

Principi OFDM sistema za radio komunikacije

Predrag Spasić¹, Ljubomir Zelenbaba²

¹Bel Mobile, Trg Nikole Pašića 7, Beograd; ²Elektrotehnički fakultet u Beogradu

I. UVOD OFDM – OPIS SISTEMA

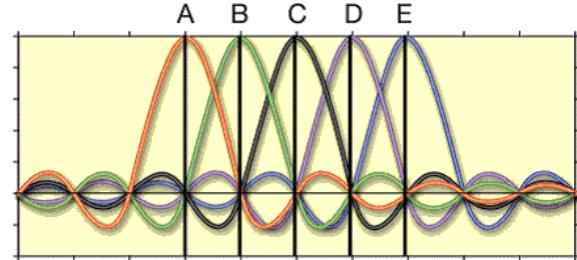
OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) principi su razvijeni pre više od 25 godina, ali je interesovanje za ovu tehnologiju poraslo u poslednje vreme, delom zahvaljujući napretku u procesiranju signala i mikroelektronici. Ova modulaciona šema ima i nazive *MultiCarrier Modulation* (MCM – modulacija sa više nosilaca) ili *Discrete Multi-Tone* (DMT – diskretna multitonksa modulacija). Ovde je važno istaći da OFDM nije zapravo modulaciona šema, jer zapravo i nije u konfliktu sa drugim modulacionim šemama, već je to više šema kodovanja ili transportna šema.

U poslednje vreme javilo se veliko interesovanje za OFDM-om kao izborom modulacije za niže frekvencije (ispod 10GHz). Iako se problem donošenja standarda vidi kao najkomplikovana stavka u razvoju i primen ove, a i drugih tehnologija, postoje mnoga udruženja koja rade na formiranju standarda koji će unificirati blagi haos na trenutnom tržištu. Veruje se da će mobilna multimedijalna mreža, "Magic", koja je deo NTT DoCoMo vizije 2010, obezbeđivati protok ka korisniku od 10Mbps korišćenjem OFDM tehnologije.

OFDM tehnika modulacije je predložena za prenos velike količine podataka radio vezama tipa point-to-point i za point-to-multipoint fiksne bežične aplikacije, kao i za WLAN aplikacije u unlicensed delu spektra (deo spektra u kome je dozvoljen rad bez zakupa spektra). OFDM je već postao deo standarda za bežične lokalne mreže u okviru 802.11 specifikacija. Rezultujući efekat ove tehnologije su efikasnije i robusnije mreže.

II OFDM PODNOSIOCI

Za razliku od CDMA (*Code Division Multiple Access*), gde su podaci modulisani direktnom sekvencom ortogonalnih Walsh-ovih kodova, OFDM podaci su modulisani setom ortogonalnih nosilaca. Osnovna ideja OFDM-a jeste da se tok podataka podeli u N paralelnih tokova kako bi se redukovao protok podataka, a svaki od tih manjih protoka se prenosi preko sopstvenog podnosioca. Ovi nosioci su međusobno ortogonalni tako što je između njih biran odgovarajući frekvenčijski razmak – maksimum signala svakog od podnosioca odgovara nulama svih ostalih signala, kao što je prikazano na slici 1. Na taj način je dozvoljeno spektralno preklapanje među nosiocima, jer će ortogonalnost obezbediti da prijemnik bude u mogućnosti da razdvoji OFDM podnosioce. Ovako se postiže bolja spektralna efikasnost korišćenjem jednostavnog multipleksa sa frekvenčijskom raspodelom.



Slika 1. Konstantan razmak OFDM podnosioca.

Ilustracija jednostavnog koncepta OFDM-a: neka je jedan nosilac modulisan korišćenjem QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), gde svaki simbol enkodira 2 bita. Ova modulacija se odvija pri određenom simbolskom protoku, i neka on sada bude 1000 simbola po sekundi. Teorija modulacije govori da spektar tako modulisanog signala ima oblik $\sin(x)/x$, čija je prva nula na 1000 Hz. Ako drugi nosilac ima frekvenciju tačno 1 kHz višu od prvog nosioca, i ako ga modulišemo sa istim simbolskim protokom, dobija se da se oba signala mogu detektovati bez međusobne interferencije. Isti rezultat bi se dobio i ako bi se sve navedene vrednosti pomnožile sa 256, a umesto da se koriste dvobitski simboli (QPSK), mogu se koristiti 6-bitni simboli (64-QAM). Ovo bi moglo da progura veliku količinu podataka kroz relativno mali propusni opseg.

Problem sa navedenim pristupom je što je potreban veliki broj lokalnih oscilatora međusobno zavisnih u smislu da su sve frekvencije izuzetno tačni multipli, kao što je navedeno. Ovo je teško izvodljivo i veoma skupo. Ovde se upravo zato koristi digitalna obrada podataka velike brzine (*very high speed digital signal processing (DSP)*). Svaki od oscilatora može da bude digitalna predstava sinusnog talasnog oblika nosioca koji može biti modulisan u numeričkom domenu. Ovo može simultano da se izvršava za sve nosioce. Rezultujući izlazi svih kanala se sabiraju. Kako postoji reprezentacija signala u frekvenčijskom domenu, a potrebno je da se moduliše svaki nosioc u vremenskom domenu, jednostavno se izvršava *Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)* koja konvertuje blok podataka iz frekvenčijskog u vremenski domen i tada moduliše nosilac. Na prijemnoj strani se digitalizuje primljeni signal, i vrši FFT nad njim kako bi se vratio u frekvenčijski domen.

U praksi, neki nosioci se koriste za estimaciju kanala i postoje ekstra biti koji se dodaju za detekciju i korekciju greške. Ovo se zapravo zove *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM)*.

III OFDM SIGNAL

U svojoj najopštijoj formi niskopropusni (*lowpass*) ekvivalent OFDM signala se može napisati kao set modulisanih nosilaca koji se paralelno prenose:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot g_k(t - nT_s) \right) \quad (1)$$

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t}, & t \in [0, T_s] \\ 0, & \text{inace} \end{cases}, \quad f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k = 0 \dots N-1 \quad (2)$$

$C_{n,k}$ je simbol emitovan na k -tom podnosiocu u n -tom signalizacionom intervalu, T_s je trajanje signalizacionog intervala, N je ukupan broj OFDM podnosioča, f_k je frekvencija k -og podnosioča, pri čemu je f_0 najniža iskorišćena frekvencija.

Definiše se n -ti OFDM okvir kao prenošeni signal u n -tom signalizacionom intervalu trajanja jednako periodu jednog simbola T_s , i označava se sa $F_n(t)$. Zamenom $F_n(t)$ u jednačinu (1) umesto izraza u zagradama koji odgovara n -tom OFDM okviru, može se napisati:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n(t) \quad (3)$$

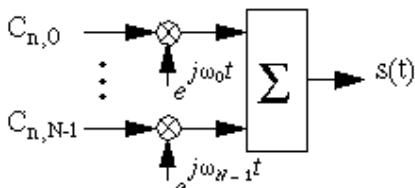
tako da $F_n(t)$ odgovara setu simbola $C_{n,k}$, $k=0 \dots N-1$, od kojih se svaki prenosi na odgovarajućem podnosiocu f_k . Demodulacija se zasniva na ortogonalnosti nosilaca $g_k(t)$:

$$\int_{\Re} g_k(t) \cdot g_k^*(t) \cdot dt = T_s \cdot \delta(k-1) \quad (4)$$

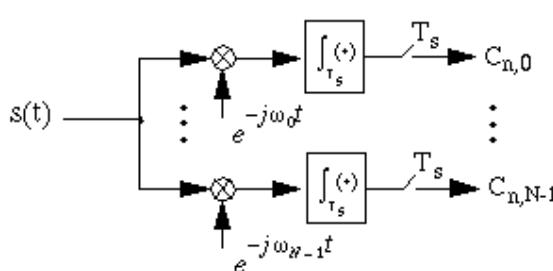
tako da demodulator koristi sledeću relaciju:

$$C_{n,k} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} s(t) \cdot g_k^*(t) \cdot dt \quad (5)$$

Blok dijagram OFDM modulatora je dat na slici 2, dok je demodulator prikazan na slici 3. Zbog jednostavnosti su izostavljeni filtri.



Slika 2. – OFDM modulator.



Slika 3. – OFDM demodulator.

Kako bi se OFDM sistem učinio praktičnijim, potrebna je ekonomičnija implementacija modulatora i demodulatora, jer

je prema slikama 2 i 3 potreban veliki broj identičnih modulator/demodulator blokova. To se može postići procesiranjem signala u diskretnom vremenu i primenom filterskih osobina diskretne Furijeove transformacije (DFT). Odabiranjem *low pass* ekvivalentnog signala iz (1) i (3) bitskom brzinom koja je N puta manja od simbolske brzine podnosioča $1/T_s$, kao i pretpostavkom da je $f_0=0$ (t.j., frekvencija nosioca je jednaka frekvenciji najnižeg podnosioča), OFDM frame se može izraziti sa:

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot g_k(t - nT_s) \Big|_{t=\left(n+\frac{m}{N}\right)T_s} \quad m = 0 \dots N-1 \quad (4.2)$$

$$\Rightarrow F_n(m) = e^{j2\pi f_0 T_s \frac{m}{N}} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \right) = N \cdot IDFT\{C_{n,k}\} \quad (7)$$

3.1 Uvođenje cikličnog prefiksa

Kada se signal $s(t)$ propusti kroz kanal sa impulsnim odzivom $h(t)$, primljeni signal je dat konvolucijom:

$$r(t) = h(t) * s(t) \quad (8)$$

i ako kanal nije idealan, doći će do ISI (intersimbolska interferencija). Zgodno je posmatrati OFDM signal u obliku okvira podataka, tako da se može smatrati da će kanal produkovati ISI u okviru *frame-a*, a takođe i IFI (inter frame interferencija) među susednim *frame-ovima*. Posmatrajući ekvivalentni signal u diskretnom vremenu i kanal h_i , $i=0 \dots L$, gde je L kašnjenje *spread* kanala, relacija (8) postaje:

$$r_m = \sum_{i=0}^L h_i \cdot s_{m-i} \quad (9)$$

Može se pokazati da će uvođenje zaštitnog intervala dužine L između dva susedna *frame-a* "absorbovati" kašnjenje u kanalu a time će ukloniti IFI.

Ovo se može ostvariti insertovanjem L vodećih nula u svaki okvir na predaji i njihovim uklanjanjem na prijemu. Međutim, kako bi se takođe uklonila ISI iz okvira, bolje je koristiti ciklični prefiks umesto zaštitnog intervala koji se sastoji od svih nula. U ovom slučaju, posle uklanjanja prefiksa na prijemu, dobija se periodična (ciklična) konvolucija prenošenog okvira podataka i kanala. Ciklično produžen okvir se može napisati kao:

$$\hat{F}_n(m) = \begin{cases} F_n(N+m), & m = -L \dots -1 \\ F_n(m), & m = 0 \dots N-1 \end{cases}, \quad (10)$$

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \quad m = 0 \dots N-1$$

Po odbacivanju prefiksa, primljeni okvir postaje:

$$\hat{F}_n(m) = \sum_{i=0}^{N-1} F_n(m-i)_N \cdot h_i \quad (11)$$

gde $(m-i)_N$ predstavlja oduzimanje po modulu N . Posle DFT demodulacije se dobija:

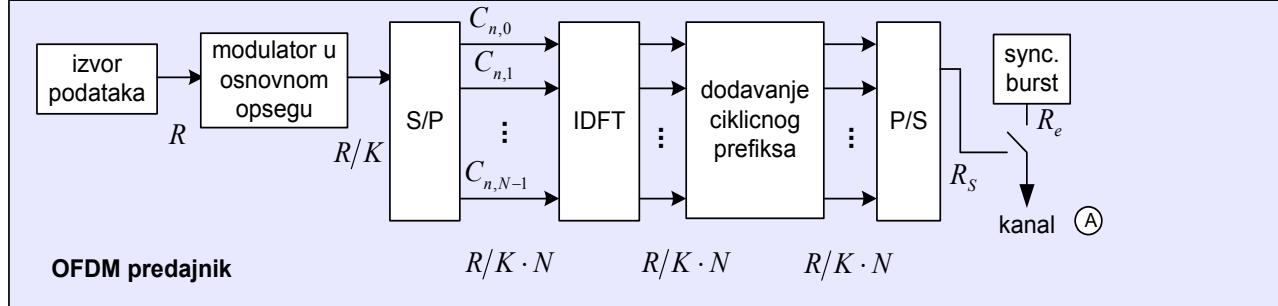
$$\hat{C}_{n,k} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \hat{F}_n(m) \cdot e^{-j2\pi k \frac{m}{N}} = C_{n,k} \cdot H_k, \quad k = 0 \dots N-1 \quad (12)$$

gde je H_k funkcija transfera kanala na frekvenciji podnosioča f_k . Tako, korišćenjem cikličnog prefiksa efekat kanala se

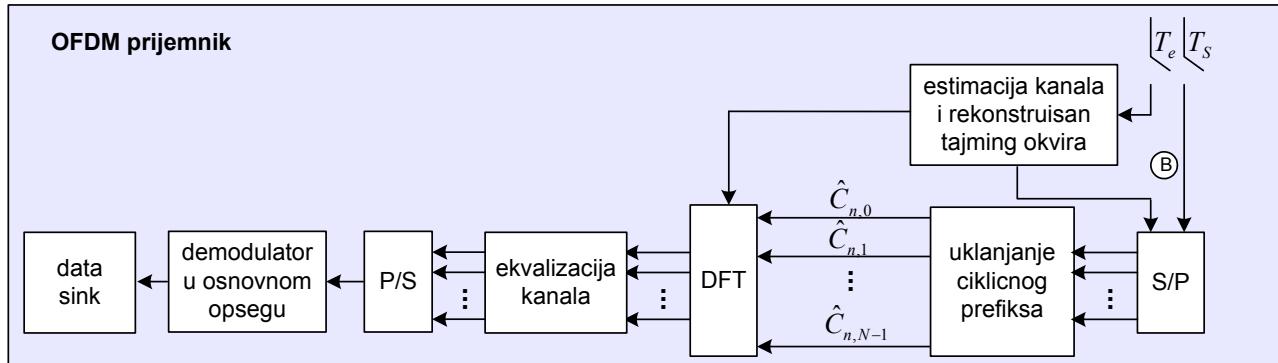
transformiše u kompleksno množenje simbola podataka sa koeficijentima kanala H_k , i sva ISI i IFI podnosioca uklonjene.

IV MODEL OFDM SISTEMA

Ovde će detaljno biti opisani predajni deo, kanal i prijemni deo, zajedno sa funkcijama svih blokova u njima.



Slika 4. - OFDM predajnik.



Slika 5. – OFDM prijemnik.

4.1 OFDM predajnik

Izvor podataka: izlaz mu je niz slučajnih nekoreliranih binarnih simbola ("0" i "1"); protok na izlazu mu je R ;

Modulator u osnovnom opsegu: ulaz mu je niz binarnih simbola, a izlaz modulisani simboli, izabrani iz BPSK, QPSK ili 16-QAM konstelacije; protok na izlazu mu je R/K ; funkcija mu je da mapira K (modulacioni parametar [bit/simb]) binarnih ulaznih simbola u modulisani simbol prema šemi signalizacije u osnovnom opsegu;

S/P (konvertor serijskog u paralelni tok podataka): protok na izlazu mu je $R/K \cdot N$; pravi frame od N simbola;

IDFT (Inverzna DFT): N modulisanih simbola na ulazu treba da se prenesu putem OFDM podnosioca; na izlazu mu je OFDM okvir podataka dužine N ; protok na izlazu mu je $R/K \cdot N$; Dakle, implementira se OFDM modulator sa N podnosioca korišćenjem IDFT. Ulaz u ovaj blok je u frekvencijskom, a izlaz u vremenskom domenu;

Dodavanje cikličnog prefiksa: na ulazu je OFDM okvir podataka; na izlazu je ciklično prošireni OFDM okvir podataka sa prefikom koji se sastoji od poslednjih L simbola okvira (L je jednako maksimalnom kašnjenju u kanalu). Ovo

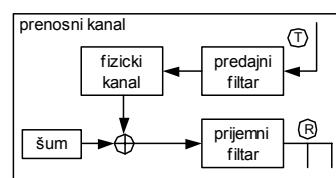
zanemareni su estimacija nosilaca i tracking funkcija, kao i timing okvira i funkcije praćenja rada kanala. Takođe, T_s ne označava trajanje OFDM okvira, već $1/T_s$ označava serijski protok podataka nad kojima je izvršeno odabiranje i dodavanje cikličnog prefiksa.

je efikasan način borbe protiv multipath-a; protok na izlazu je $R/K \cdot N$;

P/S: transformiše paralelni tok podataka od N simbola sa svog ulaza u serijski tok. Na izlazu mu je protok $R_s = R(1 + L/N)/K$;

Sync. Burst: Generiše signal koji odgovara potrebama estimacije kanala i sinhronizacije okvira. Ovi burst-ovi se uvek pojavljuju pre određenog OFDM okvira, a protok tih podataka je $R_e = 1/T_e$.

4.2 OFDM kanal



Slika 6. – Kanal u OFDM komunikacionom sistemu.

Predajni filter: sprovodi oblikovanje impulsa i spektra. Pretpostavlja se a square-root raised cosine filter sa roll-off faktorom od 50%;

Fizički kanal: modeluje besumni kanal sa sporim selektivnim fedingom, pa mu je na izlazu izobličen signal u odnosu na njegov ulaz;

Šum: ovaj blok modeluje aditivni beli Gausov šum koji se pridružuje kanalu;

Prijemni filter: na izlazu je primljeni signal ograničenog frekvencijskog opsega; ovaj blok limitira propusni opseg za šum u prijemniku.

4.3 OFDM prijemnik

Estimacija kanala i rekonstruisan tajming okvira: na ulazu je *Band limited* primljen signal; na izlazu je procena frekvencijskog odziva kanala i okvira vremena. Izvodeći spajanje inicijalne procene kanala i sinhronizacije okvira.

DFT: na ulazu je primljeni i rekonstruisani OFDM okvir podataka, a na izlazu su prenošeni modulisani simboli na koje utiče frekvencijski odziv kanala. Ovde se koristi OFDM demodulator sa N podnosiocima i diskretnom furijeovom transformacijom. Ulaz odgovara vremenskom, a izlaz frekvencijskom domenu;

Ekvalizacija kanala: na ulazu su primljeni simboli i estimacije frekvencijskog odziva kanala na frekvencijama OFDM podnosioca. Na izlazu su rekonstruisani modulisani simboli. Ovde se izvodi *zero-forcing equalization* OFDM podnosioca u frekvencijskom domenu. Samo oni podnosioci čija je magnituda iznad nekog predefinisanog praga podležu ekvalizaciji, a inače se smatraju nepouzdanim (veoma mali SNR);

Demodulator u osnovnom opsegu: na ulazu su rekonstruisani modulisani simboli, izabrani iz BPSK, QPSK ili 16-QAM konstelacije, a na izlazu su primljeni binarni podaci. Ovaj blok mapira jedan ulazni simbol u K binarnih simbola prema šemama signalizacije u osnovnom opsegu;

Data Sink: na ulazu je rekonstruisana binarna informacija. Ovde se obavlja procesiranje specifično za primljenu informaciju.

V ZAKLJUČAK OFDM – PREDNOSTI I MANE

Osnovne prednosti OFDM tehnike

- Obezbeđuje efikasno korišćenje spektra jer dozvoljava preklapanje;
- Podelom kanala na uskopojasne podkanale sa ravnim fedingom, OFDM je otporniji na frekvencijski selektivan feding od sistema sa jednim nosiocem;
- Jedan od osnovnih aspekata OFDM-a su ortogonalni podnosioci. Kako bi se sprečila ISI (Inter-Simbolska Interferencija) i ICI (Inter-Kanalska Interferencija) uvodi se zaštitni interval, koji sadrži ciklični prefiks. Dužina tog zaštitnog intervala mora biti jednak ili veća od maksimalnog relativnog kašnjenja u kanalu;
- Korišćenjem adekvatnog kodiranja kanala i interleaving-a može se izvršiti detekcija simbola koji su izgubljeni zbog frekvencijske selektivnosti kanala;
- Ekvalizacija kanala postaje jednostavnija nego pri korišćenju adaptivnih tehniki ekvalizacije u sistemima sa jednim nosiocem;

- OFDM za funkcije modulacije i demodulacije koristi FFT tehnike koje imaju veliku efikasnost izračunavanja.

- U konjukciji sa diferencijalnom modulacijom nema potrebe da se koristi estimator kanala.

- Manje je osetljiv na ofsete tajminga odabiranja od sistema sa jednim nosiocem.

- Obezbeđuje dobru zaštitu od međukanalske interferencije.

- Na kraju kao jednu od glavnih prednosti OFDM sistema je mogućnost primene u NLoS sistemima (*Non Line Of Sight*), t.j. radio sistemima koji rade bez linije optičke vidljivosti.

Neke mane OFDM-a

- OFDM je osetljiviji na ofset frekvencije nosioca i drift od sistema sa jednim nosiocem.

- Ako su podaci koji ulaze u IDFT blok, korelisani na izvestan način, izlaz iz tog bloka može biti impuls amplitude n, što je veličina IDFT bloka, ili sinusoida maksimalne vrednosti 1. Pokazano je da ovo povećava PAPR (*Peak to Average Power Ratio* – odnos maksimalne i srednje snage) u OFDM transmisiji.

LITERATURA

- [1] "Digital Communications", John G. Proakis, McGraw Hill Book Company, 1989.
- [2] "Evolution of the Power Control Techniques For DS-CDMA Toward 3G Wireless Communications Systems", Miroslav L. Dukić, Dejan M. Novaković, IEEE Communications Surveys, Fourth Quarter 2000.
- [3] "The suitability of OFDM as a modulation technique for wireless telecommunications, with a CDMA comparison", Master thesis, Eric Lawrey, James Cook University, October 1997.
- [4] "Special Issue on "Multi-Carrier Modulation" ", Jean-Paul Linnartz, Philips Research, Eindhoven, and Shinsuke Hara, Osaka University and Delft University of Technology, Wireless Personal Communication, Kluwer, No. 1 - 2, 1996

Zahvalnica: Autori ovog rada duguju posebnu zahvalnost svom profesoru Miroslavu L. Dukiću, redovnom profesoru elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, koji je mnogo pomogao da ova telekomunikaciona oblast bude predmet njihovog teoretskog i praktičnog interesovanja.

Abstract: In this work, we have presented the main characteristics of OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) systems. This modulation has a 25 years long history but the implementations in modern broadband wireless access systems are only few years old. We have also represented advantages of OFDM compared to CDMA (*Code Division Multiple Access*) systems, and in the end advantages and disadvantages of OFDM itself, as a conclusion.

PRINCIPLES OF OFDM SYSTEMS FOR RADIO COMMUNICATIONS

Spasić Predrag, Ljubomir Zelenaba

Contacts: spasicpr@eunet.yu, zljuba@beotel.yu