

KODIRANI ORTOGONALNI FREKVENCIJSKI MULTIPLEKS U ZEMALJSKOJ RADIODIFUZIJI DIGITALNOG VIDEOSIGNALA

Hoblaj J.¹, Matković D.¹

¹Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, Hrvatska

Sažetak: Radiodifuzijsko emitiranje televizijskog signala od samih početaka (SAD, Velika Britanija 1929.) do prijelaza na digitalno emitiranje temelji se na primjeni modulacijskog postupka s jednim prijenosnim signalom. Ovaj postupak vrlo je osjetljiv na interferencije sa signalima na istom i susjednim kanalima i drugim zračenjima u području prijenosnih frekvencija, na lokacijski i frekvencijski selektivni feding te Dopplerov efekt u mobilnim uvjetima prijama. Kodirani ortogonalni frekvencijski multipleks (COFDM) je vrsta tehnike multipleksiranja kod koje je primijenjeno dijeljenje fizičkog kanala u frekvencijskom i vremenskom području. Ovom tehnikom uspješno se otklanjaju smetnje u prijenosnim radiokanalima. Osim toga, COFDM sustav namijenjen je prijenosu toka podataka neovisno od njihovog sadržaja, te može raditi u višekorisničkoj okolini. Isto tako, COFDM sustavom omogućen je rad odašiljača u mreži na istoj frekvenciji (SFN- Single Frequency Network) unutar jednog geografskog područja, što se nije moglo modulacijskim postupkom s jednim prijenosnim signalom.

Ključne riječi: metode višestrukih nositelja, COFDM simbol, dodatni signali u spektru COFDM signala, hijerarhijska modulacija.

Abstract: Broadcasting of television signals from the very beginning (USA, UK 1929.) up to the transition to digital broadcasting is based on the application of the modulation with a single transmission signal. This procedure is known as very sensitive to interference with signals on the same and adjacent channels and other radiation in the transmission frequency band, location and frequency selective fading phenomena and Doppler Effect in mobile reception. Coded orthogonal frequency multiplex (COFDM) is a multiplexing technique based on dividing the applied physical channels both in the frequency and time domain. This technique effectively eliminates these problems present in the mobile radio channel. In addition COFDM system for the transmission of data stream, regardless of their content, can operate in a multiuser access environment. Limitations of single-carrier transmission methods of operating in single frequency networks (SFN) were overcome by COFDM system.

Key words: Multi-Carrier Methods, COFDM symbol, Supplementary Signals in the COFDM spectrum, Hierarchical Modulation.

1. UVOD

Od samih početaka električnog prijenosa poruka prije 100 godina korišteni su modulacijski postupci s jednim prijenosnim signalom (nositeljem poruke, odnosno moduliranim signalom). Da bi se poruka prenijela, bila je modulirana na signal sinusnog valnog oblika postupkom amplitudne, frekvencijske ili fazne modulacije. Od osamdesetih godina prošlog stoljeća pojedinačni nositelj se sve više pojavljivao u modulacijskim postupcima kod vektorskih modulacija (QPSK, QAM). Glavnu primjenu su ovi postupci imali kod uređaja kao što su telefaks, modemi, mobilni radiouređaji, radijski i televizijski prijammici, uređaji mikrovalnih veza, uređaji za satelitski prijenos i uređaji za prijenos podataka preko kabela širokopojasnih prijenosnih karakteristika. Međutim, kod bežičnog prijenosa radiovalovima, višestazno prostiranje radiovalova vrlo nepovoljno utječe na kvalitetu prijama kod modulacijskih postupaka s jednim nositeljem. Ona je najčešće uzrokom istokanalnih i susjednokalnih smetnji (interferencija) i pojave vrlo naglih promjena jačine elektromagnetskog polja na mjestu prijama. Osim toga, modulacijski postupci s jednim nositeljem vrlo su osjetljivi na smetnje okoline (impulsne smetnje i neželjena zračenja uzrokovana raznim industrijskim aparatima i strojevima). Poznato je da prilikom vožnje automobilom glasnoća radijskog programa zaustavljanjem na crvenom svjetlu semafora ponekad naglo opadne. Zbog različitih putova prostiranja elektromagnetskih valova do mjesta prijama, prijenosni signali na mjestu prijama imaju različite amplitude i faze. Njihovim zbrajanjem na anteni prijammika dolazi do pojačanja, slabljenja ili potpunog poništavanja amplitude prijenosnog signala. Ova pojava se naziva feding i ona je prostorno i frekvencijski zavisna. Uvjeti kod zemaljskog rasprostiranja radiovalova i prijama stacionarnim i mobilnim prijammicima najteži su što se tiče očuvanja kvalitete prenesene slike i zvuka u usporedbi s uvjetima u ostalim prijenosnim medijima ili bežičnim sustavima. Slična situacija je kod dvožičnih telefonskih parica (vodova) u telekomunikacijama. Tu se pojavljuju refleksije, preslušavanja od drugih parica, impulsne smetnje i utjecaj amplitudno i fazno frekvencijskih karakteristika prijenosnih vodova. Porast zahtjeva za što većom brzinom prijenosa podataka između računala i internetske mreže, te zahtjeva za pouzdanim digitalnim prijenosnim sustavima za prijenos digitalnog videosignala, rezultirao je, između ostalih, jednom tehnikom multipleksiranja zasnovanom na velikom broju

prijenosnih signala (nositelja). Metodom višestrukih nositelja informacija se prenosi u digitalnom obliku s višestrukim zaštitnim kodiranjem podataka i njihovim međusobnim ispremiješanjem. Metode s višestrukim nositeljima koje su poznate još od sedamdesetih godina prošlog stoljeća su frekvencijski multipleks ortogonalnih podnositelja (OFDM) i diskretni višetonski modulacijski postupak (DMT - Discrete multitone).

OFDM sustav se primjenjuje u sljedećim sustavima za prijenos toka podataka:

- radiodifuziji digitalnog radiosignala (Digital Audio Broadcasting - DAB)
- radiodifuziji digitalnog televizijskog signala (Digital Video Broadcasting – DVB-T, DVB-H, DVB-C, DVB-SH)
- asimetričnoj digitalnoj pretplatničkoj liniji (Asymmetrical Digital Subscriber Line - ADSL)
- prijenosu podataka preko elektroenergetskih vodova (Transmission of data signals via power lines)
- radiodifuziji digitalnog televizijskog signala prema normama u Japanu i Južnoj Koreji (Integrated Services Digital Broadcasting Television - ISDB-T, T-DMB)
- radiodifuziji digitalnog multimedijskog signala prema normama u Kini (Digital Multimedia Broadcast - Terrestrial - DMB-T)
- WLAN/ WiFi (Wireless Local Area Network, norme IEEE 802.11a/b/g/j/p/n, IEEE 802.11n)- lokalnim bežičnim sustavom prijenosa
- radijskoj mreži (celularni sustav) gradskih područja WiMAX (IEEE 802.16e/m)
- DVB-T2 sustavu
- DVB-C2 sustavu

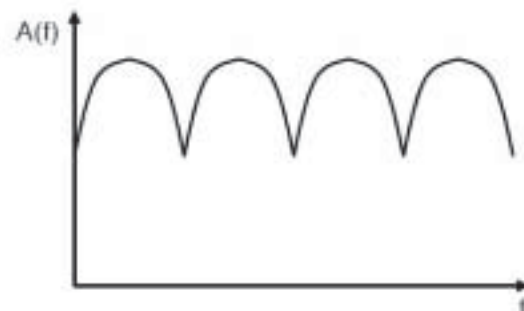
2. METODE VIŠESTRUKIH NOSITELJA

Metode s višestrukim nositeljima pripadaju najkomplexnijim metodama prijenosa i ni na koji način nisu lošije od metode kodno raspodijeljenog višestrukog pristupa (CDMA – Code Division Multiple Access).

Značajke zemaljskog rasprostiranja radiovalova:

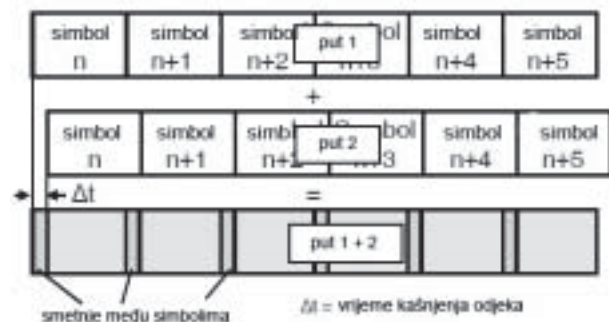
- pojava višestaznog rasprostiranja radiovalova do prijamne antene uzrokovane refleksijom od zgrada, planina, drveća, vozila
- dodavanje prijenosnom signalu bijelog šuma s normalnom (Gaussovom) razdiobom vjerojatnosti amplituda (AWGN - Additive white Gaussian noise)
- uskopojasne i širokopojasne smetnje uzrokovane sustavom paljenja u motornim vozilima, sustavom napajanja električnom energijom tramvaja, aparatima za zavarivanje, električnim strojevima, neonskom rasvjetom i drugim izvorima neželjenih zračenja u korištenom frekvencijskom opsegu
- Dopplerov efekt (pomak prijamne frekvencije) kao posljedica kretanja vozila s prijammikom u odnosu na bazni nepokretni odašiljač ili drugi pokretni

Višestazni prijam dovodi do fenomena lokacijskog i frekvencijskog selektivnog slabljenja prijamnog signala (fedinga), efekta poznatog kao „efekt crvenog svjetla“ kod prijama radijskog programa u automobilu (slika 1.). Kada se automobil zaustavi na crvenom, radioprijam prestane. Ako se odabere druga stanica ili se automobil pomakne malo naprijed, prijam će biti obnovljen. Ako je informacija prenošena sa samo jednim nositeljem, preciznije na jednoj frekvenciji, reflektirani radiovalovi iz više smjerova će uzrokovati gubitak signala na pojedinim lokacijama na toj frekvenciji. Ovaj efekt je funkcija frekvencije, amplitude reflektiranih prijenosnih signala i faza pojedinih reflektiranih prijenosnih signala, tj. iznosa njihovih kašnjenja na mjestu prijama. Ukoliko se prenosi jako mnogo podataka vektorski moduliranim nositeljima, oni će biti izgubljeni u iznosu feedingom zahvaćene širine frekvencijskog pojasa, a koja može odgovarati brzini prijenosa simbola.

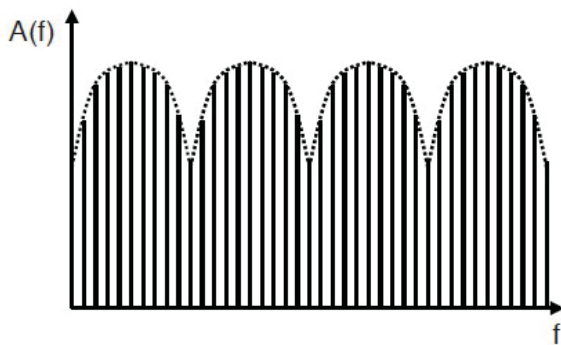


Slika 1. Prijenosna funkcija radijskog kanala s višestaznim prijamom, frekvencijski selektivni feeding [1]

Raspoloživa frekvencijska širina kanala je obično definirana. Brzina prijenosa simbola određena je vrstom modulacije i brzinom prijenosa podataka. Modulacijski postupci s jednim nositeljem imaju relativno velike brzine prijenosa simbola, često unutar raspona od 1 MS/s do 30 MS/s. To rezultira vrlo kratkim trajanjem simbola od 1 μ s i kraćim (recipročna vrijednost brzine prijenosa simbola). Međutim, kašnjenje reflektiranih signala može biti do 50 μ s i više u uvjetima zemaljskog rasprostiranja radiovalova. Takve refleksije dovode do međusobnih smetnji između susjednih simbola ili čak između onih vremenskih udaljenijih simbola, pa prijenos čine više ili manje nemogućim. Očito trajanje simbola treba produžiti što više da se smanje smetnje između simbola, te još umetnuti pauze između simbola, tzv. zaštitne intervale (slika 2.).



Slika 2. Smetnje između simbola istog signala pristiglog putovima različite duljine i s različitim kašnjenjima na mjestu prijama [1]



Slika 3. COFDM: višestruki nositelji u radijskom kanalu s fedingom [1]

Pored ovoga rješenja i dalje ostaje problem lokacijskog i frekvencijskog selektivnog slabljenja signala. Ako se podaci ne prenose putem jednog nositelja, već preko više njih, čak i nekoliko tisuća nositelja, te ukoliko se ugradi odgovarajuća zaštita od pogrešaka u prijenosu uz raspoloživu i nepromijenjenu frekvencijsku širinu kanala (kao u slučaju modulacije s jednim nositeljem), feding ne zahvaća sve nositelje nego samo neke ili određeni pojas nositelja (slika 3.).

Na kraju prijama dovoljno informacija bez pogrešaka koje se dobiju iz fedingom nezahvaćenih nositelja, uz ugrađenu zaštitu od pogrešaka u prijenosu, mogu rekonstruirati ispravni izlazni tok podataka. Ako je umjesto jednog nositelja korišteno više tisuća podnositelja, brzina prijenosa simbola je smanjena faktorom broja podnositelja, a simboli su razmjerno produljeni nekoliko tisuća puta do trajanja 1 milisekunde. Ovim postupkom riješen je problem fedinga i u isto vrijeme problem smetnji između simbola uvođenjem produljenog trajanja simbola i umetnutih zaštitnih intervala između simbola. Rezultat izloženog koncepta je sustav s višestrukim nositeljima i naziva se frekvencijski multipleks ortogonalnih podnositelja (Orthogonal Frequency Division Multiplex - OFDM). Na ovome mjestu dovoljno je ustanoviti da se nositelji međusobno ne ometaju, tj. da su ortogonalni jedan prema drugom.

3. KARAKTERISTIKE KODIRANOG FREKVENCIJSKOG MULTIPLEKSA ORTOGONALNIH PODNOSITELJA (COFDM)

COFDM je složeni sustav za prijenos podataka temeljen na više tisuća podnositelja među kojima ne postoji ometanje (preslušavanje) zbog međusobne ortogonalnosti. Podaci koji idu u prijenos najprije dobivaju zaštitne kodove (FEC-Forward Error Correction). Zatim se njihov redosljed u toku podataka ispreplete. Tako dobiveni tok podataka razdjeljuje se na podnositelje. Svaki od podnositelja je vektorski moduliran s nekim od modulacijskih postupaka: diskretnom modulacijom faze QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) i kvadraturnom diskretnom modulacijom amplitude 16 QAM ili 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Dakle, COFDM postupak u sebi

objedinjuje postupke zaštitnog kodiranja (unošenje redundancije u podatke) radi ispravljanja pogrešaka nastalih u prijenosu i OFDM-a.

U prijenosnom kanalu informacija se može prenositi kontinuirano ili u vremenskim isječcima. Tada je moguć prijenos različitih poruka u različitim vremenskim isječcima, npr. prijenos podataka iz različitih izvora. Metoda s vremenskim isječcima (TDMA- Time Division Multiple Access- multipleks s vremenskom podjelom kanala) dugo se primjenjuje u telefoniji za prijenos više različitih poziva na jednoj telefonskoj liniji, na jednom satelitskom kanalu ili isto tako na jednom mobilnom radijskom kanalu. Prijenosni kanal može se podijeliti na određene frekvencijske širine, na potpojaseve unutar kojih se nalaze podnositelji. Svaki je podnositelj moduliran neovisno o drugom i nosi svoju vlastitu informaciju neovisnu od drugih podnositelja. Svaki od tih podnositelja može biti vektorski moduliran, tj. s QPSK, 16QAM ili 64QAM modulacijom.

Svi podnositelji su raspoređeni na odvojenim konstantnim intervalima Δf . Komunikacijski kanal može sadržavati do tisuću podnositelja od kojih svaki može nositi informaciju iz drugog izvora. Također se može određeni tok podataka iz jednog izvora raspodijeliti na sve podnositelje. Prije raspodjele podaci dobivaju zaštitne kodove. Postupak se naziva frekvencijski multipleks (FDM – Frequency Division Multiplex). Budući da su podnositelji jako blizu jedan drugome, u razmaku od nekoliko kiloherca, treba pripaziti da ne dođe do međusobnog ometanja (preslušavanja) podnositelja. Rješenje je u međusobnoj ortogonalnosti nositelja. Pojam ortogonalni označava da su nositelji fazno pomaknuti za 90 stupnjeva jedan prema drugom.

Postavlja se pitanje kada će susjedni nositelji FDM sustava utjecati jedan na drugog. Odgovor treba početi tražiti u pravokutnom impulsu i u njegovoj Fourierovoj transformaciji (slika 4.). Jedan pravokutni impuls trajanja Δt ima spektar u obliku $\sin(x)/x$ funkcije u frekvencijskoj domeni s nulvrijednostima funkcije raspoređenim na razmaku $\Delta f = 1/\Delta t$ u spektru. Spektar jednog pravokutnog impulsa definiran je nad kontinuiranom domenom, odnosno umjesto diskretnih spektralnih linija određen je kontinuiranom krivuljom u obliku funkcije $\sin(x)/x$.



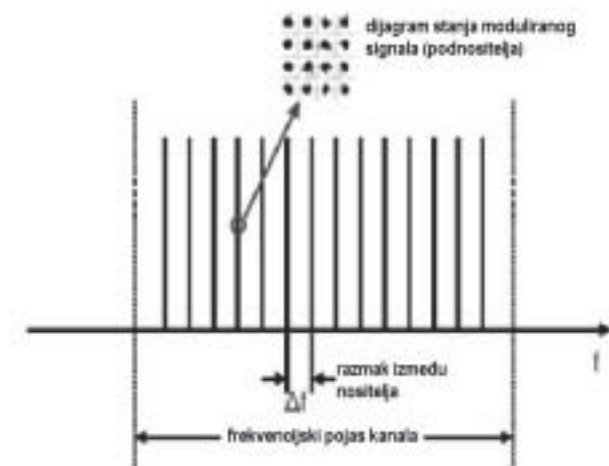
Slika 4. Fourierova transformacija pravokutnog impulsa [1]

Promjenom perioda Δt pravokutnog impulsa mijenja se i razmak Δf u spektru. Ako Δt teži nuli, nule u spektru će težiti beskonačnim vrijednostima. Rezultat je Diracov impuls, čiji se spektar proteže beskonačno na sve

frekvencije. Ako Δt teži prema beskonačnim vrijednostima tada nule u spektru teže nuli. Rezultat je jedna komponenta u spektru (istosmjerna komponenta, $f = 0$). Svi ostali slučajevi između gornja dva povezani su relacijom $\Delta f = 1/\Delta t$.

Slijed pravokutnih impulsa perioda T_p i širine (vremenskog trajanja) Δt također ima spektar oblika funkcije $\sin(x)/x$, osim što sada postoje samo diskretne spektralne linije na frekvencijski ekvidistantnim točkama razmaka $f_p = 1/T_p$, čija je ovojnica funkcija $\sin(x)/x$.

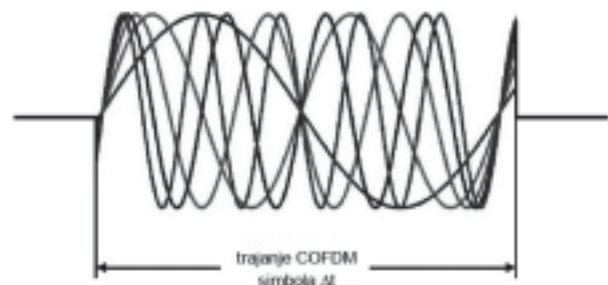
Koja je onda veza između pravokutnih impulsa i ortogonalnosti? Nositelji signala su sinusnog valnog oblika. Sinusni signal frekvencije $f_s = 1/T_s$ u svom spektru ima jednu spektralnu liniju na frekvenciji f_s i $-f_s$ u frekvencijskoj domeni. Međutim, ti sinusni signali ili nositelji, nakon modulacije, sadrže informaciju koju prenose u diskretnim vrijednostima amplitude i faze (slika 5.). Isto tako, sinusni signali nisu proizvodnog ni beskonačnog trajanja. Promjena vrijednosti amplitude i faze događa se nakon određenog vremena trajanja Δt . Tako se može zamisliti da je modulirani signal (nositelj nakon modulacije) sastavljen od signala sinusnog valnog oblika unutar pravokutnog impulsnog signala trajanja Δt . Ovaj valni oblik naziva se burst paket.



Slika 5. Frekvencijski multipleks kodiranih ortogonalnih nositelja (COFDM) [1]

Matematički gledano, u vremenskoj domeni burst paket dobiven je množenjem sinusnog signala s pravokutnim signalom, što u frekvencijskoj domeni odgovara konvoluciji spektra ova dva signala. Znači, na frekvencijama f_s i $-f_s$ umjesto vertikalnih linija bit će funkcije $\sin(x)/x$ sa svojom središnjom točkom točno na frekvenciji f_s i $-f_s$. Nule funkcije $\sin(x)/x$ određene su vremenom trajanja pravokutnog prozora Δt i nalaze se na višekratnicima $\Delta f = 1/\Delta t$. Kako se istodobno unutar vremenskog intervala Δt prenose nositelji (modulirani signali) različitih frekvencija, dijelovi krivulja $\sin(x)/x$ susjednih nositelja međusobno će se zbrajati. Ovo bi značilo preslušavanje između nositelja, odnosno potpunu degradaciju informacije sadržanu u svakom pojedinom nositelju. Ovakve smetnje (preslušavanja) se mogu svesti na najmanju mjeru, ako je razmak između nositelja (Δf) takav da se vrh funkcije $\sin(x)/x$ na mjestu jednog

nositelja podudara s nulom funkcije $\sin(x)/x$ susjednog nositelja (slika 8.). To se postiže razmakom između nositelja Δf , čija vrijednost odgovara recipročnoj vrijednosti vremenskog trajanja pravokutnog impulsnog signala (Δt), tj. burst paketa ili vremenskog perioda jednog simbola. To je ujedno i najmanji razmak između nositelja, a da su oni ortogonalni, tj. da se na intervalu ortogonalnosti (Δt) razlikuju za jednu periodu signala nositelja. Iz uvjeta ortogonalnosti proizlazi da svi ostali nositelji moraju imati frekvencije čije su vrijednosti višekratnici osnovne frekvencije $f = 1/\Delta t$. Burst paket s više tisuća moduliranih podnositelja naziva se COFDM simbol (slika 6.). Kako je u radiokomunikacijskim sustavima termin nositelj vezan uz jedan kanal, naziv nositelj kod COFDM kanala rezerviran je za središnju frekvenciju kanala, a sami nositelji u frekvencijskim potpojasevima COFDM kanala nazivaju se podnositelji.



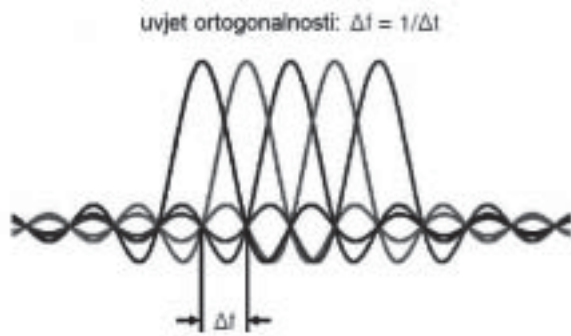
Slika 6. COFDM simbol [1]

Ortogonalnost podnositelja u COFDM simbolu osigurana je položajem podnositelja u frekvencijskoj domeni (frekvencijskom opsegu kanala). Mjesta koja oni pri tome zauzimaju su nulte točke ovojnice spektra pravokutnog impulsnog signala ($\sin(x)/x$). Razmak podnositelja je $\Delta f = 1/\Delta t$ i svi ostali podnositelji nalaze se na višekratnicima od $f_0 = 1/T_0$, pri čemu je $\Delta f = 1/T_0$, gdje je T_0 vremensko trajanje simbola (burst paketa), odnosno pravokutnog impulsnog signala unutar kojega se nalaze svi modulirani podnositelji i koje je ujedno jednako intervalu ortogonalnosti.

Primjer za broj podnositelja (dva moda rada 2k i 8k), njihov najmanji razmak (određen iz uvjeta ortogonalnosti), te vremensko trajanje simbola (recipročna vrijednost razmaka podnositelja) za DVB-T sustav prikazan je u tabeli na slici 7.

NAČIN RADA COFDM SUSTAVA	2k	8k
BRJ BROJ PODNOSITELJA	2048	8192
RAZMAK IZMEĐU PODNOSITELJA Δf	~ 4 kHz	~ 1 kHz
VREMENSKO TRAJANJE SIMBOLA Δt	$1/\Delta f = \sim 250 \mu s$	~ 1 ms

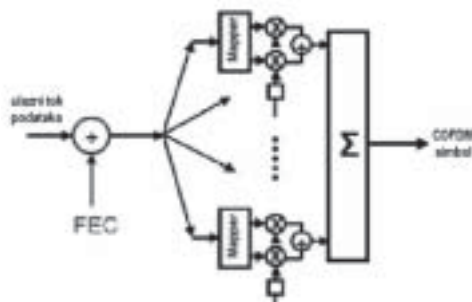
Slika 7. Parametri COFDM simbola za dva moda rada u DVB-T sustavu [1]



Slika 8. Uvjet ortogonalnosti unutar COFDM simbola trajanja Δt (odnosno T_0) [1]

3.1 Generiranje COFDM simbola

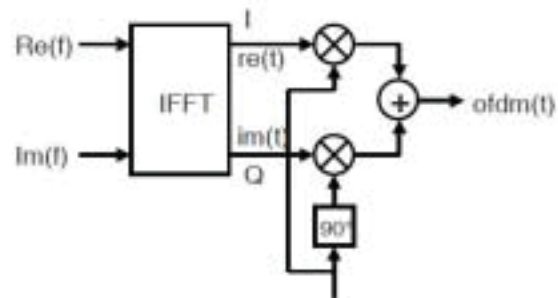
U COFDM sustavu informacija koja se prenosi zaštićena je od pogrešaka, odnosno dodan je određeni broj zaštitnih kodova prije nego što se tok podataka počne distribuirati na podnositelje. Svaki od tih tisuću podnositelja prenosi dio toka podataka. Kao i kod modulacijskog postupka s jednim nositeljem, svaki podnositelj se posebno, neovisno od drugih, modulira s nekim od modulacijskih postupaka (QPSK, 16QAM ili 64QAM). Odabrani modulacijski postupak isti je za sve podnositelje. Teoretski se COFDM modulator može zamisliti kao da je sastavljen od tisuće QAM modulatora svaki sa svojim *mapperom*. Svakom QAM modulatoru dovodi se nositelj određene frekvencije. Na slici 9. prikazan je primjer mnogo QAM modulatora s *mapperima*. *Mapperom* je označen modulacijski postupak, točnije dijagram stanja određenog modulacijskog postupka, kružićima s x označeni su sklopovi u kojima se odvija moduliranje nositelja. Nositelji se privode modulatorima s fazom 0 stupnjeva i sa zakrenutom fazom od 90 stupnjeva (kvadratom na slici označen je zakretač faze za 90 stupnjeva). Nakon moduliranja nositelji se zbrajaju (na slici kružić s oznakom +). Vidi se da se za određenu kodnu riječ na ulazu u *mapper* na izlazu pojavljuje stvarna vrijednost koja definira vrijednost amplitude nositelja s nultom fazom (vektor na x-osi), te imaginarna vrijednost koja definira vrijednost amplitude nositelja s fazom zakrenutom za 90 stupnjeva (vektor na y-osi). Zbrajanjem ovako dobivenih vektora dobiva se vektor s određenom fazom i amplitudom. Na kraju se zbroje dobiveni signali iz svih modulatora (na slici blok označen simbolom Σ), a rezultat je COFDM simbol. Treba napomenuti da podnositelji moraju biti sinkroni kako bi se osiguralo ispunjavanje uvjeta ortogonalnosti unutar trajanja simbola T_0 .



Slika 9. Blok dijagram teoretske izvedbe COFDM modulatora [1]

U praksi se ne može ostvariti opisani modulator zbog vrlo visoke cijene kojom bi se platila stabilnost sklopova. Ovaj modulator je samo za ilustraciju principa generiranja COFDM simbola.

Praktično ostvarenje COFDM modulatora omogućeno je primjenom inverzne brze Fourierove transformacije (IFFT-Inverse Fast Fourier Transform) na polje realnih $Re(f)$ i imaginarnih $Im(f)$ vrijednosti. Ovi kompleksni brojevi dobiveni su iz dijagrama stanja primijenjenog modulacijskog postupka (*mappera*), odnosno jedan kompleksni broj odgovara jednom stanju moduliranog parametra (amplitude, faze) prijenosnog signala (jednog podnositelja).

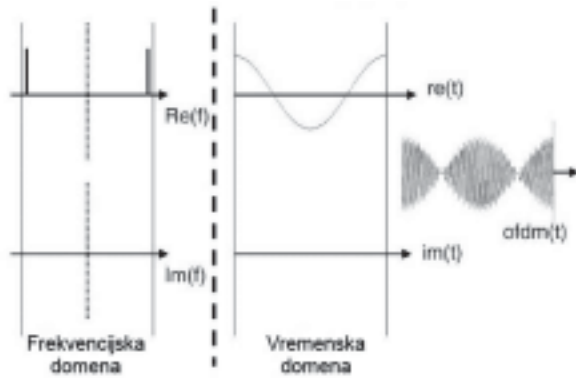


Slika 10. Praktična izvedba COFDM modulatora IFFT transformacijom [1]

Kompleksni brojevi dobiveni iz svih *mappera* grupiraju se u polje stvarnih vrijednosti $Re(f)$ i polje imaginarnih vrijednosti $Im(f)$ (slika 10.). Nakon postupka zaštitnog kodiranja i ispreplitanja bitova podataka, tok podataka (velikih brzina prijenosa) razdjeljuje se na paralelene *streamove* (malih brzina prijenosa) koji zasebno moduliraju podnositelje. Kako se pogreške prilikom prijenosa koncentriraju na određene skupine bitova, što čini postupke zaštitnog kodiranja neučinkovitim, moraju se bitovi ispreplesti (izmiješati) po nekom pravilu kako bi se nakon vraćanja u prethodni poredak u prijammiku postigao slučajni poredak položaja pogrešnih bitova (manji broj pogrešnih bitova u određenom intervalu). Tok podataka dijeli se na onoliko *streamova* koliko ima podnositelja, te se paket po paket (određeni broj bitova u određenom rasporedu-kodna riječ), ovisno o modulacijskom postupku (QPSK, 16 QAM ili 64 QAM), dovodi na *mappere*. Izlaz *mappera* su vektori moduliranog signala, odnosno stanja moduliranog signala (diskretne vrijednosti amplitude i faze podnositelja). Kako određena kodna riječ na ulazu u *mapper* proizvodi na izlazu samo jedan vektor, isti je opisan realnom i imaginarnom brojčanom vrijednošću. Grupiranjem posebno realnih i posebno imaginarnih vrijednosti iz svih *mappera* stvaraju se tablice čije vrijednosti (kompleksni brojevi) su sada ulazni podaci za inverznu FFT. Postupkom inverzne FFT kompleksni brojevi na mjestu svakog podnositelja prebacuju se iz frekvencijske domene u vremensku domenu (slika 10.). Dakle, svaki modulirani podnositelj opisan je brojem na x-osi i brojem na y-osi ili svojom sinusnom i kosinusnom komponentom ili realnim i imaginarnim brojem, odnosno kompleksnim brojem. Dobiveni valni oblik u vremenskoj domeni, nakon IFFT-a i I/Q modulatora, ima osobine slučajnog, stohastičkog signala. Radi boljeg

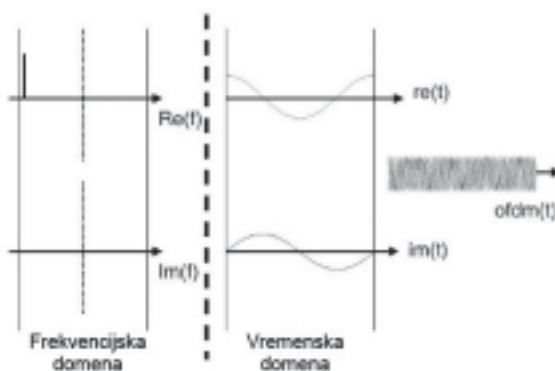
razumijevanja rada IFFT transformacije, u nastavku je objašnjeno nekoliko primjera parova valnih oblika i njihovih spektara.

Ukoliko je spektar simetričan s obzirom na sredinu frekvencijskog pojasa COFDM kanala (slika 11.) i sastavljen od nositelja br. 1 i N, nakon IFFT transformacije dobiva se u polju realnih vrijednosti $re(t)$ kosinusni valni oblik signala. Na izlazu u polju imaginarnih vrijednosti $im(t)$ nalaze se nule, dakle nema nikakvog valnog oblika.



Slika 11. IFFT transformacija simetričnog spektra [1]

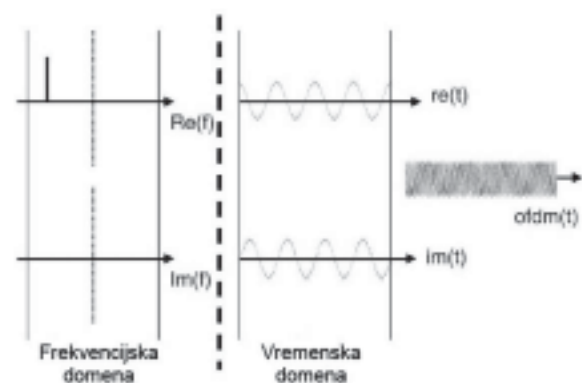
S obzirom na simetričnost spektra na ulazu u IFFT transformaciju bila je i očekivana samo realna komponenta nakon IFFT transformacije. Nakon obrade ovih vrijednosti ($re(f)$ i $im(f)$) u I/Q modulatoru (slika 11.), dobiva se na izlazu valni oblik amplitudno moduliranog signala s potisnutim nositeljem. U slučaju kada je npr. spektralna linija u gornjem dijelu pojasa, nositelj N, potisnuta i postoji samo nositelj br.1, nakon IFFT transformacije dobivaju se i realne i imaginarnje vrijednosti koje tvore kompleksni signal u vremenskoj domeni (slika 12. i 13). Nakon IFFT transformacije na izlazu u polju realnih vrijednosti $re(t)$ dobiven je signal kosinusnog valnog oblika s upola manjom amplitudom u odnosu na prethodni primjer.



Slika 12. IFFT transformacija asimetričnog spektra [1]

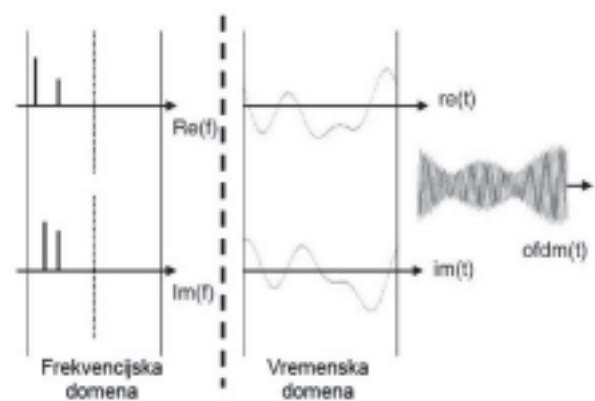
U polju imaginarnih vrijednosti nakon IFFT transformacije dobiveni signal je sinusnog valnog oblika iste frekvencije i amplitude kao i $re(t)$. Kada se dobiveni kompleksni signal ($re(t)$, $im(t)$) obradi u I/Q modulatoru, dobiva se na izlazu sinusni valni oblik konstantne amplitude (bez modulacije) i frekvencije. Opisani primjer

objašnjava fazni postupak dobivanja SSB signala (SSB-Single Sideband-modulacija amplitude s jednim bočnim pojasom), a primjena IFFT transformacije na ovaj način predstavlja SSB modulator. Za razumijevanje stvaranja COFDM simbola uzima se u obzir da svaka komponenta u frekvencijskoj domeni (signal određene amplitude i frekvencije) nakon IFFT transformacije stvara dvije komponente ($re(t)$ i $im(t)$) u vremenskoj domeni (dva signala iste amplitude i frekvencije, ali s faznim pomakom od 90 stupnjeva).



Slika 13. IFFT transformacija asimetričnog spektra s drugom frekvencijom [1]

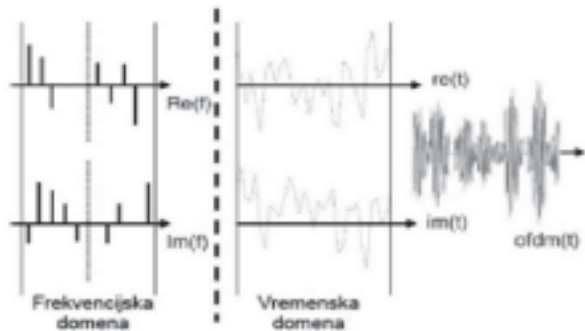
Znači, za svaki nositelj na ulazu u IFFT transformaciju dobiva se, nakon IFFT transformacije u polju imaginarnih vrijednosti $im(t)$, valni oblik koji je uvijek zakrenut za 90 stupnjeva prema onome u polju realnih vrijednosti $re(t)$ i iste je amplitude i frekvencije. Uključujući sve više i više nositelja na ulazu u IFFT transformaciju, izlazni signal je sastavljen od sve većeg broja različitih parova realnih $re(t)$ i imaginarnih $im(t)$ komponenti signala, u vremenskoj domeni, s faznim pomakom između sebe od 90 stupnjeva.



Slika 14. COFDM simbol s 3 nositelja [1]

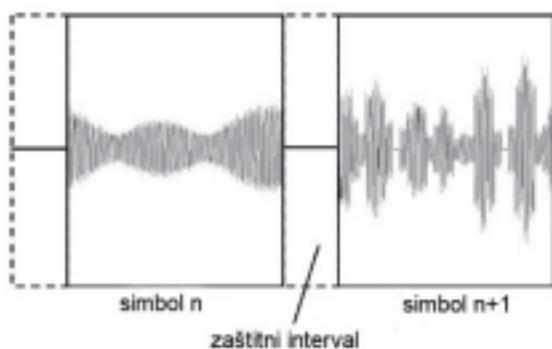
Za valni oblik u polju imaginarnih vrijednosti $im(t)$ kaže se da je Hilbertova transformacija valnog oblika u polju realnih vrijednosti $re(t)$. Ova se transformacija može zamisliti i kao fazni zakretač za 90 stupnjeva svih spektralnih komponenti u zadanom pojasu. Nakon obrade ovih vrijednosti ($re(t)$, $im(t)$) u I/Q modulatoru dobiva se valni oblik COFDM simbola u vremenskoj domeni.

Dodavanjem sve više nositelja (slika 14.), vremenski oblik COFDM simbola poprima obilježja slučajnog signala. Sa samo dvanaest nositelja slučajno raspoređenih unutar frekvencijskog pojasa, COFDM simbol poprima oblik slučajnog signala (slika 15.). Izračunavanje i generiranje simbola odvija se u vremenskim segmentima koji slijede jedan za drugim, tvoreći neprekidni tok simbola. Isti broj bitova podataka se uvijek dovodi i modulira na veliki broj COFDM



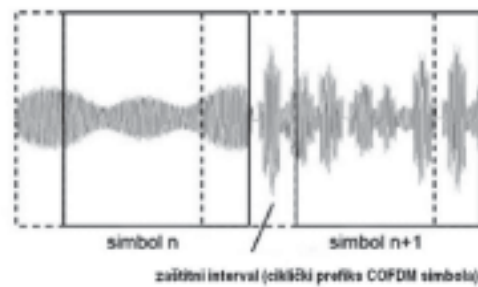
Slika 15. COFDM simbol s 12 nositelja [1]

podnositelja. Prvo se stvaraju tablice s realnim $Re(f)$ i imaginarnim $Im(f)$ vrijednostima u frekvencijskoj domeni. Nakon IFFT transformacije formiraju se tablice s $re(t)$ i $im(t)$ vrijednostima spremne za očitavanje iz izlazne memorije. Nakon toga generiraju se COFDM simboli, jedan za drugim, točne konstantne duljine vremenskog trajanja $\Delta t = 1/\Delta f$. Između simbola se zatim umeću zaštitni intervali, određenog vremenskog trajanja, čija se duljina može podešavati. Prijelazne pojave nastale superpozicijom istih simbola s različitim vremenskim kašnjenjem (višestazni prijam) obično traju kraće od trajanja zaštitnog intervala.



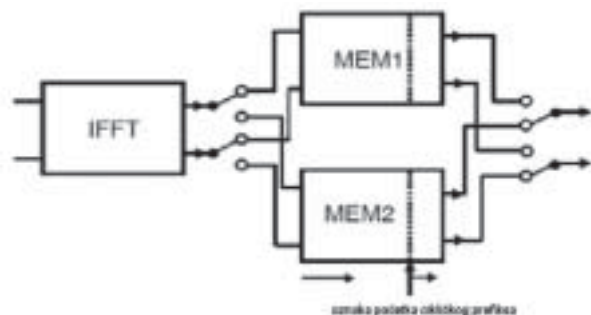
Slika 16. COFDM simboli sa zaštitnim intervalom [1]

Zaštitni interval mora vremenski dulje trajati od najduljeg vremenskog kašnjenja simbola nastalog zbog refleksija na putu prostiranja radiovala (slika 16.). Na kraju zaštitnog intervala vrijednosti prijelaznih pojava moraju doći na nulu. Ukoliko to nije slučaj, proizvedena je dodatna smetnja zbog miješanja među simbolima čija je vrijednost u funkciji intenziteta reflektiranih simbola. Vrijednosti unutar zaštitnih intervala nisu postavljene na nulu. Obično je kraj sljedećeg simbola precizno urezan u taj vremenski interval (slika 17.), pa se zaštitni interval ne može vidjeti ni u jednom oscilogramu.



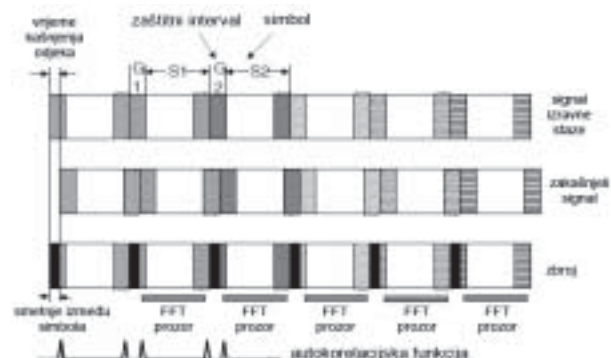
Slika 17. Zaštitni interval popunjen zadnjim dijelom sljedećeg simbola (ciklički prefiks) [1]

Ovo proširenje COFDM simbola naziva se cikličkim prefiksom (CP-Cyclic Prefix). Sa stajališta obrade signala, ovi zaštitni intervali mogu se lako generirati. Signali proizvedeni nakon IFFT transformacije zapisani su u izlaznoj memoriji i zatim se naizmjenično očitavaju tvoreći neprekidni tok. Zaštitni interval popunjava se očitavanjem zadnjeg dijela sljedećeg simbola (slika 18.). Zbog čega se zaštitni interval ne ostavi prazan, a sadrži presliku zadnjeg dijela sljedećeg simbola? Odgovor se nalazi u tome kako i na koji način se prijamnik sinkronizira na dolazeće simbole. Ukoliko bi zaštitni interval ostao prazan, prijamnik bi morao točno pogoditi početak svakog pristiglog simbola. Ovo nije moguće zato što dolazi do pojavljivanja zakašnjelih simbola zbog refleksija na putu prostiranja. Njihovim zbrajanjem na mjestu prijama nemoguće je točno odrediti početak simbola.



Slika 18. Generiranje zaštitnog intervala [1]

Ako se preslika zadnjeg dijela sljedećeg simbola ponovi u prethodnom zaštitnom intervalu, komponente signala koje se ponavljaju više puta u signalu mogu se lako pronaći putem autokorelacijske funkcije u prijammiku. Ovim postupkom omogućeno je točno pronalaženje početka i kraja područja unutar proširenog simbola, koji nije oštećen, zbrajanjem zakašnjelih simbola (slika 19.).



Slika 19. Višestazni prijam COFDM simbola [1]

Slika 19. prikazuje prijam izravnog i reflektiranog signala s vremenskim kašnjenjem uzrokovanog različitom duljinom puta do prijамne antene. Korištenjem autokorelacijske funkcije, prijамnik pozicionira početak očitavanja simbola na ono mjesto na kojem počinje neoštećeni dio simbola. To je ujedno prva vrijednost u polju ulaznih vrijednosti za brzu Fourierovu transformaciju (FFT). Dakle, na mjestu prijama primjenjuje se inverzna transformacija od one kod odašiljanja simbola (modulatora). FFT transformacijom prebacujemo nazad vrijednosti signala iz vremenske u frekvencijsku domenu. Polje ulaznih vrijednosti za FFT ima točno isti broj vrijednosti koliko ima uzoraka u COFDM simbolu. Znači, broj podnositelja u simbolu (frekvencijska domena) jednak je broju uzoraka u COFDM simbolu (vremenska domena). Postoji određena mala razlika između iznesenog zaključka i tehničke realizacije COFDM sustava. Ovdje nije bitno da prva vrijednost iz vremenske domene simbola (uzorak) dođe na prvo mjesto ulaznog polja u FFT algoritam (prozor). Posljedica toga je da će nakon FFT transformacije dijagrami stanja nositelja (moduliranih signala) biti zakrenuti za određeni fazni kut prema onima (kako su izgledali) na ulazu u IFFT transformaciju u modulatoru. Ova greška lako se otklanja u sljedećim stupnjevima prijамnika. Važno je napomenuti da zaštitni interval ne može poslužiti za eliminaciju fedinga u prijамnom signalu. Zaštitno kodiranje (FEC-Forward Error Correction), ispreplitanje bitova u toku podataka i što uniformnija raspodjela toka podataka na sve podnositelje u COFDM simbolu su jedina zaštita od posljedica fedinga u prijenosnom kanalu. Isto tako, zaštitnim intervalom omogućena je jedna nova tehnika u radu odašiljača koja nije bila izvediva u analognoj tehnologiji. Kako je rezultat prijama signala od više odašiljača s određenog geografskog područja jednak rezultatu prijama nastalog višestaznim prostiranjem, otvorena je nova mogućnost rada svih odašiljača na istoj frekvenciji (SFN- Single Frequency Network). Unutar SFN mreže svi odašiljači odašilju potpuno jednaki signal te moraju biti sinkronizirani po vremenu i frekvenciji. Ovaj problem sinkronizacije riješen je uz pomoć sustava za određivanje položaja (GPS- Global Positioning System).

3.2 Dodatni signali u spektru COFDM signala

Do sada je rečeno da se tok podataka dijeli na onoliko streamova podataka koliko ima podnositelja. Konkretnim COFDM sustavima to nije tako. U svim sustavima koji koriste COFDM modulacijski postupak (spomenuti u uvodnom dijelu) mogu se u manjem ili većem broju naći (ili ih uopće nema) sljedeće kategorije podnositelja:

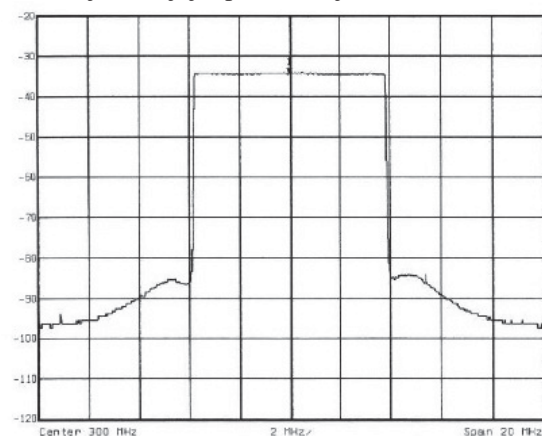
- podnositelji korisnih podataka (npr. digitalni videosignal)
- nekorišteni podnositelji postavljeni na nulu
- pilotski podnositelji na istoj poziciji u svakom simbolu
- pilotski podnositelji s promjenjivom pozicijom u svakom simbolu
- posebni podnositelji podataka za dodatne informacije

Kod podnositelja korisnih podataka koristi se koherentna i nekoherentna modulacija i demodulacija podnositelja. Kod koherentnih QPSK, 16QAM i 64QAM modulacijskih postupaka kodne riječi sastoje se od 2, 4 i 6 bita, kod kojih svaki binarni kod određuje jedno stanje moduliranog parametra (amplituda, faza) prijenosnog signala (podnositelja). Sva moguća stanja moduliranog parametra za jedan modulacijski postupak prikazuju se dijagramom stanja (slika 5.). U slučaju nekoherentnog diferencijalnog kodiranja koje se također često koristi, informacija je sadržana u razlici stanja moduliranog parametra prijenosnog signala (podnositelja) od jednog do drugog simbola. Glavni modulacijski postupci su diferencijalna diskretna modulacija faze s četiri stanja faze DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying) i diferencijalna binarna diskretna modulacija faze DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying). Prednost diferencijalnog kodiranja je u tome što se sve nastale pogreške u prijenosu automatski ispravljaju, štedeći tako na dodatnim sklopovima prijамnika i pojednostavljajući izvedbu prijамnika. Međutim, u odnosu na koherentne modulacijske postupke, vjerojatnost pogreške u prijenosu se udvostručuje. Rubni podnositelji na početku i na kraju frekvencijskog pojasa (kanala), zbog nadvišenja na rubovima u spektru COFDM signala, ne koriste se u većini slučajeva, pa se njihove amplitude postavljaju na nulu. Oni se nazivaju podnositeljima nulte informacije i postoje dva osnovna razloga zašto se koriste:

- olakšano je filtriranje (filtri s manje strmim karakteristikama) na bočnim rubovima spektra COFDM signala, čime se sprečavaju smetnje susjednih kanala
- olakšavaju prilagođavanje broja bitova po simbolu prema strukturi toka podataka koji dolaze na podnositelje

Spektar COFDM signala je približno pravokutnog oblika, a rezultat je zbroja ovojnica $\sin(x)/x$ svih podnositelja u signalu (slika 20.).

Nedovoljna strmina bočnih rubova spektra COFDM signala uzrokuje smetnje od susjednih kanala, te je potrebno povećati gušenje na bočnim rubovima s filtrima određenih strmih karakteristika. Ovi zahtjevi za vrlo strmim filtarskim karakteristikama bitno se ublažavaju nekorištenjem krajnjih podnositelja.



Slika 20. Stvarni spektar COFDM signala DVB-T sustava [1]

Uzimajući u obzir broj bitova u jednom i više COFDM simbola, često je potrebno prilagoditi se strukturi podataka ulaznog signala koji su podijeljeni u blokove (s određenim brojem bita). U zavisnosti od modulacijskog postupka zavisi i broj bitova unutar jednog simbola. Broj podnositelja unutar simbola bira se tako da se obuhvati određeni broj blokova podataka ulaznog signala i potpuno popuni određeni broj simbola. IFFT algoritam, kao i FFT, svoju veliku brzinu izračunavanja postiže smanjenim brojem računskih operacija množenja i zbrajanja, ali samo pod uvjetom da je broj ulaznih podataka (kompleksnih brojeva) jednak nekoj potenciji broja 2. Podnositelji koji nose informaciju (jedno od stanja iz dijagrama stanja) u obliku kompleksnog broja, a koji sudjeluje sa svojim vrijednostima u ulaznom polju podataka za FFT algoritam, su podnositelji korisnih podataka i pilotski podnositelji. U ulaznom polju podataka FFT algoritma ne sudjeluju krajnji podnositelji COFDM simbola.

Pilotski signali na mjestima podnositelja mogu biti:

- pilotski podnositelji s fiksnom pozicijom u frekvencijskom pojasu simbola
- pilotski podnositelji s promjenjivom pozicijom u frekvencijskom pojasu simbola

Pilotski podnositelji s fiksnom pozicijom u frekvencijskom pojasu koriste se za automatsku kontrolu frekvencije (AFC-Automatic Frequency Control)) u prijarniku, odnosno za sinkronizaciju na odašiljačku frekvenciju. Ti podnositelji su obično kosinusni signali konstantne amplitude, a u dijagramu stanja smješteni su na realnoj osi s fiksnom pozicijom amplitude. Njihov broj i raspored je određen u svakom simbolu. Ako prijarna frekvencija nije jednaka odašiljačkoj, tada će svi dijagrami stanja rotirati unutar jednog simbola. Na prijarnoj strani se fiksni pilotski signali unutar simbola izdvajaju te se frekvencija prijarnika korigira prema onoj na odašiljačkoj strani tako da se fazna razlika prema pilotskim signalima svode na nulu za vrijeme trajanja jednog simbola.

Pilotski signali s promjenjivom pozicijom u frekvencijskom pojasu (kanalu) služe kao mjerni signali za procjenu stanja kanala i korekciju određenih stupnjeva u prijarniku kod primjene koherentne demodulacije.

Posebni podnositelji podataka za dodatne informacije često se koriste kao brzi signalizacijski kanali od odašiljača do prijarnika, npr. o promjeni modulacijskog postupka (npr. s QPSK na 64QAM). Na ovaj se način najčešće prenose svi trenutni parametri prijenosnog sustava od odašiljača do prijarnika (primjer DVB-T sustava). U prijarniku ostaje samo postaviti frekvenciju prijama.

3.3 Hijerarhijska modulacija

Prijam digitalno moduliranih signala uvijek rezultira naglim gubitkom prenesene informacije kada omjer signala i šuma padne ispod neke određene vrijednosti. Naravno, to vrijedi i za COFDM sustave i kod nekih prijenosnih sustava (DVB-T, ISDB-T) koji koriste

COFDM sustav. Ovom problemu prišlo se postupkom nazvanim hijerarhijska modulacija. Uz pomoć hijerarhijske modulacije informacija se kodira na dva različita načina unutar spektra COFDM signala. Jednim kodiranjem osigurana je velika otpornost na smetnje u prijenosu, ali uz manju brzinu prijenosa (manju kvalitetu slike i tona), dok je drugim kodiranjem osigurana manja otpornost na smetnje uz veću brzinu prijenosa (veća kvaliteta slike i tona). Iz toga proizlazi da se isti videosignal može istodobno prenositi u dvije različite kvalitete. U toku prijama, ovisno o uvjetima prijama (npr. omjer signal/šum signala na antenskom priključku je na granici zahtijevanog za kvalitetnu sliku i ton), odabire se jedan od dva toka podataka bez prekida u praćenju televizijskog programa.

4. ZAKLJUČAK

COFDM sustav zamišljen je i ostvaren za vrlo teške uvjete prijenosa signala zemaljskom radiodifuzijom, naročito za mobilni prijam. Informacija u prijenosnom kanalu višestruko je zaštićena različitim postupcima zaštitnog kodiranja, ispreplitanja te podjelom glavnog toka podataka na više tokova koji se privode velikom broju podnositelja unutar frekvencijskog pojasa COFDM kanala. Kako je rezultat podjele na veliki broj tokova podataka smanjenje brzine prijenosa svakog novog toka podataka, odnosno produljenje vremena trajanja simbola (paketa podataka), ovom tehnikom eliminirane su smetnje refleksija nastale višestaznim prostiranjem radiovalova do prijarnne antene. Isto tako, ova tehnika multipleksiranja omogućava emitiranje istog signala na istoj frekvenciji, svih odašiljača u mreži, na određenom geografskom području. Uz izvorno kodiranje videosignala (MPEG-2, MPEG-4) i COFDM sustava kao tehnike kanalnog kodiranja prijenosnog signala, otvorene su mogućnosti efikasnijeg i s gospodarskog stajališta ekonomičnijeg iskorištenog frekvencijskog spektra dodijeljenog radiodifuziji televizijskog signala. Na kraju treba spomenuti da se vrlo često ovaj sustav spominje pod nazivima OFDM i COFDM. U praksi nema nikakve razlike između ove dvije tehnike. OFDM je dio COFDM sustava i nikada se sustav OFDM ne koristi bez višestruke zaštite podataka koju podrazumijeva COFDM sustav.

4. LITERATURA

- [1] Fischer, Walter, *Digital Video and Audio Broadcasting Technology* (Second edition), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] Modlic, I.; Modlic, B., *Visokofrekvencijska elektronika (modulacije, modulatori, sintezatori frekvencije)*, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
- [3] Zovko-Cihlar, B., *Televizija u boji*, Tehnička enciklopedija, Hrvatski leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1992.