magyar: Modern többvivős rendszerek kognitív rádiós alkalmazásokban
angol: State-of-the-art Multicarrier Transmission Techniques for Cognitive Radio Applications

Kollár Zsolt, Varga Lajos, Horváth Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

**Tartalmi összefoglaló**
A közeljövőben Magyarországon is lezajló digitális televíziós átállás következtében több frekvenciasáv felszabadul. E frekvenciákat a tervek szerint az átállást követően opportunisztikusan kommunikáló, intelligens rádiós rendszerek használhatják 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 többvivős modulációs eljárást.

**Kulcsszavak**: Kognitív rádió, white space, többvivős modulációs eljárások, vezeték-nélküli rendszerek, OFDM

**Abstract**
As a result of the analogue-to-digital change-over of TV broadcast which is upcoming in Hungary as well, certain frequency bands will become available. According to recent plans, these frequencies might be used by opportunistically communicating, intelligent radio systems aiming data transmission applications. As the primary (incumbent) user of these frequencies will still be the broadcast sector, data communication systems operating in these frequencies must incorporate sophisticated intelligence and fast spectrum sensing capabilities to prevent interference. The physical layer of these communication systems (the modulation) must meet some special requirements implied by these special constraints. In this paper we introduce and compare four different multicarrier modulation techniques which might be suitable candidates for cognitive radio-based applications.

**Key words**: Cognitive radio, white space, multicarrier modulation schemes, wireless communication systems, OFDM.

## 1. Bevezetés

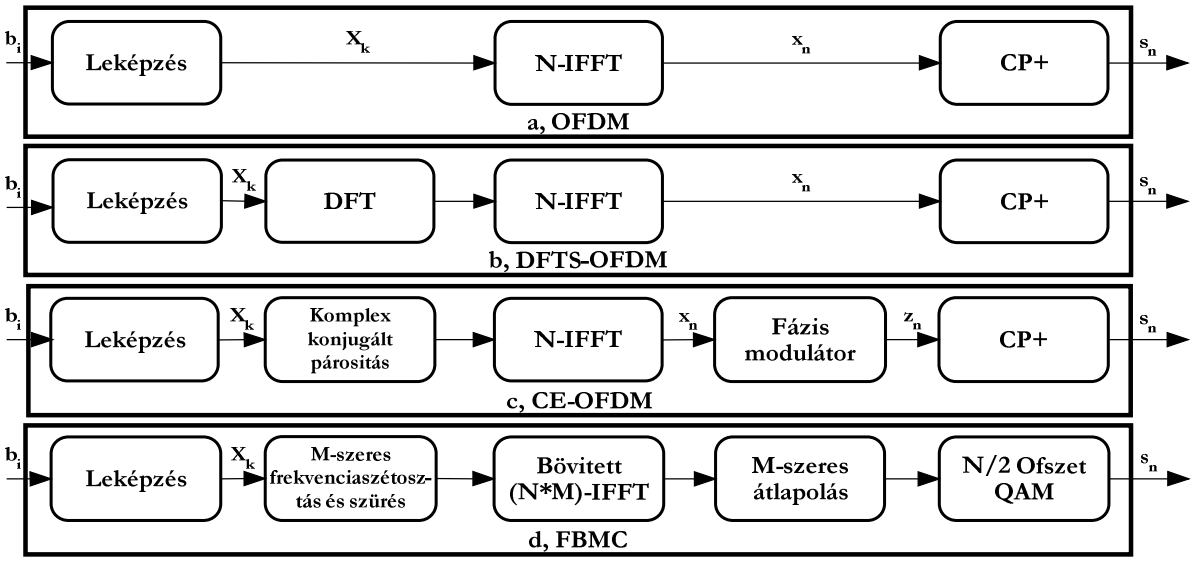
A vezeték nélküli kommunikáció térhódításával párhuzamosan a felhasználók adatsebesség-igénye is egyre nő. A rendelkezésre álló frekvenciasávok azonban korlátozottak. Erre a problémára próbál megoldást találni Mitola 1999-ben megjelent cikkében [1], amelyben a kognitív rádió alapgondolatát mutatja be.

A kognitív rádió lényegében másodlagos (opportunisztikus) 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 bonyolítania 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-tól 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].

Cikkünkben a WS-ek opportunisztikus kihasználására legígéretesebb többvivős modulációs eljárásokat mutatja be és hasonlítjuk össze. A többvivős rendszerek esetén az OFDM [6] (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonális frekvenciaosztásos nyalábolás), mint széles körben elterjedt technika alkalmazása tűnik magától értetődőnek. Több vezeték nélküli hírközlő rendszerben, többek között DVB (digitális televízió), DAB (digitális rádió) és WLAN (vezetéknélküli hálózat) esetén is ezt az eljárást alkalmazzák.

Ezen séma mellett bemutatunk még három másik alternatívát, amelyeket valamilyen szempontból előnyösebbek lehetnek az OFDM-nél [7]: A DFT-Spread OFDM [8, 9] (DFT-szórt OFDM, továbbiakban DFTS-OFDM), Constant Envelope OFDM [10] (állandó burkolójú OFDM, továbbiakban CE-OFDM) valamint a Filter Bank Multicarrier [11, 12] (szűrőbank-alapú többvivős 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.




**1. ábra A vizsgált négy eljárás adóoldali blokkvázlata**

## 2. OFDM moduláció felépítése és főbb tulajdonságai

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

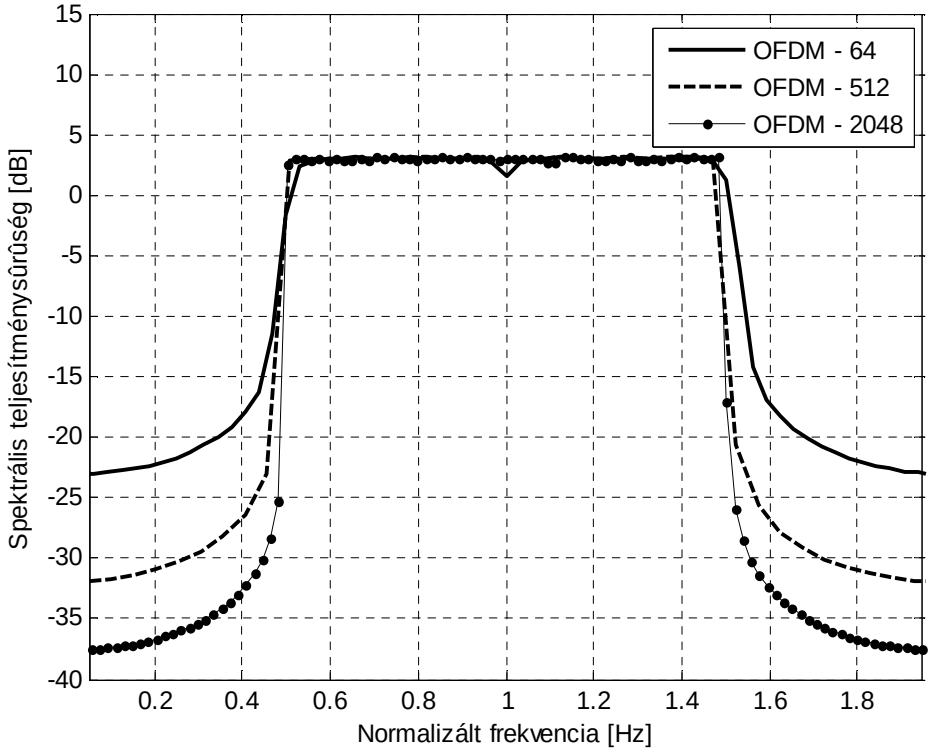
### 2.a Az OFDM moduláció

Ezen modulációs technológia a népszerűségét nagyban annak köszöntheti, hogy a több vivő 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 bementére, minden vivőnek más és más modulációs értéket adva. OFDM rendszerekben a vivők egy részét nem információ hordozására, hanem referencia- illetve mérőjelként használják (ún. pilotvivők), vagy használaton kívül hagyják (ún. nullvivők). Az IFFT blokk kimenetén megjelenő időtartománybeli jelmintákat még a felkeverés előtt kiegészítik további mintákkal, amelyeket együttesen cyclic prefixnek (ciklikus előtagnak , 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 ez a jelet keverjük fel egy vagy több lépésben a vivősávba.

**2.b Spektrális tulajdonságok**

A kommunikációs rendszerek egyik fő jellemzője az elfoglalt sávszélesség és a szomszédos csatornás áthallás. A 2. ábrán látható az OFDM jel spektrális sűrűség-függvénye a vivők számának függvényében. Jól látható, hogy a vivőszám növelésével a sávkihasználás javul olyan értelemben, hogy a szomszédos csatornás szivárgás (adjacent channel leakage) csökken. Ez az érték a vizsgált 3 vivőszám mellett -25 és -40 dB között van a szomszédos csatornákban. A vivők számának növelése ugyanakkor nem végezhető akármeddig. Például az adó és a vevő oszcillátorai között fellépő, teljes mértékben nem kiküszöbölhető frekvenciaeltérés (ofszet), amely a vevőben vivők között áthallást eredményezhet, komoly gondot okozhat; továbbá az FFT művelet mintaszámának növelése is komoly számításigény-vonzattal jár.




**2. ábra Az OFDM rendszer spektrális sűrűsége**

**2.c OFDM jel csúcstényezője**

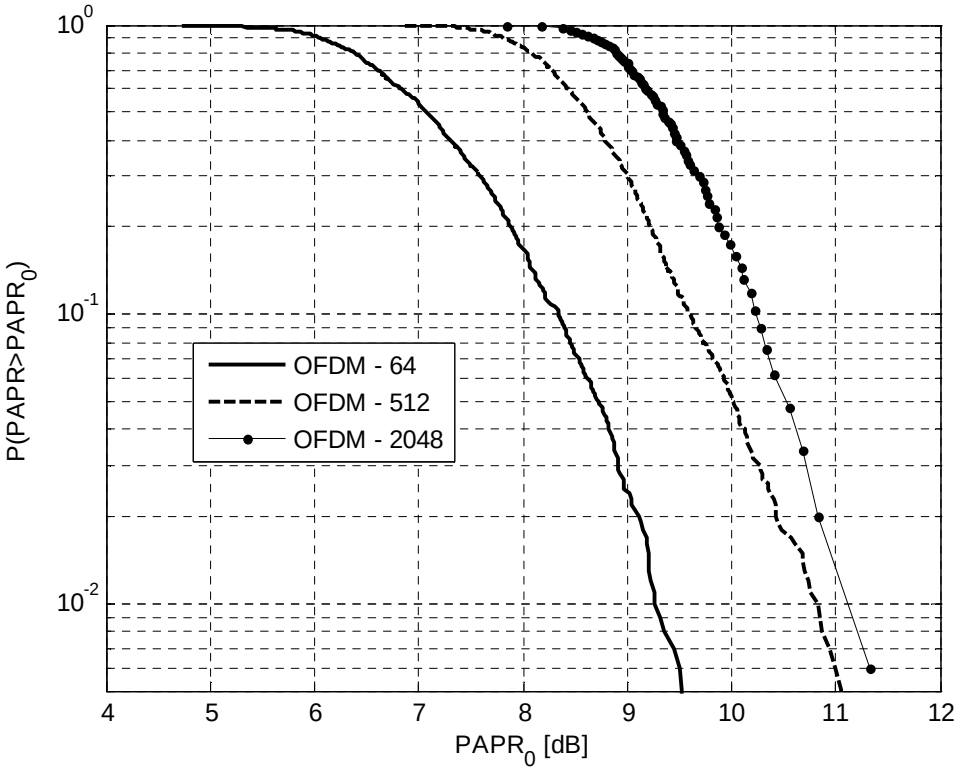
Az OFDM jel egyik fő problémája az időtartománybeli jel nagy dinamikája, a nagy csúcstényező (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio). A csúcstényező meghatározható a

szimbólum legnagyobb pillanatnyi teljesítményének és a jel átlagteljesítményének arányát 10-es alapú logaritmus alá véve:

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

A spektrális tulajdonságokhoz hasonlóan, a PAPR érték is függ a vivők számától. A PAPR valószínűségi eloszlása látható a 3. ábrán. 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 amplitúdó-értékek 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. ábra Az OFDM rendszer csúcstényezőjének eloszlásfüggvénye**

## 3. Alternatív modulációs sémák

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

### 3.a 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.b CE-OFDM

A CE-OFDM technika a PAPR drasztikus csökkentését célozza. Az 1.c ábrán látható elrendezésű rendszerben a leképzést követően a szimbólumok mellé elhelyezzük 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:

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

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 ismertetett 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. c 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 négyszögablak helyett egy speciális szűrőbankkal, amely prototípusszűrőre épül. Az *M*-szeres frekvencia-kiterjesztés miatt *M*-szeres pontszámú FFT alkalmazása szükséges. A prototípusszűrő előnyös tulajdonságainak köszönhetően az FBMC spektrális tulajdonságai az előző eljárásokhoz képest sokkal 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 prototípusszűrőt olyan módon kell megtervezni, hogy ebben az esetben is képes legyen a Nyquist-kritérium szerinti szétválasztása [13]. Ezzel az elrendezéssel a szimbólumidő növekedése és a szomszédos szimbólumok átlapolódása ellenére is elértük a szomszédos csatornás áthallás nagymértékű csökkenését.

Az FBMC megoldásnak a szomszédos csatornás áthallás csökkenése melletti 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 hátrányként említhető a vevőoldali csatornakiegyenlítés bonyolultságának növekedése a CP hiánya miatt.

## 4. A négy modulációs séma összehasonlítása

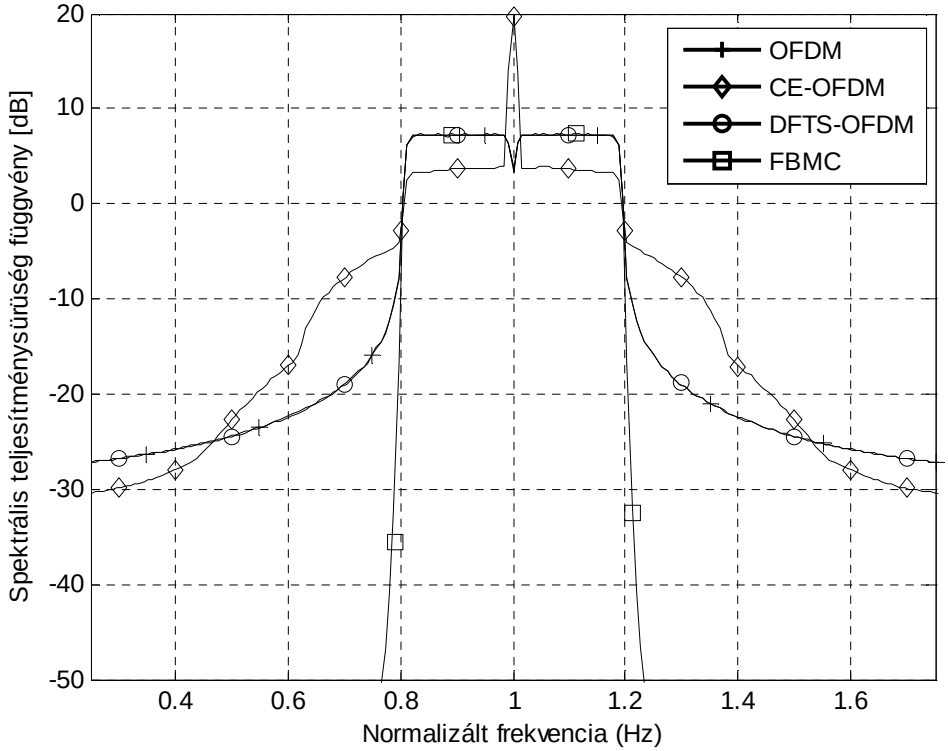
### 4.a Adatsebesség, jelfeldolgozási komplexitás

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.

### 4.b 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 sáv határon 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.

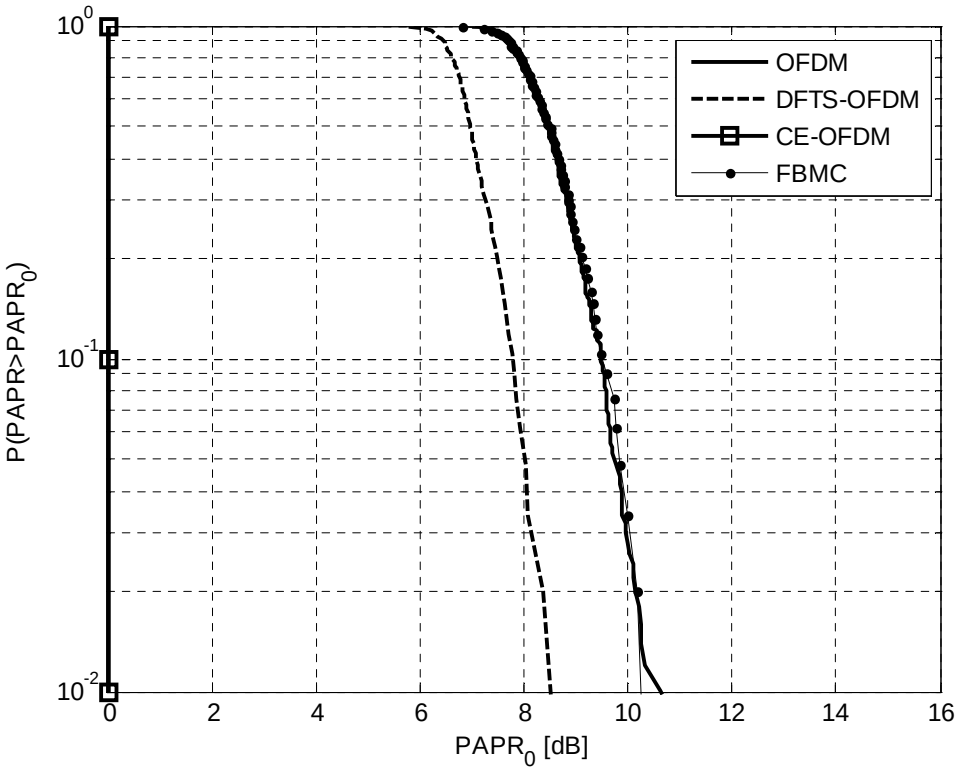



**4. ábra A vizsgált négy modulációs eljárás spektrális sűrűsége 512 vivő esetén**

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

**4.c Csúcstényező**

A teljesítményerősítők korlátozott lineáris dinamikatartománya 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 nagyobbnak 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 az amplitúdója állandó 0 dB.




**5. ábra A vizsgált négy modulációs eljárás csúcstényezőjének eloszlásfüggvénye 512 vivő esetén**

## 5. Összefoglalás

**1. táblázat: A négy modulációs séma összehasonlítása**

| Szempont | 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 |

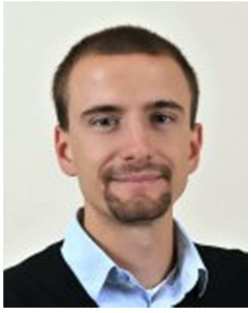
Cikkünkben négy lehetséges többvivős modulációs sémát mutattunk be, amelyeket a mérnökök kognitív rádiós eszközökben alkalmazhatnak. Ismertettük a rendszerekben használatos alapvető jelfeldolgozási lépéseket. Az összehasonlítást különös tekintettel az OFDM rendszerre végeztük. Az elemzéseket összefoglaló eredmény látható az 1. táblázatban. OFDM esetén a legegyszerűbb a jelfeldolgozás. DFTS-OFDM és CE-OFDM

esetén néhány extra jelfeldolgozási elemre van, míg FBMC esetén a komplexitás növekedése sokkal jelentősebb. A spektrális tulajdonságok szempontjából az FMBC 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 kognitív rádiók modulációs sémájának a 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 figyelemben venni, például a szinkronizáció [15], csatornakiegyenlítés [16] témaköreit, amelyek szintén fontos szerepet játszhatnak.

**Köszönetnyilvánítás**

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

**Szerzőkről**



Kollár Zsolt, okleveles villamosmérnök, 1983-ban született Budapesten. 2008-ban szerzett diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki szakán. Jelenleg doktorandusz a Budapesti Műszaki Egyetem Méréstechnika és Információs Rendszerek tanszékén. 2007 óta tagja a Rohde&Schwarz refencialabornak. Főbb kutatási területe az OFDM rendszerek valamint jelfeldolgozás vezetéknélküli kommunikációban, ezen belül is a szinkronizáció és csatornakiegyenlítés 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 Villamosságtan tanszék demonstrátora. MSc diplomájában a cikk tárgyát is képező többvivős modulációs eljárásokat vizsgálta.

Horváth Péter, okleveles villamosmérnök, 1978-ban született Budapesten. 2011-ben szerzett PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Jelenleg tanársegéd a Budapesti Műszaki Egyetem Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan tanszékén. Főbb kutatási területei a MIMO rendszerek, csatornamodellezés valamint a kognitív rádiók fizikai rétegének aspektusai.

**Referenciák**

[1] Mitola, J. and Maguirem, G. Q., “Cognitive radio: Making software radios more personal,” IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4. , pp. 13 – 18, Aug. 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. and 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. International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshop*, pp.1-8, 12-14 Oct. 2009.

[6] van Nee, R. and Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Boston (USA): Artech House, 2000.

[7] Zs. Kollár and P. Horváth, “Modulation schemes for cognitive radio in white spaces,” R*adioengineering*, vol. 19, no. 4, pp. 511–517, Dec. 2010.

[8] Hyung G. Myung, Junsung Lim, and 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 Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th*, vol. 4, pp. 1737–1741. 2002.

[10] S.C. Thompson, A.U. Ahmed, J.G. Proakis, J.R. Zeidler, and M.J. Geile, “Constant envelope OFDM,” *Transactions on Communications*, vol. 56, no. 8, pp. 1300–1312, Aug. 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, and 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, Nov. 1992.

[14] P. P. Vaidyanathan, *Multirate systems and filter banks*. Prentice-Hall Inc., 1993.

[15] Zs. Kollár and Péter Horváth, “Physical Layer Considerations for Cognitive Radio: Synchronization Point of View,” IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, VTC2011-Spring. Budapest, Magyarország, 2011.05.15-2011.05.18. Paper 97-74244.

[16] Zs. Kollár and Péter Horváth, “Channel Equalization for OFDM-Related Multicarrier Schemes in White Space Applications,” *Globecom 2011*, Houston, Texas, USA, December 2011. [bírálat alatt]