

ANALIZA PROCESA SINHRONIZACIJE „NA SLEPO“ NA OFDM UPLINKU

Dušan S. Radović, Elsys Eastern Europe, Vladimira Popovića 6, Beograd

dušanr@ieee.org

Sadržaj – U ovom radu izložena je analiza procesa sinhronizacije „na slepo“ na uplinku višekorisničkog OFDM sistema metodom predloženoj u [7]. Dat je kratak osvrt na problem procene sinhronizacionih parametara (frekvencijskog i vremenskog pomaka) na uplinku. Upoređene su performanse izabrane metode za procenu frekvencijskog pomaka u različitim tipovima radio kanala u uslovima karakterističnim za uplink, što nije urađeno u dostupnoj literaturi.

1. UVOD

Tema ovog rada je analiza performansi jedne metode za procenu frekvencijskog pomaka [7] u različitim tipovima kanala i uslovima karakterističnim za uplink višekorisničkog OFDM sistema, što nije do sada urađeno u dostupnoj literaturi.

Stalni rast poslovnih, naučnih i drugih primena komunikacionih sistema nameće potrebu za vrlo brzim i pouzdanim bežičnim sistemima prenosa. Povećanje zahteva je takvo da nijedna od današnjih tehnologija (TDMA/FDMA ili čak CDMA) neće moći da ispuni zahteve u bliskoj budućnosti zbog svojih sopstvenih ograničenja. Zbog toga se puno istraživačkih napora na polju širokopojasnih komunikacija usmerio na multi-carrier sisteme i oni se smatraju kao jedini koji će moći da zadovolje postavljene zahteve. Popularnost i sve veća primena OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) sistema su danas realnost. Neki od sistema koji koriste ovu tehnologiju su danas u široj upotrebi: sistemi digitalnog radija (DAB), digitalne televizije (DVB-T), bežične mreže (WLAN), varijante digitalne pretplatničke linije (xDSL), širokopojasni prenos preko energetske mreže (Homeplug, OPERA) [1-3]. Takođe su brojna istraživanja novih primena u 4G telekomunikacionih sistema. Među različitim sistemima prenosa sa više nosilaca (multi-carrier, MC) dva najvažnija za ćelijske bežične komunikacione sisteme su MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) i pristup pomoću frekvencijskog multipleksa sa ortogonalnim nosiocima (OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Ova dva sistema su nastala iz dobro poznatih OFDM i CDMA sistema i posebno su namenjena sistemima sa većim brojem korisnika. Proučavanje i poređenje ove dve tehnike kao najverovatnijih opcija za radio interfejs budućih 4G ćelijskih sistema je aktuelno i vrlo intenzivno.

Mada se tehnika OFDM prvi put pojavila pre više od 30 godina, OFDMA je zapravo nova ideja (prvi put je predstavljena 1996). U OFDMA sistemu postoji veći broj međusobno ortogonalnih nosilaca koji se deli među korisnicima u posmatranoj ćeliji na neki od mogućih načina. Jedan pristup je dodela nosilaca korisnicima u kontinualnim blokovima (međusobno susedni) – princip frekvencijskog multipleksa. Drugi način je učešljani (interleaved) metod u kome se svakom korisniku dodeljuje po jedan nosilac, a onda se istim pravilnim redosledom dodeljivanje nastavlja do raspodele svih nosilaca. Treći način je slučajno (adaptivno),

tj. bez neke pravilne šeme u skladu sa trenutnim uslovima u kanalu svakog korisnika.

Ovde će biti razmatrana osetljivost OFDMA sistema na sinhronizaciju (nasleđeno od OFDM) kroz analizu jedne metode za procenu frekvencijskog ofseta „na slepo“ [7]. Ova metoda ne zahteva postojanje pilot signala ili nosilaca već se na osnovu unapred poznate strukture signala dobija procena frekvencijskog pomaka čija se kompenzacija vrši pre demodulacije.

U OFDM prijemniku nakon detekcije preambule - postojanja signala na ulazu prijemnika sledi sinhronizacija sa predajnikom. Ovaj korak je naročito važan na uplinku, gde na jedan prijemnik asinhrono stižu signali od više korisnika. U radovima se razmatraju i metode za procenu koje ne koriste pilot nosioce već procenu vrše na neki drugi način koristeći pri tome apriorno znanje o strukturi ili sadržaju signala. U dostupnoj literaturi predloženo je nekoliko metoda ovog tipa za sinhronizaciju na uplinku u višekorisničkom OFDM sistemu. Posebno su značajne metode koje procenu sinhronizacionih parametara vrše na samo jednom primljenom OFDMA simbolu [5-7] i time ubrzava i olakšava postupak sinhronizacije.

Rad je podeljen na nekoliko celina. Prvo je izložen matematički model signala i metode koja se koristi za procenu. Zatim su dati rezultati simulacija za uslove uplinka za izabrane parametre sistema. Na kraju rada se nalazi diskusija rezultata i zaključak.

2. MATEMATIČKI MODEL ZA OFDMA UPLINK

Posmatrajmo prenos na uplinku u asinhronom OFDM sistemu u kome K korisnika deli N raspoloživih nosilaca, tako da svakom korisniku pripadne isti broj nosilaca Q . Sa T ćemo označiti periodu odabiranja kompleksne anvelope primljenog signala u prijemniku bazne stanice. Onda je sa $1/(NT)$ dato rastojanje između nosilaca, a $1/T$ je ukupan opseg korisnog signala. Signali svih korisnika se superponiraju na ulazu prijemnika, pa se kompleksna anvelopa signala može predstaviti zbirom vremenski diskretnih odbiraka signala svakog od korisnika. Vektor od N vremenski diskretnih odbiraka u predajniku k -tog korisnika x_k , koji odgovaraju QPSK konstalacijama s_k koje su različite od nule na samo njemu dodeljenih Q nosilaca može se zapisati sa

$$x_k(m) = F^H s_k(m) \quad (1)$$

, gde je F matrica diskretne Fourierove transformacije sa elementima $[F_{n,k}] = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right)$ za $n, k \in [0, N-1]$, a

$(\cdot)^H$ označava hermitsku transpoziciju. Ciklički prefiks (CP) od N_g odbiraka se dodaje na početak $x_k(m)$ radi eliminisanja uticaja kanala, tj. intersimbolske interferencije. Ovako formiran vektor vremenskih odbiraka $u_k(m)$, dužine $N_B = N + N_g$, čini jedan OFDM simbol i šalje se kroz prenosni kanal. Sa ukupno L diskretnih odbiraka $\{h_k(l)\}$ je modelovan

impulsni odziva kanala k -tog korisnika. Signal koji na ulazu prijemnika bazne stanice je superpozicija signala svih aktivnih korisnika. U prisustvu frekvencijskog i vremenskog ofseta, niz diskretnih odbiraka u vremenu na izlazu prijemnog filtra je dat sa [5]

$$y(m) = \sum_{k=1}^K \left\{ e^{j\omega_k m} \sum_{l=0}^{L-1} h_k(l) u_k(m-l-\mu_k) \right\} + n(m) \quad (2)$$

, gde su ω_k , μ_k frekvencijski i vremenski ofset k -og korisnika respektivno. Sa n je označena sekvenca belog aditivnog gausovog šuma (AWGN). U slučaju raspodele nosilaca po interleaved šemi primljeni signal ima posebnu strukturu, [7], koja omogućava procenu frekvencijskog pomaka na osnovu samo jednog OFDMA simbola. Na ovaj način izabrane kompleksne sinusoide – nosioci jednog korisnika imaju periodičan zbir sa periodom P . Time se problem procene frekvencijskog pomaka (CFO – carrier frequency offset) za jednog korisnika svodi na nalaženje jedne unapred nepoznate frekvencije bez obzira na broj nosilaca dodeljenih jednom korisniku, pod uslovom da je primenjeno učešljanje. Ovako formiran signal je pogodan za primenu neke od metode za procenu parametara sinusoide u šumu. Najbolje rezultate daju visokorezolucione metode tipa MUSIC [8], pa je ona i primenjena u analiziranoj metodi za procenu frekvencije [7]. Prethodno je potrebno od primljenih odbiraka odstraniti deo CP u kome postoji intersimbolska interferencija (ISI) i napraviti opservacionu matricu R na sledeći način

$$R = \begin{Bmatrix} r(1) & r(2) & \dots & r(P) \\ r(P+1) & r(P+2) & \dots & r(2P) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r(VP-P+1) & r(VP-P+2) & \dots & r(VP) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

, gde su sa r označeni odbirci signala u jednom OFDMA simbolu u prijemniku koji nisu odbačeni zbog moguće interferencije sa prethodnim simbolom. Sa V je označen ukupan broj opservacionih vektora kojih mora biti bar K za maksimalno $K-1$ aktivnih korisnika. Ako želimo maksimalan broj od K aktivnih korisnika u sistemu zbog uslova primene metode MUSIC V mora biti bar $K+1$ [7,8].

3. REZULTATI SIMULACIJA

Na osnovu izloženog matematičkog modela u MATLAB-u je urađen simulacioni model sistema u kome više međusobno asinhronih korisnika istovremeno koristi uplink vezu sa baznom stanicom. Svaki od korisnika ima različiti frekvencijski ofset koje je potrebno proceniti (i kompenzovati) pre demodulacije. Pretpostavljeni OFDMA sistem je u opsegu 5 GHz sa $N=1024$ nosilaca. Širina opsega u kome je signal je 20 MHz, što odgovara rastojanju između susednih nosilaca od 19.53 kHz. Perioda odabiranja je 50 ns.

Razmatran je uticaj vrste kanala na performanse metode za procenu CFO tako što su eksperimenti vršeni u tri različita kanala. Prvi je kanal sa aditivnim belim gausovim šumom (AWGN) koji je modelovan slučajnom kompleksnom promenljivom čija varijansa odgovara recipročnoj vrednosti odnosa signal/šum i ima nultu srednju vrednost. AWGN kanala nema feding, a ostali tipovi kanala sadrže AWGN kanal. Drugi tip kanala ima eksponencijano opadanje anvelope srednje snage (EXP) i dužinu od 8 perioda odabiranja [5], tj. 8 putanja. Za svakog korisnika generiše se nezavisan kanal tako što se koeficijenti kanala modeluju kao

nezavisne kompleksne slučajne promenljive sa gausovom raspodelom, nulte srednje vrednosti i varijanse

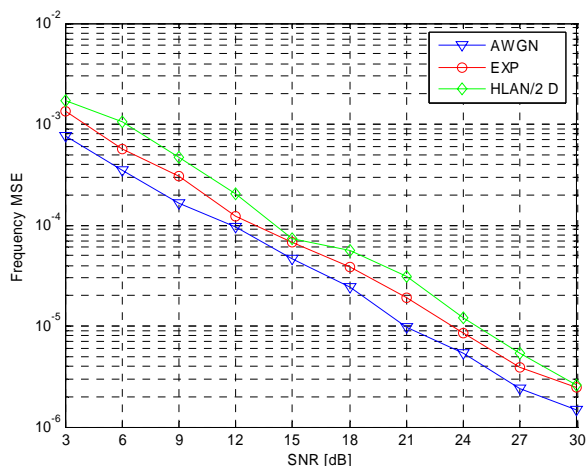
$$E\{|h_k(l)|^2\} = \exp(-l), \quad l = 0, 1, \dots, 7 \quad (4)$$

U simulaciji je korišćen još i HIPERLAN/2 D kanal [9] koji je prilagođen tako da odgovara korišćenju periodu odabiranja (nazovimo ga ekvivalentni kanal) jer vrednosti anvelope snage date u originalnom kanalu [9] ne odgovaraju trenucima odabiranja u simulacionom modelu. Energija svake putanje originalnog kanala se deli na dva dela. Prvi deo se dodeljuje trenutku odabiranja koji neposredno prethodi vremenskom trenutku u originalne putanje, a drugi deo se dodeljuje trenutku odabiranja koji neposredno sledi nakon njega. Zbir snaga dve ekvivalentne putanje jednak je snazi originalne putanje, a njihov odnos je inverzno proporcionalan vremenskoj razlici između kašnjenja originalne putanje i kašnjenja ekvivalentnih koje leže tačno na trenucima odabiranja. U ovako određenom ekvivalentnom kanalu nije se promenilo srednje kašnjenje (rms delay spread), koje za originalni kanal iznosi 140 ns. Ovaj tip kanala je odabran jer sadrži i direktnu putanju (Rice faktor je 10dB).

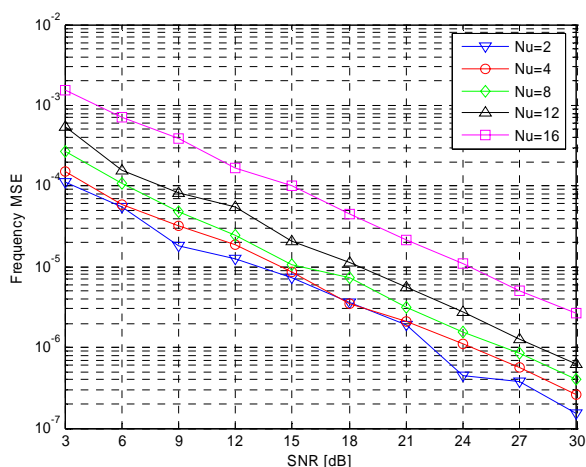
Ukupna nestabilnost oscilatora u prijemniku i predajniku je $\pm 1 \cdot 10^{-6}$, što odgovara maksimalnom frekvencijskom ofsetu od ± 5 kHz. Prema tome opseg frekvencijskog ofseta iznosi $|\Delta f_k| < 0.256$ rastojanja između nosilaca. Posmatrana ćelija je oblika kružnice sa poluprečnikom od 300 m, tada da je maksimalno kašnjenje usled prostiranja signala u oba smera 2 μ s. Za izabranu periodu odabiranja maksimalan vremenski ofset je 40 perioda odabiranja. Uticaj prethodnog simbola u HIPELAN/2 D kanalu se proteže na posmatrani simbol još na maksimalno 22 prvih odbiraka. Na osnovu toga, da bi se otklonila intersimbolska interferencija, izabrana je dužina prefiksa od 64 vremenskih odbiraka koji će sigurno eliminisati uticaje kanala i kašnjenja između susednih OFDMA simbola. Zbog korišćenja svih K raspoloživih kanala simbol koji se koristni za procenu, ima dodatnih Q odbiraka uz prethodno formiran prefiks za eliminisanje uticaja kanala. To znači da signal ima CP od ukupno 128 odbiraka, $V=K+1$. Ukupna dužina jednog OFDMA simbola je $128+1024 = 1152$ odbiraka, tj. trajanje je 57.6 μ s. Svi nosioci imaju QPSK konstelacije.

U narednim simulacijama odnos signala i šuma je definisan na ulazu u prijemnik kao odnos snage svih Q nosilaca k -tog korisnika (odgovara snazi jedne kompleksne sinusoide čiju frekvenciju procenjujemo) i ukupne snage šuma. Svaka prikazana vrednost dobijena je usrednjavanjem vrednosti greške procene dobijenih iz 50 uzastopnih simulacija (u svakoj ima 16 nezavisnih rezultata), što ukupno daje 800 procena.

Na Sl. 1 su prikazani rezultati srednje kvadratne greške (MSE) procene frekvencijskog pomaka u tri tipa kanala u funkciji odnosa signal/šum. Kao što se i očekuje MSE je najmanja u AWGN kanalu, a od 2 do 3 puta veća u kanalu sa fedingom, ili posmatrano u domenu snage potrebno je uložiti bar 3dB više snage u kanalu sa fedingom (HLAN/2 D) da bi se postigla ista vrednost greške kao u AWGN kanalu. Vrednost MSE opada sa povećanjem odnosa signal/šum bez dostizanja platoa. MSE koraka pri računanju u simulaciji je 10^{-9} .

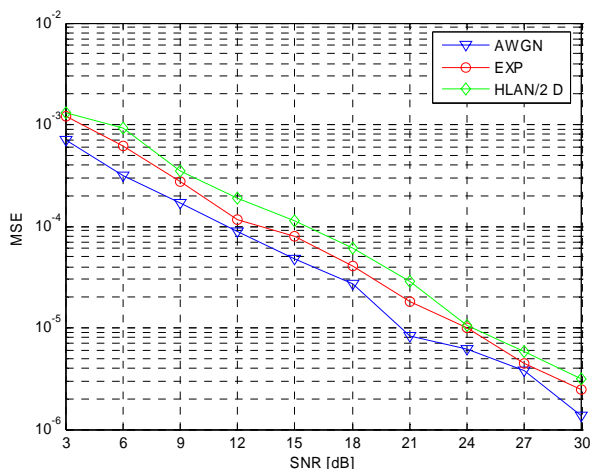


Sl.1. Rezultati procene CFO u različitim tipovima kanala za maksimalan broj aktivnih korisnika $N_u=K=16$.



Sl.2. Rezultati procene CFO za različit broj aktivnih korisnika N_u . Kanal je tipa EXP.

Na Sl. 2 prikazan je uticaj broja aktivnih korisnika na MSE. Uočava se porast greške oko 10 puta pri promeni od 2 na 16 korisnika.



Sl.3. Rezultati procene CFO za odnos near-far od 15 dB za maksimalan broj aktivnih korisnika $N_u=K=16$.

Na Sl. 3 vidimo rezultate u scenariju kada je svaki drugi korisnik ima za 15 dB veću snagu od one zadate na x-osi. Prikazana MSE za korisnike sa manjom snagom odgovara

onoj sa Sl. 1 kada svi korisnici imaju istu snagu, što znači da je metoda robusna na ovaj uticaj.

Gotovo isti rezultati se dobijaju i za veće odnose near-far (30 dB), ali ovde nisu prikazani. Ovako veliki odnosi su razmatrani jer sinhronizacija prethodi postupcima kontrole snage.

4. DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata izvodimo nekoliko zaključaka. Performanse analizirane metode za procenu frekvencijskog ofseta su najbolje u AWGN kanalu, a nešto lošije u kanalu sa fadingom, i to posebno u kanalu sa direktnom komponentom prostiranja. Metoda je vrlo robusna na uticaj efekta blizu-daleko čak i za vrlo velike odnose snage između susednih nosilaca, jer koristi MUSIC algoritam za procenu, a on ima dobre performanse u takvim slučajevima.

Nakon sinhronizacije postojeće greška zbog neidealne procene frekvencijskog ofseta koja narušava ortogonalnost nosilaca. Veličina ove greške limitira broj tačaka u korišćenju konstelaciji jer unosi dodatni šum u sistem. Ukoliko je preostali frekvencijski pomak veličine 1% međusobnog rastojanja između nosilaca ($MSE=10^{-4}$) to ima za posledicu da je efektivni odnos signal/šum ograničen na 30 dB [10]. Ova ograničena vrednost odnosa signal/šum onda limitira maksimalnu spektralnu efikasnost na oko 6 bita/s/Hz, što odgovara 64QAM konstelaciji. Kako definicija odnosa signala/šum nije ista u našoj simulaciji i zaključku iz [10], potrebno je na odnos signal/šum definisanog u ovom radu dodati 6dB ($10 \cdot \log_{10}(Q/K)$). Dakle, analizirana metoda je daleko od granice jer je uslov zadovoljen već na odnosu signal/šum po korisniku od 15 dB (tj. 15 dB + 6 dB = 21 dB po podnosiocu), pa se može primeniti za sinhronizaciju u sistemima koji koriste modulacije sa većim brojem bita u QAM simbolu.

Mogući su slučajevi kada metoda daje manje procena frekvencijskog ofseta od broja aktivnih korisnika u slučajevima vrlo malog odnosa signala i šuma pri maksimalnom broju korisnika u sistemu. Ova pojava zahteva posebnu analizu, a pouzdanost procene se može povećati korišćenjem nekoliko uzastopnih OFDMA simbola. Ovo je moguće ako je kanal sporo promenljiv u odnosu na ukupno trajanje opservacionog intervala.

LITERATURA

- [1] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Boston-London: Artech House, 2000.
- [2] <http://www.homeplug.org>
- [3] <http://www.ist-opera.org>
- [4] A. Tonello, N. Laurenti, S. Pupolin, "Analysis of the Uplink of an Asynchronous Multi-user DMT OFDMA System Impaired by Time Offsets, Frequency Offsets, and Multi-path Fading", in *Proc. VTC*, 2000.
- [5] M.-O. Pun, M. Moreli, and C.-C. J.Kuo, "Maximum Likelihood Synchronization and Channel Estimation for OFDMA Uplink Transmissions," *submitted to IEEE Trans. Commun.*
- [6] M. Morelli, "Timing and Frequency Synchronization for the Uplink of an OFDMA System," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, pp. 296-306, Jan. 2004.

- [7] Z. Cao, U Tureli, and Y.-D. Yao, "Deterministic Multiuser Carrier Frequency Offset Estimation for Interleaved OFDMA Uplink," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, pp. 1585-1594, Sept. 2004.
- [8] R.O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas. Propagat.*, vol. 34, pp. 276–280, March 1986.
- [9] J. Medbo, P. Schramm, "Channel Models for HiperLAN/2," *ETSI/BRAN document*, no. 3ERI085B, 1998.
- [10] P. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no.10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

Abstract – In this paper is presented analysis of blind synchronization on multiuser OFDM uplink by method proposed by Cao et al. Short overview of the problem is given. Performance assessment of chosen method for frequency shift estimation in various channel types and uplink environment is done, which can not be found in available literature.

**ANALYSIS OF BLIND SYNCHRONIZATION ON
OFDM UPLINK**
Dusan S. Radovic