje u načelu kao most: na jednoj strani je radijska mreža, a na drugoj npr. Ethernet. Nakon početne faze razvoja WLAN-a pojavili su se zahtjevi da pristupna točka podržava tzv. *roaming* odnosno prelazak korisnika s jedne na drugu AP. To je pristupnu točku učinilo kompleksnijom.



Slika 2.11. Primjer uređaja pristupne točke za WLAN



Slika 2.12. Radijska sučelja za korisničke uređaje mogu se naći u više izvedbi

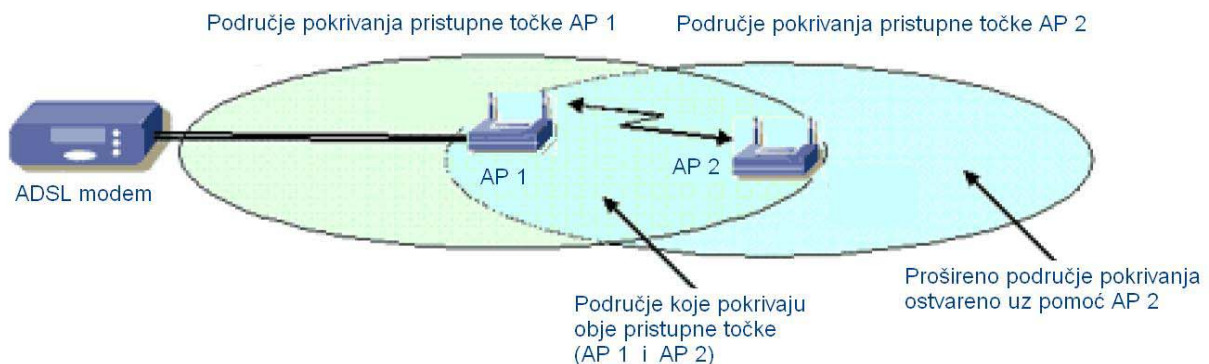
Na Slici 2.11. primjer je izvedbe uređaja pristupne točke koji je predviđen za montažu na horizontalnu plohu. Postoje i druge izvedbe za montažu na zid, strop, za otvorene prostore i sl. Radijsko sučelje za korisničko računalo može se priključiti na USB priključnicu, ili dolazi kao PCMCIA kartica (Slika 2.12.). Za primjenu u stolnim računalima dolaze kartice radijskog sučelja s posebnom izvedbom antene.



Slika 2.13. Najjednostavnija WLAN arhitektura koja se susreće u kućnoj primjeni

Slika 2.13. prikazuje najjednostavniju arhitekturu radijske lokalne mreže koja sadrži samo jednu pristupnu točku na koju se veže nekoliko uređaja: prijenosno računalo i stolna računala. Na slici su posebno istaknuti korisnički radijski prilagodnici (sučelja) koji se nalaze u okviru računala. Svi korisnički uređaji ne moraju nužno koristiti radijsku vezu. U primjeru sa slike jedno je stolno računalo na pristupnu točku povezano Ethernet kabelom. Pristupna točka je uz pomoć ADSL modema priključena na Internet.

U kućnoj primjeni WLAN-a ponekad, a u njezinoj primjeni za manje urede (SOHO, *Small Office Home Office*) nedovoljno je područje pokrivanja koje se ostvaruje uz pomoć samo jedne pristupne točke. U nekim se situacijama uporabom radijskog repetitora može dovoljno dobro riješiti problem. Uporabom više repetitora nastaje tzv. mesh/repetitorska arhitektura. U primjeru na Slici 2.14. pristupna točka AP 2 ima funkciju repetitora prema pristupnoj točki AP 1 koja je vezana na Internet. Pristupna točka AP 1 obavlja funkciju usmjernika (*router*) za pristupnu točku AP 2. Zbog toga AP 1 mora imati podatke o svim korisnicima prijavljenima na mrežu, dok AP 2 sadrži samo podatke o korisnicima koji su se prijavili na tu pristupnu točku. AP 2, dakle, vlada se kao most ili malo inteligentniji usmjernik. Pokretljivost korisnika i njegov prijelaz iz jedne u drugu ćeliju izazvat će dodatni promet podataka za usmjeravanje korisničkog prometa.



Slika 2.14. Područje pokrivanja može se proširiti uz pomoć još jedne pristupne točke (AP 2) koja radi kao radijski repetitor

Dva su načina rada mreža s repetitorom:

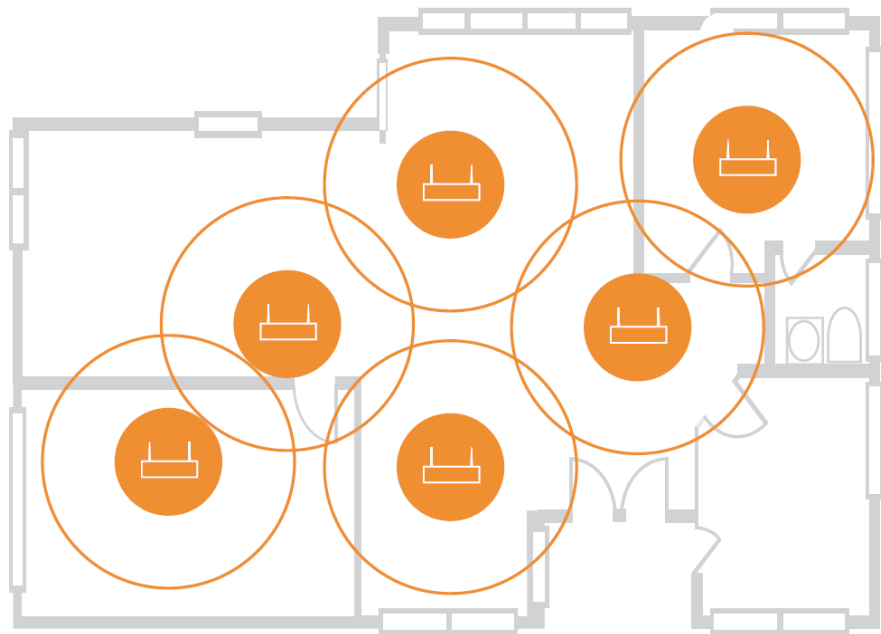
- *Jednofrekvencijski način rada* – obje pristupne točke rade na istoj frekvenciji i ta se frekvencija koristi kako za komuniciranje među pristupnim točkama tako i za veze pristupne točke s korisničkim uređajem. Ovaj način rada pokazuje se neučinkovitim zbog preklapanja područja pokrivanja dviju pristupnih točaka. Inicijative za početak neke komunikacije može stvoriti smetnje u drugim vezama pa se stoga smanjuje propusnost. U najgorem se slučaju propusnost

smanjuje za faktor $1/(N+1)$, gdje je sa N označen broj repetitorskih AP.

- *Dvofrekvencijski način rada* – zahtijeva da obje pristupne točke imaju mogućnost rada s dvije frekvencije. Jedna frekvencija koristi se za vezu između pristupnih točaka, a druga za vezu AP s korisničkim uređajima. Tad obje pristupne točke rade u istome frekvencijskom području (2,4 GHz) npr. ali na različitim kanalima unutar područja što onda rješava problem međusobnih smetnji. Treći se raspoloživi kanal u području 2,4 GHz npr. može koristiti za vezu između temeljne i repetitorske AP. Nisu rijetka ni rješenja da pristupne točke međusobno komuniciraju na 5 GHz u zemljama koje to dopuštaju.

Složenije arhitekture nastaju kad se koristi veći broj pristupnih točaka i kad se pokriva veće područje od interesa. Dva su pristupa arhitekturi radijske lokalne mreže:

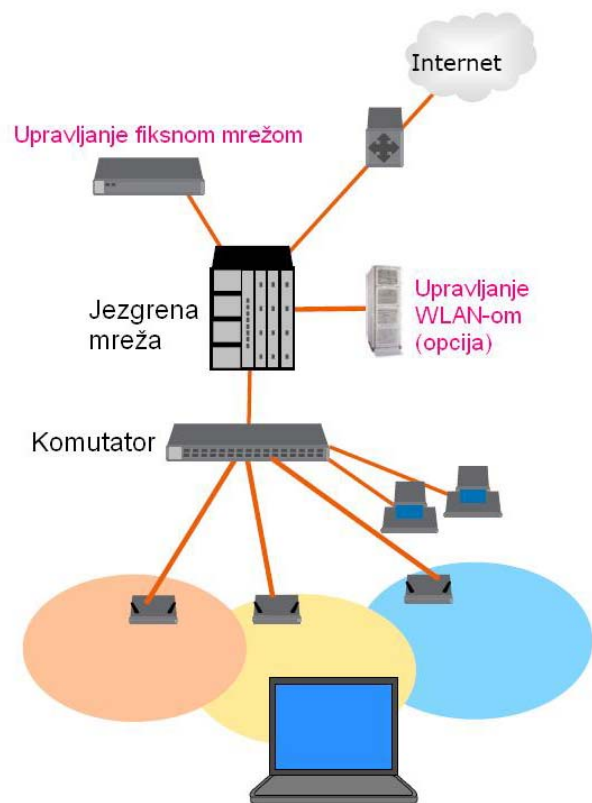
- *raspodijeljena arhitektura (distributed architecture)* osniva se na integralnoj funkcionalnosti svake pristupne točke koja sadrži visok stupanj inteligencije pa se zato one nazivaju "snažnima pristupnim točkama" (*fat AP*),
- *centralizirana arhitektura (centralized architecture)* stavlja svu inteligenciju u jedan ili više WLAN kontrolera umjesto u AP koja se onda naziva "mršavom pristupnom točkom" (*thin AP*).



Slika 2.15. Raspodijeljena arhitektura WLAN-a osniva se na određenom broju neovisnih pristupnih točaka

Raspodijeljena arhitektura WLAN-a koristila se od prvih dana primjene te vrste mreža kad se koristio manji broj pristupnih točaka i kad je mreža opsluživala manji broj korisnika. Osobine te arhitekture mogu se sažeti u nekoliko točaka:

- svaka pristupna točka (*AP*) funkcionira potpuno neovisno od ostali pristupnih točaka u mreži,
- AP sadrži kompletan softver potreban za uspostavljanje, održavanje i upravljanje radijskom vezom,
- u AP se obavljaju svi mehanizmi vezani za provjeru vjerodostojnosti korisnika (*authentication*) i sigurnost u mreži,
- šifriranje i dešifriranje obavlja se u AP,
- svaka AP ima svoju IP adresu i sastavni je element mreže,
- konfiguracija mreže je statička i na nju ne utječu promjene uvjeta u mreži kao npr. strana ometajuća AP ili pak ispad iz rada susjedne AP.



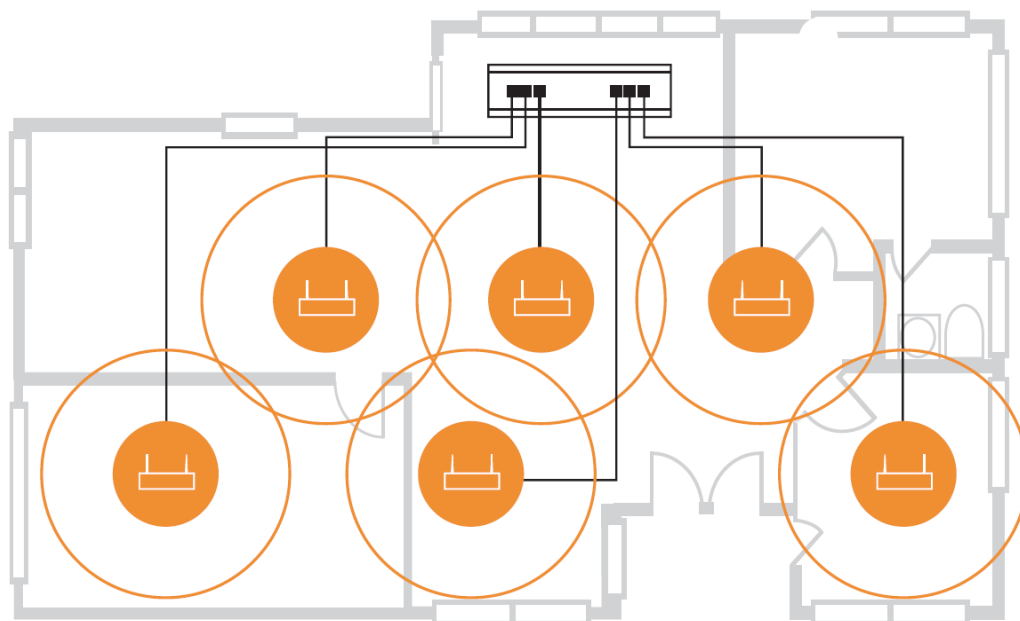
Slika 2.16. Arhitektura radijske mreže sa samostalnim pristupnim točkama (*fat APs*)

Postupak koordiniranog upravljanja ovom vrstom mreže je vrlo složen zbog potpuno samostalnog rada pristupnih točaka, tj. nekih jedinica mreže. To je lako uočiti kad se želi riješiti zahtjev za mobilnošću korisnika npr. prelazak veze s jedne na drugu pristupnu

točku bez prekidanja veze moguć je samo ako postoji neka vrsta koordinacije između pristupnih točaka, a što ne postoji u izvornoj arhitekturi. Iz navedenog već izlazi da raspodijeljena arhitektura nije prikladna za složenije i veće WLAN-ove, jer je gotovo nemoguće učinkovito upravljati s velikim brojem neovisnih jedinica mreže.

Centralizirana je arhitektura nastala iz potrebe za postavljanjem mreže na širem području s velikim brojem pristupnih točaka koja će omogućiti mobilnost terminala i roaming. U toj arhitekturi pristupne su točke puno jednostavnije, a glavna operacija obavlja se u središnjem kontroleru. Taj kontroler rješava pitanja:

- mobilnosti i roaminga,
- provjere vjerodostojnosti korisnika (*authentication*),
- šifriranja i dešifriranja,
- ujednačavanja prometa preko raznih pristupnih točaka,
- RF nadzora,
- dodavanja novih radijskih uređaja radi dopunskog pokrivanja nekih prostora i sl.

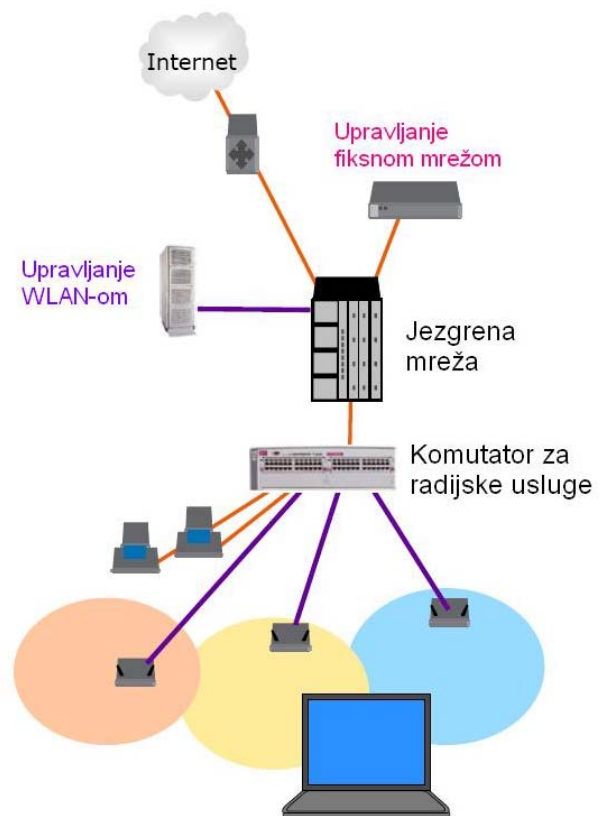


Slika 2.17. U centraliziranoj arhitekturi sve su pristupne točke vezane na središnje mjesto – radijski komutator (*switch*)

Osobitosti mreže s centraliziranom arhitekturom:

- Aktivnosti pristupne točke koordinira središnji radijski kontroler u kojem se između ostalog obavlja šifriranje i dešifriranje za sve priključene pristupne točke.

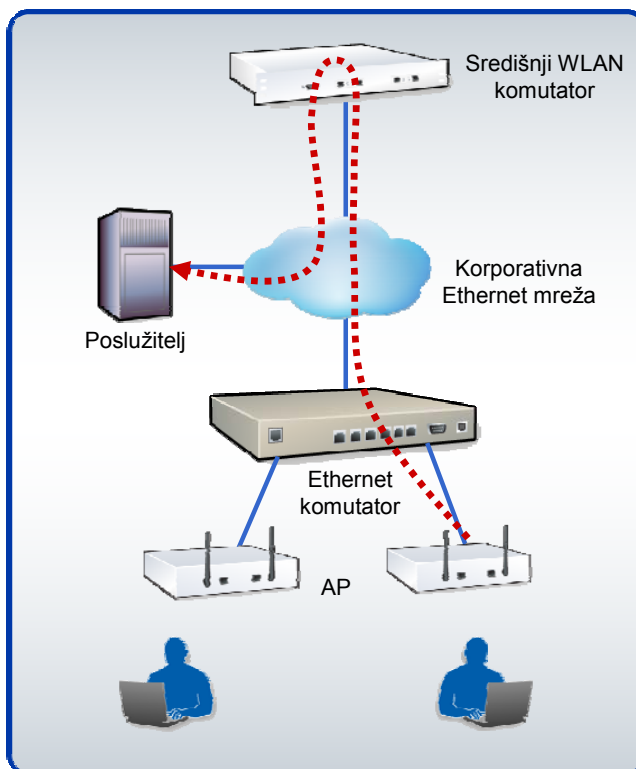
- Kontroler može prema potrebi rekonfigurirati pristupnu točku u cilju rješavanja problema u mreži.
- Uređaj za upravljanje WLAN-om obavlja zadatke nadzora nad: konfiguracijom, pojavom pogreške i proširenjem mreže.
- Zalihost u mreži osigurava se uz pomoć dodatnih kontrolera na posebnim lokacijama koji onda preuzimaju funkciju za slučaj da komutator ili kontroler ispadnu iz funkcije.
- Veća je raspoloživost mreže u odnosu na raspodijeljenu arhitekturu. Mreža lakše reagira na vremenske promjene performansi kao i naglo povećanje korisničkih zahtjeva.
- Brzo rješavanje roaminga korisnika rezultira zadovoljavajućom kvalitetom usluge i kod aplikacija osjetljivih na brzinu kao što je prijenos govora preko WLAN-a (VoWLAN, *Voice over WLAN*).



Slika 2.18. Centralizirana mrežna arhitektura s "mršavima" pristupnim točkama (*thin APs*)

Ova arhitektura duguje svoju popularnost i raširenost činjenici da omogućava centralno upravljanje. Ona je u potpunosti ispunjavala zahtjeve za mreže po IEEE 802.11a/b/g normama kad se ne traže velike brzine i za aplikacije koje nisu osjetljive na kašnjenje.

Neka vrsta uskog grla u mreži je središnji komutator kroz koji prolazi cjelokupni radijski promet. To usko grlo nije predstavljalo veći nedostatak za 802.11a/b/g mreže u pogledu raspoloživog kapaciteta, jer su teorijski naviše propusnosti od 54 Mbit/s još uvijek bile manje od mogućnosti fiksne Ethernet mreže od 100/1000 Mbit/s. Ipak u nedostatak bi se mogla ubrojiti visoka osjetljivost na ispravnost rada samo jedne jedinice mreže, generiranje nepotrebnog prometa u fiksnom dijelu mreže i unošenje dodatnog kašnjenja koje može biti vrlo neprikladno za neke vrste aplikacija.

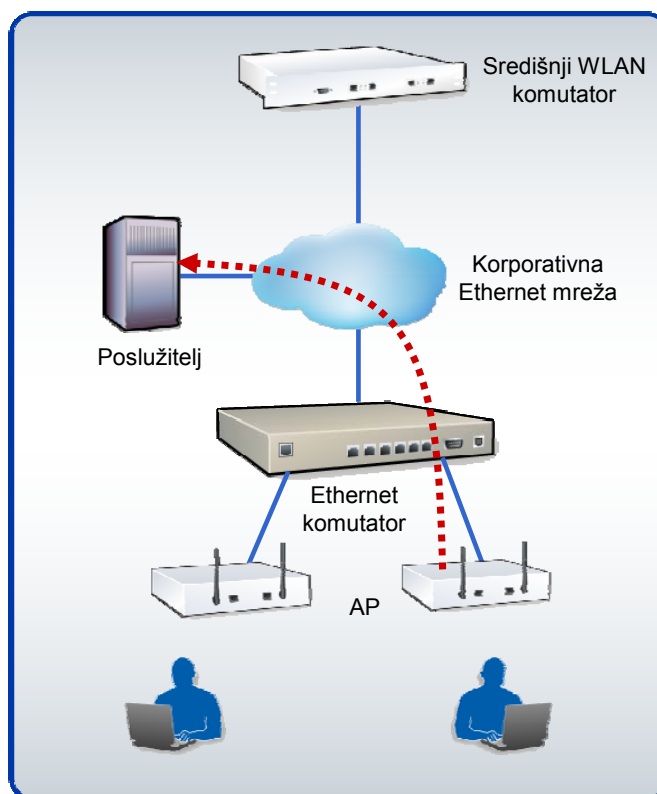


Slika 2.19. Tijek prometa u tradicionalnoj mreži centralizirane arhitekture

Centralizirana se arhitektura pokazuje potpuno neprikladnom za mreže nove generacije, tj. one po normi IEEE 802.11n ponajprije zbog puno većih brzina u radijskom dijelu mreže. Već u početnoj fazi ostvareno 6-terostruko povećanje brzine WLAN-a preplavljuje središnji WLAN komutator s podacima, a vjerojatno će se to uskoro desiti i sa LAN okosnicom kroz koje ide sav radijski promet. Na primjer, središnji WLAN komutator, koji opslužuje do 200 pristupnih točaka 802.11a/b/g vrste može podržavati samo 33 pristupne točke 802.11n vrste. Rad mreže se, uz nepromijenjenu arhitekturu, može održavati samo nabavom mnogo novih komutatora sadašnje generacije ili skupih komutatora nove generacije. Ovdje nećemo spominjati trivijalno rješenje tj. odustajanje od korištenja visokih brzina koje pruža 802.11n

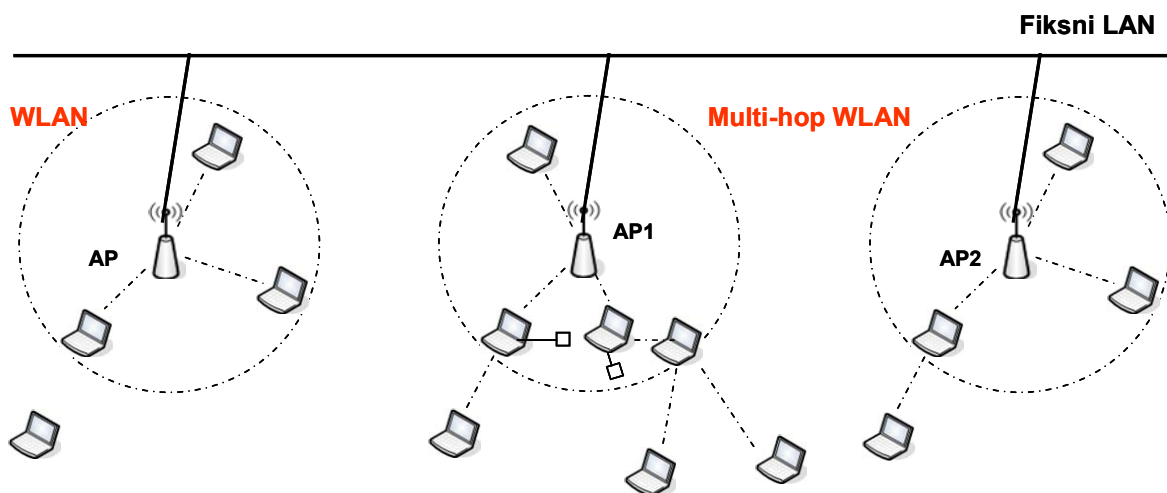
mreža. U cilju iskorištavanja mogućnosti koje pruža norma IEEE 802.11n potrebno je upotrijebiti i arhitekturu mreže novije generacije. Zahtjevi investitora u novu generaciju radijske lokalne mreže pokazuju se vrlo logičnima, a oni su ukratko: investicija u mrežu danas mora osigurati jeftinu eksploataciju u budućnosti, primijenjeno rješenje (arhitektura) mora omogućiti postizanje nazivnih brzina iz 802.11n.

Proizvođači opreme nude nekoliko rješenja za arhitekturu mreže koja će ispuniti ove zahtjeve. Rezultirajuće se rješenje često naziva "Optimizirana WLAN arhitektura" (Slika 2.18.). Ono u potpunosti ispunjava postavljene zahtjeve tj. vodi promet izravno od izvora do odredišta, a omogućuje središnje upravljanje i nadzor. Na taj je način izbjegnuta nepotrebnost prometa u fiksnom dijelu mreže pa su omogućene više brzine i zahtjevnije aplikacije. Povećanjem brzina prijenosa prema 802.11n ne postavljaju se novi zahtjevi na središnji komutator za upravljanje jer on obrađuje samo upravljačke signale za AP.



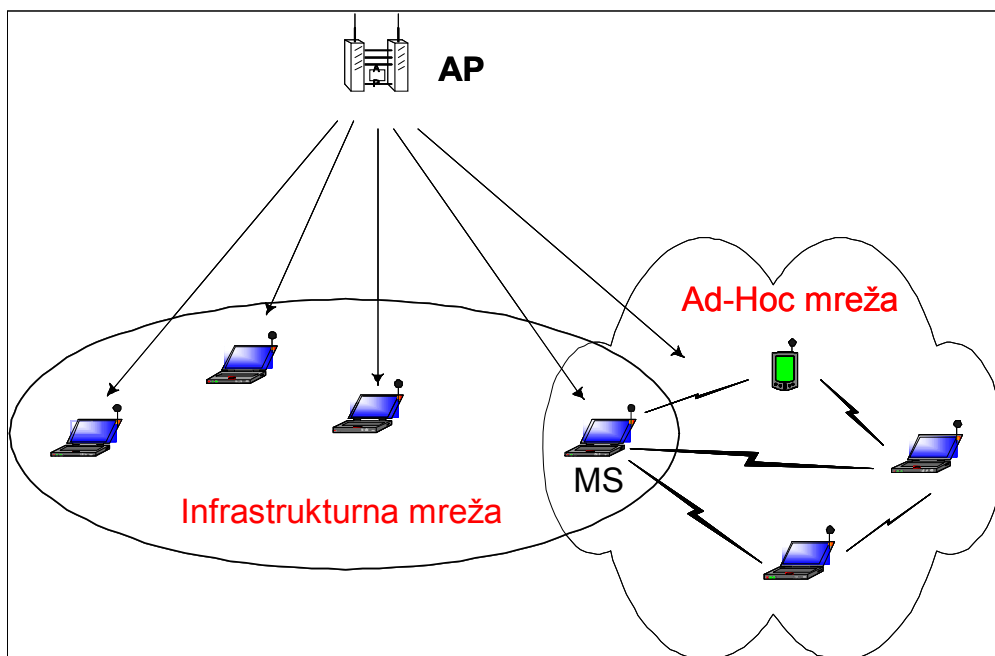
Slika 2.20. Načela optimizirane WLAN arhitekture

Radijski segment svih navedenih arhitektura može se proširiti korištenjem nekih korisničkih postaja kao repetitora ili pak postavljanjem posebnoga radijskog usmjernika (*router*). Obilježja takvih konfiguracija prikazana su na početku ovog odjeljka. Arhitekture novije generacije, koje omogućuju visoku propusnost, u velikoj mjeri smanjuju nepovoljna obilježja ovih struktura.



Slika 2.21. Lokalno proširenje temeljne arhitekture WLAN-a dodatnim vezama

Na Slici 2.22. primjer je proširenja područja pokrivanja temeljne strukture WLAN-a pridruženom ad-hoc mrežom. Mrežni čvor (korisnička postaja) označen s MS na slici služi kao poveznik tih dviju mreža. On je dio objiju mreža. Uz poznate nedostatke ad-hoc načina komuniciranja ovo se rješenje može vrlo brzo realizirati u slučaju trenutne potrebe iako uz nešto skromnije prijenosne osobine.

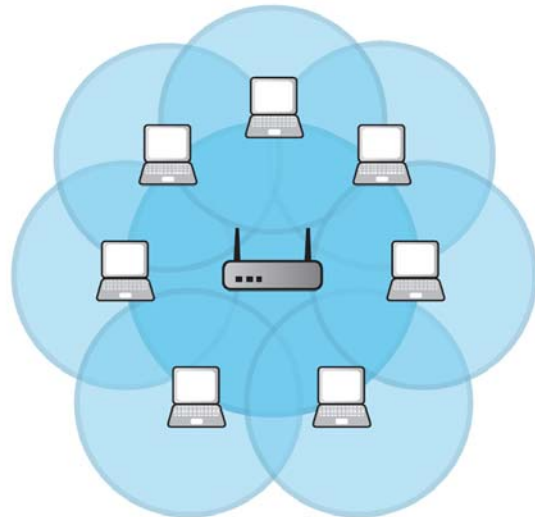


Slika 2.22. Proširenje temeljne arhitekture dopunskom ad-hoc mrežom

2.4. Lociranje pristupnih točaka

U infrastrukturnoj mreži sve mobilne postaje moraju biti na takvoj udaljenosti od pristupne točke da budu u njezinu području pokrivanja radijskim valovima. Za pokrivanje većih područja potrebno je rabiti više pristupnih točaka. Povezivanjem pojedinih segmenata WLAN mreže, koji pripadaju pojedinoj pristupnoj točki, putem distribucijskog sustava, nastaje najsloženija arhitektura IEEE 802.11 mreže.

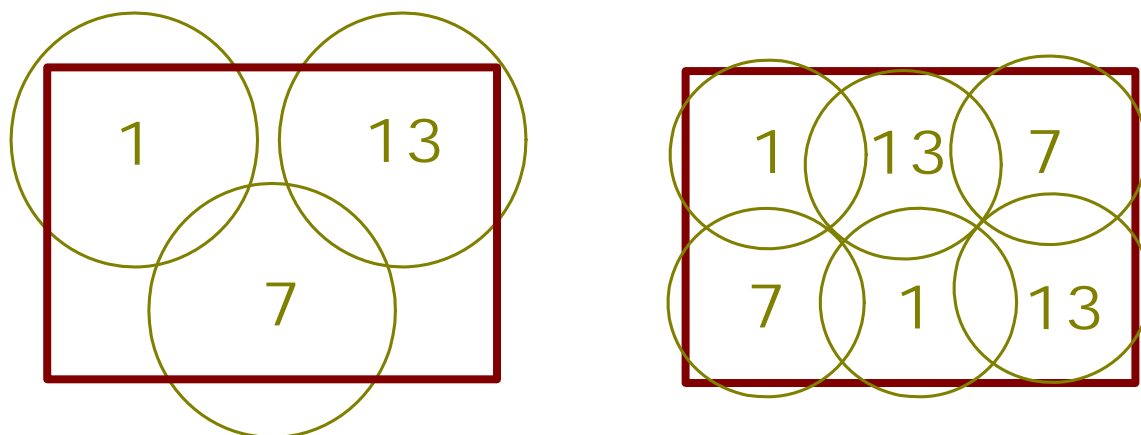
Mobilna postaja može istodobno biti pridružena samo jednoj pristupnoj točki. IEEE 802.11 norma ne postavlja ograničenje na broj mobilnih postaja koje mogu biti istodobno pridružene jednoj pristupnoj točki. U stvarnim izvedbama WLAN mreža, to ograničenje postoji ako se želi izbjeći zagušenje u mreži. Praktično se može računati da će se prihvatljive korisničke propusnosti moći osigurati kad je najviše 10–12 korisnika prijavljeno na istu pristupnu točku.



Slika 2.23. Jedna pristupna točka opslužuje više korisnika koji se nalaze u području njezina pokrivanja

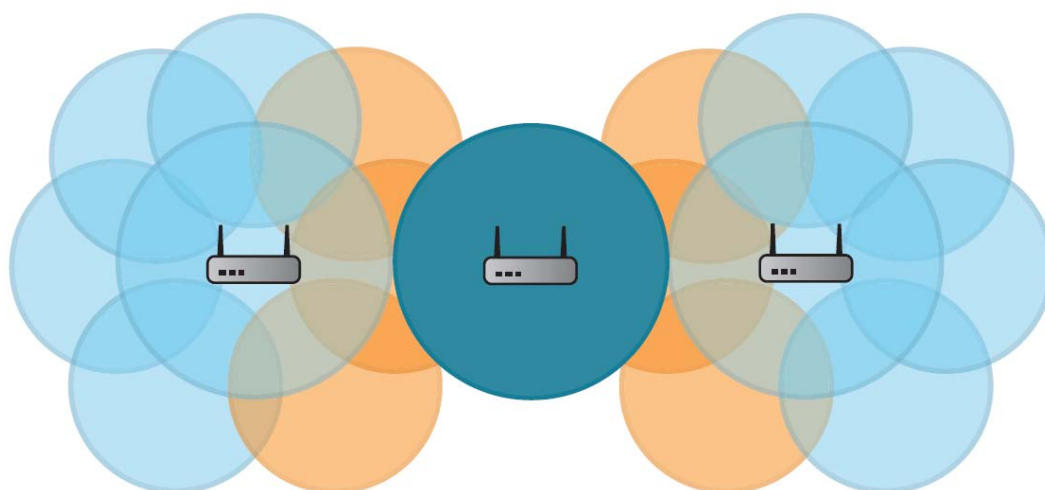
Potrebe za višim komunikacijskim kapacitetima rješavaju se postavljanjem više pristupnih točaka koje rade na različitim kanalima. U području 2,4 GHz raspolože se sa samo tri nepreklapajuća kanala što je dosta veliko ograničenje za postizanje visokih prijenosnih kapaciteta.

Kad se koristi više pristupnih točaka, radi pokrivanja većeg područja, važno je samo osigurati da prostorno susjedne pristupne točke, kojima se preklapa dio područja pokrivanja radijskim valovima, rade na različitim kanalima. Smanjenjem snage zračenja pristupne točke dobiva se mogućnost povećanja njihova broja. To rezultira boljim pokrivanjem cijeloga željenog područja, ali i opsluživanje većeg broja korisnika u tom prostoru.



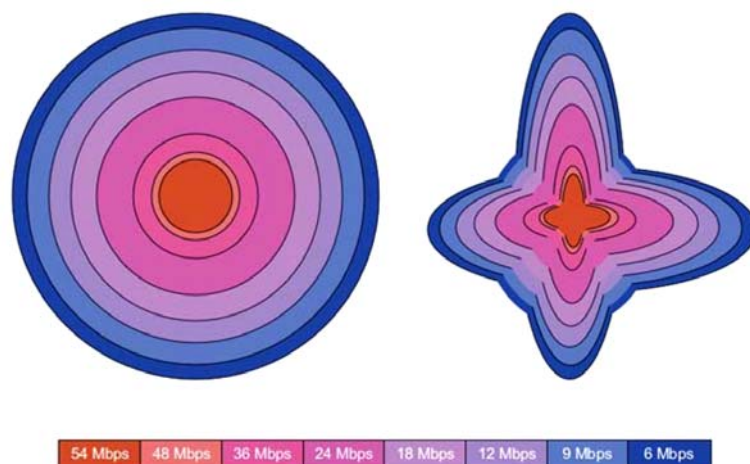
Slika 2.24. Primjer pokrivanja nekog prostora s tri odnosno šest pristupnih točaka i redni brojevi odgovarajućih radnih kanala u području 2,4 GHz

Valja, međutim, imati u vidu činjenicu da korisnički uređaji po starijim normama u području 2,4 GHz uvijek zrače istu snagu pa njihovo zračenje može biti uzrokom smanjenja propusnosti zbog primjene postupka za izbjegavanje sudara (CSMA/CA) do kojih dolazi kad zračenje korisničkog uređaja dolazi do dviju pristupnih točaka koje rade na istom kanalu. Ova se pojava može izbjeći ako se onemogući prekrivanje područja zračenja dvaju korisničkih uređaja koji su prijavljeni na različite pristupne točke, a koje rade na istom kanalu. Zahtjev za dovoljnom udaljenošću istokanalnih pristupnih točaka osigurava se postavljanjem jedne pristupne točke, koja radi na različitom kanalu, između dviju koje rade na istom kanalu.

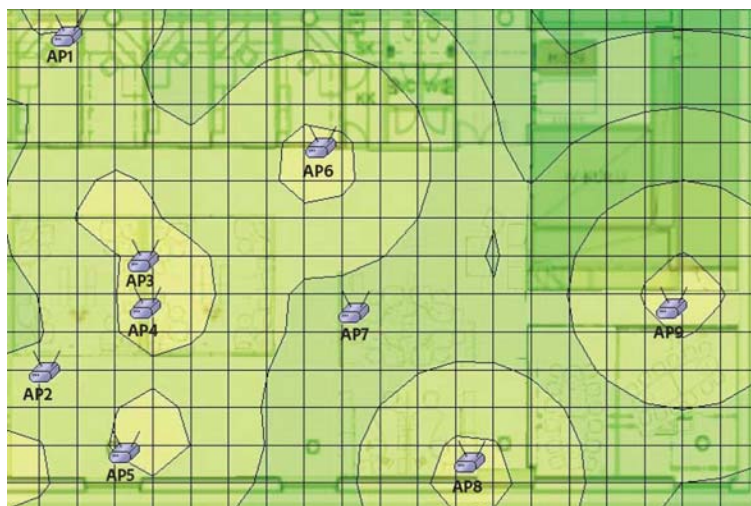


Slika 2.25. Između pristupnih točaka, koje rade na istom kanalu, mora se u svim smjerovima nalaziti barem jedna pristupna točka koja radi na nekome drugom kanalu

Ostvarive brzine prijenosa ovise i o kvaliteti veze između korisničkog uređaja i pristupne točke. To je razlogom opadanja brzine prijenosa pri povećanju udaljenosti jedinica koje komuniciraju. Zbog manje jakosti polja došlo bi do povećanja broja pogrešaka u prijenosu pa sustav u takvim situacijama koristi robusnije modulacijske postupke kojima se postižu manje brzine prijenosa.



Slika 2.26. Idealni oblik područja pokrivanja pristupne točke s neusmjerenom karakteristikom zračenja (lijevo) se često deformira u realnim uvjetima (desno) zbog raznih prepreka u okolini. Na slici su naznačene i ostvarive brzine prijenosa.



Slika 2.27. Primjer lociranja pristupnih točaka na jednom području u kojem postoje prepreke s naznačenima ostvarivim jakostima polja

Osim antena s neusmjerenim zračenjem pristupne točke mogu koristiti i antene koje pokrivaju samo jedan sektor ili pak jače usmjerene antene ovisno o potrebi.

2.5. Načela učinkovite dodjele frekvencija

Frekvencijska područja predviđena za rad sustava za širokopojasni prijenos podataka (poznatih kao WLAN ili RLAN), te za rad HIPERLAN sustava u Europi, navedena su u preporuci CEPT/ERC (*European Conference of Postal and Telecommunications Administration/ European Radiocommunications Committee*) pod nazivom CEPT/ERC/REC 70-03 Uporaba uređaja kratkog doseg (The Use Of Short Range Devices (SRD)) u njezinom Dodatku 3: Sustavi za širokopojasni prijenos podataka i HIPERLAN-ovi (*Annex 3: Wideband Data Transmission Systems and HIPERLANs*). Uređaji kratkog doseg (SRD, *Short Range Devices*) su uređaji za jednosmjernu ili dvosmjernu komunikaciju za koje postoji vrlo mala vjerojatnost da će izazvati smetnju s drugim sustavima.

Rad u frekvencijskom području 2400 – 2483,5 MHz pobliže je opisan u CEPT/ERC odluci ERC/DEC/(01)07 pod naslovom: ERC odluka od 12. ožujka 2001. o harmoniziranim frekvencijama, tehničkim značajkama i o izuzeću od individualne dozvole za uređaje kratkog doseg za RLAN mreže koji rade u frekvencijskom pojasu 2400–2483,5 MHz (*ERC Decision of 12 March 2001 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Short Range Devices used for Radio Local Area Networks (RLANs) operating in the frequency band 2400 – 2483.5 MHz*). U tu skupinu uređaja pripadaju i RLAN (WLAN) uređaji (SRD-RLAN). Za rad SRD-RLAN sustava u navedenom frekvencijskom području ne plaća se naknada za uporabu radijskih frekvencija, jer se radi o ISM području frekvencija.

Rad u frekvencijskim područjima 5150 MHz – 5350 MHz i 5470 MHz – 5725 MHz pobliže je opisan u CEPT/ERC odluci ERC/DEC/(99)23 pod naslovom: ERC odluka od 29. studenog 1999. o harmoniziranim frekvencijskim pojasevima namijenjenim za uvođenje HIPERLAN mreža (*ERC Decision of 29 November 1999 on the harmonised frequency bands to be designated for the introduction of High Performance Radio Local Area Networks (HIPERLANs)*). Za rad u navedenim frekvencijskim područjima plaća se naknada za uporabu radijskih frekvencija.

Odluka ERC/DEC/(99)23 odnosi se na HIPERLAN/1 i HIPERLAN/2 sustave, a pored frekvencijskih područja definira i ograničenja srednje ekvivalentne izotropno izračene snage (EIRP, *Equivalent Isotropic Radiated Power*). Srednja EIRP je definirana kao srednja radiofrekvencijska (RF) snaga odasлана bez prekida i mjerena tijekom perioda koji je dug u usporedbi s najnižom frekvencijskom komponentom odaslanog signala.

Parametri HIPERLAN sustava ovise o frekvencijskom području rada:

- 5150 MHz – 5350 MHz - srednja EIRP 200 mW; frekvencijsko područje pogodno za uporabu samo u zatvorenim prostorima uz obaveznu implementaciju dinamičkog odabira frekvencije (DFS, *Dynamic Frequency Selection*) i upravljanja odašiljačkom snagom (TPC, *Transmit Power Control*);
- 5470 MHz – 5725 MHz - srednja EIRP 1 W; frekvencijsko područje pogodno za uporabu u zatvorenim i otvorenim prostorima uz obaveznu implementaciju dinamičkog odabira frekvencije i upravljanja odašiljačkom snagom.

Propisi u Europi postavljaju implementaciju postupaka dinamičkog odabira frekvencije i upravljanja snagom odašiljača kao obvezu za komunikacijske sustave u području 5 GHz. Taj je zahtjev onemogućio primjenu mreža po IEEE 802.11a u Europi, jer ta norma ne uključuje takve opcije.

Sustavi u području 5 GHz moraju imati sposobnost izbjegavanja rada na zauzetim kanalima, koja im omogućava rad bez smetnji u frekvencijskim područjima koja dijele s drugim sustavima. To se osigurava dinamičkim prilagođavanjem rada sustava lokalnim uvjetima interferencije uz pomoć mehanizma dinamičkog odabira frekvencije koji treba implementirati u uređaje, a koji detektira smetnju od drugih sustava i izbjegava rad na istom kanalu na kome rade ti sustavi. DFS je potrebno implementirati i u slučaju nekoordiniranog rada više prostorno bliskih mreža u istome frekvencijskom području. Radi smanjenja smetnji, HIPERLAN sustavi npr. imaju mogućnost raspršenja odašiljačke snage na raspoloživi broj frekvencijskih kanala u širini pojasa od 330 MHz. Time se smanjuje mogućnost koncentriranja snage na jednom određenom kanalu, koji bi u tom slučaju djelovao kao izražena smetnja radu drugih sustava.

Komunikacijski sustavi u području 5 GHz u Europi moraju imati implementirano upravljanje odašiljačkom snagom (TPC) u uzlaznoj vezi, silaznoj vezi i izravnim vezama kako bi se smanjila mogućnost njihove interferencije. Svrha TPC je smanjenje izlazne snage do 3 dB relativno u odnosu na sustav koji nema implementaciju upravljanja odašiljačkom snagom. To znači da implementacija TPC uključuje sljedeće:

- podešavanje RF snage uzlazne veze na razinu dovoljnu za postizanje zadovoljavajuće komunikacije između dva radijska uređaja,
- podešavanje RF snage silazne veze na razinu dovoljnu za postizanje zadovoljavajuće komunikacije između pristupne točke i najudaljenijeg korisničkog uređaja od te pristupne točke.

2.6. Kompatibilnost sustava

Pri izgradnji radijske lokalne mreže može se koristiti oprema različitih proizvođača ako je deklarirano da su uređaji usklađeni sa zahtjevima iz pojedine norme koja se odnosi na WLAN. Korisnici mogu koristiti usluge postavljene mreže bez obzira na porijeklo svoje opreme za rad u WLAN-u. Jedino je ograničenje rad mreže i korisničke opreme po istoj skupini normi.

Tablica 2.11 Vrste korisničkih uređaja koje mogu raditi s pojedinim vrstama pristupnih točaka

Pristupna točka	Korisničko sučelje
802.11a	802.11a 802.11n
802.11b	802.11b 802.11g 802.11n
802.11g	802.11b 802.11g 802.11n
802.11n	802.11a 802.11b 802.11g 802.11n
HIPERLAN	HIPERLAN

U nastavku su primjeri situacija iz prakse kad uređaji mogu zajedno raditi iako nisu napravljeni po istoj inačici norme. Tablica 2.11. pokazuje da su sve nove inačice norme IEEE 802.11 povratno kompatibilne s ranijim inačicama, dok ne postoji kompatibilnost između mreža i uređaja po normi HIPERLAN i onih po IEEE 802.11.

2.7. Tipične aplikacije – primjeri

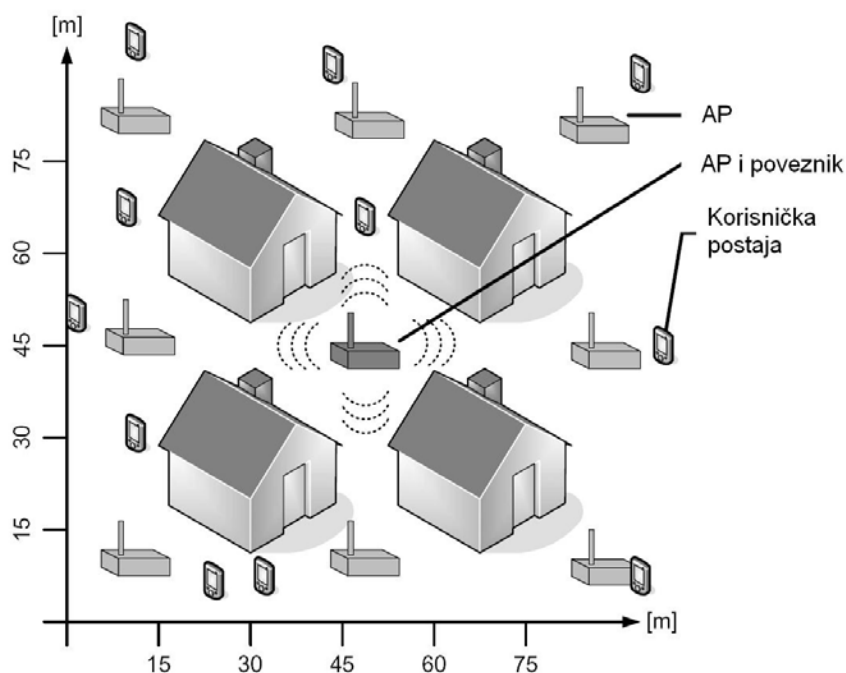
Uočavaju se tri glavna djelokruga korištenja WLAN-a:

- javni WLAN-ovi (PWLAN, *Public WLAN*), u koje su uključene i tzv. "hot-spot" mreže,
- poslovno umrežavanje,
- kućno umrežavanje.

2.7.1. Javne radijske lokalne mreže – PWLAN

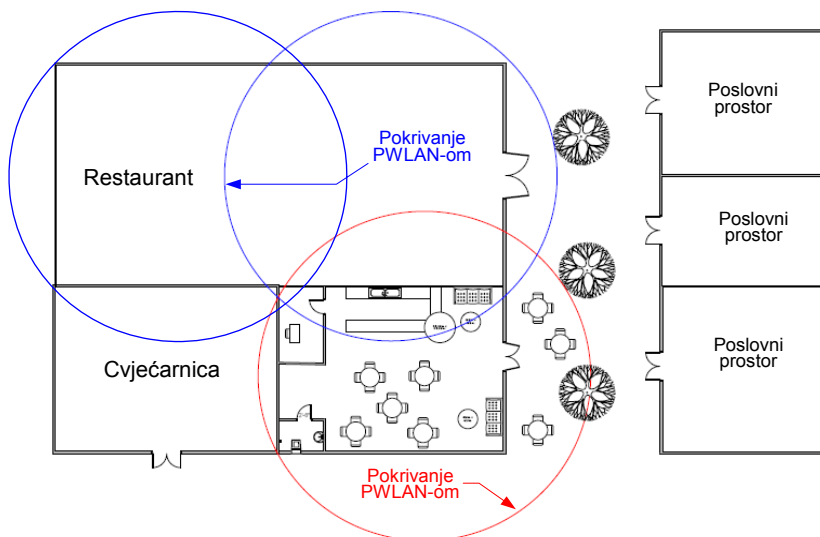
Javne radijske lokalne mreže postavljaju se na mjestima velike koncentracije korisnika (hot-spot mreže) kao što su zračne luke, željezničke i autobusne postaje, predvorja hotela, javne ustanove, konferencijski centri, restorani, kavane. One su posebno su zanimljive poslovnim ljudima izvan ureda za pristup korporativnoj mreži, Internetu i ostalim uslugama. Javna je mreža predviđena za "nomadsko" korištenje, tj. korisnik se uglavnom ne kreće nakon zauzimanja položaja i spajanja na WLAN. U javnoj su mreži ponuđene i lokalne usluge kao npr. neprekinuti prijenos videosignala (*video streaming*) i opće informacije o novostima i događajima (*infotainment*).

Na Slici 2.28. je primjer rješenja radijske lokalne mreže kojom se sa devet pristupnih točaka pokriva gusto urbanizirana četvrt nekog naselja. U ovome konkretnom primjeru uređaji pristupnih točaka smješteni su na stupovima semafora na križanjima ulica.



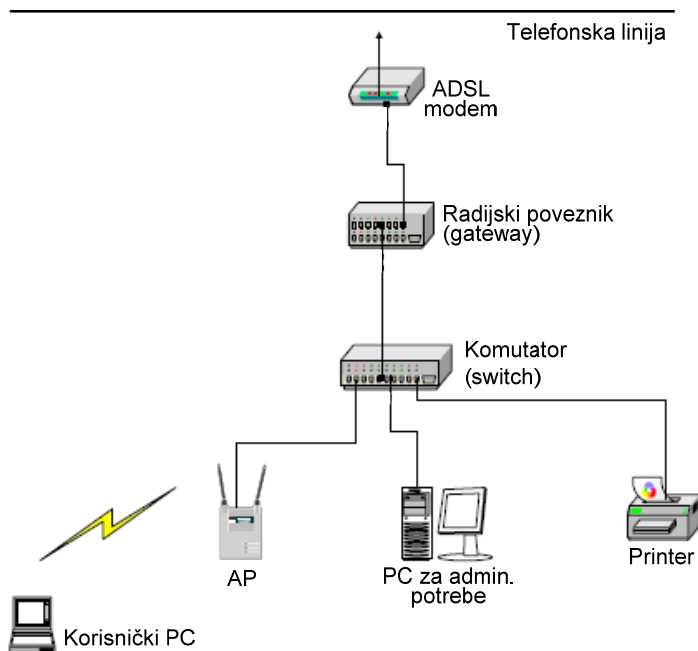
Slika 2.28. Primjer javne radijske mreže za gusto urbaniziranu malu četvrt

U primjeru sa Slike 2.29. prostor restorana pokriva se s dvije pristupne točke, dok je za pokrivanje male kavane dovoljna jedna pristupna točka. Ona će pokrivati i prostor terase ispred kavane. Vlasnici ugostiteljskih objekata često dopuštaju svojim korisnicima besplatni pristup Internetu putem postavljenog WLAN-a



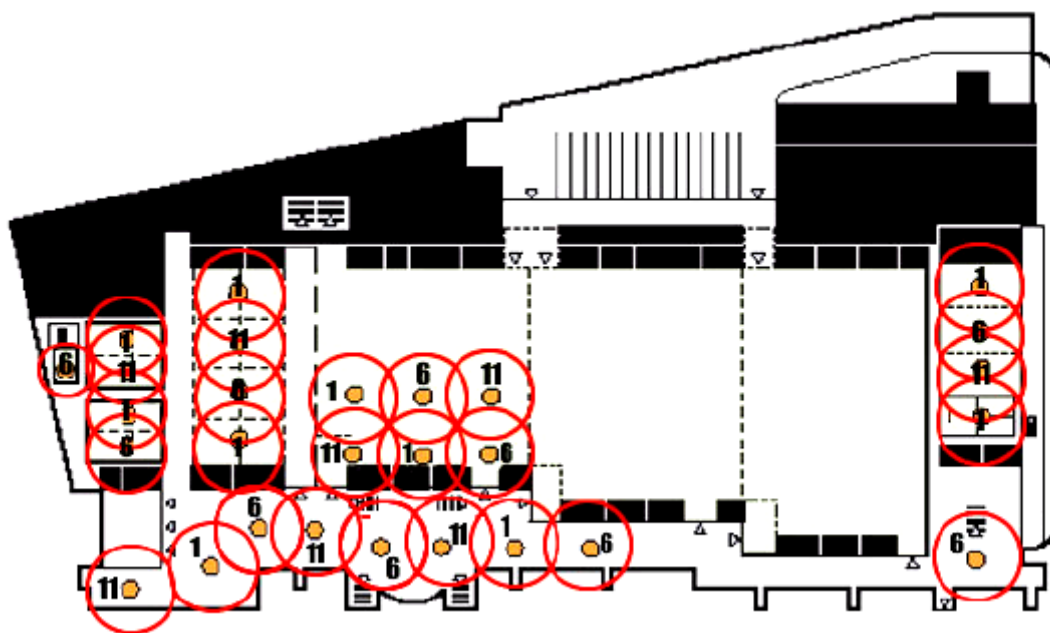
Slika 2.29. Javne mreže (PWLAN) vrlo su česte u restoranima ili kavanama

Topologija mreže za malu kavanu u osnovi odgovara topologiji koja se koristi za kućno umrežavanje. Pristup Internetu ostvaruje se preko javne telekomunikacijske mreže uz pomoć ADSL modema.



Slika 2.30. Topologija "hot-spot" mreže za malu kavanu iz primjera

Kvalitetno pokrivanje jednoga kongresnog centra puno je zahtjevniji zadatak. Najveći problem predstavlja očekivana velika koncentracija korisnika na relativno malom prostoru. Zbog toga pokrivanje treba riješiti s velikim brojem pristupnih točaka kako bi se svakom korisniku mogla dodijeliti zadovoljavajuća propusnost. Ograničeni broj RF kanala (najviše 3 u pojasu 2,4 GHz) dodatna su poteškoća u planiranju mreže koja će zadovoljiti potrebe sudionika skupa.



Slika 2.31. Zbog specifičnih zahtjeva kongresni se centar pokriva s velikim brojem AP

Sveučilišta sve više napuštaju mreže hot-spot vrste u korist mreže koja pokriva cijeli kampus. Takva *sveučilišna mreža* ima osobine neke vrste javne mreže iako joj je pri stup ograničen na korisnike sa sveučilišta ili one koji su u uskoj vezi s njim. Kvalitetno pokrivanje cijelog kampusa pravi je izazov za projektante radijskih lokalnih mreža. Radi se o dosta velikom prostoru s većim brojem zgrada i ponegdje velikom koncentracijom korisnika kao što je to u predavaonicama, laboratorijima, knjižnicama, zajedničkim prostorima, spavaonicama i sl. potreba za gustim postavljanjem pristupnih točaka izaziva istokanalne smetnje, jer se raspolaže samo sa tri nepreklapajuća RF kanala kad se mreža gradi na 2,4 GHz.

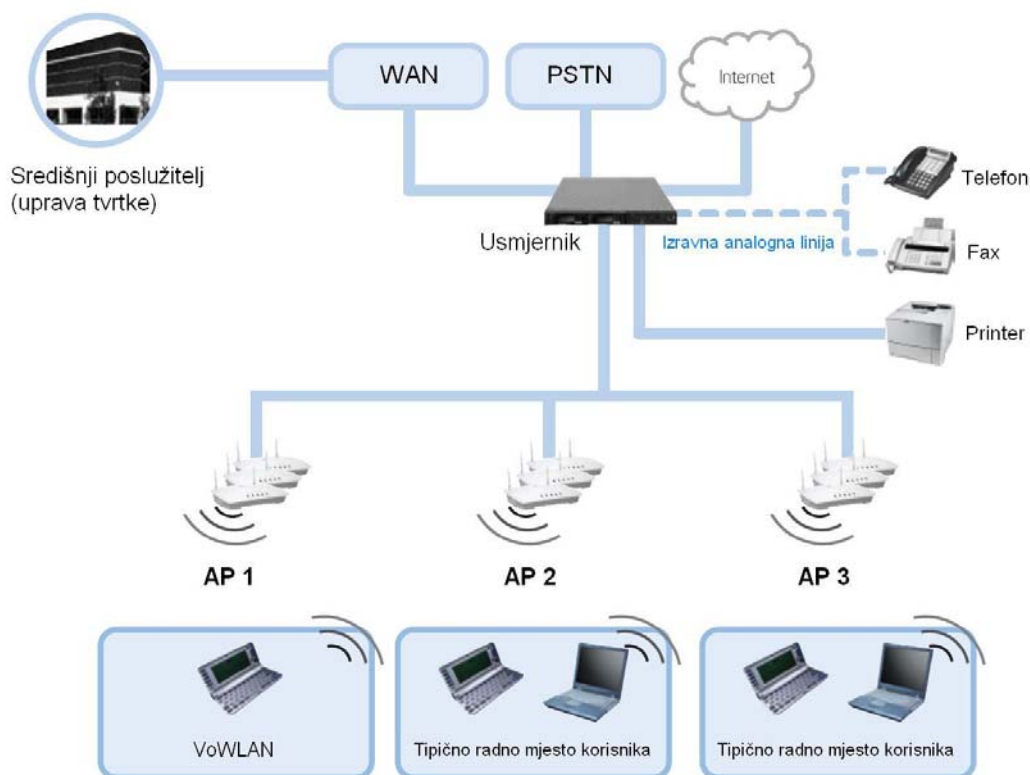
Specifičnost je sveučilišnih mreža postojanje različitih skupina korisnika koje postavljaju visoke, ali različite zahtjeve na mrežu. Glavne skupine korisnika su studenti, fakultetsko osoblje, gostujući istraživači itd. Svaka skupina zahtijeva različite politike pristupa

mreži kako bi se održala potrebna sigurnost različitih mrežnih resursa. Sveučilišta, međutim, nemaju veliki nadzor nad korisničkim uređajima pa je zato teško primijeniti i održavati sigurnosne mehanizme koji zahtijevaju softver kod korisnika.

Korisnici sveučilišnih mreža ne zadovoljavaju se jednostavnim aplikacijama. Za korisnike korporativnih WLAN-ova osnova je pristup Internetu, dok korisnici na sveučilištu eksperimentiraju s vrlo naprednim aplikacijama, kao što je na primjer radijski VOIP (*Voice Over Internet Protocol*). Takve aplikacije zahtijevaju visoku kvalitetu usluge kako bi se osigurala pouzdanost ujedno s neprekinutim prekapčanjem s jedne AP na drugu kad se korisnik giba po kampusu.

2.7.2. Korporativna mreža

Korporativni WLAN služi kao radijsko proširenje fiksnog LAN-a omogućavajući mobilnost poslovnih korisnika i fleksibilnost radne snage. Ponekad se izgrađuje izdvojeni segment mreže kad postoje aktivnosti tvrtke na prostoru koji je izvan poslovnih prostora tvrtke, na nekom gradilištu npr. U korporativnoj mreži, sagrađenoj oko Ethernet LAN-a i IP usmjernika, WLAN je zadnji segment između mobilnog terminala (MT) i mreže.



Slika 2.32. Nova rješenja za manje urede integriraju fiksni i radijski dio korporativnog LAN-a

Tradicionalna rješenja primjenjivala su potpuno odvojene mreže za prijenos govora i za prijenos podataka. To je značilo potrebu za dvostrukim ožičenjem kao i dvostruku mrežnu opremu; kućnu centralu (PBX, *Private Branch eXchange*) za govorne usluge i komutator (*switch*) za podatkovne usluge. Nova rješenja integriraju fiksni i radijski dio LAN infrastrukture. Visokokvalitetni radio uzima se kao primarni pristupni postupak u slučajevima manjih ureda. On opslužuje mobilne korisnike s prijenosnim računalima, ručnim terminalima ili drugim uređajima, uslugama, govora, podataka i videa (Slika 2.32.).

Kontroler radijske mreže integriran je u usmjernik koji konfigurira pristupne točke na temelju postojećih predložaka. Na taj se način osigurava željena inačica operativnog sustava, sigurnosne i ostale postavke kao i usluge. Uz pomoć sučelja primarne brzine (PRI, *Primary Rate Interface*) veže se korporativna mreža na javnu telefonsku mrežu (PSTN, *Public Switched Telephone Network*). Mreža širokih područja (WAN, *Wide Area Network*) priključena je uz pomoć posebnog sučelja. Vrsta sučelja ovisi o davatelju usluge i to može biti ATM, frame relay i sl.

Opći zahtjevi na ovakvu korporativnu mrežu mogu se podijeliti u nekoliko skupina:

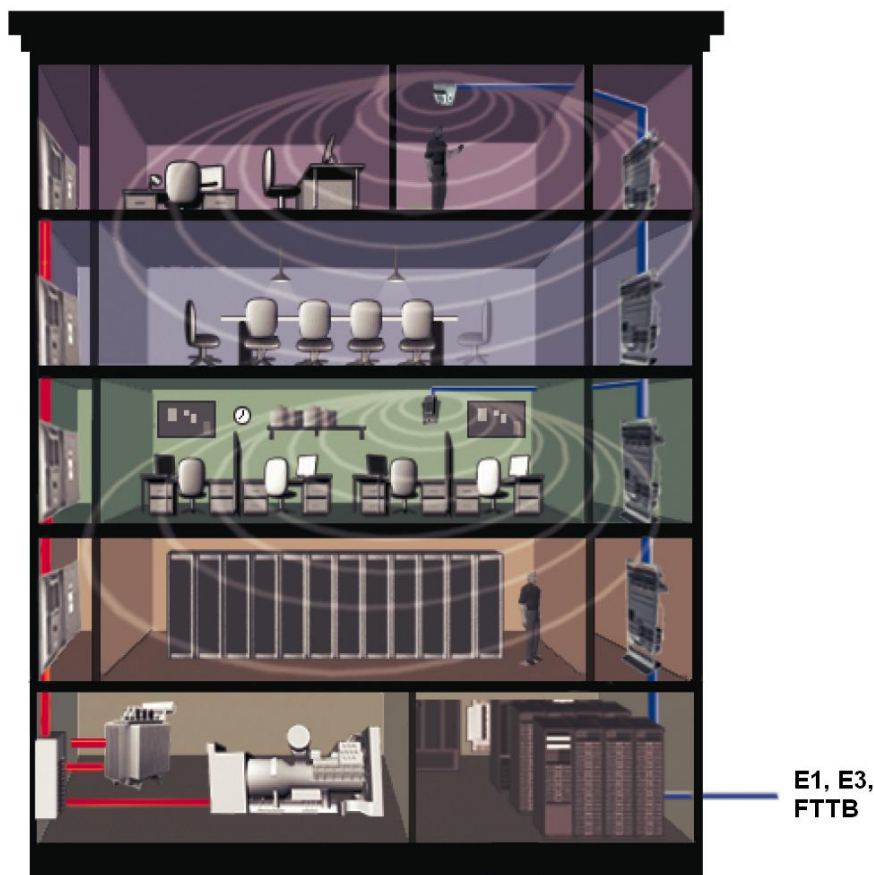
- zahtjevi na WLAN kao primarni način pristupa,
 - prostori s visokom raspoloživosti veze i brzim ponovnim uspostavljanjem veze nakon prekida zbog pogreške u uređaju ili smetnje,
 - mogućnosti spajanja u području 5 GHz po 802.11a/n i/ili u području 2,4 GHz po 802.11b/g/n,
 - prihvaćanje svih vrsta terminala: stolna računala, prijenosna računala, dlanovnici i Wi-Fi telefoni,
 - jednostavna instalacija i upravljanje pristupnim točkama,
 - poslužitelji za središnje upravljanje i praćenje odnosno bilježenje svih korisnika, otkrivanje i rješavanje različitih sigurnosnih napada,
- zahtjevi na fiksni LAN,
 - dovoljan broj 100/1000 priključaka na komutatoru za priključivanje poslužitelja, printera i drugih uredskih uređaja (najmanje 10),
 - potpora za formiranje prividnih LAN-ova radi razdvajanja govornih i podatkovnih usluga,
 - potpora za razne IP protokole,
- zahtjevi na WAN,
 - potpora raznim WAN tehnologijama (ATM, ISDN, ...),

- postizanje dovoljnih brzina prijenosa za male urede, tipično od 1 do 45 Mbit/s,
- klasifikacija i označavanje paketa na osnovu QoS,
- šifriranje po IPsec,
- potpora za slanje poruke na više računala (*multicast*),
- istodobni prijenos različitih signala govora preko iste veze (*voice trunking*),
- opći zahtjevi,
 - mogućnost središnjeg upravljanja i siguran pristup upravljanju,
 - potpora raznim vrstama pristupnih lista upravljanja (ACLs, *Access Control Lists*).

Na Slici 2.29. prikazan je primjer kako je korporativna radijska lokalna mreža po 802.11 integrirana u opću strukturu širokopo-
jasnih radijskih komunikacija.



Slika 2.33. Korporativna mreža dio je šire širokopo-
jasne radijske strukture



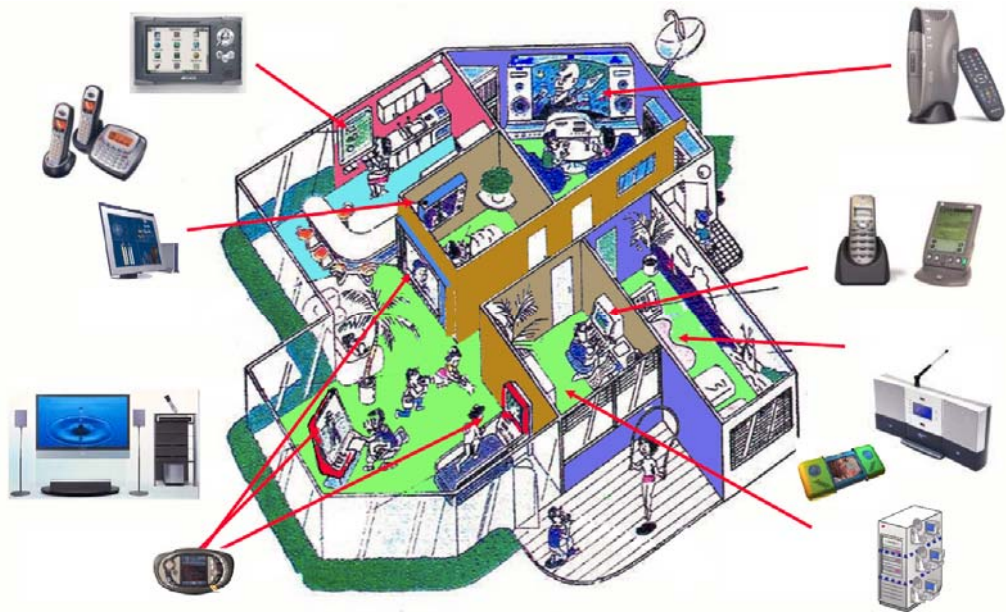
Slika 2.34. Višekatni poslovni objekt pokriven je radijskim signalom sa dvije pristupne točke, (FTTB, *Fiber To The Building*).

Na Slici 2.34. je primjer višekatnoga manjeg poslovnog objekta. Do objekta dolaze komunikacijske linije E1 ili E3 ili pak eventualno optičko vlakno (FTTB) preko kojih je korporativna mreža vezana na javnu mrežu. Sva oprema vezana za komunikacije smještena je u jednoj prostoriji koja se nalazi u podrumu ili na prvom katu. Na narednom katu je računarska oprema (poslužitelji i sl.).

Radni prostori, bilo da se radi o dvorani za sastanke, dvorani za prezentacije ili pak radnim stolovima zaposlenika, nalaze se na tri najviša kata (razine 3, 4 i 5). Pristupne točke korporativne mreže nalaze se na 3. i na 5. razini s tim da AP na 5. razini pokriva signalom i dvoranu za sastanke na razini 4.

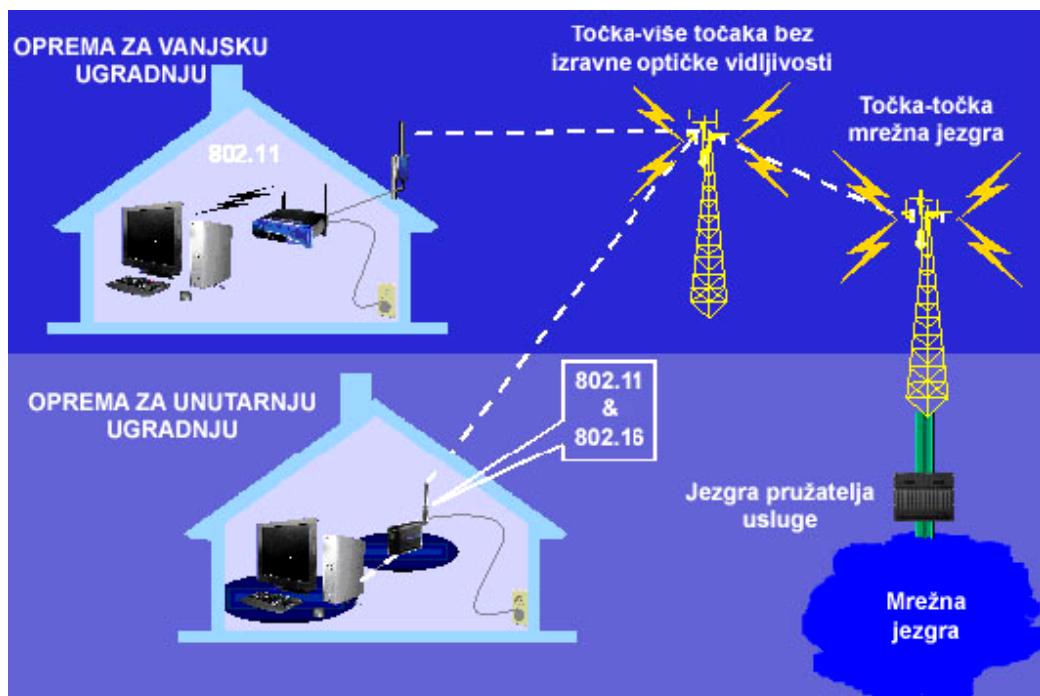
2.7.3. Kućno umrežavanje

Mreže za kućno umrežavanje najjednostavnije su vrste i one sadrže neke od elemenata prikazanih na Slikama 2.13. i 2.30. Osim za pristup Internetu i uslugama koje pruža operator pristupne mreže WLAN se može koristiti i za komunikacije unutar kuće (stana).



Slika 2.35. U kući se nalazi mnogo uređaja koji se mogu povezati s kućnom radijskom lokalnom mrežom.

Na Slici 2.36. dva su primjera radijskog spajanja kućne mreže na mrežu davatelja usluge pristupa Internetu (ISP, *Internet Service Provider*).



Slika 2.36. Priključivanje kućne mrežne infrastrukture na opći sustav širokopojasnih radijskih komunikacija

2.8. Mjerenja radijskih parametara od interesa za nacionalnog regulatora

Za nacionalnog telekom regulatora interesantne su uglavnom RF karakteristike jedinica radijske lokalne mreže kao što su:

- razina efektivne izračene snage,
- vršna gustoća snage,
- zauzeto frekvencijsko područje,
- sporedne emisije.

Osim navedenih parametara u nastavku je prikazano još nekoliko važnih karakteristika uređaja mreže.

2.8.1. Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika uređaja koji rade u području 2,4 GHz

Uvjete na tehničke karakteristike WLAN uređaja u ISM području od 2,4 GHz kao i postupke ispitivanja regulira europska norma:

ETSI EN 300 328-1: *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband Transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using spread spectrum modulation techniques; Part 1: Technical characteristics and test conditions.*

U nastavku su granične veličine iz norme.

- Efektivna izotropno izračena snaga (EIRP):
 - EIRP može biti jednak ili manji od:
 - -10 dBW odnosno 100 mW (ETSI EN 300 328-1),
 - 100 mW (Odluka o vrstama radijskih postaja za koje se ne izdaje dozvola, NN 75/1997).
- Vršna gustoća snage (najviša trenutna razina gustoće snage u [W/Hz] pri maksimumu ovojnice signala):
 - za uređaje koji koriste FHSS postupak najveći dopušteni EIRP iznosi:
 - -10 dBW (100 mW) u pojasu od 100 kHz,
 - za uređaje koji koriste druge postupke najveći dopušteni EIRP iznosi:
 - -20 dBW (10 mW) u pojasu od 1 MHz.
- Zauzeto frekvencijsko područje:

- granične frekvencije unutar pojasa od 2,4 GHz – 2,4835 GHz.
 - Na graničnim frekvencijama zauzetog pojasa spektralna gustoća snage EIRP mora biti manja od -80 dBm/Hz (-30 dBm ako se mjeri u pojasu širine 100 kHz).
- Sporedne emisije odašiljača:

Tablica 2.12. Granične vrijednosti razina uskopojasnih sporednih emisija

Frekvencijski pojas	Za vrijeme odašiljanja	Kad ne odašilje
30 MHz – 1 GHz	-36 dBm	-57 dBm
1 GHz – 12,75 GHz	-30 dBm	-47 dBm
1,8 GHz – 1,9 GHz	-47 dBm	-47 dBm
5,15 GHz – 5,3 GHz		

Uskopojasne sporedne emisije su npr. one od lokalnog oscilatora. Širina pojasa, u kojem se mjere emisije, može se uzeti vrlo malom.

Tablica 2.13. Granične vrijednosti razina širokopojasnih sporednih emisija

Frekvencijski pojas	Za vrijeme odašiljanja	Kad ne odašilje
30 MHz – 1 GHz	-86 dBm/Hz	-107 dBm/Hz
1 GHz – 12,75 GHz	-80 dBm/Hz	-97 dBm/Hz
1,8 GHz – 1,9 GHz	-97 dBm/Hz	-97 dBm/Hz
5,15 GHz – 5,3 GHz		

Sporedne emisije prijmnika:

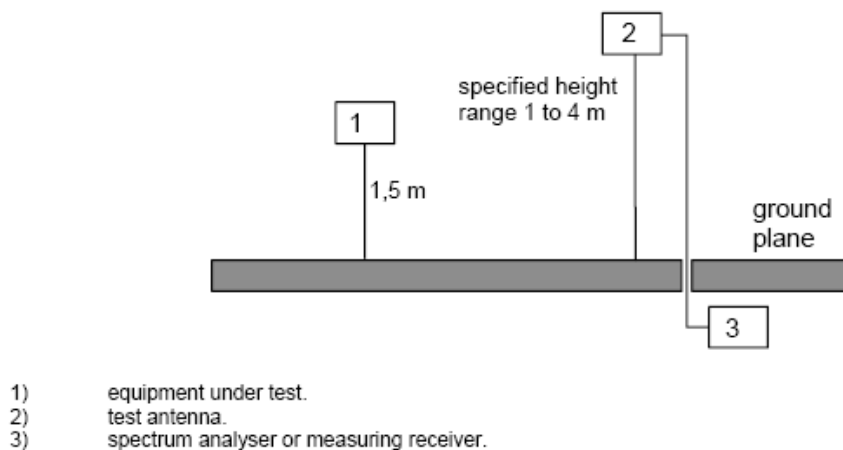
Tablica 2.14. Granične vrijednosti razina sporednih emisija prijmnika

Frekvencijski pojas	Granične vrijednosti za	
	uskopojasne emisije	širokopojasne emisije
30 MHz – 1 GHz	-57 dBm	-107 dBm/Hz
1 GHz – 12,75 GHz	-47 dBm	-97 dBm/Hz

2.8.2. Mjerenje osnovnih parametara jedinica radijske lokalne mreže na 2,4 GHz

Za nacionalnog regulatora ili za planera mreže od značaja je mjerenje radijskih parametara pristupne točke. Mjerenje odgovarajućih parametara terminalnih uređaja provodi se samo u nekim posebnim situacijama.

Norma ETSI EN 300 328 predviđa mjerenja signala na izlaznom (antenskom) priključku uređaja. Mjerenja zračenog signala obavljaju se samo iznimno i to onda ustrojem kako je navedeno u normi (Slika 2.37.).



Slika 2.37. Ustroj za mjerenje parametara WLAN-a iz zračenog signala prema ETSI EN 300 328

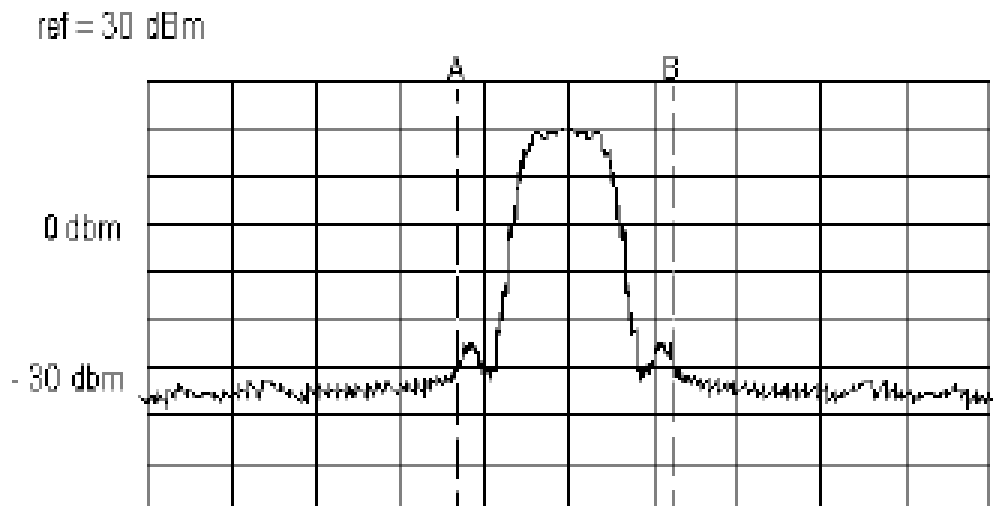
Za svaku radijsku tehnologiju u novije se vrijeme izrađuju posebni mjerni instrumenti (*site master*). U nastavku navodimo samo mjerne postupke koji ne zahtijevaju specijalizirani instrumentarij, jer smatramo nepraktičnim oslanjati se na specijalizirane instrumente za svaku tehnologiju posebno.

- Mjerenje *efektivne izotropno izračene snage* (EIRP).
 - Sprežnikom se odvaja dio izlazne snage uređaja. Taj odvojeni signal privodi se detektoru i osciloskopu radi promatranja ovojnice signala. Parametri ovojnice signala poslužit će za određivanje radnog ciklusa odašiljača x koji odgovara relativnom trajanju intervala u kojem uređaj odašilje odnosno,

$$x = \frac{T_{x_{on}}}{T_{x_{on}} + T_{x_{off}}}$$
 Radni ciklus uređaja mora biti veći od 0,1 ($x > 0,1$).
 - Izmjeri se srednja izlazna snaga A odašiljača uređaja npr. pomoću instrumenta s termokrižem.
 - Efektivna izotropno izračena snaga izračunava se tad iz izraza:

$$EIRP = A + G + 10 \log \frac{1}{x}, \text{ [dBW]}$$
 Sa A je označena razina izmjerene srednje snage odašiljača, izražena u dBW, a sa G dobitak antene u dBi.
- Mjerenje *vršne gustoće snage*.
 - Mjeri se uz pomoć analizatora spektra i mjerača snage koji se priključuje na MF izlaz analizatora spektra.
 - Kalibracija mjernog sustava provodi se pomoću CW (*Continuous Wave*) signala iz signal generatora uz sljedeće parametre analizatora spektra:
 - središnja frekvencija: jednaka frekvenciji CW signala;
 - RBW: 100 kHz za FHSS, 1 MHz za DSSS;
 - VBW: jednako RBW;
 - način detekcije: pozitivno vršno;
 - averaging: isključeno;
 - span: 0 Hz (*zero span*);
 - reference level: podesiti tako da se dobije prikaz na sredini pokaznika.
 - Kad se priključi signal iz EUT (*Equipment under Test*) mjerič snage pokazuje traženu veličinu vršne gustoće snage.

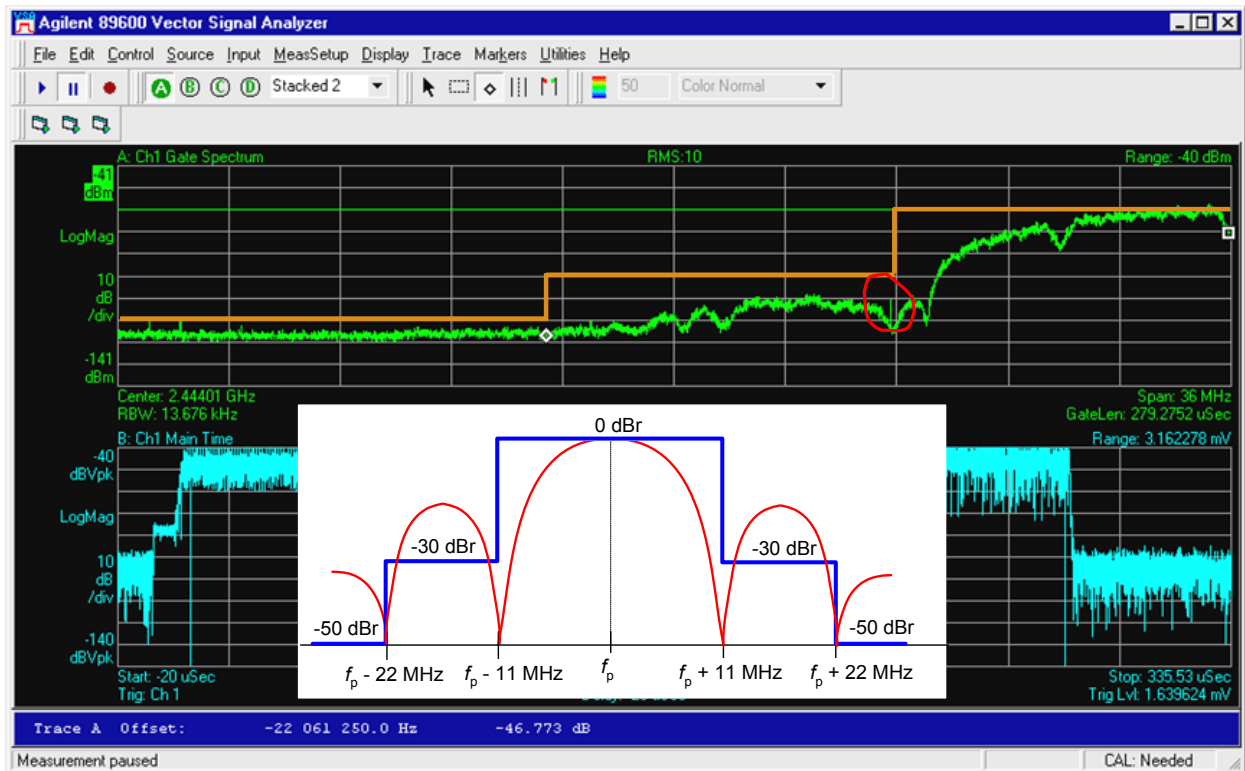
- Kad analizator spektra ima mogućnost mjerenja spektralne gustoće snage onda se ne mora koristiti ovaj postupak.
- Mjerenje *zauzetog pojasa frekvencija*.
 - Mjeri se uz pomoć analizatora spektra uz uključenu opciju "averaging" na najnižoj i na najvišoj radnoj frekvenciji unutar ISM pojasa. Potrebno je pustiti najmanje 50 otklona zrake prije određivanja mjernih vrijednosti.
 - Granične frekvencije zauzetog područja određuju se kao frekvencije na kojima je razina snage iz uređaja jednaka -80 dBm/Hz. Kad se mjeri uz postavljenu rezoluciju RBW = 100 kHz tad se određuju frekvencije A i B na kojima je snaga zračenja uređaja jednaka -30 dBm (kao na Slici 2.38.).



Slika 2.38. Primjer određivanja zauzetog pojasa frekvencija iz spektra zračenog signala

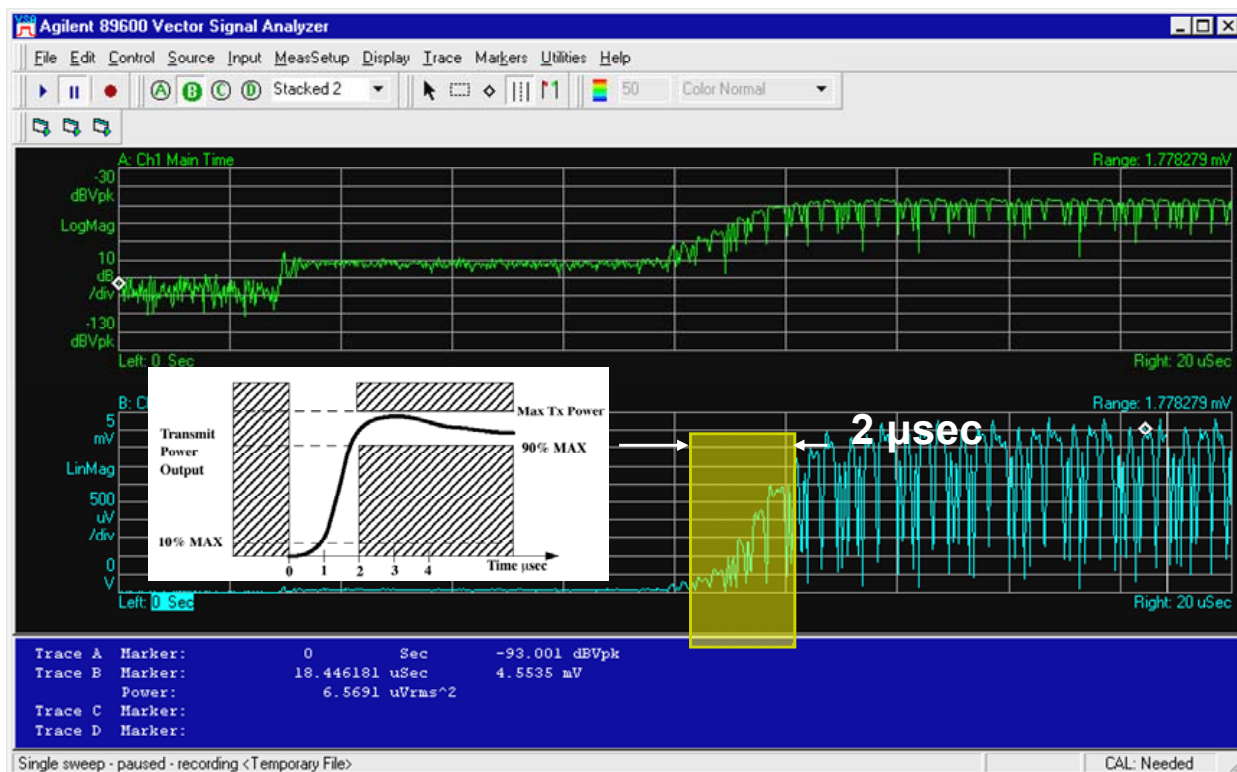
- Mjerenje *sporednih emisija odašiljača WLAN uređaja*.
 - Mjeri se uz pomoć analizatora spektra na najnižoj i na najvišoj radnoj frekvenciji (odnosi se posebno na FHSS).
 - Potrebno je pregledati spektar signala izvan radnoga područja frekvencija i potražiti komponente signala više od razine koja je 6 dB ispod propisane granične vrijednosti.
 - Analizator spektra postavlja se kako slijedi:
 - RBW: 100 kHz;
 - VBW: jednako RBW;
 - način detekcije: pozitivno vršno;
 - averaging: isključeno;

- span: 100 MHz;
- sweep time: 1 s.
- Određivanje karaktera sporedne emisije radi primjene odgovarajuće granične vrijednosti obavlja se postupkom kako slijedi:
 - Kad se pronade neka sporedna emisija tad se smanji RBW na 30 kHz.
 - Ako se razina mjerenog signala promijeni za manje od 2 dB onda se radi o uskopojasnoj emisiji, a ako je promjena veća onda je to širokopojasna emisija.
- Mjerenje *sporednih emisija prijamnika* WLAN uređaja.
 - Mjerni postupak u potpunosti odgovara postupku za odašiljač.
 - Mjerenje je potrebno provesti kad je prijamnik u stanju prijama kao i kad je u stanju mirovanja (*stand by*).
- Primjer mjerenja *spektra u kanalu*, 802.11b.
 - Mjerenje ispunjenosti uvjeta iz propisane spektralne maske temeljno je mjerenje RF spektra. Ono služi ujedno i za mjerenje zauzetoga pojasa frekvencija.
 - Primijenjeni analizator spektra mora imati sposobnost okidanja početka prebrisavanja frekvencija kako bi se mjerio signal samo u vremenskom intervalu kad on postoji (kad ima izlazne snage). Postavljene uvjete za mjerenje ispunjava vektorski analizator signala, jer on izračunava spektar pomoću FFT algoritma i ne koristi postupak prebrisavanja frekvencija. Problem ove vrste mjernih uređaja je nedovoljna širina pojasa pa se ne može izmjeriti cijela maska u jednom mjerenju. Zato se primjenjuje postupak u dva koraka.
 - Strogo gledano u zahtjeve iz norme trebalo bi koristiti analizator spektra s prebrisavanjem frekvencija.



Slika 2.39. Mjerenje spektralnih osobina signala vektorskim analizatorom signala

- Primjer mjerenja *porasta snage bursta*, 802.11b.
 - Provjera ispunjavanja uvjeta iz maske o vremenskim promjenama snage signala pri porastu snage i pri padu snage također zahtijeva mjerenje snage ovisno o vremenu. Kako je maska definirana u linearnom mjerilu potrebno je da prikaz na analizatoru signala bude također postavljen u linearno mjerilo.
 - Valja uočiti da granice iz norme ne uzimaju u obzir modulaciju koju stvaraju podaci. Mjerenja u ispitnom modu nisu jednoznačno određena, jer rezultati ovise o softveru kojim se uređaj postavlja u ispitni način rada.



Slika 2.40. Mjerenje vremenskih promjena snage signala i odgovarajući zahtjevi iz norme

2.8.3. Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika HiperLAN uređaja

Uvjete na tehničke karakteristike WLAN uređaja u području od 5 GHz kao i postupke ispitivanja regulira europska norma:

ETSI EN 301 893: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive.*

U nastavku su granične veličine iz norme.

Frekvencije nosilaca odgovaraju sredini svakog od 8 + 11 kanala:

- dopušteno odstupanje frekvencije nosioca iznosi do ± 20 ppm.

Tablica 2.15. Središnje frekvencije kanala u području 5 GHz

Frekvencije nosilaca [MHz]	
5 180	5 500
5 200	5 520
5 220	5 540
5 240	5 560
5 260	5 580
5 280	5 600
5 300	5 620
5 320	5 640
	5 660
	5 680
	5 700

Srednji EIRP i srednja gustoća EIRP-a:

- granične vrijednosti na najvećoj snazi,

Tablica 2.16. Granične vrijednosti snage

Frekvencijski pojas	EIRP	Gustoća EIRP-a
5150 MHz – 5350 MHz	23 dBm	10 dBm/MHz
5470 MHz – 5725 MHz	30 dBm	17 dBm/MHz

Sporedne emisije odašiljača:

Tablica 2.17. Granične vrijednosti sporednih emisija odašiljača WLAN uređaja

Frekvencijski pojas	Najveća snaga (ERP)	Pojas mjerenja
30 MHz – 47 MHz	-36 dBm	100 kHz
47 MHz – 74 MHz	-54 dBm	100 kHz
74 MHz – 87,5 MHz	-36 dBm	100 kHz
87,5 MHz – 118 MHz	-54 dBm	100 kHz
118 MHz – 174 MHz	-36 dBm	100 kHz
174 MHz – 230 MHz	-54 dBm	100 kHz
230 MHz – 470 MHz	-36 dBm	100 kHz
470 MHz – 862 MHz	-54 dBm	100 kHz
862 MHz – 1 GHz	-36 dBm	100 kHz
1 GHz – 5,15 GHz	-30 dBm	1 MHz
5,35 GHz – 5,47 GHz	-30 dBm	1 MHz
5,725 GHz – 26,5 GHz	-30 dBm	1 MHz

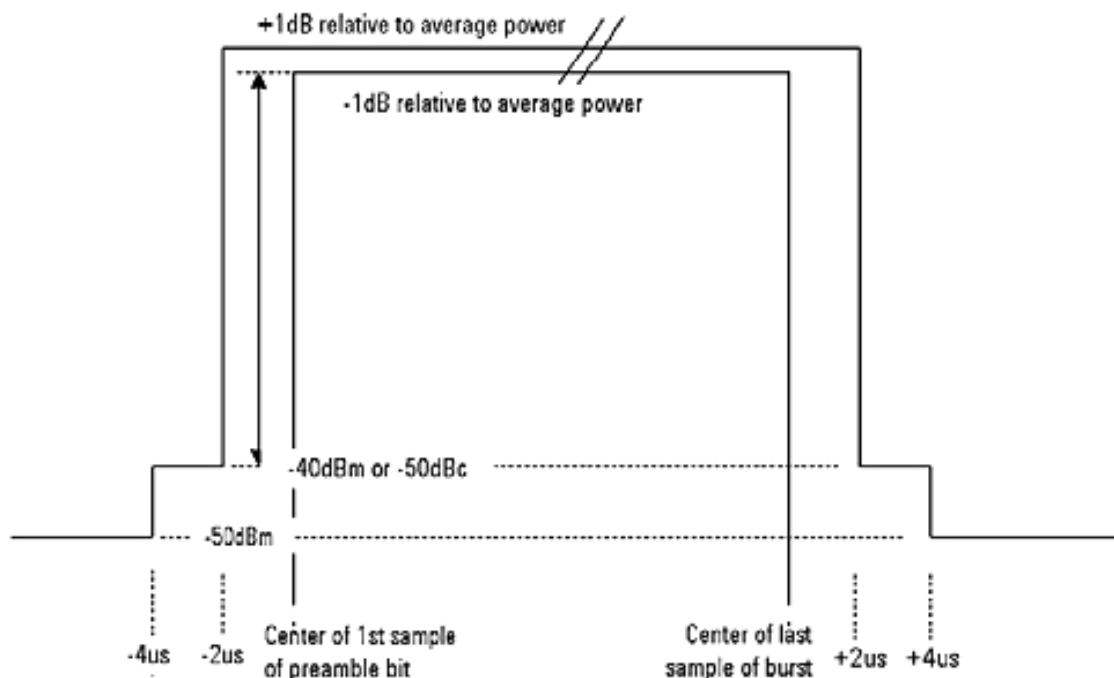
Sporedne emisije prijavnika:

Tablica 2.18. Granične vrijednosti sporednih emisija prijavnika kad je WLAN uređaj u stanju prijama

Frekvencijski pojas	Najveća snaga (ERP)	Pojas mjerenja
30 MHz – 1 GHz	-57 dBm	100 kHz
1 GHz – 26,5 GHz	-47 dBm	1 MHz

Vremenske promjene snage:

- vremenske promjene snage u intervalu porasta snage, u intervalu dok traje emisija i u intervalu pada snage moraju se nalaziti unutar granica prema Slici 2.41.



Slika 2.41. Maska unutar koje se moraju nalaziti vremenske promjene izlazne snage uređaja

2.8.4. Mjerenje osnovnih parametara jedinica HiperLAN-a

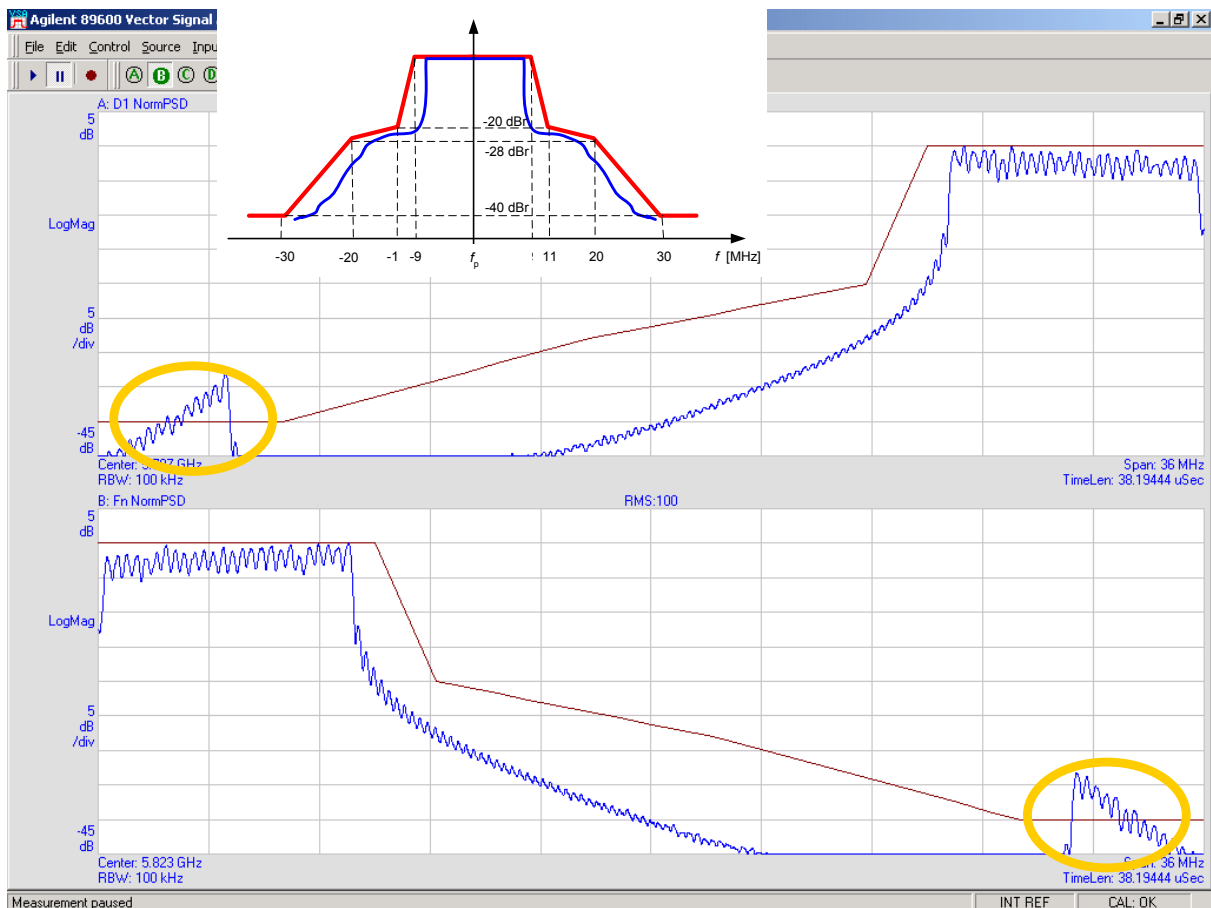
Norma ETSI EN 301 893 predviđa mjerenja signala na izlaznom (antenskom) priključku uređaja kad je to moguće. Mjerenja zračenog signala obavljaju se samo iznimno i to onda ustrojem kako je navedeno u normi (jednak je onom za 2,4 GHz, Slika 2.37.).

U nastavku navodimo samo mjerne postupke koji ne zahtijevaju specijalizirani instrumentarij.

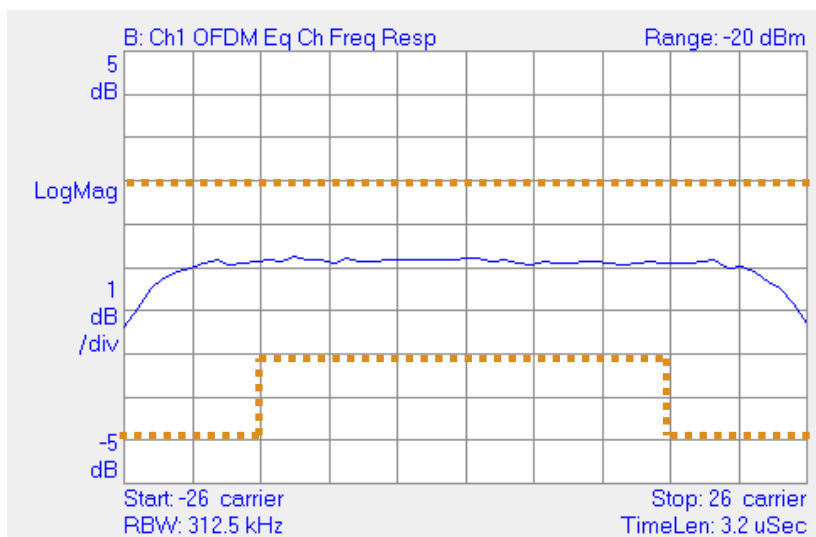
- Mjerenje *frekvencije nosilaca*.
 - Kod uređaja koji mogu raditi bez modulacije frekvencija se mjeri brojačem kad nosilac nije moduliran.
 - Kod uređaja koji ne mogu raditi bez modulacije frekvencija se mjeri analizatorom spektra. Ona se određuje kao srednja vrijednost dviju frekvencija, jedne više i jedne

niže frekvencije od frekvencije nosioca, na kojima snaga moduliranog signala padne na razinu -10 dBc.

- Mjerenje *efektivne izotropno izračene snage* (EIRP).
 - Mjeri se pri najvišoj razini snage postupkom koji je jednak onome koji je opisan u odjeljku 2.8.2. o mjerenjima uređaja na 2,4 GHz.
- Mjerenje *gustoće snage*.
 - Mjeri se postupkom kao i na 2,4 GHz.
 - Odašiljač mora biti uključen barem 10 μ s prije početka mjerenja.
 - Pri podešavanju analizatora spektra odabire se,
 - RBW: 1 MHz.
- Mjerenje *sporednih emisija odašiljača*.
 - Mjeri se analizatorom spektra uz,
 - osjetljivost: barem 6 dB ispod granične vrijednosti,
 - VBW: 1 MHz,
 - opcija "*averaging*" ili "*peak hold*": uključena.
- Mjerenje *spektra u kanalu*.
 - Mjeri se vektorskim analizatorom signala ili analizatorom spektra uz,
 - RBW: 1 MHz ili 100 kHz,
 - VBW: 30 kHz,
 - opcija "*averaging*": uključena.
 - Komentari uz mjerenje vektorskim analizatorom signala jednaki su onima koji su navedeni u odjeljku 2.8.2. u dijelu o mjerenju spektra uređaja po normi IEEE 802.11b.
- Mjerenje *sporednih emisija prijamnika*.
 - Mjeri se analizatorom spektra uz,
 - RBW: 1 MHz ili 100 kHz,
 - VBW: 1 MHz,
 - opcija "*averaging*": uključena.
- Mjerenje *OFDM-kanala*.
 - Mjeri se analizatorom spektra uz,
 - RBW: 300 kHz.



Slika 2.42. Mjerenje spektra u kanalu s naznačenom maskom graničnih vrijednosti



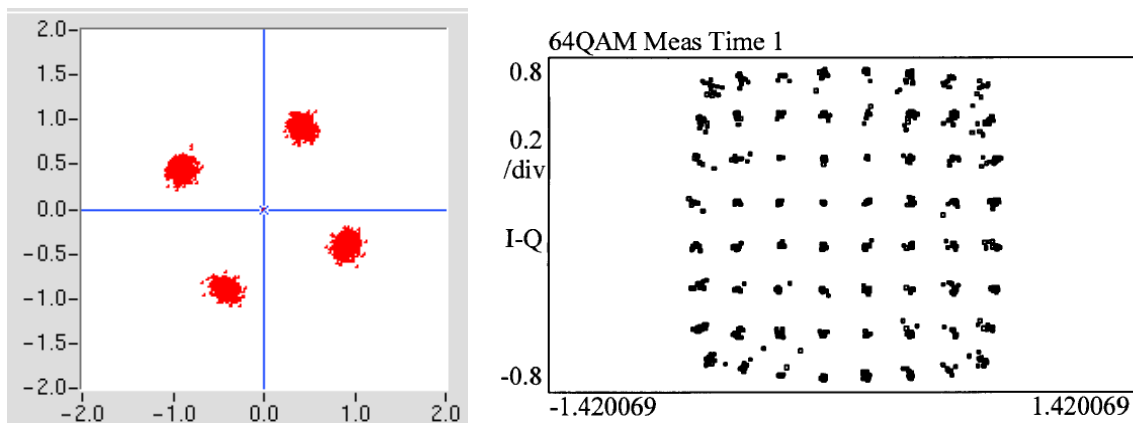
Slika 2.43. Primjer spektralnih obilježja OFDM-kanala s naznačenim granicama

2.8.5. Točnost modulacije i kvaliteta prijenosa

Kao mjera kvalitete prijenosa uzima se veličina vjerojatnosti pogreške okvira (FER, *Frame Error Ratio*) u sustavima na 2,4 GHz (IEEE 802.11b/g) odnosno vjerojatnost pogreške paketa (PER, *Packet Error Ratio*) u sustavima na 5 GHz (IEEE 802.11a, HiperLAN). Pogrešan okvir ili paket utvrđuje se onda kad prijammnik ne uspije ispraviti sve pogreške bita u okviru odnosno paketu.

Pogreška bita usko je povezana s pogreškama modulacije kad se radi o situacijama s niskom vjerojatnošću pogreške bita (BER, *Bit Error Ratio*). Pogreške modulacije odnosno pogreške u dijagramu stanja (*constellation*) utvrđuju se uz pomoć veličine verzora pogreške (EVM, *Error Vector Magnitude*). Ona kvantificira obilježja digitalnog odašiljača ili prijammnika pogledu pogrešaka amplitude i pogrešaka faze.

Idealni odašiljač daje modulirani signal s točkama dijagrama stanja na idealnim lokacijama. Položaji točaka stvarnog dijagrama stanja odstupaju od idealnih lokacija zbog različitih nedostataka u izvedbi (dodani šum, nelinearna izobličenja, linearna izobličenja, fazni šum, sporedne emisije, ostale pogreške modulacije).



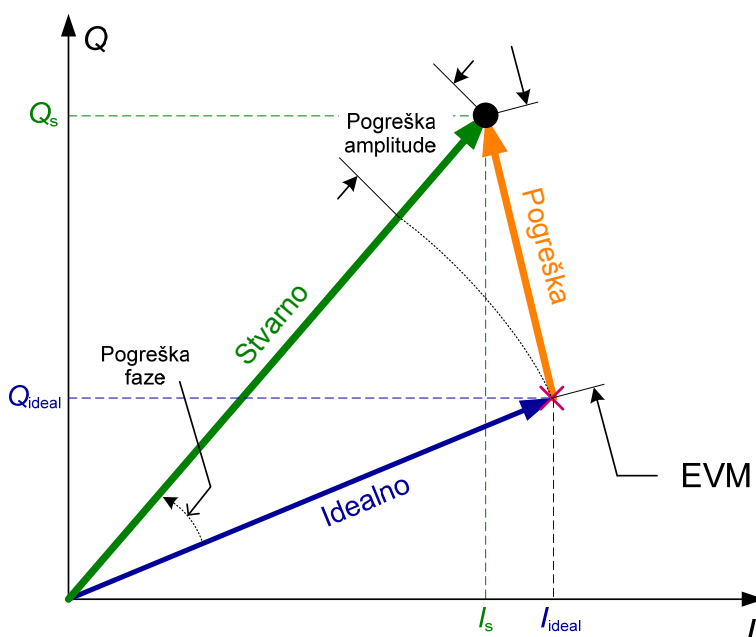
Slika 2.44. U primjerima na slici vidi se dijagram stanja QPSK-signala s izraženima faznim izobličenjima i 64-QAM-signala kod kojeg je, zbog prepobude izlaznog pojačala, došlo do kompresije signala.

EVM se često koristi kao mjera kvalitete komunikacijskog sustava umjesto tipične mjere, a to je učestalost pogreške BER. BER obilježava nekoliko ograničavajućih faktora kao što su:

- potreba za posebnom mjernom opremom,
- dugački intervali u kojima se mora provesti mjerenje i,
- ograničena dijagnostička vrijednost rezultata.

EVM omogućuje uvid u kvalitetu signala i u dijelu koji nije obuhvaćen BER-om ili dijagramom oka. EVM pokazuje koliko su stvarni položaji točaka udaljeni od njihovih idealnih položaja tj. on je jednak modulu vektora koji odgovara razlici vektora mjenenog signala i vektora idealnoga moduliranog signala.

Uobičajeno je određivati odstupanje amplitude i faze simbola mjenenog signala u odnosu na referentnu vrijednost koja odgovara idealnom položaju vrha vektora moduliranog signala.



Slika 2.45. Postupak određivanja EVM

Iz skice na Slici 2.45. izlaze veličine pogreške amplitude i pogreške faze.

$$\text{Pogreška amplitude} = \sqrt{I_s^2 + Q_s^2} - \sqrt{I_{\text{ideal}}^2 + Q_{\text{ideal}}^2},$$

$$\text{Pogreška faze} = \tan^{-1} \frac{Q_s}{I_s} - \tan^{-1} \frac{Q_{\text{ideal}}}{I_{\text{ideal}}}.$$

Modul vektora pogreške jednog simbola je onda,

$$\begin{aligned} EVM &= \sqrt{(I_s - I_{\text{ideal}})^2 + (Q_s - Q_{\text{ideal}})^2}, \\ &= \sqrt{(\Delta I)^2 + (\Delta Q)^2}. \end{aligned}$$

Za potrebe vrednovanja kvalitete modulacije EVM se uzima kao efektivna vrijednost preko većeg broja od N simbola (uobičajeno je uzimati 1000 simbola). Ona se onda izražava u %,

$$EVM_{\text{RMS}}[\%] = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\Delta I_k)^2 + (\Delta Q_k)^2}{S_{\text{maks}}^2}} \times 100\%,$$

gdje su:

ΔI_k i ΔQ_k – odstupanja koordinata stanja mjenog signala u odnosu na idealni položaj u ravnini I - Q ,

S_{maks} – najveća amplituda nekog simbola idealnoga moduliranog signala. To je amplituda simbola u uglu dijagrama stanja ako se radi o QAM. Kod M -PSK svi su simboli jednake amplitude.

U literaturi se susreće i definicija u obliku,

$$EVM[\%] = \sqrt{\frac{P_{\text{error}}}{P_{\text{ref}}}} \times 100\%,$$

$$EVM[\text{dB}] = 10 \log \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{error}}},$$

gdje su:

P_{error} – srednja snaga verzora pogreške,

P_{ref} – srednja snaga simbola idealnoga moduliranog signala koji je najveće amplitude.

EVM specificira točnost valnog oblika moduliranog signala u trenucima uzimanja uzorka i tijesno je vezan uz BER i omjer signala i šuma.

Jedna od prednosti korištenja EVM-a ogleda se u jednostavnijem mjerenju u odnosu na mjerenje BER-a, jer nije potreban cijeli komunikacijski sustav. EVM omogućuje zasebnu analizu svakog pojedinog mjesta, u kojem nastaju pogreške što olakšava rješavanje problema uzroka pogrešaka.

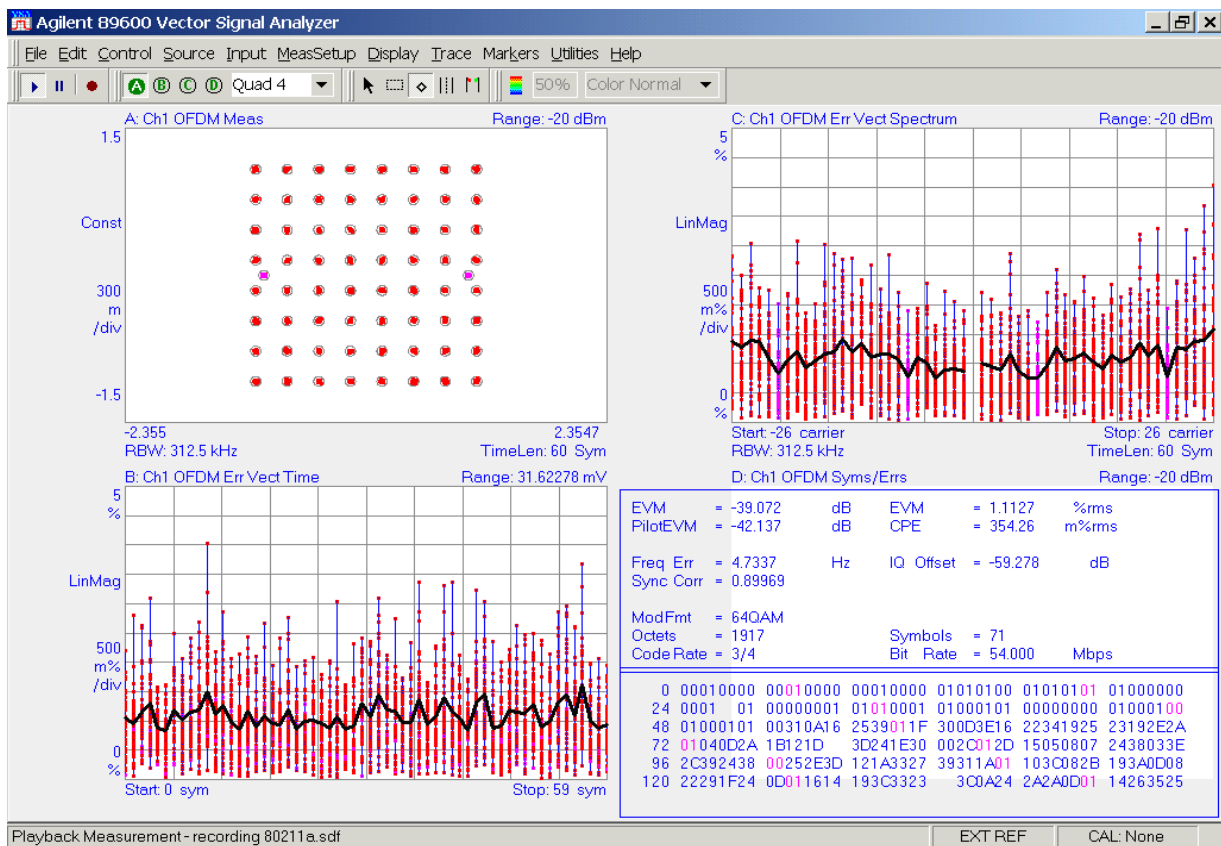
Granične (dopštene) vrijednosti EVM definiraju se relativno u odnosu na razinu signala i za radijske lokalne mreže iznose:

- 35 % ili -9 dB za sustave po IEEE 802.11b/g (2,4 GHz),
- za sustave na 5 GHz granične su vrijednosti dane u Tablici 2.19.

EVM se mjeri kao razlika stvarnoga moduliranog signala od idealnog signala pomoću specijaliziranog instrumenta, npr. vektorskog analizatora signala (VSA, *Vector Signal Analyzer*).

Tablica 2.19. Granične vrijednosti veličine verzora pogreške za mreže u području 5 GHz

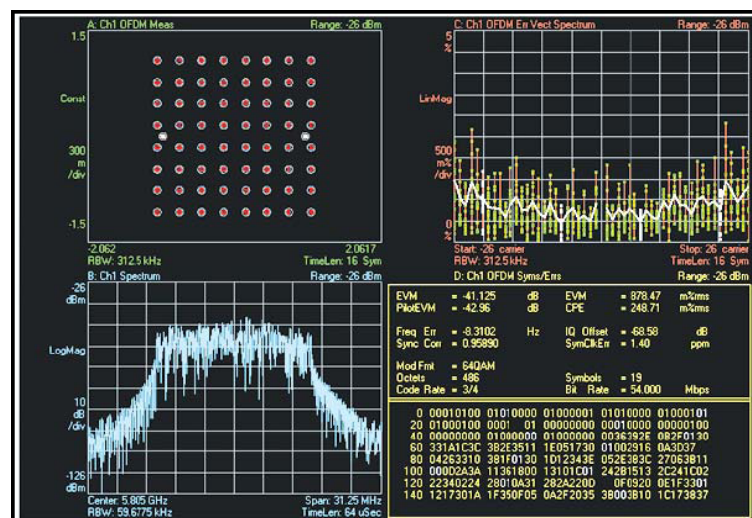
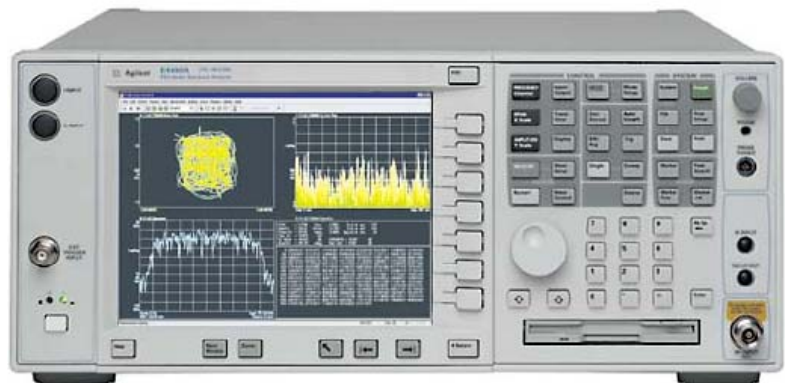
Brzina [Mbit/s]	EVM [dB]		EVM [% rms]
	HiperLAN/2	802.11a	
6	-19	-5	56,2
9	-19	-8	39,8
12	-19	-10	31,6
18	-19	-13	22,3
24	-19	-16	15,8
36	-19	-19	11,2
48	N/A	-22	7,9
54	-24	-25	5,6



Slika 2.46. Više je mogućnosti prikaza mjernih rezultata o WLAN-u na pokazniku vektorskog analizatora signala

2.8.6. Potrebna obilježja mjernog instrumentarija

Većina radiofrekvencijskih mjerenja na uređajima radijske lokalne mreže obavlja se analizatorom spektra. Pri uporabi komercijalno dobavljenih analizatora spektra nastaje jedan problem posljedica kojeg leži u činjenici da je najveća širina rezolucijskog pojasa (RBW) analizatora spektra od oko 10 MHz. To otežava mjerenja RF signala u WLAN-u koji je širok oko 20 MHz.



Slika 2.47. VSA ima čitav niz mogućnosti konfiguriranja pokaznika i prikaz različitih mjernih veličina na pokazniku u raznim formatima

Od nespecijaliziranog instrumentarija vrlo se korisnim pokazuje vektorski analizator signala VSA. On ima širinu pojasa za informacijski signal i do 36 MHz i snažni je alat za mjerenje signala u području frekvencija i u području vremena. VSA obrađuje signal u vremenskom području. Primjenom brze Fourierove transformacije (FFT) VSA može analizirati signal u području frekvencija. Korištenjem ugrađenih DSP mogućnosti dobiva sposobnost analize modulacije.



Slika 2.48. VSA se ponekad dopunjuje prijenosnim računalom čime raste sposobnost obrade mjernih podataka i njihova prikaza



Slika 2.49. Proizvođači mjerne opreme uz vektorski analizator signala VSA nude i vektorski generator signala (VSG, *Vector Signal Generator*)

VSA može mjeriti kvalitetu signala u mnogim točkama WLAN sustava. Postoje rješenja instrumenta sa dva kanala i s jednim kanalom. Dvokanalni VSA može mjeriti signal u osnovnom pojasu (I/Q), na IF i na RF razini, dok se jednokanalni VSA može koristiti samo na IF i na RF razini. Ovaj se instrument može se koristiti u točkama kako odašiljačkog, tako i prijemnog niza WLAN sustava.

Uz vektorski analizator signala dolazi i vektorski generator signala koji će poslužiti za ispitivanje prijemnih jedinica WLAN uređaja.

3. Radijske mreže gradskih područja – tehnologija WiMAX

U cijelom 3. poglavlju bit će riječi o mrežama gradskih područja (WMAN, *Wireless MAN*) koje za prijenos podataka koriste radijsko sučelje. Ove mreže se mogu smatrati proširenjem i prilagodbom WLAN tehnologija kako bi se omogućila zemljopisno veća područja pokrivanja i veće brzine prijenosa. Norme na radijske MAN mreže razvijaju se u okviru IEEE radne skupine 802.16 i ETSI/BRAN projekta. Pozornost će biti obraćena na BWA (*Broadband Wireless Access*) sustave kojima su u RH namijenjena frekvencijska područja: 3,4–3,6 GHz i 24,5–26,5 GHz.

3.1. Temeljna tehnološka obilježja mreža vrste WMAN

Danas postoji veliki broj različitih tehnologija koje se razlikuju u odnosu na:

- kapacitet sustava,
- način pristupa (vremenska, frekvencijska ili kodna raspodjela),
- način realizacije istodobnog dvosmjernog prijenosa tj. dupleksnog rada,
- simetričnost/nesimetričnost prijenosa za silaznu i uzlaznu vezu.

Sustavi koje ćemo detaljno obraditi nazivaju se WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) sustavi. Trenutna predviđanja govore da će WiMAX postati najzastupljenija tehnologija unutar WMAN mreža. Karakterizira ih:

- varijabilni kapacitet (ovisno o širini kanala, vrsti modulacije, zaštitnom kodiranju, pokretnosti korisničke opreme) do ~75 Mbit/s po baznoj postaji,
- koriste OFDM i OFDMA,

- TDD/FDD način dupleksnog rada,
- TDMA FDMA pristup,
- iznimna prilagodljivost, uporaba najnovijih tehnoloških saznanja (promjenljivi modulacijski postupci i kodiranja, inteligentne antene, MIMO tehnika...).

Oni se mogu rabiti za širokopojasne usluge kao što su povezivanje na Internet, prijenos govora, prijenos videotelefonskih signala, prijenos podataka i sl. Također se mogu koristiti i kao infrastruktura mobilnih mreža, što ovisi o politici uporabe spektra u pojedinim zemljama. Za sustave koji rade u području 3,5 GHz opće značajke su:

- propagacija je općenito ograničena na približnu optičku vidljivost (moguća čak i NLOS komunikacija),
- propagacija kroz lišće je relativno dobra,
- prijenosna udaljenost iznosi do 20 km,
- potrebna je koordinacija sa službama koje rade u istom frekvencijskom području,
- postoje različite tehnološke izvedbe sustava, a uređaji i oprema su umjerenih cijena,
- uz osnovni fiksni pristup predviđena je mogućnost korištenja i mobilnog pristupa.

Za sustave koji rade u području 26 GHz opće značajke su:

- propagacija je ograničena samo na optičku vidljivost,
- kao faktor u proračunu propagacije javlja se i gušenje zbog kiše,
- antene su malih dimenzija,
- prijenosna udaljenost iznosi do 10 km,
- dobre su mogućnosti ponavljanja frekvencija (*frequency reuse*),
- potrebna je koordinacija sa službama koje rade u istom frekvencijskom području,
- raspoloživa je veća širina frekvencijskog pojasa pa su moguće veće brzine prijenosa.

Može se zaključiti da će se sustavi koji rade u 3,5 GHz području koristiti kao pristupne mreže, dok će sustavi u 26 GHz području biti više upotrebljavani kao povezne mreže (*backhaul*).

3.1.1. Frekvencijska područja rada

U Europi postoji više frekvencijskih područja u kojima mogu raditi radijske mreže gradskih područja-WMAN mreže (vidi Tablicu 3.1.). Frekvencijsko područje 3400–3600 MHz prepoznato je 1998. godine kao najprihvatljivije za pružanje usluge nepokretnoga radijskog pristupa – FWA (ERC/REC13–04, ERC/REC14–03, ERC Report 25). Područje 3600–3800 MHz se također koristi u nekim zemljama članicama CEPT organizacije u skladu s preporukom ERC/REC 12–08. Ti frekvencijski pojasevi su najzanimljiviji za upotrebu u sustavima širokopojasnoga radijskog pristupa, jer omogućavaju realizaciju sustava u ruralnim sredinama s velikim dometima, ali isto tako realizaciju sustava u urbanim sredinama gdje se mogu ostvariti veze i bez optičke vidljivosti. Tehnologije, koje se rabe za pružanje usluga u tim područjima, nisu "definirane" i time je omogućeno operatorima da na najfleksibilniji i najbolji način iskoriste dodijeljeni spektar. Posljednjih godina svjedoci smo dramatičnog porasta usluga širokopojasnog pristupa. Razloga za to ima više: potreba za brzim pristupom Internetu, veliki opseg elektroničke pošte, prijenos multimedijских sadržaja... Na taj način dolazi nužno i do promjene prijašnjih nazora vezanih uz BWA. Očekuje se da osim nepokretnog radijskog pristupa sve više rastu nomadski i mobilni radijski pristupi. Bazna (temeljna) postaja (CS, *Central Station*) bit će na nepokretnoj lokaciji dok će korisnička oprema TE (*terminal equipment*) prestati biti striktno nepokretna. Slijedom navedenog ECC (*Electronic Communications Committee*) donio je 30.03.2007. odluku o dostupnosti frekvencijskog područja 3400–3800 MHz za harmoniziranu primjenu BWA sustava (*ECC Decision of 30 March 2007 on availability of frequency bands between 3400–3800 MHz for the harmonised implementation of Broadband Wireless Access systems (BWA)*). Ta odluka (ECC/DEC/(07)02) dozvoljava fleksibilne tzv. korisničke načine rada (nepokretni, nomadski, mobilni) u frekvencijskom području 3400–3600 MHz i/ili 3600–3800 MHz i limitira gustoću maksimalne izračene snage korisničke opreme na razinu od 25 dBm/MHz. Ovo područje (3400–3800 MHz) u europskoj tablici namjene radiofrekvencijskog spektra u frekvencijskom području 9 kHz–1000 GHz (*The European Table Of Frequency Allocations And Utilisations In The Frequency Range 9 kHz to 1000 GHz*, ERC Report 25) označeno je kao BWA. Drugim riječima, u tom se području definira širokopojasni radijski pristup, a nije specificirano da on bude nepokretni, nomadski ili mobilni. Pod pojmom BFWA (*Broadband Fixed Wireless Access*) osim nepokretnog podrazumijeva se i nomadski pristup, dok FWA označava samo nepokretni pristup.

Tablica 3.1. Frekvencijska područja za sustave širokopojasnoga radijskog pristupa u Europi

Frekvencijsko područje	ECC/ERC dokument	Namjena (ERC REPORT 25)
3400–3600 MHz	ECC/REC 04–05; ERC/REC 13–04; ERC/REC 14–03; ECC/DEC 07–02	BWA
3600–3800 MHz		BWA
5725–5875 MHz	ECC/REC 06–04	BFWA
10,15–10,30 GHz	ERC/REC 13–04; CEPT/ERC/REC 12–05	FWA
10,50–10,65 GHz		FWA
24,5–26,5 GHz	ERC/REC 00–05; ERC/REC 13–04	FWA
27,5–29,5 GHz	ERC/REC 01–03; ERC/REC 13–04	FWA

Napomena: stanje u tablici odgovara stanju iz sredine 2007. godine

Tablica 3.2. Frekvencijska područja za sustave širokopojasnoga radijskog pristupa u Hrvatskoj

Frekvencijsko područje	ECC/ERC dokument	Namjena
3,4–3,6 GHz	ERC/REC 13–04; ERC/REC 14–03	FWA, P2MP
24,5–26,5 GHz	T/R 13–02; ERC/REC 13–04; ERC/REC 00–05	FWA, P2MP

Napomena: Sadržaj tablice preuzet s web-stranice Hrvatske agencije za poštu i elektroničke komunikacije: www.telekom.hr (pristup web-stranici obavljen je dana 25.11.2008).

Pregled dokumenata koji pokrivaju područje radijskog pristupa:

- ECC/REC/(04)05: Preporučene smjernice za smještaj i dodjelu u P2MP nepokretnim radijskim sustavima za frekvencijska područja 3,4–3,6 GHz i 3,6–3,8 GHz (*Recommended guidelines for accommodation and assignment of multipoint*

Fixed Wireless Systems in frequency bands 3.4–3.6 and 3.6–3.8 GHz)

- ERC/REC 13–04: Prikladna frekvencijska područja za nepokretni radijski pristup u području između 3 i 29,5 GHz (*Preferred frequency bands for fixed wireless access in the frequency range between 3 and 29.5 GHz*)
- ERC/REC 14–03: Harmonizirani raspored radiofrekvencijskih kanala za sustave malog i srednjeg kapaciteta u pojasu 3,400 MHz do 3600 MHz (*Harmonised radio frequency channel arrangements and block allocations for low and medium capacity systems in the band 3400 MHz to 3600 MHz*)
- ECC/REC/(06)04: Korištenje frekvencijskog područja 5725–5875 MHz za širokopojasni nepokretni radijski pristup (*Use of the band 5725–5875 MHz for Broadband Fixed Wireless Access (BFWA)*)
- ERC/REC/(00)05: Korištenje frekvencijskog područja 24,5–26,5 GHz za nepokretni radijski pristup (*Use of the band 24.5 – 26.5 GHz for Fixed Wireless Access*)
- ERC/REC/(01)03: Korištenje dijelova frekvencijskog područja 27,5–29,5 GHz za nepokretni radijski pristup (*Use of parts of the band 27.5–29.5 GHz for Fixed Wireless Access (FWA)*)
- T/R 13–02: Prikladan raspored kanala za nepokretne službe u području 22,0–29,5 GHz (*Preferred channel arrangements for fixed services in the range 22.0–29.5 GHz*)
- CEPT/ERC/REC 12–05: Harmonizirani raspored radiofrekvencijskih kanala za digitalne zemaljske nepokretne sustave koji rade u frekvencijskom području 10,0 GHz do 10,68 GHz (*Harmonised radio frequency channel arrangements for digital terrestrial fixed systems operating in the band 10.0 GHz to 10.68 GHz*)
- CEPT/ERC/REC 12–08: Harmonizirani raspored radiofrekvencijskih kanala i blokova za sustave malog, srednjeg i velikog kapaciteta u pojasu 3600 MHz do 4200 MHz (*Harmonised radio frequency channel arrangements and block allocations for low, medium and high capacity systems in the band 3600 MHz to 4200 MHz*). Napomena: ovo je nešto starija preporuka.

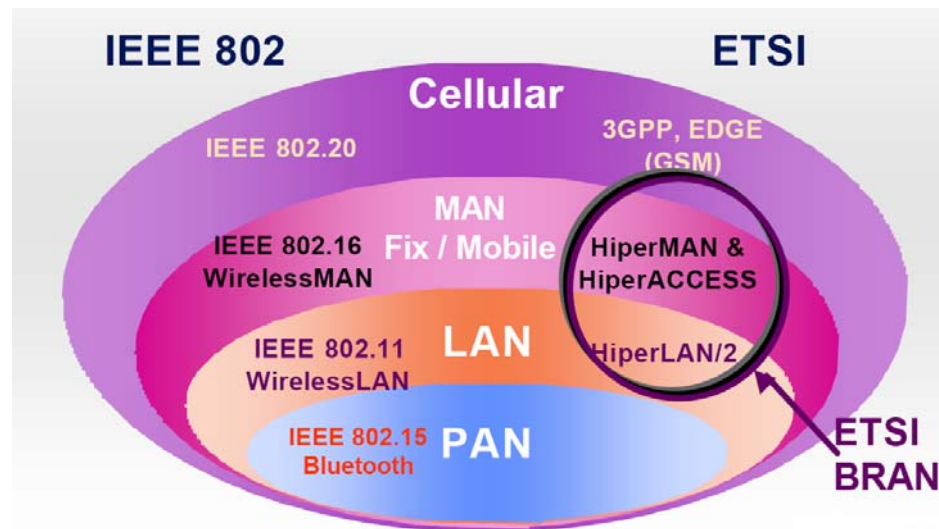
Uz prije spomenutu odluku ECC/DEC/(07)02, jedan od najnovijih dokumenata koji pruža uvid u problematiku BWA je CEPT izvješće 015 od 12.06.2007. (*Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: identify the conditions relating to the provision of harmonised radio frequency bands in the European Union for Broadband Wireless Access applications*). U njemu se zaključuje da regulatorni okvir za primjenu BWA u

frekvencijskom području 3400–3600 MHz i 3600–3800 MHz počiva na sljedećim dokumentima:

- ECC izvješće 33 (veljača 2006.);
- ECC izvješće 100 (veljača 2007.);
- ECC preporuka (04)05 (veljača 2006.);
- ECC odluka (07)02 (30. ožujak 2007.).

3.2. Pregled normi za radijske mreže gradskih područja

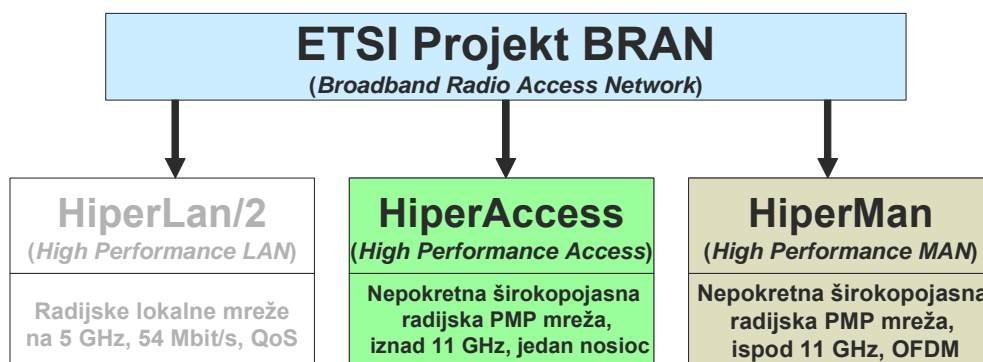
Norme za radijske mreže gradskih područja razvijaju se unutar ETSI BRAN i WirelessMAN projekata kao što je prikazano na Slici 3.1.



Slika 3.1. Prikaz radijskih mreža gradskih područja unutar ETSI i IEEE

3.2.1. Norme nastale u okviru ETSI BRAN projekta

Kako bi odgovorila na zahtjeve tržišta, ETSI organizacija osnovala je 1997. godine projekt za normizaciju širokopojsnih radijskih mreža (BRAN). ETSI BRAN je nasljednik podtehničkog odbora RES10 (*Sub-Technical Committee RES10*). U okviru ETSI/BRAN projekta razvijaju se tri norme: HiperLan/2, HiperMan i HiperAccess. Norme koje pokrivaju radijske mreže gradskih područja su posljednje dvije, tj. HiperMan i HiperAccess. Projekt BRAN priređuje norme za radijski pristup koji omogućava brzine prijenosa jednake ili veće od 25 Mbit/s. Namjena korištenja tih normi je za javne ili privatne mreže, funkcioniranje u licenciranom i nelicenciranom frekvencijskom području, za poslovne ili osobne aplikacije.



Slika 3.2. Prikaz ETSI BRAN projekta

3.2.1.1. HiperAccess

HiperAccess (*High Performance Radio Access*) – norma za širokopoljasne radijske sustave koja omogućava prijenos na veće udaljenosti (do 12 km) uz uporabu nepokretnih mreža vrste točka – više točaka (P2MP, *Point-to-MultiPoint*). Brzine prijenosa su jednake ili veće od 25 Mbit/s, a planira se da će sustav raditi u frekvencijskom području iznad 11 GHz;

Tablica 3.3. Važni parametri mreže HiperAccess

	Silazna veza (AP → AT)	Uzlazna veza (AT → AP)
Brzina prijenosa (Mbit/s)	20...120 (tipično 80)	20...80 (tipično 50)
Snaga odašiljača	15 dBm	14 dBm
Domet	do 12 km (ovisi o preprekama i kiši)	
Napomena: AP–pristupna točka (<i>access point</i>); AT–korisnička postaja (<i>access terminal</i>)		

Sustav je namijenjen za ekonomično povezivanje pojedinačnih korisnika te malih i srednjih poduzeća (SME – *Small to Medium Enterprises*) na jezgrenu mrežu, UMTS spojnu mrežu (*backhaul*). Moguće je pružanje IP usluga, prijenosa videosignala i ostalih širokopoljasnih usluga, povezivanje s LAN mrežama kao i povezivanje s fiksnom telefonskom mrežom i ISDN mrežom. Fizički sloj i DLC (*Data Link Control*) sloj se razlikuju u odnosu na HiperMan sustav. Fizički sloj je prilagođen frekvencijskom području, a pozornost je posvećena sljedećim frekvencijskim područjima:

- 40,5 – 43,5 GHz (posebice ovom području)
- 31,8 – 33,4 GHz

- 27,5 – 29,5 GHz
- 24,5 – 26,5 GHz

U tim frekvencijskim područjima moguće je primijeniti samo LOS komunikaciju (NLOS povezivanje nije moguće kao u HiperMan sustavu). Prijenos se temelji na FDD i TDD tehnici, uz modulacijski postupak s jednim nositeljem (SC, *Single Carrier*). Predviđa se uporaba QPSK, 16-QAM i 64-QAM za silazni smjer, te QPSK i 16-QAM za uzlazni smjer. Za omogućavanje višestrukog pristupa rabiće se TDMA. DLC sloj je prilagođen ATM prijenosu tako da se prenose paketi konstantne duljine, za razliku od HiperMan sustava koji je prilagođen IP prijenosu. Širina kanala iznosi 28 MHz, brzina prijenosa 22,4 MBd.

Tablica 3.4. Prikaz modulacija i pripadajućeg kodiranja kod mreže HiperAccess

Način rada	Modulacija	Vanjsko blokovsko kodiranje	Unutarnje konvolucijsko kodiranje	Duljina informacijske riječi	Spektralna učinkovitost	Traženi omjer $C/(N+I)$
0 (CZ)	QPSK	RS	$R = 1/2$	30 bajta	od $\sim 0,5$ bit/s/Hz do $\sim 3,8$ bit/s/Hz	7 dB
1	QPSK	RS	$R = 2/3$	1...4 PDU		8 dB
2	QPSK	RS	–	1...4 PDU		12 dB
3	16-QAM	RS	$R = 7/8$	1...4 PDU		18 dB
4	64-QAM	RS	$R = 5/6$	1...4 PDU		25 dB
Napomena: R –omjer koda, RS–Reed Solomon kodiranje, PDU–protokolna jedinica podataka						

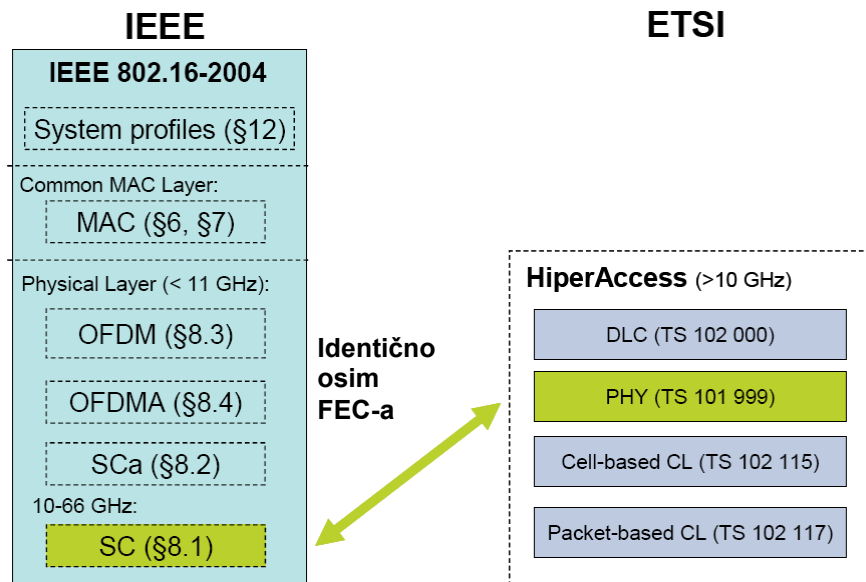
Objavljene HIPERACCESS specifikacije odnose se na:

- pregled HIPERACCESS sustava (ETSI TR 102 003 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; System Overview*);
- fizički sloj (ETSI TS 101 999 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; PHY protocol specification*);
- sloj za upravljanje podacima (ETSI TS 102 000 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; DLC protocol specification*);
- konvergencijski podslojevi za različite jezgrene mreže (ETSI TS 102 115:

- TS 102 115–1: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; Cell based Convergence Layer; Part 1: Common Part*
- TS 102 115–2: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; Cell based Convergence Layer; Part 2: UNI Service Specific Convergence Sublayer (SSCS)*

ETSI TS 102 117

- TS 102 117–1: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; Packet based Convergence Layer; Part 1: Common Part*
- TS 102 117–2: *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; Packet based Convergence Layer; Part 2: Ethernet Service Specific Convergence Sublayer)*

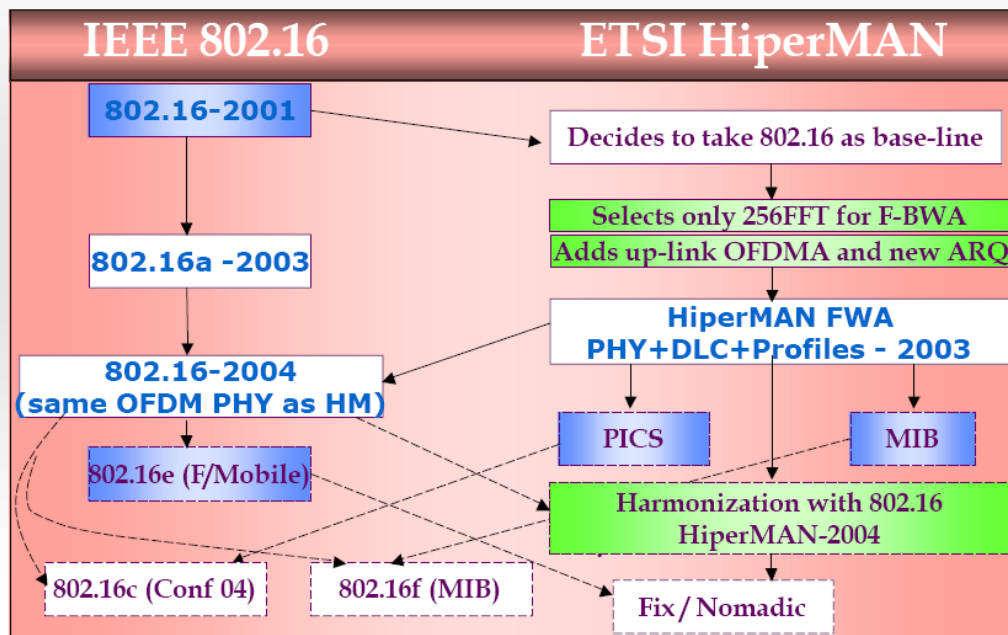


Slika 3.3. Usklađene norme za širokopojasni radijski pristup (BWA) u području iznad 11 GHz

3.2.1.2. HiperMan

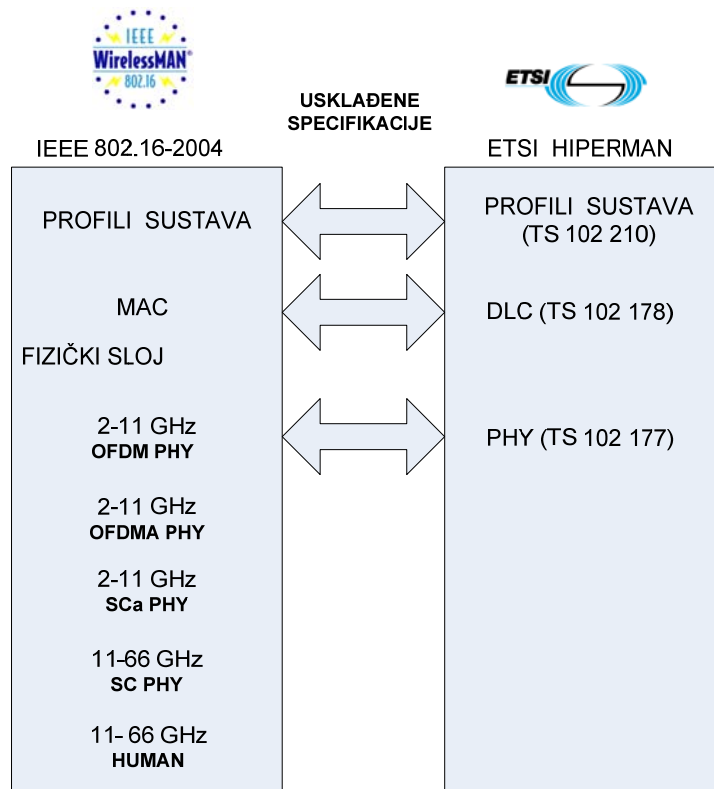
HiperMan (*High Performance Radio Metropolitan Area Networks*) – norma koja omogućava zajednički rad različitih sustava za širokopojasni nepokretni radijski pristup u frekvencijskom području 2 – 11 GHz, s radijskim sučeljem oblikovanim u skladu sa zahtjevima sustava P2MP. Brzine prijenosa su jednake ili veće od 25 Mbit/s. Ova norma rabi IEEE 802.16-2001 normu kao temeljnu početnu točku;

HiperMAN-802.16 Cooperation



Slika 3.4. Suradnja u normizaciji mreža vrste HiperMan i mreža vrste 802.16

HiperMan je sustav koji se veže na jezgrenu mrežu i nije planirano da sam po sebi omogući komunikaciju od jednog kraja do drugog (*end-to-end communication*). Za HiperMan sustave mogu se rabiti frekvencijska područja namijenjena fiksnome radijskom pristupu koja već koriste različite vrste P2MP sustava (frekvencijsko područje 3,4 – 4,2 GHz u Europi, u Hrvatskoj 3,4 – 3,6 GHz). HiperMan uključuje prva dva sloja OSI referentnog modela: fizički sloj i sloj za upravljanje podacima (DLC), koji su neovisni o jezgrenoj mreži na koju se sustav povezuje. Za prilagodbu određenoj vrsti jezgrene mreže rabe se konvergencijski podslojevi. Fizički sloj je realiziran uz primjenu OFDM modulacijske tehnike pri čemu pojedini podnosioci mogu biti modulirani primjenom QPSK, 16-QAM i 64-QAM. Ovako definirani parametri fizičkog sloja podudaraju se s parametrima fizičkog sloja definiranim u normi IEEE 802.16-2004. HiperMan definira samo jedan način rada fizičkog sloja i to: OFDM, FFT s 256 točaka. Norma podržava TDD i FDD način rada. DLC sloj u HiperMan mreži prilagođen je Internet-protokolu u kome se prenose paketi promjenjive duljine (trebaju biti podržane IP inačice 4 i 6). Fizički sloj i DLC sloj u mreži trebaju osigurati upravljanje odašiljačkom snagom i parametrima modulacijskog postupka u što mogu biti uključeni i postupci zaštite od pogreške.



Slika 3.5. Usklađene norme za širokopojasni radijski pristup (BWA) u području ispod 11 GHz

Objavljene HIPERMAN specifikacije odnose se na:

- fizički sloj (ETSI TS 102 177 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN; Physical (PHY) layer*)
- sloj za upravljanje podacima (ETSI TS 102 178 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN; Data Link Control (DLC) layer*)
- funkcionalne zahtjeve sustava (ETSI TR 101 856 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); Functional Requirements for Fixed Wireless Access Systems below 11 GHz: HIPERMAN*)
- testiranja koja potvrđuju prilagođenje u radu između IEEE 802.16d–2004 i HIPERMAN-a
 - ETSI TS 102 385–1 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN/WiMAX; Conformance testing for the Data Link Control Layer (DLC); Part 1: Protocol Implementation Conformance Statement (PICS) proforma*
 - ETSI TS 102 385–2 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN/WiMAX; Conformance testing for the Data Link Control Layer (DLC); Part 2: Test Suite Structure and Test Purposes (TSS&TP) specification*

- ETSI TS 102 385–3 *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN/WiMAX; Conformance testing for the Data Link Control Layer (DLC); Part 3: Abstract Test Suite (ATS)*
- elektromagnetsku kompatibilnost za rad u nelicenciranom području.

3.2.2. Norme nastale u okviru IEEE

3.2.2.1. Povijesni razvoj

Rad IEEE radne skupine 802.16 usmjeren je na sustave sa širokopojasnim radijskim pristupom (BWA, *Broadband Wireless Access*). Ova radna skupina razmatra mreže u tri frekvencijska područja: 2 – 11 GHz, 10 – 66 GHz i frekvencijsko područje 5 – 6 GHz za čiju uporabu se ne plaća naknada (*licence-exempt frequencies*, frekvencijska područja razlikuju se u Europi i USA). Na temelju rada navedene radne skupine u travnju 2002. godine objavljena je norma IEEE 802.16: *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, koja određuje zračno sučelje za radijske MAN mreže (*WirelessMAN Air Interface*). Ova norma se ponekad naziva IEEE 802.16.1. Norma se odnosi MAN mreže koji rade u frekvencijskom području od 10 GHz do 66 GHz, a pored radijskog sučelja definira i sloj za upravljanje pristupom prijenosnom mediju (MAC, *Medium Access Control*) koji podržava različite fizičke slojeve prilagođene frekvencijskom području rada sustava. Norma IEEE 802.16c: *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 1: Detailed System Profiles for 10 – 66 GHz*, objavljena je u siječnju 2003. godine, predstavlja dodatak normi IEEE 802.16, a definira profile mreže za rad u frekvencijskom području 10 – 66 GHz. Frekvencijsko područje od 2 – 11 GHz (licencirani i nelicencirani pojasevi) obuhvaćeno je normom IEEE 802.16a: *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2 – 11 GHz*. Ova norma objavljena je u travnju 2003. godine, a predviđa izmjene MAC sloja u odnosu na normu IEEE 802.16, jer su komponente fizičkog sloja različite zbog različitog frekvencijskog područja rada. IEEE norma 802.16b definira način rada MAN sustava u frekvencijskim područjima 5 – 6 GHz. Ova norma poznata je i pod nazivom *WirelessHUMAN (Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network)*. Radna skupina IEEE 802.16 je dovršila rad na normi 802.16.2: *IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks: Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems*, koja je objavljena u rujnu 2001. godine, a odnosi se na preporuke koje omogućuju zajednički rad različitih sustava za nepokretni širokopojasni radijski pristup u frekvencijskom

području od 10 – 66 GHz. Ta norma zamijenjena je s novijom normom 802.16.2–2004. Važno je napomenuti da je od 1999. godine kad je osnovana IEEE 802.16 radna skupina objavljeno još mnogo nadopuna i inačica, a ovdje su spomenute samo najbitnije.

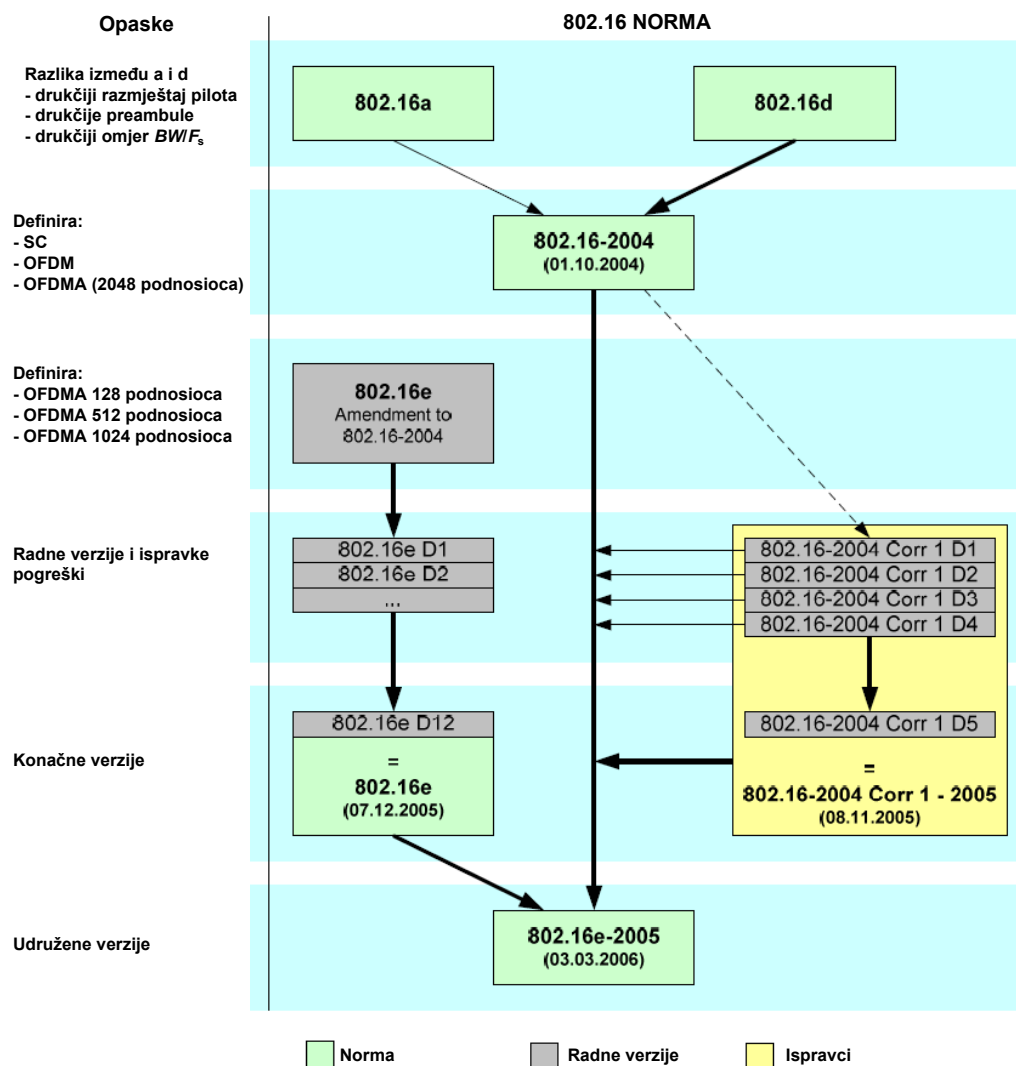
3.2.2.2. Trenutno stanje normizacije

U ovoj studiji detaljnije će se prikazati norma **802.16-2004**. Ona se odnosi na nepokretni i nomadski pristup, a objavljena je u listopadu 2004. godine. To je popravljena i združena verzija prije spomenutih normi. Da bi se omogućilo opsluživanje pokretnih korisnika objavljen je nova norma u veljači 2006. pod oznakom **802.16e** (označava se i kao **802.16e-2005**). Valja napomenuti da nema kompatibilnosti između uređaja koji rade po ovim dvjema normama.

Tablica 3.5. Pregled normi iz skupine IEEE 802.16

Norma	Naziv/Opis
802.16	WiMAX, frekvencijsko područje 10–66 GHz
802.16a	WiMAX za nepokretnu korisničku opremu, frekvencijsko područje ispod 11 GHz
802.16b	WirelessHUMAN za sustave u frekvencijskim područjima 5 – 6 GHz
802.16c	Detaljniji profili sustava za rad u frekvencijskom području 10 – 66 GHz
802.16d	WiMAX norma s dodacima u skladu s WiMAX Forumom
802.16–2004	Zamijenio je 802.16/.16a/.16d (uključuje OFDMA)
802.16e	WiMAX za pokretnu korisničku opremu (brzina do 120 km/h, FFT veličine 128, 512, 1024 i 2048)
802.16–1	Radijsko sučelje, frekvencijsko područje 10 – 66 GHz
802.16.2	Koegzistencija između BWA sustava, zamijenjeno s 802.16.2–2004
802.16.2–2004	Koegzistencija
802.16.2a	Preporučeno djelovanje za ostvarivanje koegzistencije između FBWA sustava
802.16.3	Radijsko sučelje za FBWA sustave u frekvencijskom području ispod 11 GHz (npr. ISM, PCS, MMDS, UNII područje)
Napomena: FBWA–Fixed Broadband Wireless Access, ISM–Industrial, Scientific and Medical, PCS–Personal Communications Systems, MMDS–Multichannel Multipoint Distribution Service, UNII–Unlicensed National Information Infrastructure	



U travnju 2001. godine utemeljena je međunarodna udruga proizvođača 802.16 uređaja, tzv. WiMAX Forum. Cilj djelovanja ove udruge je ispitivanje kompatibilnosti i omogućavanje zajedničkog rada uređaja različitih proizvođača koji rade u skladu s IEEE 802.16 normama. Iz više predviđenih načina rada u pojedinoj IEEE 802.16 normi, WiMAX Forum izabire jedan način rada te provodi ispitivanje mogućnosti zajedničkog rada 802.16 uređaja različitih proizvođača. Ako pojedini uređaj na zadovoljavajući način prođe takva ispitivanja, dobiva oznaku "WiMAX", koja znači da određeni uređaj ima mogućnost zajedničkog rada s drugim WiMAX uređajima u određenom frekvencijskom području i načinu (modu) rada.



Slika 3.6. Evolucija fizičkog sloja norme 802.16

Zaključno, može se dati usporedba između IEEE normi i onih nastalih u okviru ETSI BRAN projekta. Rezultati usporedbe prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 3.6. Usporedba normi za nepokretni radijski pristup

		Fizički sloj	MAC sloj
IEEE 802.16 		IEEE Std. 802.16-2004	
ETSI BRAN 	HiperMAN	ETSI TS 102 177	ETSI TS 102 178
	HiperAccess	ETSI TS 101 999	ETSI TS 102 000

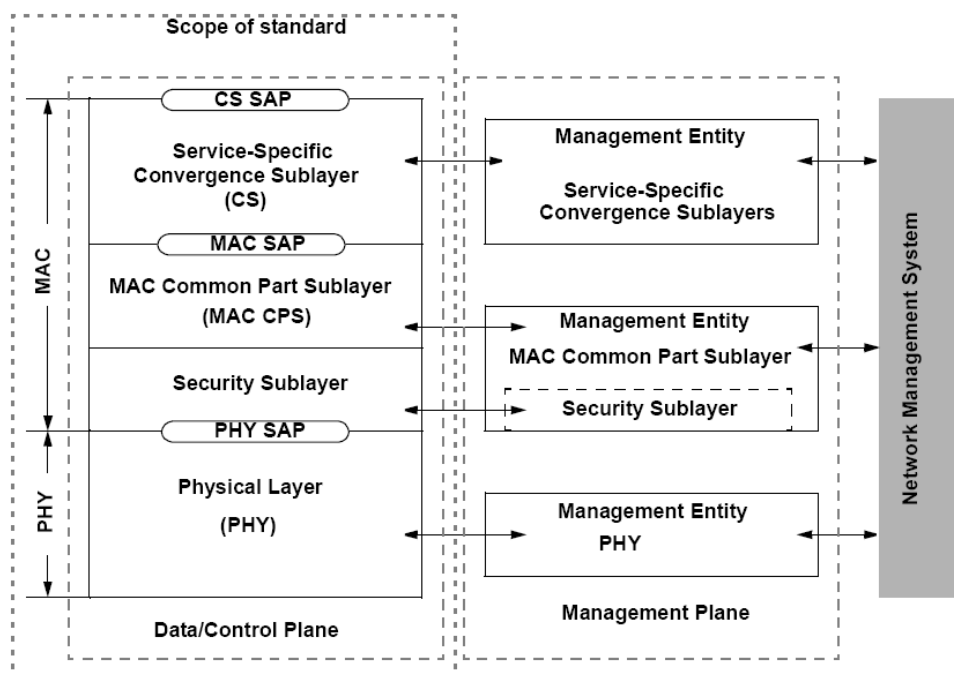
3.3. Osobitosti tehnologije WiMAX

Danas kada govorimo o tehnologiji WiMAX, zaključujemo da se ona odnosi na sve što je pokriveno normama 802.16-2004 (nepokretne mreže) i 802.16e (mobilne mreže). Svaka od tih normi nosi neke osobitosti, ali možemo reći da je osnovna karakteristika WiMAX-a bogatstvo mogućnosti, uporaba sofisticiranih algoritama i tehnologija, različite konfiguracije rada. WiMAX tehnologija pokriva različita frekvencijska područja, širine kanala, načine pristupa, dupleksne načine rada, modulacijske postupke i kodiranja, inteligentne antene, mrežne konfiguracije, šifriranje podataka, definiranje vrste usluge... Kolika je ta raznolikost najbolje se vidi iz kratkog pregleda osnovnih karakteristika i mogućnosti navedenih normi.

3.3.1. Obilježja norme IEEE 802.16-2004

Normom su obuhvaćena dva sloja: sloj upravljanja pristupa mediju (MAC, *Medium Access Control*) i fizički sloj (PHY, *Physical Layer*).

MAC sloj omogućava korištenje pet različitih radijskih sučelja na fizičkom sloju.



Slika 3.7. Prikaz MAC i PHY sloja (preuzeto izravno iz norme IEEE 802.16-2004) – referentni model

Tablica 3.7. Prikaz sloja upravljanja pristupa mediju i fizičkih slojeva u normi IEEE 802.16-2004

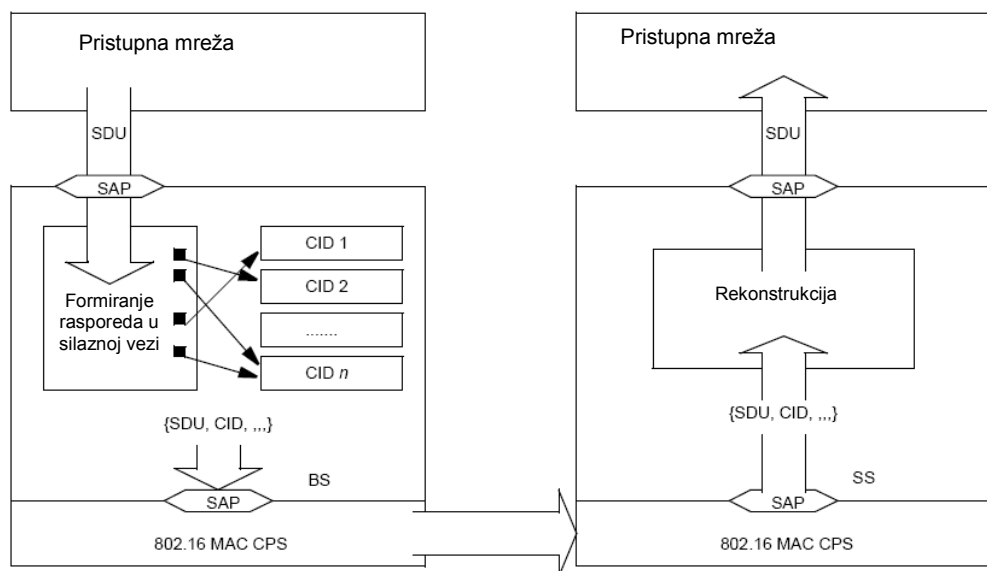
Zajednički sloj upravljanja pristupa mediju (MAC)				
11–66 GHz SC PHY	2–11 GHz SCa PHY	2–11 GHz OFDM PHY	2–11 GHz OFDMA PHY	2–11 GHz HUMAN
11 – 66 GHz izdavanje dozvole	ispod 11 GHz izdavanje dozvole	ispod 11 GHz izdavanje dozvole	ispod 11 GHz izdavanje dozvole	ispod 11 GHz ne izdaju se dozvole

Radijska sučelja, koja su najznačajnija za ovu studiju, označena su žutom i zelenom bojom. Ona će se detaljnije obraditi, dok ostala sučelja neće biti predmetom ove analize. Razlog leži u činjenici da u navedenom frekvencijskom području u RH rade takvi sustavi širokopojasnog radijskog pristupa. OFDM način prijenosa podataka pruža puno veće mogućnosti od prijenosa jednim nosiocem.

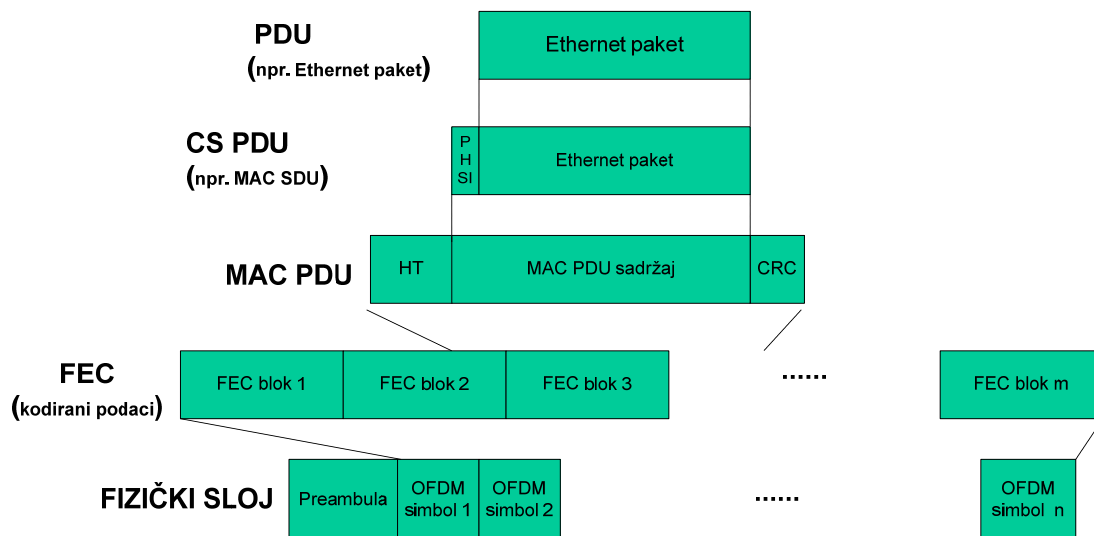
Kao što se vidi iz Slike 3.7., sloj upravljanja pristupa mediju sastoji se od tri podsloja.

1. Podsloj konvergencije usluga (CS – *Convergence Sublayer*) – osigurava transformaciju i preslikavanje podataka iz vanjske mreže (ATM CS i paketni CS: IPv4, IPv6, Ethernet, WLAN) iz i prema MAC CPS (MAC CPS, *Medium Access Control Common Part Sublayer*) kroz pristupne točke usluga (CS SAP, *Convergence Sublayer Service Access Point*). Na taj način je omogućena komunikacija sloja upravljanja pristupa prema vanjskoj telekomunikacijskoj mreži.
2. Zajednički MAC podsloj (MAC CPS) osigurava funkcionalnost pristupa sustavu, dodjelu pojasa, ostvarivanje i održavanje veze. On preuzima podatke iz raznih podslojeva konvergencije usluga kroz pristupne točke usluga (MAC SAP).
3. Sigurnosni podsloj – 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 (vidi Sliku 3.9.) 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). Klasificiranje (Slika 3.8.) se vrši pomoću identifikatora spajanja CID (*Connection Identifier*).



Slika 3.8. Klasifikacija i preslikavanje podataka od bazne postaje prema korisničkoj postaji



Slika 3.9. Tijek podataka između slojeva

3.3.1.1. OFDM radijsko sučelje

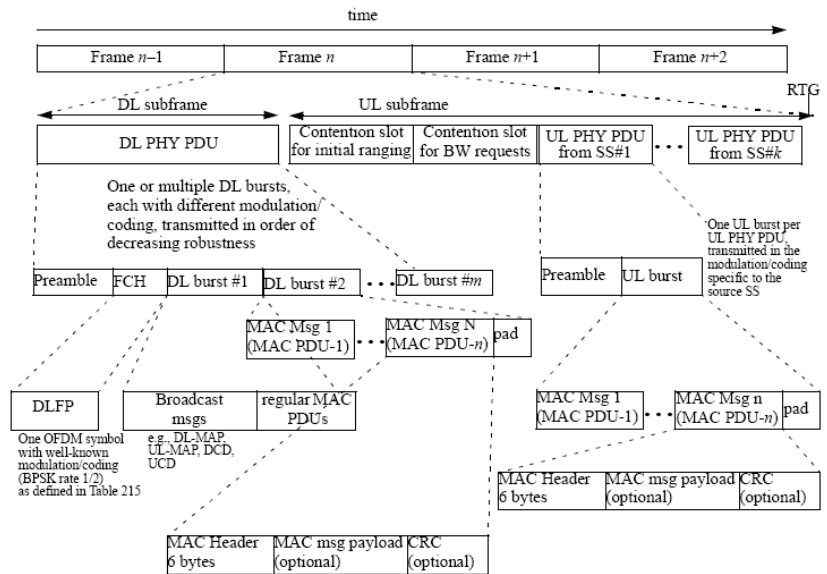
Najčešći način rada za nepokretni širokopojasni pristup predstavlja OFDM radijsko sučelje. OFDM simbol sastoji se od velikog broja moduliranih podnosilaca, koji su nastali inverznom diskretnom Fourierovom transformacijom. U WiMAX-u se koristi fiksni broj od 256 nosilaca. Svaki od podnosioca je moduliran (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Sustav podržava višestupanjsku prilagodljivu modulaciju, kojom se postiže maksimalna brzina prijenosa podataka te različita kodiranja, uz zadovoljavajuću razinu prijemnog signala. Podnosioci u OFDM spektru mogu biti: podatkovni podnosioci (192), pilotski podnosioci (8) i potisnuti podnosioci. Pilotski podnosioci su uvijek modulirani s određenim poznatim kodovima po BPSK modulacijskoj shemi. Svrha potisnutih podnosilaca je osiguravanje zaštitnog pojasa prema susjednom kanalu na frekvencijskoj osi. Sustav podržava širine kanala u opsegu od 1,25 do 28 MHz. Moguć je TDD i FDD dupleksni način rada. FDD je bolji za simetričnu vrstu prijenosa, dok je TDD bolji za asimetrični način prijenosa podataka. Koristi se TDMA način pristupa. Sustav podržava mreže P2MP (najčešća) i mesh.

Sukladno normi, četiri osnovna parametra (BW , N_{used} , n , G) karakteriziraju OFDM simbol. Ostali parametri dobiju se putem proračuna. Normom je predviđen rad do 16 logičkih podkanala u jednom OFDM kanalu, premda sustavi najčešće rade s jednim logičkim podkanalom. Rad s dinamičkim dodjeljivanjem kapaciteta u logičkim podkanalima je predviđen u OFDMA fizičkom sloju. Struktura okvira različita je za FDD i TDD dupleks (Slika 3.10. i Slika 3.11.). Postoje licencirani proizvodi za obje vrste.

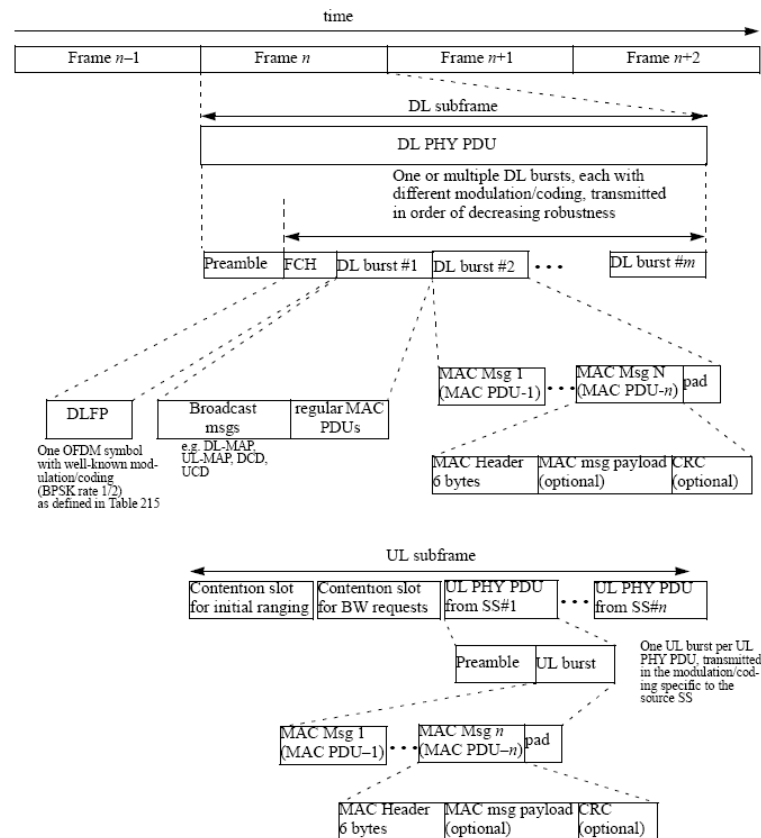
Tablica 3.8. Parametri OFDM radijskog sučelja

Oznaka	Opis
BW	Nominalna širina kanala: od 1,25 MHz do 28 MHz (kod ETSI sustava 1,75; 3,5; 7,0; 14,0; 28,0 MHz)
N_{FFT}	Ukupni broj OFDM podnosioca: 256 (fiksno)
N_{used}	Broj podatkovnih podnosilaca: 200 (uključujući 8 pilota, položaji pilota -88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88)
n	Faktor uzorkovanja (<i>sampling factor</i>): 8/7, 86/75, 144/125 (316/275, 57/50) (za sustave koji koriste širinu pojasa koja je višekratnik 1,75 MHz, $n = 8/7$) Skupa s BW i N_{used} definira razmak podnosilaca i trajanje korisnog dijela simbola.
G	Omjer trajanja zaštitnog intervala i korisnog vremena simbola: 1/4, 1/8, 1/16 i 1/32
F_{uz}	Frekvencija uzoraka (<i>sampling frequency</i>) $F_{\text{uz}} = \text{floor}(n \times BW / 8000) \times 8000$ ¹ (od 1,72 do 32 MHz)
Δf	Razmak podnosilaca: 15,625 kHz za $BW = 3,5$ MHz, $\Delta f = F_{\text{uz}} / N_{\text{FFT}}$
T_b	Trajanje korisnog dijela simbola, $T_b = 1 / \Delta f$
T_g	Trajanje zaštitnog intervala: $T_g = G \times T_b$
T_s	Ukupno trajanje simbola: $T_s = T_b + T_g$
T_{uz}	Vrijeme uzorkovanja (<i>sampling time</i>), $T_{\text{uz}} = T_b / N_{\text{FFT}}$
$N_{\text{d-p}}$	Broj donjih zaštitnih podnosilaca: 28, (podnosioci od -128 do -101)
$N_{\text{d-u}}$	Broj gornjih zaštitnih podnosilaca: 27, (podnosioci od 101 do 127)
N_{pch}	Broj logičkih podkanala (0–16)

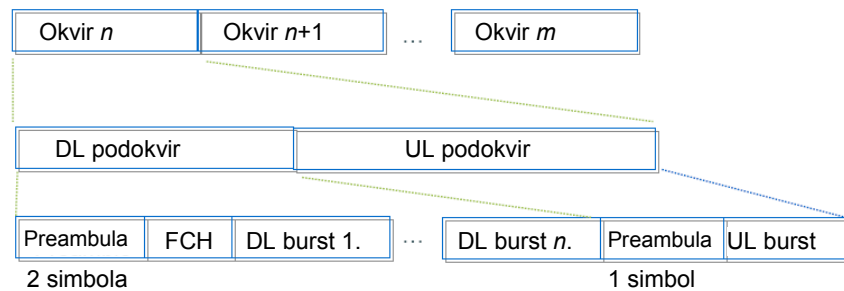
¹ floor – funkcija zaokruživanja na manji cijeli broj



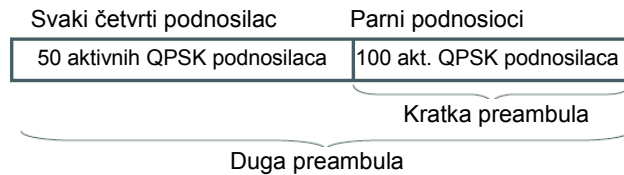
Slika 3.10. Struktura okvira za TDD način rada (preuzeto u izvornom obliku iz norme)



Slika 3.11. Struktura okvira za FDD način rada (preuzeto u izvornom obliku iz norme)



Definicija preambule

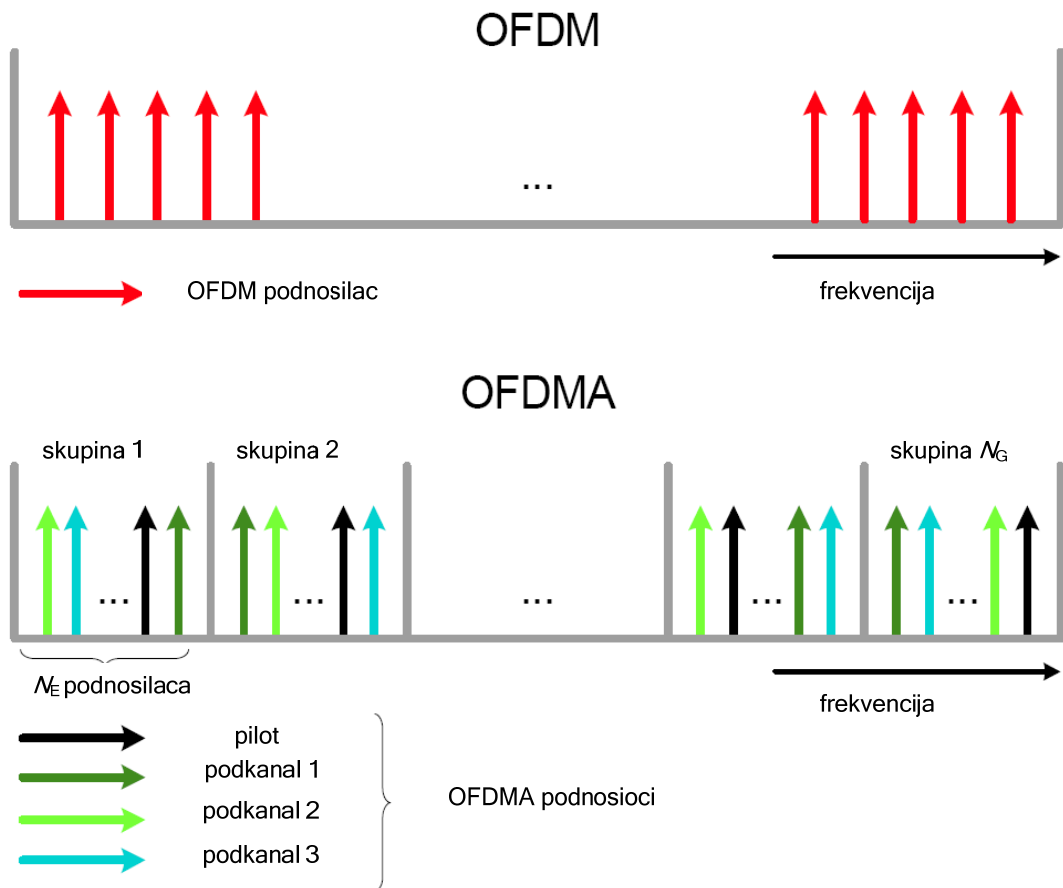


Slika 3.12. Pojednostavljeno objašnjenje za TDD

Radi jako složene strukture okvira iz norme za objašnjenje načina rada poslužit će pojednostavljena shema sa Slike 3.12. Jedan OFDM okvir može trajati od 2,5 do 20 ms i kod TDD sustava se on sastoji od podokvira silazne veze i podokvira uzlazne veze. Između njih postoji određeno zaštitno vremensko područje. Podokviri počinju s preambulama koje sadrže poznate simbole, a podaci se prenose na ograničenom broju podnosilaca. Svrha preambula je dobiti informaciju o stanju kanala kako bi prijatelj mogao odrediti odziv kanala i ispravno primiti poruke. Simboli preambule se odašilju s dvostrukom snagom. Nakon preambule odašilje se FCH (*Frame Control Header*) koji je implementiran kao jedan OFDM simbol. Simbol sadrži informacije o sadržaju okvira (lokacije i modulacije podataka namijenjenih pojedinim korisnicima). FCH ne sadrži dovoljno informacija da u potpunosti opiše profil sustava, ali prijatelji mogu započeti s dekodiranjem.

3.3.1.2. OFDMA radijsko sučelje

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) u stvari znači da se svi prijenosni resursi (frekvencijski i vremenski) dijele između svih korisnika. Kod OFDM-a se s druge strane u nekome određenom vremenskom odsječku svi resursi stavljaju na raspolaganje jednom korisniku. Dakle, OFDMA u stvari predstavlja kombinaciju višestrukih pristupa TDMA i FDMA. Na sljedećoj slici prikazana je razlika između OFDM-a i OFDMA.



Slika 3.13. Osobitosti postupka OFDMA u odnosu na OFDM

Kao što se vidi sa Slike 3.13., OFDMA dijeli cjelokupni prostor podnosilaca u N_G skupina od kojih svaka ima N_E podnosilaca. Znači postoji N_E logičkih podkanala (svaki logički podkanal opslužuje jednog korisnika). Kao primjer može se uzeti OFDMA s 2048 podnosilaca kod koje je u silaznoj vezi $N_E = 32$ i $N_G = 48$, dok su u uzlaznoj vezi ti iznosi $N_E = 32$ i $N_G = 53$. Ostali podnosioci koriste se kao piloti ili se uopće ne koriste (zaštitni pojas). Kodiranje, modulacija i razine amplitude mogu se namjestiti različito za svaki podkanal ovisno o uvjetima u kanalu kako bi se optimizirao prijenos.

Ako se želi dodatno objasniti i opisati OFDMA u navedenoj normi potrebno je definirati sljedeće osnovne pojmove:

- **PODRUČJE (zone)** – kompletan logički dio okvira. Postoje silazna i uzlazna područja (DL i UL). Neka koriste sve podkanale u OFDMA frekvencijskom području (FUSC, *Full Usage of SubChannels*), dok neka koriste samo dijelove (PUSC, *Partial Usage of Subchannels*). Područja se sastoje od burstova.

- BURST (*burst*) – dio unutar područja koji je dodijeljen jednom korisniku. Sastoji se od odsječaka. Koristi određen broj podkanala i simbola.
- ODSJEČAK (*slot*) – najmanja moguća jedinica podataka unutar OFDMA, definirana u vremenu i frekvenciji. Uvijek sadrži jedan podkanal i može sadržavati jedan do tri simbola (ovisno o vrsti područja). U DL-PUSC području odsječak je širok 2 simbola, a u UL-PUSC području 3 simbola.
- PODKANAL (*subchannel*) – opisuje najmanju logičku jedinicu u frekvencijskoj domeni. Sadrži jedan ili više podnosilaca (nisu susjedni) čiji raspored se može mijenjati unutar bursta, od simbola do simbola. Prema 802.16-2004 broj podkanala se mijenja od 32 do 96 ovisno o vrsti područja.
- SIMBOL (*symbol*) – najmanja jedinica unutar vremenske domene. Njegovo trajanje ovisi o zaštitnom vremenskom intervalu OFDMA simbola i razmaku frekvencija podnosilaca. Treba razlikovati ovo značenje pojmova simbol i OFDMA simbol.
- SEGMENT (*segment*) – je skup OFDMA skupina podkanala. Postoje tri segmenta za silaznu i tri za uzlaznu vezu.
- SKUPINA PODKANALA (*subchannel group*) – jedan ili više podkanala (od kojih se svaki sastoji od 1 ili više fizičkih podnosilaca) u DL PUSC području. Postoji 6 skupina podkanala.

Četiri osnovna parametra karakteriziraju OFDMA simbol:

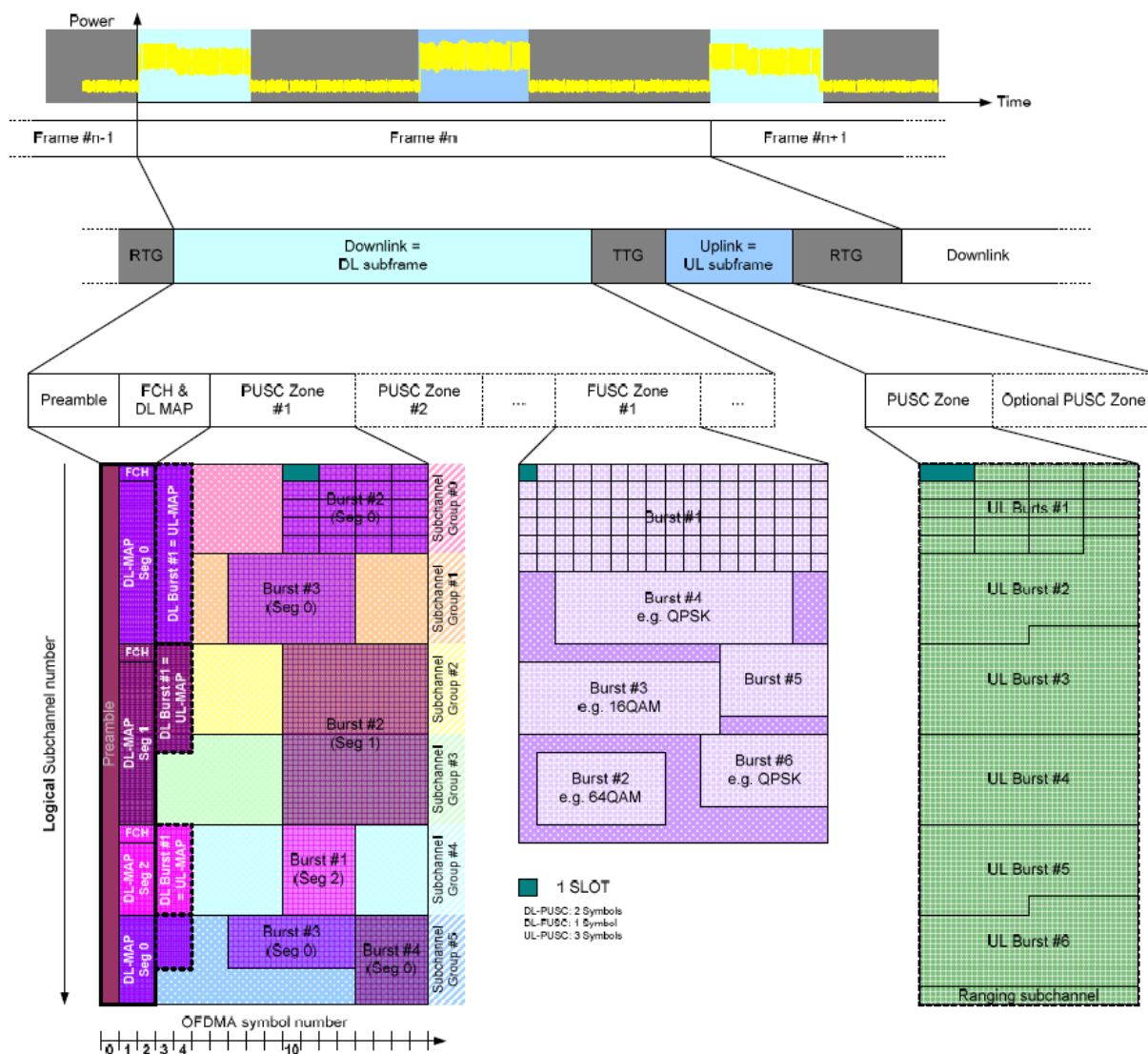
- BW , nominalna širina kanala,
- N_{used} , broj podatkovnih podnosioca (uključuje DC podnosilac),
- n , faktor uzorkovanja = 8/7,
- G , omjer zaštitnog intervala i korisnog vremena simbola (1/4, 1/8, 1/16 i 1/32).

Pomoću četiri osnovna parametra definiraju se

- N_{FFT} ukupan broj OFDM podnosioca (2048)
- F_{uz} frekvencija uzorkovanja, $F_{uz} = \text{floor}(n \times BW / 8000) \times 8000$
- Δf razmak podnosioca, $\Delta f = F_{uz} / N_{FFT}$
- T_b korisno vrijeme simbola, $T_b = 1 / \Delta f$
- T_g trajanje zaštitnog intervala, $T_g = G \times T_b$
- T_s ukupno trajanje OFDMA simbola, $T_s = T_b + T_g$
- T_{uz} vrijeme uzorkovanja, $T_{uz} = T_b / N_{FFT}$

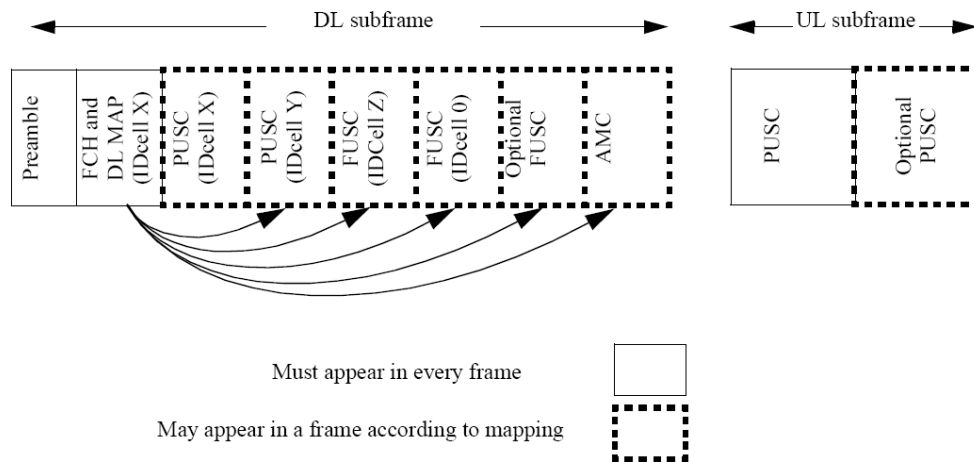
Struktura okvira

OFDMA okvir može trajati od 2 ms do 20 ms. Pri tome se prenese 19 do 198 OFDMA simbola. Treba napomenuti da to nisu egzaktno nego okvirne vrijednosti. Naime, točna vrijednost trajanja pojedinog okvira ovisit će o veličini zaštitnog pojasa OFDMA simbola. Na Slici 3.14. dan je primjer OFDMA okvira. Iako se podržava FDD i TDD, dominantno se koristi TDD.



Slika 3.14. Primjer strukture OFDMA okvira

Unutar silazne i uzlazne veze ne moraju se upotrijebiti različite vrste područja, kako je to prikazano na Slici 3.15. U okviru se uvijek moraju nalaziti: preambula, FCH i DL MAP.



Slika 3.15. Ilustracija OFDMA okvira s različitim područjima (preuzeto iz norme)

Na početku svakog podokvira silazne veze nalazi se preambula. Ona traje jedan OFDMA simbol. Uloga preambule je ostvarivanje sinkronizacije s odašiljačem i procjena stanja radijskog kanala. Broj korištenih podnosilaca određuje koji od tri segmenta područja će se koristiti. Nakon preambule odašilje se FCH (zaglavlje koje kontrolira okvir) koje je QPSK modulirano i traje dva OFDMA simbola. Svaki segment sadrži FCH, a položaj FCH polja u okviru je fiksiran. Sadržaj FCH opisuje koji podkanali se koriste te kolika je duljina DL-MAP-a koja slijedi. DL-MAP (raspoređivanje silazne veze) daje lokacije burstova u silaznim područjima. On sadrži broj silaznih burstova i njihov položaj kao i duljinu u matrici frekvencijski podnosioci – vrijeme. Odašilje se u svakom segmentu. UL-MAP (raspoređivanje uzlazne veze) se odašilje kao prvi burst u silaznoj vezi i sadrži informacije o lokacijama burstova uzlazne veze koji odašilju različiti korisnici. Postoji više područja. DL-PUSC područje mora biti prvo u silaznoj vezi (tako je i UL-PUSC prvo područje u uzlaznoj vezi). Karakterizira ga djelomično korištenje podkanala. Specijalni slučaj ovakvog područja je i DL-PUSC all SC (DL-PUSC sa svim podnosiocima) koje koristi sve podkanale. Područje DL-FUSC ne koristi segmente, ali također koristi sve podkanale. Postoje i druge vrste područja kao što su opcijski DL-FUSC te AMC (*Advanced Modulation and Coding*). Sadržaj okvira može biti i AAS (*Adaptive Antenna System*) koji se koristi u slučaju korištenja inteligentnih antena i MIMO tehnike za unaprjeđivanje karakteristika.

Tablica 3.9. Specifikacije područja

Parametar	DL-FUSC	Opcijski DL-FUSC	DL-PUSC	UL-PUSC
FFT veličina	2048	2048	2048	2048
DC podnosilac	1 (indeks 1024)	1	1 (indeks 1024)	1 (indeks 1024)
Lijevi zaštitni podnosioci	173	159	184	184
Desni zaštitni podnosioci	172	160	183	183
Korisni podnosioci (bez DC podnosioca)	1702	1728	1680	1680
Piloti	166 (2×12+2×71)	192	promjenjivo	promjenjivo
Podnosioci koji prenose podatke	1536	1536		
Broj podnosilaca po podkanalu	48	48		
Podkanali	32	32	60	70
Veličina odsječka (podkanali ×simboli)	1×1	1×1	1×2	1×3

Zaključno se za normu 802.16-2004 može ustvrditi sljedeće:

- iako postoji 5 definiranih radijskih sučelja najvjerojatnije će se upotrebljavati radijsko sučelje OFDM,
- OFDMA princip rada pogodniji je za mobilne mreže, dok je za fiksne mreže prikladniji OFDM (manje je kompleksan i jeftiniji),
- postoje certificirani proizvodi za OFDM radijska sučelja,
- proizvodi su već sazreli na tržištu,
- uklapa se u dodijeljeni spektar u našoj državi. Valja naglasiti da je europska preporuka da se ne određuje namjena po pitanju mobilnosti.

3.3.2. Obilježja norme IEEE 802.16e

Norma 802.16e također definira više vrsta radijskih sučelja. Budući je prvenstvena nit vodilja za ovu normu mobilnost, najznačajnije je radijsko sučelje OFDMA. Sve prije spomenuto u vezi OFDMA (802.16-2004), većinom je valjano i za ovu normu. Najveće razlike u odnosu na raniju normu iskazuju se u višim slojevima (MAC sloju) gdje su dodane još neke funkcionalnosti. Kao primjer mogu se spomenuti: prekapčanje (*handover*), neograničeno kretanje (*roaming*). Glavna razlika u fizičkom sloju je u tome što osim FFT veličine 2048, koja se koristi u 802.16-2004, dopušta se i FFT razina 1024, 512 i 128. S mogućnošću namještanja FFT veličine, a istodobno fiksirajući razmak frekvencija između podnosilaca (10,94 kHz) postigla se skalabilnost sustava.

Faktor uzorkovanja n može poprimiti vrijednosti $8/7$ i $28/25$, dok je omjer zaštitnog intervala i korisnog vremena simbola G iznosa $1/4$ ili $1/8$ ili $1/16$ ili $1/32$. FCH sadržaj skraćen je i modificiran za FFT vrijednost 128. U sljedeće dvije tablice dane su vrijednosti podatkovnih podnosilaca i podkanala za određene vrste područja i veličine FFT.

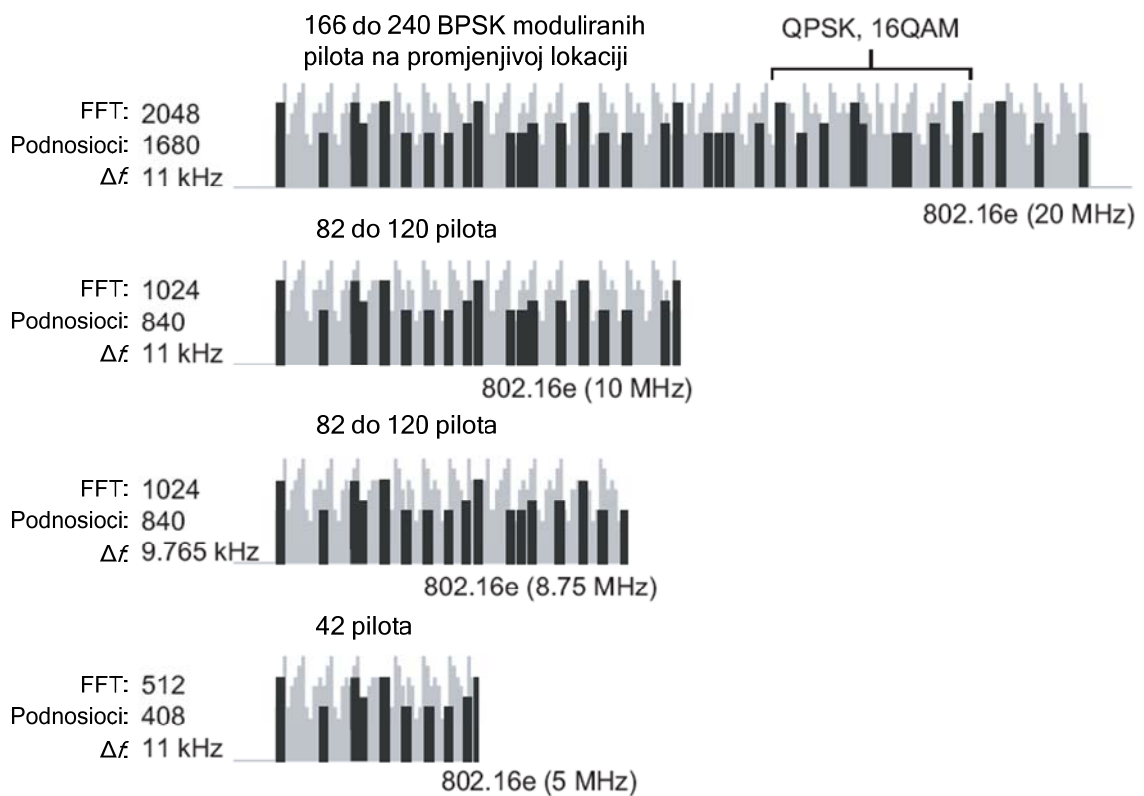
Sustav je također definiran za rad u različitim širinama kanala.

Tablica 3.10. Broj podatkovnih podnosilaca (bez DC) u ovisnosti o određenoj vrsti područja i veličini FFT

Vrsta područja	2048	1024	512	128
DL-FUSC	1728	850	426	106
DL-PUSC	1680	850	420	84
DL-PUSC all SC	1680	840	420	84
DL-OPUSC	1728	864	432	108
DL-AMC	1728	864	432	108
UL-PUSC	1680	840	408	98
UL-PUSC all SC	1680	840	408	98
UL-OPUSC	1728	864	432	108
UL-AMC	1680	864	432	108

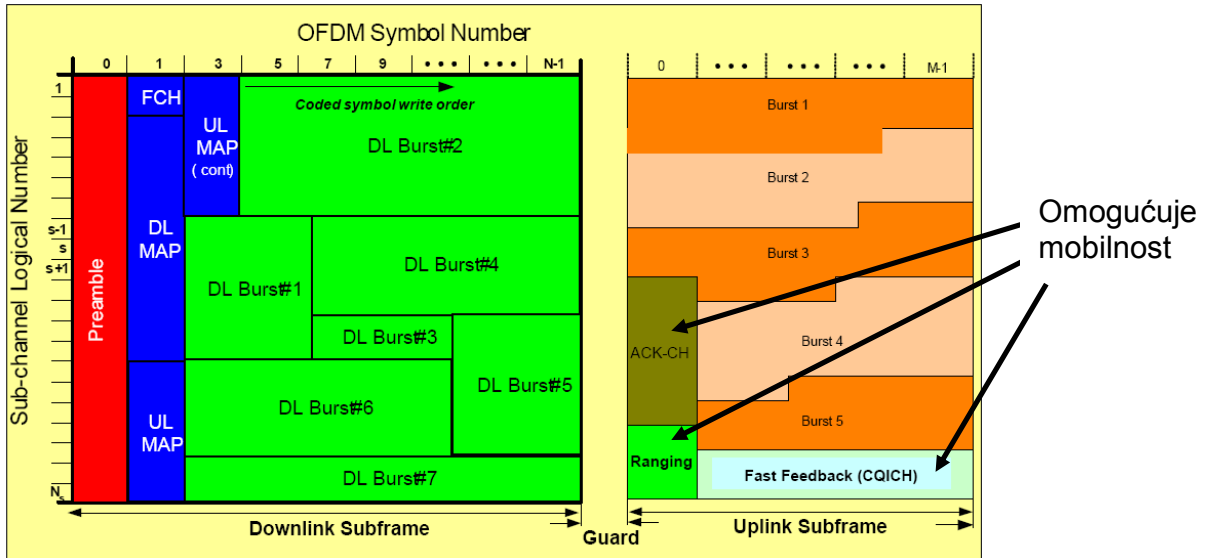
Tablica 3.11. Broj podkanala u ovisnosti o vrsti područja i veličini FFT

Vrsta područja	2048	1024	512	128
DL-FUSC	32	16	8	2
DL-PUSC	60	30	15	3
DL-PUSC all SC	60	30	15	3
DL-OPUSC	32	16	8	2
UL-PUSC	70	35	17	4
UL-PUSC all SC	70	35	17	4
UL-OPUSC	96	48	24	6



Slika 3.16. Primjeri mogućih načina rada za različite širine kanala

Trenutno su najzastupljenije širine kanala 5 i 10 MHz i one su komercijalno dostupne. Iako su dozvoljene i druge širine kanala, kasni se s realizacijama odgovarajuće opreme. Prilikom razmatranja strukture okvira, pozornost će biti obrađena dijelovima uzlazne veze koji nisu obrađeni u prethodnim razmatranjima.



Slika 3.17. Struktura okvira

Da bi se osigurala mobilnost, u uzlaznoj vezi nalaze se tri bloka:

- UL podešavanje (UL *Ranging*): služi da bi se ostvarilo namještanje snage, frekvencije, traženog pojasa itd.
- UL CQICH, zove se i CQI (*Channel Quality Indicator*), indikator kvalitete kanala: služi za povratnu informaciju o stanju u fizičkom kanalu,
- UL ACK (*acknowledgement*), odgovor: služi da bi se odgovorilo na upit iz bazne postaje DL HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*).

Na osnovu dobivenih podataka iz uzlazne veze, bazna postaja može odrediti optimalnu brzinu prijenosa, način zaštitnog kodiranja prema svakom korisniku (promjenjivu modulaciju i kodiranje). Pomoću HARQ ubrzava se odgovor sustava na pogreške u prijenosu paketa. Ovim dodatnim blokovima omogućeno je ostvarivanje komunikacije u mobilnim uvjetima, sve do brzine od 120 km/h.

Sustav ima sljedeće kategorije kvalitete usluga (QOS, *Quality of Service*):

- UGS (*Unsolicited Grant Service*) – usluge s nezatraženim dodjeljivanjem: koristi se za prijenos VoIP-a, T1/E1 prijenos, a

karakterizira ga maksimalni kontinuirani protok podataka, maksimalna tolerancija razdoblja čekanja, tolerancija na podrhtavanje takta, ima najveći prioritet;

- rtPS (*Real Time Polling Service*) – usluge s prozivanjem u stvarnom vremenu: koristi se za prijenos audio ili video tijeka podataka (MPEG video), karakterizira ga minimalni rezervirani protok, maksimalni mogući kontinuirani protok podataka, maksimalna tolerancija razdoblja čekanja, prioritet u prometu;
- ErtPS (*Extended Real-Time Polling Service*) – proširene usluge s prozivanjem u stvarnom vremenu: koristi se za prijenos audio tijeka podataka (VOIP) s uključenom detekcijom aktivnosti, karakterizira ga sve što i rtPS plus tolerancija na podrhtavanje takta;
- nrtPS (*Non Real Time Polling Service*) – usluge s nekontinuiranim prozivanjem: koristi se za prijenos datoteka (FTP), karakterizira ga minimalni rezervirani protok, maksimalni mogući kontinuirani protok, određeni prioritet u prometu;
- BE (*Best Effort Service*) – najbolje moguće ostvarive usluge: koristi se za prijenos datoteka (HTTP), pregledavanje Web sadržaja, karakterizira ga da nisu zajamčene brzina prijenosa niti kašnjenje, maksimalni mogući kontinuirani protok, ima najmanji prioritet u prometu.

Mobilni WiMAX omogućuje usluge odašiljanja iste poruke podgrupi korisničkih postaja (*multicast*) i klasično odašiljanje prema svim korisnicima (*broadcast*). Uporabom MIMO tehnike i inteligentnih antena značajno se poboljšavaju svojstva. U mobilni WiMAX (802.16e) spada i korejski sustav WiBRO (*wireless broadband*). On je nastao samo kao jedan specifični set mogućih postavki. Budući mobilni WiMAX ima golemi broj mogućih postavki (konfiguracija) teško je govoriti o proračunima brzine prijenosa podataka, područjima pokrivanja i sl.

Za kraj valja naglasiti da je ovo jedna jako mlada tehnologija koja je još u dinamičkoj fazi usavršavanja i razvoja. Vjerojatno je potrebna još koja godina da bi se dostigla potpuna zrelost i puna predviđena operabilnost. Da li će se operatori odlučiti za mobilni ili nepokretni sustav ovisit će o vrstama usluge koju misle pružati, cijeni kao i o nacionalnim regulatorima.

3.3.3. Usporedba najčešće korištenih radijskih sučelja

Kao što se vidjelo u prethodnim poglavljima, WiMAX je pokriven normama 802.16–2004 (nepokretne mreže) i 802.16e (mobilne mreže). Iako navedene norme definiraju više radijskih sučelja, u praksi se za nepokretni WiMAX koristi OFDM radijsko sučelje

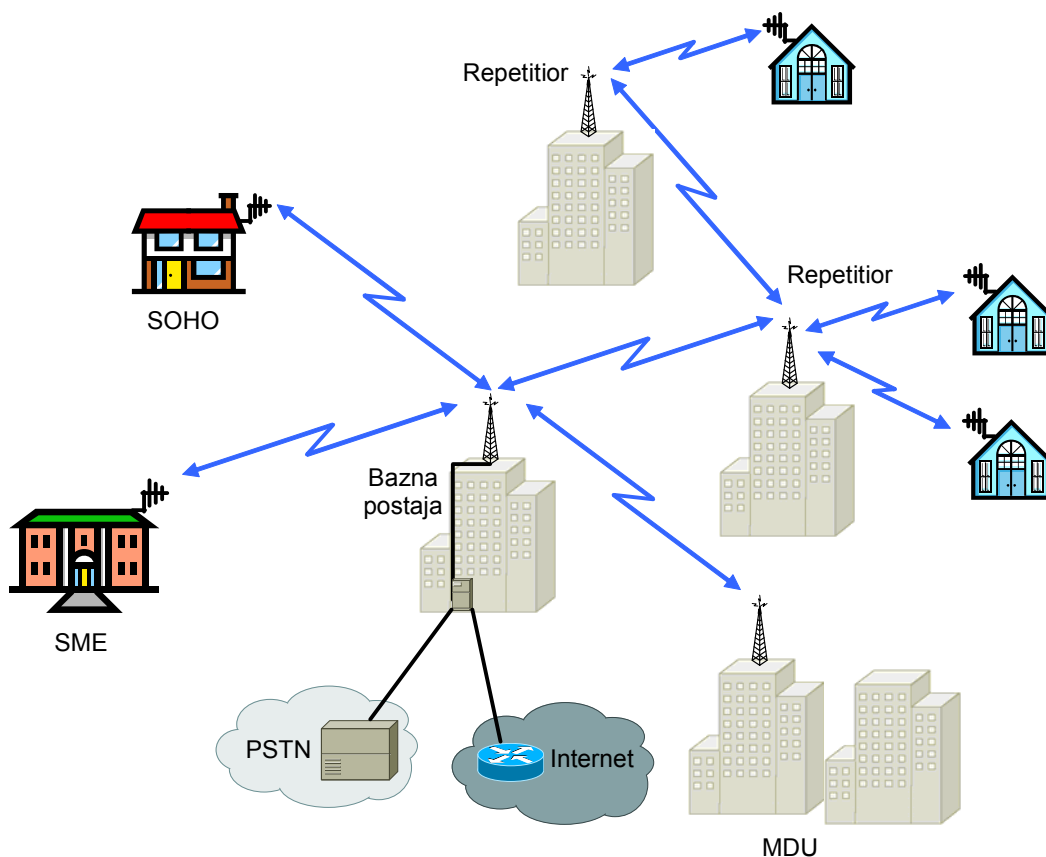
(OFDMA rijetko), dok se za mobilni WiMAX upotrebljava skoro isključivo OFDMA radijsko sučelje. U Južnoj Koreji zaživio je WiBRO sustav kojeg možemo smatrati dijelom mobilnog WiMAX-a. Usporedba osnovnih značajki različitih normi dana je u sljedećoj tablici.

Tablica 3.12. Usporedba različitih normi

Parametar	802.16-2004 OFDM	802.16-2004 OFDMA	802.16e	WiBRO
Veličina FFT	256	2048	2048, 1024, 512, 128	1024
Broj korisnih podnosilaca	200	1680/1728	promjenljiv	864/840
Broj pilota	8	166/192	promjenljiv	96
Frekvencijska širina kanala	1,25 do 28 MHz	1,25 do 28 MHz	1,25 do 28 MHz	8,75 MHz
Modulacijski postupci	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Dupleks	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD
Zaštitni interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/8
Podržano više korisnika po frekvenciji za vrijeme trajanja OFDM/OFDMA simbola	NE	DA	DA	DA
Podržano više korisnika po vremenu unutar jednog kanala	DA	DA	DA	DA
MIMO (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)	DA	DA	DA	DA

3.4. Arhitekture mreže

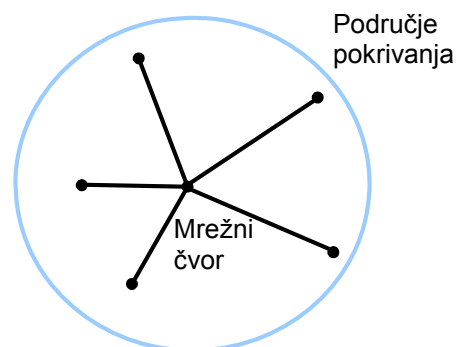
U P2MP mrežama više krajnjih fiksnih točaka povezuje se na jedan mrežni čvor tj. baznu postaju. To je dominantna arhitektura za radijske mreže gradskih područja, uključujući i WiMAX. Opću arhitekturu P2MP sustava prikazuje Slika 3.18. Bazna postaja sadrži odašiljačku/prijamnu opremu za odašiljanje/prijam signala do/od korisničke opreme ili repetitora, te uređaje koji omogućavaju povezivanje P2MP sustava na jezgrenu mrežu. Bazna postaja može za različite smjerove rabiti usmjerene antene čime se postiže podjela područja pokrivanja sustava u sektore. Na baznu postaju su priključene različite vrste korisnika: pojedinačni korisnici, mali i kućni uredi (SOHO), mala i srednja poduzeća (SME) i blokovi zgrada (MDU, *Multi-dwelling Units*). Repetitori se rabe radi povećanja područja pokrivanja ili se rabe kao međupostaje u onim područjima gdje nema optičke vidljivosti između bazne postaje i korisničkog terminala.



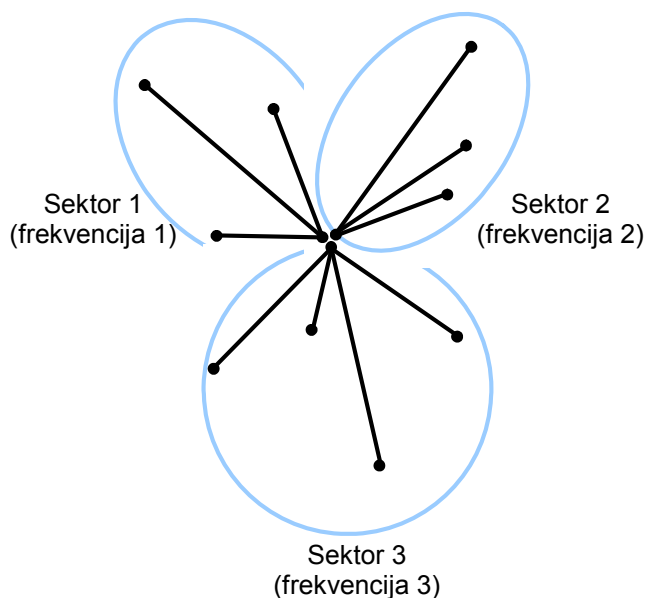
Slika 3.18. Temeljna arhitektura P2MP mreže

U ovisnosti o broju lokacija koje pri tome trebaju biti povezane na mrežni čvor, područje pokrivanja mrežnog čvora može se podijeliti na sektore, čime se ujedno povećava i kapacitet mreže. Slika 3.19. prikazuje arhitekturu P2MP sustava u kome područje pokrivanja

mrežnog čvora nije podijeljeno na sektore, a Slika 3.20. prikazuje arhitekturu P2MP sustava u kome je područje pokrivanja podijeljeno na tri sektora, pri čemu svaki sektor obuhvaća određeno područje azimuta i uključuje korisnike koji su locirani upravo u tom području azimuta. Pojedini sektor ima vlastiti usmjereni antenski sustav i koristi zasebnu frekvenciju. Broj sektora na koji se dijeli područje pokrivanja pojedinog mrežnog čvora ovisi o zahtjevima za širinom prijenosnog pojasa krajnjih korisnika. Ako je broj korisnika koji imaju velike zahtjeve za širinom prijenosnog pojasa veliki, mreža treba biti podijeljena na veći broj sektora kako bi se izbjeglo zagušenje do kojega bi moglo doći da su svi korisnici smješteni u jedan sektor.

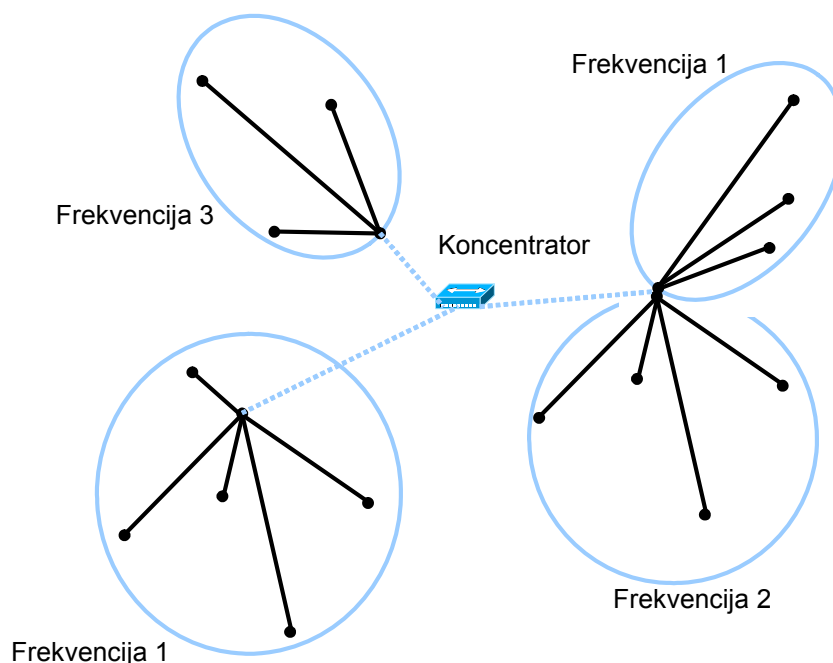


Slika 3.19. Arhitektura P2MP sustava (bez podjele u sektore)



Slika 3.20. Arhitektura P2MP sustava (uz podjelu područja pokrivanja na tri sektora)

P2MP arhitektura omogućava gospodarski isplativo povezivanje većeg broja krajnjih korisnika na jedan mrežni čvor. Prigodom priključivanja novog korisnika na mrežu jedino potrebno novo ulaganje je ulaganje u mrežnu opremu tog korisnika, dok nova ulaganja u opremanje mrežnog čvora (bazne postaje) nisu potrebna. Loše strane P2MP sustava su te što u njima treba provoditi upravljanje raspoloživom širinom pojasa kako bi se omogućilo većem broju korisnika da istodobno pristupaju mrežnom čvoru. Pored toga u projektiranju sustava treba posebnu pažnju usmjeriti na odabir lokacije mrežnog čvora jer od te lokacije do krajnjeg korisnika mora postojati optička vidljivost ili približna optička vidljivost. Ovi sustavi su dobar izbor u onim slučajevima kada je veliki broj krajnjih korisnika lociran na jednom ograničenom području kao što su gradovi ili dijelovi gradova.

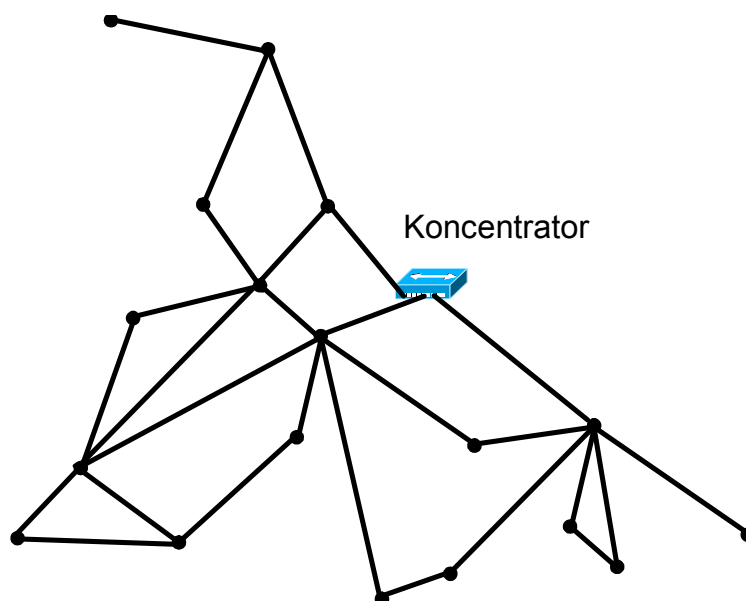


Slika 3.21. Čelijska mreža nastala povezivanjem više P2MP sustava

Povezivanjem više P2MP sustava na istu okosnicu mreže (*backbone network*) nastaje čelijska mreža u kojoj pojedina frekvencija može biti više puta iskorištena za pokrivanje različitih područja radijskim signalom, pri čemu frekvencijsko planiranje treba provodi tako da se smetnje svedu na najmanju moguću mjeru. Okosnica mreže može biti izvedena kao radijska ili fiksna mreža. Slika 3.21. prikazuje čelijsku mrežu u koju su uključene tri P2MP mreže. Središnji mrežni uređaj, na koji se vežu pojedine bazne postaje P2MP mreža, je koncentrator (*hub*). Svaka P2MP mreža ili sektor u P2MP mreži naziva se ćelijom. Uporabom ćelijske

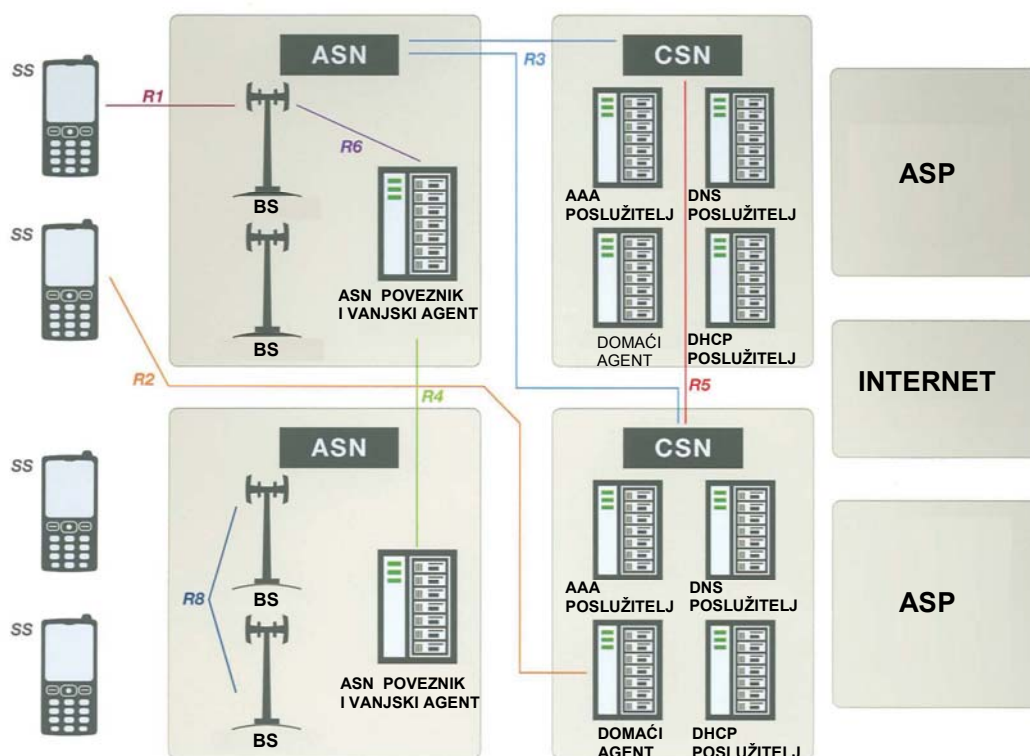
arhitekture može se pokriti veće zemljopisno područje nego što bi to bio slučaj izgradnjom jedne P2MP mreže.

U mreži vrste više točaka–više točaka svaki se mrežni čvor može povezati s bilo kojim drugim mrežnim čvorom u području pokrivanja mreže, (Slika 3.22.). Ovakva mrežna arhitektura se obično rabi kada je veliki broj krajnjih korisnika lociran na relativno malom području i kad je u području pokrivanja mreže veliki broj prepreka koje mogu onemogućiti optičku vidljivost između mrežnih čvorova. Svaki mrežni čvor u ovoj arhitekturi mreže obavlja dvije funkcije: funkcije usmjerivača i funkcije krajnjeg čvora. Podaci putuju kroz mrežu preko nekoliko međučvorova dok ne stignu do čvora na koji je povezan krajnji korisnik. Ako u ovoj mreži postoji narušavanje optičke vidljivosti između mrežnih čvorova komunikacija se obavlja preko drugih čvorova, ali da bi se takva komunikacija mogla uspostaviti mrežni čvorovi moraju biti dovoljno blizu jedan drugome, što ograničava veličinu područja pokrivanja mreže.



Slika 3.22. Arhitektura mreže vrste više točaka – više točaka (*mesh*)

Iako WiMAX podržava *mesh* arhitekturu, ona se gotovo ne primjenjuje. Mrežna arhitektura WiMAX-a je u potpunosti IP mreža (Slika 3.23.). Postojeće IP norme koriste se za izbjegavanje stvaranja novih entiteta mreže. Slika prikazuje mobilni WiMAX.



Slika 3.23. WiMAX mrežna arhitektura u skladu s WiMAX forumom

ASN: *Access Service Network* – pristupna mreža usluga

CSN: *Connectivity Service Network* – mreža za usluge spajanja

ASP: *Application Service Provider* – dobavljač namjenskih usluga

BS: *Base Station* – bazna postaja

SS: *Subscriber Station* – korisnička postaja

ASN

- osigurava radijsko sučelje koje povezuje korisničku postaju na mrežu, sadrži bazne postaje i upravlja radijskim sučeljem, sadrži ASN poveznik (*gateway*) koji osigurava uslugu mobilnosti između baznih postaja, vanjski agent ima funkciju kojom vrši provjeru vjerodostojnosti i dodjelu mobilnog IP-a

CSN

- omogućava povezivanje između ASN te usluge Interneta i drugih aplikacija, domaći agent i AAA poslužitelj (*Authentication, Authorization & Accounting Server*) provode provjeru vjerodostojnosti (*authentication*), domaći agent i DHCP poslužitelj (*Dynamic Host Configuration Protocol Sever*) provode upravljanje IP adresama, AAA poslužitelj zapisuje naplatu, domaći agent potpomaže mobilnost

U skladu s navedenom normom govori se o:

CS (*Central Station*) – bazna postaja, može biti jedna cjelina ili pak može sadržavati sljedeće dijelove:

- CCS (*Central Controller Station*) – upravljački dio bazne postaje;
- CRS (*Central Radio Station*) – radijski dio bazne postaje. Jedan CCS može kontrolirati više CRS.

TS (*Terminal Station*) – korisnička postaja, sadrži korisnička sučelja prema korisničkim uređajima.

- Jedan TS može opsluživati više TE (*Terminal Equipment*) – korisničkih uređaja.

RS (*Repeater Station*) – repetitor;

SNI (*Service Node Interface*) – sučelje prema mrežnom čvoru (jezgrenoju mreži);

UNI (*User Network Interface*) – sučelje prema korisničkoj mreži.

3.5. Lociranje baznih postaja

Planiranje sustava širokopoasnoga radijskog pristupa u uskoj je vezi s lociranjem baznih (temeljnih) postaja. Pravilnim lociranjem optimalno se pokriva neko područje u kojem se želi osigurati kvaliteta i raspoloživost usluge. Cilj je postići pokrivenost i dovoljan kapacitet uz što manji broj baznih postaja. Da bi se to moglo napraviti potrebno je izračunati područje pokrivanja bazne postaje. Najjednostavniji način proračuna područja pokrivanja bazne postaje osniva se na uporabi Friisove prijenosne jednadžbe:

$$10 \log \left(\frac{W_{pr}}{W_{od}} \right) = G_{od}[\text{dB}] + G_{pr}[\text{dB}] + n \cdot 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right), \quad n = 2.$$

Ovdje je: W_{od} snaga odašiljača, W_{pr} snaga na prijamnoj anteni, λ valna duljina, R udaljenost između odašiljačke i prijamne antene, a G_{od} i G_{pr} su dobitci odašiljačke i prijamne antene. U originalnoj Friisovoj jednadžbi koeficijent n jednak je 2 (kvadratna ovisnost). Ovdje je ipak upotrijebljen općenitiji zapis, jer, kako će biti kasnije prikazano, mnogi kompliciraniji modeli (naročito oni izvedeni iz mjernih rezultata) pokušavaju koristiti Friisovu jednadžbu u kojoj se umjesto kvadratne zavisnosti uvodi neki novi koeficijent n . U slučaju FWA sustava navedenoj formuli dodaju se dodatna gušenja uslijed učinka zasjenjenja. Ta dodatna gušenja (mjereno u dB) imaju normalnu razdiobu sa određenom srednjom vrijednosti i standardnom devijacijom (σ). Za suburbana područja u literaturi se nalazi podatak da je $\sigma = 9,6$ dB (podatak dobiven mjerenjima na

terenu). Uz 90 % pokrivenosti na rubu područja (obično to žele operatori) iz navedene standardne devijacije slijedi da su granice zalihosti 12,3 dB tj. za toliki iznos treba uvećati prijenosnu jednadžbu. Proračun veze za WiMAX sustav koji radi u području 3,5 GHz sa širinom kanala 3,5 MHz dan je u Tablicama 3.13. i 3.14. Proračun je prikazan za BPSK modulaciju s omjerom koda 1/2 i 64-QAM modulaciju s omjerom koda 3/4 (najmanja i najveća brzina prijenosa).

Tablica 3.13. Proračun uzlazne veze za WiMAX u području 3,5 GHz, širine kanala 3,5 MHz, antena korisničke postaje je na otvorenom prostoru

Parametar	Jedinica	Izraz	BPSK 1/2	64-QAM 3/4
Brzina prijenosa	Mbit/s	r	1,4	12,7
Snaga korisničke postaje	dBm	A	23,0	23,0
Dobitak antene korisničke postaje	dBi	B	18,0	18,0
Gubici u kabelu korisničke postaje	dB	C	0	0
Odaslani EIRP korisničke postaje	dBm	$D=A+B-C$	41,0	41,0
Dobitak antene bazne postaje	dBi	E	17,0	17,0
Gubici u kabelu bazne postaje	dB	F	1,0	1,0
Gustoća toplinskog šuma	dBm/Hz	$10 \times \log(kT)+30$	-174,0	-174,0
Širina kanala	MHz	G	3,5	3,5
Toplinski šum u kanalu	dBm	$H=10 \times \log(kTG)+90$	-108,6	-108,6
Šum bazne postaje	dB	I	4,0	4,0
Prag šuma bazne postaje	dBm/Hz	$J=H+I$	-104,6	-104,6
Traženi omjer S/N	dB	K	6,4	24,4
Zalihost za smetnje	dB	L	0	0
Osjetljivost bazne postaje	dBm	$M=J+K+L$	-98,2	-80,2
Dobitak uslijed diverzitija	dB	N	0	0
Ukupan dobitak cijelog sustava	dB	$Q=D+E-F-M+N$	155,2	137,2
Standardna devijacija log-normalne razdiobe	dB	σ	9,6	9,6
Zalihost uslijed fedinga	dB	O	12,3	12,3
Gubici širenja kroz zgradu	dB	P	0	0
Maksimalni gubici uzlazne veze	dB	$R=D+E-F-M+N-O-P$	142,9	124,9

Tablica 3.14. Proračun uzlazne veze za WiMAX u području 3,5 GHz, širine kanala 3,5 MHz, antena korisničke postaje je u zgradi

Parametar	Jedinica	Izraz	BPSK 1/2	64-QAM 3/4
Brzina prijenosa	Mbit/s	r	1,4	12,7
Snaga korisničke postaje	dBm	A	23,0	23,0
Dobitak antene korisničke postaje	dBi	B	18,0	18,0
Gubici u kabelu korisničke postaje	dB	C	0	0
Odaslani EIRP korisničke postaje	dBm	$D=A+B-C$	41,0	41,0
Dobitak antene bazne postaje	dBi	E	17,0	17,0
Gubici u kabelu bazne postaje	dB	F	1,0	1,0
Gustoća toplinskog šuma	dBm/Hz	$10 \times \log(kT)+30$	-174,0	-174,0
Širina kanala	MHz	G	3,5	3,5
Toplinski šum u kanalu	dBm	$H=10 \times \log(kTG)+90$	-108,6	-108,6
Šum bazne postaje	dB	I	4,0	4,0
Prag šuma bazne postaje	dBm/Hz	$J=H+I$	-104,6	-104,6
Traženi omjer S/N	dB	K	6,4	24,4
Zalihost za interferenciju	dB	L	0	0
Osjetljivost bazne postaje	dBm	$M=J+K+L$	-98,2	-80,2
Dobitak uslijed diverzitija	dB	N	12,0	12,0
Ukupan dobitak cijelog sustava	dB	$Q=D+E-F-M+N$	167,2	149,2
Kombinirana standardna devijacija log-normalne razdiobe	dB	$\sqrt{(\sigma^2 + \sigma_i^2)}$	11,3	11,3
Zalihost uslijed fedinga	dB	O	14,4	14,4
Gubici širenja kroz zgradu	dB	P	12,0	12,0
Maksimalni gubici uzlazne veze	dB	$R=D+E-F-M+N-O-P$	140,8	122,8

Da bi sustav u cjelini bio funkcionalan i ekonomski isplativ, potrebno je, pored radiofrekvencijskog planiranja, razmotriti i sljedeće zahtjeve na: karakteristike i izbor opreme, izbor lokacije i utvrđivanje vlasništva objekata, izbor sustava sa stanovišta korisničkih potreba, način izgradnje, međupovezivanje (*interconnection*), napajanje i održavanje. Prilikom planiranja sustava ili izbora rješenja potrebno je napraviti određene kompromise. Postoji pet osnovnih aspekata planiranja realnog komunikacijskog sustava. To su cijena (*Cost*), pokrivenost (*Coverage*), kapacitet (*Capacity*),

kompleksnost (*Complexity*) i smetnja (*C/I*). U nastavku će biti riječi samo o pokrivenosti i kapacitetu.

3.5.1. Izračun prosječne veličine ćelije u području 3,4–3,8 GHz prema europskim preporukama

Osnovu za proračun predstavlja ECC izvješće broj 33 iz veljače 2006. pod izvornim nazivom *The Analysis Of The Coexistence Of Point-To-Multipoint FWS Cells In The 3.4–3.8 GHz Band*.

Tablica 3.15. Preporučeni ulazni parametri za proračun veličine ćelije

	Modulacija	
	QPSK	16-QAM
Širina kanala, [MHz]	3,5/7	3,5/7
Odaslana snaga CS, [dBm]	30 (ruralni LOS slučaj) 35 (NLOS slučaj)	30 (ruralni LOS slučaj) 35 (NLOS slučaj)
Odaslana snaga vanjske TS, [dBm]	30	30
Odaslana snaga unutarnje TS, [dBm]	23	23
Šum prijarnika, [dB]	8	8
Prag prijama za BER= 10 ⁻⁶ , [dBm]	-84	-76
Kritični C/I za BER= 10 ⁻⁶ , [dB]	~14	~22
Dobitak sektorske antene (90°) CS-a, [dB]	16	16
Dijagram zračenja CS antene	ETSI EN 302 085 ITU-R F.1336	ETSI EN 302 085 ITU-R F.1336
Dobitak i dijagram zračenja vanjske TS antene, [dBi]	16 ETSI EN 302 085 ITU-R F.1336	16 ETSI EN 302 085 ITU-R F.1336
Dobitak neusmjerene unutarnje TS antene, [dBi]	4	4

CS–bazna postaja; TS–korisnički terminal

Obrađena su dva tipična scenarija, ruralni LOS slučaj i urbani NLOS slučaj. Ova dva scenarija pokrivaju samo stacionarne korisničke postaje. Valja naglasiti da nisu analizirani niti utjecaji promjenjivih modulacijskih postupaka.

Ruralni LOS slučaj

Može se zaključiti da u većini slučajeva gušenje uslijed sfernog ogiba ne utječe na veličinu radijusa pokrivanja. U slučajevima gdje su visine antena bazne postaje i korisničke postaje 10 m, značajnije dolazi do izražaja utjecaj sfernog ogiba na smanjenje područja pokrivanja. Zaključak je da u ruralnom području veličina pokrivanja iznosi ~ **9 – 15 km**. Područje pokrivanja je manje za veću raspoloživost sustava i za viši modulacijski postupak. Razlog leži u većoj razini praga prijema, odnosno većoj potrebnoj zalihosti veze.

Urbani NLOS scenarij

Pretpostavke: nema optičke vidljivosti između bazne i korisničke postaje, prisutno je znatno zasjenjenje, refleksija, ogib i raspršenje elektromagnetskih valova, dio korisnika koristi korisničke postaje unutar zatvorenog prostora. Sve navedeno dodatno smanjuje područje pokrivanja. Uvodi se za simulaciju gubitaka IEEE 802.16 SUI model (kombinacija Ercegovih terena i SUI modela). Korisnici se dijele na poslovne korisnike (koriste antene koje su usmjerene, nalaze se u otvorenom prostoru), te rezidencijalne korisnike (koriste antene u zatvorenom prostoru).

Pretpostavljene veličine prostorne pokrivenosti i vremenske raspoloživosti sustava za poslovne i rezidencijalne korisnike su:

Poslovni korisnici:

- Pokrivenost područja = 95 % / 80 % / 65 %,
- Vremenska raspoloživost sustava = 99,99 %,

Rezidencijalni korisnici:

- Pokrivenost područja = 95 % / 80 % / 65 %,
- Vremenska raspoloživost sustava = 99,0 %.

Područje pokrivanja sustava dosta varira ovisno o upotrebljavanom scenariju i dominantnoj vrsti korisnika (~ 0,3 – 9 km). Realniji slučaj za rezidencijalne korisnike je da korisnik neće koristiti panel antenu na prozoru. U stvarnoj situaciji, operator ima mješavinu raznih tipova korisnika koje servisira mrežom i čije zahtjeve treba ispuniti. Pri tome treba voditi računa o fleksibilnosti mogućih proširenja.

3.5.2. Izračun područja pokrivanja u području 24,5–26,5 GHz

U tom području moguće je ostvariti samo veze za LOS komunikaciju. Područja pokrivanja izračunavaju se nadogradnjom Friisove formule. Kao osnova za dobivene rezultate poslužit će dokumenti: ERC izvješće 99 od 2000. godine pod nazivom, *The analysis of the coexistence of two FWA cells in the 24.5–26.5 GHz and 27.5–29.5 GHz bands* i ITU-R preporuka P.530-7, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Rezultati prikazani u sljedećoj tablici prikazuju maksimalna područja pokrivanja za horizontalnu polarizaciju uz određene brzine prijenosa i vrstu kišnog područja prema ITU-u.

Tablica 3.16. Veličina područja pokrivanja, u [km], uz određeni kapacitet sustava i kišna područja

ITU kišna područja:	E	K	L
4 Mbit/s	8	4,8	3,6
8 Mbit/s	7,2	4,4	3,3
16 Mbit/s	6,5	4,0	3,0
34 Mbit/s	5,7	3,6	2,8

Podaci su dobiveni uz definirane parametre sustava prema Tablici 3.17.

Tablica 3.17. Parametri sustava potrebni za proračun područja pokrivanja

Odaslana snaga:	24 dBm
<i>Prag prijama za $BER=10 \times 10^{-6}$</i>	
4 Mbit/s (3,5 MHz širina kanala):	-86 dBm
8 Mbit/s (7 MHz širina kanala):	-83 dBm
16 Mbit/s (14 MHz širina kanala):	-80 dBm
34 Mbit/s (28 MHz širina kanala):	-77 dBm
<i>Dobitci antena</i>	
Korisnička postaja – TS (G_t):	34 dB
Bazna postaja – CS (G_n):	19 dB

Ovo frekvencijsko područje je također detaljnije analizirano jer uz područje 3,4–3,6 GHz predstavlja jedinu trenutnu mogućnost za realizaciju FWA sustava u RH.

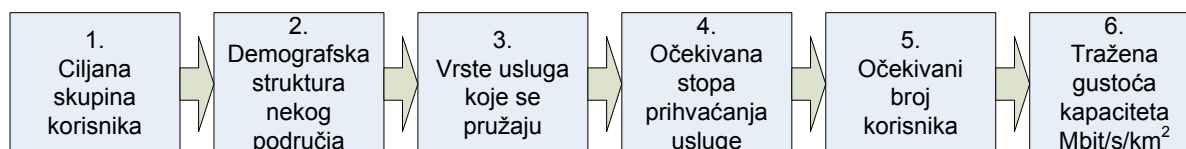
3.5.3. Kapacitet sustava (brzina prijenosa podataka)

Trenutni kapacitet ovisi o jako puno faktora: upotrijebljenoj modulaciji, zaštitnom kodiranju, ugrađenoj opremi, uvjetima propagacije, širini kanala... Svi ti parametri se dinamički mijenjaju tako da kapacitet u stvari stalno varira. Može se govoriti samo o prosječnim vrijednostima. Problem postaje još znatno složeniji uz mobilnost korisničke postaje. U sljedećoj tablici prikazana je jedna mogućnost na osnovu koje se može dobiti uvid u vrijednosti koje se, obzirom na dodijeljeni spektar i namjenu, mogu očekivati u RH.

Tablica 3.18. Maksimalni kapacitet WiMAX-a u području 3,5 GHz za kanal širine 3,5 MHz i FDD način rada

Modulacija	Osjetljivost (dBm)	SNR (dB)	Teorijska brzina (Mbit/s)	Stvarna brzina (Mbit/s)
BPSK, 1/2	-90,6	6,4	1,41	0,86
BPSK, 3/4	-88,6	8,5	2,1	1,28
QPSK, 1/2	-87,6	9,4	2,82	1,72
QPSK, 3/4	-85,8	11,2	4,23	2,58
16-QAM, 1/2	-80,6	16,4	5,64	3,44
16-QAM, 3/4	-78,8	18,2	8,47	5,16
64-QAM, 2/3	-74,3	22,7	11,29	6,88
64-QAM, 3/4	-72,6	24,4	12,71	7,74

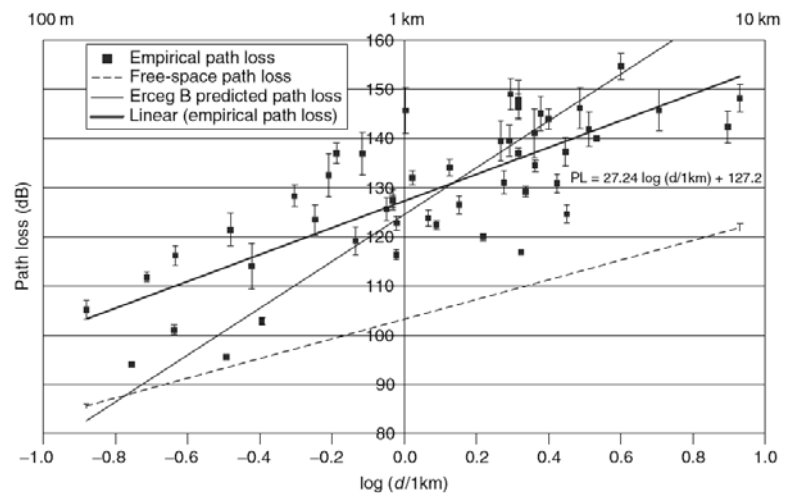
Gledajući s perspektive operatora, limitiranost je znatno veća zbog ograničenog kapaciteta nego zbog područja pokrivanja. To znači da operatori moraju predvidjeti strukturu korisnika i vrstu usluge koja im je namijenjena (privatni korisnici, poduzeća), njihovu gustoću na nekom području i očekivani stupanj korištenja kao i buduća očekivanja. Tada oni planiraju u biti gustoću kapaciteta po nekoj određenoj površini. Na osnovu toga raspoređuju se bazne postaje.



Slika 3.25. Određivanje zahtjeva za traženu gustoću kapaciteta

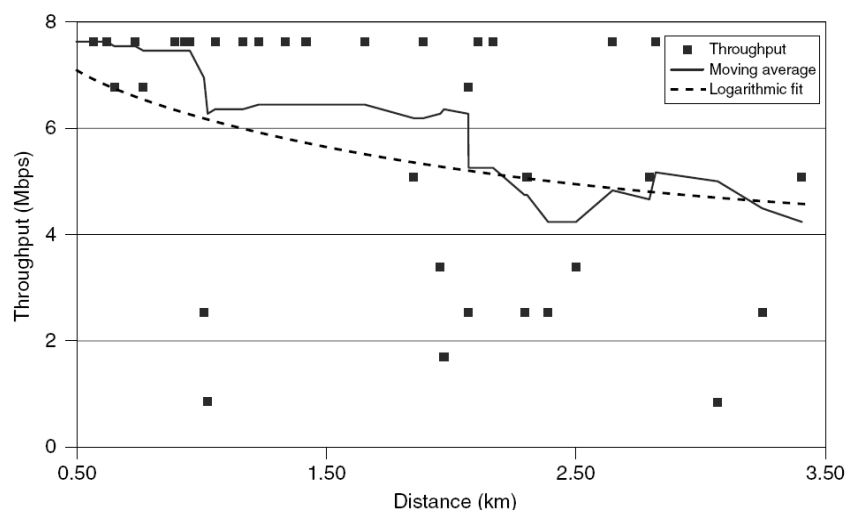
3.5.4. Ispitna mjerenja

Prije samog lociranja baznih postaja, često puta se rade ispitna mjerenja na terenu. Na osnovu rezultata tih mjerenja mogu se modelirati odgovarajući modeli pomoću kojih se računaju područja pokrivanja. Primjer za modeliranje gubitka staze dan je na sljedećoj slici. Empirijski izraz se dobije na temelju minimalnog kvadrata pogreške između mjerenih vrijednosti i linearnog modela.



Slika 3.26. Empirijski model gubitka staze dobiven na osnovu ispitnih mjerenja

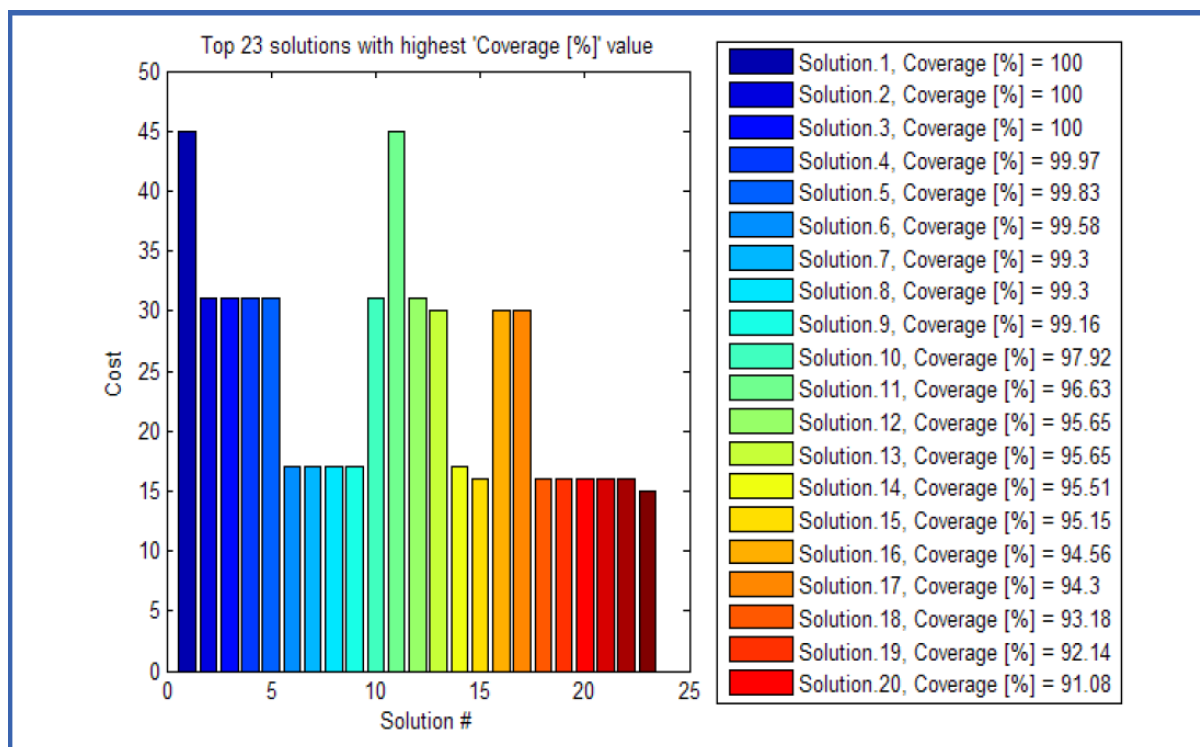
Također se rade mjerenja propusnosti slanja podataka (kapaciteta) u ovisnosti o udaljenosti od bazne postaje. Na osnovu tih mjerenja radi se empirijski model ovisnosti kapaciteta o udaljenosti od bazne postaje. Primjer proračuna kapaciteta dan je na sljedećoj slici.



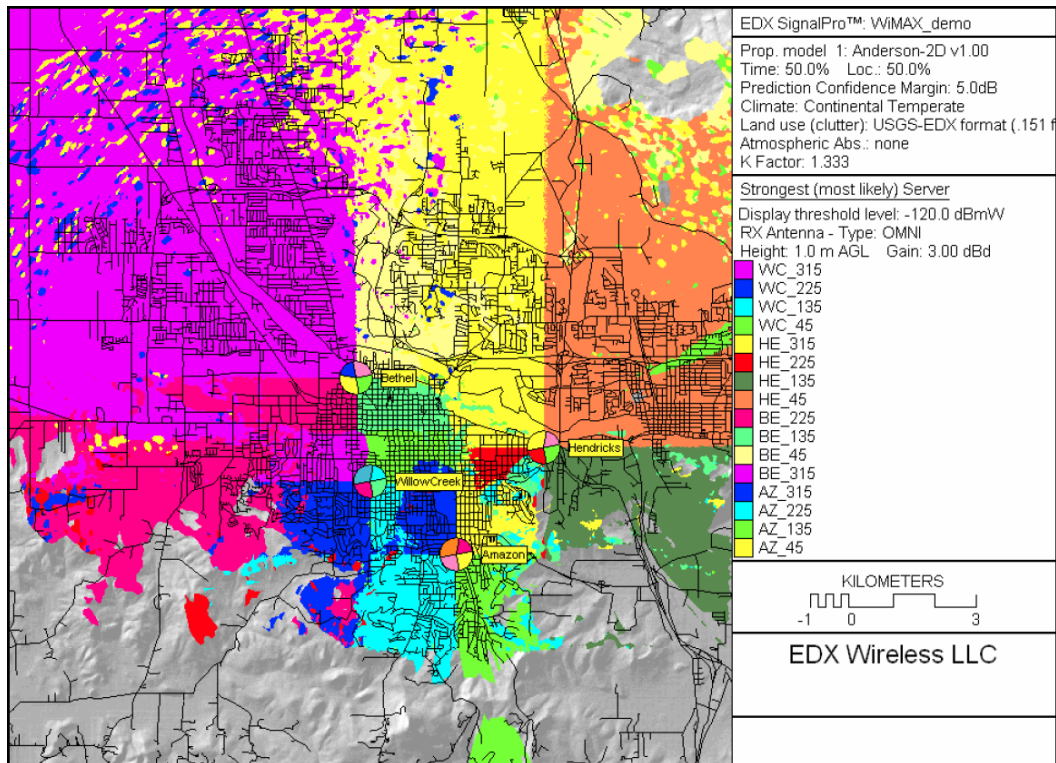
Slika 3.27. Proračun ponašanja kapaciteta u ovisnosti o udaljenosti od bazne postaje

3.5.5. Korištenje programske podrške

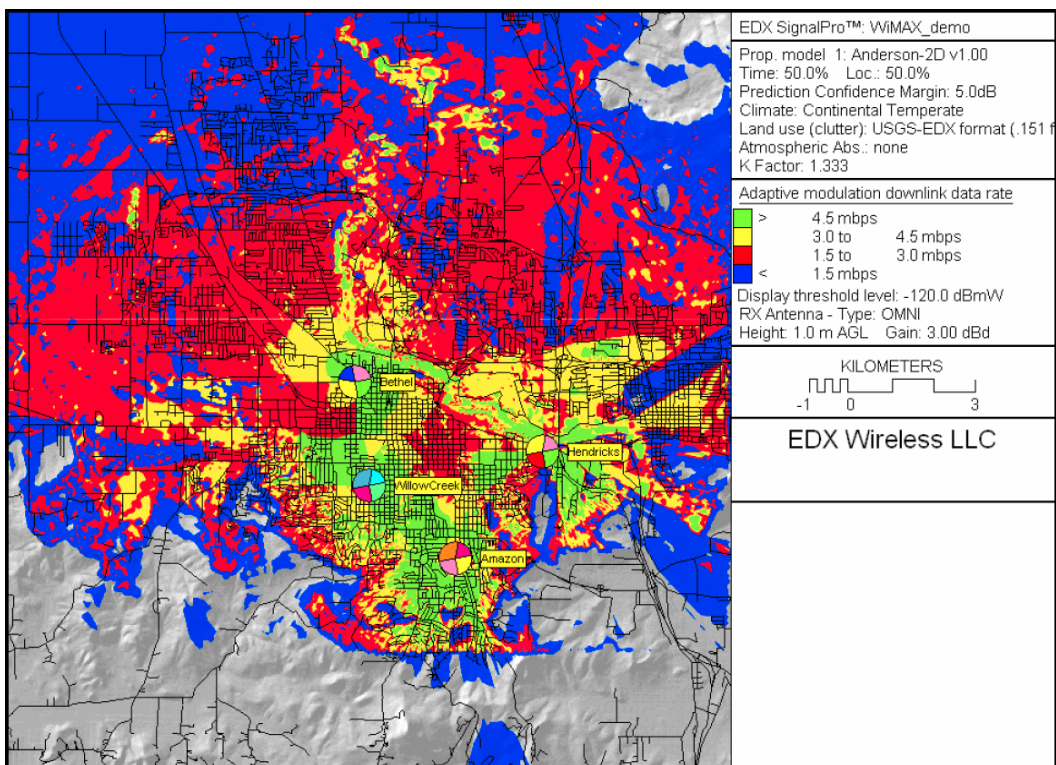
Danas projektantima stoji na raspolaganju mnoštvo korisničkih programskih paketa pomoću kojih mogu optimizirati izgradnju cjelokupne radijske mreže. Točnost tih proračuna prvenstveno ovisi o dostupnoj digitalnoj karti određenog zemljopisnog područja. Prvenstveno se to odnosi na urbana područja gdje je potrebno poznavati 3D sliku terena. Za lociranje WiMAX baznih postaja vrijede slična pravila kao i za druge radijske tehnologije. Najveći problem s kojim se projektanti danas susreću je nepoznavanje parametara WiMAX korisničke opreme, budući proizvođači ne daju točne specifikacije opreme koju proizvode (npr. osjetljivost prijammika). Nedostatak sofisticiranih programskih paketa (uključujući i digitalnu kartu) je njihova relativno visoka cijena. Prilikom korištenja programskih paketa, projektanti također na početku moraju definirati željeno pokrivanje, željene iznose kapaciteta, očekivane promete, kapacitet mreže na koju se spajaju bazne postaje, dozvoljene troškove. Na početku procesa optimiranja mreže ugrubo se odrede neke poželjne lokacije (važno iskustvo projektanata) baznih postaja. Nakon toga odaberu se kontrolne točke u kojima se želi ostvariti određena brzina prijenosa ili razina signala. Pomoću tih ulaznih podataka programski paketi računaju listu najpovoljnijih lokacija baznih postaja koje zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Na Slici 3.28. je jedan primjer rangiranih lokacija baznih postaja po kriteriju pokrivenosti.



Slika 3.28. Primjer rangiranja mogućih lokacija baznih postaja po kriteriju ostvarene pokrivenosti



Slika 3.29. Prikaz područja pokrivanja sektora baznih postaja dobiven programskom podrškom



Slika 3.30. Prikaz mogućih brzina prijenosa dobiven programskom podrškom

Umješnost projektanata sastoji se u tome da suze izbor ponuđenih rješenja na osnovu prije utvrđenih kriterija. Kad je ovaj inicijalni dio posla gotov, pristupa se detaljnijem planiranju koje uključuje točne dijagrame zračenja, visine antena, sektoriziranje. U konačnici se dobiju rezultati koji za odabrane lokacije baznih postaja daju područja pokrivanja i moguće brzine prijenosa. Na Slikama 3.29. i 3.30. su primjeri za 4 lokacije od kojih svaka ima 4 sektora.

3.6. Načela dodjele frekvencija i učinkovita dodjela frekvencija

3.6.1. Frekvencijsko područje 3,4–3,8 GHz

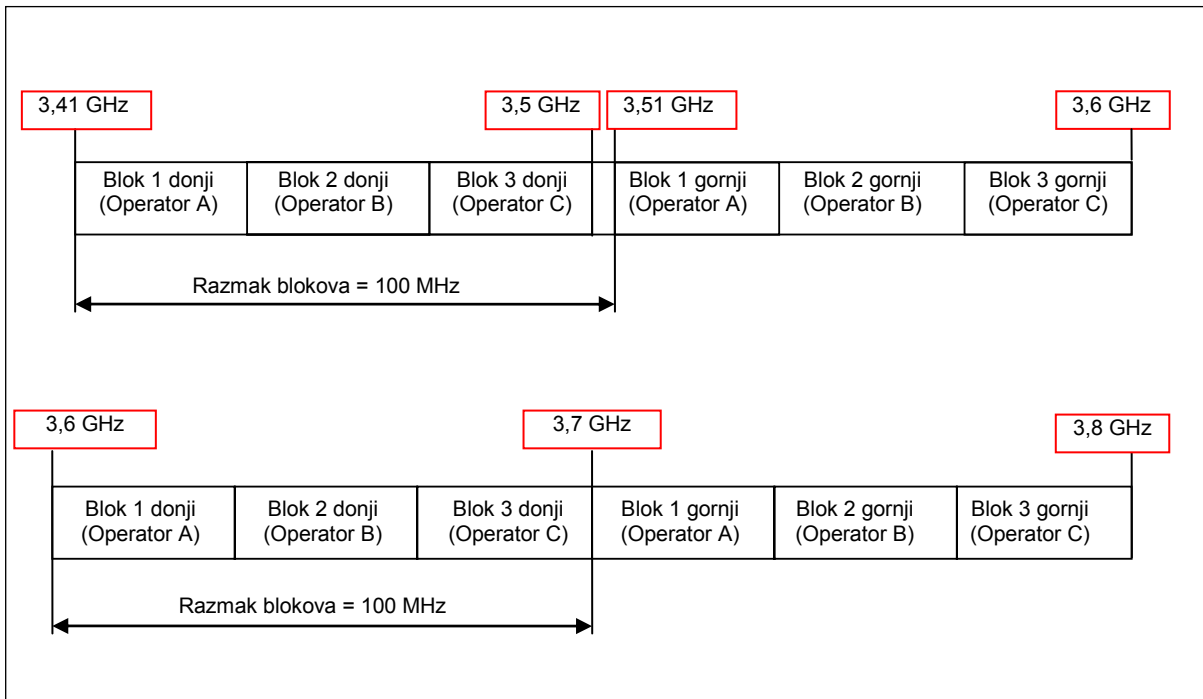
Dodjela frekvencija za P2MP mreže, koje rade u frekvencijskom području 3,4–3,6 i 3,6–3,8 GHz, provodi se u skladu s preporukom ECC/REC (04)05.

Temeljne preporuke su sljedeće:

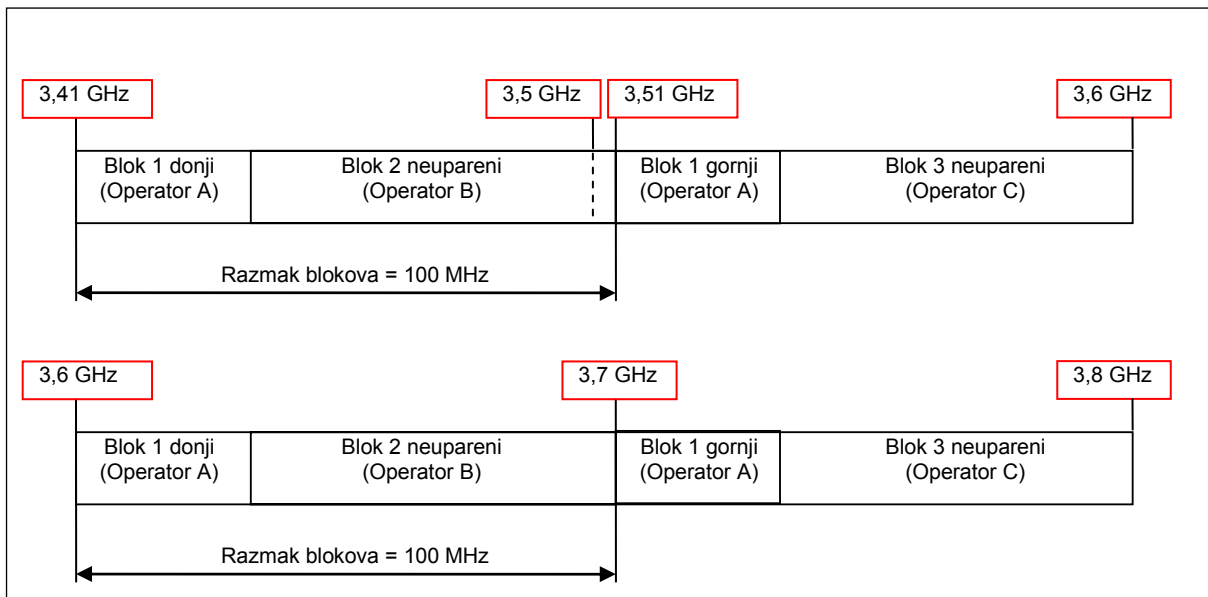
- preporuke se odnose na P2MP sustave,
- frekvencijski blokovi se dodjeljuju kontinuirano,
- u slučaju da nacionalni regulator ne slijedi kontinuiranu dodjelu frekvencijskih blokova treba obratiti pozornost na zaštitne pojaseve,
- regulator ne treba postavljati dodatne zahtjeve unutar dodijeljenih blokova (raspored kanala, središnje frekvencije).

U skladu s preporukom, potencijalnim operatorima koji rabe P2MP sustave u frekvencijskom području 3,4–3,8 MHz, dodjeljuje se blok (ili blokovi) frekvencija čija ukupna širina ovisi o uslugama koje želi pružati i tehnologiji koju rabi. Blokovi se pri tome izgrađuju na temelju odsječaka (slot) širine 0,25 MHz ili prema postojećem planu o dodijeli kanala (npr. raster 3,5 MHz). Reference su postavljene sukladno prethodnim preporukama CEPT ERC/REC 14–03 i 12–08.

Ako se operatorima pruža mogućnost izbora načina dupleksnog rada tada se frekvencijsko područje dijeli u uparene blokove. Može se dodjeljivati i neuparene blokove za TDD način rada. Dodijeljeni blokovi unutar nekog geografskog područja moraju po veličini biti jednaki ili jako slični. Frekvencijski razmak između uparenih blokova iznosi 100 MHz, a samo u iznimnim slučajevima on može biti 50 MHz.



Slika 3.31. Princip podjele frekvencijskog područja u uparene blokove



Slika 3.32. Princip podjele frekvencijskog područja u neuparene blokove

Iako je teško odrediti prikladnu frekvencijsku širinu bloka, tipične vrijednosti za kontinuirano dodijeljene blokove predložene su u Tablici 3.19.

Tablica 3.19. Preporučene veličine blokova

Preporučene veličine blokova [MHz] <i>uparena izvedba</i>	Preporučene veličine blokova [MHz] <i>neuparena izvedba</i>
17,5 × 2	35
21 × 2	42
35 × 2	70
42 × 2	84

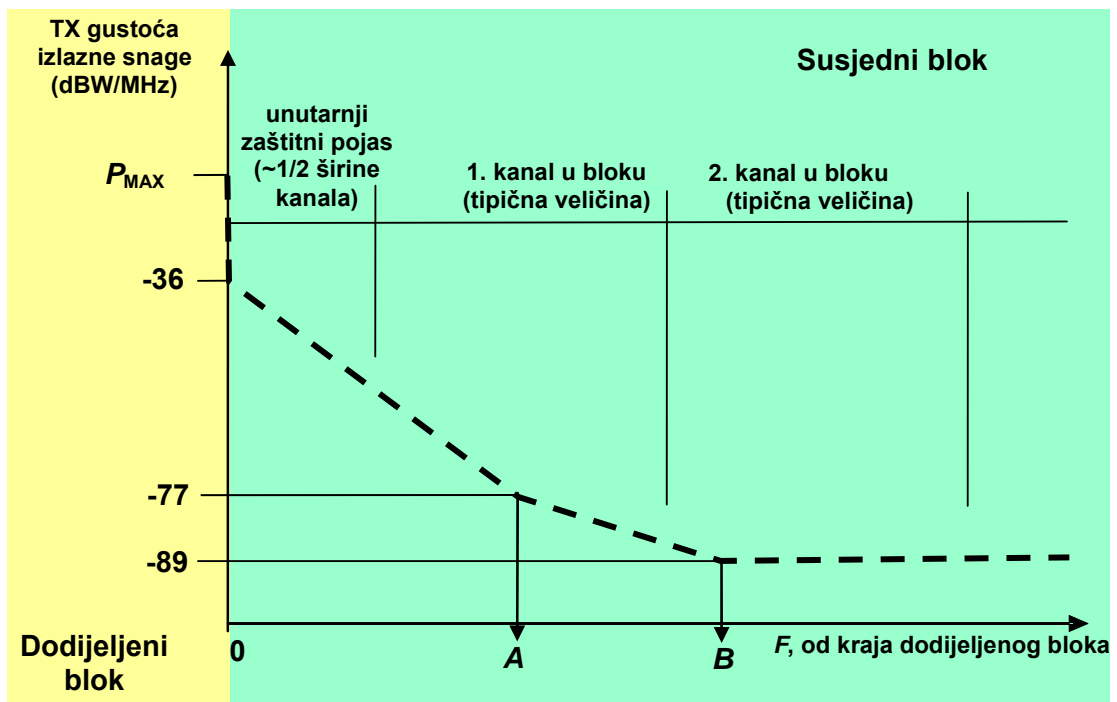
Napomene: Ako regulator odluči imati vanjske zaštitne pojaseve, veličina blokova se može smanjiti za oko 20 %. Ove veličine blokova su prikladne za veličine kanala do 7 MHz.

Vidljivo je da je veličina blokova određena za ćelijski sustav koji koristi 4 kanala s razmakom od tipično 3,5 ili 7 MHz. Uobičajeno je da u slučaju kontinuirano dodijeljenih blokova vrijedi:

- uz kanalni raster od 3,5 MHz, širina bloka iznosi ~17,5 do 21 MHz;
- uz kanalni raster od 7 MHz, širina bloka iznosi ~35 do 42 MHz.

Ako između dodijeljenih blokova postoji zaštitni pojas tada je veličina bloka zbroj 4 širine kanala.

Trenutno frekvencijske širine blokova, koje su dodijeljene operatima, razlikuju se u različitim zemljama i kreću se od ~10 MHz do ~28 MHz. Ako između dodijeljenih susjednih blokova nema zaštitnog pojasa, preporuča se uporaba spektralne maske koja definira kraj bloka. Ta maska vrijedi za baznu postaju. Definiranje ove spektralne maske predstavlja bitnu razliku u odnosu na stariju preporuku ERC/REC 14-03.



Karakteristične točke za spektralnu masku bazne postaje	Definicija (% od veličine dodijeljenog bloka)
A	20 %
B	35 %

Napomena: Postoci se računaju u odnosu na veličinu manjeg dodijeljenog bloka, ako su blokovi različitih veličina

Slika 3.33. Spektralna maska za obilježja zračenja bazne postaje

Tablica 3.20. Objašnjenje spektralne maske za bazne postaje

Frekvencijski pomak	Granične vrijednosti spektralne maske [dBW/MHz]
$\Delta F = 0$	-36
$0 < \Delta F < A$	$-36 - 41 \cdot (\Delta F / A)$
A	-77
$A < \Delta F < B$	$-77 - 12 \cdot ((\Delta F - A) / (B - A))$
$\Delta F \geq B$	-89

U slučaju korištenja vanjskog zaštitnog pojasa (blokovi se ne nadovezuju jedan na drugi), veličina zaštitnog pojasa treba biti približno jednaka 25 % veličine najvećeg bloka.

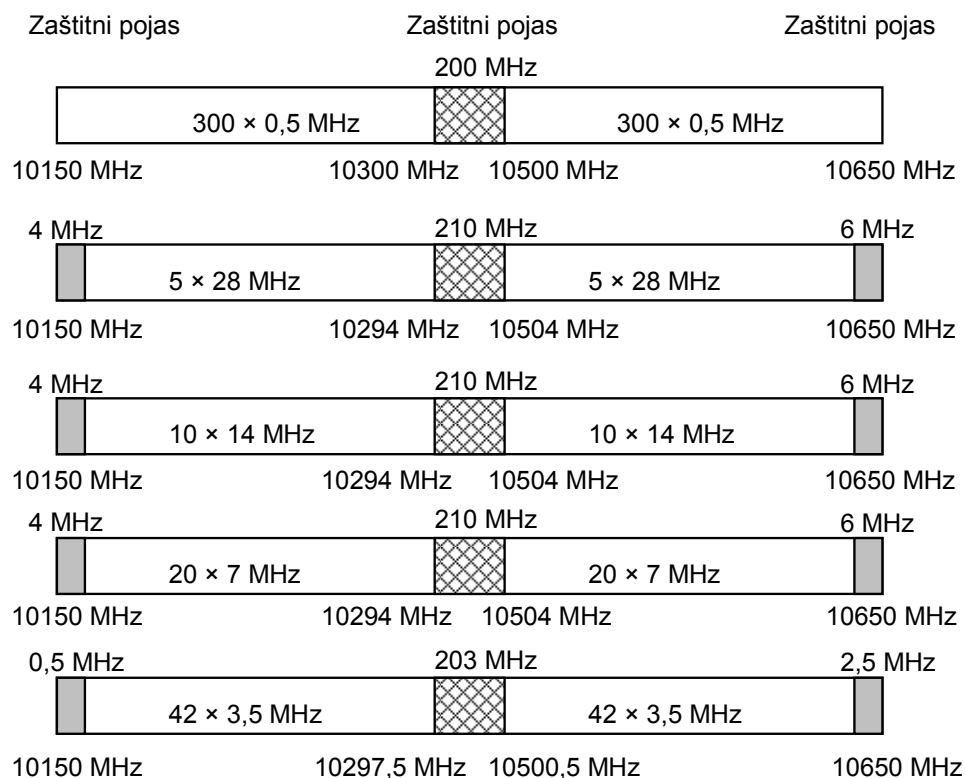
Područje 3600–3800 MHz se u Republici Hrvatskoj ne koristi za širokopojasni radijski pristup.

3.6.2. Frekvencijsko područje 5725–5875 MHz

U skladu s ECC preporukom (06)04. BFWA uređaji trebaju imati limitiranu snagu i upravljanje odašiljačkom snagom (TPC, *Transmit Power Control*). Za rad u navedenom području uređaji koriste dinamički odabir frekvencije (DFS, *Dynamic Frequency Selection*). Znači, prije odašiljanja provjerava se dostupnost kanala. Kako u navedenom području koegzistiraju i druge službe, treba paziti na njihovu međusobnu interakciju (RTTT–*Road Transport and Traffic Telematics*, GSO satelitski prijamnici). Usklađena norma EN 302 502 propisuje tehničke zahtjeve za BFWA sustave. Naputak je da se pojednostavi licenciranje ili da ga uopće nema. Ovo frekvencijsko područje ne koristi se u Republici Hrvatskoj za BFWA.

3.6.3. Frekvencijsko područje 10,15–10,30 GHz i 10,50–10,65 GHz

Ova se frekvencijska područja ne koriste u Republici Hrvatskoj za FWA. Dodjela frekvencija obavlja se u skladu s preporukama ERC/REC 12–05 E i ERC/REC 13–04. Kanali se izgrađuju na temelju odsječaka (*slot*) širine 0,5 MHz. Dupleksni razmak iznosi 350 MHz. Administracije koje imaju drukčije uređena područja ne trebaju mijenjati postojeća stanja do 2015. godine. Moguće je spajanje dva 28 MHz kanala u jedan 56 MHz kanal. Administracije mogu koristiti dijelove područja za jednosmjerne linkove.



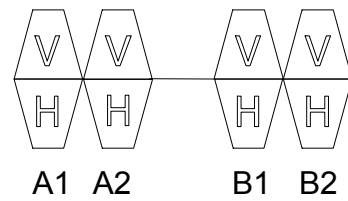
Slika 3.34. Zauzeti spektar u području 10,15–10,65 GHz

3.6.4. Frekvencijsko područje 24,5–26,5 GHz

Dodjela frekvencija za P2MP sustave, koji rade u frekvencijskom području 24,5–26,5 GHz, provodi se u skladu s preporukom T/R 13–02: Prikladan raspored kanala za nepokretne službe u području 22,0–29,5 GHz (*Preferred Channel Arrangements for Fixed Services in the Range 22.0–29.5 GHz*). U frekvencijskom području 24,5–26,5 GHz, namijenjenom za nepokretnu radiokomunikacijsku službu, u skladu preporukom T/R 13–02 Annex B kanali mogu imati širinu 3,5 MHz; 7 MHz; 14 MHz; 28 MHz; 56 MHz ili 112 MHz, a dupleksni razmak iznosi 1008 MHz (Slika 3.38.). Između donjega i gornjeg pojasa postoji frekvencijski razmak od 112 MHz.

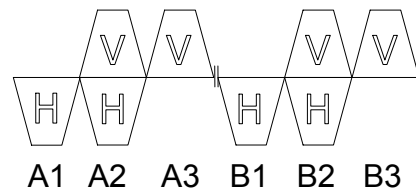
Preporuka CEPT/ERC/REC 00–05 Uporaba pojasa 24,5–26,5 GHz za nepokretni radijski pristup (*Use of the Band 24.5 – 26.5 GHz for Fixed Wireless Access*) predviđa zaštitu od smetnji za sustave koji rade na susjednim kanalima u istome zemljopisnom području uvođenjem zaštitnog pojasa u frekvencijskom području ili zaštitnih udaljenosti između baznih postaja. Pored toga ova preporuka definira kanale širine 28 MHz iz T/R 13–02, kao temeljne jedinice od kojih se izgrađuju blokovi frekvencija, koji se dodjeljuju pojedinom operatoru.

Operator A Operator B



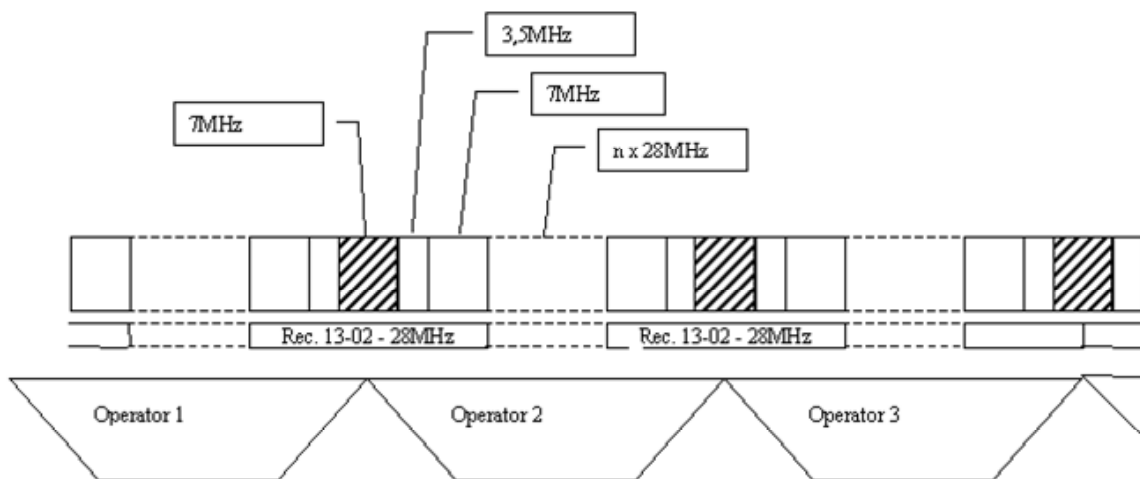
(a)

Operator A Operator B



(b)

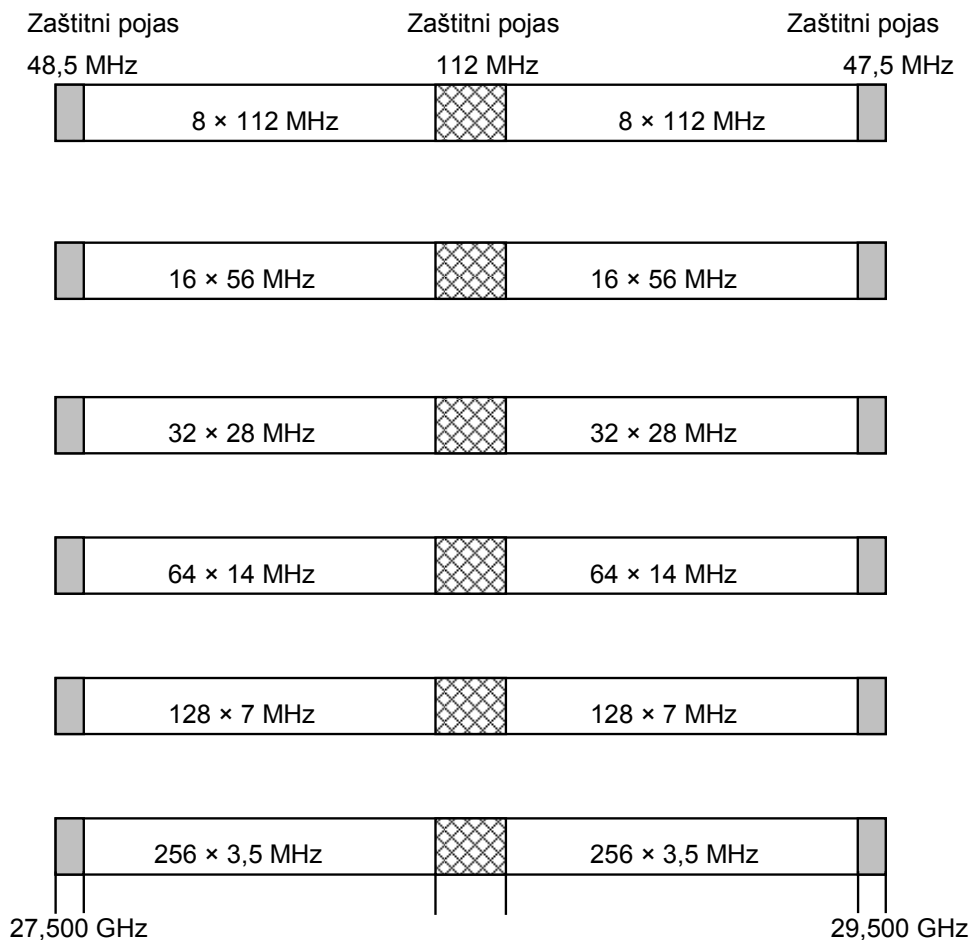
Slika 3.36. (a) Uvođenje zaštitnog intervala između frekventijskih blokova različitih operatora u susjednim frekventijskim područjima, (b) uporaba različitih polarizacija na susjednim kanalima koji pripadaju različitim operatorima



Slika 3.37. Primjer moguće realizacije zaštitnog pojasa

3.6.5. Frekvencijsko područje 27,5–29,5 GHz

Ovo se frekvencijsko područje ne koristi u Republici Hrvatskoj za FWA. Dodjela frekvencija obavlja se u skladu s preporukama ERC/REC 01–03 i ERC/REC 13–04. Preporuča se kanalni raster od 28 MHz sukladno T/R 13–02. U slučaju FDD načina rada gornji podpojas se koristi za uzlaznu vezu, a donji za silaznu vezu. Ostale napomene su identične onima koje vrijede za frekvencijsko područje 24,5–26,5 GHz. U slučaju korištenja širih kanala (npr. 56 MHz) zaštitni pojasevi trebaju se proporcionalno povećati.



Slika 3.38. Podjela frekvencijskog područja 27,5–29,5 GHz na kanale

3.6.6. Današnje stanje zauzeća frekvencijskih pojaseva u RH i dodijeljene koncesije

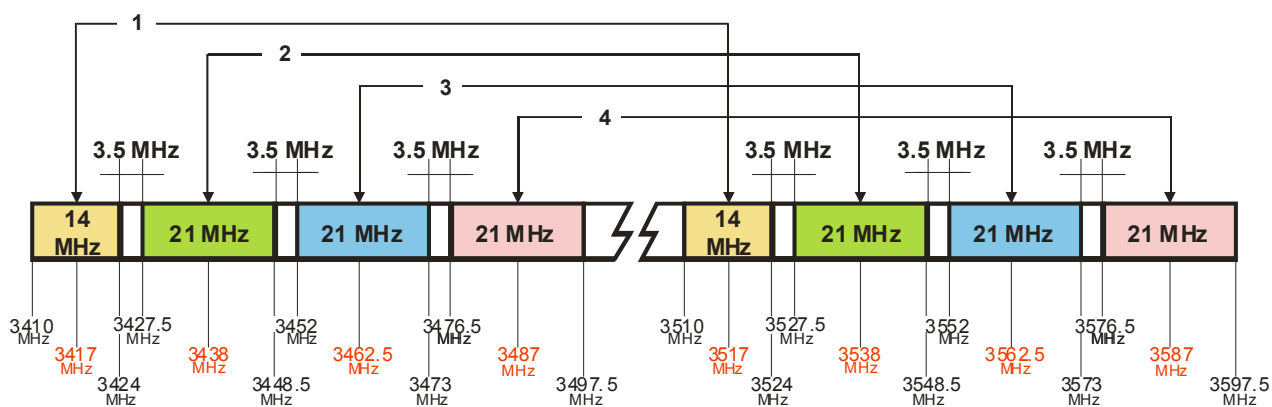
a) 3,4–3,6 GHz

Napravljena je podjela frekvencijskog područja 3410 – 3600 MHz na blokove prikazane Tablicom 3.21. Blokovi su upareni, s

dupleksnim razmakom od 100 MHz, veličina blokova je 2×14 MHz i 2×21 MHz. Između blokova predviđen je jedan kanal razmaka (3,5 MHz), kao što je prikazano na Slici 3.39. Ovi sustavi planirani su u skladu sa starijom preporukom ERC/REC 14–03. Mora se napomenuti da je novija preporuka ECC/REC (04)05 donesena tek 2006. godine.

Tablica 3.21. Podjela frekvencijskog područja 3410 – 3600 MHz na blokove u Republici Hrvatskoj

Blok	Donji pojas			Gornji pojas			Širina bloka
	Od	Do	Središnja frekvencija	od	do	Središnja frekvencija	
1	3410 MHz	3424 MHz	3417 MHz	3510 MHz	3524 MHz	3517 MHz	2×14 MHz
2	3427,5 MHz	3448,5 MHz	3438 MHz	3527,5 MHz	3548,5 MHz	3538 MHz	2×21 MHz
3	3452 MHz	3473 MHz	3462,5 MHz	3552 MHz	3573 MHz	3562,5 MHz	2×21 MHz
4	3476,5 MHz	3497,5 MHz	3487 MHz	3576,5 MHz	3597,5 MHz	3587 MHz	2×21 MHz



Slika 3.39. Podjela frekvencijskog područja 3410 – 3600 MHz na blokove u Republici Hrvatskoj

Tablica 3.22. Dodijeljene koncesije u RH

	1. BLOK 14 MHz	2. BLOK 21 MHz	3. BLOK 21 MHz	4. BLOK 21 MHz
Međimurska županija	Odašiljači i veze	Novi Net	Optima Telekom	WIMAX Telekom
Grad Zagreb	Globalnet	Iskon Internet	Odašiljači i veze	VIPNET
Primorsko-goranska županija	Odašiljači i veze	WIMAX Telekom	Optima Telekom	
Splitsko-dalmatinska županija	Optima Telekom	WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Osječko-baranjska županija		WIMAX Telekom	Optima Telekom	Odašiljači i veze
Zagrebačka županija			Odašiljači i veze	WIMAX Telekom
Ličko-senjska županija		WIMAX Telekom		Odašiljači i veze
Istarska županija		WIMAX Telekom		Odašiljači i veze
Šibensko-kninska županija		WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Zadarska županija	WIMAX Telekom		Odašiljači i veze	
Dubrovačko-neretvanska županija	WIMAX Telekom	Dubrovnik Telekom	Odašiljači i veze	
Karlovačka županija		WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Sisačko-moslavačka županija		WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Bjelovarsko-bilogorska županija		WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Požeško-slavonska županija		WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	
Jedinstveno područje koncesije od 4 susjedne županije (Krapinsko-zagorska, Varaždinska, Koprivničko-križevačka i Virovitičko-podravska županija)	WIMAX Telekom	Novi Net		Odašiljači i veze
Jedinstveno područje koncesije od 2 susjedne županije (Brodsko-posavska i Vukovarsko-srijemska županija)	Ideal komunikacije	WIMAX Telekom	Odašiljači i veze	Nexcom

Napomena: Sadržaj tablice preuzet s web-stranice Hrvatske agencije za poštu i elektroničke komunikacije: www.telekom.hr (pristup web-stranici obavljen je dana 25.11.2008).

b) 24,5–26,5 GHz

U Republici Hrvatskoj donji se pojas prostire od 24549–25417 MHz, a gornji pojas od 25557–26425 MHz. Blokovi, koji se dodjeljuju operatoru, grade se od kanala širine 28 MHz. Broj nekom operatoru dodijeljenih kanala širine 28 MHz ovisi o uslugama koje on želi pružati, tehnologiji koju će rabiti i predviđenoj strukturi sustava. Tipična širina bloka je 112 MHz (4×28 MHz), pri čemu se dodjeljuju dva bloka po 112 MHz s duplesnim razmakom od 1008 MHz. U ovom području frekvencija postoji 8 blokova širine po 112 MHz. Ako se pokaže potreba, pojedini blok se može podijeliti na dva dijela (56 MHz) koje mogu rabiti dva različita operatora. Između sustava dva različita operatora, koji rabe susjedne blokove, nije predviđen zaštitni pojas, već se primjenjuje promjena polarizacije između susjednih blokova dvaju operatora (vidi Sliku 3.36.). Polarizacija koju rabi operator A mora biti protivna polarizaciji koju rabi operator B u susjednom bloku. Kanal A3 i kanal B1, kao susjedni kanali koji pripadaju različitim operatorima, imaju različite polarizacije: A3 vertikalnu (V), a B1 horizontalnu (H) polarizaciju. Takav koncept zaštite preuzet je iz preporuke CEPT/ERC/REC 00–05. Radiofrekvencijski spektar u frekvencijskom području od 24,5 GHz do 26,5 GHz dodjeljuje se prema blokovima iz Tablice 3.23.

Tablica 3.23. Podjela frekvencijskog područja od 24,5–26,5 GHz na blokove u RH

Bl.	Donji pojas			Gornji pojas			Širina bloka (MHz)
		MHz	Centralna frekv. (MHz)		MHz	Centralna frekv. (MHz)	
A	od	24549	24605	od	25557	25613	2x112
	do	24661		do	25669		
B	od	24689	24717	od	25697	25725	2x56
	do	24745		do	25753		
C	od	24773	24829	od	25781	25837	2x112
	do	24885		do	25893		
	do	25417		do	26425		

Bl.	Donji pojas			Gornji pojas			Širina bloka (MHz)
		MHz	Centralna frekv. (MHz)		MHz	Centralna frekv. (MHz)	
D	od	24913	24941	od	25921	25949	2x56
	do	24969		do	25977		
E	od	24997	25053	od	26005	26061	2x112
	do	25109		do	26117		
F	od	25137	25165	od	26145	26173	2x56
	do	25193		do	26201		
G	od	25221	25277	od	26229	26285	2x112
	do	25333		do	26341		
H	od	25361	25389	od	26369	26397	2x56
	do	25417		do	26425		

Izvor podataka: Web stranice Hrvatske agencije za poštu i elektroničke komunikacije, www.telekom.hr

3.7. Kompatibilnost sustava i interoperabilnost

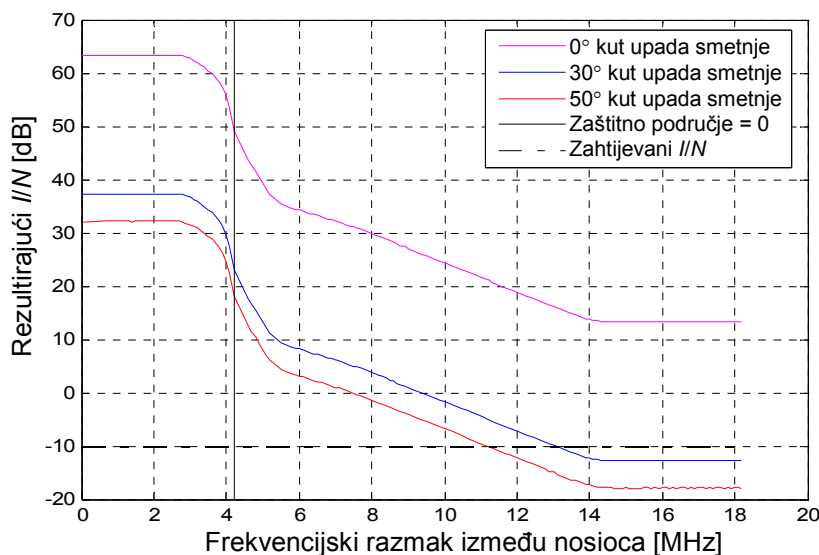
3.7.1. Kompatibilnost sustava

Pozornost je obraćena frekvencijskom području 3400–3600 MHz. Kao osnova za analizu kompatibilnosti služi ECC izvješće broj 100 od veljače 2007. pod nazivom *Compatibility Studies In The Band 3400–3800 MHz Between Broadband Wireless Access (BWA) Systems And Other Services*. Osim BWA sustava u navedenom području rade još i sljedeći sustavi, odnosno pružaju se sljedeće usluge:

- nepokretni linkovi točka–točka (P2P),
- ENG/OB sustavi, znani i kao SAB/SAP sustavi (ENG, *Electronic News Gathering*; OB, *Outside Broadcasting*; SAB, *Services Ancillary to Broadcasting*; SAP, *Services Ancillary to Programming*),
- nepokretne satelitske usluge (FSS, *Fixed-satellite service*),
- radiolokacija (radari).

3.7.1.1. Kompatibilnost između BWA sustava i nepokretnih linkova vrste točka-točka

Analize pokazuju da BWA i P2P sustavi mogu koegzistirati uz određeni frekvencijski razmak koji ovisi o karakteristikama samih sustava te uz koordinaciju položaja između BWA bazne postaje i P2P sustava. Dijeljenje istog kanala na istom području nije dopušteno. Procesom koordinacije položaja mora se osigurati da nema BWA sustava u glavnoj latici P2P linka te da je prostorni razmak između bazne postaje i P2P linka takav da i između korisničkih postaja i P2P linka ne postoji smetnja. Modeli za proračun gubitka staze u slobodnom prostoru mogu se koristiti za određivanje međudjelovanja između bazne postaje BWA i P2P linka. Metoda za određivanje međudjelovanja sastoji se u određivanju odnosa I/N (razina smetnje u odnosu na razinu šuma u prijammiku). Referentni I/N iznosi -10 dB. Pri svim vrijednostima koje su manje od referentne, smatra se da nema smetnje. I/N je funkcija razlike frekvencija između ometajućega i korisnog signala.



Slika 3.40. Primjer smetnje bazne postaje prema P2P linku (širina pojasa 1,4 MHz) na udaljenosti od 2 km

Na prethodnoj slici vidi se da u slučaju kada bazna postaja emitira točno u smjeru maksimuma zračenja prijamne antene linka (kut 0°) rezultirajući iznos I/N uvijek premašuje dozvoljenu vrijednost od -10 dB. Čak i uz frekvencijski razmak između frekvencije nosioca bazne postaje i P2P linka od 18 MHz nije moguća koegzistencija između ta dva sustava. U slučajevima kad je kut upada smetnji van maksimuma prijamne antene (kutevi 30° i 50°) moguća je koegzistencija između ta dva sustava, ako su im nosioci razmaknuti za više od 14 MHz.

3.7.1.2. Kompatibilnost između BWA sustava i ENG/OB sustava

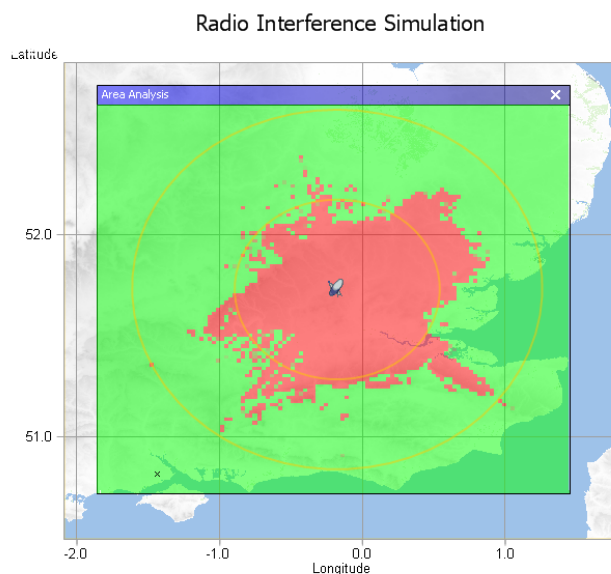
Glavna obilježja ENG/OB sustava (pokretni video linkovi na letjelicama i u vozilima), u skladu s ERC preporukom 25-10, su sljedeća:

- digitalni modulacijski sustavi bazirani na DVB-T tehnologiji,
- širina pojasa između 5 i 12 MHz,
- maksimalna izlazna snaga 1 W,
- dobitak neusmjerene antene između 2 i 10 dBi,
- visina antene iznad tla 2 do 10 m, a u slučaju da se nalazi na letjelici (helikopter) 50–700 m.

Studije pokazuju da je izraženiji utjecaj BWA na ENG/OB prijamnik nego obratno. Glavna smetnja dolazi iz bazne postaje, dok je relativno mali utjecaj korisničke opreme. Frekvencijski razmak između ova dva sustava treba biti izražen kad oni koegzistiraju u blizini (oko 1 km), dok se on može znatno smanjiti kad su ova dva sustava udaljenija (5 km). U slučaju ENG/OB sustava na letjelici, traženi frekvencijski razmak postaje značajnije veći. Specifičnost ENG/OB sustava je u tome što se oni koriste u nekim situacijama na privremenoj osnovi. Vjerojatno je da nema optičke vidljivosti između BWA i ENG/OB te se stoga koristi Ercegov model propagacije. Iznimka mogu biti situacije kad su ENG/OB uređaji instalirani na letjelice. Tada vrijede propagacijski modeli slobodnog prostora. Izračun omjera I/N radi se na isti način kao kod kompatibilnosti BWA i P2P sustava. Referentna vrijednost I/N u slučaju kad je ENG/OB žrtva iznosi -6 dB. U RH u području 3400–3600 MHz prema tablici raspodjele spektra ne navode se ENG/OB sustavi.

3.7.1.3. Kompatibilnost između BWA sustava i FSS sustava

Potrebna je koordinacija radi usklađivanja međudjelovanja bazne postaje BWA sustava i zemaljske postaje FSS sustava. Ne postoji određena granica na osnovu koje treba razmaknuti ove dvije postaje, već se problem rješava od slučaja do slučaja (jako ovisi o terenu). Koegzistencija nije moguća na istom području jer se minimalni razmak ne može garantirati. Prema podacima iz izvješća, u Hrvatskoj ne postoji zemaljska postaja koja radi u kritičnom frekvencijskom području. ITU-R preporuka SF.1006 preporuča korištenje modela propagacije prema ITU-R P.452 modelu. Za BWA baznu postaju traži se da ne stvara vrijednost I/N veću od -10 dB za 20 % vremena.



Slika 3.41. Primjer jednog zaštitnog područja oko zemaljske satelitske postaje (žute kružnice označavaju udaljenosti 50 i 100 km)

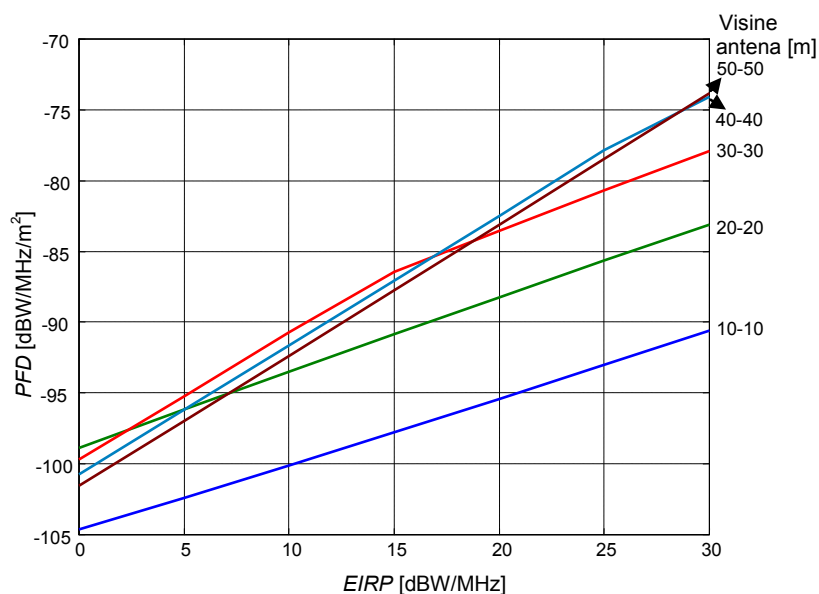
3.7.1.4. Kompatibilnost između BWA i radiolokacijskih sustava

Utjecaj radarskih sustava koji rade ispod 3400 MHz na BWA sustave (digne im razina šuma, prijammnik BWA sustava bude izložen jakom signalu...) može se riješiti samo koordinacijom i to na način da se svaki pojedinačni slučaj razmatra zasebno. Iz dostupnih studija proizlazi da izgradnja BWA sustava na udaljenosti manjoj od 5 km od radara treba biti koordinirana. Da bi se garantirala limitirana degradacija odnosa C/I BWA sustava neophodno je ostvariti sigurnosni razmak od ~ 11 km (u nekim smjerovima ova vrijednost može biti znatno manja) u odnosu na radar. Uzevši u obzir i blokirajuće efekte (oni su glavni problem u pogledu smetnji), radar može imati utjecaj na BWA sustave do 30 km.

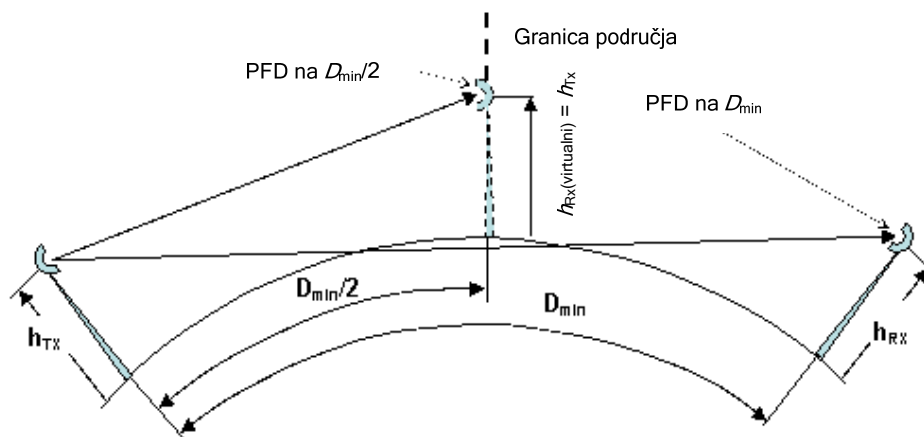
3.7.2. Kompatibilnost između FWA sustava različitih operatora na susjednom području

Budući su u RH dodijeljeni blokovi frekvencija po županijskoj osnovi, postoji mogućnost smetnje (susjedne županije) između dva FWA sustava različitih operatora na susjednom području. Rješavanje takvih problema bit će prepušteno regulatoru. Sukladno preporuci ECC (04)05, anex 4: *Guidance For Interference Avoidance Between Co-Frequency Adjacent-Area Assignments* i izvješću ECC 033 *The Analysis Of The Coexistence Of Point-To-Multipoint FWS Cells In The 3.4–3.8 GHz Band* mogu se riješiti potencijalni problemi. Zaključci navedenih preporuka i izvješća dani su u nastavku.

FWA bazna postaja mora biti koordinirana kada spektralna gustoća snage (PSD, *Power Spectral Density*) ometajućeg signala na granici područja prelazi vrijednosti prikazane na Slici 3.42.

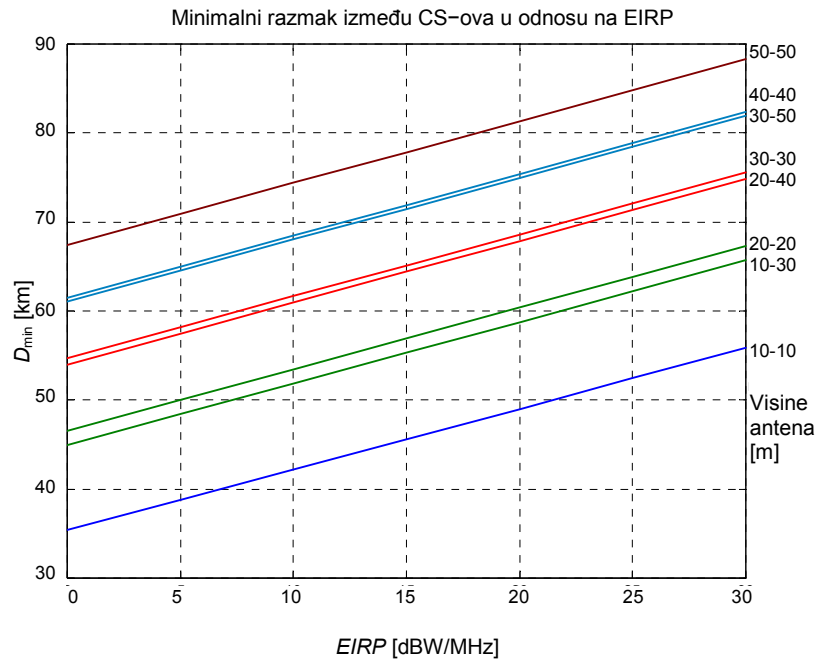


Slika 3.42. Razina spektralne gustoće snage na polovici udaljenosti dviju susjednih baznih postaja



Slika 3.43. Princip računanja spektralne gustoće snage

Treba napomenuti da za isti zbroj visina odašiljačke i prijamne antene vrijedi približno ista krivulja. Uzevši u obzir zakrivljenost zemlje vidi se da razmak između baznih postaja i razina PFD-a na granici jako ovisi o visinama antena (ometajuće odašiljačke i prijamne žrtvine). Vrijednosti dobivene iz ove slike mogu se rabiti za koordinaciju razmaka na ravnom tlu. Za tipične vrijednosti EIRP-a u 3,5 GHz području, dobije se potreban razmak dviju susjednih baznih postaja koje rade na istim frekvencijama od ≈ 60 do 80 km.



Slika 3.44. Minimalni razmak između baznih postaja za određeni iznos EIRP-a

Proračun se može koristiti i za korisničke postaje, ali tad valja računati s nižim visinama antena. U proračunu je korišteno: referentna vrijednost EIRP-a od 20 dBW/MHz te visine antena od 20–50 m za bazne postaje i 10–40 m za korisničke postaje. Regulator može, prema potrebi, u graničnom području ograničiti EIRP i visine antenskih sustava kako bi smanjio područje pokrivanja. Dozvoljeni iznos smetnje iznosi -146 dBW/MHz.

3.7.3. Interoperabilnost

Danas na tržištu djeluju mnogi proizvođači WiMAX opreme. Često puta se dogodi da uređaji jednog proizvođača ne mogu djelovati (raditi) s uređajima drugog proizvođača. Da bi se to izbjeglo, a ujedno omogućilo operatorima lakši izbor opreme, provodi se certificiranje u ovlaštenim laboratorijima koje potvrđuje da su uređaji kompatibilni s drugima. Certificiraju se bazne i korisničke postaje. Ispitivanje i izdavanje certifikata odvija se unutar WiMAX Foruma.



Slika 3.45. Primjer certifikata WiMAX opreme

Većina opreme certificirane za fiksni WiMAX odnosi se na frekvencijsko područje rada od 3,5 GHz i širinu kanala od 3,5 MHz. Certificirana je oprema koja pruža TDD i FDD način rada. Sve navedeno predstavlja ustvari profil rada. Na tržištu su većinom dostupni proizvodi certificirani za rad po normi IEEE 802.16–2004. Situacija s normom IEEE 802.16e (mobilni WiMAX) je puno slabija, tj. trenutno je certificirano znatno manje opreme za mobilni WiMAX. Operatori, koji žele ugraditi mobilni, certificirani WiMAX, morali bi još malo pričekati s ugradnjom. S druge strane, oni koji žele ugraditi fiksni, certificirani WiMAX, imaju danas na raspolaganju dosta široki izbor certificirane opreme.

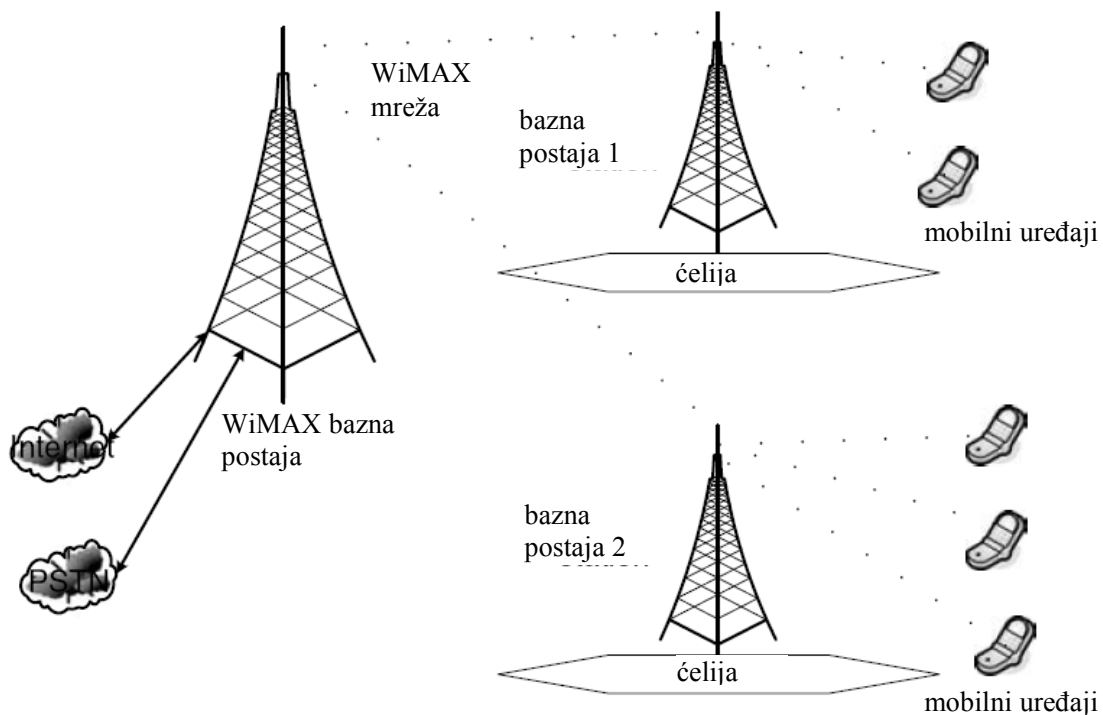
3.8. Tipične aplikacije – primjeri

WiMAX tehnologija obuhvaća više radijskih sučelja (5) unutar frekvencijskog područja od 2–66 GHz. Uslijed takve raznolikosti pruža se mogućnost korištenja WiMAX-a za različite aplikacije. Najvažnija primjena je pružanje usluge širokopojasnog radijskog pristupa. Arhitektura kojom se to ostvaruje osniva se na povezivanju jedne točke sa više točaka (P2MP), a međusobnim povezivanjem baznih postaja i ćelijskim planiranjem, može se postići pokrivenost velikih područja. Pokrivenost može doseći nacionalnu razinu (neke europske države) ili regionalnu razinu (županijsku razinu, Hrvatska), ali je ograničena područjem dodijeljene koncesije. Pružanje usluga radijskog pristupa namijenjeno je svim korisnicima kojima je radijski pristup neophodan, kao i onim korisnicima koji nemaju kabelski pristup

(bakrene parice, koaksijalni kabel, optičko vlakno) ili onim korisnicima koji žive na područjima u kojima ne postoji izgrađena infrastruktura.

U usporedbi s drugim pristupnim tehnologijama, prednost WiMAX-a očituje se u brzjoj i jeftinijoj implementaciji, jeftinijem održavanju, brzjoj i jednostavnijoj mogućnosti konfiguriranja, izgradnje, nadogradnje kao i u njegovoj podesivoj veličini i fleksibilnosti. Temeljne usluge koje se pružaju su brzi Internet i multimedijске aplikacije. Pri tome je omogućen pristup nepokretnim i pokretnim korisnicima (nepokretni i mobilni WiMAX). Širokopojasne usluge obično se vežu uz brzi prijenos podataka (nekoliko stotina kbit/s) prema i od korisnika. WiMAX se može promatrati i kao nadogradnja WLAN-a, a može se raditi i mrežna arhitektura koja u sebi sadrži obje radijske tehnologije. U odnosu na usluge radijskog pristupa u urbanim područjima, još veća primjena se očekuje u slabo naseljenim i nerazvijenim područjima. Potvrda toga je činjenica da se danas najveća izgrađena WiMAX mreža nalazi na području Pakistana. Osim već prije spomenute osnovne aplikacije za WMAN mreže, WiMAX se može koristiti i za:

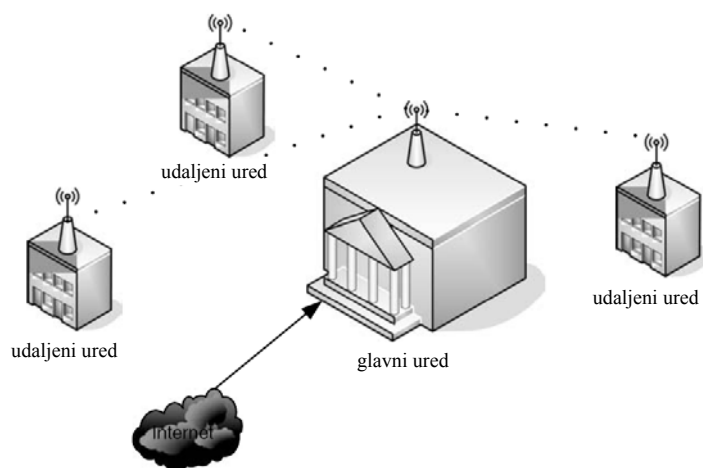
a) pružanje usluge spojne veze (*backhaul*), na primjer međusobno spajanje GSM ili UMTS baznih postaja,



Slika 3.46. Korištenje WiMAX-a kao spojne veze

b) realizaciju privatnih mreža.

Kod korištenja u privatnim mrežama postoji velika varijacija primjena: poslovne primjene, primjene za potrebe lokalne uprave, obrazovnih institucija, zdravstva, javnih organizacija, sigurnosnih službi...



Slika 3.47. Korištenje WiMAX-a u privatnim mrežama

WiMAX svoju upotrebu može naći i u slučaju:

- video nadzora;
- spajanja bankomata;
- pružanja mogućnosti interaktivnih igara (*on-line* igre);
- praćenja vozila (*fleet management*);
- pružanja pričuvne ili dopunske veze postojećim žičnim mrežama;
- spajanja uređaja osjetila i telemetrijskih uređaja;
- daljinskog pružanja medicinskih usluga;
- vojnih primjena;
- kriznih situacija (najbrže se uspostavi TK infrastruktura nakon nepogoda kao što su potresi, poplave, ...)

Teško je nabrojati moguće aplikacije, jer će one ponajprije ovisiti o domišljatosti i sposobnosti operatora. WiMAX operatori predstavljaju izravnu konkurenciju postojećim operatorima GSM/UMTS mreža koji preko svojih izgrađenih mreža već nude usluge radijskog pristupa skromnijih performansi. Oni međutim danas nude znatno širu lepezu usluga.

3.9. Mjerenja radijskih parametara od interesa za nacionalnog regulatora

Cjelovita mjerenja WiMAX sustava predstavljaju složen proces. Razlog tome leži u kompleksnosti samih sustava, a koji su detaljnije analizirani u poglavlju 3.3. Za cjelovita mjerenja potrebna je skupa i složena oprema (generatori OFDM/OFDMA signala, analizatori OFDM/OFDMA signala, programska podrška i sl.). U ovom poglavlju analiziraju se samo mjerenja koja su od značaja za nacionalnog regulatora.

Od dva frekvencijska područja, namijenjena za P2MP mreže u Hrvatskoj, granične vrijednosti pojedinih parametara uređaja precizno su definirane za područje oko 3,5 GHz. Za uređaje u frekvencijskom području 26 GHz primjenjuju se opće granice za sve uređaje koje rade na tim frekvencijama.

3.9.1. Pregled nekih graničnih vrijednosti karakteristika uređaja koji rade u području 3,5 GHz

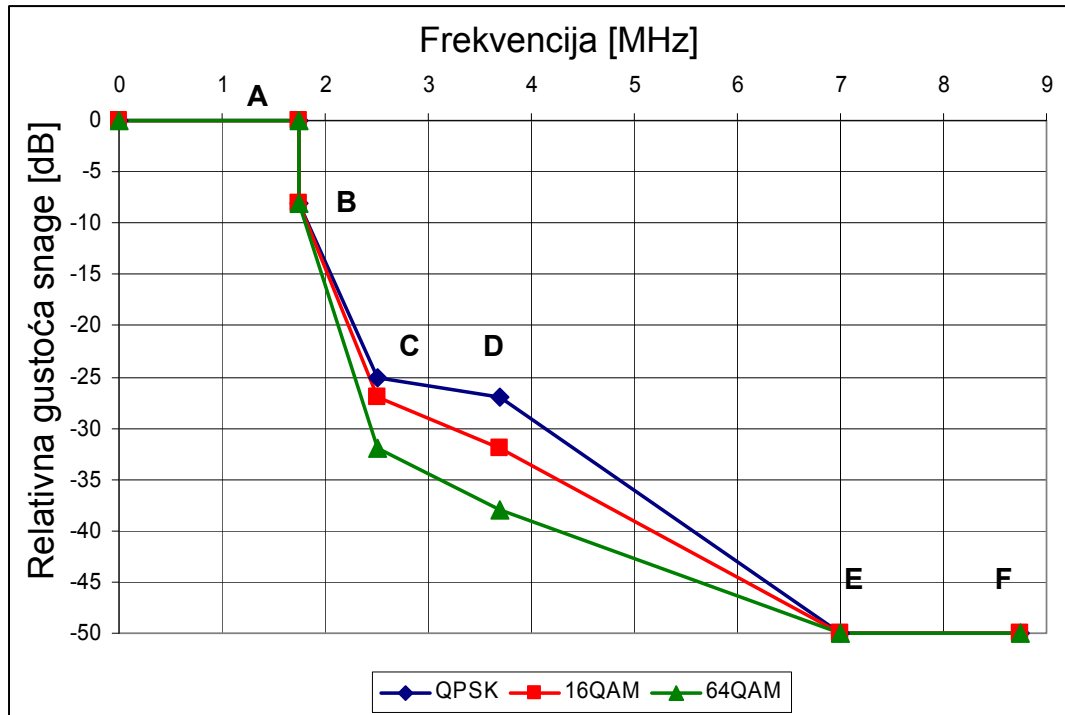
Granične vrijednosti definirane su normom ETSI EN 301 021: *Fixed Radio Systems; Point-to-multipoint equipment; Time Division Multiple Access (TDMA); Point-to-multipoint digital radio systems in frequency bands in the range 3 GHz to 11 GHz*. U toj normi regulirane su vrijednosti onih parametara koji se najviše tiču regulatora: snaga, spektar, frekvencija, izvanpojasne emisije. Pozornost će se ponajprije usmjeriti na mjerenje radijskih parametara bazne postaje.

Zanimljivo je spomenuti da ključne granične vrijednosti nisu pokrivena IEEE normom već su ostavljene da se definiraju u skladu s zahtjevima lokalnih regulatora.

Granične vrijednosti:

- *Maksimalna izlazna snaga odašiljača bazne postaje*
Maksimalna dopuštena izlazna snaga odašiljača sustava širokopolasnoga radijskog pristupa je 35 dBm.
- *Frekvencijska karakteristika zračenja odašiljača bazne postaje*
Granične vrijednosti određene su u ovisnosti o vrstama sustava koji se mjere. Prema navedenoj ETSI normi, sustavi vrste E, F i G pokrivaju OFDM modulacijske sustave, uključujući i TDMA/OFDMA sustave. Sustavi tipa E odnose se na 4 diskretna stanja u modulaciji, F na 16 diskretnih stanja, a G na 64 diskretna stanja. Granične vrijednosti zračenja na pojedinim frekvencijama određene su spektralnom maskom. Proizvođači opreme trebaju izvesti filtarske sklopove radijskog uređaja kako bi udovoljili vrijednostima određenima spektralnom maskom iz norme.

Veličine iz spektralne maske ovise o razmaku kanala i vrsti promjenjive modulacije koju sustav koristi. Na Slici 3.48. prikazana je spektralna maska za odašiljač sustava širokopojasnog radijskog pristupa za modulacijske postupke QPSK, 16-QAM i 64-QAM i razmak kanala 3,5 MHz. Odabran je taj razmak kanala, jer se on uklapa u regulativu RH i pokriva najviše WiMAX certificiranih uređaja. Referentni nivo od 0 dB predstavlja maksimalnu razinu izlaznog spektra.



Slika 3.48. Spektralna maska sustava širokopojasnog radijskog pristupa za razmak kanala od 3,5 MHz

U Tablicama 3.24. do 3.26. prikazane su kvantitativne vrijednosti spektralne maske odašiljača u karakterističnim točkama (na karakterističnim frekvencijama) za različite razmake kanala, odnosno modulacijske postupke. Zanimljivo je primijetiti da spektralna maska uređaja s višim stupnjem modulacije mora imati veće gušenje za istu frekvencijsku udaljenost od sredine pojasa u odnosu na spektralnu masku uređaja s nižim stupnjem modulacije.

Tablica 3.24. Spektralna maska za modulacijski postupak QPSK

QPSK OFDM (Tip E)							
Razmak kanala [MHz]	Brzina prijenosna [Mbit/s]	Točka A	Točka B	Točka C	Točka D	Točka E	Točka F
		0 dB, f [MHz]	-8 dB, f [MHz]	-25 dB, f [MHz]	-27 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]
1,75	2	0,875	0,875	1,25	1,85	3,5	4,375
2	2	1	1	1,42	2,11	4	5
3,5	4	1,75	1,75	2,5	3,7	7	8,75
7	8	3,5	3,5	5	7,4	14	17,5
14	16	7	7	10	14,8	28	35
28/30	32	14	14	20	29,6	56	70

Tablica 3.25. Spektralna maska za modulacijski postupak 16-QAM

16-QAM OFDM (Tip F)							
Razmak kanala [MHz]	Brzina prijenosna [Mbit/s]	Točka A	Točka B	Točka C	Točka D	Točka E	Točka F
		0 dB, f [MHz]	-8 dB, f [MHz]	-27 dB, f [MHz]	-32 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]
1,75	4	0,875	0,875	1,25	1,85	3,5	4,375
2	4	1	1	1,42	2,11	4	5
3,5	8	1,75	1,75	2,5	3,7	7	8,75
7	16	3,5	3,5	5	7,4	14	17,5
14	32	7	7	10	14,8	28	35
28/30	64	14	14	20	29,6	56	70

Tablica 3.26. Spektralna maska za modulacijski postupak 64-QAM

64-QAM OFDM (Tip G)							
Razmak kanala [MHz]	Brzina prijenosna [Mbit/s]	Točka A	Točka B	Točka C	Točka D	Točka E	Točka F
		0 dB, f [MHz]	-8 dB, f [MHz]	-32 dB, f [MHz]	-38 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]	-50 dB, f [MHz]
1,75	6	0,875	0,875	1,25	1,85	3,5	4,375
2	6	1	1	1,42	2,11	4	5
3,5	12	1,75	1,75	2,5	3,7	7	8,75
7	24	3,5	3,5	5	7,4	14	17,5
14	48	7	7	10	14,8	28	35
28/30	96	14	14	20	29,6	56	70

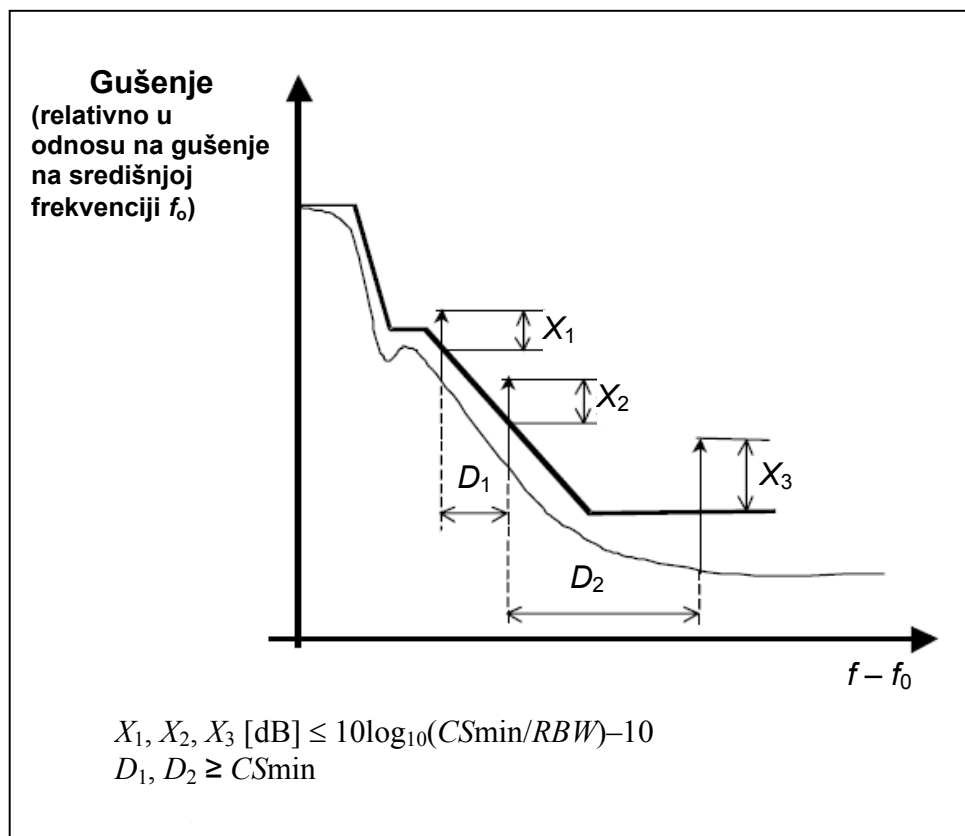
Spektar izlaznog signala mora udovoljavati uvjetima iz norme u svim temperaturnim uvjetima, cijelom frekvencijskom području, te kod maksimalnog prometnog opterećenja uređaja.

Iako je prije navedeno da spektar odaslanog signala mora biti unutar granica spektralne maske, postoje slučajevi kad se dopušta određeno prekoračenje. Dopushta se da neke komponente signala mogu prijeći iznose definirane maskom, ali se ograničava iznos tih prekoračenja i njihov međusobni razmak. Iznosi tih prekoračenja ne smiju prijeći vrijednost od,

$$10\log_{10}(CS_{\min}/RBW)-10 \text{ [dB]},$$

i diskretne komponente ne smiju biti na razmaku manjem od CS_{\min} .

Vrijednost iznosa CS_{\min} je 500 kHz za 3,5 GHz područje, a RBW predstavlja širinu rezolucijskog filtra analizatora spektra. Slika 3.49. prikazuje dopuštena prekoračenja razina iz spektralne maske.



Slika 3.49. Prikaz dopuštenih prekoračenja spektralnih maski

- Izvanpojasne sporedne emisije odašiljača*
 Određuju se sukladno CEPT/ERC/Recommendation 74-01E, *Unwanted Emissions In The Spurious Domain*. Sukladno CEPT preporuci preporučaju se mjerenja do 5. harmonika. Razina sporednih emisija mora biti manja od -40 dBm. Ovo ograničenje vrijedi za frekvencije razmaknute od frekvencije prijenosnog signala za više od 250 % širine kanala (za širinu kanala od 3,5 MHz sporedne emisije su one izvan pojasa ograničenog frekvencijama $f_p \pm 8,75$ MHz). Uzevši u obzir ovu preporuku, zaključuje se da analizator spektra mora imati mogućnost mjerenja do ~20 GHz. Prilikom mjerenja sporednih emisija harmoničke vrste preporuka je da širina rezolucijskog filtra (RBW) iznosi 1 MHz. Uz izmjerenu vrijednost treba navesti širinu pojasa korištenoga rezolucijskog filtra.
- Tolerancija frekvencije odašiljača*
 Frekvencija prijenosnog signala ne smije odstupati od nazivne vrijednosti za iznos veći od vrijednosti u Tablici 3.48.

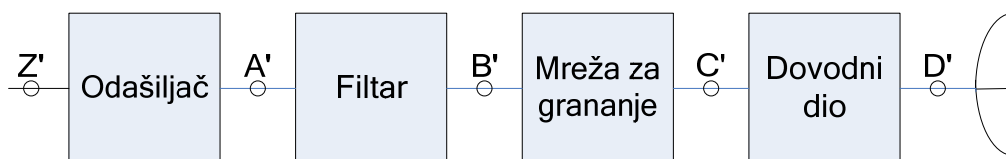
Tablica 3.27. Dopuštena odstupanja frekvencije

Frekvencijsko područje [GHz]	Minimalna brzina prijenosa podataka [Mbit/s]	Tolerancija frekvencije [kHz]
3,5/3,7	< 0,5	± 4
3,5/3,7	0,5 do 2	± 50
3,5/3,7	≥ 2	± 60

- Sporedne emisije prijarnika
Za sporedne emisije prijarnika vrijede ista pravila kao i za odašiljač.

3.9.2. Mjerne metode

Mjerenja se obavljaju na mjernoj točki sukladno objašnjenju na Slici 3.50.



Slika 3.50. Mjerenja WiMAX-a sukladno normi ETSI EN 301 021

Sva mjerenja obavljaju se u točki C' (iza mreže za grananje) pri normalnom prometu. Dakle, ako se više odašiljača spaja na isti antenski sustav mjeri se njihova ukupna snaga. U slučaju jednog odašiljača ne postoji mreža za grananje i sva mjerenja obavljaju se na izlazu iz filtra (tada je C'= B'), odnosno odašiljača ako ne postoji vanjski filter (A').

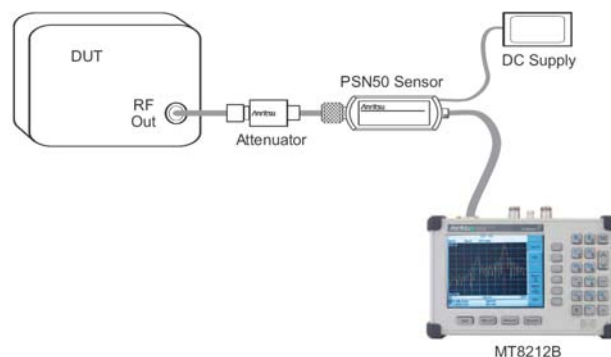
3.9.2.1. Mjerenje snage

Snaga se može mjeriti pomoću mjerača snage ili analizatora spektra (signala).

Mjerenje pomoću mjerača snage

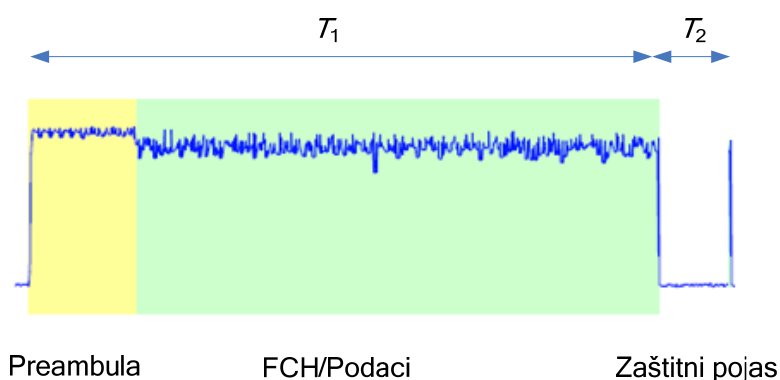
Mjerač snage sastoji se od osjetila i pokaznog instrumenta. Osjetilo se spaja na mjereni uređaj preko određenog atenuatora ili odvojnog sklopa. Prilikom spajanja osjetila, treba voditi računa da se na

njemu ne privede previsoka razina snage. Treba istaknuti da su osjetila posebice osjetljiva na DC signal. Slika 3.51. prikazuje način spajanja mjerača snage na mjereni uređaj (DUT, *Device Under Test*). Slično se spajaju i ostali instrumenti.



Slika 3.51. Način spajanja mjerača snage

WiMAX signal ima oblik bursta u vremenskom području tj. u određenom vremenu približno je konstantna razina signala (preambula ima nešto višu razinu), a u zaštitnim intervalima nema nikakvog signala. Takva vremenska struktura signala omogućuje mjerenje snage signala korištenjem termo osjetila ako je poznato trajanje intervala odašiljanja signala i trajanje zaštitnog intervala.



Slika 3.52. Struktura signala koji se mjeri; T_1 – duljina intervala odašiljanja bursta, T_2 – trajanje zaštitnog intervala

Termo osjetila su točna, ali spora. Ona pokazuju srednju snagu i zato nisu pogodna za mjerenje snage vremenski nekontinuiranog signala. Ona mogu ipak poslužiti i za mjerenja snage signala WiMAX uređaja, ali treba se uvesti korekcijski faktor tj. uvećati izmjerenu snagu za faktor,

$$R[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10} \frac{T_1}{T_1 + T_2}.$$

Izlazna snaga uređaja P_{iz} je tad jednaka,

$$P_{iz} [\text{dBm}] = P_{izmjereno} [\text{dBm}] + R [\text{dB}].$$

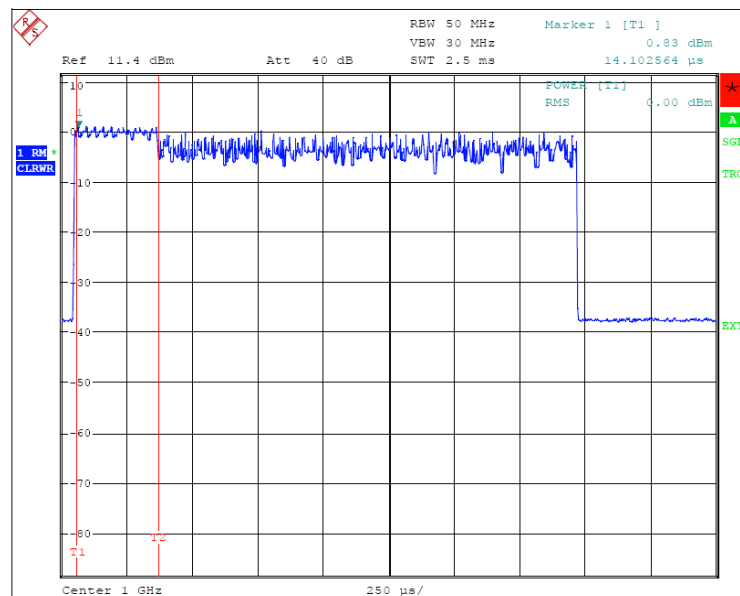
Bolji izbor za mjerenje snage ove vrste signala predstavljaju diodna osjetila. Ona su brža, a imaju i mogućnost automatskog detektiranja impulsa i njegovog mjerenja.

Mjerenje pomoću analizatora spektra (signala)

Velika širina rezolucijskog filtra neophodna je za mjerenja u vremenskom području u kojem obavljamo mjerenje snage.

Prilikom mjerenja u vremenskom području treba:

- ispravno namjestiti RBW, preporuke su da se postavi $RBW \approx 5 \times BW_{\text{signala}}$;
- namjestiti središnju frekvenciju;
- prebaciti mjerenje u vremensko područje (*ZERO SPAN*);
- namjestiti vrijeme prebrisavanja veće od trajanja podokvira;
- namjestiti vrstu detekciju na RMS;
- pomoću markera odrediti područja unutar kojih se očitava snaga.



Slika 3.53. Primjer mjerenja snage pomoću analizatora spektra u vremenskom području

3.9.2.2. Mjerenje spektralnih obilježja

Mjerenja spektralnih obilježja obavljaju se pomoću analizatora spektra (signala), a preporuča se obavljati mjerenja s uključenom

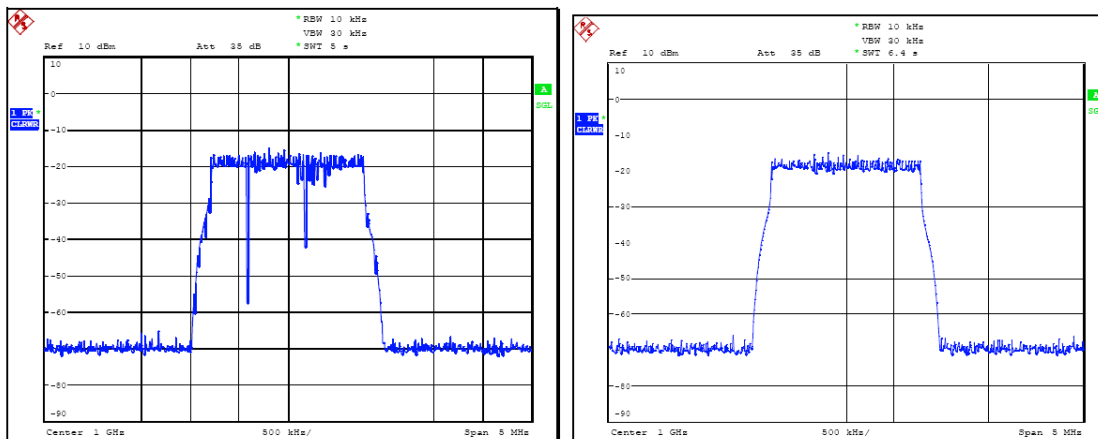
postavkom maksimalne razine signala (*max hold* ili *peak hold*). Prilikom mjerenja spektra odaslanog signala i provjere da li je signal unutar granica definiranih maskom, norma ETSI EN 301 021 preporuča namještanje parametara analizatora spektra prema Tablici 3.28.

Tablica 3.28. Namještanje postavki analizatora spektra prilikom mjerenja spektra

	Bazna postaja (CS)					Korisnička postaja (TS)
	<1,75	≥1,75 do 3,5	>3,5 do 7	>7 do 14	>14 do 28/30	Isto kao bazna postaja
Razmak kanala Δf [MHz]	<1,75	≥1,75 do 3,5	>3,5 do 7	>7 do 14	>14 do 28/30	Isto kao bazna postaja
Središnja frekvencija	stvarna	stvarna	stvarna	stvarna	stvarna	stvarna
Širina pojasa mjerenja (<i>span</i>) [MHz]	$6 \times \Delta f$	$6 \times \Delta f$	$6 \times \Delta f$	$6 \times \Delta f$	$6 \times \Delta f$	Isto kao bazna postaja
Vrijeme prebrisavanja	Automatsko	Automatsko	Automatsko	Automatsko	Automatsko	Automatsko
<i>RBW</i> [kHz]	30	30	30	30	100	Vidi napomene
<i>VBW</i> [kHz]	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	Vidi napomene
Napomene:						
za mjerenje TDMA TS s trajanjem bursta 50 μ s namješta se <i>RBW</i> na 30 kHz, <i>VBW</i> na 3 kHz;						
druga trajanja bursta: $RBW = 30 \text{ kHz} \times 50 \mu\text{s} / (\text{trajanje bursta u } \mu\text{s})$; $VBW = 3 \text{ kHz} \times 50 \mu\text{s} / (\text{trajanje bursta u } \mu\text{s})$;						
u slučaju miješanih OFDMA/TDMA sustava, postavke ovise i o trajanju OFDMA simbola;						
proizvođači opreme bi trebali navesti postavke.						

U slučaju mjerenja izvanpojasnih sporednih emisija odašiljača mjeri se do 5. harmonika, a preporuka je da širina rezolucijskog filtra (*RBW*) iznosi 1 MHz. Uz izmjerenu vrijednost treba navesti širinu pojasa korištenoga rezolucijskog filtra.

Pažnju valja obratiti i na ispravno podešavanje vremena prebrisavanja (*sweep time*) jer može doći do krivih rezultata. Naša preporuka je da se izabere automatski način izbora vremena prebrisavanja.



Slika 3.54. Primjer neispravno (lijevo) i ispravnog postavljanja (desno) vremena prebrisavanja

U konačnici valja istaknuti da se za mjerenja u vremenskom području postavlja veliki RBW, a za mjerenja u frekvencijskom području mali RBW (vidi Tablicu 3.28.).

3.9.3. Mjerni instrumentarij

Mjerač snage

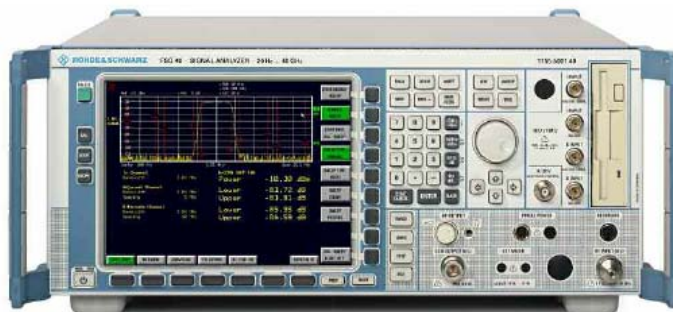
Za mjerač snage može se reći da spada u popis "dodatne" opreme za mjerenje WiMAX-a. Naime, mjerenja snage mogu se izvesti i uporabom analizatora spektra.



Slika 3.55. Primjer mjerača snage

Analizator spektra, analizator signala

Glavni instrument za mjerenje WiMAX-a predstavlja analizator spektra (signala). To je temeljni instrument jer pomoću njega možemo izmjeriti sve relevantne parametre.



Slika 3.56. Primjer analizatora signala

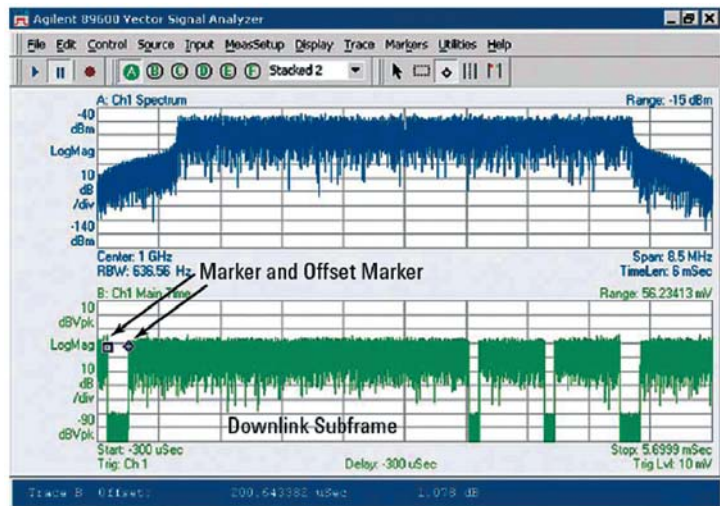


Slika 3.57. Primjer analizatora spektra

Prilikom odabira analizatora spektra neophodno je da analizator spektra ima mogućnost mjerenja do ~ 20 GHz (neželjene emisije) i da ima širinu rezolucijskog filtra do ~ 20 MHz.

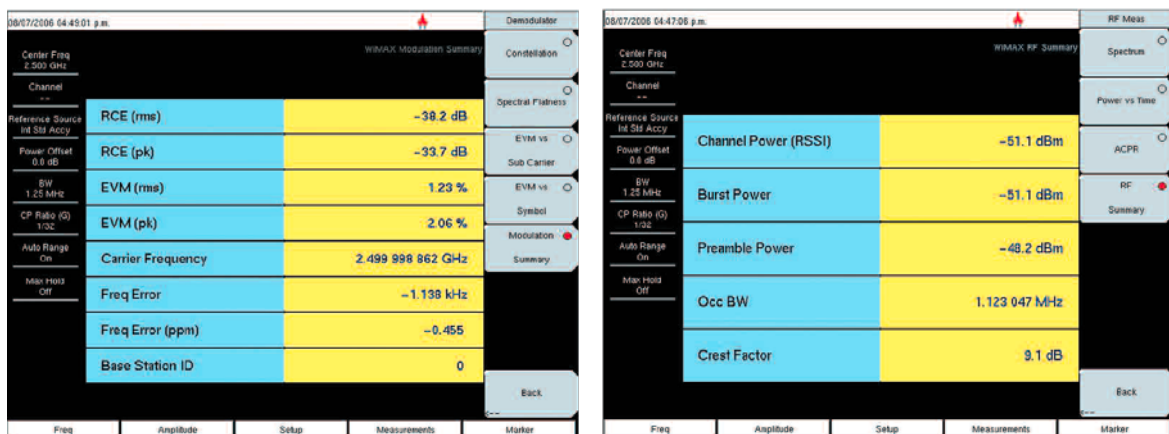
Analizator spektra, opremljen s neophodnom programskom podrškom namijenjenom mjerenju WiMAX-a, predstavlja jeftinije rješenje u odnosu na analizator signala.

Analizatori signala predstavljaju najbolji izbor za mjerenje širokopoljnih radijskih mreža, ali su oni i skuplje rješenje. Postoje dvije vrste analizatora signala: skalarni (ne daje podatak o fazi signala) i vektorski analizator signala.



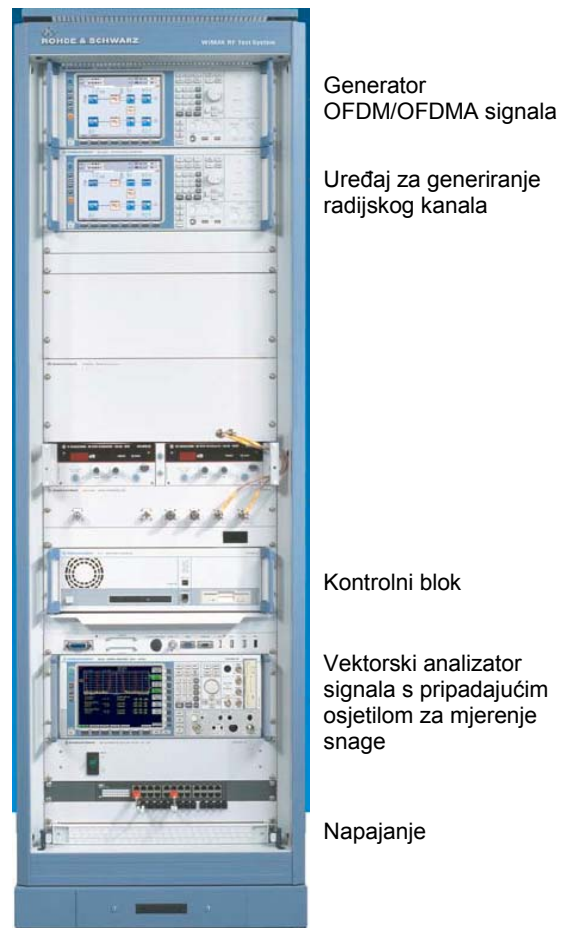
Slika 3.58. Primjer mjerenja s vektorskim analizatorom signala

Vektorski analizatori signala obavljaju digitalnu obradu signala (brzu Fourierovu transformaciju) za potrebe provođenja spektralne analize signala, vektorsku demodulaciju i prikaz signala u vremenskom području. Oni omogućuju istodobni prikaz signala u vremenskom i u frekvencijskom području. Danas na tržištu ima dosta proizvođača ove vrste opreme, ali preporuka je odabrati renomirane proizvođače kao što su Agilent, Anritsu ili Rhode&Schwarz.



Slika 3.59. Skupni pregled izmjerenih relevantnih podataka na analizatoru signala

Za potpuna mjerenja (uključuju sve vrste mjerenja) neophodni su i posebni generatori signala koji imaju mogućnost generiranja točno određenih struktura signala. Često puta je cijeli mjerni niz upravljan pomoću računala i određene programske podrške, ali ta mjerna oprema je ponajprije namijenjena proizvođačima WiMAX opreme.



Slika 3.60. Prikaz cjelokupnog sustava za mjerenje WiMAX-a

3.9.4. Korisne napomene

Zaključno za mjerenja na WiMAX uređaju treba reći:

- ispravnost mjerenja ponajprije ovisi o osposobljenosti i znanju ljudi koji ga provode;
- skupa oprema nije garancija ispravnih mjerenja;
- prilikom nabave nove opreme treba paziti na mogućnosti instrumenata i voditi računa o sadašnjim i budućim potrebama. Prije same nabave potrebno je provjeriti da li se već s postojećom opremom mogu obavljati neophodna mjerenja. Ako se odlučuje o kupnji novih instrumenata treba izabrati proizvode renomiranih proizvođača, ali neophodno je i prije same kupnje obaviti probna mjerenja. Budući da je WiMAX još "nedovoljno zrela" tehnologija, često puta i proizvođači mjerne opreme preuveličavaju mogućnosti instrumenata.

4. Daljnji razvoj i nove tehnologije

4.1. Razvoj mobilnih podatkovnih mreža prema 4G tehnologijama

Mobilne mreže četvrte generacije (4G) trebaju biti novi korak u razvoju radijskih komunikacijskih sustava. Ako gledamo perspektive budućeg 4G sustava, možemo se pitati zašto se uopće razmišlja o novoj generaciji mobilnih podatkovnih mreža. Osvrnuvši se unatrag, pri uvođenju mobilne telefonije razmišljalo se ponajprije o prijenosu govora. Prva primjena prijenosa podataka, koja je postala masovno prihvaćena, bila je SMS usluga. Takve primjene nisu bile previše zahtjevne glede potrebne širine frekvencijskog pojasa. Usluga SMS bila je u mobilnim komunikacijskim sustavima preteča danas sve prisutnijih usluga prijenosa podataka, kao što su mobilni e-mail, mobilni web pretraživač, mobilno uređivanje blogova i slično. Te su usluge omogućene uvođenjem radijskih pokretnih mreža koje su koristile komutaciju paketa, čime su postale prikladnije za prijenos IP podataka. Danas vodeća 3G tehnologija i 3,5G mreže mogu vrlo dobro poslužiti za ponudu ovakvih usluga, jer nude dovoljne brzine prijenosa u raspoloživom frekvencijskom pojasu. Kapacitet mreže doduše nije jedini pravi razlog za uvođenje još novijih tehnologija. Postoji nekoliko trendova koji će zahtijevati povećanje potrebne širine frekvencijskog pojasa za zadovoljavanje novih usluga.

U današnje vrijeme postaje sve masovnije korištenje radijskih mobilnih mreža za prijenos podataka, čime će se povećati i potreba za većim raspoloživim frekvencijskim spektrom. Multimedijски sadržaji postaju također sve zahtjevniji. Od prvobitnih web stranica baziranih uglavnom na tekstu, danas se sve više traže slikovni i glazbeni sadržaji, koji traže mnogo veće širine pojasa za prijenos. Prijenos govora IP mrežama (VoIP) je trend u današnje vrijeme čak i u fiksnim komunikacijskim mrežama. Kroz nekoliko godina fiksne mreže s komutacijom kanala sve će se manje koristiti, a operatori više niti ne ulažu u tu tehnologiju. U radijskim sustavima

je problem što VoIP prijenos zahtjeva znatno veće širine pojasa od govorne komunikacije, a isti trend prisutan je i u mobilnim mrežama. Pristup Internetu preko fiksne linije će se također u dogledno vrijeme sve više smanjivati u odnosu na mobilni pristup. U mnogim zemljama operatori pokušavaju nuditi pristup Internetu preko brzoga paketskog pristupa u silaznoj vezi (HSDPA, *High Speed Downlink Packet Access*) i brzoga paketskog pristupa u uzlaznoj vezi (HSUPA, *High Speed Uplink Packet Access*) nadograđenih na UMTS mreže, čime su počeli sve više konkurirati fiksnim mrežama s ADSL tehnologijom i kablskim operatorima. Neki alternativni operatori nude širokopojasni radijski pristup Internetu preko WiFi ili WiMAX mreža. Na taj način se nameću kao izravna konkurencija UMTS sustavu.

Ovi trendovi jasno pokazuju zašto operatori traže nove tehnologije i nove norme te zagovaraju sve brže radijske podatkovne mreže.

Postoje dva glavna cilja koja trebaju ispuniti radijski sustavi 4G – veća širina pojasa i prelazak na IP. Sustav 4G treba omogućiti svestrana IP rješenja za govornu komunikaciju, prijenos podataka te multimedijske sadržaje korisnicima na bazi "bilo gdje i bilo kada" i to većim brzinama nego što ih nude dosadašnja rješenja. Iako ne postoji formalna definicija sustava 4G, postoje određeni zahtjevi koji se postavljaju pred novu generaciju mobilnih mreža. To je ponajprije želja da 4G bude integrirani sustav baziran na IP. Nova arhitektura jezgrene mreže, bazirana na IP, daje neslućene mogućnosti za prihvaćanje i primjenu novih pristupnih rješenja optimiziranih za mobilni IP. Nakon što radijske i fiksne tehnologije konvergiraju i omoguće brzine prijenosa između 100 Mbit/s i 1 Gbit/s u unutarnjem i vanjskom prostoru, s dovoljnom kvalitetom i visokom sigurnosti komunikacija, 4G će ponuditi sve vrste usluga uz prihvatljivu cijenu. Sustav 4G treba zadovoljiti kvalitetu usluge (QoS) i brzine prijenosa za mnoge usluge od kojih neke tek dolaze, kao npr. radijski širokopojasni pristup, MMS, video razgovor (*video chat*), mobilna TV, HDTV sadržaji i ostale usluge bezprekidnog toka podataka i to bilo gdje i bilo kada. Radna grupa 4G definirala je slijedeće ciljeve budućeg radijskog komunikacijskog sustava:

- visoka spektralna učinkovitost,
- veliki kapacitet mreže s mnogo istodobnih korisnika unutar ćelije,
- nominalne brzine prijenosa od 100 Mbit/s za korisnike koji se kreću većim brzinama, a 1 Gbit/s za korisnike koji se sporo kreću ili stoje,
- brzine prijenosa od najmanje 100 Mbit/s između bilo kojih dviju točaka na svijetu,
- prekapčanje veze između raznovrsnih vrsta mreža,
- mogućnost spajanja i globalni roaming između raznih vrsta mreža,

- visoka kvaliteta usluge za multimedijske sadržaje,
- interoperabilnost s postojećima radijskim normama,
- paketska komutacija s IP podrškom.

Sustav 4G treba dinamički dijeliti i iskoristiti mrežne resurse kako bi zadovoljio minimalne zahtjeve za sve korisnike 4G sustava. Infrastruktura i terminali 4G primjenjivat će praktički sve norme od 2G do 4G. Iako bi novi sustavi mogli prihvatiti korisnike postojećih mreža, infrastruktura 4G sustava bit će potpuno bazirana na IP i komutaciji paketa. Neki prijedlozi sugeriraju da se koristi otvorena platforma u koju bi se mogle uklopiti nove inovacije. Tehnologije koje se razmatraju kao priprema za 4G su WiMAX, WiBro, LTE (*Long Term Evolution*) i 3GPP2 *Ultra Mobile Broadband*.

4.1.1. IMT Advanced

IMT-A (*International Mobile Telecommunication - Advanced*) je nova buduća norma za mobilne komunikacijske sustave koja bi trebala predstavljati sljedeću generaciju IMT-2000 sustava. Norma će specificirati 4G mobilnu komunikaciju, a kako je u ITU još uvijek u postupku pripreme, ne očekuje se da će biti definirana prije 2010. godine.

Ključna funkcija IMT Advanced tehnologije treba biti konvergencija između ostalih mobilnih sustava, kako bi se osigurala kontinuirana veza i osigurala različite usluge prema zahtjevima korisnika. Razlika u odnosu na 3G mreže bit će znatno veće ciljne brzine prijenosa do 100 Mbit/s na širokom području uz veliku mobilnost korisnika i do 1 Gbit/s za vruće-točke (*hot-spot*) za korisnike koji se sporo kreću. Težnja je da se omogući slična kvaliteta usluge kao što ju ima fiksna komunikacijska mreža, da se omogući globalni roaming, prekapčanje između heterogenih pristupnih mreža, te da se ostvari u cijelosti IP.

IMT Advanced može omogućiti nove usluge korisnicima novim mobilnim sustavom, uz velike brzine prijenosa. Veća širina IMT spektra omogućit će veći kapacitet sustava i veću učinkovitost uz niže cijene usluga za krajnjeg korisnika. Zahtjevi za novim uslugama s velikim brzinama prijenosa podrazumijevaju i povećanje kvalitete usluga, čime one postaju još atraktivnije i poželjnije. S vremenom će sve više ljudi koristiti nove digitalne uređaje, a mobilni telefoni postat će multi-funkcionalni uređaji s jednostavnim načinom korištenja, što će još više omasoviti korištenje novih usluga velikih brzina prijenosa.

Predviđa se da će postojeći frekvencijski pojasevi za IMT usluge već 2015 godine postati nedostadni za daljnju ekspanziju sustava. Predviđeno povećanje prometa neće moći biti zadovoljeno u dosadašnjem frekvencijskom spektru uz usluge s brzinama prijenosa od 100 Mbit/s do 1 Gbit/s. Zbog povećanja prometa bit će

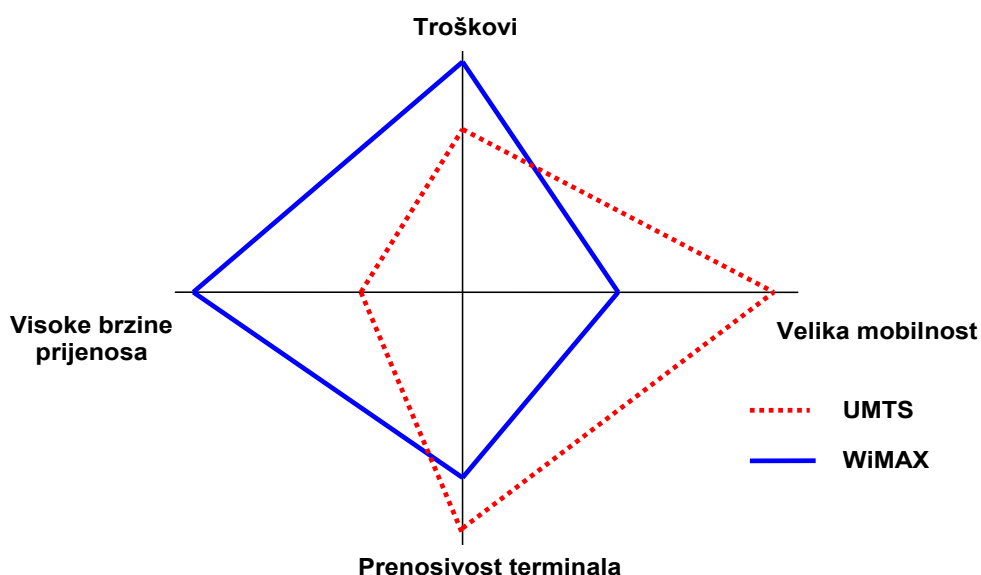
nužno koristiti veći broj baznih postaja, što je teorijski uvijek moguće, ali antenski stupovi ne mogu se postavljati baš posvuda.

Za postizanje kontinuirane pokrivenosti, zajamčene kvalitete usluge i potpunu mobilnost uz prihvatljive troškove, mikro i makro ćelije su atraktivno rješenje. Postojeći dodijeljeni raspoloživi frekvencijski spektar ne omogućava nuđenje mobilnih širokopoljnih usluga uz zadovoljavajuću gustoću ćelija i povoljne troškove. Visoke brzine prijenosa zahtijevaju uvođenje novih tehnologija s većom širinom kanala do 100 MHz, što je mnogo više od dosadašnjih 5 MHz širine kanala UMTS sustava.

Upitno je da li će IMT Advanced na bilo koji način moći doprinijeti konvergenciji i kompatibilnosti između LTE i WiMAX tabora. Jedna norma, mnoštvo kompatibilnih uređaja i mreža, usklađeno korištenje frekvencijskog spektra – sve to zvuči jako dobro i vrlo poželjno, međutim pri normizaciji nažalost nisu važni samo tehnološki zahtjevi, već i politički razlozi koji mogu bitno utjecati na procese razvoja normi. Zbog toga je teško predvidjeti što će se događati u postupcima normizacije.

4.1.2. Konvergencija WiMAX i UMTS mreža

Obije tehnologije, WiMAX i UMTS, omogućavaju radijski pristup velike brzine pa iako postoje područja određenog tržišnog preklapanja, imaju značajne razlike u tehnološkom pristupu, a time i u korisničkom segmentu i uslužnim primjenama. WiMAX norme proizašle su iz računalne industrije i namijenjene su ponajprije za prijenos podataka na manjem području pokrivanja (gradsko područje).



Slika 4.1. Usporedba temeljnih obilježja WiMAX i UMTS tehnologija

UMTS se razvio iz mreža prilagođenih ponajprije prijenosu govora koje nude usluge na vrlo širokom području pokrivanja (nacionalno pokrivanje pa i više). Potreba za osiguranjem interoperabilnosti zahtijeva opsežan rad na normizaciji, zakonskim regulativama i korištenju licenciranog frekvencijskog spektra. UMTS mreže, projektirane za visoku mobilnost u velikom području pokrivanja, omogućavaju mobilni pristup Internetu, premda baš i ne uz najviše brzine prijenosa koje nudi WiMAX. WiMAX pak nudi veliku brzinu prijenosa, ali ne osigurava toliku mobilnost i pokrivanje kao UMTS. Slika 4.1. pokazuje temeljne razlike između navedenih tehnologija i područja preklapanja.

Uz više brzine prijenosa, kako u uzlaznom tako i u silaznom smjeru, WiMAX i ostale slične kompatibilne tehnologije nameću se kao bolje rješenje za primjene temeljene na pristupu Internetu. S druge strane primjene koje traže veliku mobilnost uvijek će biti bolje uslužene unutar mreža 3G s velikim područjem pokrivanja.

WiMAX nudi mogućnost korištenja nekih vrlo popularnih web aktivnosti, kao npr. IP televizija (IPTV) i preuzimanje raznih drugih audio i video sadržaja. Za ovakve primjene potrebne su i do 7 puta veće širine pojasa nego za ostale manje zahtjevne mobilne usluge. Uz ovakve potrebne širine pojasa čak bi i mali broj istodobnih korisnika unutar 3G mreže mogao izazvati zagušenje. WiMAX nudi rješenja problema kapaciteta i za vršna opterećenja koja postoje kod IPTV. Dodatno nudi primjene kao što je VoIP sa zadovoljavajućom kvalitetom, uz vrlo niske troškove. Kako još uvijek postoji dosta veliki segment korisnika bez pristupa širokopojasnom Internetu u nekim područjima WiMAX bi mogao biti jeftinije rješenje od uvođenja 3G mreže.

UMTS tehnologija za industriju mobilnih uređaja predstavlja rješenje koje uz mobilne telefoniju nudi i pristup Internetu, dok se WiMAX može gledati kao strategija računalne industrije koja dodaje mobilni pristup Internetu u računalnim uslugama. Kombinacija WiMAX-a i novog frekvencijskog spektra uklanja neke od barijera za kompanije koje nisu telekom operatori i operatorima virtualnih mreža, da povežu radijski pristup sa svojim uslugama. WiMAX dolazi u vrijeme kad su regulatorne prilike pristupačne, konvergencija mreža i zahtjevi korisnika za usluge mobilnog pristupa Internetu sve jasnije izraženi, kad konvergencija mreža ima i ekonomskog opravdanja, a industrija gleda kako povećati prisutnost na tržištu. WiMAX tehnologija u dostupnom frekvencijskom području može ponuditi širinu pojasa za danas popularne multimedijske primjene. Ovakva funkcionalnost u rukama tvrtki koje nude Internet usluge, s tržišnim ekvivalentom najvećih mobilnih operatora, može biti snažni pokretač za velike promjene.

Kao i LTE, WiMAX se takmiči za mjesto u IMT Advanced inačici 4G te dijeli istu sudbinu kao sadašnja LTE norma – prespora je.

Stoga je radna grupa 802.16m dobila zadatak da unaprijedi sustav. Prepoznato je da je najbolji način za povećanje brzine prijenosa u sustavu povećanje širine pojasa raspoloživog za prijenos podataka. Za radijsko sučelje budućeg WiMAX sustava koristit će se pristup s višestrukim nositeljima, u kojem će se za prijenos podataka koristiti dva ili više nositelja, koji neće nužno morati biti u susjednim frekvencijskim pojasevima. Pristup, zamišljen za WiMAX, je kompatibilan unazad, što znači da će mobilni uređaji za 802.16e i 802.16m moći biti usluženi u ćeliji s istom baznom postajom, na istom nositelju. Uređaj 802.16e neće doduše vidjeti i koristiti povezivanje kanala i koristit će samo jedan nositelj. Za povratnu kompatibilnost u okvirima se uvode područja za veliku brzinu prijenosa dostupne samo uređajima 802.16m.

U praksi se ustanovilo da je struktura okvira norme 802.16e s duljinom okvira od 20 ms previše nefleksibilna. Kao posljedica tako dugih okvira pristup mreži je prespor, a presporo je i ponavljanje blokova pogrešnih podataka, jer uređaj ima samo jednu mogućnost prijenosa po okviru. Norma 802.16m koristi novu strukturu okvira koji se sastoje od superokvira (20 ms) koji se dodatno dijele u okvire od 5 ms i ponovo dijele u 8 podokvira trajanja 0,617 ms. Unutar svakog 5 ms okvira može se jednom promijeniti smjer prijenosa. Kako je unutar okvira osam podokvira, dodjela vremenskih trenutaka silaznog i uzlaznog prijenosa može se fleksibilno provoditi. Prekapćanjem smjera prijenosa najmanje svakih 5 ms, kašnjenja ponovljenog prijenosa se značajno smanjuju.

Na putu prema WiMAX II na tržištu već postoje sustavi kao WiMAX i LTE koji obećavaju veće brzine prijenosa koristeći uglavnom slijedeće:

- **Povećanje širine pojasa kanala** – HSDPA koristi kanal širine 5 MHz, WiMAX i LTE imaju fleksibilne širine kanala od 1,25 do 20 MHz. (28 MHz WiMAX) Korištenjem četverostruke širine kanala može se postići isto toliko povećanje brzine prijenosa.
- **MIMO (Multiple Input, Multiple Output)** – koriste se višestruke antene i na prijamnoj i na odašiljačkoj strani koje emitiraju neovisne tokove podataka preko svake od antena. I WiMAX i LTE predviđaju MIMO tehniku. U najboljem slučaju to može udvostručiti brzine prijenosa.
- **Modulacijski postupci višeg reda** – dok HSDPA rabi 16-QAM modulacijski postupak koji prenosi 4 bita po simbolu, WiMAX i LTE koristit će 64-QAM modulaciju u idealnim uvjetima prijenosa sa 6 bita po simbolu.

Koristeći ove tehnike LTE i WiMAX moći će znatno povećati brzine prijenosa podataka. Čak i uz te napredne tehnike postići će se brzine prijenosa podataka manje od predviđenih 1 Gbit/s. Za postizanje tako velikih brzina trebat će ponovo povećati širine

pojasa kanala na 100 MHz. To bi bilo 4 puta više od najveće širine predviđene za LTE i 20 puta više od današnjeg HSPDA, ali u praksi vrlo teško ostvarivo, jer je prilično teško pronaći raspoloživi frekvencijski pojas u kojem bi se ostvarili kanali toliko velike širine pojasa. Umjesto 2×2 MIMO moglo bi se koristiti čak 12×12 MIMO, ali to bi bilo neostvarivo jer već s 2×2 MIMO antenama proizvođači imaju problema kako ih smjestiti u minijaturno kućište mobilnog aparata. Rješenje prema Slici 4.2. sigurno se ne može smatrati praktičnim rješenjem.



Slika 4.2. Mobilni terminal s 4 MIMO antene još nema praktično prihvatljivo rješenje

Novi modulacijski postupci mogli bi također doprinijeti poboljšanju karakteristika prijenosa.

Međutim, u današnje vrijeme tehnologije LTE i WiMAX tek postaju stvarnost, a još naprednije tehnologije nailaze na velike poteškoće u pronalaženju raspoloživog frekvencijskog spektra i ugradnje naprednijih antenskih sustava s više antena, što bi bilo nužan preduvjet za omogućavanje najavljenih iznimno velikih brzina prijenosa.

4.1.3. Divergencija UMTS LTE meža

Treća generacija mobilnih radijskih tehnologija baziranih na W-CDMA (*Wideband Code-Division Multiple Access*) uvodi se širom svijeta. Kako bi se osiguralo da ovi sustavi ostanu konkurentni, 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) inicirao je projekt dugoročnog razvoja LTE (*Long Term Evolution*) namijenjenog za unaprjeđivanje UMTS norme radi lakšeg uvođenja novih usluga i budućih zahtjeva. Zahtjevi uključuju povećanje učinkovitosti, snižavanje troškova, unaprjeđenje usluga, otvaranje mogućnosti korištenja novog spektra i bolju usuglašenost s novim otvorenim normama. Iako LTE projekt nije norma, rezultat će novom inačicom UMTS norme (Release 8), koja će uključivati mnoge dodatke i preinake UMTS sustava. Arhitektura, koja će proizaći iz

toga naziva se EPS (*Evolved Packet System*) i uključuje E-UTRAN (*Evolved UTRAN*) na pristupnoj strani i EPC (*Evolved Packet Core*) u jezgrenom dijelu mreže.

Ustanovljeni su ključni zahtjevi kojima se treba rukovoditi:

- smanjenje troškova korištenja za krajnje korisnike,
- povećanje broja usluga s nižom cijenom,
- fleksibilno korištenje postojećih i novih frekvencijskih pojaseva,
- pojednostavljenje arhitekture sustava, otvorena sučelja,
- niža potrošnja mobilnih uređaja.

Studija provedivosti na UTRA i UTRAN LTE započela je krajem 2004. godine i ona je fokusirana na održavanje usluga u području komutacije paketa:

- vezano na radijsko sučelje fizičkog sloja treba podržati fleksibilan prijenos unutar širine pojasa do 20 MHz, uz uvođenje novih postupaka za prijenos i naprednih tehnologija multi-antena,
- optimizacija signalizacije vezano uz sučelja sloja 2 i 3,
- identifikacija optimalne UTRAN arhitekture i funkcionalnog razdvajanja RAN mrežnih čvorova.

Slika 4.3. prikazuje ostvarive brzine prijenosa u silaznom i uzlaznom smjeru pojedinih inačica unaprijeđenog UMTS sustava – HSDPA, HSUPA, HSPA+ (*High Speed Packet Access*) i LTE.

HSPA (*High Speed Packet Access*) omogućuje veće brzine prijenosa uz primjenu MIMO tehnologije, što podrazumijeva korištenje više antena za odašiljanje i prijam kako bi se unaprijedile karakteristike radijske veze. MIMO tehnologija omogućuje povećanje brzina prijenosa bez povećanja širine pojasa kanala ili snage odašiljanja.

<p>HSDPA uzlaz: 384 kbit/s silaz: 14,4 Mbit/s</p>	<p>HSDPA/HSUPA uzlaz: 5,76 Mbit/s silaz: 14,4 Mbit/s</p>	<p>HSPA+ uzlaz: 11,5 Mbit/s silaz: 28 Mbit/s</p>	<p>LTE (20 MHz kanal) uzlaz: 75 Mbit/s silaz: 300 Mbit/s</p>
--	---	---	---

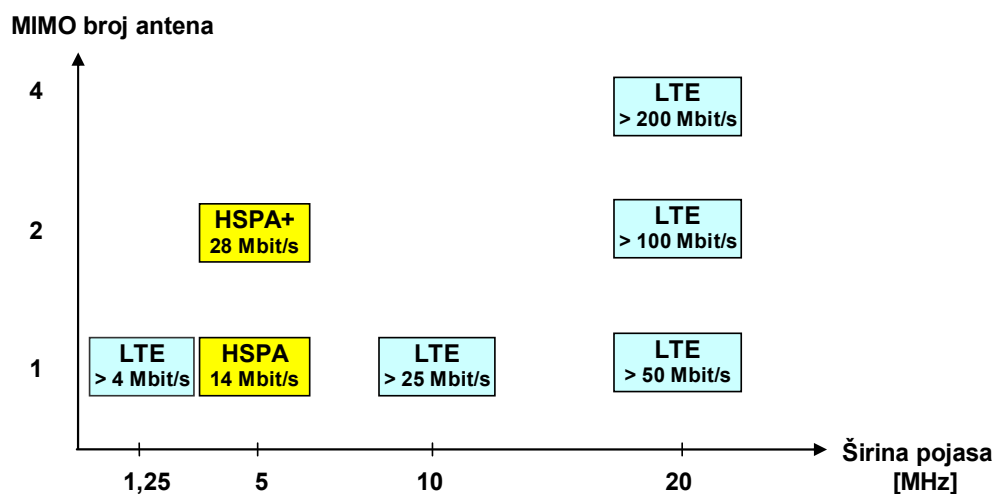
Slika 4.3. Brzine prijenosa ostvarive u unaprijeđenim inačicama UMTS sustava

3GPP Release 8 je u fazi dovršavanja, a norma će biti usmjerena na unaprijeđenje UMTS-a prema 4G mobilnoj komunikacijskoj tehnologiji. U suštini to će biti radijski širokopolasni sustav s ponajprije govornom i ostalim uslugama. Sadašnje stanje uključuje:

- vršne brzine prijenosa u silaznom smjeru od 172,8 Mbit/s unutar kanala širine 20 MHz uz korištenje 64-QAM i 2×2 SU-MIMO (*Single-User Multiple Input/Multiple Output*) te brzine do 326,4 Mbit/s korištenjem 4×4 SU-MIMO,

- vršne brzine u uzlaznom smjeru 86,4 Mbit/s uz korištenje 64-QAM,
- najmanje 200 aktivnih korisnika u ćeliji uz dodjelu širine spektra od 5 MHz,
- vrijeme čekanja (*latency*) manje od 5 ms (po pojedinom korisniku s jednim tokom podataka) za male IP pakete,
- povećana fleksibilnost upravljanja spektrom s podržavanim podesivim širinama pojasa od 1,25 MHz; 1,6 MHz; 2,5 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 15 MHz i 20 MHz u silaznom i uzlaznom smjeru
- povećanje spektralne učinkovitosti 2 do 4 puta u odnosu na Release 6 HSPA,
- optimalna veličina ćelije promjera 5 km, uz dobre performanse do 30 km, a do 100 km uz prihvatljive performanse,
- koegzistencija s ostalim sustavima (LTE, GSM/GPRS, W-CDMA UMTS).

Slika 4.4. prikazuje brzine prijenosa koje mogu ostvariti pojedine inačice unaprijeđenog UMTS sustava u ovisnosti o širini pojasa kanala i broju antena odašiljača i prijavnika koji koriste MIMO tehnologiju.



Slika 4.4. Ostvarive brzine prijenosa ovisno o MIMO parametrima i širini kanala

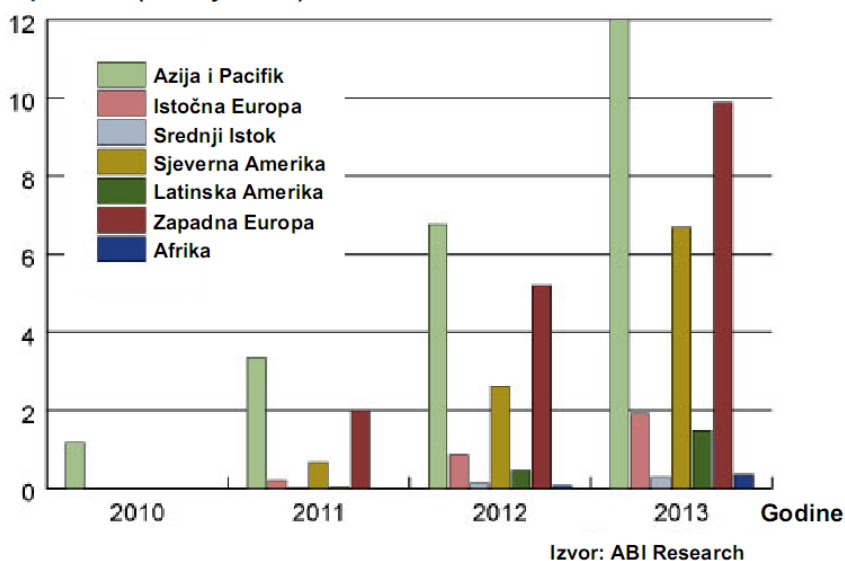
Glavna je zadaća pojednostavniti arhitekturu sustava pri prijelazu od postojećeg UMTS sustava prema potpunom IP sustavu (*all-IP*). LTE radijsko sučelje koristi frekvencijski dupleks (FDD) i vremenski dupleks (TDD). U silaznom smjeru koristi se višestruki pristup OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).

Za uzlazni smjer od mobilnog uređaja prema baznoj postaji koristi se nova verzija višestrukog pristupa SC-FDMA koja objedinjuje prednosti FDMA i OFDM-a. Iako je primjena OFDM-a u mobilnim sustavima dugo bila odgađana zbog FFT obrade signala, koja troši puno energije, te vrlo velikih razlika između vršnih i srednjih snaga signala (PAR, *Peak to Average Ratio*) zbog paralelnog emitiranja stotinjak podnosilaca. Ovaj postupak je danas osnova za LTE silaznu vezu. Veliki PAR problematičan je za mobilni uređaj kako zbog izvedbe izlaznog pojačala tako i potrošnje baterije, pa je za uzlaznu vezu 3GPP grupa razvila postupak SC-FDMA. To je hibridni postupak koji kombinira niski PAR prijenosa jednim nosiocem (kao kod GSM sustava i kod CDMA postupka) s velikim vremenom trajanja simbola i fleksibilnom dodjelom frekvencija OFDM-a. OFDM ima spektralnu učinkovitost veću nego CDMA primijenjen u UMTS-u, a kad se još koristi modulacijski postupak kao što je 64-QAM i MIMO tehnologija, LTE je definitivno superiornija tehnologija od WCDMA s HSPA.

Migracija i prednosti evolucije od tehničkih rješenja GPRS/EDGE prema HSPA i nakon toga prema LTE su definitivno očite i neizbježne. Kombinirana s mogućnošću globalnog roaminga i opće prihvaćenosti kod operatora, mnoštvom novih usluga i uređaja koji ih podržavaju, nova tehnologija, od koje će profitirati i krajnji korisnici i operatori, ima vrlo dobre izgleda da bude prihvaćena širom svijeta.

Prema izvoru agencije ABI Research, u narednim godinama u cijelom se svijetu predviđa veliki porast broja korisnika LTE mreže, što je prikazano na Slici 4.5.

Broj pretplatnika (u milijunima)



Slika 4.5. Predviđeni broj pretplatnika LTE sustava po regijama do 2013. godine

4.1.4. Mobile-Fi (IEEE 802.20)

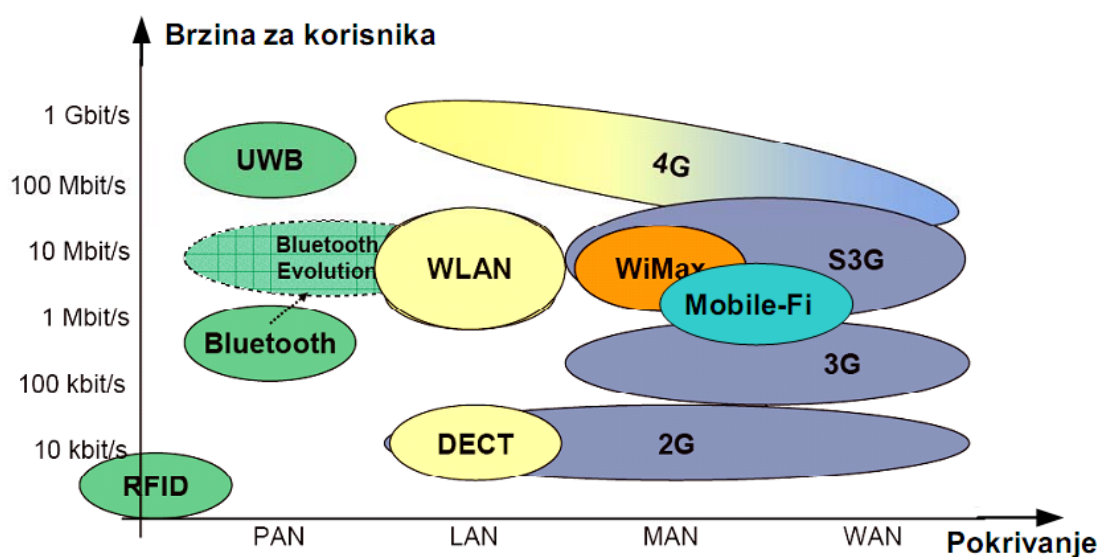
Norma IEEE 802.20, također nazvana Mobile-Fi, optimizirana je za IP i roaming u okruženju brzog kretanja mobilnog korisnika. Ova norma trebala bi potpuno mobilizirati IP i otvoriti nova tržišta uz mreže 2,5 i 3G koje su orijentirane više na komutaciju kanala. Od 2002. godine radna grupa Mobile Broadband Wireless Access (MBWA) radi na normi 802.20 s glavnom zadaćom da razvije specifikacije sučelja baziranog na komutaciji paketa za učinkoviti prijenos usluga baziranih na IP. Cilj je omogućiti globalni razvoj jeftinih masovno prihvaćenih mobilnih širokopojsnih radijskih pristupnih mreža. IEEE 802.20 je definirala novi fizički sloj (protokol sloja 1) i MAC sloj veze (protokol sloja 2) oko IP paket sloja 3. Može raditi u licenciranom frekvencijskom području ispod 3,5 GHz, s veličinom ćelija radijusa 15-tak kilometara, uz brzine kretanja korisnika do 250 km/h.

Za razliku od WiMAX-a, koji je proizašao iz IEEE 802.16 skupine normi i razvio se iz prijašnjih 802.16 tehnologija, norma IEEE 802.20 je kreirana iz temelja kao tehnologija koja podržava usluge velike mobilnosti. Uz veliku brzinu kretanja korisnika norma bi trebala podržavati vršne brzine prijenosa do 250 Mbit/s. IEEE 802.20 koristi također OFDM, MIMO i oblikovanje dijagrama zračenja (*beam-forming*) kao i WiMAX, što se predviđa da će biti glavna tehnologija za buduće ćelijske mreže, uključujući 3GPP dugoročni razvoj i razvoj 3GPP2 radijskog sučelja.

Dok su brzine prijenosa kod Mobile-Fi upola manje od onih kod Mobile WiMAX, Mobile-Fi nudi veću mobilnost. Ima izvanredno vrijeme čekanja (*latency*) od samo 10 ms, dok je za komunikacijsku normu 3G vrijeme čekanja (*latency*) 500 ms, te zadržava cjelovitost rada do brzine kretanja korisnika 250 km/h (za WiMAX do 100 km/h). S obzirom na korišteni frekvencijski spektar do 3,5 GHz nudi globalnu mobilnost, prekapčanje veze (*handover*) i podržava roaming. Dok je Mobile WiMAX prilagođen mobilnim korisnicima koji šecu i nose sa sobom prijenosna računala, Mobile-Fi je prilagođen korisnicima koji se kreću velikim brzinama. Ključna razlika je u načinu kako su ove dvije norme zamišljene s obzirom na područje pokrivanja. Pretpostavka je da će korisnici Mobile WiMAX mreža koristiti područje pokrivanja postojećih 802.16a mreža, dok korisnici Mobile-Fi sustava smjeraju na mnogo raširenije i veće područje pokrivanja.

Mnoge kompanije pokušavaju razviti svoje norme s kojima se nadaju da će uspjeti steći prevlast na tržištu. Rad na normama odvija se bez prekida, ali je prilično neizvjesno što će prihvatiti tržište. Mobilni operatori, koji uvode Mobile WiMAX, vide Mobile-Fi kao konkurentnu normu, zbog koje bi vrijednost njihovih koncesija za 3G mrežu mogla pasti. Mobile-Fi morat će prevladati mnoge prepreke, a najveća je što je korištenje

ograničeno samo na licencirano frekvencijsko područje ispod 3,5 GHz te činjenica da za Mobile WiMAX normama kasni par godina. Upitno je i da li stvarno postoji potreba za osiguravanjem prekapčanja veze uz brzine kretanja korisnika do 250 km/h. Možemo pretpostaviti da mobilni operatori neće biti spremni za veće promjene opreme sve dok im se ne amortizira uložena investicija u 3G mrežu, tako da Mobile-Fi za sada nema veće šanse. Mobile WiMAX bit će povratno kompatibilan s WiMAX fiksnim uslugama, što bi mu moglo osigurati mnogo bolju prihvaćenost od Mobile-Fi sustava. Pregled najznačajnijih radijskih tehnologija, brzine prijenosa i pokrivanje prikazani su na Slici 4.6.



Slika 4.6. Pregled radijskih tehnologija, ostvarive brzine prijenosa i područje pokrivanja

4.1.5. IEEE 802.21

Norma 802.21 namijenjena je podržavanju algoritama koji omogućuju prekapčanja veze mobilnih korisnika između mreža iste vrste, kao i prekapčanje između različitih vrsta mreža nazvano MIH (*Media Independent Handover*). Norma podržava prekapčanje između GSM, GPRS, WiFi, Bluetooth, 802.11 i 802.16 mreža korištenjem različitih mehanizama prekapčanja veze.

IEEE 802.21 radna skupina, kojoj se proključilo tridesetak kompanija, započela je s radom na normi u ožujku 2004. Prva koncepcija norme i definiranje protokola dovršeno je do svibnja 2005. godine, a sada se još radi na preradama i doradama.

Razlozi za uvođenje 802.21 norme su višestruki. Iako ćelijski sustavi i 802.11 mreže imaju mehanizme za provedbu prekapčanja unutar samih mreža, postojeće 802 norme ne podržavaju prekapčanje između različitih vrsta mreža. Mobilni IP ima

mogućnost prekapčanja veze između podmreža različitih vrsta mreža, ali je proces dosta spor. Postojeće 802 norme imaju mehanizme za detekciju i odabir pristupnog čvora mreže, ali ne na način koji bi bio neovisan o vrsti mreže.

Očekivanja su brojna:

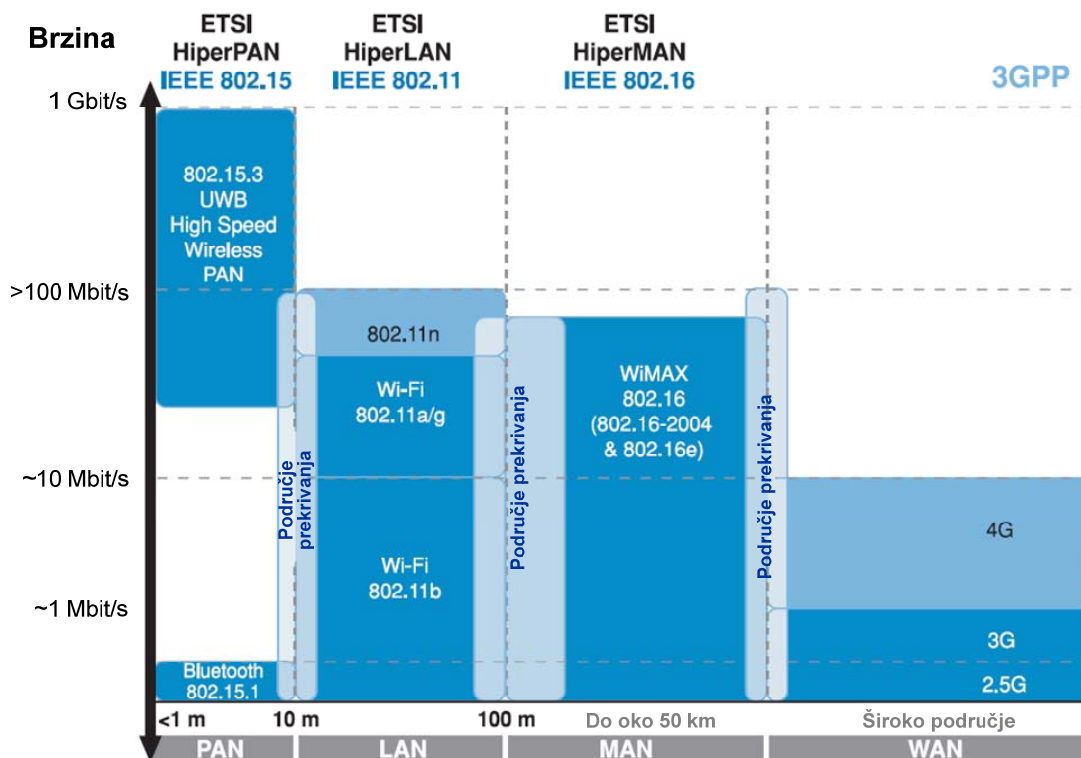
- omogućavanje roaminga između 802.11 mreža i 3G ćelijskih sustava,
- omogućavanje korisnicima sudjelovanje u ad-hoc telekonferencijama,
- primjena i za kabelske (žičane) i radijske (bežične) mreže,
- omogućava kompatibilnost i usklađenost s ostalim IEEE 802 normama,
- proizvođači će imati u ponudi adekvatnu opremu,
- iako sigurnosni algoritmi i protokoli nisu definirani unutar norme, provjera vjerodostojnosti, autorizacija te detekcija i odabir mreže bit će podržani u protokolu.

Mnogi proizvođači koji rade na 802.21 normi sugeriraju da bi, kao i za postojeću 802.11 tehnologiju, trebalo softverski provoditi prekapčanje. Softverski upravljano prekapčanje trebalo bi omogućiti da cijene mrežne opreme ne porastu značajnije.

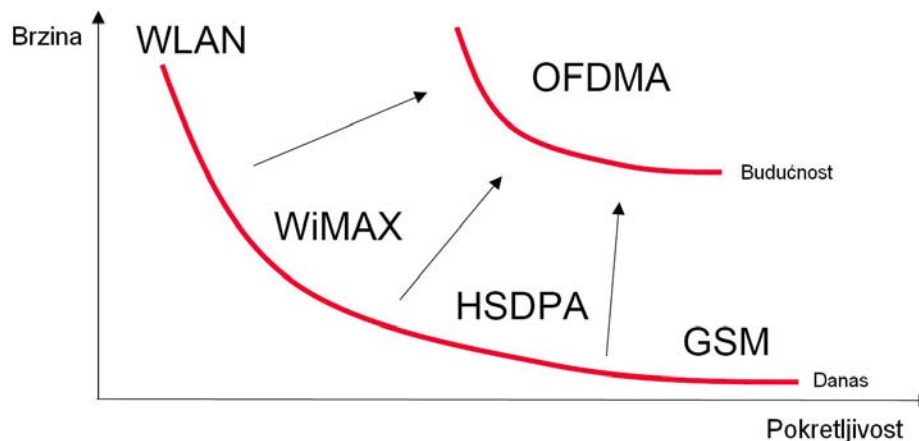
4.1.6. Performanse WLAN-a i WiMAX-a u odnosu na ostale radijske tehnologije za širokopojasni pristup

Jedna od vrlo čestih usporedbi širokopojasnih radijskih tehnologija uspoređuje veličine područja pružanja usluge i ostvarive brzine prijenosa (Slika 4.7.). Ćelijske mobilne mreže obilježava veliko područje pokrivanja, ali skromnije brzine prijenosa u odnosu na ostale tehnologije. Razvojem mobilnih tehnologija zahvaća se i područje viših brzina što se vidi iz usporedbe performansi 2,5G i 3G tehnologije. Ne očekuje se ni da će tehnologije mobilnih mreža četvrte generacije (4G) dosegnuti današnje mogućnosti mreža WMAN i WLAN. Na slici je radi preglednosti navedena i Bluetooth tehnologija koja ne spada u skupinu širokopojasnih mreža.

Slika 4.8. pokazuje odnos brzina i pokretljivosti na malo drugačiji način. Današnje tehnologije postižu veće brzine prijenosa uz smanjenu pokretljivost. Nadogradnje na 2G tehnologiju (GPRS ili 2,5G) i na 3G tehnologiju (HSDPA, neki označavaju s 3,5G) tek djelomično poboljšavaju performanse brzine ćelijskog sustava koji jedini osiguravaju veliko područje pokrivanja pa time i pokretljivost. Mreže gradskih područja osiguravaju već značajne brzine, tehnologija WiMAX do 75 Mbit/s po baznoj postaji, a pokrivaju područja gdje se nalazi glavnina korisnika tj. urbane prostore. WiMAX tehnologija već je u jednoj inačici primijenila OFDMA način pristupa. Procjenjuje se da će se primjenom OFDMA znatno podići razine ostvarivih brzina prijenosa podataka.



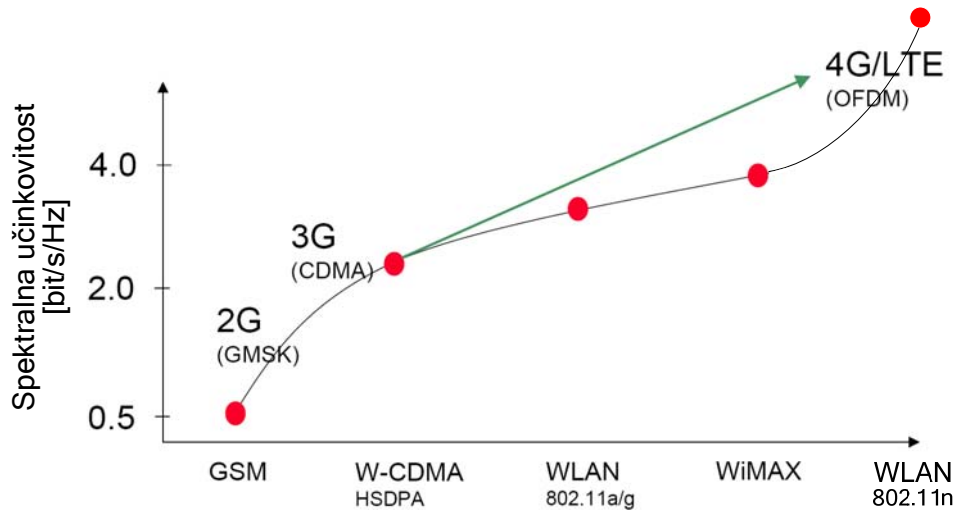
Slika 4.7. Područje pružanja usluge i ostvarive brzine za nekoliko radijskih tehnologija, 3GPP – *Third Generation Partnership Project*



Slika 4.8. Očekivane brzine prijenosa u budućnosti u odnosu na danas raspoložive tehnologije

Potrebe za većim brzinama prijenosa ne mogu se više zadovoljavati dodjelom širih pojava frekvencija s obzirom na visoki stupanj zauzetosti raspoloživog spektra. Nova rješenja treba tražiti u smjeru novih postupaka prijenosa u okviru postojećih tehnologija ili pak novih tehnologija. Slika 4.9. ilustrira ostvarene spektralne

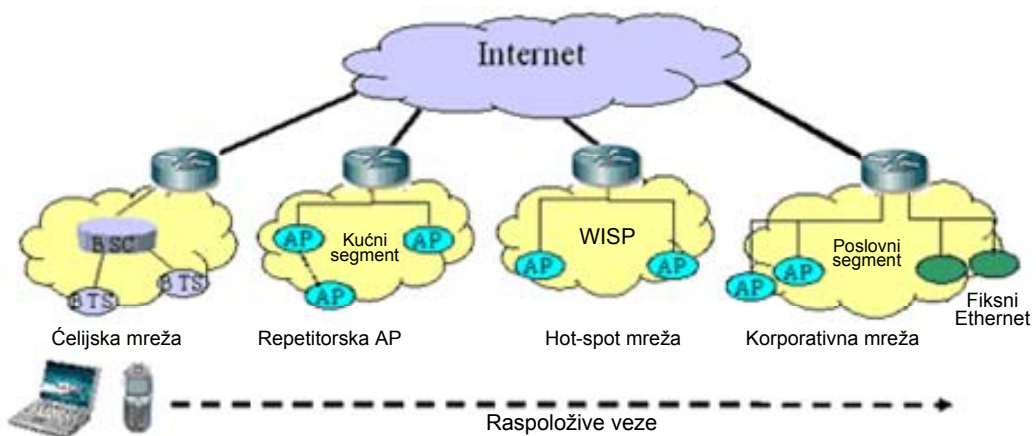
učinkovitosti poznatih tehnologija. Veliki iskorak, koji je pokazala tehnologija radijskih lokalnih mreža po normi IEEE 802.11n, posljedica je uvođenja postupka prostornog multipleksiranja i na toj osnovi izvedenom postupku pristupa SDMA odnosno uporabom MIMO tehnike.



Slika 4.9. Najviše ostvarive spektralne učinkovitosti pojedinih tehnologija za širokopojasni radijski pristup

Osim po brzini radijske se mreže raznih tehnologija znatno razlikuju u kvaliteti usluge koju one pružaju. WLAN i WMAN mreže znatno teže ispunjavaju zahtjeve na kvalitetu usluge kad je u pitanju prijenos govora (VOIP, *Voice Over IP*) u odnosu na mobilne mreže ćelijske vrste iako je tu prisutan stalni napredak.

Konačni cilj je izgradnja potpuno integrirane radijske IP mreže s neprekinutim višestrukim mogućnostima pristupa za većinu rasprostranjenih kako podatkovnih tako i govornih usluga.



Slika 4.10. Sastavni dijelovi integrirane radijske IP-mreže, WISP – *Wireless Internet Service Provider*

4.1.7. Očekivani tehnološki razvoj i prevladavajuće tehnologije

Dugoročna bitka vodi se između dvije najperspektivnije radijske pristupne tehnologije WiMAX i LTE. Svaka od njih može barem učtverostručiti brzine prijenosa postojećih radijskih sustava, ali analitičari ipak prognoziraju veću dominaciju LTE tehnologije, s obzirom da danas u svijetu prevladavaju operatori koji nude GSM i UMTS tehnologiju, a LTE se može gledati kao nadogradnja ovih najpopularnijih mobilne komunikacijskih tehnologija. LTE tehnologija mogla bi mobilnim operatorima omogućiti vrlo jednostavno unapređenje sustava, ali WiMAX je već dostupan na tržištu. Iako LTE može očekivati globalnu dominaciju, to ne znači da WiMAX neće preživjeti.

Za ostvarenje očekivanih brzina prijenosa za oba sustava nužno bi bilo povećati širinu kanala barem na 40 MHz u stvarnim uvjetima, a brzine jako ovise i o broju korisnika unutar ćelije, udaljenosti od bazne postaje te različitim drugim faktorima.

Iako postoji nekoliko tehničkih razlika između LTE i WiMAX tehnologije, analitičari smatraju da oba sustava imaju mnogo toga zajedničkoga. Za uvođenje LTE tehnologije trebat će dosta investirati u novu opremu, iako se jezgri dio postojećih mreža može iskoristiti, a također se i dio infrastrukture baznih postaja može prilagoditi na novu tehnologiju. Za uvođenje WiMAX tehnologije troškovi bi bili i mnogo veći, pogotovo ako se želi postići velika pokrivenost i uzme u obzir da kreće praktički "od nule". U radijskom dijelu oba sustava koristit će različite modulacijske postupke u uzlaznom smjeru prema baznoj postaji. WiMAX će koristiti OFDM, a LTE će rabiti SC-FDMA koji je optimiziran za učinkoviti rad s korisničkim mobilnim uređajima s malom snagom i optimiziranom potrošnjom energije. Obje tehnologije bazirat će se na IP, što će omogućiti uvođenje tehnologija kontrole kvalitete. LTE je definiran na način da i govor i prijenos podataka pretvara u pakete, a i WiMAX u teoriji također može biti prilagođen za održavanje prijenosa govornih usluga. LTE će imati prednosti zbog izgrađene infrastrukture jer će moći podržavati globalni roaming za korisnike mobilnih uređaja s velikim brzinama prijenosa, ali ipak neće moći pridobiti sve korisnike. Vrlo je vjerojatno da će se koristiti kombinirano i jedna i druga tehnologija. Za krajnjeg korisnika takva bi konkurencija na tržištu mogla biti od velike koristi, jer će se svi operatori truditi da ponude što atraktivnije i bolje usluge, uz što povoljnije troškove, kako bi bili prepoznati kao bolji ili povoljniji. To će potaknuti stalno unaprjeđivanje tehnoloških rješenja na dobrobit krajnjih korisnika.

WiMAX rješenja za integralne elemente FMC (*Fixed Mobile Convergence*) mreža nude novi pristup. Osnovni ciljevi FMC-a su

mreže nove generacije bazirane na IP infrastrukturi s dodanim mogućnostima kao npr. IMS (*IP Multimedia Subsystem*) za razvoj i dostavu širokog spektra novih usluga. Nove mobilne IP tehnologije, bazirane na IEEE 802.16 skupini normi, osiguravaju fiksno-mobilnu konvergenciju iz perspektive pristupnog elementa mreže. Ovakve bliske tehnologije imaju potencijal otvaranja novih poslovnih mogućnosti za operatore.

Postojeći kao i novi mobilni operatori, s planovima da se nadmeću s fiksnim operatorima, pokazali su veliki interes za WiMAX rješenja. Iako su im planovi i interesi različiti, i jedni i drugi žele reagirati na povećane zahtjeve za jeftinim širokopojasnim pristupom. Mobilne radijske tehnologije su odigrale vrlo važnu ulogu kao pristupno rješenje za značajno povećanje govornog prometa ako se koristi kao jeftina alternativa fiksnim mrežnim rješenjima. To je jasni primjer fiksno-mobilne konvergencije na djelu. Sad možemo očekivati isto s jeftinim širokopojasnim pristupom, jer su tehnološka rješenja za to postala dostupna.

Nije sporno da tehnologije IMT-2000 i Enhanced IMT-2000 mogu odigrati važnu ulogu u ponudi svuda prisutnog pristupa IP podacima velike brzine. Važno je uočiti da nije samo tehnologija vezana uz IMT-2000 važna za osiguravanje konkurentnih jeftinih širokopojasnih pristupnih rješenja usporedivih s brzinama fiksnih mreža, već je važno razmotriti i administrativne prepreke vezane uz korištenje radijskog spektra koje mogu imati utjecaj na uvođenje rješenja kao npr. WiMAX.

Globalno usklađivanje frekvencijskih pojaseva za radijski širokopojasni pristup bit će prilično zamršena zadaća. Frekvencijski pojas od 3,3 do 3,6 GHz je u mnogim državama licenciran za fiksni ili rjeđe nomadski BWA (Broadband Wireless Access). To se poklapa s pojasom 3,4 do 3,6 GHz koji je u te svrhe namijenjen u Hrvatskoj, a kojeg je WiMAX forum odredio za certifikaciju i testiranje. Isti se pojas ozbiljno razmatra i za IMT Advanced sustav. Ostali frekvencijski pojasi za WiMAX nalaze se u pojasu 2,3 do 2,4 GHz kao i 2,5 do 2,69 GHz, koji se također razmatraju i za IMT Advanced sustav. Ovaj posljednji pojas koristi se i za IMT-2000. U Republici Hrvatskoj ovi pojasevi u području 2 GHz imaju drugu namjenu.

WiMAX BWA rješenja ne podržavaju govornu komunikaciju s komutacijom kanala, pa zbog toga nisu najprikladnija za uključivanje u IMT-2000 ITU-R preporuku za IMT-2000 radijsko sučelje. To zasigurno otežava mogućnost da WiMAX BWA koristi frekvencijske pojaseve namijenjene za IMT-Advanced. Temeljne preporuke za IMT-Advanced ne očekuju se prije 2010. godine, pa će pristup WiMAX BWA u frekvencijskim pojasevima predviđenim za IMT-Advanced biti problematičan još dugo vremena na mnogim svjetskim tržištima. Najbolje rješenje bilo bi da WiMAX tehnologija osigura svoje mjesto unutar globalno

usklađenih frekvencijskih pojasa tako da se osigura da Mobile WiMAX bude potvrđen od ITU-R preporuka koje se bave IMT-Advanced tehnologijom. WiMAX neće imati većih izgleda kao mogući kandidat za IMT Advanced rješenja ako ispadne izvan definicije tzv. "Okosnice za sustave nakon IMT-2000" opisane u Preporuci M.1645. Zahtjevi za IMT-Advanced ustrojeni su konkretnije u novim Preporukama "Metodologija za proračun spektralnih zahtjeva za budući razvoj IMT-2000 i sustava nakon IMT-2000" (IMT-Advanced), a ključne parametre definirala je Skupina za radijske pristupne tehnike (*Radio Access Technique*) RAT-2.

Ključni parametar je spektralna učinkovitost, za koju se očekuje da bi trebala biti od 2–5 bit/s/Hz/čeliji za mikročelije i 3–6 bit/s/Hz/čeliji za pikočelije. To određuje brzine prijenosa u čeliji ostvarive unutar prijenosnog kanala određene širine ili iz druge perspektive gledano kapacitet čelije unutar kanala, što je važan podatak i s regulatorske perspektive, kako bi se optimalno iskoristili raspoloživi frekvencijski resursi. Tako bi se podržavale i poticale inovativne tehnologije i rješenja koja maksimiraju broj usluga koje se mogu ponuditi u određenom frekvencijskom pojasu.

Za svaki od analiziranih sustava možemo reći da ima i prednosti i određenih nedostataka, tako da bi odluka oko izbora najpovoljnijeg rješenja bila dosta teška. Osim tehničkih kriterija i performansi budućih sustava, nažalost presudnu ulogu mogu odigrati i politički razlozi koji bi mogli utjecati na razvoj normi i prihvaćenost pojedinih tehničkih rješenja mobilnih podatkovnih mreža. Svi novi sustavi 4G koristit će napredne tehnologije koje će omogućiti značajno povećanje ostvarivih brzina prijenosa podataka, a sustavi sa podesivom arhitekturom omogućit će laku nadogradnju i prilagodbu za buduće nove usluge. Krajnjeg korisnika ponajprije zanimaju usluge kojima njegov mobilni uređaj može pristupiti i troškovi korištenja, a ne tehnologija koja to omogućava. Zajednički cilj trebao bi biti da svi sustavi koegzistiraju zajedno te da korisnicima omoguće pristup mreži bilo gdje i bilo kada bez obzira na razlike u tehničkim rješenjima.

4.2. Inteligentne antene i MIMO sustavi

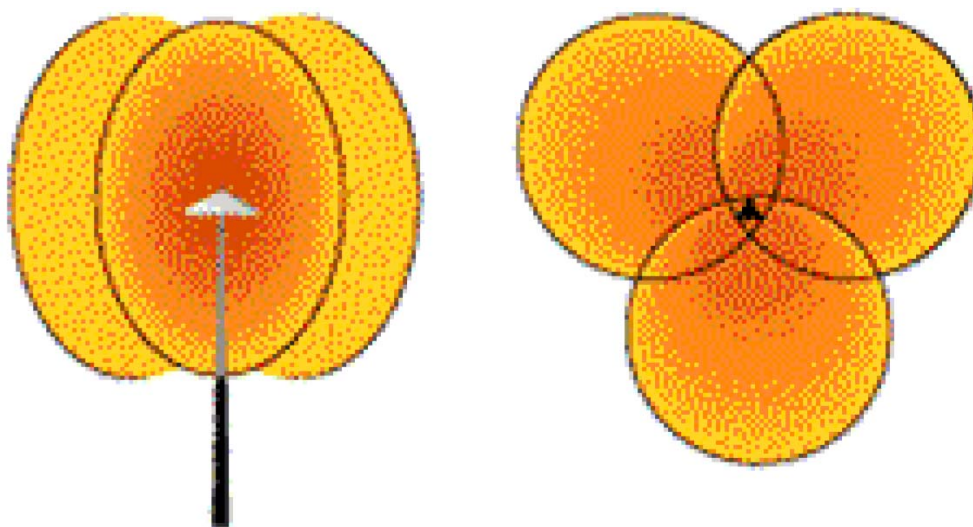
4.2.1. Inteligentne antene

4.2.1.1. O inteligentnim antenama općenito

Uporaba inteligentnih antena u cilju povećanja kapaciteta ćelijskih sustava smatra se danas postupkom koji najviše obećava. Tehnologija inteligentnih antena osniva se na prilagodljivim antenskim nizovima i ona u suštini predstavlja jedan sustav antenskih nizova. Dijagramom zračenja upravlja se uz pomoć

amplitude i faze signala kojim se napajaju pojedini elementi niza. Glavnina istraživanja usmjerena je na primjenu u 3G ćelijskim sustavima u radijskima lokalnim mrežama (WLAN), kao i budućim sustavima novijih generacija.

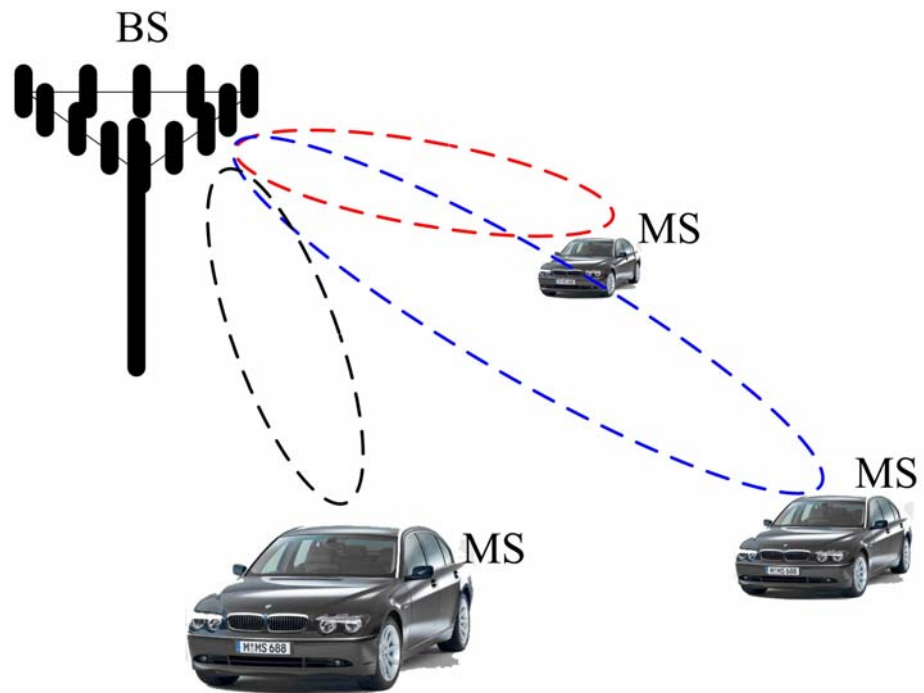
Signali pojedinih korisnika, koji komuniciraju preko iste bazne postaje, tradicionalno se razdvajaju po frekvenciji (FDMA), vremenu (TDMA) ili kodu (CDMA). Inteligentne antene omogućuju razdvajanje pojedinih korisnika po prostoru (SDMA, *Space Division Multiple Access*). To znači da više od jednog korisnika mogu na istoj baznoj postaji koristiti komunikacijski kanal na istoj frekvenciji, u istome vremenskom odsječku i s istim kodom za proširenje. Načela SDMA valjana su kako za TDMA sustave (npr. GSM) tako i za CDMA sustave (npr. UMTS).



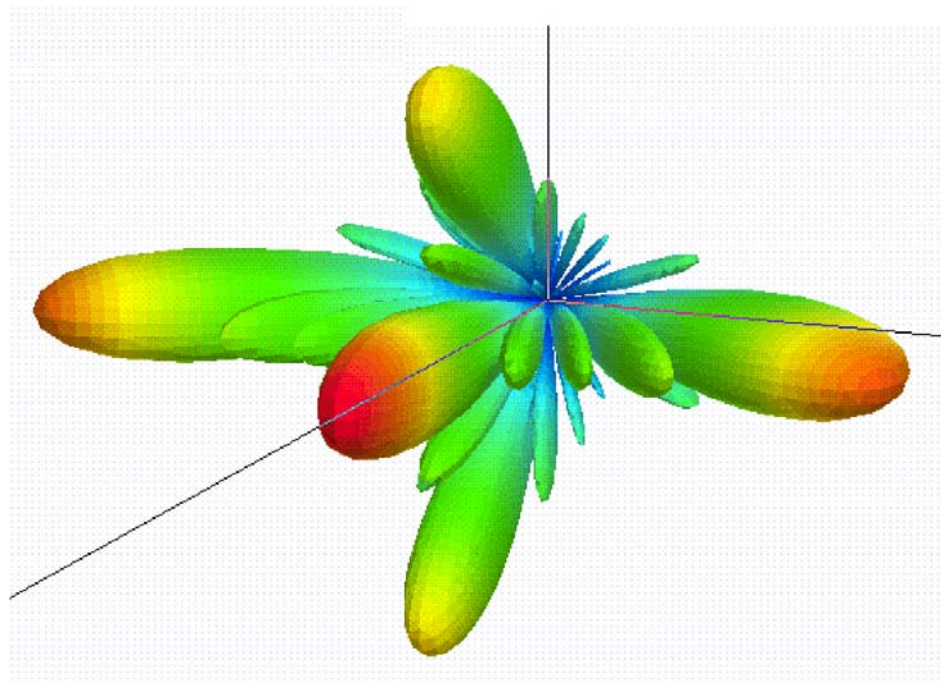
Slika 4.11. Tipični vertikalni i horizontalni dijagram zračenja/prijama antenskog sustava od tri sektorske antene

Bazne postaje uobičajeno koriste antene od kojih svaka pokriva jedan od do tri sektora širine 120° . Zračenje elektromagnetske energije u cijeli sektor, a ne samo prema korisniku, u velikoj mjeri izaziva elektromagnetsko onečišćenje i nepotrebno trošenje energije. Zračenje u područja u kojima nema korisnika stvara smetnje drugim korisnicima.

Inteligentna antena usmjerava glavni snop zračenja prema korisniku kojem je signal namijenjen. Uporabom inteligentne antene učinkovitije se koriste snaga i radijski spektar, a smanjuje se razina smetnji. Kako ona opslužuje više korisnika postojat će više smjerova povećanog intenziteta zračenja.



Slika 4.12. Bazna postaja zrači samo u smjerovima u kojima se nalaze pokretne postaje



Slika 4.13. Primjer prostornog dijagrama zračenja inteligentne antene bazne postaje ćelijskog sustava



Slika 4.14. Inteligentnom antenom usmjerava se snop zračenja krajnje pokretne postaje u smjeru bazne postaje

Uporabom inteligentne antene u pokretnoj postaji omogućava se usmjeravanje zračenja u smjeru prema baznoj postaji. Time se smanjuje potrošnja energije iz baterije, a i korisnik je manje izložen elektromagnetskom polju tijekom korištenja pokretne postaje što se pokazuje povoljnim vezano uz moguće zdravstvene učinke izloženosti elektromagnetskom polju.

Napokon, inteligentne antene doprinose povećanju dometa, donekle povećavaju sigurnost mreže, a omogućuju i uvođenje novih usluga.

U konačnici može se reći da je inteligentna antena jedna od jedinica radijskog sustava koja primjenjuje prostornu obradu signala korištenjem više antena. Kombiniraju se signali pojedinih antena i postupci digitalne obrade signala u cilju automatske optimizacije dijagrama zračenja/prijama u signalnom okolišu. Višestruke antene mogu se koristiti bilo na odašiljačkoj, bilo na prijamnoj strani radijske veze. U zadnje se vrijeme višestruke antene koriste i na odašiljačkoj i na prijamnoj strani stvarajući tzv. MIMO sustav (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*).

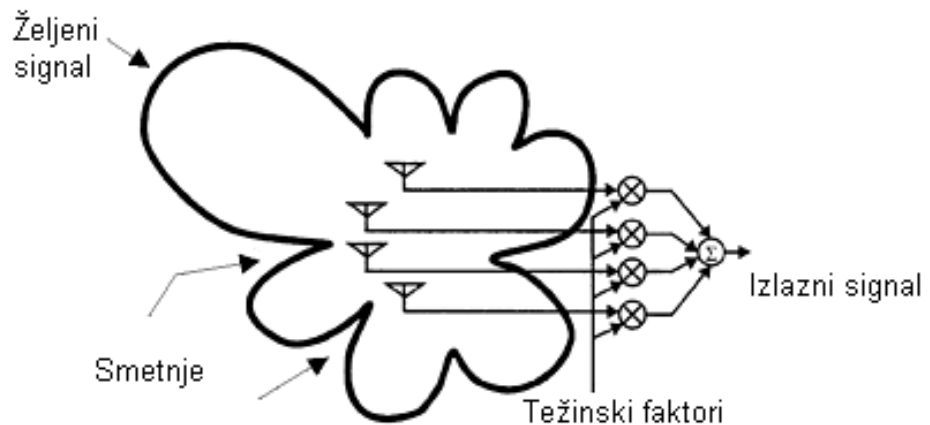
Inteligentnost antena očituje se u sposobnosti određivanja smjera dolaska signala. Taj se podatak onda koristi za izračunavanje vektora koji određuju smjer i oblik glavnog snopa zračenja koji onda prati pokretni cilj, tj. pokretnu krajnju postaju.

Nekoliko je algoritama za određivanje smjera dolaska signala kao npr.: MUSIC (*Multiple Signal Classification*), ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques*) i dr.

Inteligentnost antene u suštini je sadržana u antenskom sustavu koji inteligentno združuje istodobni rad više antena u diverzitetu.

Kriteriji za oblikovanje dijagrama zračenja/prijama inteligentne antene sastoje se iz dva dijela:

- potrebno je maksimirati zračenje/prijam u smjeru željenih pokretnih postaja i,
- minimizirati, po mogućnosti nulirati, zračenje/prijam u smjerovima neželjenih postaja koje su izvorom smetnji.



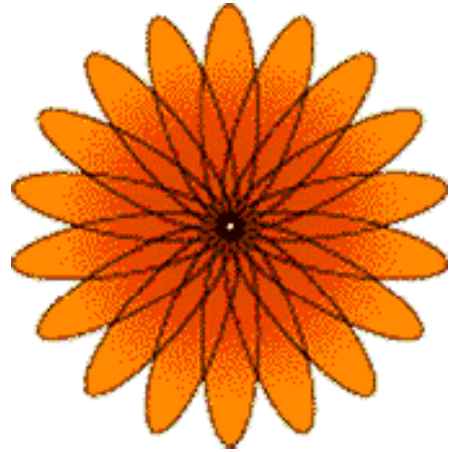
Slika 4.15. Kriteriji za oblikovanje dijagrama zračenja/prijama inteligentne antene

Dvije su kategorije inteligentnih antena. One se razlikuju u strategiji odašiljanja/prijama.

- *Antenski sustav s preklapanim snopom* – odabire se jedan od konačno mnogo unaprijed definiranih snopova glavnog zračenja.
- *Antenski sustav s prilagodljivim antenskim nizom* – postoji beskonačno mnogo mogućih smjerova glavnog snopa. Smjer odašiljanja/prijama podešava se u stvarnom vremenu na temelju prostornih kriterija.

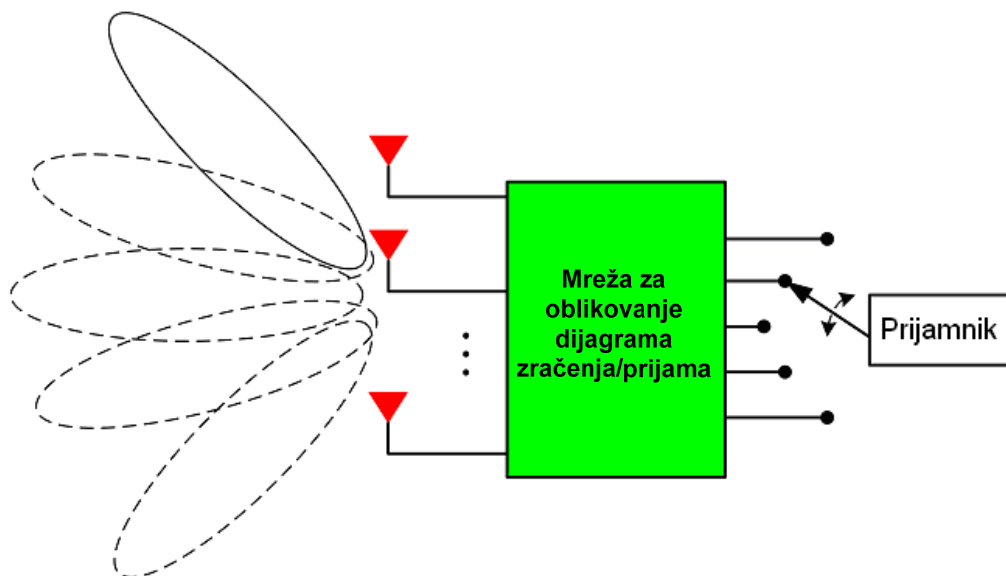
4.2.1.2. Inteligentne antene s preklapanjem glavnog snopa

Ova vrsta inteligentnih antena na neki način predstavlja proširenje konvencionalnih sektorskih antena koje zrače u azimut širine 120° i koje u stvari dijele ćeliju na tri dijela. Ćelija se dijeli na puno veći broj jedinica. Koristi se antenski sustav koji ima relativno usmjereni dijagram zračenja/prijama i koji može dati glavni snop u konačno mnogo unaprijed definiranih diskretnih smjerova. Na taj se način postiže viši dobitak antene i veća prostorna selektivnost u odnosu na klasične sektorske antene.



Slika 4.16. Preklapanjem većeg broja snopova može se dobiti maksimum dijagrama antenskog sustava u približno svim smjerovima

Antene s preklapanjem glavnog snopa koriste se najviše na prijamnoj strani radijskog sustava, tj. samo kao prijamne antene. Antenski sustav u svakom trenutku koristi samo jedan od mogućih glavnih snopova za prijam signala.



Slika 4.17. Načelo rada prijamne inteligentne antene s preklapanjem glavnog snopa

Odabir smjera glavnog snopa prijama obavlja se uz pomoć algoritama digitalne obrade signala, a na temelju prijamnih razina koje se dobivaju za pojedine položaje glavnog snopa. Kao kriterij odabira obično se uzima maksimum omjera signala i smetnje SIR (*Signal to Interference Ratio*). Pojednostavnjeni algoritmi kao kriterij koriste samo maksimiranje razine prijamnog signala.

Ovaj postupak podržava kretanje pokretne postaje, jer sustav detektira prelazak korisnika u područje drugog položaja glavnog snopa i reagira preusmjeravajući prijamni antenski sustav.

Inteligentne antene s preklapanjem glavnog snopa najjednostavniji su način poboljšanja osobina konvencionalnih sektorskih antena za bazne postaje. One međutim pate od dosta nedostataka:

- ne rješavaju problem višestaznog širenja,
- razina prijamnog signala se jako snižava kad se pokretna postaja nalazi u prostoru između dva diskretna položaja glavnog snopa,
- antenski sustav ne može razlikovati signal željenog korisnika odnosno postaja u odnosu na signale smetnje,
- zato ova vrsta antena nije učinkovita u rješavanju problema istokanalne smetnje (CCI, *Co-channel Interference*),



Slika 4.18. Osim što ne može podesiti maksimum glavnog snopa točno u smjer dolaska signala od pokretne postaje nema ni mogućnosti utjecaja na oblik dijagrama antene u području sekundarnih latica.

4.2.1.3. Inteligentne antene s prilagodljivima antenskim nizovima

Antene prilagodljive tehnologije rezultiraju danas najnaprednijima inteligentnim antenama. Uporabom većeg broja novih algoritama obrade signala prilagodljivi antenski sustav ima sposobnost lociranja i praćenja više vrsta signala. To omogućuje minimizaciju smetnji i maksimiranje razine prijama željenog signala što daje najveći omjer signala i smetnje SIR.

One se razlikuju od prethodne vrste, inteligentnih antena s preklapanjem glavnog snopa, u stupnju inteligentnosti.



Slika 4.19. Prilagodljivi antenski sustav ima sposobnost usmjeravanja maksimuma glavnog snopa prijama u smjer željenog korisnika i usmjeravanja minimuma dijagrama prijama u smjerove iz kojih dolaze signali smetnje

Za potrebe obrade informacije o smjeru dolaska signala potrebno je više antena (tipično 4 do 12 antena). One mogu biti u raznim geometrijama: linearni niz, kružna geometrija, planarna geometrija i sl. Na temelju signala u pojedinim antenama određuju se veličine za upravljanje dijagramom antenskog sustava, a to su kompleksni koeficijenti odgovarajućega digitalnog filtra FIR vrste. Inteligentne se antene najviše postavljaju za bazne postaje, no one se u nešto jednostavnijem obliku mogu koristiti i u pokretnim telefonima kao i prijenosnim računalima.



Slika 4.20. Primjer dijagrama prilagodljivoga antenskog sustava bazne postaje koja komunicira s dvije pokretne postaje

Prilagodljivi antenski sustav kontinuirano motri predviđeno područje pokrivanja i pri tome se pokušava prilagoditi promjenljivom radijskom okolišu koje se sastoji od pokretnih korisnika i

izvora smetnji. Na slici je primjer situacije kad postoje dva korisnika bez nazočnosti ometajućih signala. Inteligentni prilagodljivi antenski sustav osigurava najveći dobitak sustava u smjerovima korisnika.

Dodajući baznoj postaji komponentu višestrukog pristupa s prostornom podjelom (SDMA) dobiva se potpuno nova kvaliteta. Ona se u velikoj mjeri razlikuje od ranije opisanog principa upravljanja glavnim snopom ili snopovima antenskog sustava.

4.2.1.4. Obilježja inteligentnih antena — sažetak

U nastavku je pregledni prikaz kako glavne osobine inteligentnih antena utječu na poboljšanje performansi radijske mreže.

Tablica 4.1. Obilježja i probitci uporabe inteligentnih antenskih sustava

Dobitak	Probitak
<i>Pojačanje signala (dobitak)</i> – signali iz više antena se međusobno kombiniraju u cilju optimizacije raspoložive snage za ostvarivanje traženog pokrivanja.	<i>Veći domet/pokrivanje</i> – fokusiranjem zračene snage povećava se domet i veličina područja koje pokriva bazna postaja. Potrebna je manja snaga zračenja pokretne postaje što omogućuje duži vijek trajanja baterije odnosno njezine manje dimenzije.
<i>Potiskivanje smetnji</i> – dijagramom antenskog sustava može se smanjiti razina signala smetnje koji se zrači u nekom smjeru ili koji se prima iz nekog smjera što poboljšava SIR.	<i>Povećanje kapaciteta prijenosa</i> – precizno upravljanje nulama dijagrama antene i slabljenje smetnji omogućuje češće ponavljanje frekvencije. SDMA podržava korištenje iste frekvencije za više radijskih veza unutar iste ćelije.
<i>Prostorni diverziteti</i> – sastavljene informacije iz niza koriste se za minimiziranje fadinga i ostalih neželjenih učinaka višestavnog širenja.	<i>Potiskivanje višestruko pristiglih signala</i> – može smanjiti efektivno raspršenje kašnjenja u kanalu čime se omogućuju više brzine prijenosa bez potrebe za ujednačavanjem signala.
<i>Učinkovitost snage</i> – kombiniraju se ulazi u elemente antenskog sustava radi optimiranja dobitka sustava u silaznoj vezi.	<i>Smanjenje troškova</i> – niža cijena pojačala, manja potrošnja energije, veća pouzdanost rezultat su povećane učinkovitosti snage.

Prednosti i nedostaci prikazanih dviju vrsta inteligentnih antena mogu se sažeti u nekoliko točaka:

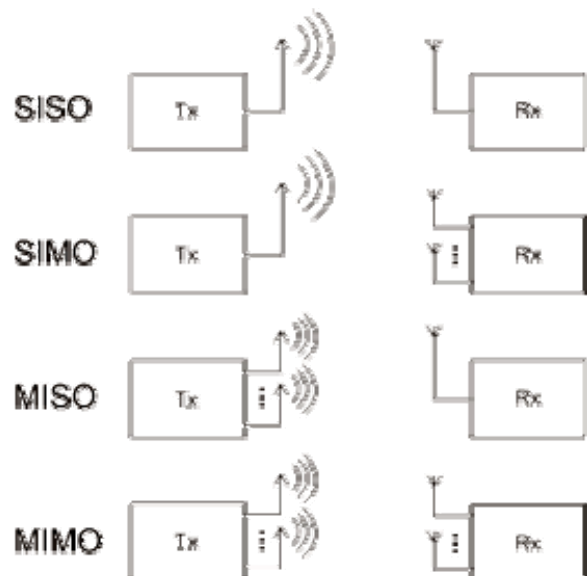
- *Integracija* – antene s preklapanim glavnim snopom tradicionalno se projektiraju u nadogradnji široko rasprostranjenih ćelijskih sustava. Oni se primjenjuju kao nova tehnologija koja inteligentno rješava potrebe postojećih mreža. Nasuprot tome u primjeni prilagodljivih antenskih sustava koristi se integralniji pristup koji daje manju zalihost hardvera u odnosu na antene s preklapanim snopom, ali zahtjeva potpuno novu izvedbu.
- *Domet/pokrivanje* – sustavi s preklapanim snopom mogu povećati domet bazne postaje od 20 do 200 % u odnosu na postaje sa sektorskim antenama, a ovisi o situaciji u okolišu i upotrijebljenom hardveru. Dinamičko prekapčanje od snopa do snopa čuva kapacitete, jer se svi signali ne emitiraju u svim smjerovima. Antenski sustavi s prilagodljivim nizom pokrivaju šire područje i to pokrivanje je jednolikije, preciznije jednolikiji je intenzitet zračenja, odnosno dobitak prijama u svim smjerovima koji su u području pokrivanja antene.
- *Potiskivanje smetnji* – antenski sustavi s preklapanim snopom potiskuju smetnje koje dolaze iz smjerova koji se jako razlikuju od smjera dolaska korisnog signala. S obzirom na fiksni dijagram antenskog sustava stupanj potiskivanja smetnji ovisi o dobitku antene u smjeru iz kojeg dolazi smetnja. Također zbog unaprijed fiksiranog dijagrama osjetljivost se ponekad mijenja kad se korisnik giba kroz sektor. Rješenja s preklapanim snopom pokazuju se dobrima u situacijama niskih ili umjerenih istokanalnih smetnji, ali postoje teškoće u razlikovanju korisnog signala od smetnje. Moguća je i situacija da se smetnja nađe u središtu glavnog snopa, a korisnik u sasvim drugom smjeru. Tad dolazi do većeg povećanja razine signala smetnje nego korisnog signala što korisniku narušava kvalitetu. Prilagodljivi sustav omogućuje sveobuhvatnije potiskivanje smetnji. Imajući u vidu da ta vrsta antena ima beskonačno mnogo kombinacija dijagrama zračenja/prijama zbog većeg fokusiranja zračenja na korisnika stvaraju se niže smetnje okolnim korisnicima u odnosu na drugo rješenje.
- *Višestruki pristup na osnovama prostorne podjele (SDMA)* – to je jedna od najusavršenijih primjena inteligentnih antena. Uz pomoć naprednih tehnika obrade signala antena prati nepokretne ili pokretne terminale i prilagođuje smjer prijenosa prema korisniku kloneći se izvora smetnji. Tehnologija prilagodljivih antenskih sustava postiže najviše stupnjeve potiskivanja smetnji pa je moguća učinkovitije ponovno korištenje iste frekvencije nego kod klasične heksagonalne

strukture. U suštini, ovakva struktura može prilagoditi dodjele frekvencije za veći broj korisnika.

4.2.2. MIMO-sustavi

4.2.2.1. Arhitektura i načela rada MIMO-sustava

Cjelokupni koncept nazvan MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) Osniva se na uporabi više antena na odašiljačkoj i na prijamnoj strani radijskog sustava. MIMO koristi razne vrste inteligentnih antena i njegova je primjena u najvećoj mjeri ograničena stanjem tehnologije inteligentnih antena. MIMO se može smatrati prirodnim nastavkom razvoja inteligentnih antena.



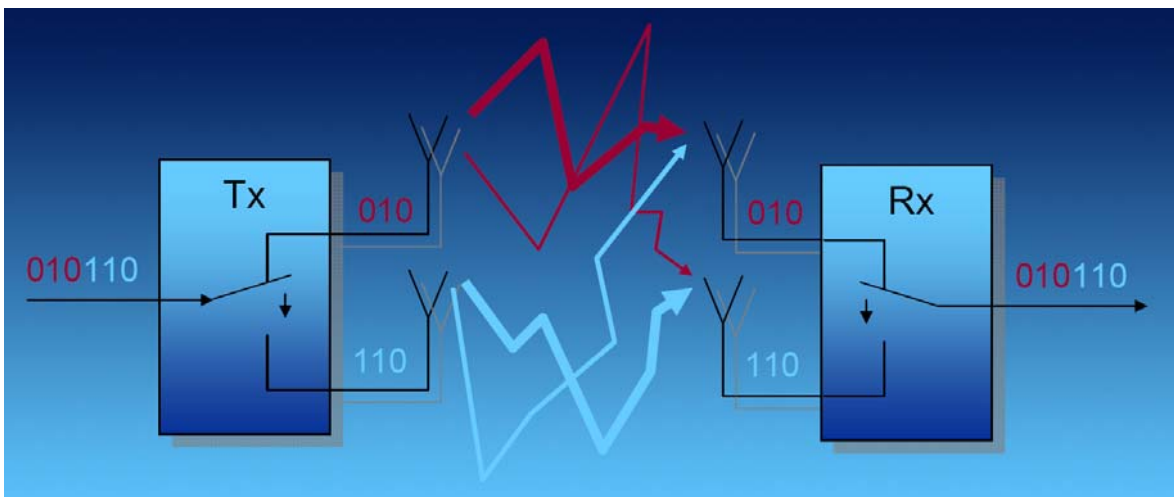
Slika 4.21. Konceptije uporabe više antena na odašiljačkoj i/ili prijamnoj strani radijskog sustava

U radijskom sustavu više se antena može koristiti i samo na jednoj strani, odašiljačkoj ili prijamnoj strani. Na Slici 4.21. je pregled svih mogućih situacija i odgovarajući nazivi sustava:

- SISO (*Single-Input Single-Output*) odgovara klasičnome radijskom sustavu koji koristi jednu antenu (ili antenski sustav) na odašiljačkoj strani i jednu antenu (ili antenski sustav) na prijamnoj strani,
- SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) obilježava uporaba jedne antene na odašiljačkoj i više antena na prijamnoj strani,
- MISO (*Multiple-Input Single-Output*) sustav koristi više antena na odašiljačkoj i jednu antenu na prijamnoj strani,

- MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), kao što je već rečeno, osniva se na uporabi više antena i na odašiljačkoj i na prijamnoj strani.

U radijskim sustavima koji nisu MIMO-vrste veza se ostvaruje putem više kanala na različitim frekvencijama npr. U MIMO-kanalu postoji više veza koje rade na istoj frekvenciji, ali se komunikacija obavlja preko različitih prostorno razmaknutih antena. Suštinska razlika između koncepta MIMO i koncepta prostornog diverzitija, koji također koristi prostorno razmaknute antene, je u tome da se u MIMO-sustavu preko različitih parova odašiljačko-prijamnih antena prenose različite informacije, dok se kod prostornog diverzitija, preko tih parova prenosi ista informacija i postupcima digitalne obrade signala (DSP) iz uzoraka višestruko primljenih signala restaurira se najbolji mogući prijamni signal.



Slika 4.22. Načelo rada MIMO-sustava

Načelo prijenosa informacija u MIMO-sustavu može se sažeti u nekoliko koraka:

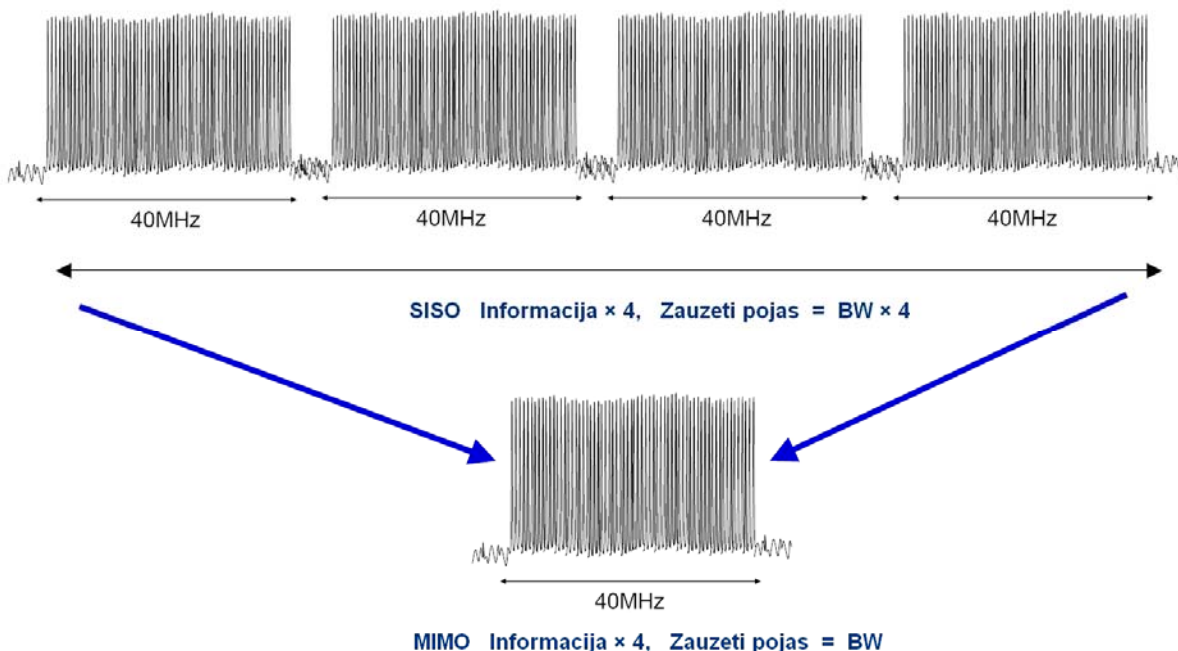
- na odašiljačkoj se strani digitalni signal veće brzine rastavlja se na više paralelnih signala manje brzine,
- svaka od paralelnih informacija (signal) prenosi se preko posebnog para antena,
- na prijamnoj se strani paralelni nizovi združuju dajući izvorišnu informaciju.



Slika 4.23. Primjer prijenosnog računala kao krajnje postaje MIMO-sustava (ističu se 4 antene)

MIMO-sustavi koriste se u svrhu povećanja propusnosti (brzine prijenosa) bez povećavanja zauzete širine pojasa ili drugim riječima povećanja spektralne učinkovitosti prijenosa. Taj se dobitak osniva na korištenju još i prostorne dimenzije, koja je do tad bila neiskorištena.

MIMO se osniva na načelu prostorno vremenske obrade signala u kojem je vrijeme (prirodna dimenzija digitalnih komunikacijskih sustava) nadopunjeno i prostornom dimenzijom i to korištenjem više međusobno prostorno razmaknutih antena.



Slika 4.24. MIMO sustav povećava spektralnu učinkovitost u ovisnosti od broja korištenih antena (na slici je prikazana idealizirana situacija)

MIMO-sustav poboljšava obilježja radijskog prijenosa po dvije osnove:

- *Prostorno multipleksiranje* koristi pojavu višestaznog širenja. Svaki od zasebnih putova u višestaznom širenju smatra se zasebnim kanalom te se različit signal odašilje paralelno preko više antena.
- *Diverziti postupak* povećava robusnost sustava i u tom smislu povećava odnos signal/šum, odnosno smanjuje učestalost pogreške (BER).

Uporaba više antena na odašiljačkoj i na prijamoj strani otvara više mogućnosti poboljšanja obilježja prijenosa:

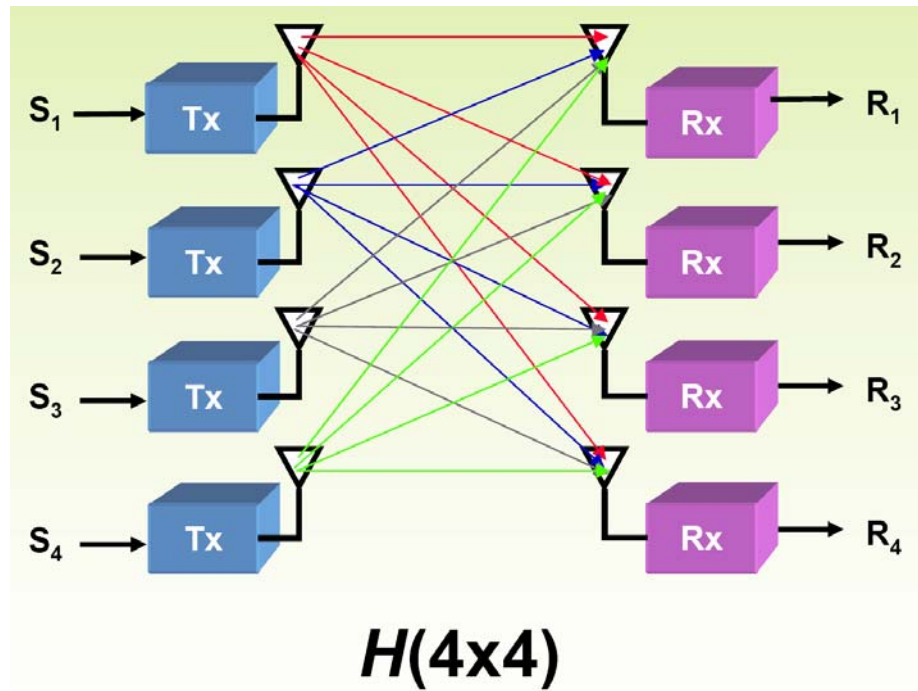
- Više antena na odašiljačkoj i na prijamoj strani može se iskoristiti za smanjenje slabljenja signala tj. fadinga i to dobitkom od diverzitija. Kanali, koji predstavljaju putove između različitih antena (antena koje nisu u paru s odašiljačkom antenom), trebali bi imati što manju korelaciju. To postavlja zahtjeve za prostornim razmakom antena u slučaju prostornog diverzitija ili pak korištenje antena s različitim polarizacijama.
- Više antena u sustavu može se iskoristiti za oblikovanje dijagrama prijama. Glavni se snop prijama može usmjeriti u određeni smjer, najčešće u smjeru korisnika, odnosno bazne postaje kad je najpovoljniji odnos signal/šum. Dobitak se osniva na potiskivanju signala iz neželjenih smjerova odnosno od neželjenih izvora.
- Uporaba više antena na odašiljačkoj i na prijamoj strani može se promatrati kao niz paralelnih i neovisnih kanala koji se koriste simultano.

4.2.2.2. Komunikacijski kanal MIMO-sustava

Model MIMO-kanala opisan je matricom \mathbf{H} koja povezuje komponente signala na odašiljačkoj strani s_i i komponente r_i na prijamoj strani komunikacijskog sustava.

$$\mathbf{R} = \mathbf{H} \times \mathbf{S} + \mathbf{N},$$

gdje su sa \mathbf{R} , \mathbf{S} i \mathbf{N} označeni vektori komponenti prijamnog signala, odašiljačkog signala i šuma.



Slika 4.25. Primjer modela komunikacijskog kanala

Za primjer MIMO-sustava sa Slike 4.25. (konfiguracija 4×4 , tj. 4 antene na Tx strani i 4 antene na Rx strani) to bi bilo,

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix}.$$

Izravne komponente, određene elementima na dijagonali matrice (h_{ii}) ukazuju na ravnomjernost kanala, dok neizravne komponente, određene elementima matrice vrste h_{ij} ukazuju na spregu među pojedinačnim kanalima u okviru MIMO-sustava. Elementi matrice \mathbf{H} određuju se uz pomoć ispitnog slijeda podataka (*training sequence*).

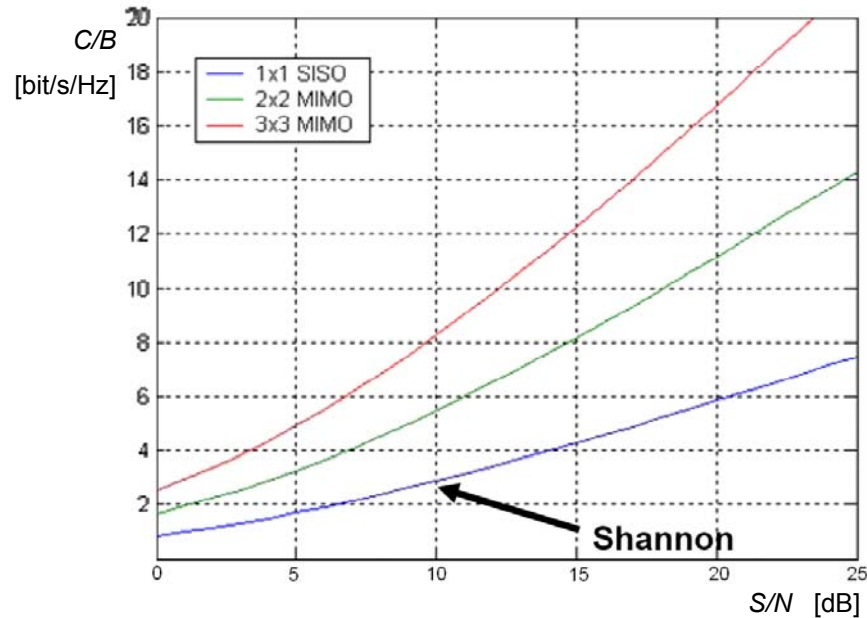
Kapacitet standardnoga (SISO) komunikacijskog kanala određen je poznatim Shannonovim izrazom,

$$C_{\text{SISO}} = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

koji pokazuje teorijski najvišu ostvarivu brzinu prijenosa, u bit/s, u kanalu širine pojasa B u kojem je ostvaren omjer signal/šum u iznosu S/N .

Kapacitet MIMO-kanala dopunski još ovisi i o broju prostornih tijekova podataka M ,

$$C_{\text{MIMO}} = M \times B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right).$$



Slika 4.26. Spektralna učinkovitost MIMO-prijenosa odgovara omjeru kapaciteta kanala i širine pojasa (C/B)

Kad je nesimetrični broj odašiljačkih i prijamnih antena tad je najveći broj prostornih tijekova podataka jednak broju antena na strani na kojoj je manje antena. Na primjer kod konfiguracije 5×3 može se realizirati najviše 3 prostorna tijeka podataka, ali na odašiljačkoj strani imamo i prostorni diverziti. Jednaki je broj prostornih tijekova podataka u konfiguraciji 3×5 s tim da je prostorni diverziti sad prisutan na prijamoj strani.

4.2.2.3. Prostorno multipleksiranje

Prostorno multipleksiranje (SMX, *Spatial Multiplexing*) je postupak koji najbolje odražava svojstva MIMO-sustava. Različiti se tokovi podataka istodobno prenose uz pomoć više antena. Ono nudi linearni porast kapaciteta sustava odnosno brzine prijenosa podataka. Pri ovakvom jednostavnom prijenosu teško je na prijamoj strani razlučiti pojedine tokove podataka, jer nastaju smetnje od tih višestrukih tokova (MTI, *Multi-Stream Interferences*). Te su smetnje razlogom zahtjeva za većim razmakom antena (po mogućnosti nekoliko valnih duljina).



Slika 4.27. Smetnje među paralelnim tokovima podataka postaju jako izražene kad je nedovoljni razmak između antena i kad signali različitih odašiljačkih antena dolaze na prijamnu antenu pod sličnim kutovima

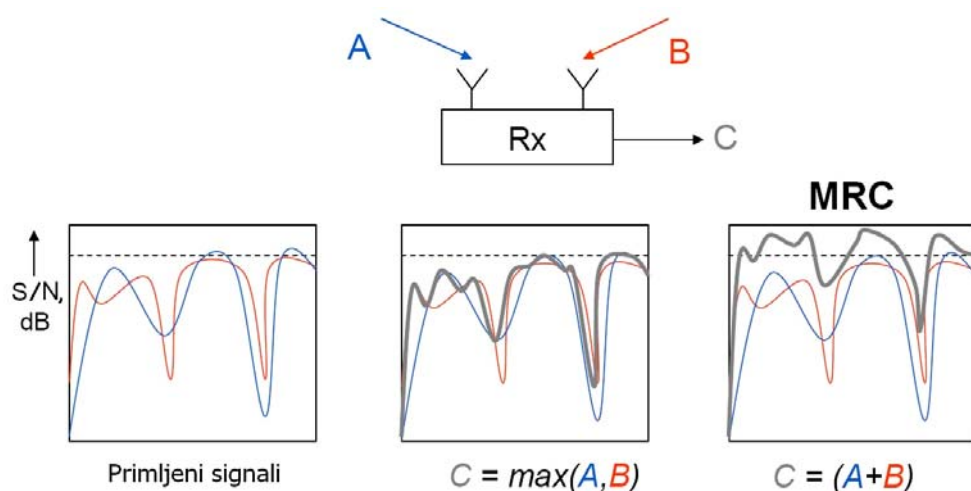
Nepovoljni učinci ove vrste smetnji smanjuju se uvođenjem vremenskih pomaka među paralelne tokove podataka uporabom tzv. prostorno-vremenskih kodova. Uz pomoć tih kodova nastaju ortogonalni, dakle, neovisni tokovi podataka. Zbog sličnosti s CDMA postupkom, koji se osniva na kodiranju signala uz pomoć ortogonalnih kodova, za postupak koji koristi prostorno-vremenske kodove u MIMO-sustavu susreće se³ i naziv prostorni CDMA (ECDMA, *Environmental CDMA*).

4.2.2.4. Prostorno-vremenski diverziti

Prostornim diverzitetom poboljšava se kvaliteta signala i postiže se viši omjer signala i šuma (S/N) odnosno energije po bitu u odnosu na gustoću snage šuma (E_b/N_0) na prijamnoj strani sustava. Diverzitet se osniva na prijenosu strukturirane zalihosti.

Dvije su vrste prostornog diverzitija,

- *prijamni (Rx) diverziti* – primljeni se signal višestruko vrednuje i konačni signal nastaje kombiniranjem signala iz više antena (npr. u konfiguraciji 1×2),
- *odašiljački (Tx) diverziti* – kopija signala odašilje se putem druge antene (npr. u konfiguraciji 2×1).



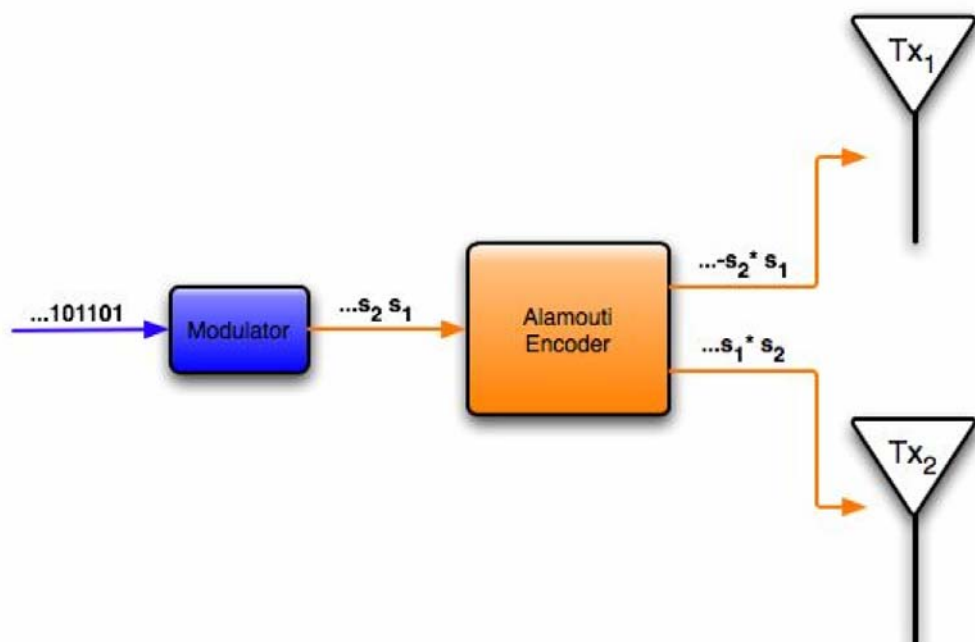
Slika 4.28. Nekoliko je algoritama kojima se dobiva konačni signal na temelju signala iz više prijamnih antena

Na Slici 4.28. su prikazana dva postupka kombiniranja signala dviju prijemnih antena. Najčešće se koristi tzv. MRC-postupak (*Maximum Ratio Combining*).

Za potrebe primjene odašiljačkog diverzitija nužna je kompletna informacija o komunikacijskom kanalu na strani odašiljača kako bi se odašiljački signal prilagodio uvjetima kanala. Uz pomoć prostorno-vremenskih kodova kombiniraju se prostorne i vremenske kopije signala. Kopija signala ne emitira se samo preko druge, prostorno razmaknute antene, nego i u drugom trenutku. Uz prostorni dodaje se onda i tzv. vremenski diverziti.

Prostorno-vremenski kodovi dijele se na dvije skupine,

- *vremensko-prostorni blokovski kodovi (STBC, Space-Time Block Code)* i,
- *vremensko-prostorni rešetkasti kodovi (STTC, Space-Time Trellis Code),*



Slika 4.29. Alamoutijev princip kodiranja

Za situacije s dvije odašiljačke i jednom prijamnom antenom koristi se tzv. Alamoutijev prostorno vremenski kod koji pripada skupini blokovskih kodova. Bitovi informacije obavljaju modulaciju koristeći jednu od M -PSK metoda. Tako nastaju simboli moduliranog signala s_1 i s_2 . U prvom se intervalu odašiljanja emitiraju simboli: s_1 preko antene 1 i s_2 preko antene 2, dok se u drugom intervalu odašiljanja emitiraju: $-s_2^*$ i s_1^* preko antene 1 odnosno 2. Emitiranje se, dakle, obavlja preko dvije prostorno razmaknute antene i u dva vremenski razmaknuta intervala što ukazuje da se radi o prostorno-vremenskom postupku.

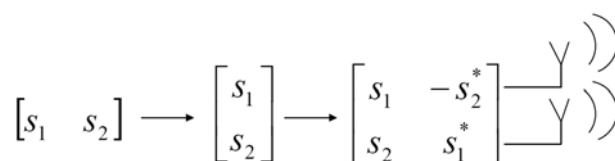
Funkciju Alamoutijevog koda opisuje matrica,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}.$$

Stupci matrice \mathbf{S} prikazuju simbole moduliranog signala koji se emitiraju u dva odašiljačka intervala, dok se simboli u pojedinom retku emitiraju preko pojedine antene. Simbolom * označena je konjugirano kompleksna vrijednost.

Na slici je ilustrirana funkcija Alamoutijevog koda i odgovarajuća matrica koda. Sljedovi, koji se odašilju, su ortogonalni jer je,

$$s_1 \cdot s_2 - s_2^* \cdot s_1^* = 0.$$



Slika 4.30. Matematički opis postupka Alamoutijevog kodiranja

Za situacije s više od dvije odašiljačke antene koriste se razni pseudo-Alamoutijevi kodovi. Sa \mathbf{S}_{42} označena je matrica koda za 4 odašiljačke antene.

$$\mathbf{S}_{42} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \\ s_3 & s_4^* \\ s_4 & s_3^* \end{bmatrix}.$$

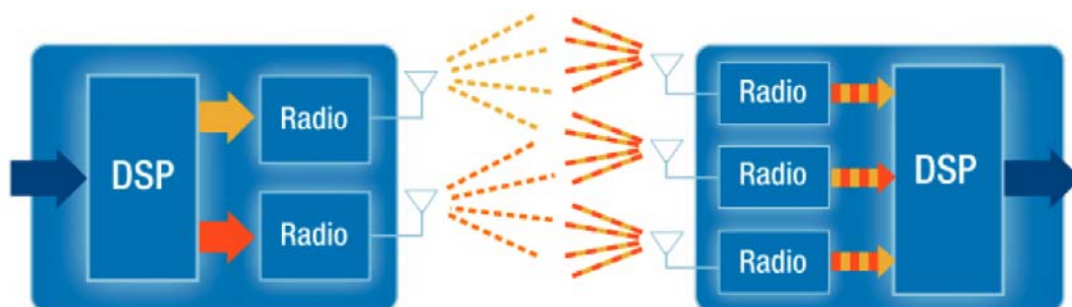
Vremensko-prostorni blokovski kodovi ne zahtijevaju složene sklopove za detekciju, dovoljna je klasična linearna detekcija kao što je postupak najveće vjerojatnosti odnosno sličnosti (ML, *Maximum Likelihood*). Glavni uvjet, koji mora biti zadovoljen pri primjeni STBC, je međusobna neovisnost odašiljačkih simbola i posjedovanje informacije o kanalu na strani prijammika, što nije uvijek ostvarivo. Osnovni nedostatak blokovskih u odnosu na rešetkaste kodove što blokovski kodovi nemaju dobitak kodiranja, već samo dobitak uslijed diverzitija.

Rešetkasti (*trellis*) kodovi ostvaruju i dobitak kodiranja, ali uz cijenu nešto kompliciranije detekcije, nužno je koristiti Viterbijev dekođer na prijamu.

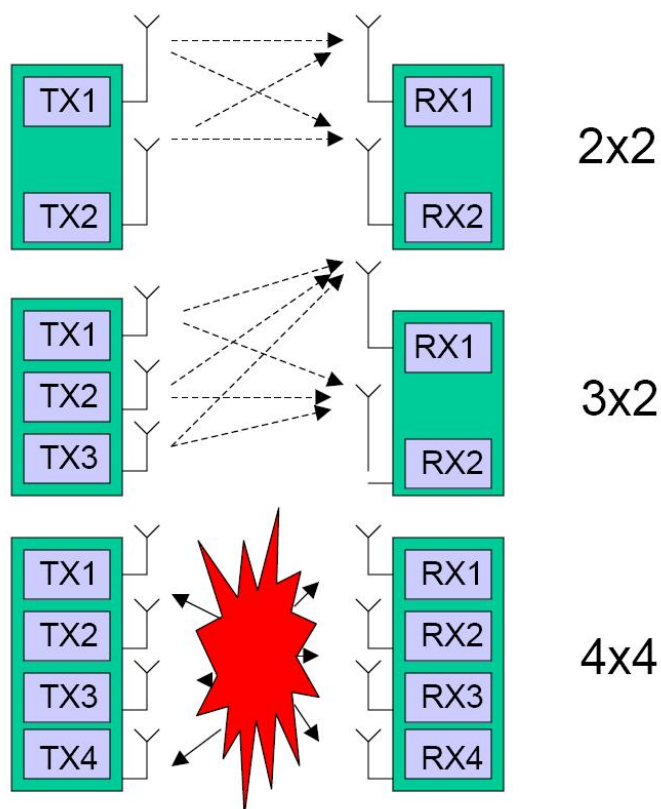
4.2.2.5. Temeljne jedinice MIMO-sustava

Prema dosadašnjem prikazu je razvidno da je na odašiljačkoj strani potrebno obaviti preslikavanje bitova informacije u kompleksne

simbole moduliranog signala, pretvorbu serijskog tijeka simbola u nekoliko paralelnih tijekova i u konačnici se provodi prostorno vremensko kodiranje. Sve ove operacije obavlja jedinica za digitalnu obradu signala DSP. Paralelni tijekovi kodiranih simbola obrađuju se u odgovarajućima radijskim jedinicama u cilju njihove prilagodbe za radijski prijenos koji se obavlja privođenjem radijskih signala odgovarajućem skupu odašiljačkih antena. U okviru raspoloživih odašiljačkih antena kombiniraju se prostorno multipleksiranje (broj paralelnih tokova podataka) i odašiljački prostorno-vremenski diverziti.



Slika 4.31. Sastavne jedinice MIMO-sustava



Slika 4.32. Nekoliko primjera konfiguracija MIMO-sustava

Na prijamoj se strani također kombinira na odašiljaču određeno prostorno multipleksiranje s prijavnim diverzitetom. Nakon radijske obrade prijavnih signala pojedinih antena, jedinica za digitalnu obradu signala u prijavniku obavlja operacije koje su inverzne onima u odašiljaču tj. dekodiranje, pretvorba u serijski slijed, demodulacija.



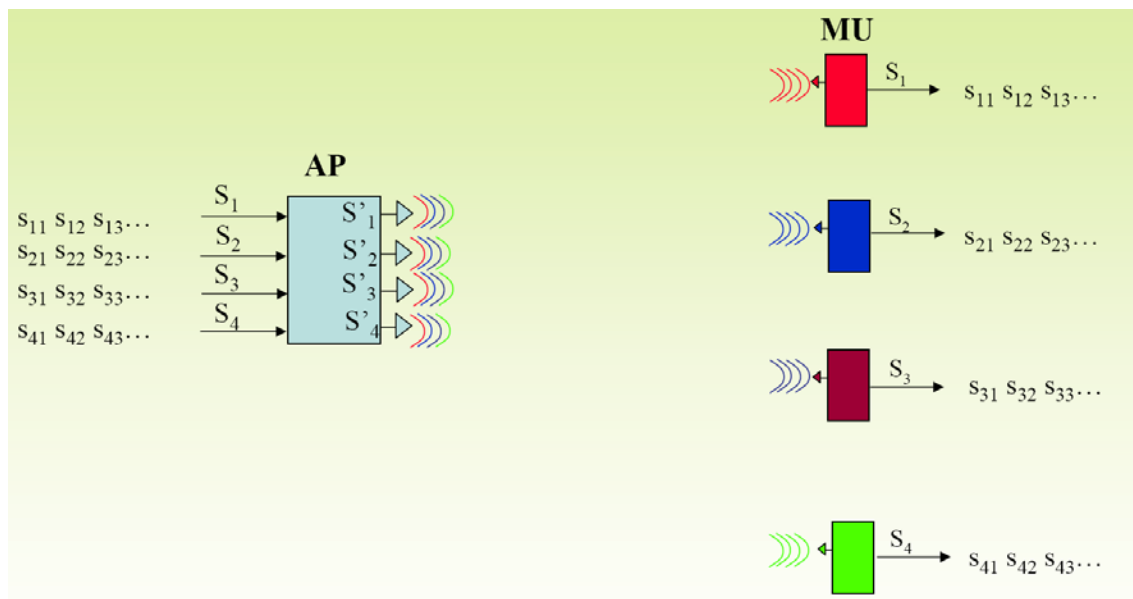
Slika 4.33. Primjeri radijskih uređaja za MIMO

4.2.2.6. MIMO u višekorisničkoj okolini

Višekorisnički MIMO (MU-MIMO, *Multi-User MIMO*) predstavlja skup naprednih MIMO-tehnologija koje iskorištavaju raspoloživost neovisnih radijskih terminala u cilju poboljšanja komunikacijskih sposobnosti pojedinog terminala. MU-MIMO usko je spregnut s SDMA koji omogućuje komunikaciju s više korisnika u istome frekvencijskom pojasu. MU-MIMO može se promatrati kao proširenje MIMO na jednu vrstu strategije višestrukog pristupa. Uz raspodjelu po frekvenciji, vremenu ili kodu dodaje se i raspodjela po prostoru. Dodavanje nove, prostorne dimenzije u razdvajanju korisnika, omogućuje agresivnije planiranje ponovnog korištenja iste frekvencije, a što je osnova povećanog kapaciteta cijeloga sustava.

MU-MIMO može više korisnika prihvatiti kao prostorno raspodijeljene prijenosne resurse uz nešto višu cijenu obrade signala. MU-MIMO može se razdvojiti u dvije kategorije,

- MIMO-kanal za razošiljanje (MIMO BC, *MIMO Broadcast Channel*), koji se koristi u silaznoj vezi i,
- MIMO-kanale za višestruki pristup (MIMO MAC, *MIMO Multiple Access Channels*), koji se koriste u uzlaznoj vezi.

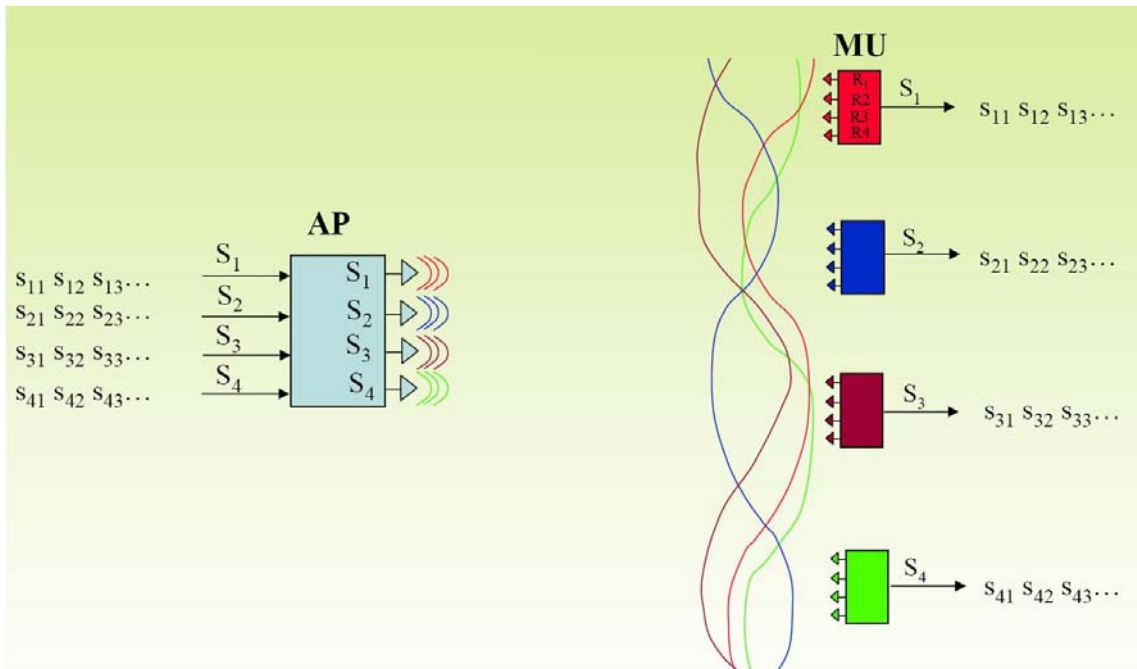


Slika 4.34. MIMO BC silazna veza, AP – pristupna točka (Access Point), MU – pokretna jedinica (Mobile Unit)

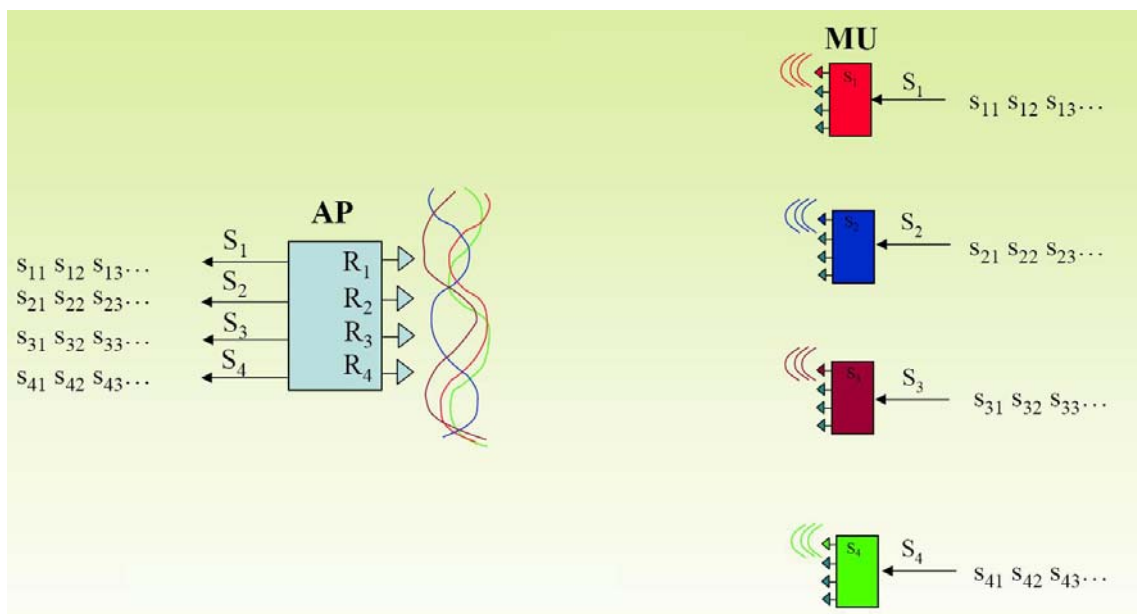
U MIMO BC silaznoj vezi jedan odašiljač zrači prema više prijammnika. Na temelju poznavanja stanja kanala prema pojedinom korisniku na strani odašiljača (CSIT, *Channel State Information Transmitter*) obavlja se oblikovanje snopa zračenja (predkodiranje). MIMO BC sustavi pokazuju svoje prednosti posebice u situacijama kad je broj antena na odašiljačkoj strani, na strani pristupne točke AP ili bazne postaje BS veći od broja antena kod pojedinog korisnika, tj. na prijamnoj strani odnosno na strani pokretne jedinice MU npr. Pokretna jedinica često ima samo jednu antenu.

U MIMO MAC uzlaznoj vezi više je odašiljača, a samo jedan prijammnik u radijskom sustavu i to onaj u pristupnoj točki. Naprednim postupcima postiže se istodobno potiskivanje smetnji i raspoređivanje korisnika u uzlaznoj vezi po načelima prostornog multipleksa. Za provođenje naprednih metoda obrade prijammnik mora imati informaciju o stanju komunikacijskog kanala (CSIR, *Channel State Information Receiver*), što je općenito lakše provedivo od CSIT. CSIR samo troši kapacitete uzlazne veze za prijenos pilotskih signala od svakog korisnika do pristupne točke.

Pokretni terminali često su neprikladni za smještaj većeg broja antena u cilju realizacije potpunoga MIMO-sustava. To se pokazuje ograničavajućim faktorom u iskorištavanju mogućnosti MIMO-mreže. Zbog toga se formira prividni antenski sustav kojeg čine antene više pokretnih jedinica. Rad pojedinih antena ovakvoga antenskog sustava, koji je raspodijeljen na više korisničkih terminala, mora biti koordiniran odnosno one moraju raditi u suradnji jedna s drugom. Odgovarajući MIMO naziva se onda kooperativnim MIMO-sustavom (CO-MIMO, *Cooperative MIMO*).



Slika 4.35. Silazna veza s raspodijeljenim MIMO-antenskim sustavom na korisničkoj strani

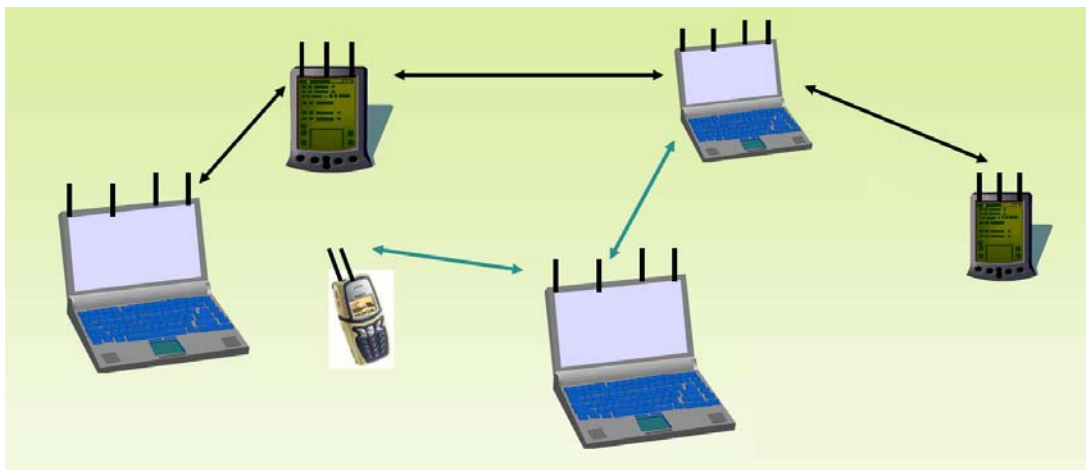


Slika 4.36. Uzlazna veza s raspodijeljenim MIMO-antenskim sustavom na korisničkoj strani

Antenski sustav, raspodijeljen na susjedne radijske terminale, može poslužiti za:

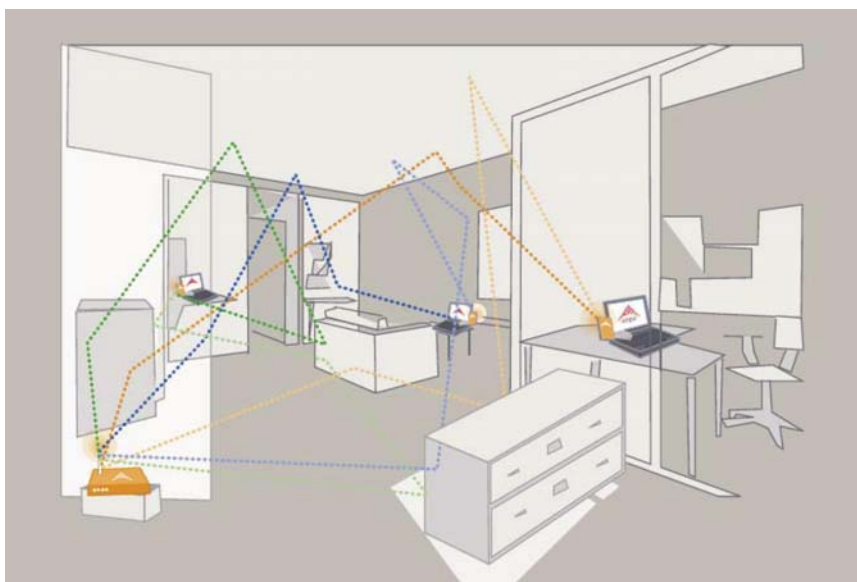
- kooperativni diverziti,
- kooperativni MIMO.

Princip raspodijeljenih antena može se koristiti za formiranje relejne postaje u ad-hoc mrežama npr. Jedna ili više postaja onda služe kao relejne postaje u povezivanju korisničkih uređaja bez posredovanja pristupne točke odnosno bazne postaje. Time se povećava dometa mreže bez potrebe za bilo kakvom infrastrukturom.



Slika 4.37. U kooperativnoj ad-hoc mreži korisnici se mogu povezivati uz pomoć postaja drugih korisnika kao releja

MIMO predstavlja učinkovito rješenje za povezivanje više terminalnih uređaja s jednom pristupnom točkom u stanu npr. Primjer na slici pokazuje komunikacijske kanale kad se uređaji nalaze na raznim mjestima u stanu.



Slika 4.38. Korištenjem komunikacijskih kanala nastalih višestrukim prostiranjem učinkovito se povezuju terminalni uređaji u jednom stanu sa samo jednom pristupnom točkom.

4.3. Poništavanje smetnji

Postupci poništavanja smetnji (IC, *Interference Cancellation*) imaju potencijal omogućiti poboljšanja u učinkovitosti iskorištenja spektra u sustavima gdje je uporaba istog kanala moguća na zemljopisno udaljenim lokacijama. U takvim sustavima, IC omogućava smanjenje udaljenosti između odašiljača koji rade na istoj frekvenciji. Taj potencijal uključuje široki raspon radijskih sustava (ćelijski sustavi, fiksne veze, radiodifuzijski sustavi i satelitske komunikacije). Međutim, tehnička i komercijalna ograničenja mogu utjecati na to da se u nekim sustavima postupci poništavanja smetnji ne mogu primijeniti.

Postupci poništavanja smetnji su bilo koji postupak ili kombinacija postupaka koja omogućava postojećem prijamniku rad uz više razine istokanalne smetnje. Izvedbom prijamnika, kojom se dopušta rad s višom istokanalnom smetnjom, povećava se spektralna učinkovitost sustava omogućavajući gušću zemljopisnu uporabu iste frekvencije. Opće načelo je da komunikacijski sustav mora biti projektiran tako da na prvom mjestu izbjegava smetnju (planiranjem mreže ili učinkovitim upravljanjem radijskim resursima te kontrolom pristupa mediju). Kako bi se udovoljilo povećanim zahtjevima za radijskim spektrom, potrebna je njegova učinkovitija uporaba s obzirom da strogi zahtjevi na razinu smetnje mogu u nekim sustavima uzrokovati potrebu za velikim udaljenostima između odašiljača koji rade na istoj frekvenciji. Ako IC može omogućiti prijamniku rad s višim razinama smetnje, postoji potencijal za poboljšanje spektralne učinkovitosti. Nadalje, povećani broj dozvola za određeni dio spektara, gdje je smetnja neizbježna, znači da radijski sustav ne mora samo izbjegavati smetnju nego mora i ublažiti učinak njene prisutnosti. Problem je u tome da strategije za ublažavanje učinka smetnje ovise o izvoru smetnje i povezanošću sa željenim signalom. Uporaba postupaka IC može sustav učiniti pouzdanijim, što se može postići ili projektiranjem ili umetanjem dodatne obrade signala u postojeće sustave.

Postupci IC dugo se primjenjuju u radijskim sustavima u zajednici s prilagodljivim antenskim nizovima (*adaptive arrays*), primarno u vojnim primjenama, ali i u nekim civilnim primjenama. Prilagodljivi antenski nizovi iskorištavaju prostornu odvojenost željenog i smetajućeg signala kako bi prostorno filtrirali ili neutralizirali smetajuće signale. U nekim primjenama je uporaba antenskih nizova nepogodna, npr. u mobilnim uređajima, te su osmišljene preinake detekcijskim postupcima koji omogućavaju IC koristeći jednu antenu. Nedavno su predstavljeni postupci SAIC (*Single Antenna Interference Cancellation*) za GSM sustave, gdje preinačeni uređaji mogu raditi s nižim razinama signala u odnosu

na smetnju, dopuštajući češće ponavljanje frekvencija i time veću spektralnu učinkovitost.

4.3.1. Postupci poništavanja smetnje

Gotovo svi postupci IC predviđaju potrebne karakteristike željenog signala i smetajućih signala. Mnogi postupci IC iskorištavaju razlike u karakteristikama željenog i smetajućeg signala omogućavajući njihovo odvajanje. Razlike su od širine pojasa signala do kuta dolaska signala. Često se koriste višestruke prijamne antene, gdje razlike u kutu upada željenog i smetajućih signala omogućavaju poništavanje. Postupci s uporabom jedne antene također su mogući, ali u tom se slučaju ne može koristiti kut upada za razlikovanje već se koriste druge razlike između željenog i smetajućih signala, poput širine pojasa, vrste modulacije ili amplitude.

Postoji nekoliko vrsta postupaka IC:

- postupci temeljeni na filtriranju (*filter based*),
- transformacijski postupci (*transform methods*),
- zajednička detekcija / višekorisnička detekcija (*joint detection / multi-user detection*),
- periodičnost statističkih svojstava (*cyclostationarity*),
- neuronske mreže (*neural networks*),
- statistika višeg reda i odvajanje izvora (*higher order statistics and source separation*),
- prostorna obrada (*spatial processing*) te,
- analogne tehnike (*analogue techniques*).

4.3.1.1. Postupci temeljeni na filtriranju

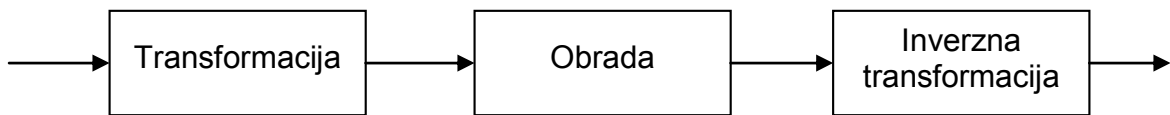
Postupci temeljeni na filtriranju oblikuju filter koji osigurava željenu frekvencijsku karakteristiku. Mogući su linearni i nelinearni filteri. Optimalni filter temelji se na prethodnom znanju o spektru željenog i smetajućeg signala. Filter pojačava spektralna područja s visokim omjerom signal/šum (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*), a potiskuje područja s niskim omjerom SNR.

4.3.1.2. Transformacijski postupci

Signal se može analizirati i obrađivati rastavljanjem na komponente u frekvencijskom području. Za neke operacije obrada u frekvencijskom području može biti učinkovitija. Uz Fourierovu transformaciju, postoji još niz drugih transformacijskih postupaka, pri čemu svaki postupak ima svoje prednosti.

Postupci rastavljanja signala mogu se podijeliti u nekoliko kategorija: transformacija blokova, banke filtera (*filter banks*) i analiza pomoću *waveleta*.

U transformacijskom području provodi se potrebna obrada za poništavanje smetnje. Iako postoji niz različitih transformacija, koncept uporabe transformacije za poništavanje smetnje je jednak, Slika 4.39. Transformacija odvaja željene i smetajuće signale tako da odbacivanjem podskupa transformacijskih komponenata ostavlja ili željene ili smetajuće signale uz minimalno izobličenje. Inverzna transformacija zadržava ili željeni signal ili smetajući signal koji se zatim može izdvojiti iz primljenog signala. Proces se uobičajeno naziva izrezivanje (*excision*), a poništavanje smetnje postiže se kombinacijom transformacije i procesa izrezivanja.



Slika 4.39. Obrada signala u transformacijskom području

4.3.1.3. Zajednička detekcija / višekorisnička detekcija

Transformacijski postupci i postupci primjene filtriranja neučinkoviti su kada su željeni i smetajući signal iste vrste. U takvim situacijama potrebni su alternativni postupci za utvrđivanje razlika u karakteristikama. Moguće je zajednički detektirati željeni i smetajući signal, što rezultira poboljšanom izvedbom za željeni signal. Primjer je korištenje neovisnosti između impulsnog odziva kanala (*channel impulse responses*), no ona se ne može uvijek jamčiti. Češće se svakom korisniku dodjeljuje jedinstveni valni oblik (*unique signature waveform*) kako bi se olakšalo odvajanje signala. Na taj je način u sustavima CDMA omogućeno dijeljenje istog spektra različitim korisnicima.

Radi povećanja djelotvornosti koristi se obrada signala u prijammiku, koja iskorištava karakteristike smetajućih signala, a takav se postupak naziva zajednička detekcija. Zajednička detekcija, koja se često naziva i višekorisnička detekcija, može se primijeniti u sustavima TDMA s jednim nosiocem ili u sustavima CDMA s proširenim spektrom ili u sustavima OFDM.

Osnovni problem višekorisničke detekcije je pronalaženje individualnih signala u kodiranom multipleksu. Učinkovitost obrade signala u prijammiku ovisi o ortogonalnosti sljedova.

4.3.1.4. Periodičnost statističkih svojstava

Statistika stacionarnog signala je konstantna u vremenu. Ciklostacionarni (*cyclostationary*) signal ima periodična statistička svojstva. Signal je ciklostacionaran reda n ako i samo ako postoji nelinearna transformacija n -tog reda koja generira sinusne komponente konačne snage koje rezultiraju spektralnim linijama.

Korištenje ciklostacionarne teorije u proučavanju komunikacijskih signala pruža mnoge mogućnosti uz one koje pruža teorija stacionarnog procesa. Mogućnosti uključuju sljedeće:

- Značajke signala diskretno su raspodijeljene u cikličkoj frekvenciji, čak i ako signal ima kontinuirani spektar snage. Signali s preklapajućim značajkama u spektru snage mogu imati nepreklapajuće značajke u cikličkom spektru.
- Pozadinski šum nema značajki u cikličkim frekvencijama različitim od nule. Prema tome, analiziranje cikličkog spektra u cikličkim frekvencijama različitim od nule, gdje se očekuje pojava značajke signala, pokazat će tu značajku bez komponenti uzrokovanih pozadinskim šumom.
- Teorijska analiza željenog signala može odrediti područja cikličkog spektra gdje se ne pojavljuju značajke tog signala. Sve značajke koje se pojave u tom području uzrokovane su smetnjom.
- Frekvencija nosioca, brzina prijenosa i fazni pomak mogu se izmjeriti iz cikličkog spektra.

Sa svim navedenim mogućnostima, ciklički spektar je potpuniji alat za analizu signala u odnosu na alate temeljene isključivo na spektru snage. Ciklička spektralna analiza otvara vrata novim načinima odvajanja signala na temelju vremena i faze, ali i cikličke frekvencije.

4.3.1.5. Neuronske mreže

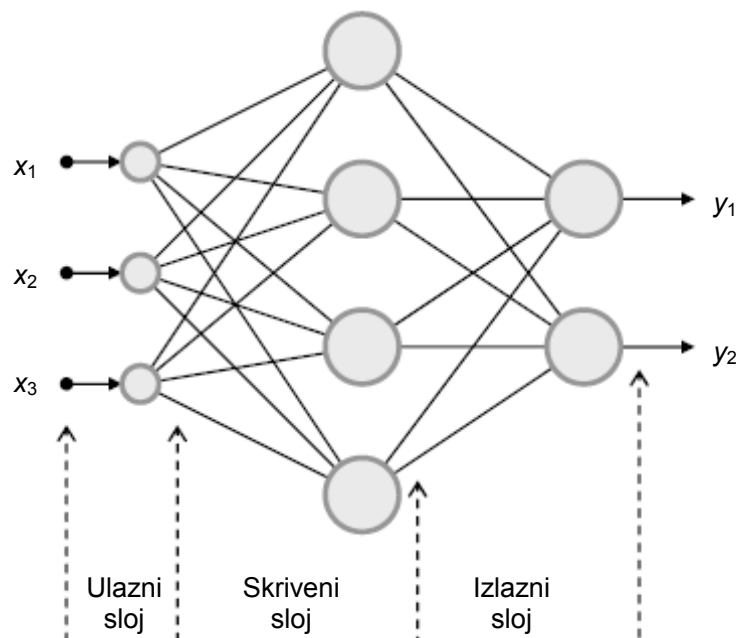
Multipliciranje matrice, koje karakterizira linearnu digitalnu obradu signala, korisno je za prikazivanje linearnih operacija. Druge strukture potrebne su za modeliranje općenitijih funkcija. Klasa struktura, koja je uspješno primijenjena na neke nelinearne probleme, uključujući IC, je klasa neuronskih mreža. Uporaba neuronskih mreža u obradi signala potaknuta je sljedećim osobinama:

- Nelinearnost – ovo svojstvo neuronskih mreža omogućava modeliranje velikog broja karakteristika i posebice je korisno ako je nelinearan mehanizam koji generira ulaz.
- Učenje – neuronska mreža ima ugrađenu sposobnost učenja od svog okruženja kako bi uredila ili podesila svoje parametre.

- Slabe statističke pretpostavke – projektiranje neuronskih mreža zasniva se na pribavljanju podataka za učenje zajedno sa željenim odzivima. Stoga je mreža sposobna prepoznati statističku karakteristiku okruženja u kojem radi, pod pretpostavkom da je okruženje dovoljno složeno te da je dostupan reprezentativni uzorak za treniranje sustava.

Sposobnost neuronske mreže da modelira nelinearne funkcije određena je tzv. univerzalnim aproksimacijskim teoremom koji u osnovi govori da se kontinuirano pridruživanje (*mapping*) može aproksimirati neuronskom mrežom do proizvoljne točnosti. Iz tog se razloga neuronska mreža ponekad naziva i univerzalni aproksimator. Linearne funkcije geometrijski su opisane linijama, ravninama i hiper-ravninama te se linearni sustav može nazvati linearni aproksimator. Univerzalni aproksimator geometrijski odgovara neprekinutim krivuljama, površinama i hiper-površinama.

Neuronska mreža sastavljena je od međusobno spojenih jedinica za obradu, tzv. čvorova ili neurona. Slika 4.40. prikazuje jednostavan primjer s tri ulazna čvora (*input nodes*): x_1 , x_2 i x_3 , četiri sakrivena čvora (*hidden nodes*) i dva izlazna čvora (*output nodes*): y_1 i y_2 . Kao što dijagram pokazuje, čvorovi su strukturirani u slojeve pri čemu je svaki čvor sinapsom povezan sa sljedećim čvorom. Uvijek moraju postojati ulazni i izlazni slojevi. Nadalje, može postojati jedan ili više skrivenih slojeva koje nemaju izravnu vezu s bilo kojim elementom izvan mreže. Neuronske mreže s jednim ili više skrivenih slojeva nazivaju se višeslojni perceptroni (*multilayer perceptrons*).



Slika 4.40. Primjer jednostavne neuronske mreže

S iznimkom ulaznog sloja, koji služi samo za distribuciju signala čvorovima u skrivenoj razini, svaki neuron na Slici 4.40. obrađuje ulazne signale kako bi proizveo izlazni signal. Te jedinice za obradu signala nazivaju se računalni neuroni (*computational neurons*) kako bi se razlikovali od ostalih čvorova koji većinom provode usmjeravanje signala.

4.3.1.6. Statistika višeg reda i odvajanje izvora

Mnogi algoritmi za obradu signala temelje se na teoriji stacionarnih slučajnih procesa. Teorija uključuje samo srednje vrijednosti i kovarijance, tj. statistiku prvog i drugog reda. Unošenjem statistike višeg reda (više od drugog), mogu se razvijati novi algoritmi sa sposobnostima koje nisu moguće u okviru stacionarnih slučajnih procesa.

Statistika višeg reda iskorištena je u nekoliko algoritama za odvajanje signala (odvajanje izvora je sinonim u literaturi). Takvi algoritmi obnavljaju individualne signale i stoga imaju primjenu za poništavanje smetnje te služe i protiv ometanja radijskog prijama.

4.3.1.7. Prostorna obrada

Prilagodljivi antenski nizovi (*adaptive antenna arrays*) dugo se koriste za poništavanje smetnje posebice kada je smetajući signal prostorno odvojen od željenog signala. Najviše su se koristili u vojnim primjenama gdje je često vrlo visoka razina ometajućeg signala. U civilne svrhe rjeđe su korišteni prilagodljivi antenski nizovi za poništavanje smetnje. Mnogi se algoritmi za svoj rad oslanjaju na više antenskih elemenata ili se mogu proširiti na uporabu više antenskih elemenata kako bi osigurali poboljšanu izvedbu.

4.3.1.8. Analogne tehnike

Digitalni postupci IC pružaju visoki stupanj fleksibilnosti i adaptacije na okoliš. Ako se RF ulazni dio (*front-end*) ponaša nelinearno zbog prisutnosti velike količine smetajućih signala, tad se rezultirajuće izobličenje ne može ukloniti kasnijom obradom signala. Stoga se mora razmotriti sposobnost uklanjanja smetnje prije A/D pretvorbe. U praksi, kombinacija analogne i digitalne obrade signala može ponuditi kombinaciju fleksibilnosti i izvedbe.

4.3.2. Primjene poništavanja smetnje

Sustavi koji imaju veliku korist uporabom postupaka poništavanja smetnje ukratko su opisani u nastavku ovog poglavlja.

4.3.2.1. Evolucija sustava GSM

Prijelaz sa sustava GSM na mreže treće generacije (3G) provest će se u dužem vremenskom razdoblju od nekoliko godina. Taj se prijelaz može usporediti s prijelazom iz analogne na digitalnu televiziju. Načelo omogućavanja dijeljenja istog spektra za sustav GSM i mreže 3G (pri čemu je GSM primarni korisnik) može pomoći oko problema potpunog prijelaza, a bilo koji postupak koji će pomoći u tom procesu ima veliku ekonomsku isplativost. Primjena poništavanja smetajućih GSM signala u UMTS prijammniku tehnički je izvediva i može se iskoristiti u UMTS opremi koja radi u GSM frekvencijskim pojasevima. Umjesto postizanja određenog spektralnog dobitka potreba je zadržati korištenje trenutnih GSM frekvencijskih pojaseva tijekom prijelaznog razdoblja.

4.3.2.2. Čelijski GSM/GSM

Alternativni pristup prethodnom scenariju je poboljšanje spektralne učinkovitosti GSM-a korištenjem GSM IC postupaka u samim GSM prijammnicima. Smanjenjem prometa za GSM usluge, manje spektra će koristiti sustav GSM, omogućavajući uslugama 3G progresivno zauzimanje postojećeg GSM spektra. Taj je pristup tehnički ostvariv i može značiti ekonomsku korist, ali se tu pojavljuju i određeni pravni problemi. Za povećanje spektralne učinkovitosti veliki broj prijammnika mora imati dodatnu mogućnost za IC, što je ekonomski neprihvatljivo za operatore.

4.3.2.3. Širokopojasni fiksni radijski pristup

Operatori nameću potrebu za uvođenjem IC u sustavima širokopojasnoga fiksnog radijskog pristupa (BFWA, *Broadband Fixed Wireless Access*), što je od posebnog interesa ako se primijeni u IEEE 802.16 prijammnicima. Ponovna uporaba iste frekvencije određuje razinu smetnje između ćelija ograničavajući kapacitete. Pojedinačni korisnici mogu zbog svoje statične prirode biti ograničeni smetnjom i imati slabu uslugu. IC će smanjiti potrebnu koordinaciju između operatora te će ujedno smanjiti i troškove. U ovom je slučaju IC tehnički izvedivo, ali postoje manji pravni problemi. Spektralni dobici su značajni ako je moguća ponovna uporaba iste frekvencije.

4.3.2.4. Fiksna veza

Potrebni omjeri željenih i neželjenih signala korišteni u dodjeljivanju frekvencija unutar radijskih sustava s optičkom vidljivošću (LOS, *Line of Sight*) veliki su te ih je moguće smanjiti korištenjem IC, čime se postiže smanjenje udaljenosti između linkova koji rade na istoj frekvenciji. Međutim, postoje poteškoće s retrogradnim uvođenjem IC zbog potrebnog vremena zastoja veze s

ugovorenom dostupnošću. Postoje mogućnosti uvođenja IC opreme u nove frekvencijske pojaseve ili na mjesta gdje se uvodi nova oprema u postojeće prenapučene frekvencijske pojaseve. Fiksni linkovi osiguravaju sporednu vezu prema ćelijskoj infrastrukturi pa proširenje u te mreže, s razvojem 3G usluga, može postaviti dodatne zahtjeve na spektar za fiksne usluge ili pak povećati pritisak na postojeće frekvencijske pojaseve.

4.3.2.5. Radarski sustavi

Radarski sustavi koriste značajnu količinu spektra u području od 1 do 10 GHz. Kad bi se oslobodilo nešto od tog spektra za druge usluge ili pak dozvolilo dijeljenje spektra, mogla bi se značajno povećati iskoristivost spektra, što bi rezultiralo značajnim dobitima. Tehnička izvedivost IC u radarskim sustavima još nije potpuno jasna te postoje značajna pravna pitanja. Poboljšanja u spektralnoj učinkovitosti radarskih sustava mogla bi se ostvariti kroz poboljšanja u izvedbi valnih oblika ili putem filtriranja postojećih signala kako bi se smanjilo zračenje izvan definiranoga frekvencijskog pojasa. Stoga zaštitni pojasevi mogu ponuditi kratkotrajno alternativno rješenje za radarske sustave.

4.3.2.6. WLAN

Prednost IC u WLAN prijamnicima ograničena je na prevladavanje problema tzv. skrivenog terminala (*'Hidden Terminal' Problem*), zbog načina na koji radi komunikacijski protokol. To je od koristi u WLAN sustavima s infrastrukturom sličnom ćelijskim sustavima, ali je njegov utjecaj na kapacitet sustava ograničen zbog pravnih problema. Nadalje, uporaba velikog broja različitih radijskih sustava unutar trenutnih WLAN frekvencijskih pojaseva znači da bi IC istodobno trebao moći djelovati na više oblika smetnje pa je on stoga potencijalno neizvediv.

4.3.2.7. Radiodifuzija

Mogu se razmatrati četiri odvojena scenarija u radiodifuziji: prijelaz analogno/digitalno, smetnja na rubnim područjima (*cross-border*), primjene u sustavima DVB-T te u sustavima DVB-H. Najviše obećava uporaba IC u korištenju istih kanala u DVB-T mrežama. Iako bi to moglo zahtijevati retrogradno smještanje IC opreme u prijamnike, smatra se da je to dovoljno učiniti na malom broju lokacija (na rubu pokrivanja) za postizanje određene koristi. Također, IC može potencijalno poboljšati spektralnu učinkovitost u sustavima DVB-H, omogućavajući češće ponavljanje frekvencija uz značajnu ekonomsku korist.

4.4. UWB mreže

UWB (*Ultra WideBand*) je tehnologija za prijenos informacija koja koristi tehniku raspršivanja energije radijskog signala unutar vrlo širokog frekvencijskog pojasa, s vrlo niskom spektralnom gustoćom snage. Niska gustoća snage emisije smanjuje mogućnost smetnje u ostalima radijskim sustavima, a velika širina pojasa može omogućiti prijenos podataka vrlo velikim brzinama.

Širokopojasne UWB komunikacijske tehnike pobudile su zadnjih nekoliko godina veliki interes kako u akademskoj zajednici tako i u industriji, prije svega za primjene u mobilnim sustavima kratkog dometa. Razlog tomu su potencijalne prednosti UWB prijenosa kao što su:

- niska snaga emisije,
- velika propusnost,
- imunitet na probleme višestaznog širenja signala što osigurava primjenu u nepovoljnim okruženjima,
- velika točnost određivanja položaja,
- razlikovanje karakteristika materijala i različitih objekata utvrđivanjem njihovih fizičkih svojstava,
- mogućnost primjene u raspoznavanju predmeta unutar zidova i ispod površine tla,
- relativno jednostavna izvedba prijarnika i odašiljača,
- niska razina smetnji.

Ipak, potrebno je uložiti još mnogo truda u istraživanje i razvoj kako bi se uobličili tehnički zahtjevi uključujući UWB značajke kanala, izvedba prijarnika i odašiljača, koegzistencija s drugim radijskim sustavima, kao i planiranje radijske veze i mrežnih slojeva s ciljem optimizacije UWB karakteristika prijenosa.

Europska komisija dala je mandat za izradu usklađene norme za UWB putem ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) i mandat za usklađenu dodjelu frekvencija preko CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*). Rad na normizaciji za UWB sustave uključuje izradu specifikacija, donošenje frekvencijskog plana i elektromagnetske kompatibilnosti. Osim za komercijalne primjene UWB se tradicionalno koristi i u radarskoj tehnici, a najnovije primjene mogle bi biti za sakupljanje podataka od raznih osjetila te precizno lociranje i praćenje. ETSI normizacijske aktivnosti za uređaje kratkog dometa uključuju sljedeće UWB primjene:

- komunikacijske primjene,
- radari za ispitivanje tla i zidova,

- radari za ispitivanje napunjenosti spremnika,
- osjetila,
- precizna lokacija unutar zgrada,
- automobilski radar.

Komunikacijske primjene UWB tehnike obuhvatit će lokalne i osobne komunikacijske mreže LAN/PAN, informacijske postaje uz ceste, radio kratkog dometa i vojne komunikacije. Radarske primjene UWB tehnike kao što je GPR (*Ground Penetrating Radar*), kao i analize strukture zidova sve se više koriste u arheologiji, ispitivanju kakvoće tla prije gradnje raznih objekata u visokogradnji i niskogradnji, restauracije građevina i drugim sličnim radovima. Policija, vatrogasci i hitna pomoć mogli bi koristiti ovu tehnologiju za "gledanje" kroz zidove.

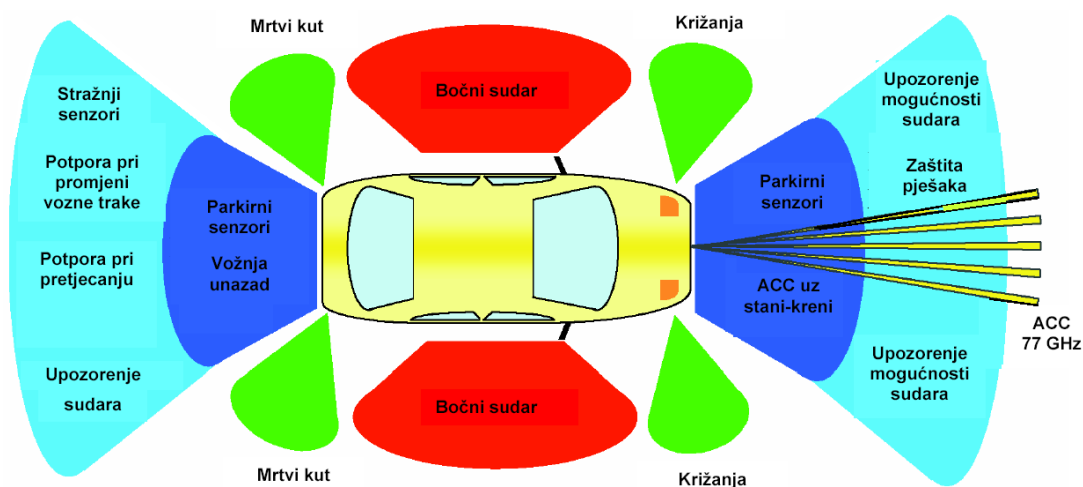
Jedno od najinovativnijih svojstava UWB tehnologije je vrlo visoka vremenska razlučivost signala, vezana uz tipično proširenje frekvencijskog spektra, koja je potaknula razvoj novih tehničkih pronalazaka i primjena u detekciji osoba i objekata. Praćenje i lociranje osoba, robe, inventara i opreme s preciznošću od par centimetara vrlo su atraktivne primjene koje nudi UWB, pogotovo u zatvorenom prostoru kao što su tvornice, skladišta, trgovine.

Mornarica je najavila planove da započne s postavljanjem UWB markera na robu koja se transportira u preookeanskoj plovidbi, kako bi se omogućila kontrola i praćenje robe i dobara te otežala krađa. Također i u automobilskoj industriji sve se više uvodi tehnologija radara kratkog dometa (SRR, *Short Range Radar*) radi povećanja sigurnosti cestovnog prometa i uvođenja inteligentnih transportnih sustava. Sustav za izbjegavanje sudara, detekcija kretanja i lokacija objekata u blizini vozila, poboljšanja u iniciranju aktivacije zračnih jastuka, postavke za namještanje tvrdoće ovjesa ovisno o kakvoći i vrsti ceste i slično bit će glavne primjene nove tehnologije. Eksperimenti se provode u frekvencijskom području od 24 GHz kao i u području od 77 – 81 GHz. Za prilagodljivu kontrolu krstarenja (ACC, *Adaptive Cruise Control*) mogao bi se koristiti radar LRR vrste (*Long-Range Radar*) s dometom od približno 150 m u frekvencijskom području 76 do 77 GHz.

Pregled mogućih primjena UWB radara u automobilima prikazan je na Slici 4.41.

UWB je tehnologija, koja se temelji na prenošenju impulsno kodirane informacije vrlo kratkog trajanja impulsa, često kraćeg od nanosekunde, pri čemu se zauzima vrlo velika širina pojasa frekvencija. To omogućava prijenos podataka vrlo velikim brzinama, većim od 100 Mbit/s, a snaga emisije je jako niska i troši se vrlo malo energije. Predviđeni domet je u rasponu od 15 do 100 m, a kako za prijenos ne treba koristiti val nosilac, sustav se može

tretirati kao radijski sustav bez nositelja, tj. obavlja se impulsni radijski prijenos u osnovnom pojasu frekvencija, koje je međutim jako visoko.



Slika 4.41. Primjena UWB radara kratkog dometa u automobilima

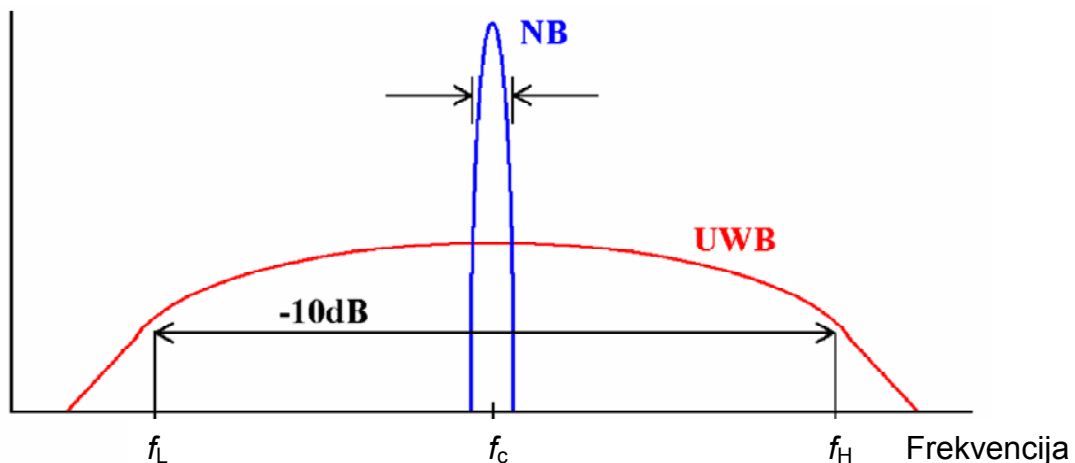
UWB sustav nije ograničen samo na radijski prijenos. UWB signal može se prenositi preko postojeće energetske mreže, koaksijalnih kabela, pa čak i putem telefonskih linija s upletenim paricama, pri čemu bi se mogle ostvariti komunikacije brzinama i većim od 1 Gbit/s.

UWB tehnologija nudi velike mogućnosti za radijsko multi-medijsko umrežavanje, ali neće se stati samo na multimedijским sadržajima. Velike prijenosne brzine omogućit će jednostavnu izvedbu sinkronizacije raznih uređaja i sadržaja – kontakti, kalendari, glazba i video sadržaji.

Za razliku od konvencionalnih radijskih sustava, koji koriste uskopojasni prijenos koristeći modulirani val nosilac, UWB signal prenosi se s vrlo velikom spektralnom širinom pojasa koristeći niz vrlo uskih impulsa male snage. Kombinacija velike širine pojasa, male snage emisije i impulsni prijenos izaziva značajno manje smetnji u usporedbi s klasičnim uskopojasnim radijskim tehnologijama, što bi trebalo osigurati sigurnu koegzistenciju s ostalim radijskim tehnologijama prisutnima na tržištu.

UWB sustav, je po definiciji svaki radijski sustav kojemu je -10 dB širina pojasa veća od 25 % središnje frekvencije pojasa (Slika 4.42.), ili ima -10 dB širinu pojasa jednaku ili veću od 1,5 GHz u slučaju da mu je središnja frekvencija viša od 6 GHz.

- UWB sustav: *relativna širina pojasa* = $(f_H - f_L)/f_c > 25 \%$, ili *apsolutna širina pojasa* $> 1,5 \text{ GHz}$.
- Uskopojasni (NB) sustav: *širina pojasa* = $(f_H - f_L)/f_c < 1 \%$.



Slika 4.42. Širine pojasa klasične uskopojasne (NB) i UWB tehnologije

Trendovi razvoja UWB sustava namijenjenog za komercijalne komunikacijske usluge trebaju razmotriti nekoliko važnih činjenica:

- rastuću potražnju za jeftinim prijenosnim uređajima koji bi nudili mogućnosti prijenosa vrlo velikim brzinama uz mnogo manju snagu emisije u odnosu na sada dostupne sustave,
- nedostatak raspoloživih frekvencija i prenatrpanost spektra unutar dosadašnjih nelicenciranih frekvencijskih pojaseva,
- povećanu dostupnost širokopojasnog pristupa Internetu preko fiksnih infrastruktura, naročito u poduzećima, domovima i na javnim mjestima,
- smanjivanje cijena poluvodičkih komponenata i potrošnje energije sklopova za obradu signala.

Preliminarni rezultati pokazuju da je UWB radio vrlo dobro prilagođen radu u okruženjima s izrazitim višestaznim komponentama signala s velikim potencijalima za komunikacije s višestrukim pristupom na manjim udaljenostima. UWB tehnologija ima mnoge prednosti zahvaljujući svojoj ultraširokopojasnoj prirodi:

- visoke brzine prijenosa u radijskim komunikacijama na malim i srednjim udaljenostima (20 do 50 m),
- manje gušenje trase i bolja otpornost na višestazno rasprostiranje signala s obzirom da se UWB proteže preko vrlo širokoga frekvencijskog pojasa, čime su i relativno mali gubici penetracije u materijale. UWB signal pokazuje otpornost na frekvencijski selektivni feding i svaki primljeni signal sadrži veliki broj razlučivih višestaznih komponenti. Fina vremenska rezolucija UWB signala olakšava prijammiku da koherentno kombinira višestazne komponente signala s razlikama u

prijeđenom putu do 30 cm. Priroda UWB signala bez vala nosioca rezultira u manjem fadingu čak i kad se impulsi preklapaju. To smanjuje graničnu vrijednost fadinga u proračunu gušenja.

- Dostupnost primopredajnika vrlo jednostavne konstrukcije s obzirom da nema prijenosnog signala nosioca. Napredak u proizvodnji komponenata i brzine prekapčanja u poluvodičkim sklopovima učinili su dostupnim jeftine komercijalne UWB sustave.
- Niska snaga emisije i male interferencije za komunikaciju na kratkim udaljenostima. Vrlo niska prosječna emisiona snaga impulsa trajanja reda veličine nanosekundi s vrlo malim pogonskim ciklusom (*duty cycle* - za nekoliko redova veličine manji od 1). Uz ultra veliku širinu spektra spektralna gustoća snage UWB signala je vrlo mala. To daje nadu da bi UWB sustavi mogli koegzistirati u istom frekvencijskom pojasu s uskopojasnim radijskim sustavima bez da izazivaju prekomjerne interferencije.

UWB tehnologija obuhvaća generiranje i prijenos radiovala koji se spektralno proteže preko mnogih frekvencijskih područja dodijeljenih ostalim radiokomunikacijskim uslugama. Mogućnost da se može koristiti isti frekvencijski spektar koji se koristi i za druge radijske sustave mogla bi biti vrlo značajna odlika UWB sustava, koja bi širom otvorila vrata za sve masovnije korištenje ove tehnologije.

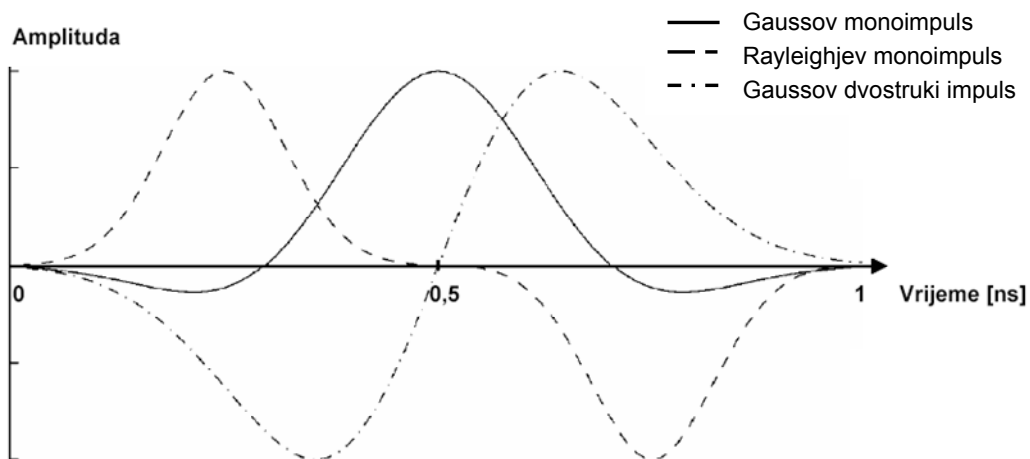
4.4.1. Osobitosti UWB signala

UWB sustavi načelno se mogu podijeliti na impulsne radijske sustave IR (*Impulse Radio*) i multipojasne sustave. Multipojasni sustavi nude prednost potencijalno vrlo učinkovitog iskorištavanja frekvencijskog spektra, dok IR sustavi imaju prednost u jednostavnosti zbog čega im je potencijalno niža cijena.

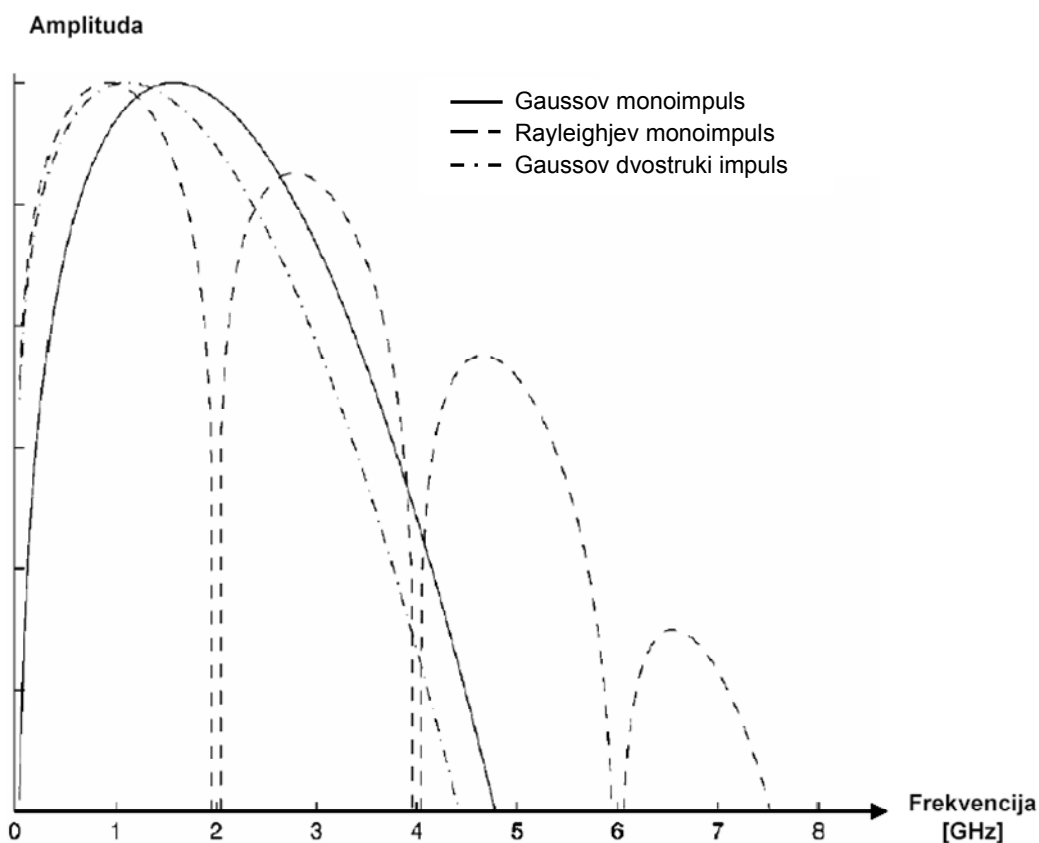
4.4.2. UWB u osnovnom pojasu frekvencija

Izravno emitirani UWB impulsi nemaju nositelja na središnjoj frekvenciji. Oni zahtijevaju širokopolasne antene, a spektar im se proteže od skoro DC do nekoliko GHz. Potencijalni problemi ometanja signala mogli bi nastati unutar GPS licenciranih područja koja se protežu oko 1,2 GHz i 1,6 GHz. Impulsni radiokomunikacijski sustavi i impulsni radari koriste vrlo uske impulse što rezultira ultraširokim frekvencijskim spektrom. Načelno se može reći što je uži impuls u vremenskom području, u frekvencijskom području nastaje signal sve šireg spektra. Za radijske primjene ovakva komunikacijska metoda može se klasificirati kao tehnika modulacije impulsa, jer podaci moduliraju položaj impulsa (PPM,

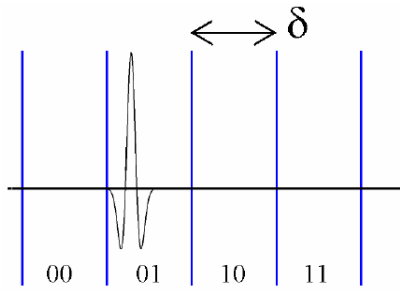
Pulse Position Modulation). UWB signal je vrlo sličnog oblika kao i šum, što otežava prisluškivanje i detekciju. Valni oblici impulsa koji se najčešće koriste su Gaussov i Rayleighjev impuls prikazani su na Slici 4.43., kao i njihovi spektri u frekvencijskom području sa Slike 4.44. Spektralna širina UWB signala u izravnoj vezi s valnim oblikom i širinom impulsa.



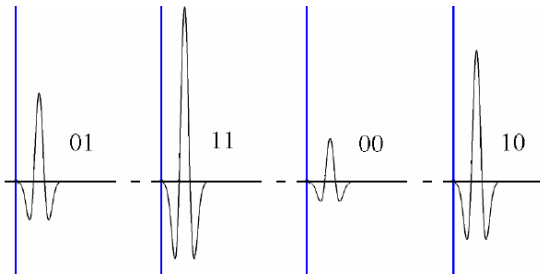
Slika 4.43. Oblici impulsa UWB signala



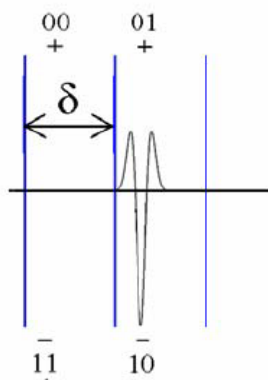
Slika 4.44. Spektar UWB signala u osnovnom pojasu frekvencija



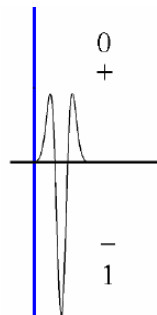
4-simbolni PPM, s binarnim simbolom 01



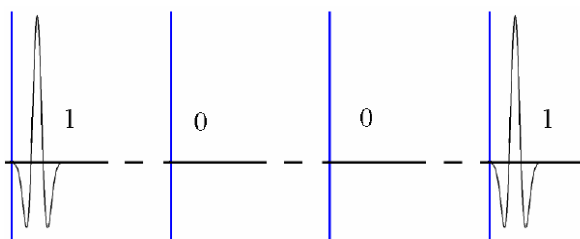
4-simbolni PAM sa sekvencama: 01, 11, 00, 10



4-simbolni biortogonalni, s binarnim simbolom 10



bipolarni s binarnim simbolom 1



OOK (*On/Off Keying*) sa slijedom: 1,0,0,1

Slika 4.45. Osnovni modulacijski postupci koji se mogu primijeniti za UWB modulaciju impulsa

Važan kriterij u oblikovanju impulsa je jednostavnost izvedbe generatora impulsa i minimalne smetnje između UWB sustava i ostalih uskopojasnih sustava koji koegzistiraju u istome frekvencijskom pojasu, što podrazumijeva da se oblik impulsa mora prilagoditi zakonski reguliranoj spektralnoj maski koja definira maksimalne dopuštene snage spektralnih komponenata signala u pojedinoj frekvencijskom području.

Modulacija podataka se tipično temelji na jednostavnim postupcima modulacije impulsa PPM (*Pulse Position Modulation*) i PAM (*Pulse Amplitude Modulation*). Najjednostavniji prijamnik je homodinski unakrsni korelator koji se bazira na arhitekturi koja rabi izravnu pretvorbu RF pojasa u osnovni pojas frekvencija. Pretvorba preko međufrekvencije nije potrebna, što prijamnik čini jednostavnijim od konvencionalnih superheterodinskih prijamnika.

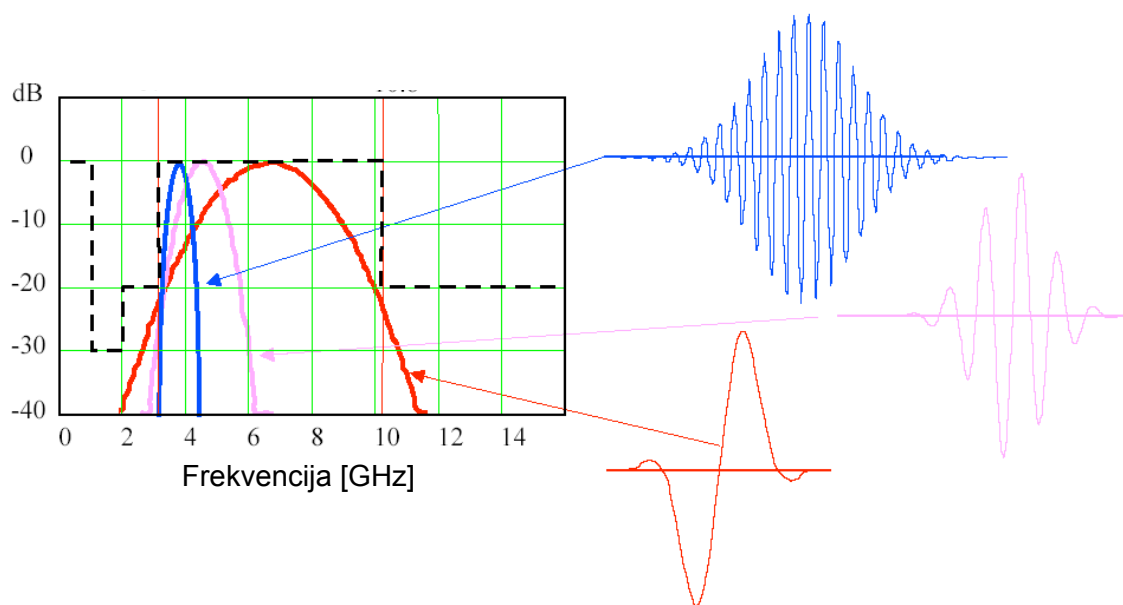
Na Slici 4.45. prikazani su valni oblici impulsa u osnovnim modulacijskim postupcima primjenjivima za impulsnu modulaciju UWB signala uključujući PPM, PAM, biortogonalnu i bipolarnu modulaciju, kao i OOK (*On/Off Keying*).

4.4.3. Ostali načini stvaranja UWB signala

Osim korištenja impulsne emisije u UWB sustavu razmatra se kao alternativa i korištenje uskopojasnih signala. UWB se temelji na proširenom spektru sa skakanjem frekvencije. UWB prijenos baziran na uskopojasnom načinu prijenosa signala ima prednosti jer već postoje dobro istražene tehnike prijenosa vrlo visoke spektralne učinkovitosti kojima se može postići velika učinkovitost prijenosa UWB signala, uz korištenje elemenata iz postojećih normi. Tako se za generiranje UWB signala mogu iskoristiti višestruki pristup u kodnoj podjeli (CDMA, *Code-Division Multiple Access*) koji se koristi u mobilnim mrežama treće generacije. Širokopojasni CDMA s opcionalnim tehnikama korištenja više nosilaca MC (*MultiCarrier*) omogućava prilagođavanje spektra signala spektralnoj maski. Postoje tri načina generiranja prijenosa proširenim spektrom s više nosilaca (SS-MC, *Spread Spectrum Multi Carrier*): *multi-carrier CDMA*, *multicarrier DS-CDMA*, i *multitone (MT) CDMA*. Svaka od ovih tehnika neminovno profitira zbog dobrih karakteristika konvencionalnih signala proširenog spektra, ali svaka ima svojih prednosti i nedostataka. Jedna od mana je i činjenica da je zbog korištenja više nosilaca neminovna i veća složenost odašiljača i prijamnika, jer se trebaju koristiti miješala ili tehnike brze Fourierove transformacije (FFT) kako bi se različite komponente signala dovele u potrebna frekvencijska područja.

Osim ove dvije vrste postoji i multipojasni UWB, kod kojeg svaki UWB signal zauzima više od 500 MHz širok pojas i nije sastavljen od niza impulsa. Emitira se signal čiji je valni oblik sastavljen od

nekoliko sinusnih titraja čija ovojnica ima oblik impulsa. Ovaj pristup omogućava fleksibilnije namještanje središnje frekvencije radijskog signala uz manju širinu zauzetog spektra i fleksibilniji je u prilagodbi na različite brzine prijenosa, ali ima smanjenu mogućnost penetracije i prolaska kroz različite materijale. Valni oblici signala u vremenskom području i spektri signala sa spektralnom maskom koju za UWB propisuje američki FCC (*Federal Communications Commission*) prikazani su na slici 4.46.



Slika 4.46. Valni oblici signala i pripadajući spektr

Koja će se vrsta modulacije koristiti ovisi o predviđenim uvjetima rada i prihvatljivoj složenosti samog UWB sustava. UWB modulacije impulsa trebale bi uključivati i neke tehnike nasumičnog usrednjavanja frekvencijskog spektra kako bi se ograničile smetnje izazvane emitiranjem slijeda impulsa. Ove tehnike mogu biti skakanje u vremenu (TH, *Time-Hopping*) i tehnike izravnog slijeda (DS, *Direct Sequence*). Uspješnost modulacijskih postupaka u realnim uvjetima ovisi o izobličenjima koja nastaju u sklopovima odašiljača i prijamnika te o karakteristikama prijenosnog kanala. Stoga su važne i tehnike za smanjenje izobličenja, kao i smetnji. Postupci i načini ublažavanja i smanjivanja problema smetnji moraju se još istražiti kako bi se zaštitili postojeći uskopojasni sustavi od UWB smetnji, ali i smetnje uskopojasnih sustava na UWB sustav.

4.4.4. Komercijalne primjene UWB tehnologije

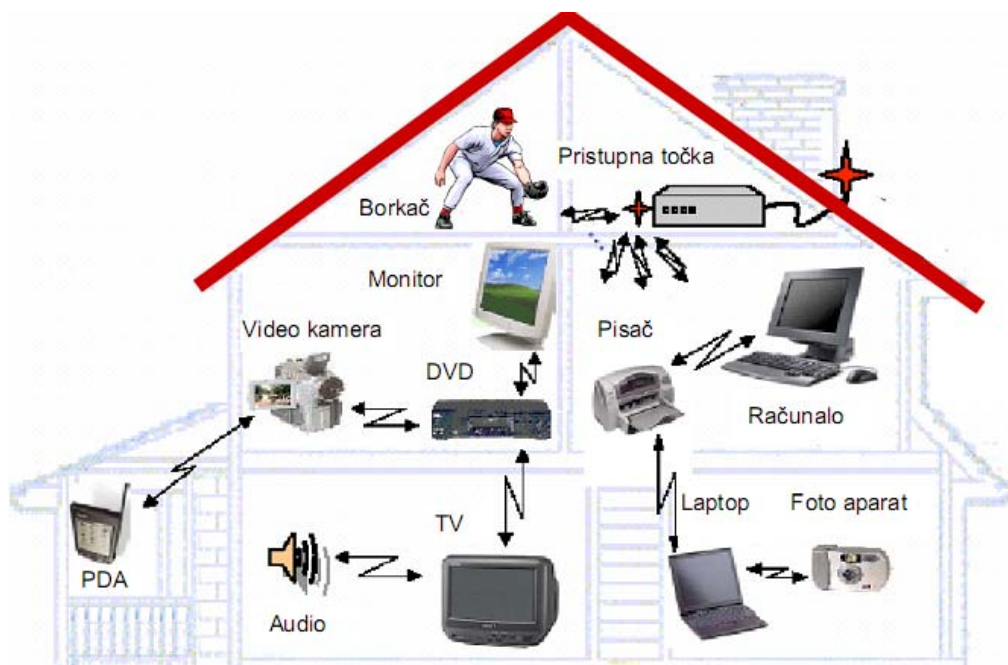
Izgledno je da će uskoro Bluetooth tehnologija, popularna PAN (*Personal Area Network*) norma za spajanje računala s perifernim uređajima na kraćim udaljenostima, dobiti svoga nasljednika u

obliku nove norme UWB koja omogućava čak stostruko brži prijenos podataka od Bluetooth tehnologije. UWB trenutno može postići propusnost od 110 Mbit/s na udaljenostima do deset metara, a očekuje se da će njegova propusnost doseći i 1Gbit/s. UWB tehnologija mogla bi imati utjecaja na još jednu popularnu normu – USB (*Universal Serial Bus*) koji danas služi za kablasko povezivanje perifernih uređaja s računalima. UWB daje korisnicima nadu da će moći zamijeniti mnoštvo kabela za povezivanje elektroničkih uređaja u svojim domovima, uključujući televizijske prijarnike, velike LCD i plazma ekrane, digitalne kamere, videorekordere, set-top boxove, zvučnike, stolna računala, prijenosna računala, telefone i slične uređaje.

UWB tehnologija bit će primijenjena za:

- izvedbu sustava kućnog kina bez kabela za povezivanje,
- dijeljenje multimedijskih sadržaja između kućnih uređaja,
- prebacivanje fotografija sa digitalne kamere na druge uređaje,
- brzu sinkronizaciju digitalnih audio uređaja vrlo visokih kapaciteta,
- povezivanje videosignala između računala i monitora bez kabela.

Najčešće moguće primjene UWB tehnologije u domovima prikazane su na Slici 4.47.



Slika 4.47. Moguće komercijalne primjene UWB tehnologije u domovima

4.4.5. Frekvencijski plan za UWB u Europi

U siječnju 2008. godine odobreno je novo frekvencijsko područje i usvojene su regulativa i specifikacije na globalnoj razini za radijsko povezivanje uređaja brzinom do 480 Mbit/s (USB, PC, razni uređaji za reprodukciju, video i audio komponente i slična oprema) pomoću UWB-a. Europska komisija (EC, *European Commission*) je odlučila da će odobriti korištenje samo nekih dijelova spektra od 3,1 do 10,6 GHz koji je za te svrhe usvojen u SAD-u još od 2002. godine. U Europi će za UWB biti odobreno frekvencijsko područje od 6,0 do 8,5 GHz, a privremeno do kraja 2010. godine i frekvencijsko područje od 4,2 do 4,8 GHz, što je prikazano u Tablici 4.2.

Tablica 4.2. Ograničenja efektivne izotropne izračene snage (EIRP) u frekvencijskom spektru za UWB u Europi

Frekvencijski pojas [GHz]	Najveća srednja gustoća EIRP [dBm/MHz]	Najveća vršna gustoća EIRP [dBm/50 MHz]
ispod 1,6	-90,0	-50,0
1,6 – 3,4	-85,0	-45,0
3,4 – 3,8	-85,0	-45,0
3,8 – 4,2	-70,0	-30,0
4,2 – 4,8	-41,3 (do 31.12.2010.)	0,0 (do 31.12.2010.)
	-70,0 (nakon 31.12.2010.)	-30,0 (nakon 31.12.2010.)
4,8 – 6,0	-70,0	-30,0
6,0 – 8,5	-41,3	0,0
8,5 – 10,6	-65,0	-25,0
iznad 10,6	-85,0	-45,0

(Izvor: European Commission, Radio Spectrum Policy Unit)

U prvom kvartalu 2008. godine razmatrao se novi amandman koji treba ublažiti ograničenja u tablici i uzeti u obzir mnoge nove studije koje se bave UWB kompatibilnosti u cestovnom i željezničkom prometu, kompatibilnosti sa aeronautičkim radarom u frekvencijskom području 2,7 – 3,4 GHz te radarskom području 8,5 – 9,0 GHz i uzeti u obzir istraživački rad na tehnici "detektiraj i izbjegni" (DAA, *Detect And Avoid*) i tehnikama smanjivanja smetnji. Ostale specifične primjene UWB tehnologije Europska komisija je već razmotrila. Odlučeno je da se frekvencijsko područje 24 GHz i 79 GHz koristi za radar kratkog dometa (SRR) za automobile, dok će se odluka o frekvencijama za radare za ispitivanje tla i zidova te ispitivanje materijala donijeti još ove godine. Ostale primjene, kao što su razlikovanje objekata, lociranje i praćenje te ispitivanje razina, još se razmatraju.

Odluke ECC/DEC/(06)04 su nadopunjene dijelom koji se odnosi na usklađene uvjete za uređaje koji rabe UWB tehnologiju u frekvencijskim područjima ispod 10,6 GHz i definira uvjete korištenja UWB tehnologije s niskim pogonskim ciklusom (LDC, *Low Duty Cycle*) i studije koje se odnose na dodatne tehnike smanjivanja smetnji kao što je DAA (*Detect And Avoid*) u frekvencijskom pojasu od 3,4 – 4,8 GHz.

Frekvencijsko područje od 6,0 – 8,5 GHz u Europi je namijenjeno za dugoročni rad UWB sustava s maksimalnom srednjom gustoćom EIRP od -41,3 dBm/MHz i maksimalnim vršnim gustoćama EIRP od 0 dBm/50MHz, bez zahtjeva za dodatnim slabljenjem.

U frekvencijskom području od 3,1 – 4,8 GHz ECC (*Electronic Communications Committee*) je odlučila da se istraže učinkovite tehnike smanjivanja smetnji, među kojima su DAA i LDC tehnike, kako bi se osigurala kompatibilnost i mogućnost rada UWB uređaja u istome frekvencijskom području s radijskim sustavima bez međusobnog ometanja, s težnjom da se UWB uređajima odobri u frekvencijskom području 3,4 – 4,8 GHz povećanje snage emisije do maksimalne srednje gustoće EIRP od -41,3 dBm/MHz. Učinkovitost ovih tehnika smanjenja smetnji istražiti će se i za zaštitu radarskih sustava koji rade u frekvencijskom području ispod 3,4 GHz.

Procjena mogućih interferencija izazvanih UWB uređajima od ogromne je važnosti kako bi se zajamčilo da nema konflikata u koegzistenciji između UWB tehnologije i ostalih postojećih i budućih radijskih sustava, kao i radi poticanja prihvaćanja UWB tehnologije širom svijeta. Studije koje analiziraju ove aspekte trebaju razmatrati realne situacije korištenja UWB tehnologije, a ne samo pojednostavljene modele. Slično kao i ostale radijske LAN mreže, UWB terminali će biti u stanju mirovanja (*sleep mode*) vrlo veliki postotak vremena, neće raditi stalno i emitirati kontinuirano s maksimalnom razinom snage. Pokazalo se da uzimajući i obzir ove

pretpostavke – arhitekturu UWB sustava, faktor aktivnosti, kontrolu snage emisije i ostale značajke, čak i za veliku gustoću UWB terminala ne postoji praktični rizik od ometanja prijama ostalih radijskih sustava.

4.4.6. Zaključak

Tehničke značajke UWB tehnologije, uključujući vrlo visoku propusnost, nisku snagu emisije i nisku cijenu opreme, postavljaju UWB u vrlo povoljan položaj na tržištu širokopoljnih sustava kratkog dometa za komercijalnu uporabu. Iz regulatorne perspektive UWB predstavlja reformu u upravljanju s frekvencijskim spektrom. Ako će zahtjevi za radijskim multimedijским primjenama rasti i dalje ovim tempom i ako će se primjenjivati odgovarajuće norme, UWB ima veliki potencijal da promijeni sliku tržišta budućih radijskih mreža. Ključni pokretači ove tehnologije bit će pogodne regulatorne uredbe i stalno rastući tržišni zahtjevi.

4.5. Softverski radio

Uz naziv softverski definirani radio (SDR, *Software Defined Radio*) često se koristi i naziv na-sofveru-temeljen radio (SBR, *Software Based Radio*) ili samo softverski radio (SR, *Software Radio*). Pojam "softverski radio" prvi je uveo Joseph Mitola 1991. godine govoreći o kategoriji reprogramabilnih ili rekonfiguracijskih radija. Drugim riječima, ista sklopovska podrška (*hardver*) može izvoditi različite funkcije u različito vrijeme. SDR forum definira tzv. USR radio (*Ultimate Software Radio*) koji prihvaća potpuno programabilni promet i kontrolne informacije te podržava široki raspon frekvencija, radijskih sučelja i namjenskih programa. Korisnik se može prebaciti s jednog sučelja na drugo u jednoj milisekundi, može koristiti sustav GPS (*Global Positioning System*) za utvrđivanje lokacije, može koristiti tehnologiju inteligentnih kartica (*smartcard*) ili pak može gledati program lokalne postaje ili primati satelitski program.

Točna definicija softverskog radija je kontroverzna te ne postoji konsenzus oko razine rekonfigurabilnosti (*reconfigurability*) potrebne za definiranje radija kao softverskog radija. Mikroprocesor ili DSP (*Digital Signal Processor*) u radiju ne definira ga nužno kao softverski radio. SDR se može definirati kao radio u čijem se prijamnom dijelu digitalizacija provodi poslije antenskog sustava u nekom od stupnjeva prijarnika, najčešće poslije širokopoljnog filtriranja, niskošumnog pojačanja te spuštanja na nižu frekvenciju. U odašiljačkom se dijelu provodi suprotan proces. Obrada digitalnog signala u fleksibilnim i rekonfigurabilnim funkcionalnim blokovima definira karakteristike radija. Napretkom tehnologije, SDR bi postao potpuni SR kod kojeg bi se digitalizacija provodila u neposrednoj blizini antenskog sustava, a

potrebnu obradu bi provodio softver u komponentama za obradu digitalnog signala velike brzine. Softverski radio je ona vrsta radija koja je sadržajno definirana u softveru i čije se ponašanje fizičkog sloja može mijenjati ovisno o promjenama softvera. Stupanj rekonfigurabilnosti određen je različitim faktorima u projektiranju radija kao što su tehnika sustava, oblikovanje antene, elektronika, obrada u osnovnom pojasu, brzina i rekonfigurabilnost hardvera te upravljanje snagom.

Pojam softverskog radija odnosi se na radio čija fleksibilnost potječe od softvera uz korištenje statične hardverske platforme. S druge strane, pojam "*soft-radio*" označava u potpunosti konfigurabilan radio kod kojeg se programiranjem u softveru rekonfigurira fizički hardver. Drugim riječima, isti hardver može se preinačiti s ciljem provođenja različitih funkcija u različitim trenucima prilagođavajući hardver trenutnoj primjeni. Ponekad pojam softverskog radija obuhvaća pojam *soft-radija*.

SDR je primjenjiv za radijski prijenos u različitim područjima. Tri osnovna područja primjene su: komercijalni radio (*commercial wireless*), civilne primjene (*civil government*) te vojne primjene. Navedena tržišta imaju različite kriterije (npr. cijena, težina, veličina, izvedba, značajke itd.) koji izravno utječu na primjene i definiciju SDR-a u svakoj od tih područja. Karakteristike rekonfigurabilnosti i fleksibilnosti te višepojasne i višenačinske karakteristike zahtijevaju svi radijski komunikacijski sustavi uključujući komercijalne radijske usluge, vojne komunikacije i civilne usluge. Rješenja za dinamičku rekonfigurabilnost uključuju svestrana hardverska i softverska okruženja te mogućnost osiguravanja sposobnosti ažuriranja, unaprjeđenja ili zamjene putem mehanizama dohvata podataka (*download*).

Dvije su softverske funkcionalnosti koje se mogu implementirati u radiju:

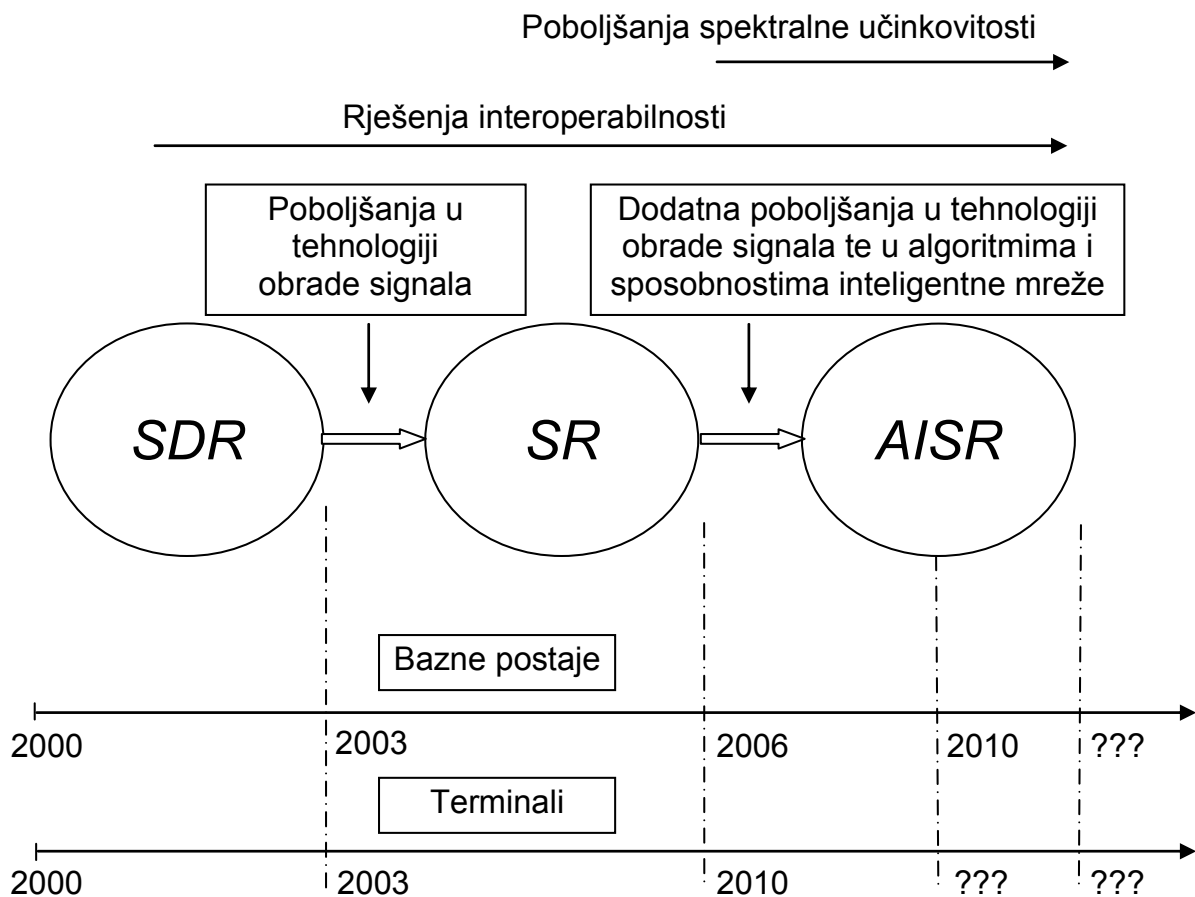
1. softverska obrada signala koji sadrži informaciju;
2. softverska kontrola koja osigurava inteligentnu prilagodbu radijskih parametara kako bi se postigao bolji rad (npr. niže vjerojatnosti pogreške bita) ili veća spektralna učinkovitost (npr. više bita/s/Hz) dok se radio automatski prilagođava okruženju u kojem se nalazi.

Navedene dvije odvojene softverske funkcionalnosti u sadašnjim i budućim radijskim tehnologijama izravno su povezane s dva osnovna pitanja:

1. sposobnost tehnologije SDR da definira probleme interoperabilnosti koji se javljaju u sustavima radijskih komunikacija;

2. sposobnost tehnologije SDR da postigne veću spektralnu učinkovitost i iskoristivost spektra (uključujući dinamičku dodjelu spektra i ometanje spektra).

S jedne strane je industrija oduševljena mogućnošću SDR-a da definiira kritične probleme interoperabilnosti za široki raspon primjena i da osigura višenačinske i višepojasne sposobnosti za komercijalne radijske sustave u kraćem roku. S druge strane, industrija ne podržava gledište da SDR koristeći koncepte prilagodljivog inteligentnog radija može riješiti probleme spektralne učinkovitosti i upravljanja spektrom na deset godina ili više. Značajke SR-a, kao što su prilagodljivost i inteligencija, koje omogućavaju prilagodljivu dinamičku dodjelu spektra, mogu se promatrati kao razvoj radijskih tehnologija na duži rok.



Slika 4.48. Evolucija od SDR-a preko SR-a do AI-SR-a. Vremenske linije su različite – evolucija je prikazana relativno prema fazama prikazanim u krugovima. Druge radijske usluge poput vojnih ili civilnih sustava mogu imati drugačije vremenske razvoje.

Slika 4.48. prikazuje evoluciju tehnologije od SDR-a preko SR-a do adaptivnog inteligentnog softverskog radija (AI-SR, *Adaptive Intelligent Software Radio*). Pokretački mehanizam evolucije tehnologije od SDR-a do SR-a su unaprjeđenja u tehnologiji obrade signala uključujući analogno-digitalnu i digitalno-analognu pretvorbu, bržu obradu signala, memorijske čipove itd. Unaprjeđenja u ovim osnovnim tehnologijama potrebna su kako bi se digitalizacija radijskog signala preselila iz osnovnog pojasa u međufrekvencijsko područje te u konačnici u radiofrekvencijsko područje, blizu antenskog sustava kod idealnog SR-a. Unaprjeđenja u algoritmima inteligentne mreže potrebna su kako bi se pokrenula daljnja evolucija od SR-a prema AI-SR-u koji ima poboljšanu spektralnu učinkovitost uz prilagodljivu dodjelu i upravljanje spektrom.

4.5.1. Arhitektura SDR-a

4.5.1.1. Ravnina implementacije radija

Razmatrajući arhitekturu radijskih uređaja te terminala i baznih postaja, možemo je podijeliti u dva glavna funkcionalna područja:

- Pristupni radio (*radio front-end*) - značajke frekvencijskog područja za prijam i odašiljanje;
- Pozadinski radio (*radio back-end*) - funkcionalnosti obrade signala.

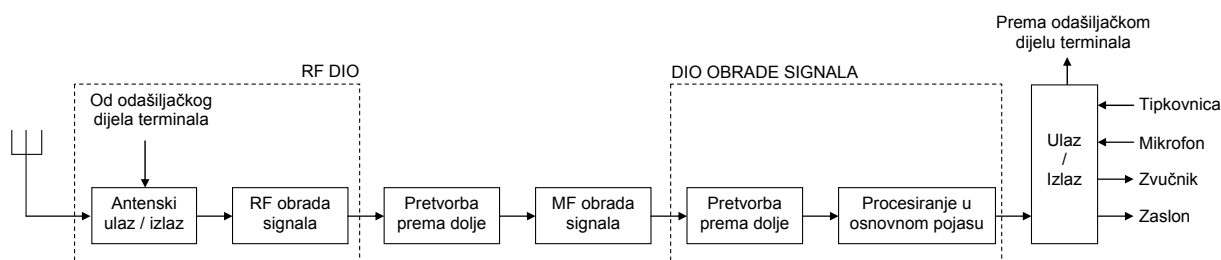
Tradicionalno, ovom podjelom je hardver dominantni element pristupa, a hardver spojen sa softverom dominantni element pozadine. Dominantna uloga hardvera će se napretkom tehnologije promijeniti u sporednu ulogu, a dominantnu ulogu će preuzeti softver.

Velika složenost komercijalnih uređaja uzrokovana je mogućnošću rada u više frekvencijskih pojaseva. Višenačinska funkcionalnost (npr. različite tehnologije radijskih sučelja) može se učinkovito ostvariti u softverskom dijelu obrade kao relativno mali dio ukupne složenosti. Razmatranje pristupnog i pozadinskog dijela vrlo je složeno, a složenost uređaja povećava se dodavanjem dodatnih frekvencijskih pojaseva i načina (modova) rada. Dodatni problem je istovremeni rad s trenutnom i budućom generacijom komunikacija u istom radijskom uređaju.

Slike 4.49. do 4.52. prikazuju funkcionalnu podjelu u pristupni i pozadinski dio te služe kao evolucijski putokaz prema SR-u. Primjer pokazuje evoluciju proizvoda od tradicionalne izvedbe – jednopojasno (*single band*) i jednomodno (*single mode*) radijsko sučelje, prema višepojasnome i višemodnome digitalnom

radijskom sučelju s većim brojem funkcionalnosti. Navedena evolucija može se podijeliti u četiri faze:

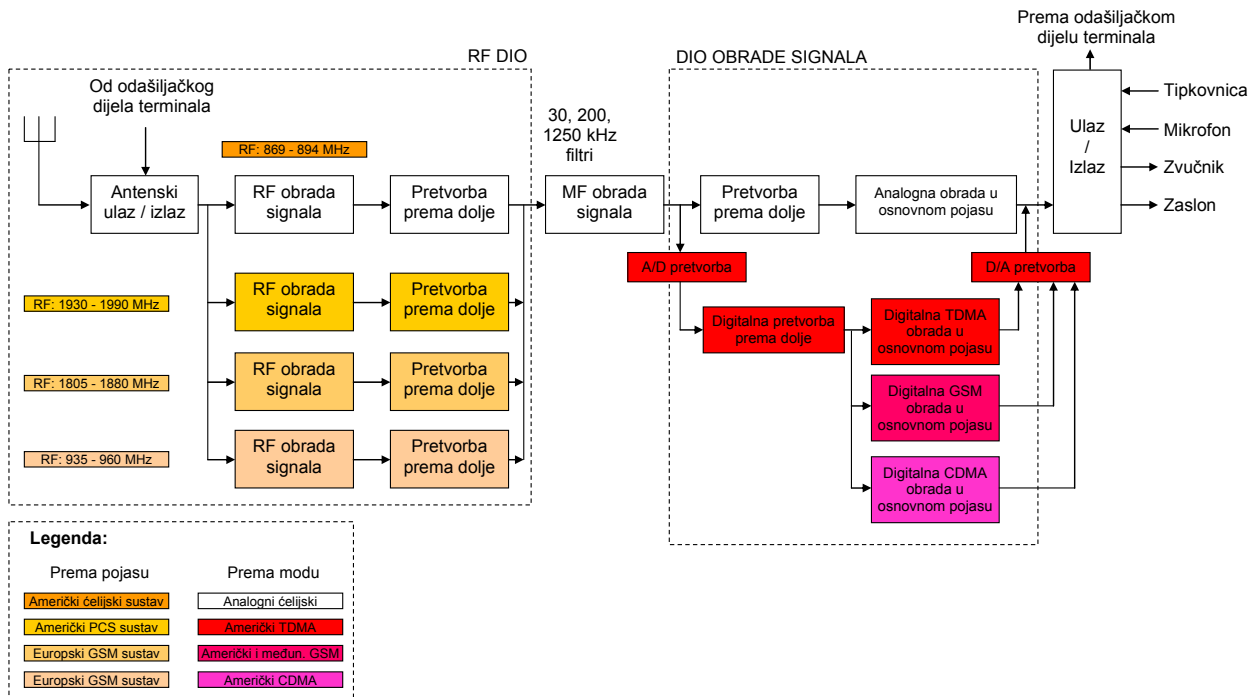
- Prva faza je osnovni jednopojasni i jednomodni slučaj, Slika 4.49.
- Druga faza predstavlja terminal druge generacije koji ne može udovoljiti svim zahtjevima tržišta, Slika 4.50.
- Treća faza je prvi evolucijski korak koji zadržava konvencionalni pristupni dio, a primjenjuje rješenja SDR-a u pozadinskom dijelu iza MF stupnja, Slika 4.51.
- Četvrta faza predstavlja maksimum evolucije sa softverskom obradom u RF području, Slika 4.52.



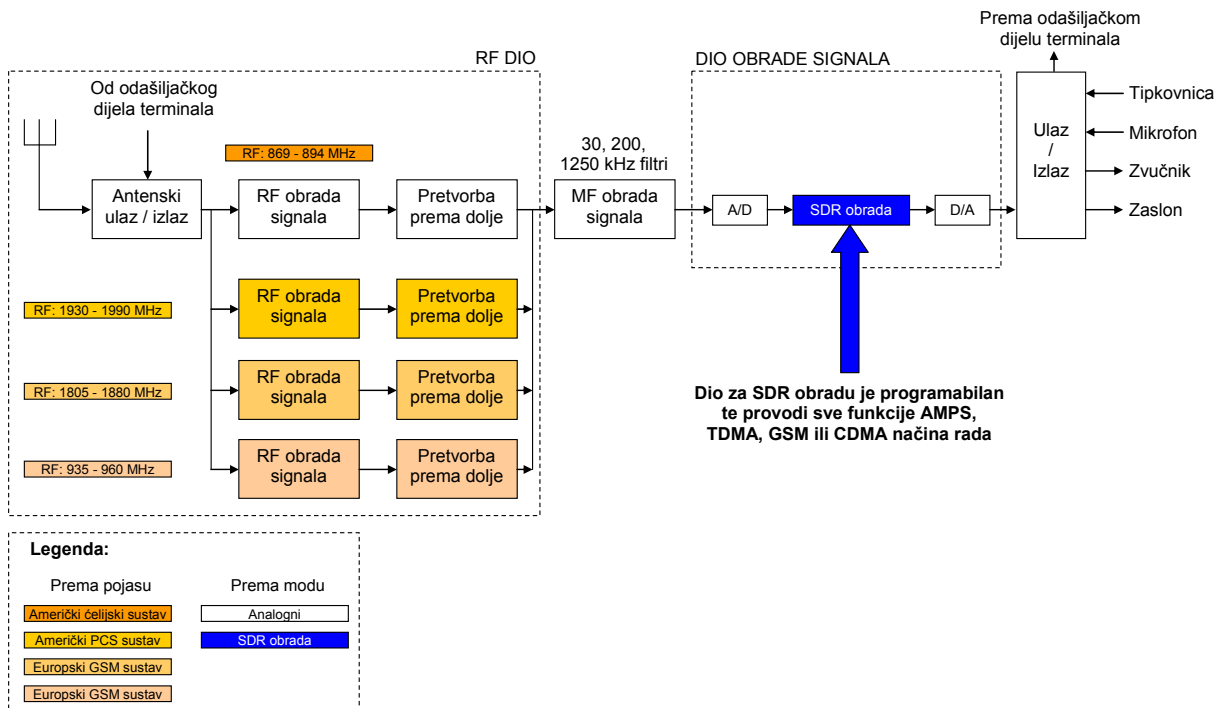
Slika 4.49. Evolucija SDR-a, prva faza: opći ćelijski/PCS jednopojasni i jednomodni terminal. Slika prikazuje *opći* jednomodni (AMPS, TDMA, CDMA, GSM, PHS itd.) i jednopojasni (tj. 850, 900, 1800, 1900 MHz itd.) terminal, što se može smatrati tradicionalnom implementacijom.

Iako na Slikama 4.49. do 4.52. zbog nedostatka prostora nisu prikazani svi frekvencijski pojasevi namijenjeni komercijalnoj uporabi (osobito u dijelu Azije), jasno je kako se koristeći arhitekturu SDR-a svi frekvencijski pojasevi mogu uključiti u model evolucije.

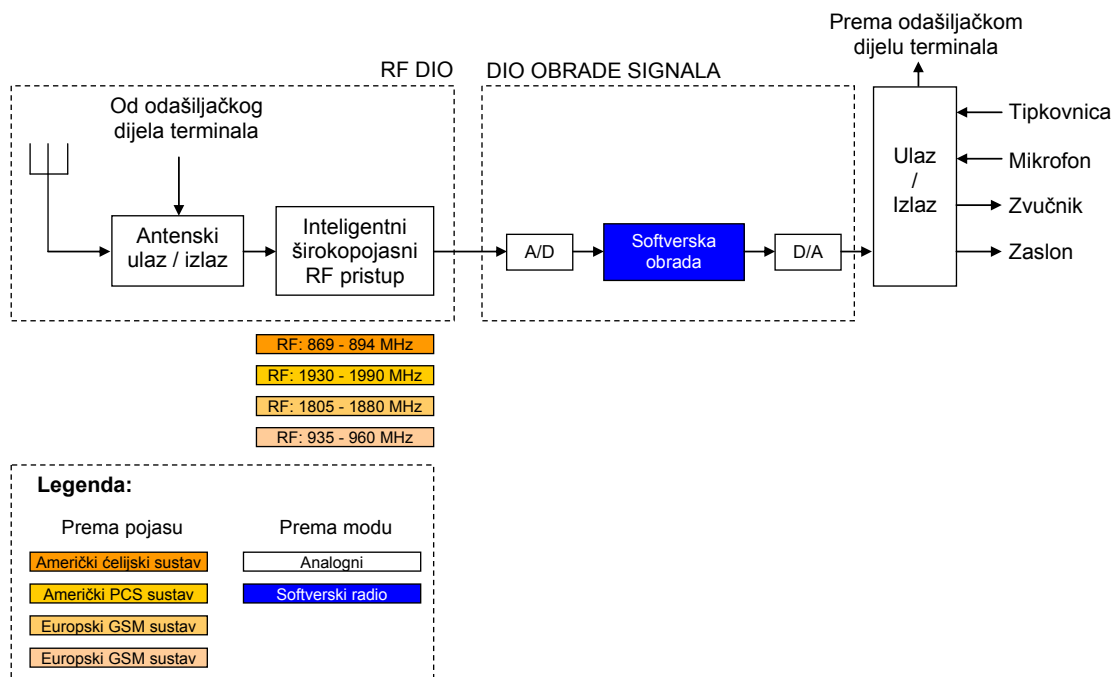
Slični primjeri mogu se izvesti i za fleksibilne bazne postaje. Bazne postaje imaju potencijal postići četvrtu fazu prije mobilnih terminala zbog različitih zahtjeva pri projektiranju, poput mogućnosti potrošnje veće snage, istodobne podrške većem broju nosilaca itd.



Slika 4.50. Evolucija SDR-a, druga faza: četveropojasni (800, 900, 1800 i 1900 MHz) i četveromodni (AMPS, TDMA, GSM i CDMA) način rada terminala.



Slika 4.51. Evolucija SDR-a, treća faza: A/D, D/A i čipovi za obradu signala mogu provoditi obradu u međufrekvencijskom području te u osnovnom pojasu frekvencija.



Slika 4.52. Evolucija SDR-a, četvrta faza: budući proizvodi temeljit će se na ovakvoj arhitekturi, koja će biti ostvariva uz očekivani tehnološki napredak.

4.5.1.2. Ravnina mrežnog operatora

Dvije su osnovne uloge SDR-a:

- fleksibilnost baznih postaja kao i mobilnih uređaja/terminala,
- stvaranje prilagodljivih mreža.

Radijske mreže su trenutno statične. Govorne usluge te ograničena količina podatkovnih usluga mogu se odašiljati i primati, a uređaji na oba kraja su fiksni u konfiguraciji i sposobnostima. SDR mijenja statičnu radijsku domenu u dinamički prilagodljive sustave.

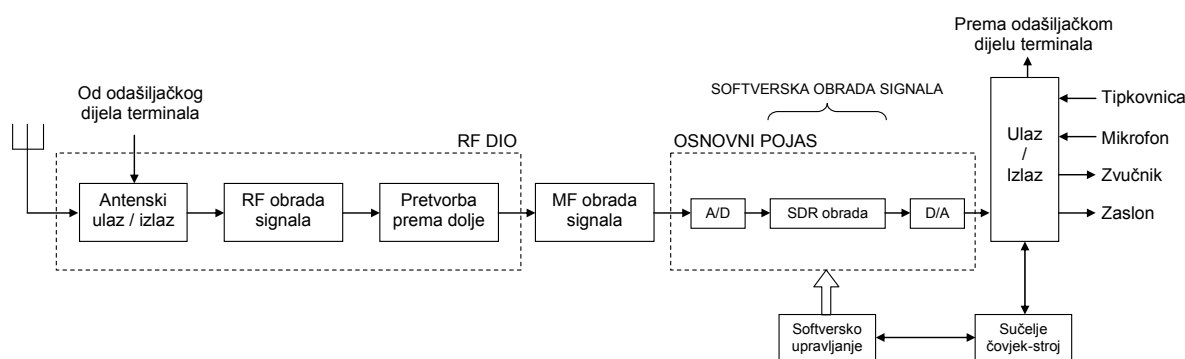
Današnje radijske mreže su kombinacija nekoliko normi od kojih svaka ima drugačiju arhitekturu i korištene frekvencije. S obzirom da bazne postaje i uređaji SDR-a imaju potencijal prilagoditi se postojećim normama, dovoljna je jedinstvena prilagodljiva mreža koja može udovoljiti promjenjivim uvjetima.

4.5.2. Koncepti softverskog radija

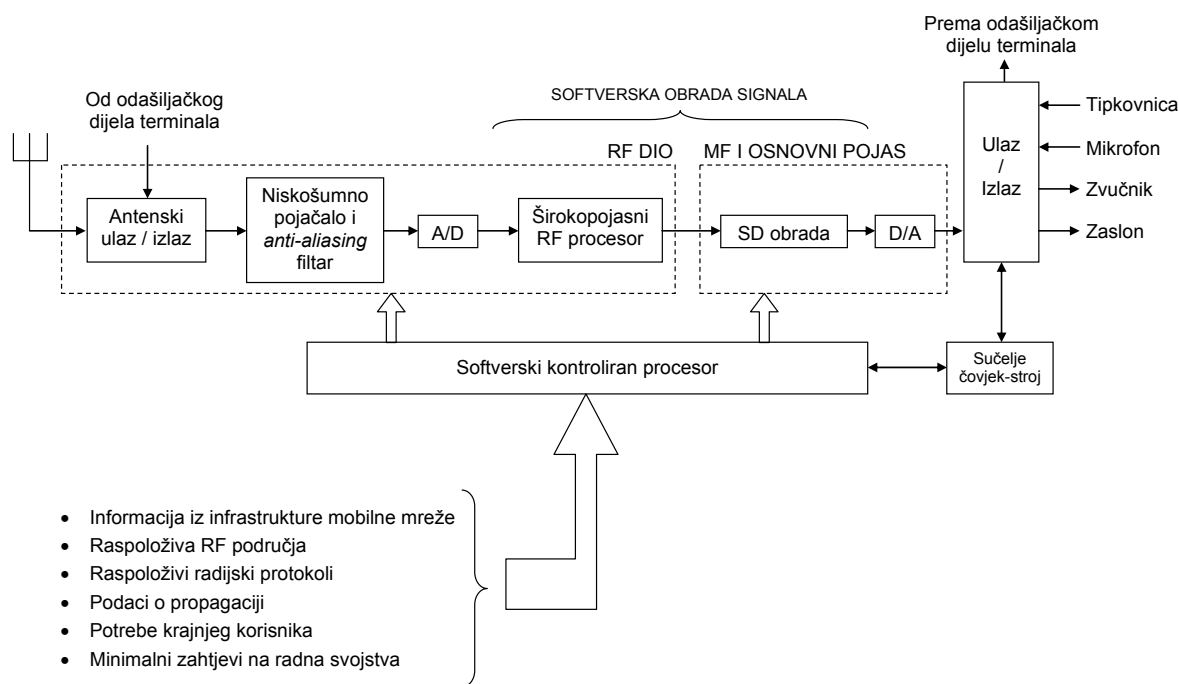
Slike 4.53. i 4.54. ilustriraju koncept softverskog radija, a zbog općenitog prikaza mogu se primijeniti i na komercijalni radijski uređaj i na arhitekturu bazne postaje. U primjeru na Slici 4.53. A/D

pretvorba smještena je poslije obrade signala u međufrekvencijskom području. Kao što je na slici naznačeno, obradu signala u osnovnom pojasu frekvencija kontrolira softver uz mogućnost ručnog namještanja koristeći korisničko sučelje. Ovaj primjer prikazuje arhitekturu SDR-a gdje obradu signala kontrolira softver. Pomicanjem A/D pretvorbe bliže antenskom sustavu, radio se približava idealnom SR-u. To je prikazano na Slici 4.54. koja ilustrira dva koncepta:

1. koncept SR-a s digitalizacijom u RF području blizu antenskog sustava;
2. koncept AI-SR-a.



Slika 4.53. Konceptijska definicija softverski definiranog radija (SDR).



Slika 4.54. Konceptijska definicija softverskog radija (SR) i prilagodljivoga inteligentnog softverskog radija (AI-SR)

Na Slici 4.54. A/D pretvorba smještena je odmah poslije niskošumnog pojačala i *anti-aliasing* filtra, tj. u RF dijelu uređaja. Ostatak obrade signala u RF i međufrekvencijskom području obavlja širokopojasni RF procesor. Nije prikazan srednji slučaj između arhitektura na slici 4.53. i 4.54. s izravnim pretvorbom iz osnovnog pojasa u RF, čime se eliminira analogna obrada signala u međufrekvencijskom području.

Može se očekivati da će u doglednoj budućnosti i dalje postojati potreba za analognim niskošumnim pojačalom u ulaznom dijelu prijamnika i analognim pojačalom snage u RF dijelu odašiljača. Stoga je idealni SR s A/D pretvorbom neposredno nakon antenskog sustava neizvediv u praksi, ali to je krajnji cilj razvoja tehnologije.

Slika 4.54. također ilustrira koncept AI-SR-a u kojem radio ima sposobnost prilagođavanja operativnom okruženju. RF procesor kontrolira snažni softverski kontrolirani procesor. Softverski kontrolirani procesor sadrži umjetnu inteligenciju i algoritme obrade signala omogućavajući sposobnost prilagodbe SR-a. U komercijalnim radijskim sustavima takva obrada signala potrebna je za postizanje dinamičke dodjele spektra, spektra s prekidima, spektra na zahtjev ili prilagodljivog upravljanja spektrom. Navedena sposobnost izuzetno je poželjan cilj, no istraživanje komponenti koje bi to omogućile tek je u začetku.

4.5.3. Realizacija SDR-a zahtjeva novu tehnologiju

Postojanje SDR-a ima brojne prednosti koje omogućavaju fleksibilnost uređaja i uključuju duboke promjene radijskih mreža. Međutim, nameće se pitanje isplativosti implementiranja SDR-a koristeći današnju tehnologiju. Bazne postaje mogu prihvatiti zahtjeve za fleksibilnošću te usvojiti SDR, ali problem nastaje na strani terminala, odnosno mobilnog uređaja, koji zbog različitih zahtjeva krajnjeg korisnika, disipacije snage, niskih troškova i veličine nameće potrebu razvoja nove tehnologije.

Iako se ciljevi i ograničenja baznih postaja i mobilnih uređaja međusobno razlikuju, postoji preklapanje razvoja njihove osnovne tehnologije.

4.5.4. Karakteristike i prednosti softverskog radija

Implementacija idealnog softverskog radija zahtjeva ili digitalizaciju odmah iza antenskog sustava, omogućavajući potpunu fleksibilnost u digitalnoj domeni, ili potpuno fleksibilnu pristupnu radijsku frekvenciju za upravljanje širokim rasponom frekvencija i modulacijskih shema. Idealni softverski radio još nije u potpunosti iskorišten u komercijalne svrhe zbog tehnoloških ograničenja i cijene.

SR osigurava fleksibilnu radijsku arhitekturu koja omogućava mijenjanje karakteristika radija, po mogućnosti u stvarnom vremenu, jamčeći pritom željenu kvalitetu usluge. Fleksibilnost arhitekture omogućava davateljima usluge nadogradnju infrastrukture i brzu implementaciju novih usluga. Fleksibilnost u arhitekturi hardvera u kombinaciji s fleksibilnošću u arhitekturi softvera osigurava mogućnost neprimjetnog integriranja SR-a u mreže s različitim radijskim i podatkovnim sučeljima. Nadalje, arhitektura SR-a pruža sustavu mogućnosti nadogradnje uz implementaciju u postojeći softver. Tipične nadogradnje mogu uključivati postupke poput smanjenja smetnje, šifriranje, raspoznavanje govora i kompresija, minimizacija snage i upravljanje, različiti protokoli adresiranja i sheme naprednog obnavljanja nakon pojave pogreške.

Pet je faktora ključno u prihvaćanju i širenju SR-a:

1. Višestruka funkcionalnost – razvojem mreža za kraće udaljenosti kao što je *Bluetooth* i WLAN, sada je moguće unaprijediti usluge radija davanjem prednosti drugim uređajima koji osiguravaju komplementarne usluge. Primjerice, telefaks uređaj opremljen *Bluetooth* tehnologijom može poslati telefaks bliskom prijenosnom računalu opremljenom SR-om koji podržava sučelje *Bluetooth*. Rekonfiguracijska sposobnost SR-a može podržati gotovo neizmjeran broj različitih usluga u sustavu.
2. Globalna mobilnost – danas postoji veliki broj različitih komunikacijskih normi. Potreba za transparentnošću, tj. mogućnosti radija da radi sa svim normama u različitim područjima svijeta potakla je razvoj koncepta SR-a. Vojne usluge također se susreću sa sličnim problemom nekompatibilnosti radijskih normi koje postoje između vojnih ogranaka kao i unutar njih.
3. Kompaktnost i djelotvornost snage – SR ima kompaktnu arhitekturu jer se isti dio hardvera koristi za implementaciju višestrukih sustava i sučelja.
4. Lakoća proizvodnje - RF komponente teško je normirati i mogu imati različite izvedbene karakteristike. Optimizacija komponenti može potrajati nekoliko godina i time odložiti uvođenje proizvoda. Općenito, digitalizacija signala na početku prijamnog lanca može rezultirati arhitekturom sa značajno manje komponenti.
5. Lakoća nadogradnje – fleksibilna arhitektura omogućava poboljšanja i dodatne funkcionalnosti bez troška zamjene svih jedinica ili korisničkih terminala. Integriranjem novih uređaja u postojeću infrastrukturu, SR omogućava novim uređajima, od radijskog sučelja do namjenskih programa, povezanost s mrežom.

Korisnici očekuju uporabu jednog uređaja u svim područjima, što je moguće samo rekonfiguracijom prijavnika i podrškom za norme korištene u pojedinom području. Dinamičkim dohvatom (*download*) i obnavljanjem softvera, koje bi se provodilo u skladu s definiranom normom, omogućit će se brza implementacija softverske nadogradnje i nove primjene.

4.5.5. Načela projektiranja SDR-a

Prednost SDR-a je fleksibilnost, potpuna i lagana rekonfiguracija te skalabilnost. Važno je osigurati navedene osobine u konačnom proizvodu. U nastavku slijedi procedura generičkog projektiranja SR-a:

Korak 1: Planiranje sustava (*Systems Engineering*) – uzimanjem u obzir ograničenja i zahtjeve komunikacijske veze i mrežnog protokola omogućava se dodjela dovoljnih resursa za uspostavljanje usluge. Primjerice, ograničenja dosega i odašiljačke snage ograničavaju vrste modulacije i brzinu prijenosa podataka. Za dobro definiranu normu planiranje sustava je većinom unaprijed definirano poput protokola usmjeravanja. Doduše, ako je dozvoljena dodatna fleksibilnost u definiranju mreže, planiranje sustava i optimizacija postaju složeniji. U idealnom SR-u, koji ima mogućnost mijenjanja većeg broja parametara sustava u stvarnom vremenu, optimizacija aktivne komunikacijske sjednice veliki je izazov.

Korak 2: Planiranje RF lanca – idealni RF lanac za SR trebao bi uključiti istodobnu fleksibilnost u odabiru dobitka snage, širine pojasa, središnje frekvencije, osjetljivosti i dinamičkog opsega. Postizanje fleksibilnosti je nepraktično te su potrebni ustupci. Izvedbom SR-a moguće je u digitalnom području kompenzirati neke nedostatke RF komponenti. Kompenzacija nelinearnosti pojačala snage ili upravljanje snagom RF stupnja može se provesti u digitalnom području.

Korak 3: Odabir analogno-digitalne i digitalno-analogne pretvorbe – za idealni SR teško je postići analogno-digitalnu i digitalno-analognu pretvorbu te u praksi ona zahtijeva ustupke u potrošnji snage, dinamičkom opsegu i širini pojasa (frekvenciji uzorkovanja). Odabir A/D i D/A pretvorbe usko je povezano s dinamičkim opsegom i pretvorbom frekvencije.

Korak 4: Odabir arhitekture softvera – arhitektura softvera važna je za osiguravanje održivosti, proširenja, kompatibilnosti i skalabilnosti SR-a. U idealnom slučaju bi arhitektura trebala omogućavati neovisnost hardvera korištenjem prikladnog sučelja između softvera koji je orijentiran prema primjenama i hardvera. Kako bi se osigurala kompatibilnost i maksimalno iskoristili hardverski resursi, softver mora biti svjestan hardverskih mogućnosti na oba kraja veze. SR mora kontrolirati probleme

poput upravljanja pogreškama i adresiranja bez obzira na korišteni protokol. Još jedna od važnih točaka u arhitekturi softvera je sigurnost te prava (ovlaštenost) za njegovu uporabu.

Korak 5: Odabir arhitekture hardvera za obradu digitalnog signala – osnovni hardver za obradu digitalnog signala može se implementirati pomoću mikroprocesora FPGA (*Field Programmable Gate Array*) ili ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*). Tipični mikroprocesori nude maksimalnu fleksibilnost, najvišu potrošnju snage i najnižu brzinu, dok mikroprocesori ASIC osiguravaju minimalnu fleksibilnost, najnižu potrošnju snage i najvišu brzinu. S druge strane, mikroprocesori FPGA svojim karakteristikama su između mikroprocesora ASIC i tipičnih mikroprocesora DSP (*Digital Signal Processor*). Odabir osnovnih elemenata ovisi o algoritmima i njihovim zahtjevima. U praksi će SR koristiti sva tri osnovna elementa (FPGA, ASIC i DSP), a izbor će ovisiti o podržanoj primjeni.

Korak 6: Potvrđivanje ispravnosti radija (*Radio Validation*) – ovo je vjerojatno najteži korak. Uz osiguravanje ispravnog komuniciranja jedinica, važno je osigurati rad bez pogrešaka koje mogu dovesti do potpunog prestanka rada sustava. Uz brojne promjenjive parametre SR-a i želju za otvorenim i promjenjivim izvorom softverskih modula, teško je osigurati sustav potpuno otporan na kvar (*fail-proof*). Ispitivanja i provjere sustava pomažu smanjenju rizika od prestanka rada sustava.

4.6. Spoznajni radio i napredne metode dodjele i planiranja spektra

Spoznajni radio (*cognitive radio*) predstavlja novi pristup za djelotvorniju uporabu radiofrekvencijskog spektra kao ograničenoga prirodnog resursa. Spoznajni radio se temelji na softverskom radiju (detalji u odjeljku 4.5.) i umjetnoj inteligenciji. Spoznajni radio je inteligentni radijski komunikacijski sustav koji je svjestan svoje okoline te koristi postupak učenja iz svoje okoline i sposoban je prilagođavati svoje tehničke značajke statističkim promjenama ulaznih parametara. Osnovni ciljevi spoznajnog radija su djelotvorna uporaba radiofrekvencijskog spektra i ostvarivanje pouzdane komunikacije između izvora i odredišta u svakom trenutku, kad i gdje je to potrebno.

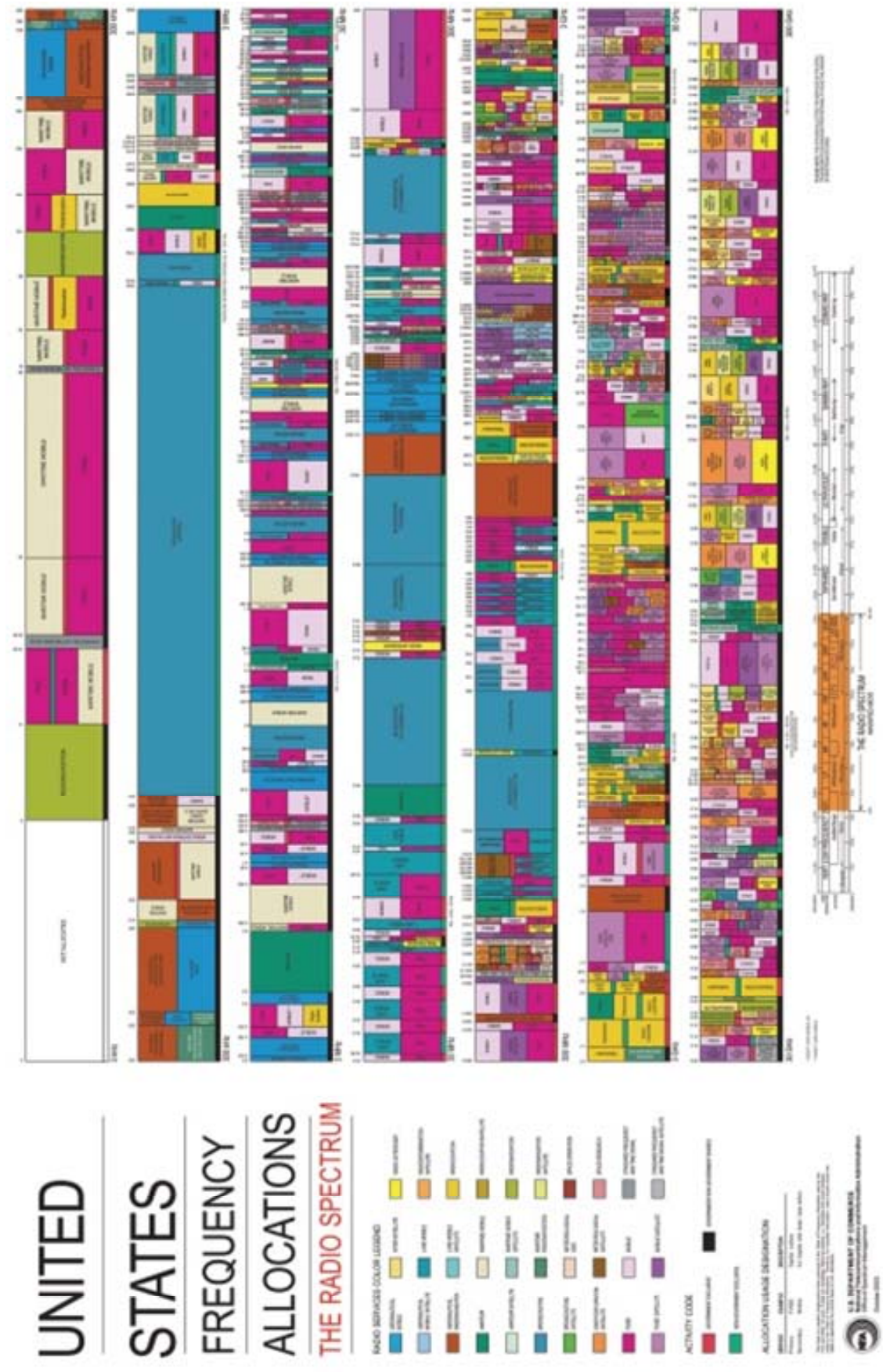
4.6.1. Uvodni pojmovi

Radiofrekvencijski spektar raspodijeljen je u skladu s tablicama namjene za uporabu u različitim radiokomunikacijskim službama. Tablice namjene donose države na svjetskoj radiokomunikacijskoj konferenciji i regionalnoj europskoj razini. Međunarodnim tablicama namjene radiofrekvencijski spektar je namijenjen za radiokomunikacijske službe do 1000 GHz. Na temelju međunarodnih

tablica namjene, administracije donose nacionalne tablice namjene, koje su u najvećoj mjeri usklađene s međunarodnim tablicama. Razne radiokomunikacijske službe mogu rabiti frekvencije na primarnoj ili sekundarnoj osnovi, prema utvrđenim pravilima i tehničkim uvjetima. Nadalje, dijelovi frekvencijskog spektra dodijeljeni nekoj službi dijele se na radijske kanale i raspodjeljuju se za uporabu u jednoj ili više zemalja, odnosno zemljopisnih područja, kroz odgovarajući međunarodni plan raspodjele frekvencija.

Na nacionalnoj razini, najčešće postoji državno tijelo koje uz nacionalnu tablicu namjene i plan dodjele, dodjeljuje radijske kanale na uporabu korisnicima, odnosno radijskim postajama prema točno utvrđenim uvjetima. U Republici Hrvatskoj radijski se kanali dodjeljuju korisnicima uglavnom do frekvencije od 40 GHz. Stanje u drugim zemljama je u velikoj mjeri slično, osim što se gornja granica praktične komercijalne uporabe radijskih frekvencija mijenja od 20 GHz do 60 GHz. Komunikacijski sustavi koji rade na visokim frekvencijama omogućavaju prijenos informacija velikim brzinama, ali nose sa sobom veliki broj tehničkih, tehnoloških i praktičnih problema koji otežavaju uporabu visokih frekvencija i poskupljuju radijske uređaje. Dodatno, tu su i problemi propagacije radijskih valova na visokim frekvencijama zbog čega se pouzdani komunikacijski kanal može ostvariti na relativno malim udaljenostima između krajnjih postaja.

Zbog sve većeg interesa za radijskim komunikacijskim sustavima, posebice zbog potrebe za mobilnošću i prijenosom velikih količina informacija, postoji stalna tendencija povećavanja gornje granice uporabe radijskih frekvencija. Taj trend već je dugo prisutan u radijskim komunikacijama i na neki način predstavlja bježanje od problema ograničenosti frekvencijskog spektra, kojeg postajemo sve više svjesni. Problem je u tome što slobodnih radijskih frekvencija ima sve manje, a raspoložive frekvencije ograničene su zahtjevnim tehničkim uvjetima uporabe, Slika 4.55. Ako s druge strane pogledamo dodijeljene radijske kanale primarnim korisnicima na nižim frekvencijama, lako se može uočiti da koeficijent iskoristivosti tih frekvencija rijetko prelazi 30 %. To znači da su fiksno dodijeljene radijske frekvencije u više od 70 % vremena i prostora neiskorištene. Ako postoji način da se iskoristi taj skriveni potencijal dodijeljenih, a neiskorištenih frekvencija, otvara se značajan prostor za razvoj novih primjena radijskih komunikacija, i to u puno atraktivnijim frekvencijskim pojasevima od vrlo visokih frekvencija.



Slika 4.55. Ilustracija problema raspoloživosti frekventijskog spektra (primjer iz SAD-a)

U ovom poglavlju opisat će se nova istraživanja u području djelotvorne uporabe frekvencijskog spektra, te će se navesti moguće nove primjene. Pored toga, uvest će se pojam frekvencijskih praznina (bijeli prostori ili engl. *white spaces / spectrum gap*) te će pobliže biti prikazane mogućnosti značajnog povećanja iskoristivosti uporabe radijskih frekvencija zasnovanog na sekundarnoj dodjeli radijskih kanala kroz koncept spoznajnog radija. Spoznajni radio predstavlja novi pristup djelotvornije uporabe radiofrekvencijskog spektra kao ograničenog prirodnog resursa. Spoznajni radio temelji se na razvoju čitavog niza naprednih tehnologija, posebice na softverskom radiju, inteligentnoj obradi digitalnog signala, strojnom učenju i umjetnoj inteligenciji. Razlike između softverskog, spoznajnog i konvencionalnog radija prikazane su u Tablicama 4.3. i 4.4.

Koncept softverskog radija izložen je relativno nedavno. Od tada su istraživanja i razvoj tehnologija vezanih uz softverski radio pobudila dosta interesa i pažnje u vojnoj i civilnoj industriji, te u znanstvenim krugovima. S. Haykin u svom članku: "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", objavljenom u časopisu IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Vol. 23, No. 2, February 2005, str. 201-220), predstavlja model spoznajnog radija i uvodi temperaturu smetnje kao mjeru zauzetosti radijskih frekvencija i aktivnosti radiokomunikacijskih izvora. S druge strane, A.N. Mody i sur. u članku "Network-centric Military Communications, Recent Advances in Cognitive Communications", objavljenom u časopisu IEEE Communications Magazine (October 2007, str. 54-61), predstavljaju napretke u istraživanju spoznajnog radija pri čemu je naglasak stavljen na digitalnoj obradi signala i napretku strojnog učenja u svrhu omogućavanja dinamičkog pristupa radijskim frekvencijama. Teorijski prometni kapacitet radijskih sustava, zasnovanih na spoznajnom radiju, istražen je u članku "The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical Perspective", kojega su objavili S. Srinivasa i S.A. Jafaru u časopisu IEEE Communications Magazine (May 2007, str. 73-79). Nadalje istražen je utjecaj omjera broja primarnih korisnika s fiksnom dodjelom kanala i sekundarnih korisnika s dinamičkom dodjelom kanala zasnovanoj na spoznajnom radiju na ukupni ostvareni informacijski promet u mreži.

Tablica 4.3. Razlike između konvencionalnog, softverskog i spoznajnog radija u odnosu na način primjene

RAZLIKE U ODNOSU NA NAČIN PRIMJENE		
Konvencionalni radio	Softverski radio	Spoznajni radio
Podržava fiksni broj sustava	Dinamička podrška za više promjenjivih sustava, protokola i sučelja	Može samostalno stvoriti nove valne oblike
Rekonfigurabilnost određena prilikom projektiranja	Sučelje s različitim sustavima	Može podržavati rad s novim sučeljima
Može podržati višestruke usluge, koje su određene prilikom projektiranja	Osigurava veliki broj usluga s promjenjivom kvalitetom usluge	Prilagođava rad sustava kako bi postigao traženu kvalitetu usluge prema zahtjevima određene primjene

Tablica 4.4. Razlike između konvencionalnog, softverskog i spoznajnog radija u odnosu na način projektiranja

RAZLIKE U ODNOSU NA NAČIN PROJEKTIRANJA		
Konvencionalni radio	Softverski radio	Spoznajni radio
Tradicionalno RF projektiranje	Poboljšani konvencionalni radio	Poboljšani SDR
Tradicionalno projektiranje osnovnog pojasa	Softverska arhitektura	Inteligencija
	Rekonfigurabilnost	Svjesnost
	Jednostavna nadogradnja	Učenje
		Promatranje

U drugom dijelu ovog poglavlja dan je pregled načina dodjele radijskih frekvencija koje variraju u svojoj složenosti i djelotvornosti iskorištenja. U trećem odlomku opisan je koncept spoznajnog radija, te način iskorištavanja frekvencijskih praznina za sekundarnu dodjelu radijskih frekvencija. Prikazana je sekundarna dodjela radijskih frekvencija na konkretnom primjeru UMTS sustava kao primarne usluge i spoznajnog radija kao sekundarne usluge. U zaključnom dijelu poglavlja predstavljene su prednosti spoznajnog radija, regulatorni izazovi koji se javljaju te glavni smjerovi nastavka istraživanja na razvoju spoznajnog radija.

4.6.2. Načini dodjele radijskih frekvencija

Kod radijskih komunikacijskih sustava upravljanje radijskim frekvencijama i kontroliranje smetnji najvažniji je element u povećanju kapaciteta mreže i prihoda operatora. Učinkovitost uporabe radiofrekvencijskih kanala od vitalnog je značaja za funkcioniranje i ekonomičnost sustava. Pri tome se nastoji postići prijenos što veće količine informacijskog prometa, odnosno spajanje što većeg broja korisnika uz što manji "utrošak" radijskih frekvencija. Smetnje uslijed istokanalnih signala i signala iz susjednih kanala potrebno je zadržati ispod razine koja bi ugrozila željenu kvalitetu usluge.

Radiofrekvencijski spektar dodijeljen jednom operatoru najčešće je nepromjenjiv i ovisan je o administrativnoj odluci državnog regulatornog tijela. Pravi zadatak planiranja radiofrekvencijskog spektra sastoji se u načinu najbolje iskoristivosti tog raspoloživog resursa u povećanju kapaciteta mreže i prihoda operatora. Pažljivom primjenom naprednih postupaka frekvencijskog planiranja može se kod radijskih komunikacijskih sustava postići višestruko povećanje prenesenog informacijskog prometa uz isti raspoloživi spektar.

Slobodno se može reći da je kvaliteta današnjih radiokomunikacijskih sustava prije svega ograničena smetnjama, a ne šumom. Pri planiranju nije cilj izbjeći smetnje, jer bi tako planiran sustav radio daleko ispod svojih mogućnosti odnosno, iskorištenje dodijeljenih radijskih frekvencija ne bi bilo učinkovito. Potrebno je pravilno izbalansirati sustav, tako da se i uz nazočnost smetnji ipak dobivaju zadovoljavajući rezultati.

Načini dodjeljivanja radijskih kanala u neke radiokomunikacijskom sustavu mogu se podijeliti na tri osnovna algoritma:

- **Fiksno dodjeljivanje kanala** – taj način dodjeljivanja kanala je najjednostavniji i on se često rabi u konkretnim sustavima. Kod takvog algoritma radijski kanali su dodijeljeni baznim postajama na temelju procjene prometa prilikom planiranja sustava i u načelu se ta raspodjela ne mijenja tijekom dužeg vremenskog razdoblja. Takve mreže imaju prednost u svojoj jednostavnosti, ali su nefleksibilne i vrlo često ne funkcioniraju optimalno.
- **Hibridno dodjeljivanje kanala** – takvi sustavi su kompromisno rješenje između fiksnog i dinamičkog dodjeljivanja radijskih kanala. U takvom slučaju dio radijskih kanala fiksno je dodijeljen baznim postajama u širokopojasnoj radijskoj mreži, dok se ostatak radijskih kanala raspoređuje dinamički u sustavu analizom trenutne prometne situacije. Takav sustav ne postavlja velike zahtjeve na sustav upravljanja, ali ipak pruža određenu fleksibilnost sustava i omogućava mu približavanje idealnom rasporedu kanala koji

smanjuje smetnje na najnižu moguću razinu pa omogućava rješavanje trenutnih prometnih problema.

- **Dinamičko dodjeljivanje kanala** – taj način dodjeljivanja kanala obavlja analizu prometa u sustavu u stvarnom vremenu te se ovisno o trenutnoj opterećenosti pojedinih dijelova mreže dodjeljuju radijski kanali. Osnovna ideja je dodijeliti više kanala gdje je veći promet u mreži, a manje tamo gdje je manji promet. Teorijski takav algoritam izgleda idealan, ali je problem što je implementacija takvoga sustava najčešće presložena s obzirom na mogućnosti sustava (takav sustav je možda učinkovit, ali je vrlo često i skup). Ovakvi postupci postavljaju velike zahtjeve na računarski sustav koji treba u stvarnom vremenu analizirati sva zbivanja u sustavu. Sustavi s dinamičkim dodjeljivanjem kanala mogu biti centralizirani ili distribuirani. Kod radiokomunikacijskih sustava s vremenskom podjelom, dinamičko dodjeljivanje resursa može se raditi i na razini paketa.

4.6.3. Spoznajni radio

Spoznajni radio je inteligentni radijski komunikacijski sustav koji je svjestan svoje okoline, koristi postupak učenja iz svoje okoline i sposoban je prilagođavati svoje tehničke značajke statističkim varijacijama ulaznih parametara. Osnovni ciljevi spoznajnog radija su:

- utvrđivanje trenutno neiskorištenog frekvencijskog spektra,
- učinkovita uporaba radiofrekvencijskog spektra i,
- ostvarivanje pouzdane komunikacije između izvora i odredišta u svakom trenutku kada i gdje je to potrebno.

Niska iskorištenost elektromagnetskog spektra dovodi do razmišljanja o pojavi frekvencijskih praznina koje možemo definirati kao frekvencijski pojas dodijeljen primarnom korisniku spektra koji nije u uporabi u određenome vremenskom trenutku i na određenomu zemljopisnom položaju. Djelotvornost uporabe radijskih frekvencija može se značajno poboljšati ako se omogući sekundarnom korisniku spektra pristup tima frekvencijskim prazninama.

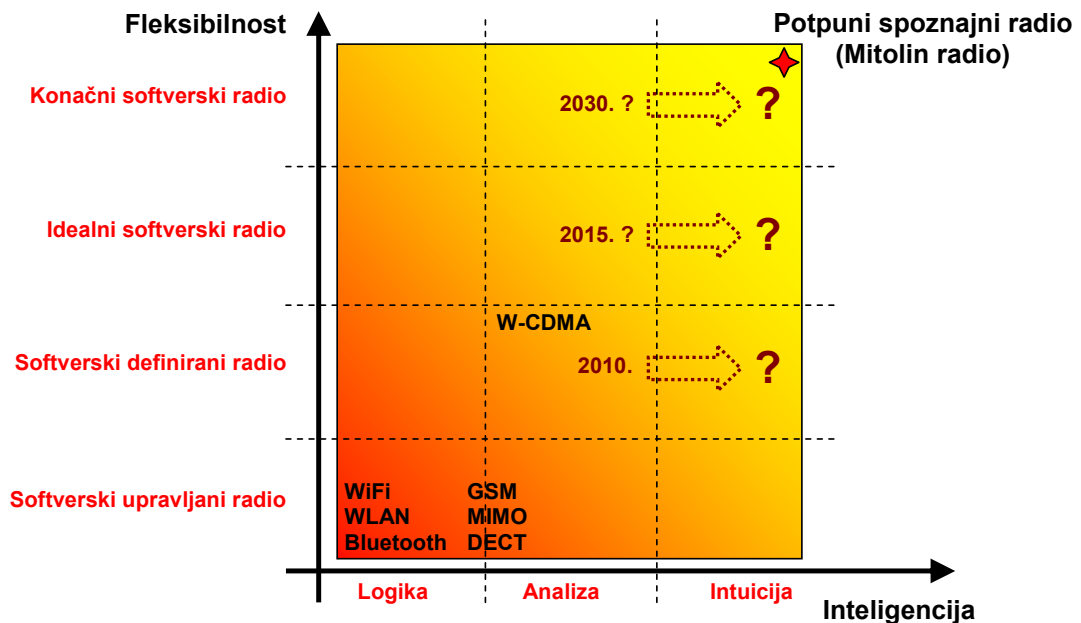
Šest ključnih riječi pojavljuje se kada govorimo o spoznajnom radiju:

- svjesnost,
- inteligencija,
- učenje,
- prilagodljivost,

- pouzdanost i,
- učinkovitost.

Implementacija navedene kombinacije sposobnosti danas je moguća zahvaljujući napretku u obradi signala, umrežavanju (*networking*), strojnom učenju (*machine learning*), softveru i hardveru. Uz spomenute spoznajne sposobnosti, spoznajni radio omogućava i rekonfigurabilnost. Rekonfigurabilnost omogućava platforma SDR na koju je nadograđen spoznajni radio. SDR je današnja stvarnost zahvaljujući konvergenciji dviju ključnih tehnologija: digitalnom radiju i softveru.

Pojam spoznajni radio uveo je Joseph Mitola 1999. godine opisujući spoznajni radio kao način za unaprjeđenje fleksibilnosti osobnih radijskih usluga. Spoznajni radio rabi tehnologiju softverskog radija kako bi ostvario potrebnu fleksibilnost u prilagođavanju tehničkih značajki. Za ostvarivanje spoznajne funkcije spoznajni radio rabi postupke umjetne inteligencije i strojnog učenja. Ovisno o stupnju fleksibilnosti, odnosno razini umjetne inteligencije, spoznajni radio može biti različite razvojne razine, kao što je prikazano na Slici 4.56.



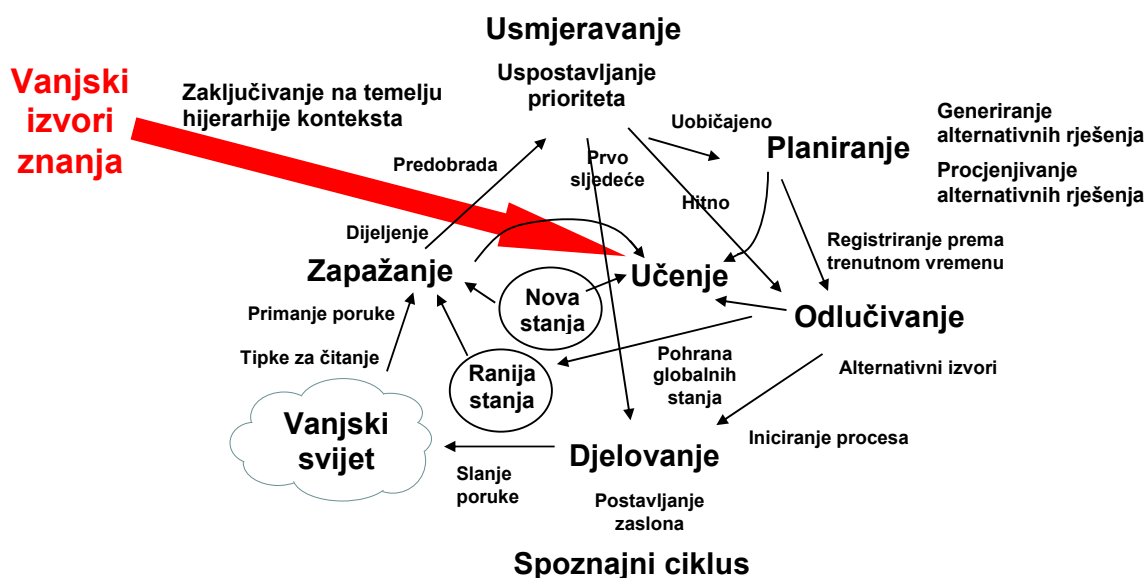
Slika 4.56. Razvojne razine spoznajnog radija

Iako tehnologija spoznajnog radija puno obećava u povećanju iskoristivosti radijskih frekvencija i lakoći primjene za korisnike, ona predstavlja radikalni odmak od klasičnog načina regulacije i upravljanja radijskim frekvencijama. Postoji još čitav niz zahtjevnih zadataka i izazova s tehničke i regulatorne strane kako bi spoznajni radio bio moguć.

Kako bi ostvarivao svoju ulogu, spoznajni radio treba ostvarivati tri osnovne funkcije:

- analizu radijske okoline na temelju raspoloživih podataka o primarnim korisnicima radiofrekvencijskog spektra; mjerenja trenutne uporabe radijskih frekvencija kako bi pravodobno utvrdio postojanje i zakonitosti pojavljivanja frekvencijskih praznina;
- utvrđivanje propagacijskih svojstava radijskog kanala, djelotvornih putova prospajanja, te informacijskog kapaciteta kanala između informacijskog izvora i odredišta;
- usklađena promjena karakteristika odašiljača i prijavnika, te dinamičko dodjeljivanje radijskih kanala, kako bi se na djelotvoran i pouzdan način ostvarila željena komunikacija.

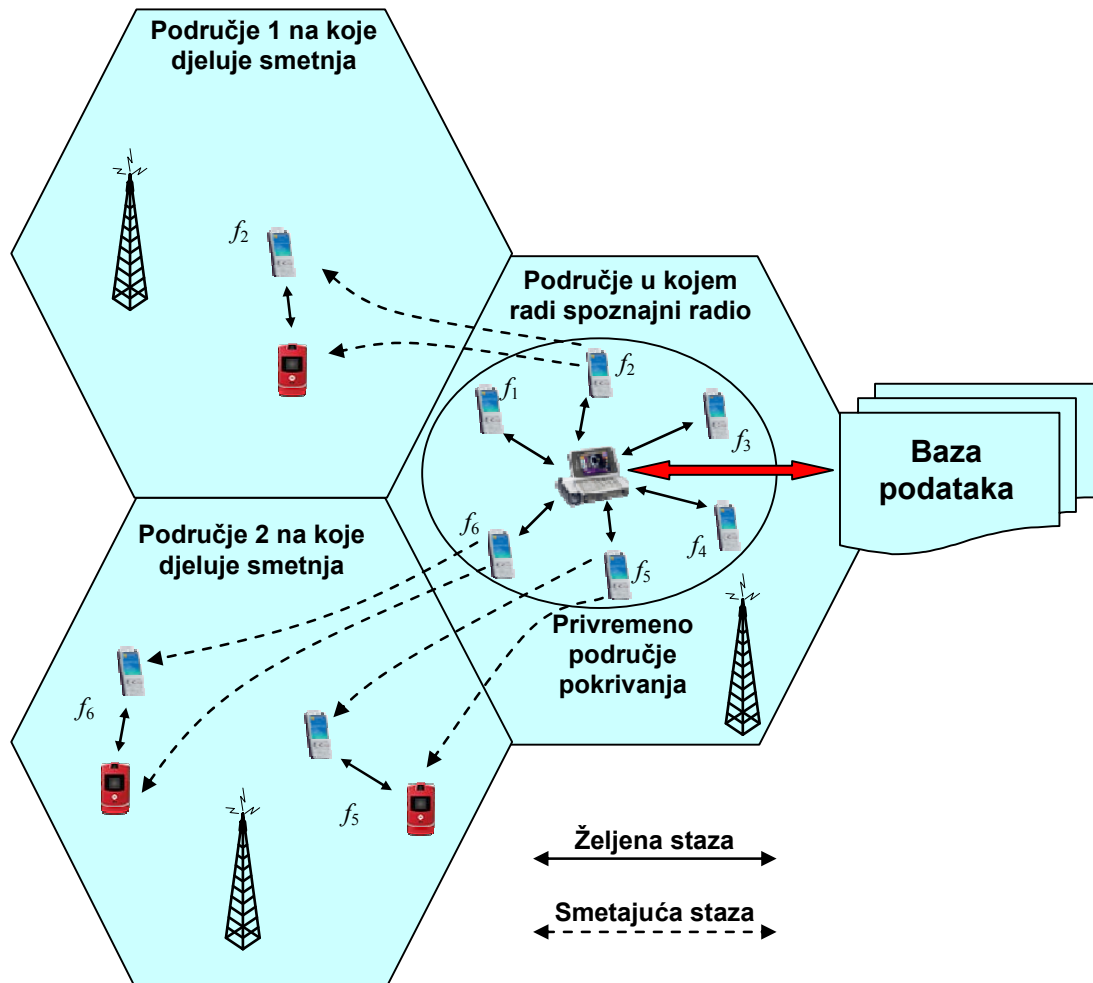
Spoznajni radio, ovisno o svojem stupnju razvoja, može imati osam različitih spoznajnih razina: od unaprijed programiranog radijskog uređaja do potpuno intuitivnog uređaja koji predviđa korisnikove potrebe i samostalno djeluje. Osnovne upravljačke funkcije spoznajnog radija prikazane su na Slici 4.57.



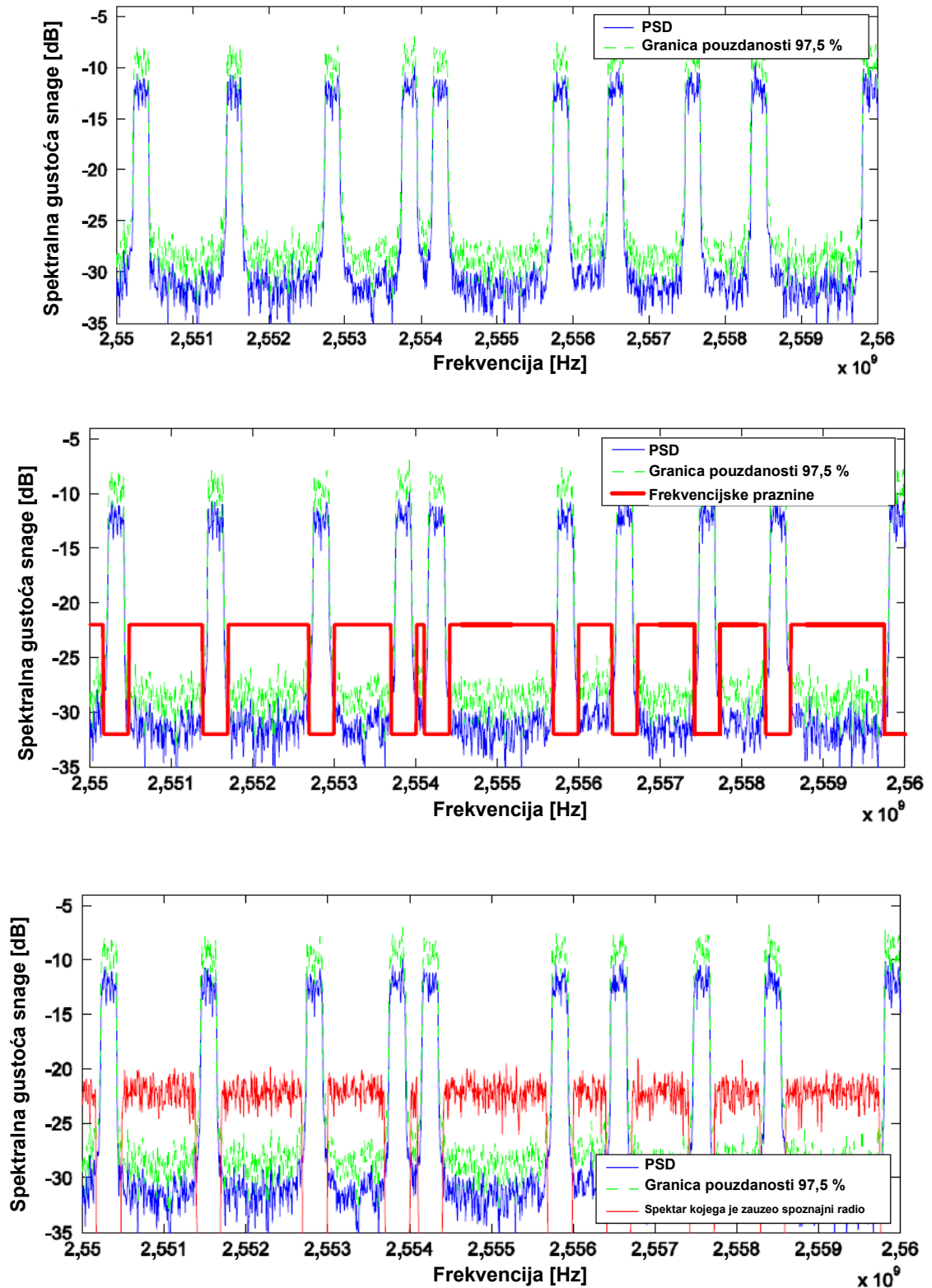
Slika 4.57. Osnovne upravljačke funkcije spoznajnog radija

Spoznajni radio dobiva podatke o svojoj okolini kroz promatranje i signalizaciju. Te informacije se obrađuju, klasificiraju i procjenjuju s obzirom na njihovu važnost i sadržaj. Na temelju toga spoznajni radio utvrđuje moguće opcije djelovanja i donosi odluku koja donosi najveći kumulativni prinos. Na temelju te odluke, spoznajni radio mijenja svoje značajke, koje rezultiraju promjenama u njegovoj okolini. Kao važan dio tog procesa, spoznajni radio koristi rezultate promatranja, odluka i posljedice mijenjanja značajki kako bi učio i usavršio svoje ponašanje u budućim ciklusima. Na Slici

4.58. prikazan je model koegzistencije primarnog mobilnog sustava treće generacije i sekundarnog sustava temeljenog na načelu spoznajnog radija. Za utvrđivanje frekvencijskih praznina spoznajni radio rabi baze podataka izdanih dozvola primarnim korisnicima spektra, kao i mjerne podatke mreže osjetila. Na temelju toga, spoznajni radio utvrđuje svoje operativne osobine, a da pri tome ne uzrokuje neželjenu razinu smetnji primarnom sustavu.



Slika 4.58. Model koegzistencije primarnog sustava i spoznajnog radija



Slika 4.59. Primjer načina rada komunikacijskog sustava zasnovanog na spoznajnom radiju, PSD – spektralna gustoća snage (*Power Spectral Density*)

Na Slici 4.59. prikazan je način rada komunikacijskog sustava zasnovanog na načelu spoznajnog radija na temelju analize autora A. Shukla i sur., "Cognitive Radio Technology", Studija QinetiQ za OFCOM iz veljače 2007. godine. Zbog povoljnih svojstava propagacije većina istraživanja praktične mogućnosti primjene spoznajnog radija usmjerena je na frekvencijski pojas od 300 MHz do 3 GHz. U konkretnom primjeru radi se o frekvencijskom području 2,5 – 2,69 GHz namijenjenom za proširenje mobilnih sustava treće generacije. Na prvom dijagramu na Slici 4.59. prikazan je spektrogram mobilnog sustava treće generacije koji radi kao primarna radijska usluga u tom frekvencijskom području. Na temelju analize radijske okoline, spoznajni radio pronalazi moguće frekvencijske praznine koje su prikazane na drugom dijagramu na Slici 4.59. Identifikacija frekvencijskih praznina temelji se na neparаметarskoj analizi spektralne gustoće snage. Radi sigurnosti utvrđivanja frekvencijskih praznina, utvrđena je spektralna maska za koju možemo tvrditi da će stvarni signal biti unutar te maske s pouzdanošću od 97,5 %. Kada su utvrđene frekvencijske praznine, spoznajni radio procjenjuje kapacitet prijenosa između pojedinih točaka mreže te izračunava osobine propagacijskog kanala između izvora i odredišta. Na temelju tih analiza spoznajni radio definira svoje tehničke osobine i generira ortogonalne podatkovne nosioce koji na najbolji način iskorištavaju frekvencijske praznine kako je to prikazano na trećem dijagramu na Slici 4.59.

4.6.4. Zaključna razmatranja

U ovom poglavlju prikazani su elementi i način rada spoznajnog radija. Spoznajni radio predstavlja novu tehnologiju temeljenu prije svega na mogućnostima softverskog radija koji omogućava fleksibilnost radijskih uređaja i umjetnoj inteligenciji koja utvrđuje slobodni frekvencijski prostor i omogućava djelotvornu uporabu radijskih frekvencija. Osnovna osobina spoznajnog radija je činjenica da je on svjestan svoje okoline te da se fleksibilno prilagođava kako bi ostvario komunikacijske potrebe svog vlasnika. Prednosti spoznajnog radija su u prvoj mjeri povećana iskoristivost radijskih frekvencija i spajanje svih komunikacijskih uređaja u jedan. Ta tehnologija omogućava uvođenje novih usluga u frekvencijskim područjima od 300 MHz do 3 GHz, koja su do sada smatrana već dodijeljenima i zauzetima. Spoznajni radio u tom smislu predstavlja značajan tehnološki iskorak i radikalni odmak od klasičnog načina regulacije i upravljanja radijskim frekvencijama.

S regulatornog aspekta spoznajni radio predstavlja značajni izazov jer traži od regulatornih tijela veću fleksibilnost u dodjeli radijskih frekvencija i ukidanje dosadašnje prakse fiksne namjene frekvencijskog spektra i dodjele radijskih frekvencija jednom korisniku u jednom zemljopisnom području. S druge strane

uvođenje spoznajnog radija zahtijevati će uvođenje ažurne baze podataka o primarnim korisnicima te definiranje pravilnika kojim će biti utvrđeni postupci i tehnički kriteriji koje trebaju poštovati primarni i sekundarni korisnici radijskih frekvencija.

Iako je primjena cjelokupnog koncepta spoznajnog radija, koji je intuitivan i u potpunosti fleksibilan, idealistična i vjerojatno se neće ostvariti u idućih dvadesetak godina, možemo očekivati da će se već u idućih pet godina pojaviti radijski uređaji koji će moći inteligentno prilagođavati fizički sloj koristeći koncept spoznajnog radija. Očito je da se radi o konceptu i tehnologiji sa značajnim potencijalom koja može omogućiti velike napretke u primjenama radijskih komunikacija, poglavito u svezi s načinom dodjele i uporabe radijskih frekvencija.

4.7. Tehnologija iBurst

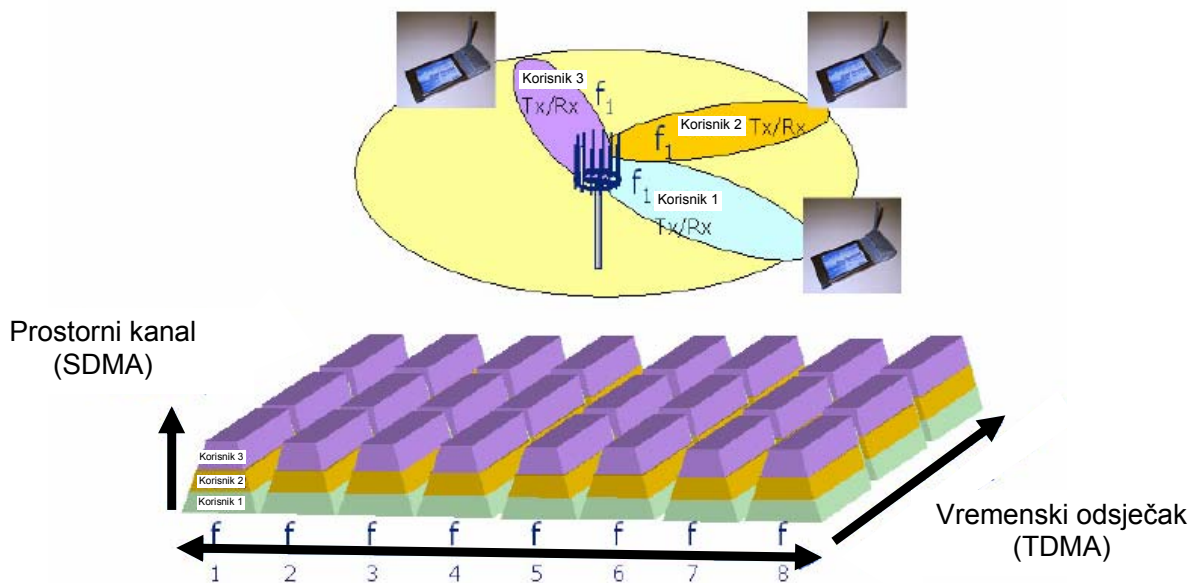
4.7.1. Temeljne značajke tehnologije iBurst

Savez ATIS (*Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) je 2005. godine normirao radijsko sučelje HC-SDMA (*High Capacity Spatial Division Multiple Access*) za širokopojasni radijski pristup koji je pripremio pododbor *Wireless Wideband Internet Access* koji djeluje unutar odbora WTSC (*Wireless Technology and Systems Committee*). Sučelje HC-SDMA osigurava širokopojasnu radijsku povezanost fiksnima, prijenosnim i mobilnim uređajima. Protokol je projektiran za implementaciju s tehnikama inteligentnih antena kako bi se postupno poboljšalo radiofrekvencijsko pokrivanje, kapacitet i izvedba za sustave.

Sučelje HC-SDMA radi na sličnom načelu kao i GSM ili CDMA2000 za mobilne uređaje, s prebacivanjem između HC-SDMA ćelija, osiguravajući korisnicima širokopojasni radijski pristup čak i kada se kreću automobilom ili vlakom.

Protokol definira radiofrekvencijske karakteristike baznih postaja i korisničkih uređaja (npr. razinu izlazne snage, prijenosne frekvencije, oblikovanje impulsa, neželjeno zračenje unutar i izvan frekvencijskog pojasa, osjetljivost i selektivnost prijarnika), strukturu prijenosnih okvira za silazni i uzlazni promet, pozivanje i odašiljanje prometa te definira modulacijski postupak. Protokol opisuje različite logičke kanale i njihovu ulogu u uspostavljanju komunikacije putem radijske veze te određuje procedure u slučaju pojavljivanja pogreške.

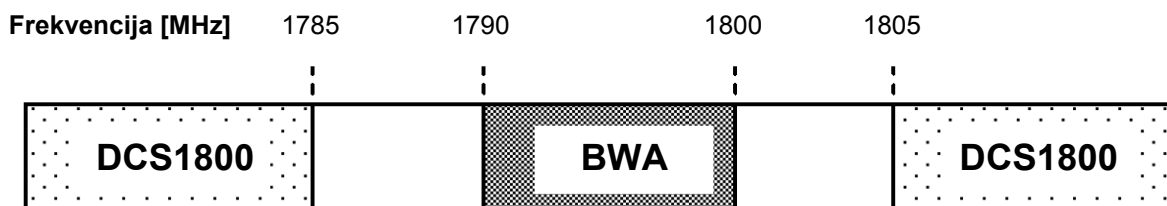
U siječnju 2006. godine, radna skupina Mobile Broadband Wireless Access Working Group, koja radi na razvoju IEEE norme 802.20, usvojila je prijedlog za tehnologiju koja uključuje uporabu norme HC-SDMA uz korištenje TDD (*Time Division Duplex*) s više nosilaca (*multi-carrier*) širine 625 kHz, Slika 4.60.



Slika 4.60. Načelo rada sustava HC-SDMA

Širokopojasni radijski internetski sustav iBurst, koji radi u frekventijskom području 1785–1805 MHz, koristi opisano sučelje HC-SDMA, adaptivne antenske nizove te ostale tehnologije za postizanje velikih brzina prijenosa, velikog kapaciteta i izvrsne prenosivosti. Tehnologija iBurst olakšava širokopojasni pristup Internetu u bilo koje vrijeme i s bilo kojeg mjesta te omogućava neprekinuti prijenos videosignala u stvarnom vremenu (*video streaming*), dohvat (*download*) velike količine podataka te pretraživanje weba.

Frekvencijsko područje u kojem radi sustav iBurst (1785–1805 MHz) predstavlja frekvencijsku prazninu između postojećih sustava DCS1800 (*Digital Cellular System*) koji rade u susjednim frekvencijskim područjima (1710–1785 MHz i 1805–1880 MHz), Slika 4.61. Frekvencijsko područje od 1790 do 1800 MHz iskoristivo je za uvođenje novih sustava za širokopojasni radijski pristup (BWA, *Broadband Wireless Access*). Osim najpoznatijeg sustava iBurst, u ovom frekvencijskom području moguću primjenu za sada imaju još dvije tehnologije: UTRA TDD (UMTS *Terrestrial Radio Access Time Division Duplex*), te TDD-SCDMA (*Time Division Duplex – Synchronous Coded Division Multiple Access*) radijska lokalna petlja pekinškog operatora Xinwei.

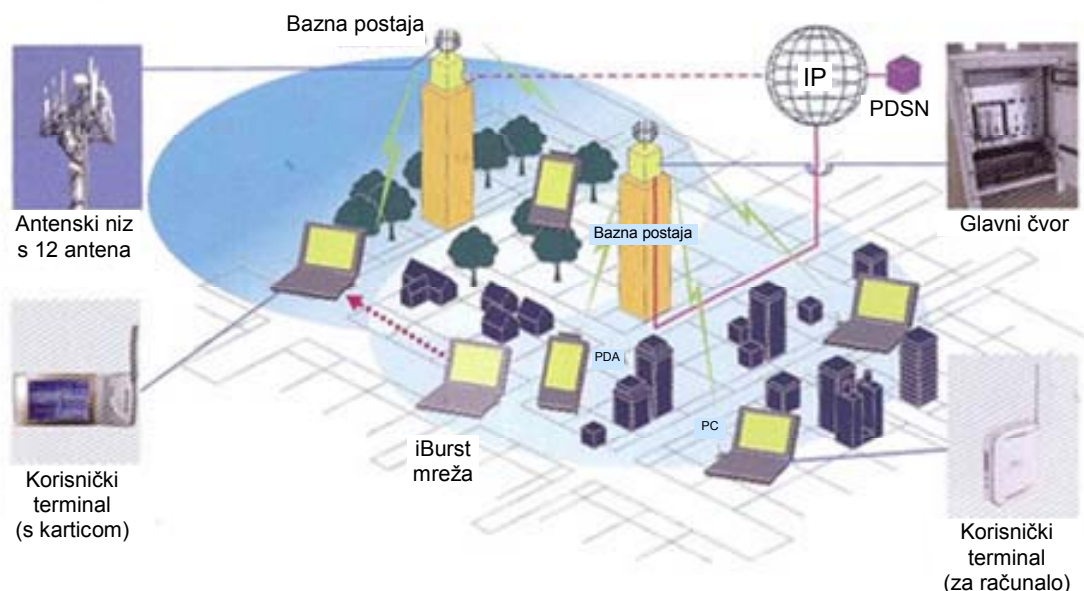


Slika 4.61. Položaj frekvencijskog područja 1790–1800 MHz u odnosu na postojeća frekvencijska područja za sustav DCS1800

iBurst pruža novi način mobilnosti i slobode te omogućava neprimjetno prebacivanje između ćelija, pri čemu je za pristup potreban samo modem i račun kod pružatelja usluga. Omogućene su četiri opcije pristupa:

1. Fiksni modem s USB i Ethernet ulazima (s vanjskim napajanjem);
2. Prijenosni USB modem (s USB napajanjem);
3. Modem za prijenosno računalo (PC kartica);
4. Radijski rezidencijalni prilaz (WRG, *Wireless Residential Gateway*) u kombinaciji s modemom za prijenosno računalo.

Koncept iBursta omogućava relativno jeftinu izgradnju sustava i kontinuiranu fiksnu cijenu usluge stvarajući radijsko širokopojasno okruženje koje nije skupo te je praktično za uporabu. Bazna postaja projektirana je za fleksibilni razmještaj uz mogućnost prividnog samokalibriranja antena za optimalno pokrivanje. Sustav može koristiti do 12 antena postavljenih u antenski niz, Slika 4.62.



Slika 4.62. Osnovna arhitektura iBurst mreže

Sustav iBurst je izravan nastavak otvorene internetske arhitekture, koji omogućava korisnicima transparentan pristup punom rasponu primjena, usluga i sadržaja, pri čemu operatorima pruža mogućnost nadogradnje na njihove postojeće mreže.

4.7.2. Uklapanje iBursta u današnje mreže

Uz raspon, pokrivanje i kapacitet, sustav iBurst projektiran je na način da olakša implementaciju i rad operatorima na mrežnoj strani. Umjesto zahtjeva za potpuno novom podatkovnom infrastrukturom, mreža iBurst je nastavak fiksne širokopojasne pristupne mreže kao posljednje rješenje ("*Last-One-Mile Access Solution*"). iBurst se u cijelosti temelji na protokolu IP te je kompatibilan sa svim primjenama, uslugama i sadržajima temeljenim na protokolu IP.

Otvorena IP arhitektura pomaže operatorima da u kratkom vremenskom razdoblju dođu na tržište. Ujedno ne postoji utjecaj na postojeće usluge prijenosa govora. Pružatelji usluga mogu koristiti isti sadržaj i alate koje koriste za širokopojasni fiksni pristup, a korisnici uživaju u svim širokopojasnim primjenama (pristup Internetu, e-mail, VPN, VoIP, prijenos videosignala, *on-line* igrice, itd.) na standardnim operacijskim sustavima (Windows, Linux, Macintosh).

Za iBurst nije potreban nikakav posebni klijentski softver osim iBurst modema za prijenosna ili osobna računala.

Japanska tvrtka Kyocera unaprijedila je postojeću mobilnu širokopojasnu tehnologiju iBurst i predstavila nova poboljšanja u travnju 2008. godine. Sustav će se početi pojavljivati u Kyocerinim iBurst baznim postajama i terminalima do zadnjeg tromjesečja 2009. godine.

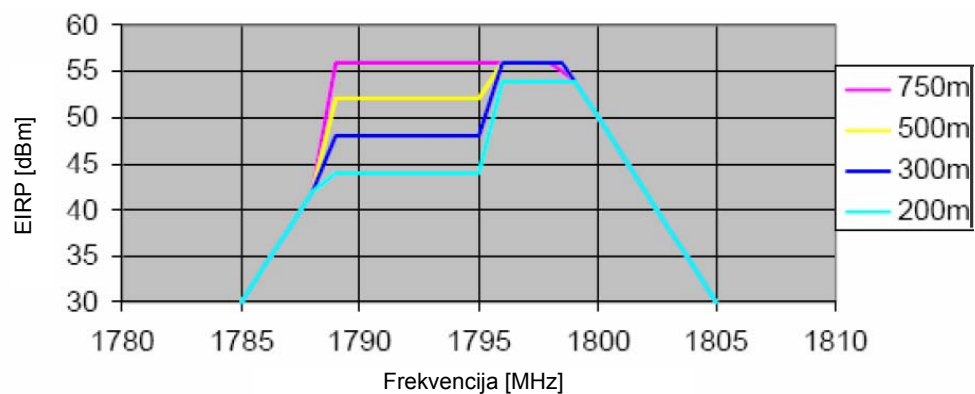
Postojeća oprema za iBurst dozvoljava istodobnu uporabu tri prostorna kanala u istome frekvencijskom kanalu i u istome vremenskom odsječku, čime omogućava brzinu korisničke silazne veze do 2 Mbit/s, a silazne veze bazne postaje do 24 Mbit/s. S unaprjeđenom tehnologijom podržavaju se četiri prostorna kanala u istome frekvencijskom kanalu i u istome vremenskom odsječku, povećavajući brzinu korisničke silazne veze na 4 Mbit/s, a bazne postaje povećavaju silaznu vezu na brzine do 32 Mbit/s za pojas od 5 MHz ili 64 Mbit/s za pojas od 10 MHz.

Mreže iBurst trenutno djeluju u jedanaest zemalja, a planira se implementacija sustava u još dvadesetak zemalja.

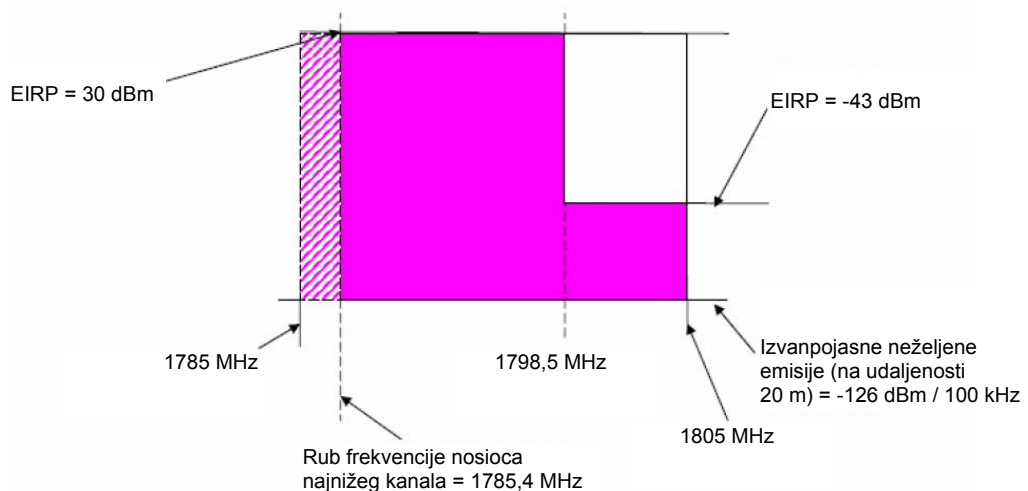
Operatori za iBurst diljem svijeta osnovali su neprofitnu organizaciju iBA (iBurst Association) koja promovira i razvija tehnologiju iBurst.

4.7.3. Koegzistencija sustava iBurst s postojećim sustavima

Kako bi se ostvarila koegzistencija sustava iBurst (kao i ostalih BWA sustava koji rade u istome frekvencijskom području) s postojećim sustavima (npr. sa sustavom DCS1800), novi sustavi ne smiju unositi smetnju u ranije dodijeljena frekvencijska područja. Radi ostvarenja tog cilja, potrebno je koristiti napredne metode poništavanja ili smanjenja smetnji (detalji u poglavlju 4.3.), poput prijedloga neovisnog regulatornog tijela OFCOM (*Office of Communications*), koje je propisalo odgovarajuće spektralne maske za bazne postaje, Slika 4.63. i korisničke terminale, Slika 4.64., za BWA sustave u ovom frekvencijskom području.



Slika 4.63. Spektralna maska za bazne postaje u sustavima BWA koji rade u frekvencijskom području 1785 – 1805 MHz



Slika 4.64. Spektralna maska za korisničke terminale u sustavima BWA koji rade u frekvencijskom području 1785 – 1805 MHz

4.8. Tehnološki neutralna dodjela frekvencija

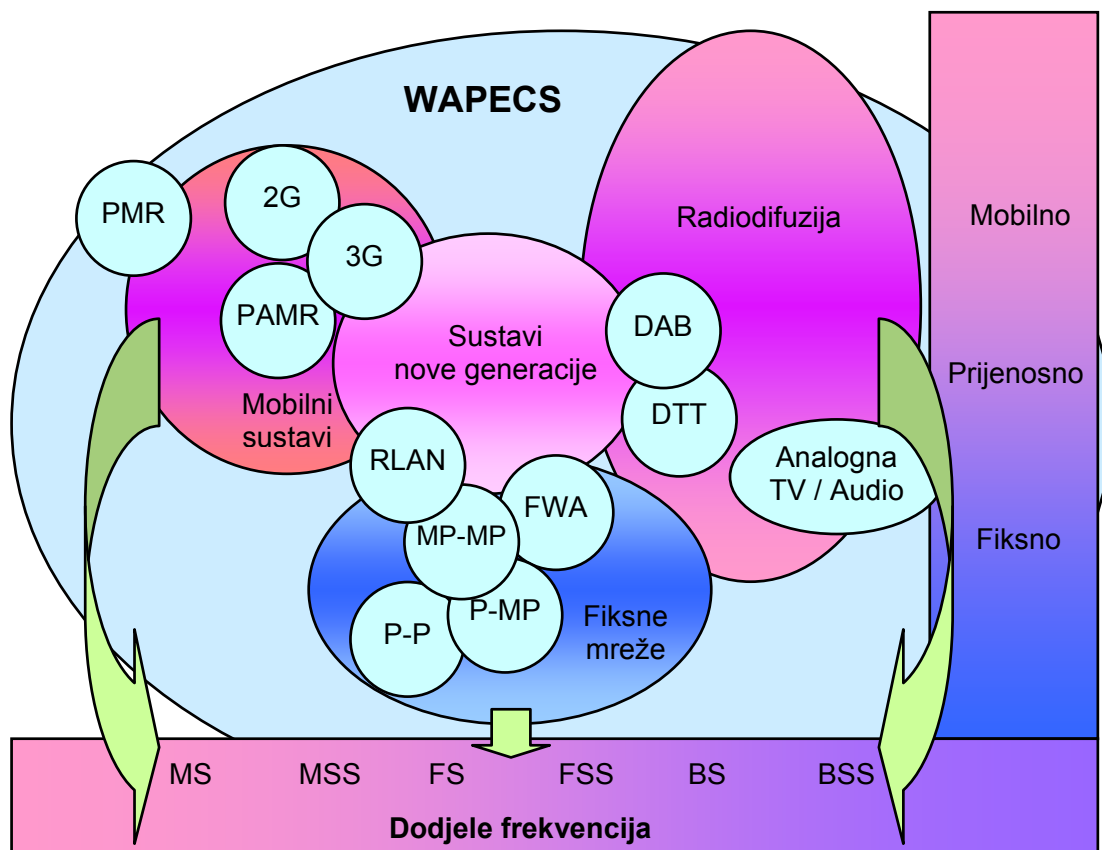
Skupina stručnjaka RSPG (*Radio Spectrum Policy Group*) osnovana je 2002. godine i okuplja stručnjake iz zemalja Europske unije koji savjetuju Europsku komisiju o problemima vezanim za frekvencijski spektar. U studenom 2005. godine skupina RSPG usvojila je mišljenje (*opinion*) koje poziva na fleksibilnije korištenje i upravljanje spektrom za mobilne usluge, usluge radiodifuzije, fiksne radijske i ostale komunikacijske usluge. Usvojeno mišljenje pod nazivom WAPECS (*Wireless Access Policy for Electronic Communications Services*) važan je korak u razvoju pristupa upravljanja spektrom diljem Europske unije.

WAPECS je okvirno načelo za osiguranje elektroničkih komunikacijskih usluga (ECS, *Electronic Communications Services*) unutar frekvencijskih pojaseva koji se moraju identificirati i usuglasiti između zemljama članicama Europske unije, s time da raspon za ECS usluge bude temeljen na neutralnostima tehnologija i usluga, da osigurava određene tehničke uvjete za izbjegavanje smetnji, da osigurava djelotvorno i učinkovito korištenje spektra te da uvjeti autorizacije ne ometaju konkurenciju.

Neutralnost usluge u kontekstu WAPECS-a prikazanog na Slici 4.65. razmatra se pod sljedećom definicijom: "Bilo koja ECS usluga može se osigurati u bilo kojem frekvencijskom pojasu WAPECS-a preko bilo koje vrste elektroničke komunikacijske mreže. Nijedan frekvencijski pojas ne smije biti rezerviran za posebnu ECS uslugu, što treba biti provedeno bez štete za one koji su dužni osigurati posebnu uslugu u posebnom pojasu ili potpojasu, npr. radiodifuzija i usluge hitnih poziva (*emergency services*)."

Drugim riječima, različite mreže mogu osigurati mobilni, prijenosni ili fiksni pristup za raspon ECS usluga s jednom ili više dodijeljenih frekvencijskih područja (mobilna, radiodifuzijska, fiksna), putem zemaljskih ili satelitskih sustava, korištenjem različitih tehnologija za isporuku usluga korisnicima. Primjerice, spektar dodijeljen za radiodifuziju može podržavati silaznu vezu mobilne mreže (uključujući povratni kanal ili s povratnim kanalom u drugom frekvencijskom području dodijeljenom mobilnim uslugama) i obrnuto (npr. prijenos podataka, multimedija, interaktivna radiodifuzija unutar mobilnog područja). WAPECS je primjenjiv i za licencirana i nelicencirana područja.

S druge strane, neutralnost tehnologije odnosi se na sljedeće pravilo: "Za svaki frekvencijski pojas WAPECS-a mora se za buduće korištenje spektra osigurati da pripadajuće komunikacijske mreže udovoljavaju svim relevantnim spektralnim tehničkim zahtjevima, neutralnosti tehnologije i fleksibilnosti."



2G	Druga generacija mobilnih sustava	MP2MP	Fiksne veze više točaka na više točaka (Multipoint to Multipoint Fixed Links)
3G	Treća generacija mobilnih sustava	MS	Mobilna usluga (Mobile Service)
BS	Radiodifuzijska usluga (Broadcasting Service)	MSS	Mobilna satelitska usluga (Mobile Satellite Service)
BSS	Radiodifuzijska satelitska usluga (Broadcasting Satellite Service)	P2MP	Fiksne veze točka - više točaka (Point to Multipoint fixed links)
DAB	Radiodifuzija digitalnog audiosignala (Digital Audio Broadcasting)	P2P	Fiksne veze točka - točka (Point to Point fixed links)
DTT	Digitalna zemaljska televizija (Digital Terrestrial Television)	PAMR	Javne mobilne mreže (Public Access Mobile Radio)
FS	Fiksna usluga (Fixed Service)	PMR	Privatne mobilne mreže (Professional / Private Mobile Radio)
FSS	Fiksna satelitska usluga (Fixed Satellite Service)	RLAN	Radijske lokalne mreže (Radio Local Area Networks)
FWA	Fiksna radijska pristupna mreža (Fixed Wireless Access)		

Slika 4.65. Koncept WAPECS-a

Neutralnost leži na definiciji minimalnog skupa parametara kojih se određeni radijski sustav mora pridržavati. Sa strane spektra, implementacija radijskog sustava u određeni frekvencijski pojas zahtjeva razmatranje mnogo parametara (snaga, visina antene, spektralna maska itd.). Razne studije zaključile su da fino podešavanje parametara omogućava osiguravanje najbolje učinkovitosti spektra.

Cilj WAPECS-a je osigurati dostupnost spektra za široki raspon usluga i primjena vodeći računa o povećanim zahtjevima za spektrom, konvergenciji i olakšanom brzom pristupu spektru za nove usluge i primjene. Ograničenja postavljena na korištenje određenog frekvencijskog pojasa trebala bi se ukinuti gdje god je to moguće.

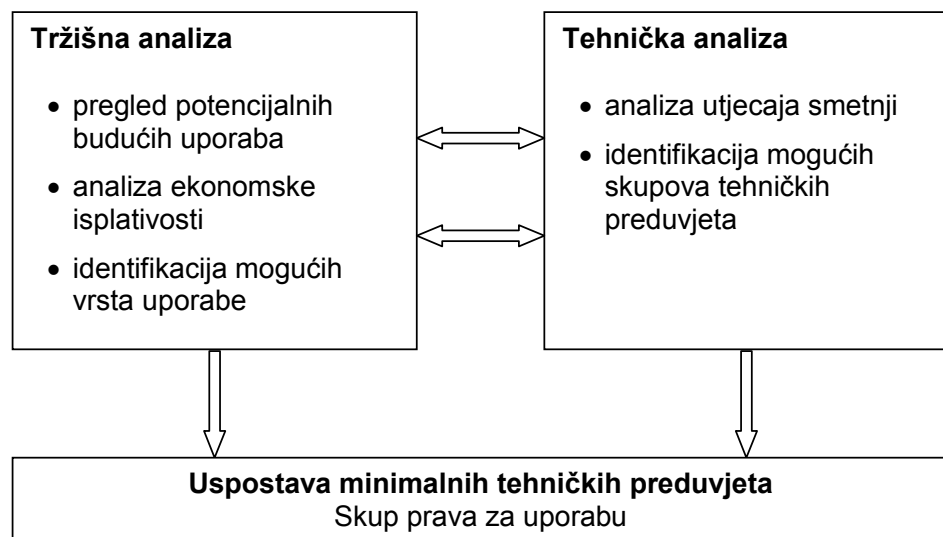
WAPECS je dugoročna vizija koja teži omogućavanju pravednih konkurentskih uvjeta između radijskih pristupnih platformi nudeći slične usluge te opskrbljujući slična tržišta.

4.8.1. Tržišna i tehnička analiza

Postoje ustupci između povećane fleksibilnosti dostupne svakom korisniku spektra i smanjenja rizika od smetnji s drugim korisnicima. Ustupci mogu biti više ili manje učinkoviti ovisno o načinu na koji se tehnička ograničenja odrede u pravima korištenja.

Ekonomska učinkovitost zahtjeva korištenje spektra na način da pridonosi društvu. U slučajevima novih tehnologija i evolucije postojećih, očekuje se veća ekonomska učinkovitost korištenja spektra bez povećanja vjerojatnosti smetnje između korisnika radijskih usluga.

Kao što je prikazano na Slici 4.66., potrebno je provesti tržišnu analizu kako bi se identificirala najvjerojatnija buduća uporaba pojaseva. Kako bi taj proces bio uspješan, potrebna je interakcija tržišne i tehničke analize za postizanje optimalnog rezultata.



Slika 4.66. Veza tehničkih i ekonomskih problema

Tehnička analiza vrijedi samo pod pretpostavkom da je izvedena iz tržišne analize, te da je temeljena na trenutno dostupnim informacijama. Ako se primjena razvija i postaje značajno drugačija u

odnosu na pretpostavljenu primjenu/tehnologiju, početna tehnička pravila za smanjenje smetnje neće više biti prikladna za tu primjenu/tehnologiju.

4.8.2. Referentni WAPECS sustavi

Kako bi se uspostavio kriterij kompatibilnosti sustava koji rade u određenome frekvencijskom pojasu WAPECS-a, potrebno je uvesti neke pretpostavke o sličnim sustavima u tom pojasu. To je ključna točka koncepta WAPECS. Određivanje minimalnih tehničkih ograničenja povezuje se sa skupom općenito definiranih pretpostavki proizašlih iz tržišne analize. Stoga je predložen koncept preporučenih WAPECS sustava. Za svaki pojas (ili potpojas) WAPECS-a može se preporučiti jedan ili više WAPECS sustava, ovisno o tržišnoj analizi za najvjerojatnije sustave u dotičnom području (najčešće istraživanjem i konzultacijama sa zainteresiranim strankama).

Sustav WAPECS preporučuje se na temelju mrežnog scenarija: izračena snaga, vanjsko/unutarnje pokrivanje, priroda terminala (poznata ili nepoznata lokacija, fiksni, nomadski, mobilni), gustoća i visina odašiljača i način rada TDD/FDD, te realnih očekivanja izvedbe prijarnika (minimalna potrebna razina signala, selektivnost, osjetljivost na smetnju).

U slučaju da više različitih WAPECS sustava koriste isti frekvencijski pojas, uvjeti njihove koegzistencije moraju se razmatrati kod tehničkih uvjeta tog frekvencijskog pojasa.

4.8.3. Modeli za definiranje najmanje ograničavajućih tehničkih uvjeta

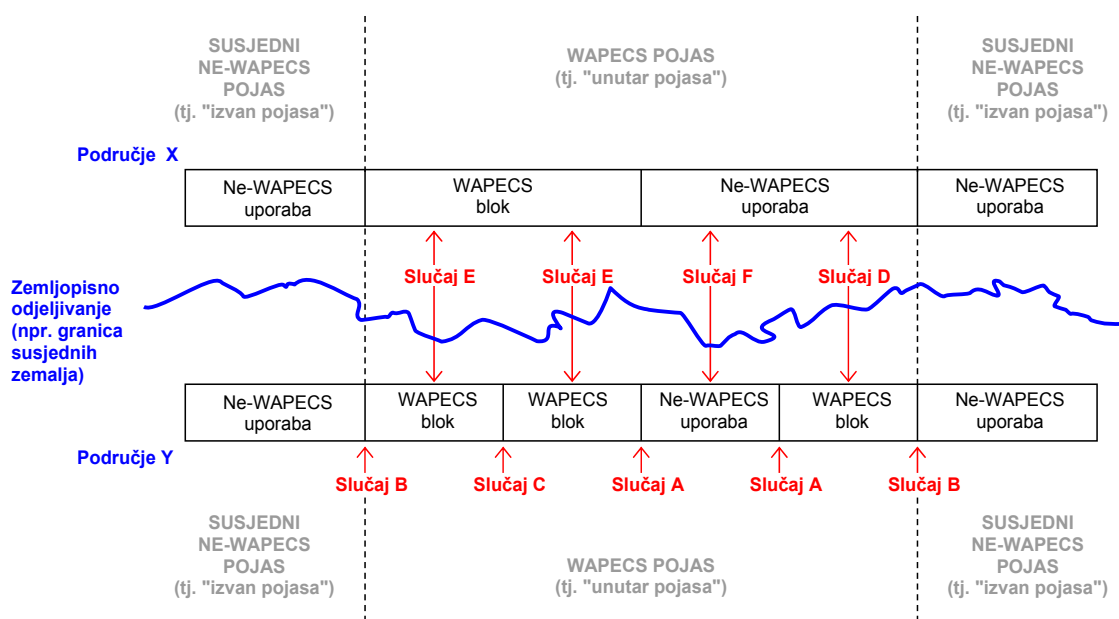
Za razvoj tehničkih uvjeta za pristup spektru predloženo je nekoliko modela:

- Model 1: metoda tradicionalne kompatibilnosti i dijeljenja (npr. koristeći ACLR, *Adjacent Channel Leakage Ratio* i ACS, *Adjacent Channel Selectivity*);
- Model 2: model BEM (*Block Edge Mask*) koji se može podijeliti u dvije klase:
 - BEM (model 2A) i,
 - EIRP BEM (model 2B);
- Model 3: model maske PFD (*Power Flux Density*);
- Model 4: odašiljačka maska PSD (*Power Spectral Density*);
- Model 5: hibridni model;
- Model 6: model središnjeg prostora (*Space-centric*).

Model 1 temelji se poznavanju ili na skupu pretpostavki o tehničkim karakteristikama predviđenog sustava i ostalih sustava s kojima dijeli pojas. Model 2 kontrolira smetnju između sustava definiranjem raspona snage/frekvencije unutar kojeg odašiljač emitira. Model 3 pruža sigurnost izravno određujući razine smetnje koje sustav generira susjednim pojasevima. Model 4 definira prava uporabe spektra (SUR, *Spectrum Usage Rights*) u odnosu na ukupnu prenesenu spektralnu gustoću snage (PSD) unutar nekog područja. Uzima se u obzir prijenos svih odašiljača unutar određenog područja na određenoj frekvenciji. Model 5, kao hibridni model, temelji se na kombinaciji modela 2 (ili 4) i modela 3. Model 6 koristi se u Australiji za upravljanje smetnjom između novih uređaja (ne između novih i starih postojećih uređaja) i koristi skup eksplicitnih odašiljačkih prava (s implicitnim prijamničkim pravima), tj. spektralna prava koja definiraju maksimalnu izračenu snagu iz svake antene (EIRP). Zaštita od smetnje određena je neizravno. Model dozvoljava korisniku samoupravljanje smetnje između njegovog uređaja i novog susjednog uređaja bez pregovora, jer može precizno odrediti potrebnu hardversku izolaciju na temelju preciznih izolacijskih razina zaštitnog prostora (*guardspace*) omogućene spektralnim pravima.

4.8.4. Analiza scenarija pri pojavi smetnje

Postoje različiti slučajevi kompatibilnosti koje treba uzeti u obzir kod razmatranja tehničkih uvjeta korištenja frekvencijskih pojaseva WAPECS-a. Slika 4.67. prikazuje relevantne slučajeve kompatibilnosti između susjednih pojaseva (slučajevi A, B i C) i unutar pojasa (slučajevi D, E i F).



Slika 4.67. Grafička ilustracija slučajeva kompatibilnosti unutar pojasa i između susjednih pojaseva

Na Slici 4.67. su prikazana zemljopisno odvojena područja X i Y koja mogu pripadati dvjema administracijama koje su odvojene državnom granicom. U ovom primjeru su različiti sustavi WAPECS i ne-WAPECS u područjima X i Y.

U nekim slučajevima postojeći ne-WAPECS sustavi nastaviti će s radom u WAPECS području. Mora se provesti analiza smetnje vodeći računa o posebnim karakteristikama ne-WAPECS sustava.

Načini određivanja rizika od smetnje mogu biti različiti. Oni uključuju ograničenja snage za sustave WAPECS ili odjeljivanje frekvencija unutra pojasa (slučaj A) ili zemljopisno odjeljivanje između WAPECS i ne-WAPECS sustava (slučaj D).

Svaki pojas WAPECS-a biti će omeđen na oba kraja susjednim tipično ne-WAPECS pojasevima (slučaj B). Za sprečavanje smetnje preporuča se korištenje zaštitnog pojasa.

U većini slučajeva će pojas WAPECS-a biti podijeljen u blokove i dodijeljen različitim korisnicima (slučaj C). U takvim slučajevima potrebno je odrediti potrebno odvajanje između dva WAPECS sustava.

WAPECS sustavi mogu raditi u zemljopisno odvojenim područjima (slučaj E) i uključuju prekograničnu situaciju gdje dva WAPECS sustava rade na istim frekvencijama, ali uz dva različita operatora.

4.8.5. Analiza pojaseva

Temeljem dosadašnjih istraživanja za opis tehničkih uvjeta odabran je model BEM (*Block Edge Mask*). BEM se primjenjuje na cijeli blok spektra dodijeljenog operatoru, bez obzira na broj zauzetih kanala. Maske su namijenjene formiranju dijela autorizacijskog režima za korištenje spektra. Pokrivaju emisiju unutar bloka (*in-block power*) kao i emisiju izvan bloka (*out-of-block emission*).

4.8.5.1. Analiza pojasa 3,4 – 3,8 GHz

Tip razmatranog WAPECS sustava u ovom pojasu je P2MP (*Point to Multipoint Fixed Links*) s jednom središnjom postajom (CS, *Central Station*), koja je ekvivalentna baznoj postaji, i različitim terminalima (TS, *Terminal Station*).

U razmatranom pojasu rade i drugi sustavi/usluge koji ne pripadaju kategoriji WAPECS. To su FSS (*Fixed Satellite Service*) od svemira prema Zemlji, FS (*Fixed Service*) s vezom od točke do točke i ENG/OB (*Electronic News Gathering / Outside Broadcasts*) u području od 3,4 do 3,6 GHz. Pojas se koristi i za radiolokaciju u području 3,4–3,6 GHz te za radioamaterske usluge u području 3,40–3,41 GHz.

Kako bi se postigla koegzistencija sustava, potrebna je neka vrsta odvajanja (zemljopisna udaljenost ili frekvencijsko odvajanje).

Spektralna prava definirana za pojas 3,4–3,8 GHz fokusirana su na sustave sa širokopojasnim radijskim pristupom (BWA, *Broadband Wireless Access*) s arhitekturom P2MP. WAPECS u ovom pojasu rabi BEM s definiranim vrijednostima EIRP unutar bloka te definiranim vrijednostima izračene snage izvan pojasa samo za središnju postaju. Ne postoje definirani zahtjevi za terminale, osim ograničenja za EIRP unutar bloka te snagu izvan frekvencijskog pojasa.

Važno je naglasiti da prikladan režim licenciranja temeljen na suradnji operatora i dijeljenju informacija o uporabi frekvencija sustava WAPECS može olakšati uporabu spektra osiguravajući fleksibilnu i učinkovitu uporabu spektralnih resursa.

4.8.5.2. Analiza pojasa 2,5 – 2,69 GHz

Frekvencijski pojas 2,5 – 2,69 GHz na raspolaganju je za sustave UMTS/IMT, no to ne sprečava uporabu pojasa i za druge primjene za koje može biti dodijeljen.

U ovom pojasu nalaze se i drugi sustavi koje treba uzeti u razmatranje. To su FS veze od točke do točke, SAP/SAB (*Services Ancillary to Programming / Services Ancillary to Broadcasting*), ENG/OB te radioastronomija, zemaljski istraživački sateliti i sekundarna dodjela usluga za istraživanje svemira.

Predloženi BEM za ovo područje sadrži većinom jednostruki skup EIRP BEM-ova koji se primjenjuju u različitim okolnostima. Razvijeni su na temelju vrijednosti EIRP-a unutar bloka i izvan pojasa. Frekvencijsko odvajanje od 5 MHz potrebno je između FDD uzlaznog bloka ili nesinkroniziranih TDD blokova s drugim TDD blokom. Frekvencijski razmak od 5 MHz između rubnih blokova može se ispuniti sa "zabranjenim" TDD blokovima. Stoga su predložene dvije maske BEM, jedna za zabranjeni TDD blok i jedna za nezabranjeni blok.

Koegzistencija dva WAPECS bloka na istoj frekvenciji u zemljopisni odvojenim područjima može se ostvariti korištenjem jačine polja.

4.8.5.3. Analiza pojaseva 880 – 915 MHz / 925 – 960 MHz

2006. godine zaključeno je da će se mreže UMTS/IMT postupno uvesti u frekvencijsko područje i zemljopisna područja koja trenutno koriste mreže GSM900 i DCS1800.

Ne-WAPECS sustavi u ovom pojasu su vojni sustavi na nacionalnoj razini i ARNS (*Aeronautical Radionavigation Service*) usluge za nacionalnu uporabu. Potrebno je za oba slučaja razmotriti kompatibilnost s WAPECS sustavom.

U idućim godinama u području od 900 MHz mogli bi koegzistirati GSM i UMTS. UMTS bi se mogao uvesti u ruralna ili rjeđe naseljena područja kako bi popunio zahtjeve za pokrivanjem i uslugom ili u gusto naseljena područja gdje je potrebno proširiti kapacitet mreže.

S druge strane, s obzirom na liberalizaciju tržišta u Europi i činjenicu da će u idućih 5 godina isteći 50 % dozvola za GSM900, otvara se prilika drugim tehnologijama (osim GSM-a i UMTS-a) i elektroničkim komunikacijskim uslugama.

Trenutno nema alternativnih tehnologija za područje od 900 MHz, no moguće je da se u sljedećim godinama tehnologija iz drugih područja prilagodi za područje od 900 MHz.

4.8.5.4. Analiza pojaseva 1710 – 1785 MHz / 1805 – 1880 MHz

Postojeće tehničke regulacije i studije kompatibilnosti sustava GSM i UMTS primjenjuju se i u ovom području uz neke dodatne radijske primjene. Ponašanje dodatnih radijskih primjena mora biti jednako onom individualnog GSM/UMTS 1800 kanala ili skupa kanala.

Spektralna maska sustava GSM temelji se na konfiguraciji kanala širine 200 kHz, a spektralna maska sustava UMTS na konfiguraciji kanala širine 5 MHz. Zbog specifične karakteristike njihove tehnologije ne može se pretpostaviti mogućnost izvedbe tehnološki neutralne maske BEM za buduće namjene WAPECS-a iz postojećih maski.

4.8.5.5. Analiza pojaseva 1900 – 1980 MHz / 2010 – 2025 MHz / 2110 – 2170 MHz

Pojasevi 1885–2025 MHz i 2110–2170 MHz identificirani su za IMT-2000 i uključuju satelitsku komponentu. Pojasevi 1900–1980 MHz, 2010–2025 MHz i 2110–2170 MHz određeni su za zemaljske primjene. Pojasevi 1920–1980 MHz / 2110–2170 MHz u većini zemalja koriste se ili se planiraju koristiti za tehnologije IMT-2000. Jedini ne-WAPECS sustavi u ovom području su FS.

4.8.5.6. Analiza pojasa 470 – 862 MHz

Ovaj pojas UHF predviđen je u Europi za radiodifuziju kao i za druge zemaljske usluge. Zadnjih 40 godina većinom je, a i dalje je tako, korišten za analognu televiziju. Zbog sve šireg uvođenja sustava digitalne televizije (DVB-T), Europska unija predlaže gašenje analogne televizije do 2012. godine.

Pojas 790–862 MHz predviđen je za mobilne usluge od 2015. godine u regiji 1, a u mnogim zemljama članicama CEPT-a (*European Conference of Postal and Telecommunications*) moguće

je koristiti pojas 790–862 MHz za mobilne usluge i prije 2015. godine.

Pojas 645–862 MHz dodijeljen je u nekoliko zemalja za aeronautičke navigacijske usluge.

U pojasevima IV/V su neke nacionalne usluge koje mogu biti jako važne poput RAS (*Radio Astronomy Service*) i SAP/SAB (*Services Ancillary to Programming / Services Ancillary to Broadcasting*).

U gornjem području razmatranog pojasa nalaze se neke usluge vojnih sustava u nekim zemljama.

U kontekstu WAPECS-a mogu se razmatrati tri vrste mreža u pojasu 470–862 MHz. To su jednosmjerne mreže velike snage (većinom za fiksne radiodifuzijske usluge, npr. DVB), jednosmjerne mreže srednje do male snage (tipično za mobilne multimedijske usluge i novije oblike konvergiranih radiodifuzijskih i komunikacijskih usluga, npr. DVB-H) te dvosmjerne mreže malih snaga (tipično za fiksne i mobilne usluge širokopojasnog pristupa, npr. IMT).

Unutar razmatranog pojasa postoje sustavi koji nisu u WAPECS kategoriji. To su aeronautički radionavigacijski sustavi, radioastronomija, SAB/SAP te vojni sustavi.

Kako bi se zaključili potrebni minimalni tehnički uvjeti za sustave WAPECS u pojasu 470–862 MHz, potrebne su daljnje studije koje provodi CEPT.

5. Zaključak

Računalne komunikacije odnosno komuniciranje među računalima značajni je segment u ukupnim komunikacijama. Razvoj tehnologije vodi ka sve značajnijem udjelu takvih povezivanja i izgledno je da će u budućnosti jedna računalna mreža visokih performansi nadomjestiti nekoliko mreža koje su danas u uporabi, svaka za pojedinu uslugu kao što su npr. telefon, kabelaška televizija, Internet. Radi povezivanja i zajednički rad mreža računala u kojima se rabe različite mrežne tehnologije i različiti protokoli razvijeni su referentni modeli slojevite arhitekture mreže koji definiraju koncepte i postavljaju norme te utvrđuju pravila povezivanja sustava u mrežu i mreža međusobno. Za svaki sloj definiraju se usluge sloja, sučelja sa susjednim slojevima i protokoli. Uporabom referentnog modela omogućava se stvaranje otvorenih rješenja, neovisnih o proizvođaču opreme ili mrežnom operatoru.

Specifikacija i upravljanje kvalitetom usluge od velikog je značaja za radijske mreže, posebno za one koje podržavaju multimedijske aplikacije. Kvaliteta usluge očituje se u sposobnosti aplikacije da dobije zahtijevanu kvalitetu usluge, od mreže, u cilju uspješnog rada. Postojeće tehnologije za WLAN i WMAN mreže omogućavaju fiksni i nomadski radijski pristup. U takvim mrežama mobilnost korisnika je ograničena. U zadnje vrijeme normirano je i rješenje mreža gradskih područja za komunikaciju u pokretu.

Prednosti radijske lokalne mreže u odnosu na fiksnu inačicu su u mobilnosti korisnika mreže, brznoj i jednostavnoj instalaciji, fleksibilnosti i ekonomičnosti u izvedbi mreže. U Hrvatskoj se mreže vrste WLAN koriste u ISM području na 2,4 GHz. Pojasevi u području 5 GHz (5,150 – 5,350 GHz isključivo za zatvorene prostore i 5,470 – 5,725 GHz za zatvorene i vanjske prostore) su prilično neiskorišteni. Uzrok tome mogao bi biti u propisanoj tehnologiji za uporabu u tim područjima frekvencija. Naime, zahtijevana tehnologija HIPERLAN vrlo je skromno zastupljena na

tržištu i to je glavnom preprekom za interes potencijalnih investitora. Mišljenja smo da bi se i u području 5 GHz trebalo primijeniti iskustva stečena u implementaciji WMAN mreža na 3,5 GHz, tj. da ne treba definirati tehnologiju koja je dopuštena za primjenu, već samo uvjete koje mreža mora ispuniti. Daljnji problem korištenja pojaseva na 5 GHz je nemogućnost dodjele frekvencijskih blokova kao u slučaju WMAN mreža. Danas prisutne WLAN tehnologije na 5 GHz primjenjuju dinamički odabir kanala, a što je i obvezatno za mreže koje se koriste u Europi. U okviru tog postupka mreža koristi bilo koji od slobodnih kanala u jednom od podpojaseva. U cilju poticanja korištenja tih za WLAN namijenjenih frekvencija neke su zemlje, npr. Republika Slovenija, dopustile rad u tim pojasevima bez obveze za pribavljanjem dozvole, dakle, lokalno su te pojaseve proglasile nelicenciranim frekvencijama.

Velika većina mreža, koje su u uporabi, osniva se na inačicama IEEE 802.11 norme s tim da u Hrvatskoj nije dopušteno postavljati mreže po normi IEEE 802.11a (rade na 5 GHz). Primjena europskih normi znatno zaostaje u praktičnim realizacijama ponajprije zbog manje raspoloživosti uređaja. Pojavom norme IEEE 802.11n, koja združuje rad na 2,4 GHz i na 5 GHz, još su više istaknute prednosti mreža po inačicama IEEE 802.11 normi, jer one osiguravaju povratnu kompatibilnost prema starijim inačicama iz iste skupine, ali nisu kompatibilne s europskom normom.

Tri su glavna djelokruga korištenja WLAN-a: javni WLAN-ovi (uključene su i tzv. "hot-spot" mreže), poslovno umrežavanje i kućno umrežavanje. Dok se na javni WLAN postavljaju vrlo različiti zahtjevi, npr. za veliku gustoću korisnika na nekom prostoru ili pak za pokrivanje manjih prostora, dotle Korporativni WLAN služi kao radijsko proširenje fiksnog LAN-a. Tradicionalna rješenja primjenjivala su potpuno odvojene mreže za prijenos govora i za prijenos podataka. Nova rješenja integriraju fiksni i radijski dio LAN infrastrukture. Visokokvalitetni radio uzima se kao primarni pristupni postupak u slučajevima manjih ureda.

WiMAX tehnologija namijenjena je pružanju širokopojsnih usluga: povezivanja na Internet, prijenosa govora odnosno videotelefonskih signala, prijenosa podataka i sl. Norma 802.16-2004. odnosi se na nepokretni i nomadski pristup, dok je ona pod oznakom 802.16e-2005 namijenjena opsluživanju pokretnih terminala. Valja napomenuti da nema kompatibilnosti između uređaja koji rade po ovim dvjema normama. Rad s dinamičkim dodjeljivanjem kapaciteta u logičkim podkanalima predviđen je u OFDMA fizičkom sloju koji se koristi u mobilnim uvjetima, dok je za fiksne mreže prikladniji OFDM. Proizvodi za OFDM radijska sučelja su certificirani i već sazreli na tržištu, što se ne može reći i za proizvode po 802.16e. WiMAX se može promatrati i kao

nadogradnja WLAN-a, a može se raditi i mrežna arhitektura koja u sebi sadrži obje radijske tehnologije.

Gledajući s perspektive operatora, limitiranost je znatno veća zbog ograničenog kapaciteta nego zbog područja pokrivanja. To znači da operatori moraju predvidjeti strukturu korisnika i vrstu usluge koja im je namijenjena (privatni korisnici, poslovni korisnici), njihovu gustoću na nekom području i očekivani stupanj korištenja kao i buduća očekivanja. Tada oni planiraju u biti gustoću kapaciteta po nekoj određenoj površini.

Za nacionalnog telekom regulatora interesantne su uglavnom RF karakteristike jedinica radijske mreže. U primjeru radijske lokalne mreže od značaja je mjerenje radijskih parametara pristupne točke. Mjerenje odgovarajućih parametara terminalnih uređaja provodi se samo u nekim posebnim situacijama. Od dva frekvencijska područja, namijenjena za P2MP mreže u Hrvatskoj, granične vrijednosti pojedinih parametara uređaja precizno su definirane za područje oko 3,5 GHz. Za uređaje u frekvencijskom području 26 GHz primjenjuju se opće granice za sve uređaje koje rade na tim frekvencijama. Zanimljivo je spomenuti da ključne granične vrijednosti nisu pokrivena IEEE normom.

Postoje dva glavna cilja koja trebaju ispuniti radijski sustavi novih generacija pa i 4G – veća širina pojasa i prelazak na IP. Sustav 4G treba omogućiti svestrana IP rješenja za govornu komunikaciju, prijenos podataka te multimedijske sadržaje korisnicima na bazi "bilo gdje i bilo kada" i to većim brzinama nego što ih nude dosadašnja rješenja. WiMAX, WiBro, LTE (*Long Term Evolution*) i 3GPP2 *Ultra Mobile Broadband* su neka vrsta pripreme za 4G.

Uz više brzine prijenosa, kako u uzlaznom tako i u silaznom smjeru, WiMAX i ostale slične kompatibilne tehnologije nameću se kao bolje rješenje za primjene temeljene na pristupu Internetu. S druge strane primjene koje traže veliku mobilnost uvijek će biti bolje uslužene unutar mreža 3G s velikim područjem pokrivanja.

Na putu prema WiMAX II postojeći sustavi kao i WiMAX te LTE obećavaju veće brzine prijenosa koristeći uglavnom slijedeće: povećanje širine pojasa kanala (HSDPA koristi kanal širine 5 MHz, WiMAX i LTE imaju fleksibilne širine kanala od 1,25 do 20 MHz, WiMAX i 28 MHz) MIMO (WiMAX i LTE predviđaju MIMO tehniku), modulacijske postupke višeg reda (HSDPA rabi 16-QAM, WiMAX i LTE koristit će 64-QAM). Koristeći ove tehnike LTE i WiMAX moći će znatno povećati brzine prijenosa podataka, ali i uz te napredne tehnike postići će se brzine prijenosa podataka manje od predviđenih 1 Gbit/s.

Dugoročna bitka vodi se između dvije najperspektivnije radijske pristupne tehnologije WiMAX i LTE. Svaka od njih može barem učetverostručiti brzine prijenosa postojećih radijskih sustava, ali analitičari ipak prognoziraju veću dominaciju LTE tehnologije, s

obzirom da danas u svijetu prevladavaju operatori koji nude GSM i UMTS tehnologiju, a LTE se može gledati kao nadogradnja ovih najpopularnijih mobilnih komunikacijskih tehnologija. LTE mogla bi mobilnim operatorima omogućiti vrlo jednostavno unapređenje sustava, ali WiMAX je već dostupan na tržištu. Iako LTE može očekivati globalnu dominaciju, to ne znači da WiMAX neće preživjeti.

Napredne tehnologije antenskih sustava s pripadajućom elektronikom, tzv. inteligentne antene i MIMO sustavi, današnje su aktualno rješenje za unaprjeđenje performansi radijskih mreža. Inteligentna antena, kao jedna od jedinica radijskog sustava, primjenjuje prostornu obradu signala korištenjem više antena. Inteligentnost antena očituje se u sposobnosti određivanja smjera dolaska signala. Taj se podatak onda koristi za izračunavanje vektora koji određuju smjer i oblik glavnog snopa zračenja koji onda prati pokretni cilj, tj. pokretnu krajnju postaju. Inteligentnost antene u suštini je sadržana u antenskom sustavu koji inteligentno združuje istodobni rad više antena u diverzitetu. MIMO-sustavi koriste se u svrhu povećanja propusnosti bez povećavanja zauzete širine pojasa ili drugim riječima povećanja spektralne učinkovitosti prijenosa. Taj se dobitak osniva na korištenju još i prostorne dimenzije, koja je u ranijim rješenjima bila neiskorištena.

Niska gustoća snage emisije UWB tehnologija smanjuje mogućnost smetnje u ostalima radijskim sustavima, a velika širina pojasa može omogućiti prijenos podataka vrlo velikim brzinama. Priroda inačice UWB signala bez vala nosioca rezultira u manjem fedingu čak i kad se impulsi preklapaju. Predviđeni domet je u rasponu od 15 do 100 m. Za prijenos nije nužno koristiti val nosilac, već se obavlja impulsni radijski prijenos u osnovnom pojasu frekvencija, koje je međutim jako visoko. Izgledno je da će uskoro Bluetooth tehnologija, popularna PAN norma za spajanje računala s perifernim uređajima na kraćim udaljenostima, dobiti svoga nasljednika u obliku nove norme UWB koja ima mogućnosti čak stotruko bržeg prijenosa podataka od Bluetooth tehnologije.

Obrada digitalnog signala u fleksibilnim i rekonfigurabilnim funkcionalnim blokovima obilježava softverski radio. Dvije se softverske funkcionalnosti mogu implementirati u radiju: softverska obrada signala koji sadrži informaciju i softverska kontrola koja osigurava inteligentnu prilagodbu radijskih parametara. Značajke, kao što su prilagodljivost i inteligencija, koje omogućavaju prilagodljivu dinamičku dodjelu spektra, mogu se promatrati kao razvoj radijskih tehnologija na duži rok.

Spoznajni radio predstavlja novi pristup za djelotvorniju uporabu radiofrekvencijskog spektra. To je inteligentni radijski sustav, koji je svjestan svoje okoline, koristi postupak učenja iz svoje okoline i sposoban je prilagođavati svoje tehničke značajke statističkim varijacijama ulaznih parametara. S regulatornog aspekta spoznajni

radio predstavlja značajni izazov, jer traži od regulatornih tijela veću fleksibilnost u dodjeli radijskih frekvencija i ukidanje dosadašnje prakse fiksne namjene frekvencijskog spektra i dodjele radijskih frekvencija jednom korisniku na jednome zemljopisnom području.

Sustav iBurst je izravan nastavak otvorene internetske arhitekture. On omogućava korisnicima transparentni pristup punom rasponu primjena, usluga i sadržaja, pri čemu operatorima pruža mogućnost nadogradnje na njihove postojeće mreže.

Ovu studiju je izradila ekspertna skupina Zavoda za radiokomunikacije, Sveučilišta u Zagrebu Fakulteta elektrotehnike i računarstva.

U Zagrebu, 2. prosinca 2008. godine

Voditelj ekspertne skupine
Fakulteta elektrotehnike i računarstva



prof.dr.sc. Tomislav Kos

Odgovorna osoba
Fakulteta elektrotehnike i računarstva



prof.dr.sc. Borivoj Modlic