

Az IEEE 802.16 szabvány fizikai rétege

NÉMETH ZOLTÁN

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék
pepa@mcl.hu

Kulcsszavak: IEEE 802.16, HiperMAN, OFDM, WiMAX

A cikk az IEEE 802.16-2004 szabványverzió fizikai rétegének specifikációit ismerteti. Kapcsolódik a szélessávú vezeték nélküli elérés szabványosítási környezetét ismertető előző cikkhez, míg a következő ennek szerves folytatása a MAC-réteg ismertetésével.

1. Bevezetés

Ebben a cikkben az IEEE 802.16-2004 verzió alapján ismertetjük a fizikai réteg specifikációit. Ez a verzió a 2-66 GHz működési frekvenciatartományba eső szélessávú rádiós átviteli rendszereket írja le [1]. Ebből a frekvenciatartományból a jelenleg gyártott eszközök szempontjából Európában és hazánkban a legfontosabb a 3,5 GHz-es engedélyköteles, valamint az 5,4 GHz-es és 5,8 GHz-es frekvenciaengedélyhez nem kötött sáv. A cikkben ezért elsősorban az ezekre a tartományokra, és az ezekben működő eszközök fizikai rétegének leírására koncentrálnunk.

2. Frekvenciasávok és szabályozási kérdések

A WiMAX rendszer európai és hazai [10,11] szabályozásának vizsgálata előtt először áttekintjük az IEEE 802.16-2004 szabvány által felkínált frekvenciahasználati lehetőségeket. Jelen összefoglalóban csak a 11 GHz alatti frekvenciákat tüntetjük fel. A szabvány által megjelölt frekvenciasávok, illetve az azokra vonatkozó előírások az 1. táblázatban találhatóak.

A rendelkezésre álló frekvenciasávoknak csak egy része felel meg az európai szabályozásnak, az ETSI, a CEPT (Conference of European Postal and Telecommunications), az ERC (European Radiocommunications Committee), illetve az NHH (Nemzeti Hírközlési Hatóság) előírásainak.

2.1. Engedélyhez nem kötött frekvenciasávok

A szélessávú adatátvitelre felhasználható szabad felhasználású frekvenciasávok közül először a 2,4-2,4835 GHz-es sávot kell megemlíteni. Ebben a tartományban direkt szekvenciális és frekvenciaugratásos szórt spektrumú modulációt kell alkalmazni -20 dBW/1 MHz, illetve -10 dBW/100 kHz teljesítménysűrűség-korláttal. A megengedett maximális kisugárzott teljesítmény 100 mW (EIRP) az ETSI/CEPT/ERC előírások szerint [3].

Az előírt moduláció nem felel meg az IEEE 802.16-2004 által alkalmazott OFDM-nek (és az egyvívós előírásnak sem), ezért ez a sáv WiMAX átvitelre az európai szabályozás szerint nem használható. A magyar szabályozás az ETSI rendelkezéseivel összhangban van.

Az előírásoknak megfelelően [3,4] az 5,15-5,35 GHz sáv ugyancsak szélessávú adatátvitelre használható. Ebben az esetben az átlagos teljesítményre vonatkozó korlát 200 mW, a teljesítményszabályozás (TPC) kötelező, és csak a beltéri használat megengedett. Ennek következtében a WiMAX rendszerek szempontjából ennek a sávnak nincs jelentősége. Az NHH szabályozása az eddigieket kiegészítendő a sávban változó 0,25 mW/25 kHz, illetve 10 mW/1 MHz maximális teljesítménysűrűséget (EIRP) engedélyez. A dinamikus frekvencia kiválasztás (DFS) kötelező, ezen kívül vagy adóteljesítmény szabályozás (TPC) szükséges, vagy a maximális teljesítmény-jellemzők csökkennek 3 dB-lel.

Az előbbi sávtól eltérő szabályozás [3] alá esik az 5,47-5,725 GHz tartomány, mivel ebben az esetben megengedett a kültéri használat is. Az átlagos teljesítményre vonatkozó korlát 1 W, a teljesítményszabályozás (a 3 dB-es mérséklési tényezővel – mitigation factor) és a dinamikus frekvencia kiválasztás (DFS) kötelező. Ebben a sávban az ETSI az OFDM modulációjú HIPERLAN rendszerek használatát ajánlja [5]. A magyar szabályozás szerint az engedélymentes 5,4 GHz-es (5,47-5,725 GHz) sávban elsődleges jelleggel mozgószolgálat keretében többek között vezeték nélküli hozzáférési rendszerek (rádiós helyi hálózatok: RLAN, HIPERLAN) működhetnek. Harmadlagos jelleggel állandó helyű szolgálat keretében vezeték nélküli hozzáférési rendszerek (RLAN, HIPERLAN, WiMAX) üzemelhetnek. A megengedett maximális teljesítménysűrűség (EIRP) a sávban változó 50 mW/1 MHz.

Végül a WiMAX szempontjából még jelentőséggel bíró szabad sáv az 5,725-5,85 GHz tartományba esik (ISM sáv). Ebben a sávban az európai szabályozás szerint [3] jelenleg a közúti szállításhoz és forgalmi telematikához használt rendszerek működhetnek. Az előírt teljesítménykorlát 2 W (EIRP) [6], illetve bizonyos megkötések esetén 8 W (EIRP) [6]. A csatornaosztás 5, 10

és 20 MHz-es lehet. Az 5,805-5,815 GHz sáv használatához a nemzeti hatóságok által kiadott külön engedély szükséges. A sáv harmonizálása jelenleg folyamatban van, és kívánatos is, mivel számos WiMAX eszköz készül erre a frekvenciatartományra.

Az 5,8 GHz-es (5,725-5,85 GHz) engedélymentes sáv magyar viszonylatban is megemlítendő, de meg kell jegyezni, hogy ebben a sávban működnek nem polgári alkalmazások is. Az 5,795-5,815 GHz sávban közúti közlekedési telematikai (RTTT) rendszerek közút-jármű összeköttetései működhetnek. Az RTTT összeköttetések és digitális szórt spektrumú pont-pont rendszerek harmadlagos jelleggel üzemelhetnek. Az utóbbi rendszerek esetében a minimális előírt jelfeldolgozási nyereség (processing gain) 10 dB. Amennyiben az átviteli rendszerrel áthidalt távolság nagyobb, mint 30 km, úgy a maximálisan sugározható teljesítmény 21 dBW (EIRP). 30 km-nél kisebb távolság esetén a maximális kisugárzott teljesítmény $(6+0,5L)$ dBW, ahol L az áthidalt távolságot jelenti km-ben. A katonai alkalmazás és a pont-pont átvitel megkötése miatt a sáv jelenleg még nem használható.

2.2. Engedélyköteles frekvenciasávok

Az WiMAX rendszerek által használt engedélyköteles frekvenciasávok európai szabályozása kiforrottabb, mint a szabad sávoké, bár itt is található még nyitott kérdések, amelyek a jövőben megoldásra várnak. Az

egyik ilyen kérdés például a mobilitás kezelése, amely azonban nem tartozik az IEEE 802.16-2004 szabványhoz, ezért vizsgálatát mellőzzük.

A WiMAX szabvány lehetővé teszi a 2,1, a 2,3, a 2,5 és a 2,6 GHz-es frekvenciasávban történő kommunikációt is, azonban ezek a frekvenciasávok a szélessávú adatátvitelre csak Európán kívül (például az Amerikai Egyesült Államokban és Kanadában) használhatók. A WiMAX szabvány által ajánlott 2,1 GHz-es sáv a magyar szabályozás szerint nem használható. A 2,11-2,17 GHz-es sáv állandóhelyű és a mozgószolgálat keretében szolgáltatás célú IMT-2000/UMTS földfelszíni rendszerek részére jelölhető ki FDD (frekvenciaosztásos duplex) downlink átvitelhez. A 2,3 GHz-es (2,3-2,4 GHz) sáv mozgó és állandóhelyű szolgálatok részére van kijelölve. Másodlagos jelleggel az amatőr szolgálat állomásai használhatják. Ugyancsak másodlagos jelleggel nem polgári célú rádiólokátorok üzemelnek várhatóan 2008-ig. Új frekvenciakijelölésre, illetve berendezés-beszerzésre nem kerülhet sor. A 2,5 GHz-es és 2,6 GHz-es sáv (2,5-2,69 GHz) sáv elsődleges jelleggel mozgószolgálatokhoz van kijelölve, a frekvenciasáv az IMT-2000/UMTS rendszerek számára tervezett. Az eddigiek alapján tehát a WiMAX rendszerekhez ezek a frekvenciasávok nem használhatók a magyar szabályozás szerint sem.

A WiMAX rendszerek számára Európában használható frekvenciák a 3,41-4,2 GHz sávon belül helyezkednek el. Ez a tartomány több részre osztható, a 3,41-

1. táblázat Lehetséges WiMAX frekvenciasávok

Frekvenciasávok (GHz) (* – szabad sáv)	Megengedett csatornaosztás	Előírás	
2,305–2,320; 2,345–2,360	1 vagy 2 x (5 + 5 MHz) vagy 1 x 5 MHz	USA CFR 47 27. rész; FCC IB95-91 jegyzék	
2,150–2,162; 2,500–2,690	125 kHz-től ($n \times 6$) MHz-ig, egyszeres vagy többszörös, folytonos vagy nem folytonos és ezek kombinációi	USA CFR 47 21.901 rész; USA CFR 47 74.902 rész	
2,150–2,160; 2,500–2,596; 2,686–2,688	1 MHz – ($n \times 6$) MHz (1 vagy 2 utas); 25 kHz – ($n \times 25$ kHz) „visszatérő”; folytonos csatornák kívánatosak	Kanada SRSP-302.5	
2,400–2,483*	Direkt szekvenciális, frekvenciaugratásos stb. szórt spektrum	CEPT/ERC/ 70-03 ajánlás; USA CFR 47 15. rész, E [B19] alfejezet	
3,400–4,990	3,410–4,200	1.75–30 MHz – 1.75–30 MHz párosítva; csak szimmetrikus használat; 50 MHz vagy 100 MHz frekvenciatávolsággal	ITU-R F.1488 ajánlás II. függelék; ETSI EN 301 021[B15]; CEPT/ERC 14-03 E ajánlás; CEPT/ERC 12-08 E ajánlás
	3,400–3,700	$n \times 25$ MHz (egyszeres vagy páros; párosnál 50 MHz vagy 100 MHz frekvenciatávolsággal)	ITU-R F.1488 ajánlás I. függelék; CITEL PCC.III/ 47 (XII-99) ajánlás; Kanada SRSP-303.4
	3,650–3,700	Szabályozás folyamatban	USA FCC WT00-32 jegyzék
	4,940–4,990	Szabályozás folyamatban	USA FCC WT00-32 és ET-98-237 jegyzékek
5,150–5,850*	5,150–5,350	$n \times 20$ MHz (HIPERLAN); csak beltéri használatra	CEPT/ERC/70-03 ajánlás
	5,470–5,725	$n \times 20$ MHz (HIPERLAN)	
	5,250–5,350	Maximum 100 MHz; csak beltéri használatra	USA CFR 47 15. rész, E [B19] alfejezet; USA CFR 47 15. rész, C [B19] alfejezet
	5,250–5,350	Maximum 100 MHz	
	5,725–5,850	Maximum 125 MHz	
10,000–10,680	3.5–28 MHz – 3.5–28 MHz párosítva 350 MHz frekvenciatávval	CEPT/ERC/12-0 ajánlás; ETSI EN 301 021 [B15]	

3,6 GHz, a 3,6-3,8 GHz és a 3,8-4,2 GHz sáv külön szabályozás alá esik. Az engedélyköteles frekvenciasávot használó WiMAX eszközök számára Európában alapvetően a 3,41-3,6 GHz-es tartomány van kijelölve. A CEPT ajánlása szerint a sáv elsődlegesen fix helyű és fix-műholdas rádiószolgáltatásokra használható. A pont-pont és a pont-többpont összeköttetések különböző kombinációinak engedélyezése a nemzeti hatóságok jogkörébe tartozik. Cellás pont-többpont rendszerek üzemeltetése esetén kívánatos a folytonos spektrumkihasználás. A sávban 250 kHz-es sávosztást kell alkalmazni. A 3,41-3,5 GHz és 3,5-3,6 GHz tartományban 50 MHz-es duplex frekvenciatávolsággal üzemeltethetők pont-többpont rendszerek, valamint pont-pont összeköttetések 1,75 MHz, 3,5 MHz, 7 MHz és 14 MHz csatornaosztással.

Ugyanezek a szabályok vonatkoznak a 100 MHz frekvenciatávolsággal működő duplex rendszerekre is [7]. Az ETSI ebben a tartományban frekvenciaduplex (FDD) és időduplex (TDD) rendszerek működését is engedélyezi. Alapvető hozzáférési módként a szabvány időosztásos többszörös hozzáférést (TDMA) ír elő, amelyet ki lehet egészíteni más technikákkal is, például ortogonális frekvenciaosztásos frekvenciaosztásos többszörös hozzáféréssel. Az előírás szerint ebben a frekvenciatartományban fix telepítésű földfelszíni pont-többpont rádiórendszerek üzemeltethetők. A CEPT ajánlással megegyezően a duplex frekvenciatávolság 50 és 100 MHz lehet.

Az előírt pont-többpont rendszereknél a csatornaosztásra vonatkozó szabályok szigorúbbak, a következő csatornaszélességek lehetségesek: 1,75 MHz, 2 MHz, 3,5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 28 MHz és 30 MHz. A kisugárzott teljesítmény nem lépheti túl a 35 dBm értéket (kb. 3 W), a teljesítményszint szabályozás nem kötelező előírás. A szabvány – alkalmazási lehetőségként – hang, fax, adat, ISDN, digitális audio és video átvitteket említ [8].

Az ETSI a 3,5 GHz-es sáv mellett definiál egy 3,7 GHz-es frekvenciasávot is a 3,6-3,8 GHz tartományra. Ennek a sávnak az előírásai teljesen megegyeznek a 3,5 GHz-es sáv előírásaival [8]. Az ETSI mellett a CEPT is rendelkezik erről a frekvencia tartományról, igaz szélesebb sávban: 3,6 GHz-től 4,2 GHz-ig. Az előírásnak megfelelően a sáv elsődlegesen fix helyű és fix-műholdas rádiószolgáltatásokra használható. Mind a pont-pont, mind a pont-többpont rendszerek engedélyezettek. Cellás pont-többpont rendszerek üzemeltetésénél kívánatos a folytonos spektrumkihasználás. A 3,6-4,2 GHz tartományban az egyik lehetőségként 30 (és 15) vagy 40 (és 20) MHz-es csatornákat kell használni 320 MHz-es duplex távolsággal. A másik megoldás szerint a 3,6-3,8 GHz tartományban a 3,4-3,6 GHz-re vonatkozó CEPT előírás érvényes, a 3,8-4,2 GHz-es tartományban pedig 29 MHz-es csatornákat kell használni 213 MHz-es duplex távolsággal [9].

A WiMAX hálózatok szempontjából a legfontosabb, hogy a magyar szabályozás engedélyezi az állandó helyű digitális pont-többpont szélessávú hozzáférési rend-

szerek működését a 3,41-3,494 GHz-es és a 3,51-3,594 GHz-es frekvenciasávokban. Ebben a sávban cellás kialakítású rendszerek telepítése kívánatos. A hatóság döntése szerint frekvenciaelosztás módja: árverés (amely 2001-ben megtörtént). Frekvenciakijelölés ebben a sávban csak frekvenciahasználati jogosultsággal rendelkező részére adható. A végfelhasználói állomást az egyedi engedélyezési kötelezettség alól mentesítették.

A 3,494-3,51 GHz-es és a 3,6-3,8 GHz-es sávok az előbbinek megfelelő jellegű felhasználási szabályozását a hírközlési hatóság egyelőre tervezi. A 3,8-4,2 GHz-es sávban pont-pont közötti digitális és analóg rádióösszeköttetések részére jelölhető ki frekvencia. Analóg rádióösszeköttetésekben újabb berendezésekkel létesített állomás részére nem jelölhető ki frekvencia. Az NHH-nak (Nemzeti Hírközlési Hatóság) a 3,5 GHz-es sávot használó FWA rendszerekre vonatkozó további előírásai az ETSI és CEPT rendelkezésekkel megegyeznek.

Az IEEE 802.16-2004 szabvány lehetővé teszi a 10-10,68 GHz-es engedélyköteles frekvenciasávok használatát is. Az európai szabályozásban erről az ETSI és a CEPT is rendelkezik [8,10]. A CEPT a 10,15-10,3 GHz, 10,5-10,65 GHz frekvenciasáv párt kijelölte fix telepítésű pont-többpont rendszerek számára, illetőleg megszüntette a korábbi 10,5-10,68 GHz-es mobilszolgáltatást. Az ETSI rendelkezései erről a (10,5 GHz-es) frekvenciasávról néhány kivétellel megegyeznek a 3,5 GHz-es előírásokkal [8]. A sávban Magyarországon jelenleg elsődleges jelleggel rádiólokátorok, ezen kívül rádió- és televízió-hírvagy és műsor-átviteli célú rádióösszeköttetések, úrkutatási, műholdas Földkutatási, valamint állandóhelyű és a mozgószolgáltatások részére jelölhető ki frekvencia.

3. Rendszerprofilok

A WiMAX rendszer alkalmazási területét alapvetően két részre oszthatjuk. Ezek közül az egyik a külvárosi és vidéki területek szélessávú vezeték nélküli szolgáltatással való ellátása. Az ilyen területek viszonyaira jellemző, hogy viszonylag kevés a terepakadály. Figyelembe véve a rendszer üzemi frekvenciáját, a távolságokat és ehhez kapcsolódóan a létrejövő csillapítást, a terjedési viszonyok tekintetében az egyutas esetleg a kétutas modell használható. Ilyen esetben, bár a különbség nem jelentős, az átviteli kapacitás tekintetében előnyben vannak az egyvívós szórt spektrumú rendszerek a többvívós megoldásokhoz képest.

A WiMAX másik alkalmazási területe a belvárosi és nagyvárosi területek szélessávú lefedettségének biztosítása. A sűrűn lakott városi környezetben a rádiójel számos akadályba ütközik, reflektálódik, ezért ebben az esetben a jelterjedés leírásához a többutas terjedési modell használható. Az ilyenkor létrejövő fadingek hatását ellensúlyozandó a többvívós technikát alkalmazása célszerű, mivel ezek a rendszerek ekkor jobban teljesítenek. A WiMAX szabvány által előírt többvívós

technológia az OFDM, azaz az ortogonális frekvenciaosztásos multiplexálás.

Az említett feltételeknek megfelelően az IEEE 802.16-2004 szabvány nem egy adott működési módot definiál, hanem különböző rendszerprofilokat határoz meg. A WiMAX eszközök gyártói ezeket a rendszerprofilokat, illetve ezek különböző kombinációit valósíthatják meg az általuk gyártott berendezésekben. Fontos megemlíteni, hogy a szabvány a WiMAX rendszerek fizikai és MAC rétegét írja le, és ennek megfelelően a profilfelosztás mindkét rétegre jellemző. A két profilhalmaz közül először a teljesség igénye nélkül a MAC profilokat mutatjuk be, mellyel az a célunk, hogy röviden felvázoljuk, hogy ezek a profilok mivel egészítik ki a fizikai rétegbeli profilok szolgáltatásait. Egyes fizikai és MAC profilokhoz tartozik RF, sőt némelyiknél teljesítményosztály profil is, amelyekről ugyancsak röviden szólnunk [2].

3.1. MAC, RF és teljesítményosztály profilok

A MAC réteg profilokat alapvetően két csoportra bonthatjuk attól függően, hogy egyvívós vagy többvívós rendszerhez használják azokat. Az egyvívós rendszerekben (WirelessMAN-SC, WirelessMAN-SCa és WirelessHUMAN(-SCa)) két MAC profil létezik, az alap csomag és az alap ATM profil.

SC esetben az alap csomag az előírt feladatok, illetve képességek közé tartoznak például a csomagtördelés, az IPv4 támogatás vagy a QoS osztályok (non-real time polling, best effort) támogatása. Az ATM profilnál ezek a funkciók kiegészülnek például a virtuális áramkörök kezelésével, az ATM fejléctömörítéssel és az ATM cellák és a protokoll adataegységek megfelelő összerendelésével és tördelésével. Az SCa rendszereknél – amelyek ugyancsak egyvívósek, működésüket azonban az NLOS környezethez is igazították – az eddig említettekhez képest további funkciókat építettek be mind az alap csomag, mind az alap ATM profilokhoz. Ezek közül a megnövelt hibakezelési képességet és az automatikus újradás kérését (ARQ) kell megemlíteni.

Többvívós esetekben (WirelessMAN-OFDM, WirelessHUMAN(-OFDM), WirelessMAN-OFDMA és WirelessHUMAN(-OFDMA)) más felosztás van érvényben. Itt pont-többpont (PMP) és Mesh profilok léteznek. A PMP profilt pont-többpont összeköttetésű rendszerekben használják, a Mesh profilt pedig olyan rendszerekben, ahol az előfizetői eszközök nem csak a bázisállomáson keresztül kapcsolódhatnak a hálózathoz, hanem közvetlenül egymással is kommunikálhatnak. OFDM rendszereknél a PMP profil szerint előírt az IPv4 és a QoS osztályok (non-real time polling, best effort), valamint a frekvencia engedélyhez nem kötött sávokban a DFS támogatása. A Mesh profilban a PMP-hez képest lényeges különbség, hogy az ARQ támogatása itt előírás, a QoS osztályok közül azonban csak a best effortot írja elő a szabvány. OFDMA rendszereknél a két említett profil közül csak a PMP használható.

Az egyvívós SCa és a többvívós OFDMA rendszereknél a szabvány teljesítményosztály profilokat is definiál. Az előírásnak megfelelően mindkét esetben négy teljesítményosztály kezelése szükséges. A teljesítményosztályok 17 dBm-től kezdődően vannak kialakítva, és határaik 20 dBm, 23 dBm és 30 dBm-nél vannak megállapítva.

Ahogy korábban is említettük, léteznek RF profilok. Ezeket a szabvány az egyvívós SC kivételével minden rendszerprofilnál definiálja. Az RF profilok minden esetben azt határozzák meg, hogy hogyan kell az adott tartományban a vevőfrekvenciákat elhelyezni.

A MAC, RF és teljesítményosztály profilok rövid áttekintése után áttérünk a fizikai rétegbeli profilok tárgyalására. Elsőként az egyvívós esetekkel foglalkozunk, amelyeket csak kevésbé részletesen vizsgálunk, mivel ezek a jelenlegi gyakorlati alkalmazás szempontjából kisebb jelentőséggel bírnak.

3.2. Fizikai rétegbeli profilok

3.2.1. WirelessMAN-SC

A WirelessMAN-SC fizikai réteg profil a 10-66 GHz közötti frekvencián működő rendszereket írja le. A rugalmas spektrumkihasználás érdekében a szabvány támogatja a TDD és FDD duplexálási módokat. Mindkét esetben olyan adaptív burstformálási eljárást használnak, melynél keretről keretre lehet változtatni az átviteli paramétereket (modulációs és kódolási sémák). FDD esetben támogatják az előfizetői állomások esetleges félduplex képességét. Az uplink fizikai csatorna TDMA hozzáféréseken alapul. A különböző célokra (például regisztráció, felhasználói adatforgalom stb.) felhasznált időrések kiosztását a bázisállomás szabályozza. A downlink csatornában időosztásos multiplexálást (TDM) használnak. A csatorna magában foglal egy átviteli konvergencia alréteget, amelyben randomizációt, hibajavító kódolást (Reed-Solomon kódolás/blokk turbo kódolás, blokk konvolúciós kódolás/paritásellenőrzés) hajtanak végre és szimbólumokat alakítanak ki a QPSK, 16-QAM vagy a 64-QAM modulációkhoz. Az uplink csatornában, amely TDMA burst átvitelt valósít meg, a downlinkhez hasonló műveleteket végeznek. Downlink esetben a 64-QAM, uplink esetben pedig a 16-QAM és a 64-QAM opcionálisak.

A csatornaszélesség (20, 25, 28 MHz) függvényében a szimbólumsebesség 16-224 MBaud között, a bitsebesség pedig a modulációtól is függően 32-134 között változhat. A megengedett bithiba arányt (10^{-3} -os és 10^{-6} -os) a moduláció és a szimbólumsebesség alapján definiálják. A különböző modulációkhoz definiálják a megengedett konstellációs hibavektor (EVM) nagyságát is.

A kimenő teljesítménysűrűség a bázisállomás esetében nem haladhatja meg a +28,5 dBm/MHz (EIRP), az előfizetői terminálnál pedig a +39,5 dBm/MHz (EIRP)-t. A teljesítményszabályozásnak legalább 40 dB-es korrekciót kell tudnia végrehajtani legfeljebb 20 dB/s sebességgel.

3.2.2. WirelessMAN-SCa

A WirelessMAN-SCa fizikai réteget 11 GHz alatti frekvenciasávokra tervezték NLOS átvitelekhez. Ennek megfelelően számos ponton különbözik az SC megoldástól. Olyan keretstruktúrákat használ, amelyek lehetővé teszik a jobb csatornabecslést és -kiegyenlítést megnövekedett késleltetésű, illetve NLOS esetekben. A hibajavításhoz az SC megoldáshoz hasonlóan Reed-Solomon kódokat, de alkalmazzák a TCM-et (trellis kódolt moduláció), és a kódolási láncba opcionálisan egy interleaving blokk is beépíthető.

A turbo kódolásnál a szabvány két lehetőséget is felajánl, választható a BTC (blokk turbo kódolás) és a konvolúciós turbo kódolás (CTC). A Reed-Solomon kódolásnál és a turbo kódolásoknál többféle kódarány is választható és kombinálható. A szabvány lehetőséget biztosít arra is, hogy a hibajavító kódolások helyett az automatikus újraküldés kérést (ARQ) válasszunk. A modulációk közül a BPSK, a spread BPSK (BPSK spektrumszórással), a QPSK, a 16-QAM kötelező, a 64-QAM pedig opcionális.

A duplexálás tekintetében az SC működéshez hasonlóan a TDD és FDD módok is támogatottak, FDD-nél itt is figyelembe veszik az előfizetői terminál esetleges félduplex képességét. Az SC-hez képest továbblépést jelent, hogy az SCa megoldásnál az adaptív antenna rendszerek (AAS) is támogatottak.

A szimbólumsebességet a csatorna sáv szélesség függvényében határozzák meg. A három profilhoz három tartományt definiálnak, melyek között az 1,5 és a 20 MBaud értékek jelentik a határokat. A megengedett bithiba arányt (10^{-3} -os és 10^{-6} -os) a moduláció és a szimbólumsebesség alapján határozzák meg. Az SC esetéhez hasonlóan a különböző modulációkhoz definiálják a megengedett konstellációs hibavektor (EVM) nagyságot, sőt az adó minimális jel-zaj viszony értékét is megszabják, melynek legalább 40 dB-nek kell lennie. Az adóteljesítmény szabályozásának az előfizetői eszköz esetében legalább 30 dB-es, a bázisállomás esetében legalább 20 dB-es korrekciót kell tudnia végrehajtani 1 dB-es lépésközökkel.

Az SCa (az SC megoldással ellentétben) kiegészíthető a WirelessHUMAN profillal. Ez a kiegészítés az 5 GHz-es frekvencia engedélyhez nem kötött sávokban történő működéshez tartalmaz előírásokat. Az előírások a vivőfrekvenciák elhelyezésére és a spektrumalakra vonatkoznak. Mivel a WirelessHUMAN(-SCa) engedélymentes sávban történő működést ír elő, ezért ott a TDD duplexálási mód és a dinamikus frekvenciaválasztás alkalmazása kötelező.

3.2.3. WirelessMAN-OFDM

A jelenlegi gyakorlati alkalmazás szempontjából a legfontosabbak a WirelessMAN-OFDM fizikai réteg. Az OFDM modulációnak köszönhetően a 11 GHz alatti frekvenciatartománybeli

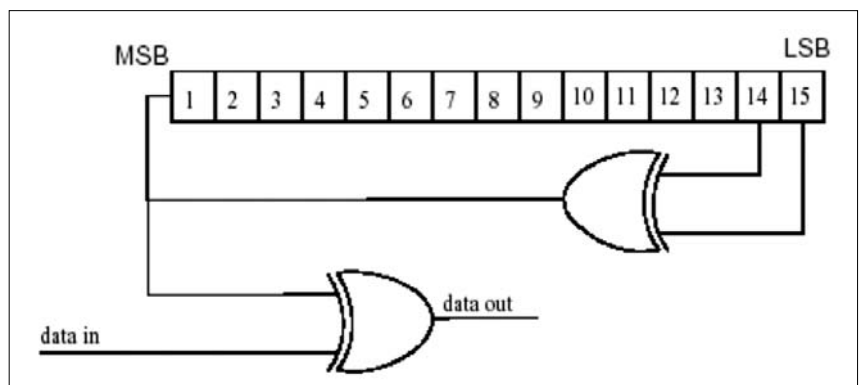
működésre tervezett rendszer jól teljesít NLOS terjedési viszonyok esetén. A WirelessMAN-OFDM rendszerprofil a már említett MAC, RF és teljesítményosztály profilból, a duplexálási technikából, és a most bemutatásra kerülő fizikai réteg profilból áll.

Az OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) moduláció alkalmazásakor OFDM szimbólumokat visznek át a rádiócsatornán, melyeket IFFT transzformációval hoznak létre. A szimbólum kialakításakor (T_s a teljes szimbólum ideje) az IFFT végrehajtása előtt még az időtartományban létrehozunk egy redundáns részt. A hasznos jel (T_b idő) végének egy meghatározott nagyságú részét (T_g) a szimbólum elejére másolják. Ez a rész a ciklikus prefix (CP). A CP nagysága a szabvány szerint a hasznos szimbólumidő $1/4$, $1/8$, $1/16$ vagy $1/32$ -ed része lehet. A megoldás célja, hogy a szimbólumközi áthallás (ISI) hatását csökkentse. Nagyobb méretű CP alkalmazása jobb ISI-védelmet jelent, a nettó adatsebesség azonban kisebb lesz. Ezen kívül az E_b/N_0 arány $10\lg(1-Tg/(Tb+Tg))$ dB csökkenésével kell számolni.

Az időtartománybeli szimbólumkialakítás után 256 pontos IFFT transzformációt hajtanak végre, így 256 alvivő jön létre a frekvenciatartományban. Az alvivők közül 200-at használnak, az alsó 28 (-128, ..., -101) és a felső 27 (101, ..., 127) vivő az alsó és felső védősávhoz tartozik, és a DC alvivőt sem használják. Nyolc alvivőt (88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88) a pilotjelek átvitelére használnak, ami különböző csatornabecslési célokhoz szükséges. A 192 vivő közül nem mindegyiket kötelező felhasználni adatátvitelre. Az alvivők közötti távolságot és a hasznos szimbólumidőt a névleges sáv szélességgel és a felhasznált alvivők számával együtt mintavételi faktor (n) határozza meg. Amennyiben a sáv szélesség 1,75 MHz, 1,5 MHz, 1,25 MHz, 2,75 MHz, 2 MHz többszöröse, úgy az n értéke rendre $8/7$, $86/75$, $144/125$, $316/275$, $57/50$. Egyéb esetekben a mintavételi faktor értéke $8/7$.

A WirelessMAN-OFDM fizikai réteg csatornakódolása három blokkból áll: randomizációból, hibajavító kódolásból és interleavingből (a vételi oldalon fordított sorrendben). A randomizációnál a hasznos adatjel és egy álvéletlen bitsorozat (PRBS) XOR kapcsolatát képezik. A használt PRBS generátor az 1. ábrán látható.

1. ábra PRBS generátor



A generátor inicializálása a keretek kezdetekor fontos művelet, ezt a szabvány pontosan definiálja külön-külön az uplink és downlink esetekre.

A hibajavító kódolást (FEC) végrehajtó blokkban egy külső Reed-Solomon kódoló és egy változtatható sebességű belső konvolúciós kódoló található. Opcionálisan a szabvány engedélyezi a blokk turbo kódolást (BTC) és a konvolúciós turbo kódolást (CTC) is. A Reed-Solomon kódoló szisztematikus RS ($N=255$, $K=239$, $T=8$) kódot használ $GF(2^8)$ Galois-mező felett, ahol N és K a be- és kimenő adatbyte-ok számát, T pedig a javítható adatbyte-ok számát jelöli. A kódgenerátor és mezőgenerátor polinomok a következők:

$$g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{2^T-1}), \lambda = 02_{HEX}$$

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1, \lambda = 02_{HEX}$$

Az RS blokkokat ezután egy bináris konvolúciós kódolóra vezetik, amelynek a kódaránya $1/2$, kódhossza (constraint length) 7 , generátor polinomjai pedig az alábbiak:

$$G_1 = 171_{OCT}$$

$$G_2 = 133_{OCT}$$

A konvolúciós kódoló bitelhagyási (puncturing) sémáit és a két kimenet sorba rendezését a szabvány úgy definiálja, hogy a kívánt teljes kódarányok megfelelően előálljanak. Ezek a teljes kódarányok moduláció típusától függően (BPSK – 64-QAM) $1/2$, $2/3$, $3/4$ értékeket vehetnek fel.

Az opcionális BTC kód két egyszerű komponens kód kétdimenziós, mátrixos formában történő felhasználásából áll, melyek vagy bináris kiterjesztett Hamming kódok, vagy paritás ellenőrző kódok. A kódarányok a moduláció függvényében (QPSK – 64-QAM) $1/2$, $3/4$, $3/5$, $4/5$, $2/3$ és $5/6$ értékeket vehetnek fel, és így a spektrális hatékonyság 1 és 5 bit/s/Hz között változhat.

Az opcionális CTC kódoló egy dupla bináris cirkuláris szisztematikus kódolót és egy belső interleavert tartalmaz. A kódarányok a moduláció függvényében (QPSK – 64-QAM) $1/2$, $2/3$, $3/4$ értékeket vehetnek fel. A szabvány definiálja továbbá a CTC interleavert és cirkulációs állapotokat, valamint a bitelhagyási sémákat.

A hibajavító kódolásnál az utolsó kötelező elem az interleaver, melynek blokkmérete a kódolt bitek és az OFDM szimbólumonként kiosztott csatornák számának (N_{bcps}) függvénye. Az interleaving ebben az esetben tulajdonképpen két lépésben végrehajtott permutáció. Az első lépés biztosítja, hogy a szomszédos bitek nem kerülnek szomszédos alcsatornára. A második lépés azért felelős, hogy a szomszédos kódolt bitek váltakozva kerüljenek a konstelláció szignifikánsabb vagy kevésbé szignifikánsabb bithelyeire, és így hosszú kevésbé megbízható bitsorozatok ne jöhessenek létre. Az első permutációnál egy $12 \times (N_{bcps}/12)$ méretű blokk jön létre, amelyen a második permutáció még egy sorrendcserét hajt végre. Egy blokk mérete így az alcsatornák számától és a modulációtól függően 12 -től 1152 -ig változhat.

A csatornakódolás után a bitsorozat a modulátorra kerül, ahol BPSK, Gray-kódolt QPSK, 16-QAM vagy 64-

QAM modulációt hajtanak végre. Az frekvenciaengedélyhez nem kötött sávokban a 64-QAM moduláció opcionális. A szabvány szerint downlink irányban a per-allocation adaptív moduláció támogatása szükséges, míg uplink irányban előfizetői terminálonként külön-külön támogatni kell a különböző modulációs sémákat a bázisállomástól érkező MAC burst konfigurációs üzeneteknek megfelelően. A pilot alvivő modulációja egy PRBS generátor bitsorozatának megfelelően történik. A generátor polinom ebben az esetben: $x^{11} + x^9 + 1$.

Az előző fizikai réteg típusokhoz hasonlóan a lehetséges duplexálási megoldások itt is definiálva vannak. Az engedélyhez kötött sávokban a szabvány vagy FDD, vagy TDD duplexálási megoldást ír elő. Az SS-ek esetében az FDD-nél lehetséges félduplex működés is. A szabad sávokban a duplexálási technikaként csak a TDD módot lehet használni. Minden egyes TDD keretben a TTG és az RTG védőidőket illesztnek be a downlink és az uplink alkeretek közé, illetve minden egyes frame végére.

A szabvány lehetőséget nyújt adódiversity kialakításához, és (opcióként) tér-idő kódolós (STC) diversity megoldást tartalmaz. Ebben a sémában egy olyan több bemenetű egy kimenetű (MISO) rendszert ír le, amelyben a bázisállomás két adóantennával, az előfizetői terminál pedig egy vevőantennával rendelkezik. Adóoldalon az STC kódolót az IFFT blokk elé helyezik, a vevőoldalon az STC dekóder az FFT blokk után kap helyet.

A megfelelő átvitel biztosításához az eddig említett technikákon kívül szükséges a rádiócsatorna mérése is. Az RSSI (vételi jelerősség) és a CINR (vivő-interferencia-zaj viszony) mérések és a hozzájuk kapcsolódó statisztikák segítik az olyan folyamatokat, mint az adaptív burstprofil választás (az adaptív modulációhoz). A szabvány ezért kötelezően előírja az RSSI és CINR mérésének és a statisztikák vezetésének (átlagérték, szórás) implementációját. Az RSSI mérése az OFDM downlink burst-ök bevezetőjeleinek (preamble) alapján történik, és nem igényli a demoduláció felfüggesztését. Az RSSI mérése a -40 dBm – -123 dBm tartományban működik 1 dB-es lépésekben. A mérés relatív pontossága 2 dB, az abszolút pontossága pedig 4 dB. A CINR mérése implementáció specifikus, de a mérés során minden esetben fel kell függeszteni a demodulációt. Az CINR mérése a -10 dB – 53 dBm tartományban lehetséges 1 dB-es lépésközökkel. A mérés relatív pontossága 1 dB, az abszolút pontossága pedig 2 dB.

A rendszerkövetelményekkel kapcsolatban a szabvány külön tárgyalja az adó- és a vevőoldal előírásait. Az adóoldali követelmények közül először a teljesítményszabályozást kell megemlíteni. Egy alcsatorna felosztást nem támogató előfizetői esetében az adónak minimum 30 dB egyenletes teljesítményszint szabályozást kell biztosítania. Egy alcsatorna felosztást is támogató előfizetői terminálnál ez az érték 50 dB. A lépésköz minimális értéke az előírás szerint 1 dB, míg a pontosság a 30 dB értéket meg nem haladó lépésközök esetében $\pm 1,5$ dB, a 30 dB-nél nagyobb lépésközöknél

± 3 dB. A bázisállomás esetében az adónak minimum 10 dB egyenletes teljesítményszint szabályozást kell biztosítania. A szabvány az OFDM jel spektrumának simaságára is tesz előírást: a -50 – -1 és 1–50 alvivő tartományokban a 200 alvivőre vetített átlag alapján az eltérés ± 2 dB lehet, míg a -100 – -50 és 50–100 alvivő tartományokban ez az eltérés +2 – -4 értéket vehet fel. Az adó konstellációs hibájára ugyancsak megkötések vannak a moduláció és a kódolási arány függvényében. Ez az érték -13 dB-tól -31 dB-ig változhat a BPSK(1/2) – 64QAM(3/4) feltételeknek megfelelően. Végül a vivőfrekvenciákkal kapcsolatban meg kell még említeni, hogy a lehetséges sáv szélesség értékeknek a szabályozás szerint előírt sáv szélességgel (ez az európai és a magyar szabályozás szerint 14 MHz) vagy annak 2 hatványai szerinti tört részével (1/2, 1/4 stb.) kell megegyezni, és minimális értékük 1,25 MHz lehet. A MHz-ben vett tört frekvenciaérték esetén a 250 kHz legközelebbi többszörösére kell lefelé kerekíteni. Attól függően, hogy ez páratlan vagy páros többszörös-e, a vivőfrekvenciákra további megkötések vannak.

A vevőoldali követelmények közül az egyik legfontosabb a paraméter a vevőérzékenység. Ennek tekintetében a 10^{-6} -nál kisebb BER biztosításához legalább az alábbi érték teljesítése szükséges:

$$-102 + SNR_{Rx} + 10 \cdot \log \left(F_s \cdot \frac{N_{used}}{N_{FFT}} \cdot \frac{N_{subchannels}}{16} \right),$$

ahol az SNR_{Rx} értékek a modulációnak és a kódolásnak megfelelően rendre a következők: BPSK(1/2): 6,4 dB; QPSK(1/2): 9,4 dB; QPSK(3/4): 11,2 dB; 16-QAM(1/2): 16,4 dB;

16-QAM(3/4): 18,2 dB; 64-QAM(2/3): 22,7 dB; 64-QAM(3/4): 24,4 dB. Az F_s a mintavételi frekvencia MHz-ben, N_{used} a használt alvivők száma, N_{FFT} az FFT (illetőleg IFFT) transzformáció pontszáma, $N_{subchannels}$ pedig az alcsatornák száma. Emellett a szomszédcsatornás interferencia C/I értéke 16-QAM(3/4) moduláció esetén -11 dB, 64-QAM(3/4) moduláció esetén -4 dB. A nem szomszédos csatornás elnyomás értéke ilyen feltételek mellett -30 dB, illetve -23 dB. A legnagyobb még dekódolható jel teljesítménye -30 dB, és a vevőbe érkező fizikai károsodást még nem okozó jel szintje 0 dB.

Az előírt feltételek mellett számos fizikai WirelessMAN-OFDM és WirelessHUMAN(-OFDM) profil alkítható ki. A lehetséges profilokat a 2. táblázat foglalja össze. A táblázat tartalmazza a MAC rétegbeli profilokat is, amelyekkel az OFDM technológiát használó fizikai rétegbeli profilok együttműködnek. A felsoroltakon kívül az egyes profilok még abban különböznek egymástól, hogy a különböző modulációknál a 10-6 BER értékhez milyen jelszint tartozik.

3.2.4. WirelessMAN-OFDMA

A WirelessMAN-OFDM mellett nagy jelentőséggel bír még WirelessMAN-OFDMA fizikai réteg. A jelenlegi

2. táblázat WirelessMAN-OFDM és WirelessHUMAN (-OFDM) profilok

Azonosító	Profilnév	Jellemzők
profM3_PMP	WirelessMAN-OFDM pont-többpont MAC profil	Pont-többpont működés; kötelező QoS: BE és NRT; DFS: szabad sávban kötelező
profM3_Mesh	WirelessMAN-OFDM Mesh MAC profil	Mesh működés; kötelező QoS: BE; DFS: szabad sávban kötelező
profP3_1.75	WirelessMAN-OFDM 1.75 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 1,75 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} keretek
profP3_3.5	WirelessMAN-OFDM 3.5 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 3,5 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{1} keretek
profP3_7	WirelessMAN-OFDM 7 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 7 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{1} keretek
profP3_3	WirelessMAN-OFDM 3 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 3 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{4} keretek
profP3_5.5	WirelessMAN-OFDM 5.5 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 5,5 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{4} keretek
profP3_10	WirelessHUMAN(-OFDM) 10 MHz fizikai profil	Csak szabad sávban használható; sáv szélesség 10 MHz; PMP{2,4,6} Mesh{4} keretek; TDD kötelező; DFS kötelező

WiMAX eszközöknél ez technológia még nincs implementálva, a gyártók legkorábban 2005 harmadik negyedévére ígérnek. Ezt a fizikai réteget a 11 GHz alatti frekvenciatartománybeli működésre tervezték úgy, hogy jól teljesítsen NLOS terjedési viszonyok esetén is (OFDM). A WirelessMAN-OFDMA rendszerprofil a már említett MAC, RF és teljesítményosztály profilból és a fizikai réteg profilból áll.

Az OFDMA esetében a szimbólumkialakítás módja megegyezik az WirelessMAN-OFDM-nél tárgyalttal. A hasznos és redundáns részekre, valamint a CP-re vonatkozó időtartománybeli leírás szintén azonos. Az időtartománybeli szimbólumkialakítás után IFFT transzformációt hajtanak végre, melynek pontszáma (N_{FFT}) attól függ, hogy hány alvivőt (N_{used}) használnak. N_{FFT} a szabvány definíciója szerint 2-nek az a legkisebb hatványa, amely N_{used} értékétől nagyobb.

Nem mindegyik alvivőt használják adatátvitelre, vannak közöttük a csatornabecsléshez használt pilot vivők, adatot nem forgalmazó (inaktív), a védősávhoz tartozó vivők és a DC vivő. Az aktív alvivőket részhalmozokra bontják, amelyeket részcsatornának neveznek. Downlink irányban a részcsatornákat különböző vevőkhoz (vagy vevő csoportokhoz) rendelik, uplink irányban pedig egy adóhoz csak egy vagy néhány alcsatornát rendelnek, így több adó is tud működni egyidejűleg. Egy alcsatornát alkotó alvivők nem feltétlenül szomszédosak. Az OFDM szimbólumokat is felosztják alcsator-

nákra – melyeket logikai alcsatornáknak neveznek –, a rendszer így biztosítani tudja a skálázhatóságot, a többszörös hozzáférés és az összetett antennák kezelésének képességét. Az alvivők közötti távolságot és a hasznos szimbólumidőt a névleges sáv szélességgel és a felhasznált alvivők számával (N_{used}) együtt mintavételeli faktor (n) határozza meg. Az n értékét minden esetben 8/7-re határozták meg.

Az OFDMA PHY esetében úgynevezett réseket (slot) definiálnak, melyeket idő és alcsatorna dimenzió is jellemmez. Az OFDMA slot definíciója a szimbólumstruktúrától függ, amely eltérő uplinkre és downlinkre, részleges (PUSC, csak néhány alcsatorna hozzárendelése egy adóhoz) és teljes (FUSC, minden alcsatorna hozzárendelése az adóhoz) alcsatorna használat esetén, valamint elosztott és szomszédos alcsatorna permutációk esetén. Downlink FUSC elosztott alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát jelent OFDMA szimbólumként. Downlink PUSC elosztott alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát két OFDMA szimbólumként jelent. Uplink PUSC elosztott alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát három OFDMA szimbólumként jelent. Szomszédos alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát jelent OFDMA szimbólumként uplinknél és downlinknél is. Az alcsatorna kiosztása teljes és részleges alcsatorna használat esetén különbözőképpen történik. FUSC downlink esetben először a pilot vivőket jelölik ki, majd a megma-

3. táblázat WirelessMAN-OFDMA és WirelessHUMAN (-OFDMA) profilok

Azonosító	Profilnév	Jellemzők
OFDMA_profM1	WirelessMAN-OFDMA pont-többpont MAC profil	Kötelező QoS: BE és NRT; DFS: szabad sávban kötelező
OFDMA_profP1	WirelessMAN-OFDMA 1,25 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban; csak UL; sáv szélesség 1,25 MHz; 64QAM nem támogatott; {4,7} kerettípus
OFDMA_profP2	WirelessMAN-OFDMA 3,5 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 3,5 MHz; {4,7} kerettípus
OFDMA_profP3	WirelessMAN-OFDMA 7 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 7 MHz; {2,3,5} kerettípus
OFDMA_profP4	WirelessMAN-OFDMA 8,75 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban; csak UL; sáv szélesség 8,75 MHz; {2,4,6,8} kerettípus; spektrum maszk: helyi szabályozás
OFDMA_profP5	WirelessMAN-OFDMA 14 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 14 MHz; {2,3,5} kerettípus
OFDMA_profP6	WirelessMAN-OFDMA 17,5 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban; csak UL; sáv szélesség 17,5 MHz; {2,4,6,8} kerettípus; spektrum maszk: helyi szabályozás
OFDMA_profP7	WirelessMAN-OFDMA 28 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sáv szélesség 28 MHz; {2,3,5} kerettípus
OFDMA_profP8	WirelessHUMAN(-OFDMA) 10 MHz fizikai profil	Csak szabad sávban használható; csak UL; sáv szélesség 10 MHz; {2,4,5} kerettípus
OFDMA_profP9	WirelessHUMAN(-OFDMA) 20 MHz fizikai profil	Csak szabad sávban használható; csak UL; sáv szélesség 20 MHz; {2,4,5} kerettípus

radó vivőket csoportosítják alcsatornába. PUSC downlink és uplink esetben az alvivőket alcsatornába csoportosítják, és minden egyes alcsatornába beillesztenek pilot vivőket is. Ennek következtében teljes alcsatorna használatnál közös pilot halmazt használnak, részleges alcsatorna használatnál pedig minden alcsatornának saját pilot vivői vannak. Az alcsatorna kiosztás leírásához a szabvány három fogalmat definiál. Az adatrégió egy kétdimenziós megjelölés, amely olyan folytonos alcsatornák egy csoportja, amelyeket egy folytonos OFDMA szimbólumcsoport tartalmaz. A szabvány definiálja a szegmens fogalmát is, amely a hozzáférhető OFDMA alcsatornák halmazának egy részletét (lehet az összes is) jelenti. A szegmens MAC műveletek támogatásához is használható.

A permutációs zóna olyan folytonos OFDMA szimbólumok halmazát jelenti (uplink és downlink esetben is), amelyek ugyanazt a permutációs formulát használják. Az uplink és downlink alkeretek tartalmazhatnak több ilyen permutációs zónát is. Az alvivő kiosztásnál az itt definiált fogalmak közül először a downlink átvitelnél találkozunk. Ebben az esetben ugyanis először egy bevezetőjel (preamble) átvitele történik, melynél az alvivőket három szegmensre osztják. A preamble időtartama alatt álvéletlen adatsorozatokot visznek át, melyek szegmensenként különböznek.

A bevezetőjel utáni adatszimbólumok továbbításakor csatornakiosztás eltérő PUSC és FUSC esetekben. PUSC átvitelnél 2048 alvivőből 183-at, illetve 184-et használnak fel az alsó és felső védősávok kialakításához, 1 pedig a DC alvivő. A megmaradó 1680 vivőt 120 clusterre osztják fel, amelyek egyenként 14 vivőt tartalmaznak. Ezek használhatók a pilot- és adatjel átvitelére.

A szabvány pontosan előírja a lehetséges szegmens és permutációs zóna felosztásokat is. FUSC esetben a 2048 vivőből 173-at, illetve 172-t használnak fel az alsó és felső védősávok kialakításához, 1 pedig a DC alvivő. Az 1702 hasznos vivőből 2x71 darabot használnak fel a változó 2x12 darabot pedig a fix helyű pilotjelek átviteléhez. Így 1536 adatvivő marad, melyeket 32 alcsatornába sorolnak csatornánként 48 alvivővel. Az uplink átvitel alcsatorna felosztása védősáv (és DC) szempontból megegyezik a downlink PUSC esettel. Az 1680 alvivőt itt 70 alcsatornába sorolják alcsatornánként 48, illetve szimbólumonként 24 vivővel. A szabvány opcionálisan lehetőséget nyújt az adaptív antenna rendszerek (AAS) támogatásához is. AAS esetén az eddig bemutatott alcsatorna felosztáshoz képest fontos különbség, hogy nem elosztott, hanem szomszédos kiosztás van érvényben. A 2048 vivő között 1 DC, 160, illetve 159 védősávi alvivő található. Az 1728 vivőből 192 szolgál a pilotjelek átvitelére. A maradék 1536 alvivőt 32 alcsatornára bonják alcsatornánként 48 vivővel.

A WirelessMAN-OFDMA fizikai réteg csatornakódolása az WirelessMAN-OFDMA-hoz hasonlóan három blokkból áll: randomizációból, hibajavító kódolásból és interleavingből. A randomizációnál a hasznos adatjel és

egy álvéletlen bitsorozat (PRBS) XOR kapcsolatát képezik. A használt PRBS generátort jellemző polinom: $x^{11} + x^9 + 1$.

A hibajavító kódolást (FEC) végrehajtó blokkban a szabvány konvolúciós kódoló használatát írja elő. Opcionálisan a szabvány engedélyezi a blokk turbo kódolást (BTC), a konvolúciós turbo kódolást (CTC) és a nullvégű (zero tailed) konvolúciós kódolást is. A kódolási blokkméret a használt alcsatornák számától és a modulációtól függ. A kötelezően előírt konvolúciós kódolóra kódaránya 1/2, kódhossza (constraint length) 7, generátor polinomjai pedig az alábbiak:

$$G_1 = 171_{OCT}$$

$$G_2 = 171_{OCT}$$

A konvolúciós kódoló bitelhagyási (puncturing) sémáit és a két kimenet sorba rendezését a szabvány úgy definiálja, hogy a kívánt teljes kódarányok megfelelően előálljanak. Ezek a teljes kódarányok modulációtípustól függően (BPSK – 64-QAM) 1/2, 2/3, 3/4 értékeket vehetnek fel.

Az opcionális BTC kód két egyszerű komponens kód kétdimenziós, mátrixos formában történő felhasználásából áll, melyek vagy bináris kiterjesztett Hamming kódok, vagy paritás ellenőrző kódok. A kódarányok a moduláció függvényében (QPSK – 64-QAM) 1/2, 3/4, 3/5, 4/5, 2/3 és 5/6 értékeket vehetnek fel.

Az opcionális CTC kódoló egy dupla bináris cirkuláris szisztematikus kódolót és egy belső interleavert tartalmaz. A kódarányok a moduláció függvényében (QPSK – 64-QAM) 1/2, 2/3, 3/4 értékeket vehetnek fel. A szabvány definiálja továbbá a CTC interleavert és cirkulációs állapotokat, valamint a bitelhagyási sémákat. A CTC kódolót úgy tervezték, hogy támogassa a hibrid automatikus újraadás kérés mechanizmust (HARQ), melynek implementációja ugyancsak opcionális. HARQ alkalmazása esetén a szabvány eltérő randomizációt definiál, az interleaving blokkot pedig kiveszi a rendszerből. Ebben az esetben egy új elem a CRC kódoló, amely 16 bites CRC16-CCITT kódolást valósít meg a HARQ kéréshez szükséges hibadetektáláshoz.

Opcióként az alap konvolúciós kódoló alkalmazhatja a nullvégű technikát is. Ebben az esetben a randomizáció után minden burst végéhez egy 0x00 záróbyte-t illesztnek. A konvolúciós kódolást és a bitelhagyást a teljes burst-ön végzik anélkül, hogy blokkokra bontanák.

A hibajavító kódolásnál az utolsó kötelező elem az interleaver, melynek blokkmérete a konvolúciós kódolóból érkező blokkonkénti bitek számának (N_{bcps}) függvénye. Az interleaving egy két lépésben végrehajtott permutáció. Az első lépés biztosítja, hogy a szomszédos bitek nem kerülnek szomszédos alvivőkre. A második lépés azért felelős, hogy a szomszédos kódolt bitek váltakozva kerüljenek a konstelláció szignifikánsabb vagy kevésbé szignifikánsabb bithelyeire, és így hosszú kevésbé megbízható bitsorozatok ne jöhessenek létre. Az első permutációnál egy $16 \times (N_{bcps}/16)$ méretű blokk jön létre, amelyen a második permutáció még egy sorrendcserét hajt végre.

A csatornakódolás után a bitsorozat a modulátorra kerül, ahol Gray-kódolt QPSK, 16-QAM vagy 64-QAM modulációt hajtanak végre. A 64-QAM moduláció megléte opcionális. A szabvány szerint downlink irányban a per-allocation adaptív moduláció támogatása szükséges, míg uplink irányban előfizetői terminálonként külön-külön támogatni kell a különböző modulációs sémákat a bázisállomástól érkező MAC burst konfigurációs üzeneteknek megfelelően. A pilot alvivő modulációja egy PRBS generátor bitsorozatának megfelelően történik. A generátor polinom ebben az esetben: $x^{11}+x^9+1$.

A WirelessMAN-OFDM-hez hasonlóan a lehetséges duplexálási megoldások itt is definiálva vannak. Az engedélyhez kötött sávokban a szabvány vagy FDD, vagy TDD duplexálási megoldást ír elő. Az SS-ek esetében az FDD-nél lehetséges félduplex működés is. A frekvenciaengedélyt nem igénylő sávokban a duplexálási technikaként csak a TDD módot lehet használni. Minden egyes TDD keretben a TTG és az RTG védőidőket illesztnek be a downlink és az uplink alkeretek közé, illetve minden egyes keret végére azért, hogy az adásvételi átkapcsolásokhoz legyen elegendő idő.

A WirelessMAN-OFDMA PHY lehetőséget nyújt adódiversity kialakításához. Lehetséges a tér-idő kódolásos (STC) vagy a frekvenciaugratásos diversity kódolásos (FHDC) megoldás alkalmazása. Ebben a sémában egy olyan több bemenetű egy kimenetű (MISO) rendszert ír le, amelyben a bázisállomás kettő vagy négy adóantennával, az előfizetői terminál pedig egy vevőantennával rendelkezik. Adóoldalon az STC kódolót az IFFT blokk elé helyezik, a vevőoldalon az STC dekóder az FFT blokk után kap helyet. Az alcsatornák, a szegmensek és permutációs zónák kiosztása az eddiektől eltérő, és attól is függ, hogy 2 vagy 4 adóantennát használnak-e, illetve hogy downlink PUSC, FUSC, vagy uplink átvitel zajlik-e.

A megfelelő átvitelhez az OFDMA PHY esetében is szükséges a rádiócsatorna mérése. Az RSSI-re és a CINR-re vonatkozó előírások megegyeznek a WirelessMAN-OFDM fizikai rétegnél tárgyaltakkal.

Az előzőekhez hasonlóan a szabvány külön tárgyalja az adó- és a vevőoldali előírásokat. Az adóoldali követelmények közül először a teljesítményszabályozást kell megemlíteni. Az adónak frekvenciaengedélyhez kötött sávokban minimum 45 dB, szabad sávokban minimum 30 dB egyenletes teljesítményszint szabályozást kell biztosítani. A lépésköz minimális értéke az előírás szerint 1 dB, míg a relatív pontossága $\pm 0,5$ dB.

A szabvány az OFDMA jel spektrumának simaságára is tesz előírást: a $-N_{used}/4 - 1$ és $1 - N_{used}/4$ alvivő tartományokban az $N_{used}/4$ számú aktív alvivőre vetített átlag alapján az eltérés dB lehet, míg a $-N_{used}/2 - N_{used}/4$ és $N_{used}/4 - N_{used}/2$ alvivő tartományokban ez az eltérés $+2 - -4$ értéket vehet fel. Az adó konstellációs hibájára ugyancsak megkötések vannak a moduláció és a kódolási arány függvényében. Ez az érték 16,4 dB-től 31,4 dB-ig változhat a QPSK(1/2) – 64QAM(3/4) feltételeknek megfelelően. Végül a vivőfrekvenciákkal kapcsolatban meg kell még említeni, hogy a lehetsé-

ges sávszélesség értékeknek a szabályozás szerint előírt sávszélességgel (ez az európai és a magyar szabályozás szerint 14 MHz) vagy annak 2 hatványai szerinti tört részével (1/2, 1/4 stb.) kell megegyezni, és minimális értékük 1 MHz lehet.

A vevőoldali követelmények közül az egyik legfontosabb a paraméter a vevőérzékenység. Ennek tekintetében a 10^{-6} -nál kisebb BER biztosításához ez az érték, amelyet a szabvány egy táblázatban definiál, -65 dBm és -91 dBm között változhat a moduláció, a kódolási arány, és a sávszélesség függvényében. Emellett a szomszédcsatornás interferencia C/I értéke 16-QAM (3/4) moduláció esetén 11 dB, 64-QAM(3/4) moduláció esetén 4 dB. A nem szomszédos csatornás elnyomás értéke ilyen feltételek mellett 30 dB, illetve 23 dB. A legnagyobb még dekódolható jel teljesítménye -30 dB, és a vevőbe érkező fizikai károsodást még nem okozó jel szintje 0 dB.

A WirelessMAN-OFDMA és WirelessHUMAN(-OFDMA) fizikai réteg specifikációjához tartozó profilok és azok fontosabb jellemzői a 3. táblázatban láthatók.

A táblázat tartalmazza a MAC rétegbeli profilt is, amellyel az OFDMA technológiát használó fizikai rétegbeli profilok együttműködnek. A felsoroltakon kívül az egyes profilok még abban különböznek egymástól, hogy a különböző modulációknál a 10^{-6} BER értékhez milyen jelszint tartozik.

4. Összefoglalás

A WiMAX hálózatok és maga a szabvány is jelenleg is fejlesztés és kidolgozás alatt áll. A szabvány legfrissebb már elkészült verziója az IEEE 802.16-2004. A piacon hozzáférhető WiMAX berendezésekben azonban jelenleg ezt a szabványt csak részben valósítják meg, és a készülékek egy korábbi verzióval (IEEE 802.16a) kompatibilisek részben vagy egészen.

Mivel a WiMAX Forum célja egy világon mindenütt elfogadott rendszer bevezetése, ezért a szabványosításon kívül egyéb kiegészítő folyamatokat is támogatnia kell. Ennek az a közvetett oka, hogy a szabvány számos működési módot és lehetőséget definiál, amelyek között vannak kötelező érvényűek és opcionálisak is. Nyilvánvaló, hogy ha csak a kötelező érvényű előírásokat tartjuk be, akkor számos plusz lehetőségtől el-esünk. Amennyiben azt szeretnénk, hogy a különböző opciók ellenére a különböző gyártók által készített berendezések együtt tudjanak működni, szükség van együttműködési tesztek elvégzésére is. Az együttműködési teszteken sikeresen szerepelt eszközök megkapják WiMAX Certified tanúsítványt, amely biztosítja, hogy az adott berendezés bármely más ilyen tanúsítvánnyal rendelkező készülékkel együtt tud működni. Az együttműködési tesztek kezdetének tervezett időpontja 2005 júliusa.

Az WiMAX eszközök együttműködésén kívül a másik jövőbe mutató kérdés a mobilitás kérdése. Az ide kapcsolódó szabványrész az IEEE 802.16e megjelölésű.

lést viseli. Amint már említettük ez jelenleg is fejlesztés alatt áll és csak draft verziója létezik. Az előrejelzések szerint a szabvány elkészültével a mobil WiMAX rendszerek megjelenése 2008-ra várható.

Végezetül meg kell említenünk a további hatósági szabályozási kérdéseket is. Ezek közül néhányat kiemelnénk ki. Az egyik hogy a 3,5 GHz-es sáv Magyarországon jelenleg nem használható backhaul (pont-pont) alkalmazásokhoz, és csak az FDD duplexálási mód alkalmazása engedélyezett. Az ide vonatkozó szabályok enyhítése kiterjesztené a WiMAX lehetséges alkalmazási területeit és módjait.

Az 5,8 GHz-es frekvenciaengedélyhez nem kötött sáv WiMAX felhasználásra jelenleg nem alkalmas, mert egyrészt itt katonai alkalmazások is működnek, másrészt csak pont-pont kommunikáció lehetséges. A szabályozás megváltoztatása hatóság részéről ugyancsak megfontolandó. Végül meg kell még említenünk, hogy a mobilitás kérdése szabályozási szempontból nem megoldott, a 3,5 GHz-es sávban csak rögzített helyű és hordozható alkalmazások használhatók. A felvetett problémák reményeink szerint a közeljövőben megoldódnak, és így a WiMAX rendszerek széleskörű alkalmazására nyílik majd lehetőség.

Irodalom

- [1] IEEE 802.16-2004:
IEEE Szabvány helyi és nagyvárosi hálózatokhoz 16. rész: Rádiós interfész rögzített helyű szélessávú vezeték nélküli hozzáférési rendszerekhez
- [2] CEPT/ERC 70-03 ajánlás:
Rövid hatótávolságú eszközök (SRD) használata
- [3] ETSI ETS 300 836-1:
Szélessávú rádiós hozzáférési hálózatok (BRAN); Nagy teljesítményű rádiós helyi hálózat (HIPERLAN) 1. típusa; Konformációs tesztek specifikációja; 1. rész: rádiós típushitelesítés és rádiófrekvenciás (RF) konformációs teszt specifikáció
- [4] ETSI TS 101 475 v1.1.1 (2000-4):
Szélessávú rádiós hozzáférési hálózatok; 2. típusú HIPERLAN; Fizikai réteg
- [5] ETSI EN 300 674-1 v1.2.1 (2004-08):
Elektromágneses kompatibilitás és a rádióspektrum kérdései; A közúti szállítás és forgalmi telematika; Az 5,8 GHz-es ISM sávban működő dedikált kis hatótávolságú kommunikáció eszközei (500 kbit/s / 250 kbit/s); 1. rész: Általános jellemzők és teszt módszerek a közúti (RSU) és fedélzeti (OBU) eszközökhöz
- [6] CEPT/ERC 14-03 ajánlás:
Harmonizált rádiófrekvenciás csatornaelrendezések és blokk kiosztások kis és közepes kapacitású rendszerekhez a 3400–3600 MHz frekvenciasávban
- [7] ETSI EN 301 021 v1.4.1 (2001/03):
Fix telepítésű rádiórendszerek; Pont-többpont eszközök; Időosztásos többszörös hozzáférés (TDMA); A 3-11 GHz frekvenciatartományban működő pont-többpont digitális rádiórendszerek

- [8] CEPT/ERC 12-08 ajánlás:
Harmonizált rádiófrekvenciás csatornaelrendezések és blokk kiosztások kis, közepes és nagy kapacitású rendszerekhez a 3600–4200 MHz frekvenciasávban
- [9] CEPT/ERC 12-05ajánlás:
Harmonizált rádiófrekvenciás csatornaelrendezések a 10,0–10,68 GHz frekvenciasávban működő földfelszíni rögzített helyű digitális rendszerekhez
- [10] 346/2004. (XII. 22.) Kormányrendelet a frekvenciasávok nemzeti felosztásának megállapításáról
- [11] Az inform. és hírközlési miniszter 35/2004. (XII. 28.) IHM rendelete a frekvenciasávok felhasználási szabályainak megállapításáról

