

Frekvencijska sinhronizacija za OFDM sisteme u uslovima vremenski sporopromjenljivih kanala

Enis Kočan, Milica Pejanović-Đurišić, Zoran Veljović¹

Sadržaj — U radu je predložena veoma efikasna metoda ostvarivanja frekvencijske sinhronizacije za OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) sisteme u uslovima vremenski sporopromjenljivih kanala. Predložena metoda je zasnovana na primjeni pilot tonova i realizuje se u dva koraka. U prvom koraku, korišćenjem preambule koju čini samo jedan OFDM simbol, estimira se i koriguje frekvencijski ofset proizvoljne veličine. U drugom koraku se koriste dva pilot tona smještena u svakom simbolu podataka za dodatnu korekciju kumulativnog uticaja frekvencijskog ofseta kod sporopromjenljivih kanala. Rezultati za vjerovatnoću greške po bitu dobijeni simulacionim putem, pokazuju da se primjenom predložene metode mogu ostvariti performanse veoma bliske idealno sinhronizovanom OFDM sistemu.

Ključne reči — Frekvencijski ofset, frekvencijska sinhronizacija, OFDM.

I. UVOD

ORTOGONALNO frekvencijsko multipleksiranje (OFDM) je modulaciona tehnika kojom se ostvaruju velike brzine prenosa podataka čak i u uslovima frekvencijski selektivnih kanala, pri čemu se veoma efikasno koristi raspoloživi frekvencijski opseg zahvaljući međusobnoj ortogonalnosti podnosilaca. Pored toga, OFDM je otporan na štetne efekte *multipath* propagacije, jer se pravilnim izborom veličine cikličnog prefiksa onemogućuje pojava intersimbolske interferencije (ISI). Zbog svojih dobrih osobina OFDM je našao primjenu u više standardizovanih žičanih i bežičnih sistema za prenos podataka velikim brzinama, a izvjesna je njegova upotreba i u narednim generacijama širokopojasnih bežičnih mreža [1].

Od same pojave OFDM modulacione tehnike uočeni su i njeni nedostaci, koji se ogledaju u osjetljivosti OFDM-a

na frekvencijski ofset i fazni šum. Frekvencijski ofset može nastati uslijed neusklađenosti predajnog i prijemnog oscilatora ili kao posledica Doppler-ovog pomjeraja. Uslijed frekvencijskog ofseta dolazi do interferencije među ponosiocima (ICI – *Inter-carrier Interference*), što značajno degradira performanse sistema, [2]. Zato su predložene brojne metode za estimaciju i korekciju frekvencijskog ofseta. Neke od njih koriste redundantnost inherentno ugrađenu u svaki OFDM simbol, uslijed primjene cikličnog prefiksa, [3], [4]. Druga grupa estimacionih metoda se zasniva na primjeni posebnih pilot sekvenci za estimaciju frekvencijskog ofseta, [5], [6], [7].

Metoda predložena u ovom radu se zasniva na primjeni pilot tonova i realizuje se u dva koraka. U prvom koraku se estimira i koriguje frekvencijski ofset primjenom preambule koja se sastoji od samo jednog OFDM simbola. Međutim, ispostavlja se da i pored male greške estimacije, ovaj korak frekvencijske sinhronizacije nije dovoljan za očuvanje performansi OFDM sistema na zahtijevanom nivou. Zato se implementira drugi dio estimacionog postupka, za čiju realizaciju se koriste dva antipodna pilot tona u okviru svakog OFDM simbola podataka. Rezultati dobijeni primjenom samostalno razvijenog simulacionog modela, sa parametrima koji karakterišu kanal na opsegu od 17 GHz u *indoor* okruženju, pokazuju da se predloženom metodom mogu estimirati i korigovati sve vrijednosti frekvencijskog ofseta, uz neznatnu degradaciju BER (*Bit Error Rate*) performansi sistema.

Rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju opisan je uticaj frekvencijskog ofseta na OFDM sistem. U trećem poglavlju opisan je predloženi metod frekvencijske sinhronizacije. U četvrtoj glavi predstavljeni su dobijeni rezultati za performanse sistema sa primijenjenom predloženom metodom estimacije i korekcije frekvencijskog ofseta. Peto poglavlje sadrži zaključna razmatranja.

II. OFDM SISTEM U PRISUSTVU FREKVENCIJSKOG OFSETA

U slučaju idealne sinhronizacije između predajnika i prijemnika, OFDM signal na strani prijema, nakon FFT (*Fast Fourier Transformation*) bloka, može se predstaviti u obliku, [1]:

$$Y_{i,k} = X_{i,k} H_{i,k} + N_{i,k} \quad (1)$$

gdje je $X_{i,k}$ kompleksni simbol podatka u osnovnom opsegu, $H_{i,k}$ je funkcija prenosa i -tog podkanala u k -tom

¹ Enis Kočan, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (telefon: +38281245873; e-mail: enisk@cg.ac.yu)

Milica Pejanović-Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Podgorici (telefon: +38281245873; e-mail: milica@cg.ac.yu)

Zoran Veljović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici (telefon: +38281245873; e-mail: veljovic@cg.ac.yu)

Ovaj rad je dijelom podržan od strane GSRT projekta u okviru programa bilateralne saradnje Crne Gore i Grčke za period 2006.-2008. godine.

signalizacionom intervalu, i $N_{i,k}$ je šum na i -tom podkanalu u posmatranom k -tom signalizacionom intervalu. Jednačina (1) pokazuje da se idealno sinhronizovan OFDM sistem može predstaviti kao skup paralelnih Gauss-ovih kanala, odnosno OFDM omogućava da se frekvencijski selektivni kanal ekvivalentira skupom međusobno ortogonalnih podkanala sa frekvencijski ravnim fadingom. Međutim, u prisustvu frekvencijskog ofseta narušava se ortogonalnost podnosilaca.

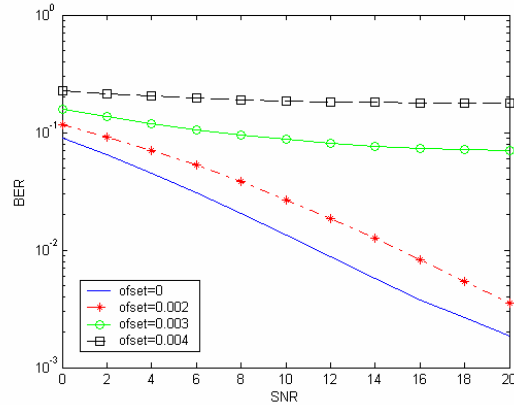
U slučaju *indoor* okruženja, kakvo je i razmatrano u ovom radu, Doppler-ov pomjeraj se može zanemariti, pa frekvencijski ofset nastaje uslijed razdešenosti predajnog i prijemnog oscilatora. Frekvencijski ofset se matematički opisuje frekvencijskim pomjerajem δf i faznim ofsetom θ u niskopropusnom ekvivalentnom signalu. Signal u prijemniku, nakon FFT bloka, u prisustvu frekvencijskog ofseta, može se predstaviti u obliku, [1]:

$$Y_{i,k} = X_{i,k} H_{i,k} \text{sinc}(\delta f T) \cdot \exp\{j[\theta + 2\pi\delta f(kT_s + T/2)]\} + N_{i,k} \quad (2)$$

gdje je T trajanje efektinog dijela OFDM simbola (bez zaštitnog intervala), T_s je trajanje kompletnog OFDM simbola, a $N_{i,k}$ je ukupni šum na i -tom podkanalu u k -tom signalizacionom intervalu, uključujući i dodatni šum uslijed ICI. Iz relacije (2) se može vidjeti da, ako je frekvencijski ofset konstantan, onda on utiče samo na promjenu faze između dva OFDM simbola. Zato, u vremenski sporopromjenljivim kanalima, gdje se estimacija kanala i frekvencijskog ofseta obavljaju periodično, dolazi do izražaja kumulativni efekat frekvencijskog ofseta, odnosno za svaki naredni OFDM simbol u okviru frejma se povećava greška estimacije.

Na sl.1 prikazane su BER performanse OFDM sistema u prisustvu frekvencijskog ofseta. Ovi rezultati su dobijeni simulacionim putem, i to u slučaju kada se ne obavlja estimacija i korekcija frekvencijskog ofseta. Radi poređenja, data je i BER karakteristika idealno sinhronizovanog OFDM sistema. U simulaciji je modelovan *indoor* kanal na opsegu od 17 GHz, pošto je taj opseg jedan od kandidata za narednu generaciju WLAN (*Wireless Local Area Network*) mreža. U slučaju male mobilnosti korisnika, modelovani kanal predstavlja vremenski sporopromjenljivi kanal. Uskopojasna fading statistika je Rice-ova za mala rastojanja, a za veća Rayleigh-eva, čak i u slučaju postojanja direktne linije vidljivosti, [8]. U radu je analiziran najgori mogući slučaj, tj. kanal sa Rayleigh-evim fadingom. Isti parametri kanala su korišćeni u svim simulacijama, pa će se oni podrazumijevati za sve rezultate predstavljene u daljem tekstu. Za grafike prikazane na sl.1 podrazumijeva se još i da prijemnik idealno poznaje kanal, ali frekvencijski ofset između predajnika i prijemnika nije poznat, niti se estimira. Nakon slanja frejma od 40 OFDM simbola, što je znatno manje od trajanja koherentnog vremena kanala, obavlja se ekvalizacija na osnovu poznavanja funkcije prenosa kanala. 'Ofset' na slici označava frekvencijski ofset normalizovan u odnosu na rastojanje podnosilaca, tj. $\text{ofset} = \Delta f = \delta f T$. Dobijeni rezultati pokazuju da čak i veoma male vrijednosti frekvencijskog ofseta (0.3% rastojanja podnosilaca) čine OFDM sistem skoro neupotrebljivim.

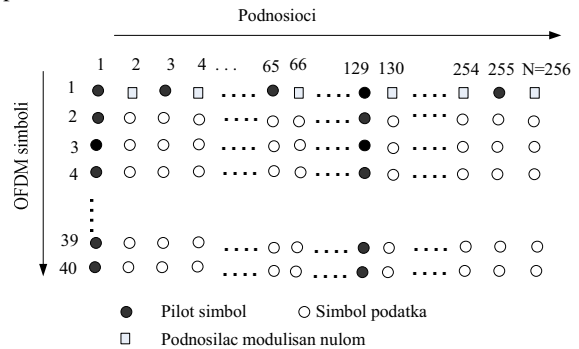
Ovim se potvrđuje da je pitanje frekvencijske sinhronizacije veoma važno za OFDM sisteme.



Sl. 1. BER performanse OFDM sistema u prisustvu frekvencijskog ofseta

III. OPIS PREDLOŽENE METODE

Predložena metoda frekvencijske sinhronizacije se zasniva na primjeni pilot tonova i realizuje se u dva koraka. Šema rasporeda pilot tonova i simbola podataka u okviru jednog frejma, koji se sastoji od 40 OFDM simbola, je prikazana na slici 2.



Sl. 2. Rasored pilot tonova i simbola podataka u okviru jednog frejma

Samo jedan OFDM simbol čini preambulu, koja se koristi za ostvarivanje prvog koraka predložene sinhronizacione metode. Modulacijom parnih podnosilaca nulom, ostvaruje se da preambula ima identične polovine u vremenskom domenu (nakon IFFT bloka u predajniku), [6]. Ovakva struktura preambule omogućava estimaciju cjelobrojnog i frakcionog dijela frekvencijskog ofseta. Cjelobrojni dio frekvencijskog ofseta postoji ako je vrijednost ofseta na početku procesa komunikacije bila veća od rastojanja podnosilaca ($\Delta f > 1$). Ofset ove veličine bi prouzrokovao pomjeranje pozicija pilot tonova u preambuli, koji su međusobno udaljeni za $2/T$ u frekvencijskom domenu. Pilot simboli na neparnim podnosiocima preambule su diferencijalno kodirani, što omogućava estimaciju ofseta većeg od rastojanja podnosilaca. Diferencijalno kodirani pilot tonovi određuju pseudoslučajnu sekvencu V_i :

$$V_i = \begin{cases} X_{i,1}, & \text{za } i = 1, 3, \dots, N-3 \\ X_{i+2,1} \\ 0, & \text{za } i = N-1 \end{cases} \quad (3)$$

N predstavlja broj podnosilaca u IFFT bloku. Snaga simbola podataka je u simulacionom modelu normalizovana na jedinicu, dok je snaga pilot simbola dva puta veća od snage simbola podataka, radi bolje estimacije. Generisani pilot simbol je oblika:

$$pilot = A = \sqrt{2} \exp(j\pi/4) \quad (4)$$

Izabrana je sledeća struktura preambule:

$$preambula = [A \ 0 \ A^* \ 0 \ A \dots A^* \ 0] = [P(i)] \quad (5)$$

gdje je $i=1, \dots, N$ i $N=256$ predstavlja broj podnosilaca jednog OFDM simbola. Korišćenjem preambule ovakve strukture moguće je estimirati frekvencijski ofset do veličine pet rastojanja podnosilaca.

U prijemniku se, nakon uklanjanja cikličnog prefiksa, estimira frakcioni dio frekvencijskog ofseta upoređivanjem faznih stavova između odgovarajućih podnosilaca u identičnim polovinama preambule:

$$\hat{\phi} = \text{angle}(R(d)) \quad (6)$$

gdje je:

$$R(d) = \sum_{m=1}^{m=N/2} (r_{d+m}^* r_{d+m+N/2}) \quad (7)$$

r_{d+m} je odбирak signala u vremenskom domenu. Predložena metoda se može koristiti i za ostvarivanje vremenske sinhronizacije, ali je u ovom radu pretpostavljena idealna vremenska sinhronizacija, tj. ($d=0$). Fazni stavovi svih odbiraka OFDM simbola u okviru jednog frejma se koriguju estimiranim frekvenciskim ofsetom $\exp(-jt\hat{\phi}/T)$.

Nakon FFT operacije u prijemniku preambula se koristi za estimaciju eventualnog cjelobrojnog dijela frekvencijskog ofseta. Cjelobrojni dio frekvencijskog ofseta se estimira nalaženjem vrijednosti \hat{g} , koja maksimizuje funkciju $B(\hat{g})$, [6]:

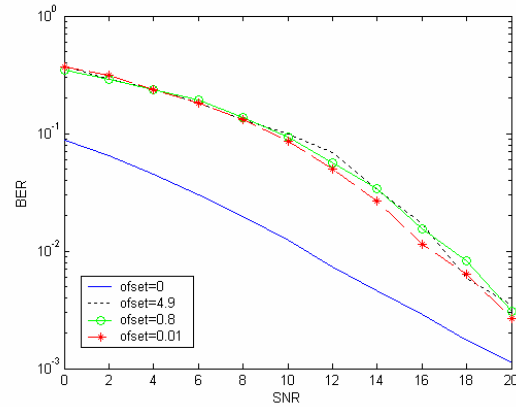
$$B(\hat{g}) = \left| \sum_{i \in W'} Y_{i+2\hat{g},1} V_i^* Y_{i+2\hat{g}+2,1} \right|^2 / \left(\sum_{i \in W'} |Y_{i,1}|^2 \right)^2 \quad (8)$$

$Y_{i,1}$ označava i -ti podnosilac preambule na izlazu iz FFT bloka u prijemniku. W' je skup sledećih neparnih podnosilaca: $W' = \{1, 3, 5, \dots, N-7\}$. Ukupna, normalizovana vrijednost estimiranog frekvencijskog ofseta iznosi:

$$\Delta\hat{f} = \hat{\phi}/\pi T + 2\hat{g}/T \quad (9)$$

Ako postoji cjelobrojni dio frekvencijskog ofseta, onda se pozicije svih podnosilaca, svih OFDM simbola, pomjeraju za $2\hat{g}$. Ovim se završava prvi korak predložene sinhronizacione metode.

Uprkos maloj greški estimacije koja se pravi u prvom koraku estimacione metode, kumulativni efekat frekvencijskog ofseta uzrokuje značajnu degradaciju BER performansi OFDM sistema (Sl. 3). Rezultati predstavljeni na sl. 3 potvrđuju da je neophodno primijeniti dodatnu korekciju uticaja frekvencijskog ofseta. Prije toga, preambula se koristi za estimaciju funkcije prenosa kanala ($\hat{H}_{i,1}$).



Sl. 3. BER performanse OFDM sistema, u slučaju kada se koristi samo preambula za frekvencijsku sinhronizaciju

Za drugi korak postupka frekvencijske sinhronizacije koriste se dva pilot simbola u okviru svakog OFDM simbola podataka. Ta dva pilot simbola su antipodi, tj. ako je prvi simbol A , onda drugi simbol ima vrijednost $-A$. Na izlazu iz FFT bloka u prijemniku, vrijednosti ova dva pilot signala se oduzmu, tj., za k -ti OFDM simbol u frejmu može se pisati:

$$Z_k = Y_{1,k} - Y_{1+N/2,k}, \quad k=1, 2, \dots, 40 \quad (10)$$

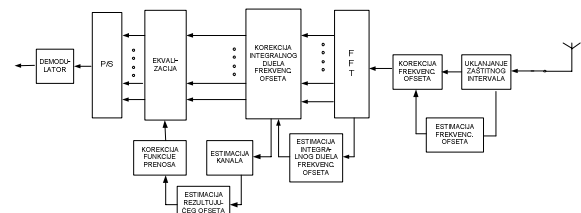
Estimacija ofseta koji se javlja kao posledica greške prvog dijela estimacionog postupka, se obavlja upoređivanjem faznih stavova dobijene razlike za svaki OFDM simbol, sa faznim stavom odgovarajuće razlike u preambuli:

$$\beta_k = \arctan \left[\frac{\text{Im}(Z_1^* Z_k)}{\text{Re}(Z_1^* Z_k)} \right] \quad (11)$$

Korišćenjem antipodnih pilot simbola, umjesto identičnih, ostvaruje se manja varijansa estimacije, kao i veći ukupni odnos signal/šum za ovako združene pilot simbole, [7]. U konačnom, dobijena estimacija frekvencijskog ofseta se koristi za korekciju estimirane funkcije prenosa:

$$\hat{H}_{i,k} = \hat{H}_{i,k} \exp\{j2\pi\beta_k\} \quad (12)$$

Ova estimirana funkcija prenosa uključuje kompletan estimirani frekvencijski ofset, i ona se koristi za ekvalizaciju. Na sl.4 prikazana je blok šema prijemnika sa predloženom metodom frekvencijske sinhronizacije:

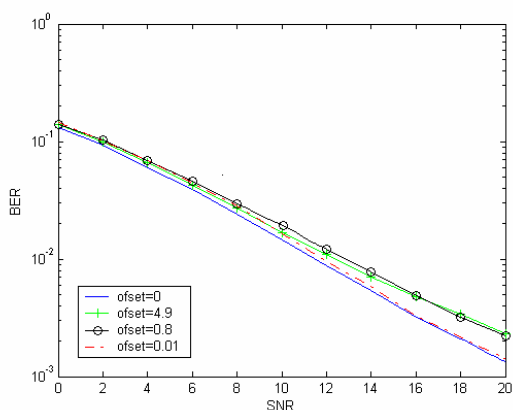


Sl. 4. OFDM prijemnik sa predloženom metodom frekvencijske sinhronizacije

IV. REZULTATI

Sl. 5 prikazuje BER performanse OFDM sistema za različite vrijednosti frekvencijskog ofseta, kada je

primijenjena predložena metoda frekvencijske sinhronizacije. Radi poređenja, dat je BER grafik idealno sinhronizovanog OFDM sistema.



Sl. 5. BER performanse OFDM sistema uz primijenjenu predloženu metodu frekvencijske sinhronizacije

Sa sl. 5 se može uočiti da se primjenom predložene metode frekvencijske sinhronizacije ostvaruju BER performanse koje se neznatno razlikuju od performansi idealno sinhronizovanog OFDM sistema, za sve vrijednosti normalizovanog frekvencijskog ofseta u opsegu do pet rastojanja podnosilaca. Dobijeni rezultati pokazuju da u slučaju kada je normalizovani frekvencijski ofset jednak 10% rastojanja podnosilaca, BER grafik se gotovo u potpunosti poklapa sa BER grafikom za slučaj kada je ofset jednak nuli. Za ostale vrijednosti frekvencijskog ofseta, za sve prikazane vrijednosti BER-a, pogoršanje performansi iznosi najviše 1-2 dB u odnosu na idealno sinhronizovan sistem, što potvrđuje da se predložena metoda ostvarivanja frekvencijske sinhronizacije može smatrati adekvatnom.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu predložena je veoma efikasna metoda ostvarivanja frekvencijske sinhronizacije za OFDM sisteme, zasnovana na primjeni pilot tonova. Pokazano je da predložena metoda ostvaruje dobru frekvencijsku sinhronizaciju za sve vrijednosti frekvencijskog ofseta, pa čak i za one koje prelaze vrijednost rastojanja podnosilaca. Simulacionim putem je pokazano da se BER performanse OFDM sistema u slučaju vremenski sporopromjenljivog kanala, neznatno razlikuju od idealno frekvencijski sinhronizovanog sistema, ako se primijeni predložena metoda.

Pored dobre ostvarene frekvencijske sinhronizacije za sve vrijednosti frekvencijskog ofseta, prednost predložene metode je u tome što ona ne opterećuje mnogo OFDM sistem. Naime, samo jedan OFDM simbol čini preambulu koja se koristi za estimaciju frekvencijskog ofseta, a u isto vrijeme služi i za estimaciju samog kanala. U drugom dijelu predložene metode koriste se samo dva pilot tona, usadana u svaki simbol podataka i oni omogućavaju praćenje malih promjena vrijednosti frekvencijskog ofseta, od simbola do simbola.

LITERATURA

- [1] R. Prasad, "OFDM for wireless communications systems," Artech House, 2004.
- [2] T. Pollet, M. Van Bladel, and Moenceclay, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise," *IEEE Trans. Commun.*, vol.43, pp. 191-193, July 1995.
- [3] R. Van Nee, R. Prasad, "OFDM Wireless Multimedia Communications," Artech House, 2000.
- [4] J. van de Beek, M. Sandel, P.O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, No. 7, July 1997.
- [5] P. H. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 42, No. 10, October 1994.
- [6] Y. H. Kim, Y. K. Hahm, H. J. Jung, I. Song, "An Efficient Frequency Offset Estimator for Timing and Frequency Synchronization in OFDM System", *IEEE Pacific Rim Conf. on Commun., Comp. and Signal Proc.*, Aug. 1999.
- [7] W. Zhang, X.-G. Xia and P. C. Ching, "Clustered pilot tones for carrier frequency offset estimation in OFDM systems," *IEEE Trans. on Wireless. Commun.*, vol. 6, No. 1, January 2007.
- [8] M.L. Rubio, A. Garcia-Armada, R. P. Torres, J. L. Garcia, "Channel modeling and characterization at 17 GHz for indoor broadband WLAN", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 593-602, April 2002

ABSTRACT

In this paper, very efficient frequency synchronization method for OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) systems, in the case of slow time-varying channels, is proposed. The proposed method is based on pilot tones usage, and is realized in two steps. In first step, the preamble consisted of just one OFDM symbol, is used for estimation and correction of frequency offset of arbitrary size. In the second step, two pilot tones embedded in each OFDM data symbol are used for additional correction of cumulative effects of frequency offset in the slow time-varying channels. BER (*Bit Error Rate*) results, obtained by simulation, show that with the proposed synchronization method can be achieved performances very close to ideally synchronized OFDM system.

FREQUENCY SYNCHRONIZATION METHOD FOR OFDM SYSTEMS IN SLOW TIME-VARYING CHANNELS

Enis Kocan, Milica Pejanovic-Djurisic, Zoran Veljovic