

Modern többvívős rendszerek kognitív rádiós alkalmazásokban

KOLLÁR ZSOLT, VARGA LAJOS, HORVÁTH PÉTER

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
kollar@mht.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: kognitív rádió, white space, többvívős modulációs eljárások, vezeték nélküli rendszerek, OFDM

A közeljövőben Magyarországon is lezajló digitális televíziós átállás következtében több frekvenciasáv felszabadul. Ezeket a tervek szerint az átállást követően opportunisztikusan kommunikáló, intelligens rádiós rendszerek használhatják majd adatkommunikációs célra. Mivel a kérdéses frekvenciasáv elsődleges felhasználói továbbra is a műsorszóró rendszerek, így az itt kommunikáló rádióknak magas fokú intelligenciával és gyors spektrumérzékeléssel kell rendelkezniük az interferencia elkerülése érdekében. Ebben a környezetben a kommunikáció fizikai rétegének (az alkalmazott modulációnak) speciális elvárásoknak kell megfelelni. Cikkünkben ismertetünk és összehasonlítunk néhány, a kognitív rádiós modellben alkalmazható többvívős modulációs eljárást.

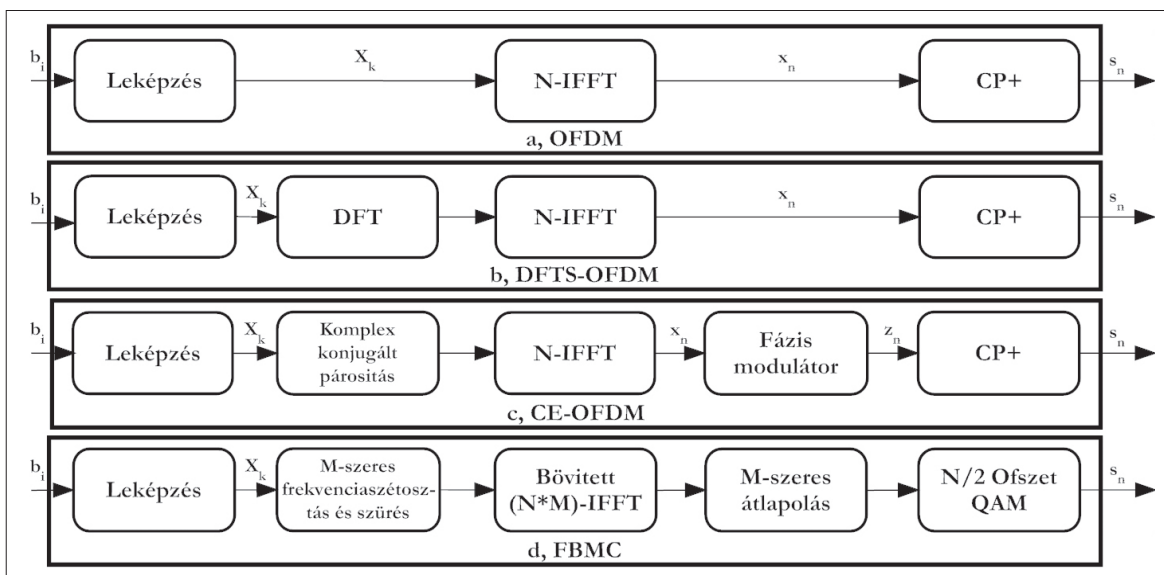
1. Bevezetés

A vezeték nélküli kommunikáció térhódításával párhuzamosan a felhasználók adatsebesség-igénye is egyre nő. A rendelkezésre álló frekvenciasávok azonban korlátozottak. Erre a problémára próbál megoldást találni Mitola 1999-ben megjelent cikkében [1], amelyben a kognitív rádió alapgondolatát mutatja be.

A kognitív rádió lényegében másodlagos (opportunistikus) rendszer, amely képes a kiválasztott frekvenciasávokat intelligensen és adaptívan kihasználni oly módon, hogy közben ezzel az elsődleges (inkumbens) rendszereket nem zavarja. Ennek érdekében közel egyidőben kell a szabad frekvenciasávokban adatforgalmat bonyolítani és figyelnie azt, hogy közben az inkumbens rendszereket ne zavarja, ha azok adást kezdeményeznek [2]. Ilyen és ehhez hasonló rendszerek működésének szabványosítására törekszik az IEEE 802.22-es szabványa is [3,4].

Ezen technológiák hazánkban is fontos szerepet játszhatnak a jövőben. Magyarországon 2015-től az analóg televíziós műsorszórás helyét teljes egészében a digitális rendszer veszi át, amely összességében kevesebb frekvenciasávot igényel. Az átállás következtében felszabaduló frekvenciák (white-space, WS) gazdaságos felhasználására kézenfekvő megoldás a kognitív rádiós rendszerek alkalmazása [5]. Cikkünk a WS-ek opportunistikus kihasználására legígéretesebb többvívős modulációs eljárásokat mutatja be és hasonlítja össze. A többvívős rendszerek esetén az OFDM [6] (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ortogonális frekvenciaosztásos nyálábolás), mint széles körben elterjedt technika alkalmazása tűnik magától értetődőnek. Több vezeték nélküli hírközlő rendszerben, többek között DVB (digitális televízió), DAB (digitális rádió) és WLAN (vezeték nélküli hálózat) esetén is ezt az eljárást alkalmazzák.

Ezen séma mellett bemutatunk még három másik alternatívát, amelyek valamilyen szempontból előnyösebb



1. ábra
A vizsgált
négy eljárás
adóoldali
blokkvázlata

bek lehetnek az OFDM-nél [7]: A DFT-Spread OFDM [8,9] (DFT-szórót OFDM, továbbiakban DFTS-OFDM), Constant Envelope OFDM [10] (állandó burkolójú OFDM, továbbiakban CE-OFDM) valamint a Filter Bank Multicarrier [11, 12] (szűrőbank-alapú többvívős technika, továbbiakban FBMC) modulációs eljárásokat. A következőkben ezeket a rendszereket hasonlítjuk össze, valamint megmutatjuk, hogy adott feltételek, illetve paraméterek mellett melyik rendszer választása lehet előnyös az adott alkalmazásban.

2. Az OFDM moduláció felépítése és főbb tulajdonságai

Ebben a szakaszban a közismert OFDM eljárást mutatjuk be röviden, majd az OFDM jel főbb jellemzőit és az azok által okozott nehézségeket tárgyaljuk. A következő szakaszban ezen tulajdonságok alapján fogjuk összehasonlítani a többi rendszerrel.

2.1 Az OFDM moduláció

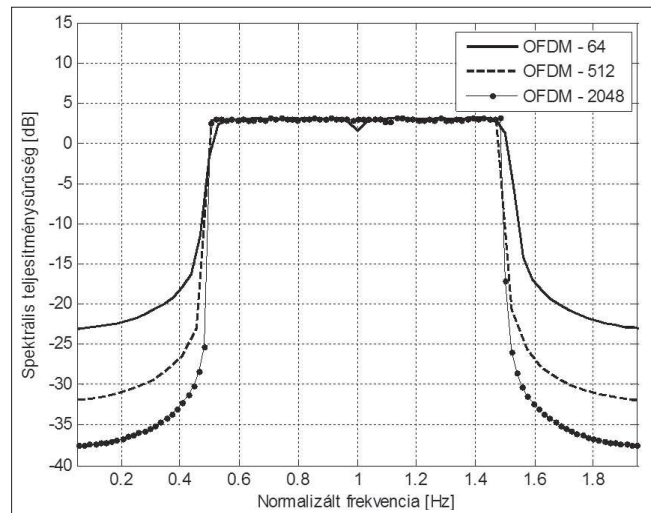
Ezen modulációs technológia a népszerűségét nagyban annak köszönheti, hogy a több vívő modulációja és demodulációja hatékonyan megvalósítható IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, inverz gyors Fourier-transzformáció) és FFT algoritmusok segítségével. A rendszer egyszerűsített blokkvázlata az 1/a. ábrán látható.

Első lépésben a bejövő b_i bináris adatfolyamot – amelyet általában hibakorlátozó kódolásnak vetünk alá – egy leképző fokozat segítségével átalakítják a modulációnak megfelelő komplex szimbólumokká (X_k), ezeket a jeleket vezetik rá egy N pontos IFFT blokk bemenetére, minden vívőnek más és más modulációs értéket adva. OFDM rendszerekben a vívők egy részét nem információ hordozására, hanem referencia- illetve mérőjelként használják (pilotvívők), vagy használaton kívül hagyják (nullvívők). Az IFFT blokk kimenetén megjelenő időtartománybeli jelmintákat még a felkeverés előtt kiegészítik további mintákkal, amelyeket együttesen cyclic prefixnek (ciklikus előtag, CP) hívunk. Ezek a minták többnyire az időtartománybeli jel N darab mintájából az utolsó P darabnak a jelalak elejére történő másolásával állnak elő. Ezeket a mintákat a szimbólumok közötti áthallás kiküszöbölésére használják, így a vevőoldalon a többutas terjedés okozta káros hatások csökkenthetők. Az így kialakított alapsávi jelet (s_n) a továbbiakban egy digitális-analóg átalakító segítségével folytonos jellé alakítjuk, majd ezt keverjük fel egy vagy több lépésben a vívősávba.

2.2 Spektrális tulajdonságok

A kommunikációs rendszerek egyik fő jellemzője az elfoglalt sáv szélesség és a szomszédos csatornás áthallás. A 2. ábrán látható az OFDM jel spektrális sűrűség-függvénye a vívők számának függvényében. Jól látható, hogy a vívőszám növelésével a sávkihasználás javul olyan értelemben, hogy a szomszédos csatornás szivárgás (adjacent channel leakage) csökken. Ez az érték a vizsgált három vívőszám mellett -25 és -40 dB kö-

zött van a szomszédos csatornában. A vívők számának növelése ugyanakkor nem végezhető akármeddig. Például az adó és a vevő oszcillátorai között fellépő, teljes mértékben nem kiküszöbölhető frekvenciaeltérés (offset), amely a vevőben vívők között áthallást eredményezhet, komoly gondot okozhat; továbbá az FFT művelet mintaszámának növelése is komoly számításgényvonzattal jár.



2. ábra Az OFDM rendszer spektrális sűrűsége

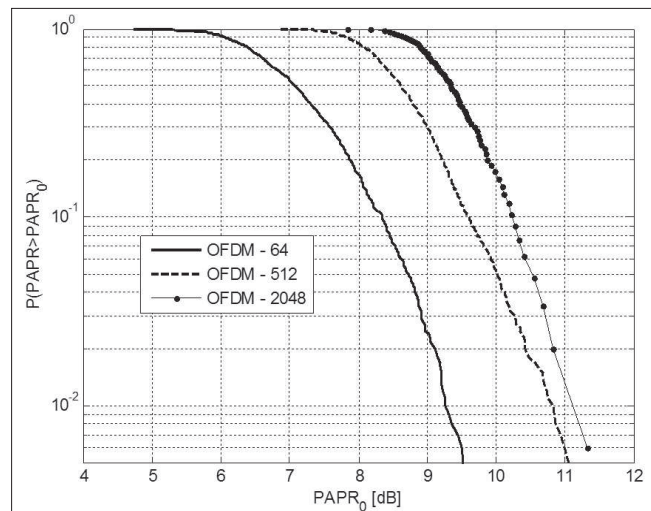
2.3 Az OFDM jel csúcstényezője

Az OFDM jel egyik fő problémája az időtartománybeli jel nagy dinamikája, a nagy csúcstényező (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio). A csúcstényező meghatározható a szimbólum legnagyobb pillanatnyi teljesítményének és a jel átlagteljesítményének arányát 10-es alapú logaritmus alá véve:

$$PAPR = 10 \log_{10} \left(\frac{x_{n,\max}^2}{\sum_n (x_n)^2} \right), n = 0, 1 \dots N - 1$$

A spektrális tulajdonságokhoz hasonlóan, a PAPR érték is függ a vívők számától. A PAPR valószínűségi eloszlása látható a 3. ábrán.

3. ábra A csúcstényező eloszlásfüggvénye



Jól látható hogy a vivők számának növelésével a valószínűség, hogy a jel PAPR értéke átlép egy adott $PAPR_0$ értéket, egyre növekszik. Vagyis nagyobb vivőszámnál a csúcstényező nagyon nagy értékeket is felvehet. Mivel az OFDM jel komplex vivők összegeként fogható fel, ezért jó közelítéssel – a centrális határeloszlás tétele miatt – az amplitúdóértékek gaussi eloszlásúak lesznek.

A nagy csúcstényező elsősorban a végerősítőben okoz gondot, ahol az erősítőnek széles linearitási tartománnyal kell rendelkeznie, ellenkező esetben a jel nemlineáris torzítást szenved. Azonban a széles lineáris tartomány kihasználtsága a gaussi eloszlású amplitúdó miatt alacsony marad, így az erősítő hatásfoka nem lesz optimális. Valós rendszerekben kompromisszumos megoldásként körülbelül 10 dB-s linearitási tartományra terveznek és csúcstényező-csökkentő eljárásokat alkalmaznak.

3. Alternatív modulációs sémák

Ebben a szakaszban ismertetünk három, az OFDM alapvetésére épülő, azt valamilyen szempontból felülmúló modulációs megoldást.

3.1 DFTS-OFDM

Az 1/b. ábrán látható elrendezésű DFTS-OFDM technika az OFDM „alaprendszer” kiegészítésével áll elő. Az adóban a leképzést követően, a modulációs lépést megelőzve egy DFT, a vevőben pedig egy IDFT blokk kerül. A DFTS-OFDM technika előnye a konvencionális OFDM-nél alacsonyabb PAPR érték. Lényegében a moduláció felfogható, mint egy egyvivős moduláció is, ezt a technikát alkalmazza a korszerű LTE (Long Term Evolution – negyedik generációs mobil adatátviteli szabvány) technológia is.

3.2 CE-OFDM

A CE-OFDM technika a PAPR drasztikus csökkentését célozza. Az 1/c. ábrán látható elrendezésű rendszerben a leképzést követően a szimbólumok mellé elhelyezük konjugált komplex párjaikat, és a párokat úgy rendezzük el, hogy az IFFT kimenetére valós jel kerüljön. Az így kapott x_n valós jelet egy fázismodulátorra vezetjük, ahol konstans amplitúdó mellett az IFFT kimeneti valós jele $-2 \cdot \pi \cdot h$ súlyozó tényezővel szorozva – az időfüggvény fázisát befolyásolja, lényegében folytonos fázisú modulációt (CPM) valósít meg. A fázismodulátor kimeneti jele (z_n) az x_n bemeneti jel függvényében:

$$z_n = e^{j2\pi h x_n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1.$$

A CE-OFDM technika hátránya, hogy – mivel az eredeti szimbólumok mellett a konjugált komplex párokra is szükség van – az elérhető adatsebesség az OFDM-hez képest feleződik. A technika nagy előnye, hogy alkalmazásával az ismertett eljárások közötti legalacsonyabb PAPR érték érhető el. A modulált jel teljesítménysűrűség-függvényét a CPM-hez hasonlóan a fázismodulátor h súlyozó tényezője befolyásolja, és a spektrumban megjelenhetnek diszkrét vonalak.

3.3 FBMC

Az 1/d. ábrán látható az FBMC rendszer blokkdiagramja. A komplex szimbólumokat frekvencia-kiterjesztéssel létrejövő köztes frekvenciaértékekre leképezve súlyozzák, mégpedig az OFDM-nél megszokott négyzetablak helyett egy speciális szűrőbankkal, amely prototípuszűrőre épül. Az M -szeres frekvencia-kiterjesztés miatt M -szeres pontszámú FFT alkalmazása szükséges.

A prototípuszűrő tulajdonságainak köszönhetően az FBMC spektrális tulajdonságai az előző eljárásokhoz képest lényegesen előnyösebbek, a szomszédos csatornás szivárgás mértéke sokkal kisebb [11]. Mivel a szimbólumok az időtartományban hosszabbak, ezért a spektrum keskenyebb lesz. Az FBMC eljárás QAM-et alkalmazva a CE-OFDM-hez hasonlóan felezett adatsebességű működésre képes, de a komplex alapsávi jelek I és Q összetevőit (a valós és képzetes részt) szétválasztva OQAM (Ofszet-QAM) alkalmazásával az előnyös spektrális tulajdonságok mellett az adatsebesség változatlan marad [12]. Az OFDM-mel egyező adatsebességű esetben a szomszédos szimbólumok átlapolódnak egymással. Az átlapolódás a vevőben megszüntethető, ha a szomszédos, átlapolódó szimbólumokra felváltva a komplex alapsávi jel valós és képzetes összetevőit adjuk. A prototípuszűrőt oly módon kell megtervezni, hogy ez esetben is képes legyen Nyquist-kritérium szerinti szétválasztásra [13]. Ezzel az elrendezéssel a szimbólumidő növekedése és a szomszédos szimbólumok átlapolódása ellenére is elértük a szomszédos csatornás áthallás jelentős csökkenését.

Az FBMC megoldásnak a szomszédos csatornás áthallás csökkenése mellett másik nagy előnye, hogy nem alkalmaz ciklikus előtagot, aminek következtében növelhető az adatsebesség. Megjegyezzük, hogy a szűrő impulzusválaszának hosszúságától függő hosszúságú fel- és lefutási idővel viszont számolni kell.

Az FBMC legnagyobb hátránya, hogy az előző megoldásokhoz viszonyítva nagyobb pontszámú FFT/IFFT műveleteket igényel és a szűrőbank alkalmazása miatt a működtetéséhez sokkal számításintenzívebb jelfeldolgozás szükséges. Polifázisú szűrőbank alkalmazásával ez a számításigény jelentősen csökkenthető [14]. Másik hátránként említhető a vevőoldali csatornakiégnyelítés bonyolultságának növekedése a CP hiánya miatt.

4. A négy modulációs séma összehasonlítása

4.1 Adatsebesség, jelfeldolgozási komplexitás

A CE-OFDM spektrális hatékonysága közelítőleg a fele a másik három modulációénak. Az FBMC esetén az OQAM alkalmazásával megtartható az OFDM eredeti adatsebessége, sőt a CP hiánya miatt nagyobb spektrális hatékonyság is elérhető. A jelfeldolgozási komplexitás szempontjából a legelőnyösebb tulajdonságokkal a legegyszerűbb eljárás, az OFDM rendelkezik. A CE-OFDM és a DFTS-OFDM rendre kissé növekvő komplexitású, de a kiterjesztett FFT és a szűrés miatt messze az FBMC rendszer igényli a legnagyobb számítási kapacitást.

	OFDM	DFTS-OFDM	CE-OFDM	FBMC
Rendszer-komplexitás	alacsony	közepes	közepes	komplex
Spektrális tulajdonságok	alacsony oldalsávi szivárgás	alacsony oldalsávi szivárgás	DC + oldalsávi szivárgás	nagyon alacsony oldalsávi szivárgás
Csúcstényező	nagy	közepes	kicsi	nagy
Adatsebesség	1-P/N	1-P/N	0.5(1-P/N)	1

1. táblázat
A négy modulációs séma összehasonlítása

4.2 Spektrális tulajdonságok

A modulációs sémák spektrális teljesítménysűrűség-függvénye látható a 4. ábrán.

CE-OFDM esetén $2 \cdot \pi \cdot h = 0,8$ értéket használtunk. A szimulációk során ebben az esetben ideális, lineáris erősítő használatát feltételeztük, a CP a szimbólumidő negyedével egyező hosszúságú. Az ábrán jól látható, hogy a legelőnyösebb spektrális tulajdonságokkal az FBMC jel rendelkezik. A szomszédos csatornás áthallás a sávhátáron ebben az esetben -60 dB alatti. Az OFDM és a DFTS-OFDM hasonló spektrális tulajdonságokat mutat, míg a CE-OFDM esetén a kis PAPR érték elérése mellett kompromisszumként a rendelkezésre álló csatorna kisebb hatékonyságú kihasználása és nagy DC összetevő látható.

A spektrális tulajdonságok alapján a kognitív rádiós felhasználásra az FBMC a legalkalmasabb.

4.3 Csúcstényező

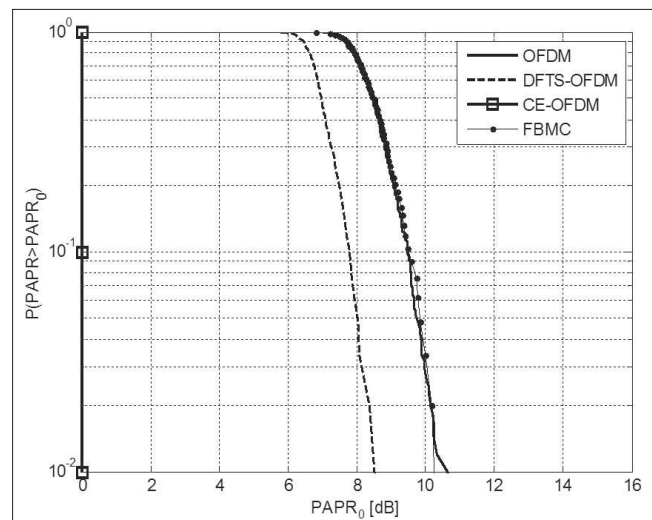
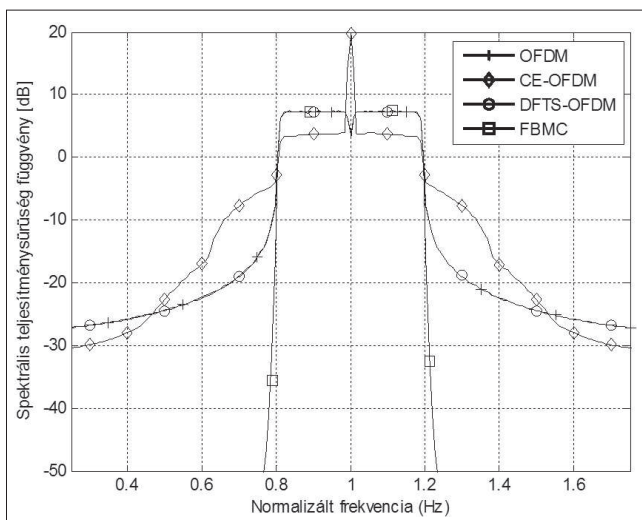
A teljesítményerősítők korlátozott lineáris dinamika-tartománya miatt fontos a csúcstényező minél alacsonyabb értéken tartása. Az 5. ábrán a vízszintes tengelyen feltüntetett PAPR függvényében látható a függőleges tengelyen annak a valószínűsége, hogy a jel PAPR-je ennél nagyobbak adódik. Az OFDM és az FBMC itt közel megegyező eredményeket produkál, a DFTS-OFDM eredménye ennél valamivel kedvezőbb, míg a konstans burkoló miatt a CE-OFDM esetén a fázismoduláció miatt az amplitúdója állandó 0 dB.

5. Összefoglalás

Cikkünkben négy lehetséges többvívős modulációs sémát mutattunk be, melyeket a mérnökök kognitív rádiós eszközökben alkalmazhatnak. Ismertettük a rendszerekben használatos alapvető jelfeldolgozási lépéseket. Az összehasonlítást különös tekintettel az OFDM rendszerre végeztük. Az elemzéseket összefoglaló eredmény látható az 1. táblázatban. OFDM esetén a legegyszerűbb a jelfeldolgozás. DFTS-OFDM és CE-OFDM esetén néhány extra jelfeldolgozási elemre van szükség, míg FBMC esetén a komplexitás növekedése sokkal jelentősebb. A spektrális tulajdonságok szempontjából az FBMC rendszer a legelőnyösebb, ez rendelkezik a legkisebb szomszédos csatornás áthallással. A CE-OFDM rendszeré az legalacsonyabb csúcstényező, amely az erősítő tervezését és gazdaságos üzemeltetését könnyíti meg. A DFTS-OFDM rendszer ugyan egyik kategóriában sem bizonyult a legjobbnak, a legtöbb esetben mégis jó kompromisszumos megoldás lehet, mivel minden szempont szerint jó eredményeket mutat. Általánosságban elmondható, hogy ezeket a szempontokat kell a kognitív rádiók modulációs sémájának tervezésénél figyelembe venni és azt a modulációt választani, amely a legjobban megfelel a kívánt specifikációnak. Az ideális rendszer kiválasztása során néhány további, a cikkben csak érintőlegesen említett aspektust is érdemes figyelembe venni, például a szinkronizáció [15], csatornakiégnyelítés [16] témaköreit, amelyek szintén fontos szerepet játszhatnak.

4. és 5. ábra

A vizsgált négy modulációs eljárás spektrális sűrűsége és csúcstényezőjének eloszlásfüggvénye 512 vívő esetén



Köszönetnyilvánítás

A publikáció elkészítését az Európai közösség 7. keretprogramja támogatta a 248454 számú pályázat keretében (QoSMS).

A szerzőkről



KOLLÁR ZSOLT okleveles villamosmérnök, 1983-ban született Budapesten. 2008-ban szerzett diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki szakán. Jelenleg a BME Méréstechnika és Információs Rendszerek tanszékén doktorandusz. 2007 óta tagja a Rohde&Schwarz referencialabornak. Főbb kutatási területe az OFDM rendszerek, valamint jelfeldolgozás vezetékek nélküli kommunikációban, ezen belül is a szinkronizáció és csatorna-kiegyenlítés módszerei.



VARGA LAJOS okleveles villamosmérnök, 1986-ban született Medgyesegyházán. 2011-ben szerzett diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki szakán. 2007 óta tagja a Rohde&Schwarz referencialabornak és a Masat-1 kisműholdat építő csapatnak, jelenleg a Szélessávú Hírközlés és Villamosság-tan tanszék demonstrátora. MSc diplomatervében a cikk tárgyát is képező többvívós modulációs eljárásokat vizsgálta.



HORVÁTH PÉTER okleveles villamosmérnök, 1978-ban született Budapesten. 2011-ben szerzett PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosság-tan tanszékén tanársegéd. Főbb kutatási területei a MIMO-rendszerek, csatornamodellezés, valamint a kognitív rádiók fizikai rétegeinek aspektusai.

Irodalom

- [1] Mitola, J. and Maguire, G.Q., „Cognitive radio: Making software radios more personal” IEEE Personal Communications, Vol. 6, No.4 , pp.13–18, August 1999.
- [2] Qing Zhao and Sadler, B.M., „A Survey of Dynamic Spectrum Access,” IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No.3, pp.79–89, May 2007.
- [3] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks [Online]. Elérhető: <http://www.ieee802.org/22/>
- [4] Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., Shankar, S., „IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios,” IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN, Baltimore, USA, pp.328–337, 2005.
- [5] Nekovee, M., „A survey of cognitive radio access to TV White Spaces” 2009 ICUMT'09. Int. Conf. on Ultra Modern Telecom. and Workshop, pp.1–8, 12-14 October 2009.
- [6] van Nee, R. and Prasad R., OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, Boston, USA, 2000.
- [7] Zs. Kollár and P. Horváth, „Modulation schemes for cognitive radio in white spaces,” Radioengineering, Vol. 19, No.4, pp.511–517, 2010.
- [8] Hyung G. Myung, Junsung Lim, David J. Goodman, „Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission” IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 1, No. 3, pp. 30-38, Sep. 2006.
- [9] D. Galda and H. Rohling, „A low complexity transmitter structure for OFDM-FDMA uplink systems,” In: Vehicular Technology Conf., VTC Spring 2002, IEEE 55th, Vol. 4, pp.1737–1741, 2002.
- [10] S.C. Thompson, A.U. Ahmed, J.G. Proakis, J.R. Zeidler, M. J. Geile, „Constant envelope OFDM,” Transactions on Communications, Vol. 56, No.8, pp.1300–1312, August 2008.
- [11] F. Schaich, „Filterbank based multi carrier transmission (FBMC) – evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX,” In: 2010 European Wireless Conference (EW), pp.1051–1058, 2010.
- [12] P. Siohan, C. Siclet, N. Lacaille, „Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory,” IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 50, No.5, pp.1170–1183, 2002.
- [13] H.S. Malvar, „Extended lapped transforms: Properties, applications and fast algorithms,” IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No.11, pp.2703–2714, 1992.
- [14] P.P. Vaidyanathan, Multirate systems and filter banks, Prentice-Hall Inc., 1993.
- [15] Zsolt Kollár and Péter Horváth, „Physical Layer Considerations for Cognitive Radio: Synchronization Point of View,” IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, VTC2011-Spring, Budapest, Magyarország, 2011. Paper 97-74244.
- [16] Zs. Kollár and Péter Horváth, „Equalization of Multicarrier Cognitive Radio Transmission Over Multipath Channel with Large Delay Spreads,” Infocommunications Journal, Vol. III, No.2, pp.43–47, May 2011.