

# **híradástechnika**

**1945 VOLUME LX. 2005**

## **hírközlés ■ informatika**



### **Szélessávú vezeték nélküli hozzáférés**

**A WiMAX legfontosabb alkalmazásai**

**Az IEEE 802.16-os szabványcsalád áttekintése**

**A hatósági szabályozás kérdései**

# **2005/8**

**A Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület folyóirata  
a Nemzeti Hírközlési és Informatikai Tanács együttműködésével**

# Tartalom

<i>SZÉLESSÁVÚ VEZETÉKNÉLKÜLI HOZZÁFÉRÉSI HÁLÓZATOK – WIMAX-RENDSZEREK</i>	1
<b>Szabó Sándor</b>	
A WiMAX-rendszerek alkalmazási lehetőségei	2
<b>Gódor Győző, Szalay Máté, Imre Sándor</b>	
Az IEEE 802.16 szabvány áttekintése	8
<b>Németh Zoltán</b>	
Az IEEE 802.16 szabvány fizikai rétege	12
<b>Szalay Máté, Gódor Győző, Imre Sándor</b>	
Az IEEE 802.16 szabvány közeghozzáférési (MAC) rétege	23
<b>Grád János</b>	
Hatósági szabályozás szélessávú vezeték nélküli rendszerekre	30
<i>Tájékoztató a Híradástechnika szerzőinek</i>	35
<b>Erdei Márk, Wagner Margit Katalin</b>	
Szoftverrádió-rendszerek – új trendek	36
<b>Buchholcz Gergő, Thomas Ziegler, Do Van Tien</b>	
TCP-ELN: hatékony kommunikáció rádiós csatornák felett	40
<b>Sipos László</b>	
Albert Einstein intelmei	46

*Címlap: WIMAX kültéri egység a CREATE-NET kutatóközpontban (Trento, Olaszország)*

---

## Védnökök

SALLAI GYULA a HTE elnöke és DETREKŐI ÁKOS az NHIT elnöke

---

## Főszerkesztő

SZABÓ CSABA ATTILA

## Szerkesztőbizottság

Elnök: ZOMBORY LÁSZLÓ

BARTOLITS ISTVÁN  
BÁRSONY ISTVÁN  
BUTTYÁN LEVENTE  
GYÓRI ERZSÉBET

IMRE SÁNDOR  
KÁNTOR CSABA  
LOIS LÁSZLÓ  
NÉMETH GÉZA  
PAKSY GÉZA

PRAZSÁK GERGŐ  
TÉTÉNYI ISTVÁN  
VESZELY GYULA  
VONDERVISZT LAJOS

# Szélessávú vezeték nélküli hozzáférési hálózatok – WiMAX-rendszerek

imre@hit.bme.hu  
szabo@hit.bme.hu

Napjainkban három nagy terület, az informatika a távközlés és a média konvergenciáját éljük, mely elsősorban a gerinchálózat és a tartalom-kezelés egységesítésében nyilvánul meg. A hozzáférési hálózatok terén azonban továbbra is meglehetősen sokféle technológia versenyez egymással, melyek közül egyesek fokozatosan kihalnak, miközben újak születnek.

A kérdés ma már nem annyira az, hogy melyik technológia lesz a „győztes”, hanem sokkal inkább az, hogy képesek vagyunk-e olyan rendszereket alkotni, melyek a rendelkezésre álló különféle hozzáférési technológiákból mindig a szempontjainknak (ár, QoS, átviteli sebesség stb.) leginkább megfelelőt képesek biztosítani. Létfontosságú tehát, hogy a vezeték nélküli (fix és mobil egyaránt) környezetben többféle, különböző igényeket kielégítő szélessávú hozzáférési technológia is elérhető legyen.

Napjainkban a hozzáférés körülbelül fele-fele arányban fix szélessávú (xDSL és CATV), illetve dial-up, a fixen belül a WiFi (WLAN) aránya 8%. Egyes előrejelzések szerint rövidesen a fix hozzáférés és ezen belül a vezeték nélküli megoldások fognak dominálni, a várhatóan kb. 70%-nyi fixen belül 40% lesz a WiFi és 8% lesz a WiMAX! (Forrás: Intel Developers Forum, San Francisco, 2004. szeptember 7.)

A szabványosítási műhelyekből legfrissebben a színpadra lépett rendszer az IEEE 802.16-ra épülő WiMAX, mely az eredeti WMAN koncepciót túllépve ma már komoly eséllyel indulhat a WLAN-ok között is, sőt bizonyos mértékig a földi cellás rendszerek alternatívája is lehet. Számunk tematikus részében ezt a rendszert szeretnénk megismertetni az olvasóval.

A WiMAX nem egyszerűen a WiFi „turbó”-változata, bár valóban lényegesen nagyobb hatótávolság (~100 m helyett néhány 10 km), és adatsebesség (10 Mbit/s helyett max. 70 Mbit/s) jellemzi. Alapvetően más alkalmazási környezetre van szánva, ezt hangsúlyozza a

MAN – „metropolitan area” elnevezés, amely természetesen nemcsak nagyvárost, hanem primér körzetet, régiót, vagy más, hasonló méretű távközlési körzetet, vagy adminisztratív területet jelenthet. Rugalmas topológiák alakíthatók ki (nemcsak pont-multipont), és az alkalmazott fejlett modulációs és jelfeldolgozási technikák következtében a fix rádiós mikrohullámú rendszereknél szokásos optikai rálátásra sincs szükség. A nagyvárosi területen a WiMAX a meglévő gerinc- és szétosztó hálózatok alternatívája.

Először a WiMAX potenciális alkalmazási lehetőségeit vesszük sorra, mintegy bemutatva a rendszer mögött rejlő motivációkat. Ezt követi a WiMAX szabványosításával kapcsolatos információkat összefoglaló áttekintés. A WiMAX működését két részletben mutatjuk be. Először a korszerű OFDM-alapú rádiós fizikai réteg kerül terítékre, majd a közeghozzáférési és biztonsági kérdésekkel ismerkedhet meg az olvasó. Azonban a legjobb műszaki megoldások is hiábavalónak bizonyulhatnak, ha nincsenek összhangban a hazai, illetve a nemzetközi szabályozási törekvésekkel, ezért a tematikus rész befejező cikke ezekre a kérdésekre koncentrálna.

Számunk új tudományos eredményeket bemutató második részében két érdekes és egyben korszerű cikket olvashat az olvasó. Mindkettő tehetséges doktoranduszok tollából született. Az első a heterogén mobil rendszerek együttműködését támogató szoftverrádiós rendszerek új trendjeit foglalja össze, míg a másik a hazánkban idén nyáron Visegrádon rendezett WICON 2005 nemzetközi konferencia egyik színvonalas előadása nyomán született és a TCP rádiós csatorna felletti hatékony átvitelének egyik lehetséges módját mutatja be.

Imre Sándor,  
vendégszerkesztő  
BME Híradástechnikai Tanszék

Szabó Csaba Attila,  
főszerkesztő

# A WiMAX-rendszerek alkalmazási lehetőségei

SZABÓ SÁNDOR

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék  
szabos@hit.bme.hu

**Kulcsszavak:** WiMAX, UMTS, 4G-rendszerek

A WiMAX a fix és mobil szélessávú hálózatok egyik ígéretes lehetősége. Alkalmazásával a vezetékes szolgáltatók kiterjeszhetik hálózatuk határait, rugalmas szolgáltatásokat nyújthatnak az előfizetőknek. A jelenlegi mobil szolgáltatók cellás rendszereik tehermentesítésére alkalmazhatják. A WiMAX kedvező tulajdonságai a nagy elérhető sáv szélesség és hatótávolság, a beépített QoS támogatás és a rugalmasan használható frekvenciasávok. A cikkben a WiMAX alkalmazási lehetőségeit és a 4G hálózatokban betöltött helyét vizsgáljuk meg.

## 1. Bevezetés

A mobil és vezetéknélküli hálózatok fejlődési iránya a „mindig a lehető legjobb minőségű kapcsolódást” („Always best connected”) biztosító 4G mobil rendszerek felé mutat [1]. Ezek a 4G rendszerek egyesítik a meglévő vezetéknélküli hozzáférési technológiák és hálózatok előnyeit: például a legnagyobb lefedettséggel rendelkező GSM/GPRS hálózatról átválthat a felhasználó a nagyobb sebességet kínáló WLAN hálózatra, amikor – például egy WLAN hotspothoz – annak lefedettségi területére érkezik (1. ábra).

A vezetéknélküli technológiák piaca nagyon sokszínű. Az alkalmazási terület szerint megkülönböztethetünk fix telepítésű szélessávú hozzáférési hálózatokat (Fixed BWA – Fixed Broadband Wireless Access), mobilitás támogatással rendelkező szélessávú hozzáférési hálózatokat (MBWA – Mobile Broadband Wireless Access) és különböző cellás vezetéknélküli mobil hálózatokat. BWA esetén az IEEE 802.20, IEEE 802.16 WiMAX, IEEE 802.11 WiFi, ETSI HIPERLAN, HIPERLAN2, míg cellás rendszerekben a 3G UMTS, EDGE, GSM technológiák érhetőek el. A BWA hálózatok a „személyes hálózatok”-nál (Personal Area Network – PAN, pl. Bluetooth) és a helyi hálózatoknál (Local Area Network – LAN, pl. WiFi) nagyobb távolságok áthidalására alkalmasak, de a nagy kiterjedésű hálózatoknál (Wide Area Network – WAN, például cellás mobiltelefon rendszerek, GSM, 3G UMTS) kisebb területet szolgálnak ki.

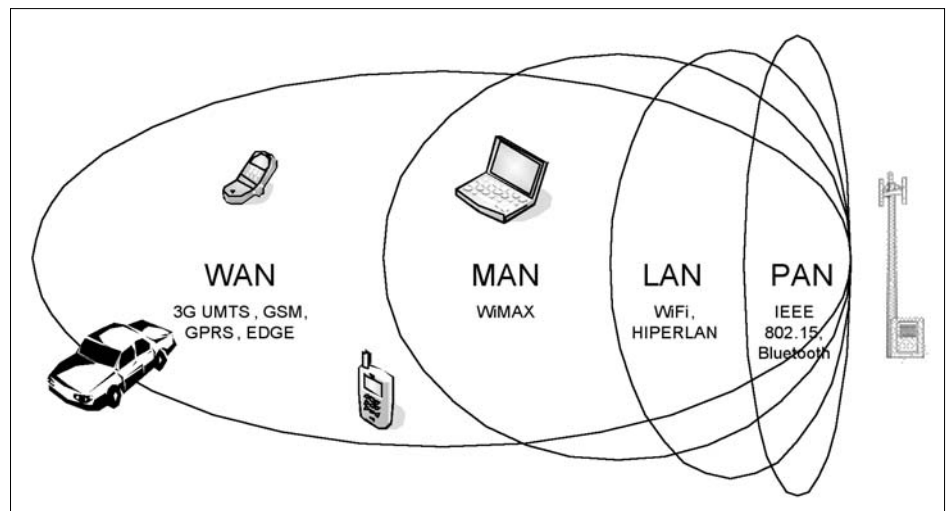
1. ábra  
Vezetéknélküli technológiák  
és vezetéknélküli hálózatok  
hatótávolsága

Az „Always best connected”-elv szerint a lefedettségi terület és a nagysebességű mobilitás-támogatás szempontjából a cellás rendszerek, míg az elérhető sáv szélesség tekintetében a fix telepítésű szélessávú hozzáférési hálózatok jelentik a legjobb megoldást. Így bár logikailag a 4G hálózatok a cellás mobil hálózatok evolúciójának (GSM evolúció) következő lépcsőjét jelentik, ez a pont megközelíthető – a mobilitás-támogatás megjelenésével – a fix BWA hálózatok irányából is.

A WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), mint a fix – és később a mobil – BWA hálózatok legígéretesebb technológiája, mindkét terület (BWA és cellás rendszerek) szolgáltatói számára is alkalmazható.

## 2. A WiMAX

A vezetékes szolgáltatók számára hálózatuk kiterjesztésének hatékony eszközei a vezetéknélküli technológiák, például a fix telepítésű szélessávú DSL illetve kábel csatlakozási pont könnyedén felruházható a vezetéknélküli technológia nyújtotta szabadsággal, WiMAX



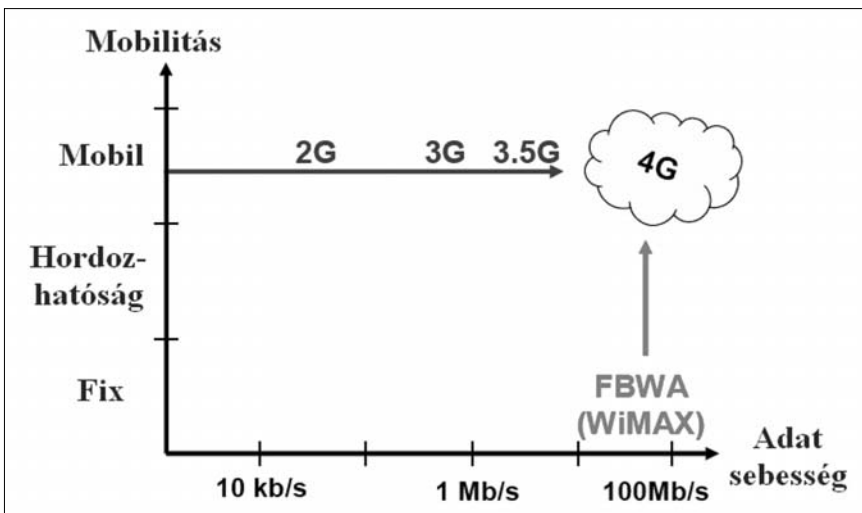
interfészt tartalmazó routerek segítségével, a WiFi-nél jobb minőségben. A WiMAX betörési lehetőséget jelent a mobil szolgáltatók uralta szélessávú vezeték nélküli piacra, a mobilitás támogatással rendelkező WiMAX hálózat a lefedettségi területen a cellás rendszerekhez hasonló szolgáltatások nyújtására alkalmas. A vezeték nélküli szolgáltató megjelenhet olyan piaci területeken is a WiMAX technológiával, ahol a szabályozás nem teszi ezt lehetővé vezeték nélküli hozzáféréssel, vagy nem szolgálható ki gazdaságosan az igény vezeték nélküli összeköttetés kiépítésével. A vezeték nélküli szolgáltatók, Internet szolgáltatók (ISP), WiFi hotspot üzemeltetők indíthatnak kombinált hang- és adatszolgáltatásokat, melyek versenyezhetnek a cellás rendszerekkel.

A mobil szolgáltatók számára a WiMAX technológia alkalmazásának egyik lehetősége a saját 3G UMTS hálózatuk tehermentesítése. Nagysebességű vezeték nélküli prémium szolgáltatások beindítására is használható a WiMAX technológia. További alkalmazási lehetőség a rádiótornyok összeköttetése (backhaul), a költséges bérelt vonal kiváltása.

A szélessávú vezeték nélküli hozzáférés irányába mutatnak a vezeték nélküli és vezeték nélküli szolgáltatók fejlesztései, ez a piac lesz az az ütközőpont, ahol a jelenlegi mobil és vezeték nélküli szolgáltatók egymás versenytársaivá válhatnak (2. ábra).

A WiMAX technológia legígéretesebb előnye a jelentős sávszélességű (~10 Mbit/s nagyságrendű) hozzáférés költséges infrastruktúra nélkül. A WiMAX rendszer elindításához elegendő egy központi bázisállomás, a „pay as you grow” elvet követheti a szolgáltató. Az előfizetői terminálok ára is csökken. Alkalmas városi, sűrűn lakott területeken – közvetlen rálátás nélkül (NLOS) –, és rurális, kisebb népsűrűségű területeken – nagy távolságú (LOS telepítés) – történő felhasználásra is. WiMAX segítségével a szélessávú szolgáltató elérheti a távoli, kis népsűrűségű, kiszolgáltatlan területeket is. Fejlődő piacokon a megfelelő sűrűségű vezeték nélküli infrastruktúra hiánya miatt szintén ígéretes jövő áll a WiMAX előtt.

2. ábra A 4G rendszerek és a WiMAX



A WiMAX-rendszerek alapjául az IEEE 802.16 szabványosítási tevékenysége szolgál [2], amely 1988-ban kezdődött. Az eredeti cél egy Wireless MAN (WMAN) rendszer megalkotása volt, ami a 10-66 GHz sávokban üzemel, ahol nagy sávszélesség áll rendelkezésre. A jelenlegi fejlődés iránya egy nyílt, nemzetközi szabvány a FBWA és MBWA hálózatok számára.

Az első verzió a 802.16a (802.16.3), a 2-11 GHz-es sávokban, nem rálátásos terjedés (NLOS – non-line-of-sight) esetén alkalmazható. A 802.16-2004 verzió pontmultipont támogatással rendelkezik, alkalmazható nem rálátásos esetben is. Az elérhető elvi átviteli sebesség tekintélyes (max. 70 Mbit/s), carrier-grade QoS támogatással rendelkezik, hang, adat és videó átvitelre alkalmas (triple-play). A mobil kiterjesztést támogató 802.16e szabvány ('Mobile WiMAX') véglegesítése még várhatóan idén lezárul. A WiMAX fórumon jelenlévő nagyobb gyártók folyamatosan jelentik be berendezéseiket és lapkakészleteiket (Intel, Alvarion, Aperto, Fujitsu stb.) [3].

A WiMAX konzorcium tagjai berendezésgyártók és szolgáltatók, jelenleg közel 240 tagja van. A 2001-ben alapított csoport célja a BWA szektor globális növekedésének elősegítése egységes ipari fellépéssel, marketing tevékenységgel és a szabványosítás támogatásával. Az egyik legfontosabb cél a gazdaságosság. A szolgáltatók szempontjából fontos a beruházás védelme. Ezt szolgálja a „WiMAX certified” logó (hasonlóan a WiFi certified logóhoz), amit a hivatalos WiMAX teszt labor, a Spanyol Cetecom végez el [4]. További gazdasági szempont az alacsony végkészülék árak (100-150 USD) valamint a felhasználó általi installálhatóság.

A WiMAX előtt álló egyik jelentős kihívás a sajtó és a WiMAX Fórum által keltett nagy hírverésből adódó elvárásoknak való megfelelés (például: „Move over 3G, here comes WiMAX” – Forbes, 2004. március). A sajtóban olyan állítások hangzanak el, mint a „WiFi szteroidon”, „70 Mbit/s sebesség akár 50 km távolsáig”, „roaming”, „versenytárs a 3G-nek” stb.

Ezzel szemben a jelenlegi WiMAX szabvány nem rendelkezik globális roaming-támogatással és jelenleg nincs kiépített, globális WiMAX hálózat sem – szemben a jelenleg is elérhető 2G/3G rendszerekkel. A valóságos terjedési feltételek mellett, éles

rendszereken mérhető tényleges átviteli sebességek és távolságok azonban a fenti hangzatos számoknál rosszabbul fognak alakulni. A WiMAX gyakorlati felhasználása során a képet tovább árnyalja néhány nemzeti szempont is: a nemzetközi szabályozással szemben a WiMAX Magyarországon jelenleg nem használható a 3,5 GHz-es sávban backhaul célokra.

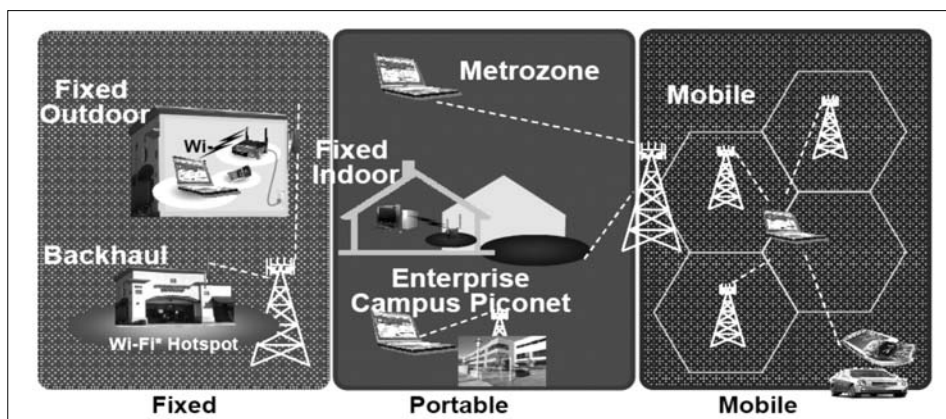
A fix és mobil szélessávú, vezeték nélküli szélessávú hozzáférési technológiák közül természetesen nem csak a WiMAX az egyetlen esélyes:

- A **801.11 WiFi** maximum 54 Mbit/s sebességgel legfeljebb néhány száz méter átmérőjű területen biztosítja a kommunikációt. Előnye, hogy már a piacon jelenlévő technológiáról van szó, alacsony berendezésárakkal. Hátránya a rövid hatótávolság, QoS problémák, valamint, hogy kizárólag a szabad felhasználású sávban működik, továbbá a kültéri alkalmazása akadályokba ütközik. A WiMAX ígéretes technológia a jelenlegi WLAN felhasználási területein, mivel hosszabb hatótávolságot, nagyobb kapacitást, valamint jobb QoS és biztonsági megoldásokat kínál. Egy szolgáltató szempontjából két technológia között a legfontosabb különbséget a kapcsolat minőségének garantálhatósága jelenti. A WiFi hálózatok nem rendelkeznek beépített, QoS biztosítási mechanizmusokkal, a tervezés során a számítógéphálózatokat vették alapul, például a garantált minőségű real-time hang és videóátvitel szükségessége nem merült fel. A WiMAX ezzel szemben beépített QoS támogatással rendelkezik, valamint az engedélyhez kötött működési frekvencia tartományban biztosítható a zavarmentes működés is. A WiFi leginkább, mint a WiMAX felhasználói végpontokhoz a helyiségen belüli csatlakozást lehetővé tévő technológia jöhet számításba LAN szinten. A WiFi MAN (Metropolitan Area Network) területen történő alkalmazása nem kivitelezhető.

- Az **UMTS** nagy adatsebességet kínál fejlett mobilitás támogatással. Az UMTS által kínált sebesség maximum 2 Mbit/s, tehát jelentősen kisebb, mint a WiMAX által nyújtott sebesség. Az UMTS hálózatok rádiós interfész fejlődésének következő lépcsőjét jelentő HSDPA technológia megnöveli az elérhető downlink-irányú sebességet, akár 20 Mbit/s értékre. A WiMAX kiegészítheti a 3G hálózatok szolgáltatásait, az UMTS szolgáltató által működtetett hot-spotokban, mindkét rendszerrel kommunikálni képes terminálok alkalmazásával.

- A **802.20 MobileFi**, csomagkapcsolt, IP alapú átvitelre optimalizált rádiós interfésszel rendelkezik [5]. A WiMAX technológia által nyújtott sáv szélesség felét kínálja, azonban a mobilitás-támogatása jelentősebb, 10 ms késletetést kínál 250 km/h felhasználói sebességig (a WiMAX csak 120 km/h-ig). A legfőbb eltérések a WiMAX-hoz képest a gyorsan mozgó felhasználók kiemelt támogatása, és a kisebb maximális sáv szélesség. Általánosabban használható frekvenciasávokban működik (3,5 GHz alatt), globális mobilitást és handoff, valamint roaming támogatással rendelkezik. A 802.16 WiMAX kiforrottabb a MobileFi koncepciónál, a 802.20 szabványosítása pedig még csak folyamatban van, kész termékek egyelőre nem várhatóak.

3. ábra  
Hordozhatóság és  
mobilitás-támogatás  
megjelenése  
a WiMAX rendszerekben [8]



- A **WiBro** elsősorban Ázsiában jelenthet kihívást az Intel számára. A WiBro a WiMAX-hoz hasonló célokkal jött létre, a tervek között szerepel a WiMAX-rendszerrel való együttműködés kidolgozása is [6,7], egyfajta korai tesztrendszere lehet a „mobil WiMAX”-nak.

### 3. A WiMAX továbbfejlesztése a mobil rendszerek felé

A WiMAX a kezdeti tervek szerint is biztosít kültéri lefedettséget (szemben például a WiFi-vel), így kézenfekvő a mobilitás, a hordozhatóság megjelenése. Az IEEE 802.16e szabvánnyal elérhető lesz a hordozhatóság, ami akár nagysebességgel mozgó felhasználók mobilitás-támogatásig fejlődhet, teljes értékű QoS támogatással. A WiMAX lefedettség növekedésével, összefüggő szolgáltatási terület kialakulásával lehetőség nyílik a 3G UMTS hálózatokon elérhető szolgáltatások igénybevételére.

A mobilitás-támogatás megjelenésével a WiMAX előtt új piacok nyílnak meg. A korábban említett BWA alkalmazás mellett a mobil eszközökben történő integrálásban is nagy jövőt látnak a WiMAX fórum tagjai, többek közt az Intel is. A BWA piacnál nagyobb a hordozható eszközök – laptopok (2004-ben 40 millió) és cellás rádiótelefonok (2004-ben 500 millió) piaca, melyből csak körülbelül 5% szélessávú (3G) [8].

Az Intel célja a folyamatos hálózati elérés biztosítása mobil eszközök számára, a sikeres Centrino lapkakészlethez hasonlóan – mely integrált WiFi képességekkel rendelkezik – a WiMAX technológia integrálása a laptopokba és PDA-kba szánt Intel lapkakészletekbe.

### 4. A WiMAX és a 3G UMTS

A fix és mobil szélessávú vezeték nélküli szélessávú elérés piacán jelenleg a két legnagyobb játékos a 3GPP (3G Partnership Project) szövetség és az – előzőekben már említett – Intel vezette WiMAX fórum [9]. A 3GPP fórum az UMTS technológiában látja mobil szélessávú elérés jövőjét, míg a WiMAX fórum a WiMAX technológiában.

A WiMAX legfontosabb technológiai előnyei a 3G rendszerekkel szemben:

- magasabb nyers adatsebesség,
- kisebb késleltetés,
- nagy spektrális hatékonyság és
- natív IP támogatás.

A 3G UMTS rendszer előnyei többek között:

- világméretű használhatóság (roaming),
- nagyobb lefedettség és
- a technológia érettsége (1. táblázat).

Azonban a rendszerek közötti háborúban a technológia csupán az egyik szempont. A WiMAX egyidejűleg több fronton intéz támadást a 3G rendszerek ellen:

#### 1. Technológia:

Az IEEE 802.16e komoly kihívást jelent a 3G szolgáltatók ellen, hiszen a „hagyományosan” cellás mobil szolgáltatók területén jelenhet meg az új WiMAX szolgáltató.

#### 2. Szabályozás:

A WiMAX Fórum erejét, súlyát felhasználva, a fórum által szorgalmazott spektrum újraellokálás, spektrummegosztás eredményeként világméretű támogatottságra, egységes szabályozásra lehet számítani.

#### 3. Gazdasági érvek:

Az erős marketing és a jól koordinált, nemzetközi fellépés mellett a WiMAX Fórum ipari támogatást és erős ipari háttérrel is jelent, ami fontos szempont a potenciális szolgáltatók számára a beruházások mérlegelésénél.

A WiMAX eredetileg adatra, a 3G UMTS inkább hangátvitelre optimalizált rendszer, de nincsenek világos határolóvonalak.

Mi az elemzők és a sajtó véleménye? A Reuters szerint: „Move over 3G, here comes WiMAX”, a Yankee Group szerint „A 802.16-2004 inkubátor a 802.16e számára, aminek célja a 3G számára versenytárs létrehozása”[8].

A WiMAX és a 3G kapcsolatára egyfajta kettősség jellemző. A WiMAX Forum-on nem említik a 3G-t, mint olyan technológiát, mellyel a WiMAX rivalizálna. A gyak-

ran feltett kérdésekből idézve: „Will WiMAX compete with WiFi? With HiperMAN? With 802.20?”. A felsorolásban nem szerepel a 3G. Azonban a WiMAX fórum egyik legjelentősebb tagja, az Intel, nyíltan megfogalmazza célját a WiMAX technológiával. Az Intel célja, hogy a WiMAX 802.16e olyan nagysebességű adatátviteli szolgáltatássá váljon, ami alkalmas a 3G szolgáltatások kiváltására illetve kiterjesztésére [10].

Ennek egyik módja lehet az egyre jelentősebb nagysebességű mobil adatforgalom átirányítása a 802.16 hálózatra, a cellás rádiótelefon rendszerek pedig kisebb sebességű adatátviteli alkalmazások és a hangösszeköttetés számára lennének használhatóak. „Always best connected” – megvalósulhat békés együttélésük is.

A kérdést várhatóan a két érdekcsoport ereje fogja eldönteni. A WiMAX Fórum, vagy a 3GPP tudja-e jobban mozgósítani marketing gépezetét, hatékonyabban meggyőzni a szolgáltatókat és a fogyasztókat a saját rendszerének előnyeiről?

## 5. A WiMAX alkalmazási területei távközlési szolgáltatók számára

A WiMAX helyzetének áttekintése után megvizsgáljuk a WiMAX alkalmazási területeit. A WiMAX technológia legfontosabb alkalmazási területei a meglévő vezetékes infrastruktúra kiegészítése olyan helyeken, ahol technológiai vagy gazdasági akadályai vannak a vezetékes szélessávú elérési hálózat további bővítésének. Bizonyos területeken nem megtérülő beruházás a vezetékes hozzáférés kiépítése a kis előfizetői sűrűség miatt, illetve a szabályozási helyzet nem teszi lehetővé azt, vagy csak rövid idejű igényeket kell kiszolgálni. A WiMAX elsősorban a szélessávú hozzáférési hálózat fehér foltjainak kitöltésére alkalmas.

- Kik lehetnek a potenciális WiMAX szolgáltatók?

A szolgáltatási terület szempontjából – új belépők, illetve a területen már jelen lévő, inkumbens szolgálta-

1. táblázat A WiMAX és a 3G UMTS összehasonlítása

	WiMAX	3G UMTS
<b>Lefedettségi terület</b>	MAN	WAN
<b>Átviteli sebesség (max.)</b>	70 Mbit/s (szektoronként)	20 Mbit/s (HSDPA)
<b>QoS támogatás</b>	Igen, beépített	Igen, beépített
<b>Késleltetés</b>	Alacsony késleltetés	Magasabb késleltetés
<b>Frekvenciasáv jellege</b>	Szabad felhasználású és engedélyhez kötött is	Engdélyköteles, limitált
<b>Támogatók</b>	WiMAX fórum, Intel	Mobil operátorok és berendezésgyártók
<b>Érettség</b>	802.16-2004 berendezések már elérhetőek; a 802.16e még szabványosítás alatt	Működő rendszerek

tók lehetnek a WiMAX rendszert bevezető szolgáltatók. A vezetékes szolgáltatók mellett új szolgáltatók lehetnek még a mobil szolgáltatók is, akik a meglévő cellás hálózati infrastruktúrájuk nyújtotta előnyöket, szinergiákat használgják ki a berendezések telepítése során.

- Milyen szolgáltatások nyújtására alkalmas a WiMAX rendszer?

A WiMAX hálózatok alkalmasak a „triple-play” koncepció szerinti szolgáltatások hordozására, vagyis a nyújtható szolgáltatások köre magába foglalja a szélessávú adatátvitelt, a hangátvitel és mozgóképátvitel lehetőségét.

- Milyen piaci célcsoport kiszolgálására használható a WiMAX hálózat?

Az előfizetők szempontjából lakossági- (elsősorban szélessávú adatforgalom és hangátvitel) és üzleti-előfizetői kört (szélessávú adatátvitel, nxE1, ISDN, hangátvitel) céloz meg a WiMAX. Új előfizetői réteg lehetnek a nomád és mobil felhasználók, akiket a WiMAX jelenlegi, és később szabványosításra kerülő funkciói szolgálhatnak ki. WiMAX alkalmas továbbá vezeték nélküli szélessávú hozzáférés biztosítására, vezeték nélküli „hot-spot”-ok kiépítésére.

- Mennyire fenyegetheti a WiMAX a szélessávú vezetékes hozzáférés piacát?

A vezetékes hozzáférési technológiák (ADSL2+, VDSL, kábel TV, fényvezető kábel) számára a WiMAX nem jelent igazi alternatívát azokon a területeken, ahol a vezetékes szélessávú összeköttetés gazdaságosan kiépíthető.

### 5.1. WiMAX alapú FBWA városi környezetben

Fejlett kábeltvév vagy sodrott rézérpár alapú szélessávú eléréssel rendelkező városi környezetben a WiMAX várhatóan nem ér el átütő sikert, mint a vezetékes szélessávú hozzáférési technológia vezeték nélküli alternatívája, mert a fejlett szélessávú hozzáférési piaccal rendelkező városokban kisméretű az a maradék piac, amit WiMAX segítségével ki lehetne szolgálni, így kis mértékű jövedelmezőségre lehet számítani. Kevésbé fejlett területeken jelentős szerephez juthat, mint a vezetékes hozzáférést kiváltó technológia.

Városi környezetben a WiMAX a maradék piac részleges lefedésére alkalmas, főleg azokon a területeken, ahol a felhasználók nagyobb tömbökben érhetőek el. A WiMAX hálózat méretezésénél a lefedendő terület nagysága a dominál, nem az igényelt kapacitás, így több BS kiépítésére lehet szükséges, melyek alacsonyabb kihasználtsággal működnek.

Az erős verseny, és a jó hírnév miatt, az inkumbens szolgáltató 100% lefedettségre törekszik a városi és külvárosi területein. A fenti okok arra kényszerítik a szolgáltatót, hogy a szélessávú piac maradék, kevésbé profitáló területein is nyújtson szolgáltatást. Ebben a helyzetben jelent használható alternatívát a WiMAX technológián alapuló szélessávú elérés. A WiMAX pont-multi-pont konfigurációban, LOS és NLOS környezetben, fix telepítésű felhasználói végberendezésekkel költséghatékony és rugalmas megoldást jelent a problémára.

Újonnan belépő szolgáltató számára a WiMAX technológia alkalmas az inkumbens operátorral történő versenyzésre, azonban a vezetékes szélessávú hozzáférési technológiák alacsony áruk és fejlettségük miatt erős versenytársak. Ebben az esetben elsősorban az inkumbens szolgáltató hibáit lehet kihasználni, például rossz megítélés, lassú kiépítés stb.

Sok múlik az új szolgáltató marketing stratégiáján, szolgáltatásainak minőségén. Az új belépő várhatóan elsősorban a fennmaradó üzleti előfizetői piaci szegmenst célozza meg a nagyobb jövedelmezőség miatt. Az új belépő számára a WiMAX megteremti ugyan a lehetőséget arra, hogy versenyezzen az inkumbens szolgáltatóval, a sikerhez azonban hosszú távú szemléletre, és jelentős tőkeerőre van szüksége. Hosszabb távon a vezeték nélküli WiMAX szolgáltató nehezen versenyezhet a vezetékes hozzáférési technológiák fejletéseivel.

A WiMAX elsősorban a kezdetben elérhető nagyobb sáv szélességgel, könnyebb telepítéssel, valamint a nomaditással, mobilitással támogatásával juthat előnyökhöz, amihez azonban szükség van további (6 GHz fölötti) frekvenciasávokra, illetve a szabványosítás (például a 802.16e) befejeződésére.

### 5.2. WiMAX alapú FBWA rurális területen

Rurális területeken – a városi esethez viszonyítva – nagyobb méretű a szélessávú vezetékes kapcsolattal nem rendelkező potenciális előfizetők piaca, mivel a vezetékes elérés kiépítése több helyen nem gazdaságos. Az inkumbens szolgáltató számára szükséges alternatív technológiát a WiMAX jelentheti, mellyel kiegészítő szolgáltatást nyújthat saját szélessávú vezetékes hozzáférése mellett. Az inkumbens szolgáltató célja, hogy a teljes szolgáltatási területén biztosítson szélessávú elérést, azonban sok, ritkán lakott területen nem megtérülő befektetés vezetékes szélessávú elérés kiépítése. Ezekon a területeken a WiMAX életképes alternatívát jelent (további lehetőségek a televízió hálózat, kétirányú műholdas kapcsolat stb).

Új belépő számára kézenfekvő a rurális szélessávú hozzáférési piacon történő megjelenés WiMAX alapú szolgáltatásokkal. Az alacsonyabb szélessávú penetráció miatt nagyobb részesedést lehet elérni az adott területen, amennyiben rendelkezik a megfelelő tőkével és hosszú távra tervez.

A rurális területen túlnyomórészt lakóövezetek találhatóak, javarészt LOS kommunikációra van lehetőség, a BS-ok kihasználtsága jobb, mint a – magasabb épületekkel rendelkező – városi esetben. A beruházás költségeit azonban megemeli a kültéri LOS antennák alkalmazása, valamint az ezzel járó szerelési költségek. Rurális környezetben az alternatív technológiák kevésbé jövedelmezőek, mint a WiMAX.

### 5.3. Mobilitás támogatás WiMAX rendszerekben: nomád és mobil felhasználók támogatása

A WiMAX egyik potenciális előnyös tulajdonsága a felhasználói mobilitás támogatása, a nomaditással szintjé-



től egészen a nagysebességű, teljeskörű mobilitás biztosításáig. A WiMAX bázisállomások számának és a lefedett terület növekedésével először a legmagasabb megtérüléssel rendelkező helyeken, majd egész városrészekben, városokban kezd kialakulni egy összefüggő szolgáltatási terület, ami lehetővé teszi a területen belüli hordozhatóságot, nomaditást. Ezt az infrastruktúrát felhasználva a 802.16e szabvány segítségével megvalósulhat a teljes mobilitás-támogatás.

A nomád szolgáltatások iránti fizetőképes kereslet, a felhasználói tulajdonságok, és a szolgáltatás határára nem ismert. A helyzetet üzleti szempontból nehezíti, hogy egyre több szabadon hozzáférhető, ingyenes illetve kedvező árazású WiFi hotspot működik, és számuk feltehetően növekedni fog a jövőben is. Egy „fizetős” WiMAX nomád szolgáltatás – bár nagyobb sávszélességet, jobb QoS támogatást, és nagyobb hatótávolságot kínál – sikere nem jósolható meg biztosan.

A városi szélessávú elérést nyújtó WiMAX szolgáltatási területek növekedésével és a „fehér foltok” csökkenésével párhuzamosan másodlagos szolgáltatásként juthat szerephez a nomád felhasználók számára biztosított szélessávú hozzáférés. A nomád szolgáltatások javarészt a városokra korlátozódnak, rurális területeken nincs meg a szükséges felhasználói sűrűség.

Érdekes lehetőségekkel kecsegtet a teljeskörű mobilitás támogatás megjelenése a WiMAX szabványban (802.16e). Ez a szolgáltatás kiegészítő illetve versenytárs is lehet a cellás mobil rendszerek (GSM, UMTS) számára. Egy eredményes mobil szolgáltatás elindításához természetesen még sok részletet meg kell oldani, hogy csak néhány példát említsünk: a cellaváltások, a roaming egységes kezelése stb. A mobil WiMAX hálózatot a cellás rendszerek szolgáltatói felhasználhatják a saját – költséges és limitált spektrumban üzemelő – hálózatuk tehermentesítésére. A jelentősebb mobil adatforgalom elsősorban így a WiMAX, míg a hanghívások pedig a cellás GSM illetve UMTS rendszer segítségével történhetnek. A több vezeték nélküli rendszert is támogató, beépített lapkakészlettel és rádióval rendelkező terminálok megjelenésével a WiMAX az „Always best connected” 4G hálózatok jelentős szereplőjévé válhat.

A vezetékes hálózati hozzáférést nem kínáló mobil szolgáltató a WiMAX technológia segítségével beléphet a fix szélessávú hozzáférés piacára is. Ebben az esetben a mobil szolgáltató felhasználhatja a meglévő infrastruktúráját a WiMAX szolgáltatás kiépítéséhez, például az új BS-ek számára nem szükséges az infrast-

ruktúra (adótorony, tápellátás stb.) kiépítése, továbbá megoszlik a működtetési és karbantartási költség is. Az infrastruktúrán felül a meglévő marketing, ügyfélszolgálati, számlázási stb. szervezeteit is felhasználhatja a WiMAX szolgáltatás támogatására. A szinergiák, és a meglévő felhasználók révén a mobil szolgáltató összességében kedvezőbb helyzetből indul, mint a piacra újonnan belépő szolgáltató.

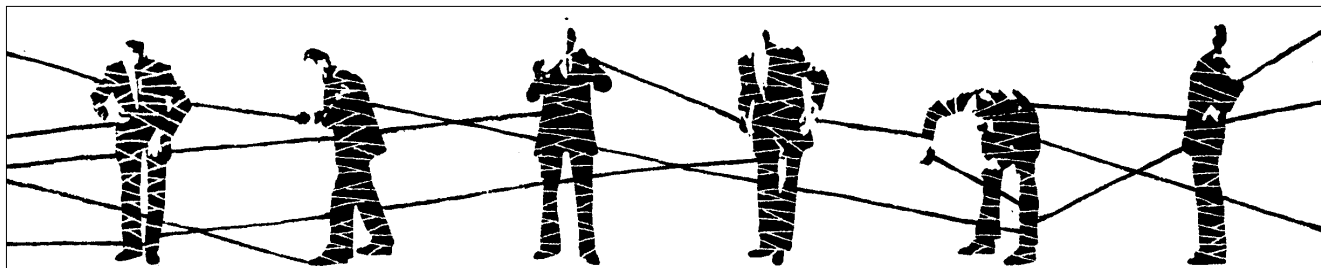
## 6. Összefoglalás

A WiMAX ígéretes technológia a jelenlegi vezetékes és vezeték nélküli szolgáltatók számára fix szélessávú elérési biztosítására városi és rurális környezetben, a nomád és mobil felhasználók kiszolgálására, valamint a 3G UMTS rendszerben történő alkalmazásra. A WiMAX rendszerek fejlődési irányai a mobilitás támogatás és a 4G rendszerekben történő alkalmazás biztosítása, így a szélessávú vezeték nélküli hozzáférés piacán verseny alakulhat ki a 3G UMTS és a WiMAX között, melynek „nyertese” nem jósolható meg.

A felhasználók választását nagyban befolyásolja a WiMAX Fórum és a 3GPP Szövetség marketing tevékenysége és természetesen az egyes rendszereken kínált szolgáltatások és az igénybevételükhöz szükséges végberendezések ára is. Technológiailag mindkét rendszernek megvannak az előnyei, de a különbségek – a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően – a jövőben nem lesznek jelentősek.

## Irodalom

- [1] [www.4gforum.org](http://www.4gforum.org)
- [2] [www.ieee802.org/16/](http://www.ieee802.org/16/)
- [3] [www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)
- [4] [www.cetecom.es](http://www.cetecom.es)
- [5] [www.grouper.ieee.org/groups/802/20/](http://www.grouper.ieee.org/groups/802/20/)
- [6] Daehyoung Hong, „2.3GHz Portable Internet (WiBro) for Wireless Broadband Access”, ITU-APT Regional Seminar, 2004.
- [7] Soon Young Yoon, „Introduction to WiBro Technology”, Telecom R&D Center Samsung Electronics Co., Ltd.
- [8] Paul S. Henry, „WiMAX: Another Step Toward 4G”, 4G Forum, 2005. június
- [9] [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
- [10] [www.intel.com/netcomms/columns/jimj105.htm](http://www.intel.com/netcomms/columns/jimj105.htm)



# Az IEEE 802.16 szabvány áttekintése

GÓDOR GYÓZÓ, SZALAY MÁTÉ, IMRE SÁNDOR

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék  
{godorgy, szalaym, imre}@hit.bme.hu

**Kulcsszavak:** WiMAX, IEEE 802.16, IEEE 802.x

*Cikkünkben az IEEE 802.16 szabvány célkitűzéseit, az eddigi munkát, illetve a 802.x családdal való kapcsolatot mutatjuk be. A 802.x család bemutatása után ismertetjük a 802.16 szabvány főbb elemeit, illetve a különféle átdolgozásokat. Végül kitérünk a WiMAX Fórum tevékenységére és a különböző eszközök és gyártók közötti együttműködés fontosságára.*

## 1. Bevezetés

Az IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802 LAN/MAN szabványügyi bizottság Local Area Network (helyi hálózat) és Metropolitan Area Network (nagyvárosi hálózat) szabványok fejlesztésével foglalkozik. A legszélesebb körben alkalmazott szabványok az Ethernet-család, a Token Ring, a Wireless LAN, a Bridging és a Virtual Bridged LAN. Minden egyes szabvány fejlesztéséért egy-egy Working Group a felelős. A leggyakrabban használt szabványok neveit, illetve a fejlesztésért felelős Working Groupok megnevezéseit a későbbiekben ismertetjük.

Az IEEE 802.16 szabvány egy nagysebességű, nagy hatótávolságú, vezeték-nélküli BWA (Broadband Wireless Access) rendszer fizikai és közeghozzáférési rétegeinek definícióját tartalmazza. A 802.16 szabvány a vezetékes (wireline) szélessávú hozzáférési technológiák alternatívája [1].

A vezeték nélküli technológiák jelentőségét a „digitális megosztottság” megoldásában az egyes országok hírközlési hatóságai is felismerték, és ennek megfelelően az ilyen megoldások támogatásához liberalizációs folyamatot indítottak el az elmúlt néhány évben. 2002 áprilisában a vezeték nélküli eszközök gyártói megalapították a globális szabványosítási és együttműködési kérdésekkel foglalkozó WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) Fórum nevű non-profit kereskedelmi szervezetet. A szervezet célja, hogy az IEEE 802.16 és az ETSI HiperMAN szabvány alapú 2-11 GHz frekvenciatartományban működő vezeték nélküli nagyvárosi hálózatok ipari elfogadását és implementálását megalapozza, ezáltal azok a vezeték nélküli távközlési piac jelentős részét alkothassák.

A WiMAX olyan szélessávú, vezeték nélküli megoldás definíálásán dolgozik, amelyben a különböző gyártóktól származó eszközök együttműködésre képesek, ezzel lehetővé téve a technológia gyors elterjedését. A WiMAX Fórum tevékenységét a 6. fejezet mutatja be.

A szakirodalomban az IEEE 802.16 szabványt és a WiMAX-ot gyakran szinonimaként használják, a következő cikkek is ezt a gyakorlatot követik.

## 2. Kapcsolat a 802.x családdal

Az IEEE 802.16 szabvány helyét a 802.x családban az 1. ábra mutatja. Jól látható, hogy hasonlóan a 802.3 (Ethernet), a 802.5 (Token Ring) vagy a 802.11 (WLAN) szabványokhoz, a 802.16 is fizikai és közeghozzáférési rétegeket definiál. A 802.x szabványok a felsőbb rétegekkel szabványos interfészen keresztül kommunikálnak, a biztonsági megoldások pedig a 802.10-es szabványban definiáltakra épülnek.

Tekintsük át a leggyakrabban használt 802.x szabványokat és a fejlesztésükért felelős Working Group-okat.

A fizikai réteget, illetve a közeghozzáférési réteget leíró szabványok a következők:

- 802.3: Ethernet (CSMA/CD) Working Group
- 802.4: Token Bus Working Group
- 802.5: Token Ring Working Group
- 802.6: Metropolitan Area Network (MAN) Working Group
- 802.11: Wireless LAN (WLAN) Working Group
- 802.12: Demand Priority Working Group
- 802.15: Wireless Personal Area Network (WPAN) Working Group
- 802.16: Broadband Wireless Access Working Group

A felsőbb rétegbeli szabványok megnevezései:

- 802.1: Higher Layer LAN Protocols Working Group
- 802.2: Logical Link Control Working Group
- 802.10: Security Working Group

## 3. Az IEEE 802.16 szabvány

Az IEEE 802.16 szabvány a MAN-környezetben működő Broadband Wireless Access közeghozzáférési (MAC) és fizikai (PHY) rétegeit definiálja. A MAC réteg három alrétegre tagolható, melyek a következők: szolgáltatás-specifikus alréteg (Convergence Sublayer), közös alréteg (Common Part Sublayer) és biztonsági alréteg (Security).

A továbbiakban röviden bemutatjuk a 802.16 MAC illetve PHY rétegeket, illetve a szabvány különböző átdolgozásait [1].

**3.1. A 802.16 MAC réteg**

A MAC réteg három jól elkülöníthető részre tagolódik. Legfelül található a szolgáltatás-specifikus alréteg, mely a felsőbb protokollokhoz való illesztést segíti. Középen helyezkedik el a közös alréteg, amely a MAC kulcsfontosságú funkcióit közvetíti. Végül legalul található a biztonsági alréteg.

*Szolgáltatás-specifikus alréteg*

A szabvány kétféle konvergencia alréteget definiál a felsőbb rétegekhez való illesztésre. Az egyik az ATM konvergencia-alréteg, a másik pedig a csomag konvergencia-alréteg (csomagkapcsolt protokollok továbbítására, mint például IP, PPP vagy Ethernet). A szolgáltatás-specifikus alréteg feladata, hogy a MAC SDU-kat (Service Data Unit) az adott protokollban alkalmazott adatkeretű alakítsa, illetve a QoS paraméterek biztosítása az adott összeköttetésen.

*A közös alréteg*

Ez az alréteg a hatékony közeghozzáférési mechanizmus biztosításáért felelős. A 802.16 szabvány a kétirányú PMP (pont-multipont), illetve a „mesh”-módot definiálja. A MAC összeköttetés alapú, ami azt jelenti, hogy minden szolgáltatás egy egyedi azonosítóval rendelkező kapcsolathoz van rendelve. Ez az úgynevezett kapcsolat-azonosító (Connection ID – CID), mely 16 bites. A 802-2001 szabványnak megfelelően minden előfizetői állomás (Subscriber Station – SS) rendelkezik egy 48 bites MAC címmel, mely a globális azonosítást biztosítja, illetve a regisztráció és a hitelesítés során játszik fontos szerepet. A közös alréteg további funkciói a következők: címezés, MAC header illetve PDU (Packet Data Unit) kialakítása, fragmentáció, ütemezési feladatok, sáv szélesség allokálás és a PHY réteg támogatása (duplexálási technikák).

*A biztonsági alréteg*

Ez az alréteg két fontos funkciót lát el. Először is biztosítja az adatok titkosítását a bázisállomás és az előfi-

zetői állomás között a kapcsolat teljes időtartama alatt, így biztosítva az előfizetőt arról, hogy adatai nem kerülnek illetéktelen személy kezébe. Másodsorban a megsemmisítéses (impersonating) támadások ellen véd.

**3.2. A 802.16 PHY réteg**

Minden egyes környezetben más-más fizikai réteg specifikációra van szükség. Az IEEE 802.16 szabvány három frekvenciasávot definiál a különféle működések szempontjából. Ez a három frekvenciatartomány a következő:

*10-66 GHz közötti engedélyhez kötött sávok*

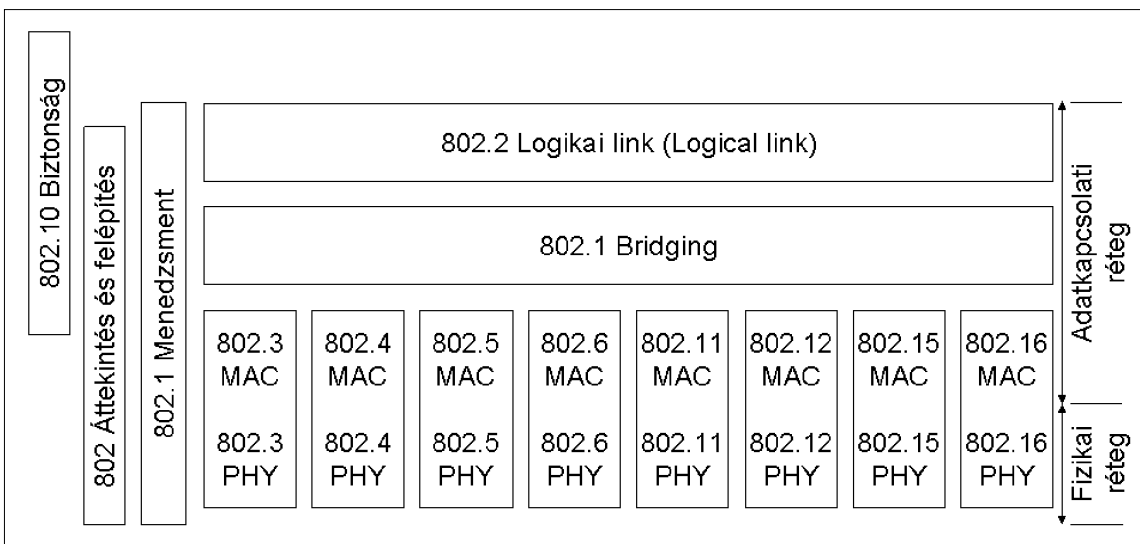
A 10-66 GHz közötti sávok szolgáltatják a fizikai környezetet, ahol a rövid hullámhosszaknak köszönhetően elengedhetetlen a közvetlen rálátás az antennára (line-of-sight, LOS) valamint elhanyagolható a többutas terjedés. A 10-66 GHz-es sávban a tipikus csatorna sáv szélesség 25-28 MHz. Az adatátviteli sebesség 120 Mbit/s, így ez a környezet alkalmas PMP (point-to-multipoint) hozzáférési szolgáltatások kezelésére: a small office/home office (SOHO) környezettől egészen a közepes és nagy irodai környezetekig.

*2-11 GHz közötti sávok*

A 11 GHz alatti frekvenciák olyan fizikai környezetet biztosítanak, ahol a hosszabb hullámhosszaknak köszönhetően nem szükséges a LOS és a többutas terjedés lehet a domináns. Ahhoz, hogy képesek legyünk near-LOS és non-LOS (NLOS) működésre, elengedhetetlen néhány kiegészítő PHY (fizikai réteg) funkció, mint például továbbfejlesztett teljesítményszabályozási technikák alkalmazása, interferencia csökkentő/együttélési technikák és összetett antennák alkalmazása. Ezt a sávot a 802.16a szabvány fedi le [2].

*5-6 GHz körüli szabad frekvenciasávok*

A 11 GHz alatti szabad sávok terjedési körülményei hasonlóak az ebben a sávban működő engedélyköteles frekvenciákéhoz. A nagy különbség az, hogy a szabad sávban más eszközök is működnek, így további interferencia és együttélési problémák léphetnek fel, illetve figyelemmel kell lenni a megengedett kibocsátott teljesítményre is.



1. ábra  
A 802.x család felépítése

## 4. A 802.16 szabvány átdolgozásai

A 802.16 szabvány több átdolgozásból („revision”) áll. Léteznek továbbá kiegészítések („amendment”) és előzetes („draft”) szabványok. Ezeket általában a 802.16 szám utáni betűvel jelölik, például 802.16c. Előfordulhat, hogy több átdolgozást egy közös átdolgozássá fognak össze. A legfontosabb változatok a 2. ábrán láthatóak. Az alábbiakban áttekintést adunk a 802.16 szabvány különböző elfogadott átdolgozásairól, előzetes szabványokról és kiegészítésekről.

### 4.1. 802.16c

Ezt az átdolgozást az IEEE 2002. decemberében fogadta el. Az átdolgozás a 10-66 GHz frekvenciasávban történő line-of-sight (LOS) szélessávú vezeték nélküli kommunikáció rádiós interfészét definiálja. Az adatátviteli sebesség elvi határa 70 Mbit/s, melyen a felhasználóknak osztozniuk kell. Az áthidalható távolság elérheti az 50 km-t is.

### 4.2. 802.16a

Az IEEE 2003 januárjában fogadta el ezt az átdolgozást. A 2-11 GHz frekvenciatartomány MAC és PHY rétegét definiálja. Az alacsonyabb frekvenciatartomány lehetővé teszi a non-line-of-sight (NLOS) kommunikációt is. 20 MHz-es csatornánként 100 Mbit/s adatátviteli sebességet tesz lehetővé. Tipikusan 6-8 km-es cellasugarat használ.

### 4.3. 802.16b

Ez az átdolgozás az 5-6 GHz körüli szabad, engedélyhez nem kötött alkalmazásokat foglalja magában.

### 4.4. 802.16d

Az IEEE 802.16d átdolgozást az IEEE 2004 júniusában fogadta el, és 802.16-2004 néven került publikálásra. Ez az átdolgozás az addigi 802.16 szabványok „összeolvadásából” jött létre, azokat hivatott helyettesíteni. A következő szabványokat helyettesíti hivatalosan: 802.16-2001, 802.16c-2002, és 802.16a-2003. A szakirodalomban általában, ha a 802.16 megjelölést betű nélkül használják, erre a változatra utalnak.

### 4.5. 802.16e

A 802.16e előzetes „draft” szabvány, a 802.16 szabvány kiegészítése. Míg a 802.16-2004 fix vezeték nélküli hozzáférést támogat, a 802.16e lefedi a fix, a nomád és a teljesen mobil vezeték nélküli hozzáférést. Definiálja, hogy hogyan kapcsolódhat a felhasználó mobil internetszolgáltató (Wireless Internet Service Provider) hálózatához, és hogyan képes a kapcsolatot fenntartani akár 120 km/h sebesség mellett is. Az „e” kiegészítésre általában, mint „mobil-kiegészítés”-re hivatkoznak, ám a mobilitás támogatása csak az egyik jellemzője a 802.16e-nek. A másik, hogy jelentős kiegészítéseket tartalmaz az OFDMA fizikai réteghez.

A 802.16e OFDMA fizikai rétegét Scalable OFDMA-nak (SOFDMA) nevezik. A SOFDMA azonban számos előnnyel bír fix hozzáférés esetén is, ezért ez a draft nem csak felhasználói mobilitás esetén fontos. Továbbá biztonság terén is tartalmaz újításokat. Ez a legtöbb vitára alkalmas draft, mert súlyos átfedésben van az IEEE 802.20 szabvánnyal. A 802.16e szabvány elfogadása és publikálása 2005 szeptemberben vagy októberben várható.

### 4.6. 802.16f

Az IEEE 802.16 Network Management Task Group a 802.16 szabványhoz készít kiegészítéseket (amendment). Ilyen kiegészítések a 802.16f és a 802.16g.

A 802.16f tervezetét az IEEE 2004 augusztusában fogadta el. A projekt célja a 802.16 szabványhoz kapcsolódó „Management Information Base” (MIB) definiálása, a menedzselhető objektumok meghatározása, és szabványos menedzsmet-módszerek kidolgozása. Ezzel a különböző gyártók eszközei menedzsmet szinten is kompatibilissá válhatnak.

### 4.7. 802.16g

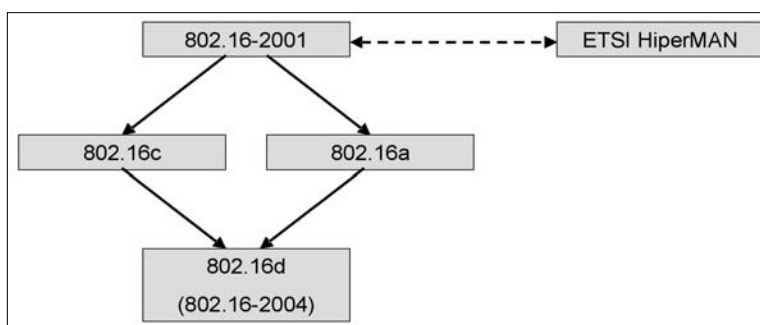
A 802.16g a 802.16f-hez hasonlóan a Network Management Task Group kiegészítése (amendment). Az IEEE 2004 augusztusában fogadta el a kiegészítés tervezetét a menedzsmet-síkhhoz tartozó eljárásokkal és szolgáltatásokkal kapcsolatban. A projekt célja szabványos menedzsmet algoritmusok és menedzsmet-hez kapcsolódó interfészek kidolgozása a 802.16e által (mobilitás támogatással) kiegészített szabványhoz. A kiegészítés kiterjed erőforrás-, mobilitás- valamint spektrum-menedzsmetre. A munka a 802.16f-fel szoros együttműködésben folyik.

## 5. ETSI HiperMAN

A 802.16-2004 szabvány egyik működési módját (a 256 OFDM PHY-t) az ETSI átvette az IEEE-től. Az ETSI HiperMAN szabvány mind a fizikai rétegben, mind a közeghozzáférési rétegben megegyezik az IEEE 802.16 által definiált működéssel.

Az ETSI HiperMAN kidolgozása a 802.16 szabvány kidolgozásával szoros együttműködésben történt. Az OFDM fizikai-réteg specifikációt például a HiperMAN

2. ábra A 802.16 szabvány különböző változatai



vette át a 802.16a-ból, de a 802.16-2004 már tartalmaz ETSI HiperMAN specifikációjából átvett részeket. A HiperMAN Protocol Conformance Implementation Statement (PICS)-et például a 802.16 szabvány vette át az ETSI-től.

## 6. A WiMAX Fórum és tevékenysége

A 802.16 szabvány egy nagyon összetett rendszert definiál. Számos megoldást felkínál a fizikai rétegben, különböző frekvenciasávokat határoz meg a kialakított környezeteknek, illetve a régióként eltérő frekvenciakiosztási szabályozást is figyelembe veszi. A vásárlói igényeknek megfelelően az IP centrikus és az ATM alapú rendszerek ugyancsak elfogadottak.

A rendszert úgy tervezték, hogy a nagy sávszélesség igényű üzleti alkalmazásoktól kezdve egészen a kisebb sávszélesség igényű otthoni felhasználásig megállja a helyét. A szabványban úgynevezett rendszerprofilok lettek definiálva, hogy a különféle igényeket, felhasználói elvárásokat minél jobban lehessen kezelni. A profilok célja, hogy leírja azon tulajdonságokat, melyek kötelezőek, vagy opcionálisak a tényleges megvalósítás során mind a fizikai, mind pedig a MAC rétegben. Ezáltal a gyártóknak lehetőségük nyílik ugyanarra a piacra olyan termékeket előállítani, amelyek képesek az együttműködésre, bár nem minden szempontból vannak azonosan implementálva.

A rendszerprofilok megléte még csak az egyik feltétele az együttműködési feladatnak. Szükség van egy szabványos eljárásra is, amelynek segítségével lehetőség van annak meghatározására, hogy egy eszköz vagy rendszer melyik profillal kompatibilis, illetve mely további opciókkal rendelkezik. Ez lehetőséget biztosít a rendszerfejlesztők számára ahhoz, hogy jó döntéseket tudjanak hozni arról, hogy milyen szolgáltatásokat tudnak nyújtani a vásárlóknak, és segítséget nyújt a megfelelő eszközök kiválasztásában is.

Meg kell említeni azt is, hogy az IEEE 802.16 termékek fejlesztői szembekerülnek azzal a mellékhatással, hogy a szabvány elsődlegesen a követelményekre koncentrál. A 802.16-os work group előírásokat határoz meg, illetve a munkája folytatásaként más piacok igényeinek megfelelően is kiterjeszti a szabványt, és kiegészítéseket készít az alapszabványhoz. A tesztelői-részek abból a szempontból fontosak, hogy biztosítják a kompatibilitást, vagyis azt, hogy az adott szabványt vagy profilt igénylő eszközök ugyanazon tesztelési folyamaton estek át, illetve garantálják, hogy az egyes eszközgyártók által készített termékek a szabvány azonos értelmezése szerint kerültek tesztelésre, és végül független konformanciatesttel tesz lehetővé, ezáltal növelve az előző két tényező hitelességét.

A WiMAX rendszer hatékony működésének elengedhetetlen feltétele, hogy a különböző gyártók által szállított eszközök képesek legyenek az együttműködésre. A három vezető WiMAX eszközgyártó cég (a Redline Communications [4], az Alvarion [5] és az Air-

span Networks Inc. [6]) már megkezdte az együttműködési tesztek első fázisát, melyet a hannoveri CeBIT 2005 kiállításán jelentettek be. A tesztek első fázisa a fizikai rétegre összpontosít, azon belül is a fizikai rétegbeli kompatibilitásra, mely az adatcsomagok problémamentes átviteléért felelős a bázisállomás és az előfizetői állomások között.

A tesztek során használt termékek a következők: Alvarion BreezeMAX, Airspan AS.MAX termékcsalád és Redline RedMAX. A tesztek célja a WiMAX fórum [3] hivatalos tanúsítási folyamatának támogatása, mely 2005 júliusában megkezdődött. A tesztek először a 3,5 GHz-es frekvenciatartományban zajlanak és a TDD, illetve az FDD működést vizsgálják 3,5 MHz-es csatornaszélességgel.

A tesztelési folyamat következő lépésének középpontjába a MAC réteget állítják. További törekvés a tesztelés bővítése a WiMAX tanúsítási tesztkészlettel.

Az együttműködés abból a szempontból is nagyon hasznos, mivel ha egy hálózatüzemeltető több gyártótól is vásárolhat eszközöket, így árverseny alakul ki, mely segíthet a WiMAX rendszerek tömeges piaci elterjesztésének felgyorsításában.

## 7. Összefoglalás

Cikkünkben áttekintettük az IEEE 802.x szabvány-családot, majd bemutattuk a kapcsolatot a 802.16-tal. Ismertettük ezen szabvány célkitűzéseit, részletesebben kitértünk a MAC réteg felépítésére, az egyes alrétegek funkcióinak ismertetésére. Bemutattuk a szabványban specifikált különböző fizikai rétegbeli megoldások számára definiált frekvenciasávokat, illetve a 802.16 szabvány különböző átdolgozásait. Végül röviden bemutattuk a WiMAX szabványt, és részletesebben kitértünk a különféle hálózati elemek közötti, illetve a gyártók közötti együttműködés fontosságára.

### Irodalom

- [1] IEEE Standard for local and metropolitan area networks, Part 16:  
Air Interface for Fixed Broadband Wireless Networks,  
URL: <http://ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>
- [2] IEEE Standard for local and metropolitan area networks, Part 16:  
Air Interface for Fixed Broadband Wireless Networks,  
Amend. 2: Medium Access Control Modifications and  
Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz,  
URL: <http://ieee802.org/16/pubs/80216a-2003.html>
- [3] <http://www.wimaxforum.org>
- [4] <http://www.redlinecommunications.com>
- [5] <http://www.alvarion.com>
- [6] <http://www.airspan.com>

# 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 koncentrálnak.

## 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 sávotól 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 vívőfrekvenciákat 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 hozzáférése alapján. 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 antena 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

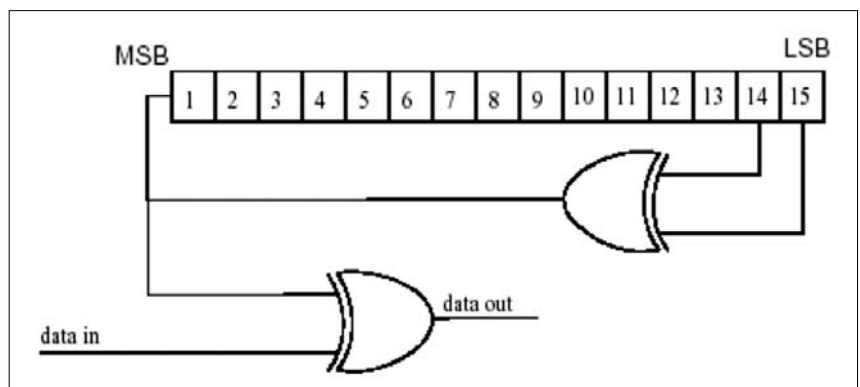
működésre tervezett rendszer jól teljesít NLOS terjedési viszonyok esetén. A WirelessMAN-OFDM rendszerprofil a már említett MAC, RF és teljesítményosztály profilból, a duplexálási technikából, és a most bemutatásra kerülő fizikai réteg profilból áll.

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 terminálként 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 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 1,25 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<sup>-6</sup>-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 alakítható 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; sávszélesség 1,75 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} keretek
profP3_3.5	WirelessMAN-OFDM 3.5 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sávszélesség 3,5 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{1} keretek
profP3_7	WirelessMAN-OFDM 7 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sávszélesség 7 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{1} keretek
profP3_3	WirelessMAN-OFDM 3 MHz fizikai profil	Csak engedélyköteles sávban használható; sávszélesség 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; sávszélesség 5,5 MHz; 64QAM kötelező; PMP{2,4,6} Mesh{4} keretek
profP3_10	WirelessHUMAN(-OFDM) 10 MHz fizikai profil	Csak szabad sávban használható; sávszélesség 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 részcsatornára bontják, amelyeket részcsatornának neveznek. Downlink irányban a részcsatornákat különböző vevők-höz (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 szimbólumonként. Downlink PUSC elosztott alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát két OFDMA szimbólumonként jelent. Uplink PUSC elosztott alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát három OFDMA szimbólumonként jelent. Szomszédos alcsatorna használat esetén egy slot egy alcsatornát jelent OFDMA szimbólumonként 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 megegyeznie, 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.

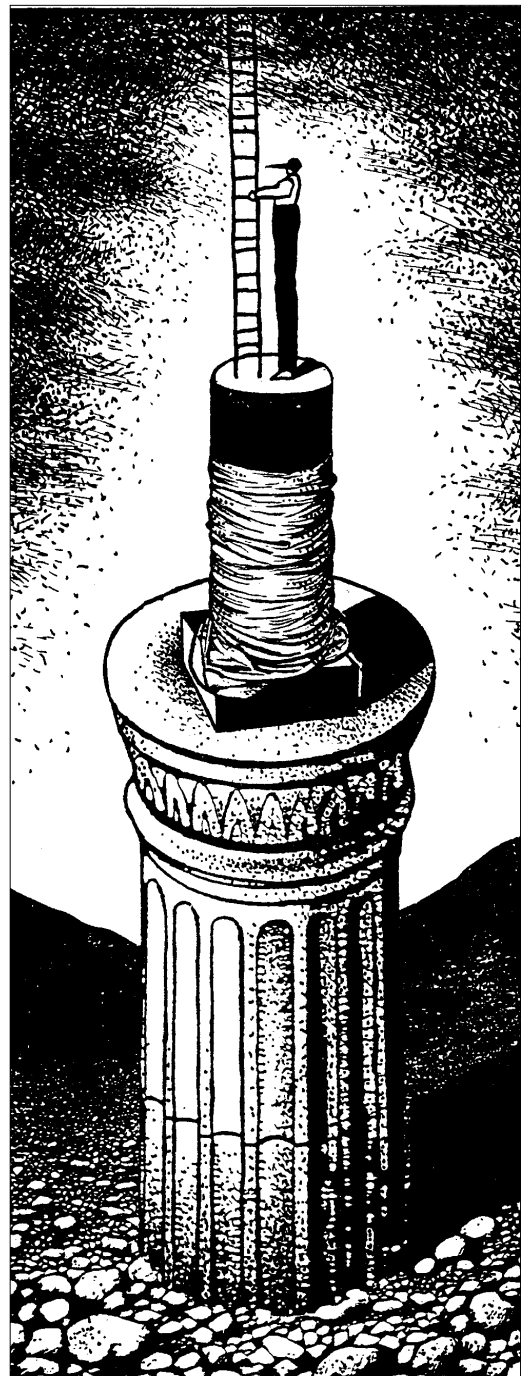
Végezetül meg kell említenünk a további hatósági szabályozási kérdéseket is. Ezek közül néhányat kiemelnénk ki. Az egyik hogy a 3,5 GHz-es sáv Magyarországon jelenleg nem használható backhaul (pont-pont) alkalmazásokhoz, és csak az FDD duplexálási mód alkalmazása engedélyezett. Az ide vonatkozó szabályok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





# Az IEEE 802.16 szabvány közeghozzáférési (MAC) rétege

SZALAY MÁTÉ, GÓDOR GYŐZŐ, IMRE SÁNDOR

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék  
{szalaym, godorgy, imre}@hit.bme.hu

**Kulcsszavak:** WiMAX, MAC, közeghozzáférés, IEEE 802.16

Cikkünkben az IEEE 802.16 szabvány közeghozzáférési rétegét mutatjuk be. A referenciamodell bemutatása után részletesen kitérünk a szolgáltatás specifikus alrétegre, a közös alrétegre és a biztonsági alrétegre. A cikk a 802.16-2004 szabvány alapján készült [1].

## 1. Bevezetés

### 1.1. A 802.16 szabvány

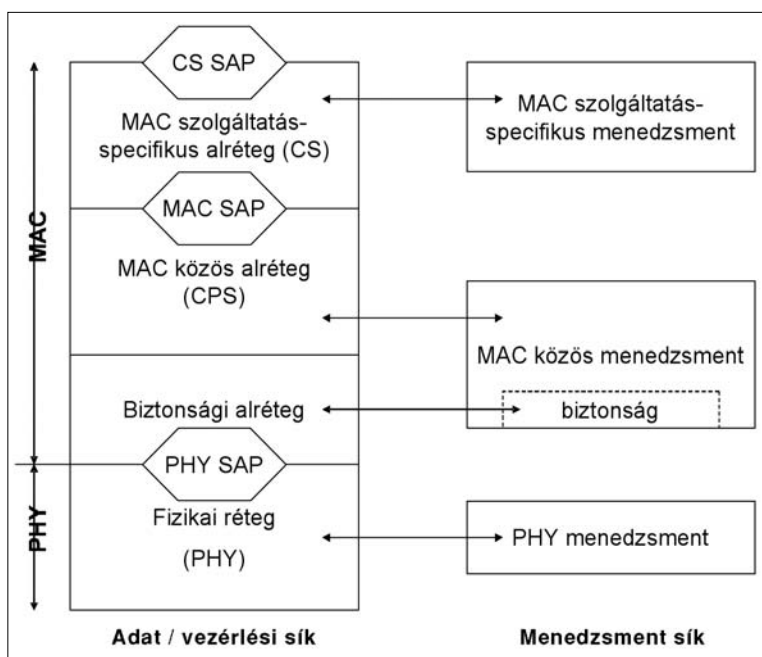
Az IEEE 802.16 szabvány egy nagysebességű, nagy hatótávolságú, vezeték-nélküli telekommunikációs protokoll BWA (Broadband Wireless Access) fizikai és közeghozzáférési szintjeinek definícióját tartalmazza.

A 802.16 ugyanúgy közeghozzáférési és fizikai rétegeket definiál, mint a 802.3 (Ethernet), a 802.5 (Token ring) vagy a 802.11 (WLAN). A 802.16 szabvány helyét a többi IEEE 802 szabvány között az 1. ábra mutatja.

### 1.2. Referenciamodell

A 802.16 szabvány referenciamodelljét a 2. ábra mutatja. A modell adat/vezérlési és menedzsment síkra osztható. A 802.16 szabvány csak az adat/vezérlési síkot definiálja, a menedzsment síkkal nem foglalkozik.

Az adat/vezérlési sík két rétegből áll: a fizikai (PHY) rétegből, és a fölötte elhelyezkedő közeghozzáférési (MAC) rétegből. Ez a cikk a közeghozzáférési réteget mutatja részletesen. A fizikai réteg a PHY SAP-on (Service Access Point, szolgálat-elérési pont) keresztül nyújt szolgáltatásokat a közeghozzáférési réteg számára.



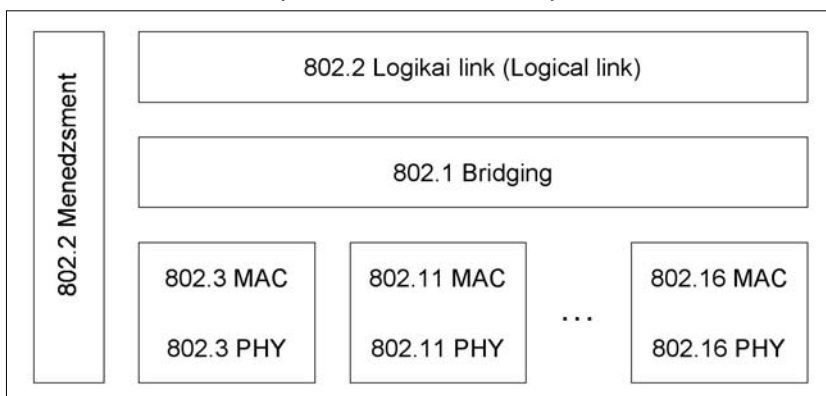
2. ábra A 802.16 referenciamodell

### 1.3. A MAC réteg felépítése

A közeghozzáférési réteg tovább bontható három alrétegre. Ezek: a legfelül elhelyezkedő szolgáltatás-függő konvergencia-alréteg (CS), a közös-alréteg (CPS), és a biztonsági-alréteg (Security).

A szolgáltatás-függő konvergencia alréteg a CS SAP-on keresztül, felsőbb rétegektől érkező külső adatokat képezi le MAC SDU-kra, amelyeket a közös alréteg kap meg a MAC SAP-on keresztül. Különböző protokollokhoz különböző konvergencia alréteg specifikáció tartozik, tehát különböző formátumú MAC SDU-k keletkeznek. A közös alréteg nem értelmezi a kapott MAC SDU-kat, hanem PDU-ként (Protocol Data Unit) tekint rájuk. A közös alréteg olyan feladatokat lát el, mint sáv szélesség allokálás, kapcsolat-felépítés és kezelés, ütemezés.

1. ábra IEEE 802.16 helye az IEEE 802 szabványok közt



A MAC réteg legalul elhelyezkedő alrétege a biztonsági alréteg, amely kulcskezelési és adattitkosítási funkciókat valósít meg.

Az alrétegeket a következőkben részletesen fogjuk tárgyalni.

## 2. A szolgáltatás-specifikus konvergencia alréteg

A szolgáltatás-specifikus konvergencia alréteg közvetlenül a MAC közös-alréteg (MAC CPS) fölött helyezkedik el, és a MAC-SAP-on keresztül a közös-alréteg által nyújtott szolgáltatásokat használja. A konvergencia alréteg a következő feladatokért felel:

- fogadja a magasabb rétegből érkező PDU-kat;
- osztályozza a magasabb rétegekből érkező PDU-kat;
- ha az osztályozás alapján szükséges, akkor feldolgozza a magasabb rétegből érkező PDU-kat;
- a CS-PDU-kat eljuttatja a megfelelő MAC-SAP-hoz (szolgálat-elérési ponthoz);
- fogadja a CS rétegbeli partner entitásoktól érkező CS-PDU-kat.

Eddig két konkrét konvergencia-alréteg definíciót tartalmaz a szabvány, de ez természetesen bővíthet a jövőben. A jelenleg definiált két CS a következő:

- ATM (aszinkron átviteli mód) konvergencia-alréteg
- Csomag (packet) konvergencia-alréteg

Ezt a két közös-alréteget mutatjuk be röviden a következőkben.

### 2.1. Az ATM konvergencia-alréteg

Az ATM konvergencia-alréteg (CS) egy logikai interfész, amely a különböző ATM szolgáltatásokat a MAC-CPS SAP-hoz rendeli. Az ATM-CS a fölötté elhelyezkedő ATM-rétegtől ATM-cellákat fogad, osztályozza azokat, esetleg fejléc-tömörítést hajt végre, és az így keletkezett PDU-t eljuttatja a megfelelő MAC-SAP-hoz. Az ATM-CS egyaránt képes SVC, PVC és soft-PVC ATM kapcsolatok kezelésére.

Mivel az ATM virtuális kapcsolatok az ATM szabványnak megfelelően épülnek fel, a 802.16 szabvány nem definiál szolgáltatási primitíveket az ATM konvergencia alrétegehez.

A jobb sávszélesség-kihasználás érdekében egyrészt lehetőség van a szállított ATM cellák fejlécének tömörítésére, másrészt egy MAC PDU szállíthat több, ugyanahhoz a kapcsolathoz tartozó ATM cellát.

### 2.2. A csomag konvergencia-alréteg

A csomag konvergencia-alréteg a következő feladatokát látja el:

- osztályozza a felsőbb rétegből érkező PDU-kat;
- megállapítja, hogy melyik kapcsolathoz tartoznak az érkező PDU-k;
- ha szükséges, fejléc-tömörítést hajt végre;
- az így keletkezett CS-PDU-kat eljuttatja a megfelelő MAC-SAP-hoz;

- fogadja a más MAC-SAP-októl érkező CS-PDU-kat;
- visszaállítja az esetlegesen elhagyott fejléc-mezőket.

A csomag konvergencia-alréteg használható tetszőleges csomagkapcsolt protokoll továbbítására, úgy mint IP, PPP, vagy 802.3 Ethernet.

Ugyanúgy, mint az ATM konvergencia-alréteg esetében, itt is lehetőség van a szállított csomag fejlécének tömörítésére.

### 2.3. A MAC SAP

A konvergencia-alréteg és a közös-alréteg közötti interfész egy logikai interfész, az itt definiált protokoll-primitívek informatívak, azt mutatják meg, hogy milyen információk átadására van szükség a két alréteg között. A két réteg határán helyezkedik el a MAC-SAP (lásd 2. ábra).

A MAC SAP-on a szabvány a következő protokoll-primitíveket definiálja:

```
MAC_CREATE_SERVICE FLOW.request
MAC_CREATE_SERVICE FLOW.indication
MAC_CREATE_SERVICE FLOW.response
MAC_CREATE_SERVICE FLOW.confirmation
MAC_CHANGE_SERVICE FLOW.request
MAC_CHANGE_SERVICE FLOW.indication
MAC_CHANGE_SERVICE FLOW.response
MAC_CHANGE_SERVICE FLOW.confirmation
MAC_TERMINATE_SERVICE FLOW.request
MAC_TERMINATE_SERVICE FLOW.indication
MAC_TERMINATE_SERVICE FLOW.response
MAC_TERMINATE_SERVICE FLOW.confirmation
MAC_DATA.request
MAC_DATA.indication
```

A MAC\_CREATE... primitíveket egy új kapcsolat felépítésekor használjuk. A MAC\_CHANGE... primitíveket egy kapcsolat paramétereinek megváltoztatására használjuk, a MAC\_TERMINATE... primitíveket pedig a kapcsolat lebontására. A változtatást és lebontást szintén kezdeményezheti a bázisállomás és az előfizetői állomás is. Adatáramlás a MAC\_DATA... primitívek segítségével történhet.

## 3. Közös-alréteg

Egy hálózatnak, mely megosztott közeget használ, szüksége van egy hatékony közeghozzáférési mechanizmusra. A 802.16 szabvány kétirányú pont-multipont (PMP) és Mesh topológiájú vezeték nélküli hálózatokat definiál. Ebben az esetben a közeg maga a tér, melyben a rádióhullámok terjednek.

PMP esetben a downlink irány a bázisállomástól (BS) az előfizetői állomás (SS) felé mutató irány, a másik pedig az uplink irány. A 802.16 szabvány vezeték nélküli kapcsolatot definiál, ahol középen a bázisállomás helyezkedik el, illetve szektor-antennák segítségével párhuzamosan szolgálja ki a független szektorokat. Egy

adott frekvencia csatornát és egy antenna szektort tekintve az összes előfizetői állomás ugyanazt az adást veszi. Egyedül csak a bázisállomás adhat ebben az irányban, így nem kell szinkronizáljon más állomásokkal, egyedül csak az esetleges idő osztású duplexálást (TDD) kell figyelembe vegye, mely meghatározza, hogy egy időszelvet milyen módon kell továbbosztani uplink és downlink adási periódusokra. Downlink irányban tehát általában broadcast üzenettovábbítás történik.

Uplink irányban az előfizetői állomások igény alapján osztoznak a kapacitáson, melyet az adott szektoron belül a bázisállomás oszt szét köztük. A bázisállomás lekérdezi az egységeket, hogy mekkora uplink irányú sáv szélességre van szükségük. Az előfizetői egység sáv szélességet kérhet a bázisállomástól, mire az sáv szélességet oszt ki neki.

Az egy címzethez szóló üzeneteken kívül lehetőség van címzettek egy csoportjához címzett (multicast) és mindenkinek címzett (broadcast) üzenetek küldésére is.

A szabvány definiál egy másik topológiát is, a Mesh topológiát. Ennek megvalósítása opcionális a 802.16 szabvány alapján. A fő különbség a PMP esethez képest az, hogy míg PMP módban a forgalom csak a bázisállomás és az előfizetői egységek között zajlik, addig Mesh módban a forgalom más előfizetői állomásokon is keresztülhaladhat, illetve közvetlen kommunikáció is lehetséges két előfizetői egység között.

A MAC összeköttetés alapú. A rendszerhez kapcsolódott előfizetői állomások minden forgalma úgynevezett kapcsolatokon keresztül történik. Egy felépített kapcsolat a típusától függően több-kevesebb karbantartást igényelhet. Az IP-alapú kapcsolatoknak például magas a karbantartás igénye, mert tipikusan burst-ösek, és a csomagok szét darabolását és összerakását (fragmentation) is kezelni kell. A kapcsolatok paramétereiben történő változást, valamint a kapcsolatok befejezését a bázisállomás és az előfizetői állomás is kezdeményezheti.

### 3.1. Címzés

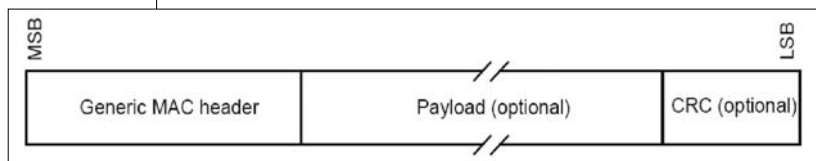
Az IEEE 802-2001 szabványnak megfelelően minden előfizetői állomásnak van egy 48 bites, globálisan egyedi azonosítója (MAC address). PMP esetben ezt az egyedi azonosítót a regisztrációs folyamatnál, az előfizetői egységgel való kapcsolat kiépítéséhez használják. Szerepet játszik még a hitelesítési folyamatnál is, ahol a bázisállomás és az előfizetői állomás egymás identitását ellenőrzik. Mesh módban ezt a címet a hálózatba való belépés folyamán, illetve az adott csomópont és a hálózat közötti kölcsönös hitelesítési folyamat során használják.

A kapcsolatokat egy 16 bites kapcsolat-azonosító (CID) azonosítja. Az előfizetői állomás inicializálásakor irányonként három kapcsolat épül fel a bázisállomás és az előfizetői állomás között. A három különböző kapcsolatra azért van szükség, mert különböző menedzsment-üzeneteknek különböző QoS-re van szükségük.

Az előfizetői állomás és a bázisállomás az alap-kapcsolaton (basic connection) rövid és késleltetés-érzékeny üzeneteket váltanak egymással, az elsődleges menedzsment-kapcsolaton (primary management connection) hosszabb, és késleltetés-tűrőbb üzeneteket, a másodlagos menedzsment-kapcsolaton (secondary management connection) pedig késleltetés-tűrő, valamilyen külső szabványnak megfelelő üzeneteket. A harmadik csoportba tartozhatnak például a DHCP vagy SNMP üzenetek.

Mesh mód esetén az egyik előfizetői állomás bázisállomásként viselkedik a többi előfizetői állomás felé. Ezt az előfizetői állomást nevezzük „Mesh-BS”-nek. Ha a hitelesítés megtörtént, a többi előfizetői állomás kap egy 16 bites csomópont azonosítót (Node ID) válaszként a Mesh BS-hez küldött kérésre. A csomópontok azonosítása a normál működés folyamán a Node ID-k segítségével történik. A Node ID a Mesh alfejlécben továbbítódik, mely az általános MAC fejlécbet követi mind az unicast, mind pedig a broadcast üzenetek esetén.

A szomszédos csomópontok címzésére egy 8 bites link azonosítót (Link ID) kell használni. Minden egyes csomópontnak ki kell jelölnie egy azonosítót minden összeköttetéshez, mely valamelyik szomszédjával létesült. A Link ID-k a teljes kapcsolatlétesítési folyamat alatt továbbítódnak, mindaddig, míg a szomszédos csomópontok új összeköttetéseket alakítanak ki egymással. A Link ID unicast üzenetként továbbítódik a CID részeként az általános MAC fejlécben.



3. ábra A MAC PDU formátum

### 3.2. A MAC PDU formátum

Minden MAC PDU a 3. ábrán látható struktúrájú. Minden egyes PDU egy fix hosszúságú általános MAC fejléccel (Generic MAC header) kezdődik. A fejlécbet a MAC PDU Payload mezője követheti. Ha ez létezik, akkor a Payload nulla vagy több alfejlécből, nulla vagy több MAC SDU-ból és/vagy azok részeiből kell álljon. A payload információ változó hosszúságú lehet, így egy MAC PDU bájtok változó számát reprezentálhatja. Ez teszi lehetővé, hogy a MAC alagút technikával továbbítson különféle magasabb szintű forgalmi típusokat ezen üzenetek formátumainak, vagy bit-mintáinak ismerete nélkül. A MAC PDU végül tartalmazhat egy CRC mezőt is.

A szabvány kétféle MAC header formátumot definiál. Az első az általános MAC fejléc (Generic MAC Header), mely minden MAC PDU legelején található és MAC vezérlési üzeneteket vagy CS adatokat tartalmaz. A második header formátum a sáv szélesség kérés fejléc (Bandwidth Request Header), melyet további sáv szélesség igénylőkor használnak. Azt, hogy éppen melyik típusú fejléccel van szó, a fejlécben található HT (Header Type) bit jelzi: ha a bit 0 értékű, akkor Generic Header, ha 1 értékű, akkor Bandwidth Request Header.

4. ábra  
A MAC PDU szerkesztésének folyamata

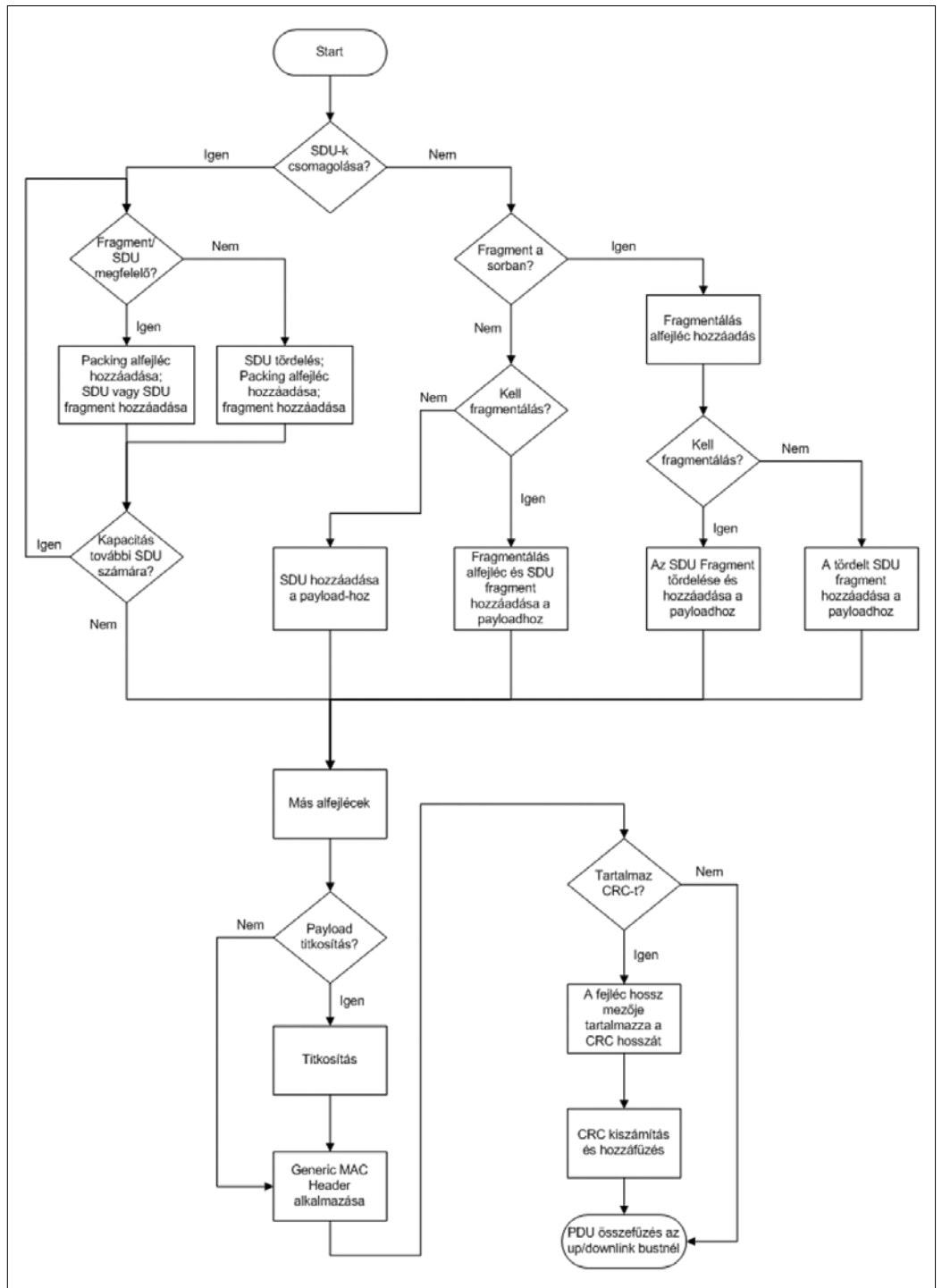
Mind az uplink, mind pedig a downlink irányban egy egyszerű átvitelbe összerúzhatóak összetett MAC PDU-k. Egy uplink burst átvitel esetén az összetett MAC PDU-t az 5. ábra ismerteti.

Minden egyes MAC PDU egy egyedi CID (Connection Identifier) azonosítóval van ellátva, amely azt jelzi, hogy melyik kapcsolathoz tartoznak. A CID alapján a vételi oldalon a MAC entitás össze tudja állítani a MAC SDU-t a fogadott MAC PDU-kból, és továbbítani tudja a felsőbb rétegek felé.

**3.3. Fragmentáció**

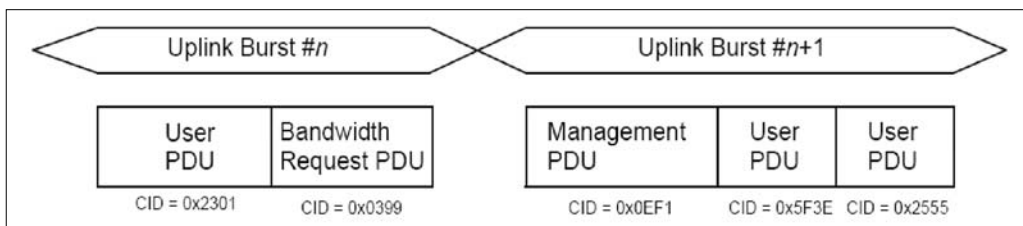
Fragmentációnak azt a folyamatot nevezzük, amikor egy MAC SDU egynél több MAC PDU-ba van szétosztva. Így a rendelkezésre álló sávszélesség hatékonyabb kihasználására, illetve egy adott kapcsolat esetén a QoS paraméterek biztosításának elősegítésére nyílik lehetőség. A szabvány a fragmentáció és a visszaállítás funkciókat kötelezően írja elő, vagyis minden eszközben implementálva kell, legyen.

Egy összeköttetésen a töredék forgalom (fragment traffic) engedélyezés akkor történik meg, mikor a MAC SAP



felépíti a kapcsolatot. A fragmentációt downlink irányban a BS, míg uplink irányban az SS kezdeményezi.

A fragmentek egy todalékkal (Fragmentation Control) jelzik helyzetüket az éppen aktuális SDU-ban, az 1. táblázatnak megfelelően.



5. ábra  
MAC PDU összefűzés

Fragment	Fragmentation Control (FC)
Első fragment	10
További fragmentek	11
Utolsó fragment	01
Fragmentáció nélkül	00

1. táblázat Fragmentálási szabályok

### 3.4. Ütemezés

Minden egyes kapcsolathoz társul egy egyszerű adatszolgáltatás, illetve minden adatszolgáltatáshoz QoS paraméterek egy halmaza kapcsolódik, mely meghatározza az adatok viselkedését. Ezen paraméterek kezelése a DSA (Dynamic Service Addition) és a DSC (Dynamic Service Change) üzenetek segítségével történik. A 802.16 szabvány négy különböző ütemezési mechanizmust definiál: Unsolicited Grant Service (UGS), Real-time Polling Service (rtPS), Non-real-time Polling Service (nrtPS) és Best Effort Service (BE).

#### Unsolicited Grant Service (UGS)

Ennél az ütemezési mechanizmusnál az előfizetői állomás kérés nélkül fix méretű engedélyt (grant) kap előre definiált szabályos időközönként. A lekérdezések megtakarításával ez a mechanizmus meghatározott időközönként fix méretű adatcsomagot igénylő szolgáltatásokhoz megfelelő. Ilyenek például a T1/E1 vagy a VoIP, ha nem alkalmazunk csend-elnyomást.

#### Real-time Polling Service (rtPS)

Ez a mechanizmus a real-time, de változó bitsebességű adatfolyamokhoz megfelelő. Ilyen például az MPEG videó-folyam. Az előfizetői állomás előre definiált fix időközönként igényelhet grant-et, melynek méretét minden alkalommal az előfizetői állomás határozhatja meg. Ennek az ütemezési mechanizmusnak valamivel nagyobb a jelzési overheadje, mint az UGS mechanizmusnak.

#### Non-real-time Polling Service (nrtPS)

Ez a mechanizmus a nem valós idejű, változó sávszélesség-igényű adatfolyamok számára megfelelő. Ilyen például az FTP fájl-átvitel. Az nrtPS osztályhoz tartozó CID-eket a bázisállomás tipikusan egy másodpercenként (vagy gyakrabban) kérdezi le. Ez az időköz valós idejű folyamatok számára nem lenne megfelelő.

#### Best Effort Service (BE)

Ez a mechanizmus a best-effort típusú forgalomhoz illeszkedik. Az uplink, vagyis felfelé-irányú ütemezés célja a poll/ grant mechanizmus hatékonyságának növelése. Például nyilván nem hatékony a hosszú ideig inaktív előfizetői állomás folyamatos, gyakori lekérdezése (polling). A megfelelő ütemezés, és a hozzá tartozó megfelelő QoS paraméterek beállításával elérhető, hogy a felfelé irányú forgalom késleltetése és sávszélessége megfeleljen az elvárásoknak, és a lekérdezések (polling) és engedélyezések (grant) a megfelelő időben érkezzenek. A 2. táblázat ismerteti az uplink irányú ütemezési megoldásokat.

Ütemezési mechanizmus	PiggyBack kérés	Sávszélesség „lopás”	Lekérdezés
UGS	Nem lehetséges	Nem lehetséges	A PM bit segítségével kérhet unicast lekérdezést nem-UGS folyamat számára. Egyébként nincs lekérdezés.
rtPS	Lehetséges	Lehetséges	Csak unicast lekérdezés
nrtPS	Lehetséges	Lehetséges	Átviteli/kéresi stratégián keresztüli unicast lekérdezés esetén korlátozható egy szolgáltatás folyam; máskülönben minden típusú lekérdezés lehetséges.
BE	Lehetséges	Lehetséges	Minden típusú lekérdezés lehetséges

2. táblázat Ütemezési mechanizmusok uplink irányban

### 3.5. Sávszélesség allokálás

Ahogy már írtuk, a hálózatba való belépés során, illetve inicializáláskor minden előfizetői állomáshoz az előfizetői állomás és a bázisállomás között irányonként három kapcsolat épül fel. Ezen kapcsolatok vezérlési üzenetek fogadására és továbbítására szolgálnak. A kapcsolat-párok QoS szintek segítségével vannak elkülönítve egymástól, ezáltal lehetővé téve, hogy a különböző kapcsolatok más-más MAC vezérlési forgalmat bonyolítsanak.

Ha egy kapcsolaton a sávszélesség növelésére van szükség, akkor ezt az igényt az előfizetői állomásnak valamilyen módon jeleznie kell a bázisállomás felé. Az ilyen sávszélesség kérések lehetnek inkrementálisak (incremental) vagy aggregáltak (aggregate). A sávszélesség kérés fejlécének Type mezője tartalmazza, hogy milyen fajta kérés érkezett. Az inkrementális kérés azt tartalmazza, hogy az előfizetői állomás mekkora sávszélesség növelést/csökkentést szeretne a kapcsolat eredeti sávszélességéhez képest. Aggregált kérés esetén az üzenet azt tartalmazza, hogy mekkora legyen a kapcsolat sávszélessége (a régi sávszélesség helyett). Hogy a mechanizmus önkorrigáló legyen, az előfizetői állomások kötelesek bizonyos időközönként aggregált sávszélesség-kérést küldeni.

A sávszélesség kérésre (request) a bázisállomás sávszélességet ad (grant) az előfizetői állomásnak. A sávszélesség-kérések kapcsolatra vonatkoznak, míg a sávszélességet az előfizetői állomás egyben kapja (tehát nem kapcsolatonként). Előfordulhat, hogy az előfizetői állomás kisebb sávszélességet kap, mint amit kért. Ennek oka például az ütemező döntése, vagy a kérés üzenet (request) elveszése lehet. Fontos azonban, hogy ha az előfizetői állomás kisebb sávszélességet kapna a kértnél, akkor nem ismeri ennek okát. Ha kisebb sávszélességet kapott, akkor vagy újabb kéréssel próbálkozik, vagy eldobja a feldolgozás alatt lévő SDU-t.

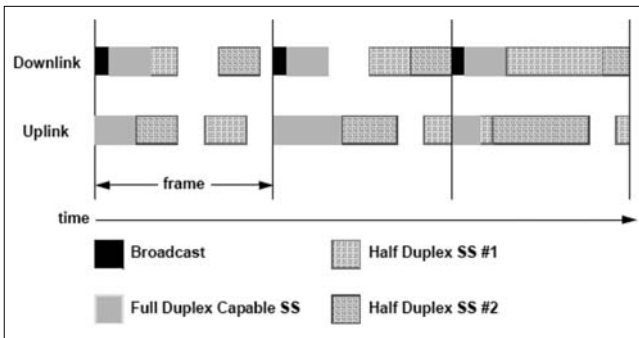
A lekérdezés (polling) tulajdonképpen az a mechanizmus, amikor a bázisállomás sávszélességet allokál az előfizetői állomásnak azzal a céllal, hogy sávszélesség igényt (request) küldhessen. A lekérdezés címezhető egy konkrét előfizetői állomásnak, de sávszélesség-hiány miatt előfordulhat, hogy a lekérdezést a bázisállomás egyszerre egy előfizetői-állomás csoporthoz (multicast), vagy a szektor összes előfizetői állomásához (broadcast) intézi.

### 3.6. A PHY réteg MAC rétegbeli támogatása

A MAC protokoll számos duplexálási technikát támogat. A duplexálási technika megválasztása hatással lehet bizonyos PHY paraméterekre.

#### FDD

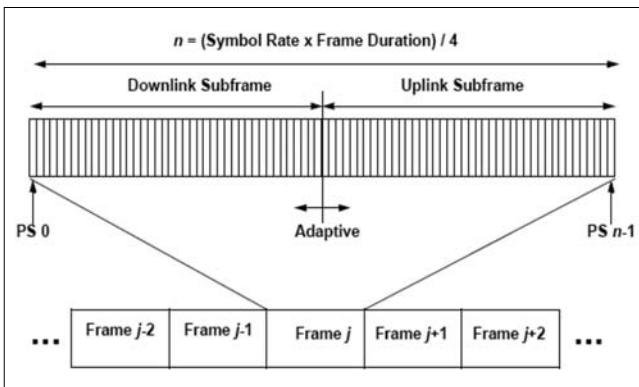
Ebben az esetben az uplink és a downlink csatornák különböző frekvenciákra vannak szétválasztva. A burst-ökben való adattovábbítás lehetővé teszi az egy rendszeren belüli különféle modulációs technikák alkalmazását, illetve engedélyezi a rendszernek a full-duplex SS (adás és vétel történhet egyszerre is) és a half-duplex SS (egyszerre csak az egyik történhet) átvitel együttes alkalmazását. A 6. ábra példát mutat az FDD keretre.



6. ábra Példa a frekvencia osztásos duplexálásra

#### TDD

Ebben az esetben az uplink és a downlink átvitel azonos frekvencián történik, de időben szét vannak választva, mint ahogy ez a 7. ábrán látható. A TDD keretnek egy fix időtartam van definiálva, ami tartalmaz egy downlink és egy uplink alkeretet.



7. ábra Egy TDD keret felépítése

A downlink burst és a következő uplink burst között található rés, a TTG (transmit/receive transition gap), mely időt biztosít arra, hogy a BS át tudjon kapcsolni adási üzemmódból vételibe, illetve az SS át tudjon kapcsolni vételből adási módba. Ez alatt az idő alatt nincs modulált adatátvitel a BS és az SS között. A TTG befejeztével a BS vevő figyelni fogja, mikor jön az uplink burst első szimbóluma.

Az RTG (receive/transmit transition gap) résznek hasonló a szerepe, mint a TTG résznek. Ezen időzés alatt a BS átkapcsol vételi üzemmódból adásiba, illetve az SS adásból vételibe. Az időzés alatt szintén nem megy

modulált adat, és az időzés befejeztével az SS vevők figyelik a QPSK modulált adat első szimbólumát a downlink burst-ben.

#### Keretszervezés

Ez a PHY specifikáció keretszervezéses csomagtovábbítással működik. Minden egyes keretben található egy downlink és egy uplink alkeret. A downlink alkeret a keretszinkronizáció és a vezérlés számára elengedhetetlenül szükséges információkkal kezdődik. TDD esetben a downlink alkeret az első, ezt követi az uplink alkeret. FDD esetében az uplink adattovábbítások egyidejűleg történnek a downlink kerettel. Minden egyes SS meg kell próbálja venni a downlink keret összes részét, kivéve azon burst-öket is, melyek burstprofilja vagy nincs implementálva az SS-ben, vagy kisebb robusztussággal bír, mint az SS épp működésben lévő burstprofilja. A half-duplex SS-eknek nem kell megkísérlni a downlink részeit hallgatni, ha az egybeesik a kiosztott uplink adatátvitelükkel.

## 4. A biztonsági alrétteg

A biztonsági alrétteg, a 802.16 szabvány MAC rétegének legalsó alréttege kettős feladatot lát el. Egyrészt biztosítja az adatok titkosságát a bázisállomást és az előfizetői állomást összekötő linken. Ezáltal az előfizető biztos lehet, hogy forgalma nem kerül jogosulatlan harmadik fél kezébe. Másrészt a megszemélyesítéses támadások (szolgáltatás lopás, „service theft”) ellen is véd. Ez mind az előfizetőnek, mind pedig a szolgáltatónak az érdeke.

Ha az előfizetői állomás a képességek egyeztetésekor azt közli, hogy nem támogatja a 802.16 biztonsági mechanizmusokat, akkor a bázisállomás a beállításainak megfelelően vagy a hitelesítési lépés kihagyásával hitelesítettnek tekinti az előfizetői állomást (nyitott rendszer), vagy megtagadja a szolgáltatást az előfizetői állomástól. Egyik esetben sincs a linken se kulcscsere, se titkosítás.

### 4.1. Biztonsági protokollok

A biztonsági alrétteg két protokollból áll:

- Egy encapsulation (beágyazó) protokollból, amely adattitkosító- és hitelesítő-algoritmusból, valamint az ezek alkalmazására vonatkozó szabályokból áll.

- Egy kulcsmenedzsment protokollból (PKM, privacy key management), amely a kulcsok bázisállomástól az előfizetői állomáshoz való eljuttatására, valamint egyéb kulcskezelési feladatok ellátására szolgál.

### 4.2. Csomagtitkosítás

A csomagok titkosítása a biztonsági alrétteg feladata. A MAC fejléc tartalmaz a titkosítással kapcsolatos mezőket, tehát nincs külön – a titkosítással kapcsolatos – fejléc.

A csomagtitkosítás a MAC PDU-ra vonatkozik, a MAC-fejléc nincs titkosítva, a MAC menedzsment üzenetek tehát titkosítás nélkül kerülnek továbbításra. A csomag-

titkosítás DES vagy AES algoritmussal történik, de a szabvány „nyitott” olyan értelemben, hogy csomagtitkosításra használt algoritmusok köre a jövőben bővíthet.

### 4.3. Kulcsmenedzsment

A kulcsmenedzsment protokoll segítségével vizsgálja meg a bázisállomás, hogy az előfizetői állomás jogosult-e a szolgáltatás igénybevételére, valamit elvégzi a kulcs eljuttatását az előfizetői állomáshoz. Lehetőség van adott időközönként a jogosultságok újra-ellenőrzésére, és a kulcsok frissítésére.

A kulcsmenedzsment protokoll az IETF RFC 3280-ban [2] definiált X.509 tanúsítványokat, RSA nyilvános kulcsú titkosítást, és más erős szimmetrikus-kulcsú titkosító eljárásokat (3DES, AES) használ. Az algoritmusoknak ez, a kulcsmenedzsmentben használt köre is bővíthet a jövőben.

A PKM kulcsmenedzsment protokoll kliens-szerver architektúrát követ. A bázisállomás, a kliens, kulcs-anyagot (keying material) kér a szervertől, vagyis a bázisállomástól. A PKM kulcsmenedzsment protokoll MAC-menedzsment üzeneteket használ.

A PKM protokoll úgy működik, hogy első lépésben nyilvános kulcsú kriptográfiai algoritmusok segítségével egy osztott titkot (shared secret) generál a bázisállomás és az előfizetői állomás, majd a forgalom-titkosító kulcsokat (TEK, traffic encryption key) ennek az osztott titoknak a felhasználásával, szimmetrikus kulcsú algoritmusok használatával cserélik ki. Ennek a megoldásnak az az előnye, hogy a forgalom-titkosító kulcsokat a rendkívül számításigényes nyilvános kulcsú algoritmusok használata nélkül tudják frissíteni.

A bázisállomás az előfizetői állomást a kezdeti jogosultság-ellenőrzéskor hitelesíti. Minden előfizetői állomásnak van egy X.509 tanúsítványa, amelyet a gyártója bocsátott ki, és programozott bele az eszközbe. Ez a tanúsítvány tartalmazza, vagyis egymáshoz rendeli az előfizetői állomás MAC-címét és nyilvános kulcsát. A hitelesítés úgy történik, hogy az előfizetői állomás elküldi a tanúsítványát a bázisállomásnak. A bázisállomás a tanúsítvány ellenőrzése után a tanúsítványban található nyilvános kulccsal eltitkosít egy „authorization key”-t (AK), és elküldi az előfizetői állomásnak. Ezután a bázisállomás hozzárendeli a már hitelesített identitást azokhoz a szolgáltatásokhoz, melyeket jogosultságai alapján az előfizető elérhet. Ezzel a módszerrel azt is elkerüljük, hogy egy támadó egy jogos felhasználó nevében lépjen fel (megszemélyesítéses támadás), és azt is, hogy egy jogos felhasználó hamis identitással próbáljon meg fellépni a hálózat felé.

Minden előfizetői állomásnak vagy a gyártó által előre beprogramozott RSA titkos/nyilvános kulcspárja van, vagy egy mechanizmussal maga képes kulcspárok generálására. Ha előre beállított kulcspárral rendelkezik, akkor előre megkapja a nyilvános kulcsot tanúsító X.509 tanúsítványt a gyártótól. Ez a megoldás biztonsági problémákat vet fel, mert a gyártó ismerni fogja a titkos kulcsokat is, tetszőleges tanúsítványt ki tud állítani, és bármelyik eszközt meg tudja személyesíteni. Ha maga ge-

nerálja a kulcspárt, akkor ezt az első hitelesítési lépés előtt meg kell tennie, és utána valamilyen mechanizmus segítségével egy X.509 tanúsítványt kell beszereznie, amely igazolja a generált kulcsok hitelességét.

### 4.4. Security Association (SA)

Az SA biztonsággal kapcsolatos információk egy csoportja, amely egy bázisállomás és a hozzá tartozó egy vagy több előfizetői állomás közötti biztonságos kommunikációt segíti elő, a paramétereket, algoritmusokat írja le. A 802.16 szabvány háromféle SA típust definiál: elsődleges (primary), statikus (static) és dinamikus (dynamic). Az elsődleges SA-t az előfizetői állomás az inicializációs folyamatban építi ki. A statikus SA-kat a bázisállomás megtartja, a dinamikus SA-k pedig menet közben keletkeznek és szűnnek meg a különböző adatfolyamok keletkezésével és megszűnésével. Mind a statikus, mint a dinamikus SA-k tartozhatnak egyszerre több előfizetői állomáshoz is.

Az SA-kat SAID-k azonosítják. Minden előfizetői állomás, kapcsolódáskor felépít egy darab elsődleges SA-t, melynek SAID-je megegyezik az alap-kapcsolat (basic connection) CID-jével.

A további SA-khoz az előfizetői állomás kér kulcs-anyagot (például DES kulcs és inicializáló vektor (IV)) a bázisállomástól. A kulcs-anyagok korlátozott élettartama van, amelyet a bázisállomás a kulcs-anyaggal együtt eljuttat az előfizetői állomásnak. A kulcs-anyag élettartamának lejárása előtt az előfizetői állomásnak új kulcs-anyagot kell kérnie a bázisállomástól.

Hogy a titkosítás folyamatos maradjon, mindig két érvényes forgalom-titkosító kulcs van, melyek nem egyszerre járnak le, hanem átlapolóva. Mikor az egyik lejár, újat generálnak helyette, de addig a másik kulcsot lehet használni, így a szolgáltatás folyamatosága biztosított.

## 5. Összefoglalás

Cikkünkben áttekintettük az IEEE 802.16-2004 szabvány közeghozzáférési (MAC) rétegét. Alrétegenként haladva felülről lefelé, először bemutatuk a szolgáltatás specifikus alrétég ATM-hez illeszkedő és csomag típusú forgalomhoz illeszkedő változatait, majd a közös alrétegnél kitértünk a címzésre, MAC PDU felépítésére, az ütemezésre, illetve a fizikai réteg támogatására. Végül a biztonsági alrétég tárgyalásánál leírtuk, hogy hogyan működik az adattitkosítás és a kulcsmenedzsment.

### Irodalom

- [1] IEEE Standard for local and metropolitan area networks, Part 16:  
Air Interface for Fixed Broadband Wireless Networks,  
URL: <http://ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>
- [2] 3280 – Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile,  
URL: <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3280.html>

# Hatósági szabályozás szélessávú vezeték nélküli hozzáférési rendszerekre

GRAD JÁNOS

Nemzeti Hírközlési Hatóság  
grad@nhh.hu

**Kulcsszavak:** szélessávú vezeték nélküli hozzáférés, frekvenciagazdálkodás, RLAN, WMAN

A cikk a szélessávú vezeték nélküli hozzáférés EU- és hazai szabályozási kérdéseivel foglalkozik. Áttekinti a rádiós LAN és MAN rendszerek működésének feltételeit az 5 GHz-es frekvenciasávokban és foglalkozik a WiMAX-rendszerek működésével az engedélyköteles és engedélyhez nem kötött sávokban.

## 1. Bevezetés

Az Európai Unió Bizottsága 2005. július 17-i ülésén határozatot fogadott el az 5 GHz-es frekvenciasáv európai harmonizált használatáról szélessávú hozzáférési rendszerek céljára. A határozat szerint az EU tagállamoknak legkésőbb 2005. október 31-ig biztosítaniuk kell az 5 GHz-es frekvenciasáv két részében, nevezetesen

- az 5150–5350 MHz-es alsávban, valamint
- az 5470–5725 MHz-es alsávban.

Az alsáv kijelölésén túl a határozat megszabja a frekvenciasáv rádióhasználatának jellegzetes műszaki paramétereit is.

Az EU Bizottság indoklása kiemeli, hogy a fenti frekvenciasávok használhatóvá tétele kedvező lehetőséget teremt a szélessávú internetkapcsolat biztosítására és nyomatékosítja ennek össz-európai társadalmi fontosságát.

Miután az EU Bizottság határozatot hoz, a tagországokban két állami feladatot kell végrehajtani:

- a határozatot be kell illeszteni az ország jogrendjébe, valamint
- meg kell hozni az érdemi intézkedéseket a határozat végrehajtására.

Jelen esetben az első feladat jogi természetű és pontosan körvonalazható, mi a teendő. A Frekvenciasávok Nemzeti Felosztási Táblázatát meghatározó kormányrendelet soron következő módosításakor ebbe a rendeletbe be kell venni az EU határozat megnevezését és hivatkozási számát. Általában a második feladat sok nehézséget jelenteni, a magyarországi alkalmazás feltételeinek megteremtése. Most azonban szerencsés helyzetben vagyunk. Magyarország – hosszabb előkészületek után – már 2005. január 1-i hatállyal lehetővé tette a tárgyi rádióhasználatot pontosan olyan feltételek mellett, mint amilyeneket a mostani EU határozat előírt.

A 2. és 3. fejezetben áttekintjük az 5 GHz-es frekvenciasávra vonatkozó EU határozatot, illetve az azzal összhangban lévő hatályos magyar szabályozást. A 4. és 5. fejezetben azt tárgyaljuk, hogyan valósíthatók meg rádiós LAN és MAN rendszerek ezekben a frekvenciasáv-

vokban. A 6-8. fejezetekben specifikusan a WiMAX rendszerek működésével foglalkozunk, mind az engedélyhez nem kötött, mind az engedélyköteles sávokban. Cikkünk végén utalunk a továbblépés irányaira.

## 2. RLAN, WMAN, WiFi

Az EU által is szabályozott 5 GHz-es sáv alkalmazástechnikai szempontból két alsávra bontható. Az alsó alsávban az állomások közti rádióösszeköttetés beltérre korlátozódik, ez az RLAN sáv. A felső sáv rész alkalmazástechnikai szempontból még fontosabb, ez a kültéri alkalmazások sávja (habár a beltéri telepítés itt sincs megtiltva). Az 5 GHz-es sáv alkalmazástechnikáját az 1. táblázat mutatja. A sávhasználat egyúttal kitűnő lehetőséget nyújt a terminológia áttekintésére.

	5150 – 5350 MHz	5470 – 5725 MHz
Telepítés	csak beltéri	bel- és kültéri
Alkalmazás	RLAN	RLAN, ORLAN és WMAN

1. táblázat  
5 GHz-es EU-szabályozás alkalmazástechnikai áttekintése

A beltéri használat eszközei az RLAN-ok (Radio Local Area Network, rádiós helyi hálózat). Megjegyzendő, hogy RLAN helyett gyakran a WLAN (Wireless Local Area Network) megnevezés is használatos. A két megnevezés között nincs semmiféle tartalmi különbség, de a nemzetközi szabályozási szervezetek (Nemzetközi Távközlési Unió, Európai Unió stb.) dokumentumai konzervatív módon csakis az RLAN elnevezést használják. Ezt a megoldást követik a nemzeti szabályozási hatóságok is, így a magyar szabályozás dokumentumaiban az RLAN megnevezés jelenik meg.

Az RLAN egyik jellegzetes (de korántsem kizárólagos) megoldást az IEEE 802.11 szabványnak megfelelő rendszerek adják, amit gyakran WiFi néven említenek. Nincs akadálya, hogy egy adott RLAN megoldást kültérre telepítsenek. A kültéri RLAN-okat néha ORLAN-nak is nevezik (Outer RLAN, külső RLAN).



Az 5 GHz-es sávnyitás kiemelkedő jelentősége abban van, hogy lehetővé teszi kültéri állandóhelyű összeköttetések létesítését. Az ilyen összeköttetéseket ismert rövidítéssel FWA-nak nevezik (Fixed Wireless Access, állandóhelyű rádiós hozzáférés). Az FWA jellegzetes struktúrája a pont-multipont (p-mp) felépítés, azaz a rendszer központi állomásból és több (esetleg nagyszámú) terminál állomásból áll. Az FWA rövidítésben előforduló fontos szó az *Access* (hozzáférés), ami azt jelenti, hogy a terminál állomások egyúttal végfelhasználói állomások is (tipikusan a szolgáltatás előfizetői állomásai).

Az 5 GHz-es sávban a megadott műszaki szabályozás mellett létrehozott FWA rendszerek szokásos elnevezése WMAN (Wireless Metropolitan Access Network, Rádiós nagyvárosi hozzáférési hálózat). Természetesen arról szó sincs, hogy az ilyen rendszereket csak nagyvárosokban lehetne használni. Az elnevezés inkább abból a tényből fakad, hogy ilyen rendszereket a felhasználói igényeknek megfelelően legelőször nagyvárosokon belüli internet-ellátásra használták, méghozzá igen előnyösen és gazdaságilag nagyon rentábilis módon.

### 3. Az 5 GHz-es sáv EU szabályozása

Az EU által kötelezővé tett (és Magyarország által már jóval előbb bevezetett) szabályozás az 5 GHz-es sávra csupán néhány műszaki jellemzőt ad meg, ezen túlmenően teljesen szabad utat kínál a műszaki megoldásokhoz. A kötelező paramétereket a 2. táblázat foglalja össze.

A táblázatból látható, hogy műszaki szabályozás szempontjából az 5150–5350 MHz-es sávot további két részre kell bontani, így végeredményben a teljes vizsgált sáv három alsávból tevődik össze.

	5150 – 5350 MHz		5470 – 5725 MHz
	5150 – 5250	5250 – 5350	
<b>Telepítés</b>	csak beltéri		bel- és kültéri
<b>Max. EIRP</b>	200 mW	200 mW (TPC-vel) 100 mW (TPC nélkül)	1 W (TPC-vel) 0,5 W (TPC nélkül)
<b>Max. EIRP sűrűség</b>	0,25 mW/25 kHz	10 mW/1 MHz (TPC-vel) 5 mW/1 MHz (TPC nélkül)	50 mW/1 MHz (TPC-vel) 25 mW/1 MHz (TPC nélkül)
<b>DFS</b>	nem szükséges	Kötelező	
<b>TPC</b>	nem szükséges	ajánlott	

2. táblázat

Az 5 GHz-es EU szabályozás műszaki paramétereit

A táblázattal kapcsolatban néhány értelmező megjegyzést kell tenni.

(1) *EIRP* (Equivalent Isotropic Radiated Power, ekvivalens izotrop kisugárzott teljesítmény): Számítási mennyiség, közvetlenül nem mérhető. Egyenlő az antenna által lesugárzott összteljesítmény és az antennanyereség szorzatával.

(2) Az *EIRP* sűrűség maximális értékénél 0,25 mW/25 kHz azt jelenti, hogy bármely 25 kHz sáv szélességben az *EIRP*-nek kisebbnek kell lenni, mint 0,25 mW. Hasonló módon 10 mW/1 MHz jelentése az, hogy bármely 1 MHz sáv szélességben az *EIRP*-nek kisebbnek kell lenni, mint 10 mW. Habár a két idézett számérték (tehát 0,25 mW/25 kHz és 10 mW/1 MHz) megegyezik egymással, a két mennyiség fizikai értelmezése különböző.

(3) *DFS* (Dynamic Frequency Selection, dinamikus frekvencia kiválasztás): Az állomásokba beépített olyan hangolórendszer, ami érzékeli, hogy egy adott csatornán más rendszer (például radar) működik és az *RLAN*/*WMAN* állomást szabad frekvenciára hangolja. A *DFS* azt is elősegíti, hogy az egymás közelében működő hasonló rendszerek ne azonos frekvencián működjenek, hanem szabad frekvenciát találjanak maguknak.

(4) *TPC* (Transmit Power Control, adóteljesítmény szabályozás): Olyan teljesítményszabályozó rendszer, amelyben a központi állomás és minden egyes terminál között teljesítményszabályozás működik, lehetővé téve, hogy az adatátvitel a lehető legkisebb teljesítménykisugárzás mellett menjen végbe. A *TPC* által minimalizált teljesítmények lehetővé teszik, hogy egy adott területen belül a lehető legtöbb állomást lehessen működtetni.

### 4. 5 GHz-es *RLAN* és *WMAN* rendszerek működtetése Magyarországon

Magyarországon az 5150–5350 MHz-es és 5470–5725 MHz-es sávokban működő *RLAN* és *WMAN* eszközök nem esnek egyedi engedélyezési kötelezettség alá. A használható berendezéstípusokat a Nemzeti Hírközlési Hatóságnál (NHH) típusnyilvántartásba kell venni.

Magyarországon mindazok a berendezéstípusok szabadon forgalmazhatók és velük hálózatok szabadon, engedélyezési kötelezettség nélkül megvalósíthatók, amelyek az NHH nyilvános típusnyilvántartásában fel vannak tüntetve.

Az, hogy a fenti 5 GHz-es sávban hazánkban nincs engedély-kötelezettség, további kedvező és kedvezőtlen következményekkel jár:

#### Kedvező következmények

- A hálózat-telepítés egyszerű és minden hatósági adminisztrációtól mentes. (Itt természetesen nem foglalkozunk a tulajdonvédelmi, szolgáltatási, építéshatósági, környezetvédelmi, rendvédelmi stb. előírásokkal, amelyeket természetesen be kell tartani. Az egyszerűség a hírközlési hatóság eljárására – illetve eljárás mentességére – vonatkozik.)

- Nincs frekvenciadíj. Ez következik abból, hogy az engedély mentesség következtében a hatóságnak nincs is tudomása arról, hol és hány RLAN/WMAN állomás üzemel és kik az üzemeltetők.

### Kedvezőtlen következmények

- Az állomások nem kaphatnak interferencia védelmet más állomások zavarásával szemben. A hatósági-lag biztosított interferencia védelemnek az előfeltétele egy teljes hatósági rálátás a működő rendszerekre. Engedélykötelezettség hiányában azonban nincs hatósági rálátás. A hatóság nem avatkozik be az engedélymentes telepítésekbe.

Megjegyzendő, hogy interferenciás veszélyeztettségnek elsősorban a kültéri telepítésű állomások vannak kitéve. Az 5 GHz-es sávú RLAN/WMAN rendszerek az előírásnak megfelelően szükségszerűen rendelkeznek DFS-sel, ami elősegít egy bizonyos fokú önszerveződést az egymás közelébe telepített hálózatok között. Az 5 GHz-es hálózatok tehát rendelkeznek egy olyan önszervező intelligenciával, ami hatásosan csökkenti a hasonló rendszerekkel kialakuló kölcsönös interferenciát. A hatósági beavatkozás hiányát tehát saját önszervező aktivitás helyettesíti.

- Az állomások nem zavarhatják más rendszerek állomásait. Az RLAN/WMAN 5 GHz-es működési sávjában más rendszerek is működnek, Magyarországon elsősorban meteorológiai radarok. Az RLAN/WMAN berendezések semmilyen módon nem zavarhatják a vele egy sávban működő rádiórendszert.

Megjegyzendő, hogy elvileg a szóban forgó zavarások létre sem jöhetnének, hiszen a kötelező DFS ezt kiküszöböli. A gyakorlat azonban ennek ellentmond. Olykor előfordul, hogy a szabályozási paraméterek leromlanak, a DFS szabályozása elégtelenné válik. Természetesen még az olyan akaratlan zavarás sem megengedett, ami a hozzáférési eszközök esetleges hibás működéséből származik. A szolgáltatók, illetve a berendezések üzemeltetői kötelesek arról gondoskodni, hogy a meteorológiai radarokat az adott berendezésekből zavarás ne érje.

A meteorológiai radarok működési frekvenciája az 5600–5650 MHz-es sávba esik. A zavarás garantált elkerülése végett kívánatos, ha a radarok telephelyeinek környezetében az RLAN és WMAN eszközök nem használják az 5600–5650 MHz-es sávú csatornákat. Ez megoldható a bázisállomások szoftveres beállítása által. A sávkorlátozást a radarok telephelyeinek mintegy 30 km sugarú környezetében kívánatos megtenni.

Meteorológiai radar telephelyek Magyarországon:

- Budapest, XVIII. ker. Gillice tér 39.,
- Napkor, Szabolcs-Szatmár-Bereg megye,
- Pogányvár, Zala megye.

Tehát a fenti telephelyeken az 5600–5650 MHz-es sávban üzemelő meteorológiai radarállomások feltétlen védelmet igényelnek az RLAN/WMAN rendszerekből származó zavaró jelekkel szemben.

## 5. RLAN és WMAN rendszerek megvalósítása

Az 5 GHz-es EU-szabályozás sávjában a műszaki paramétereket megadja az 2. táblázat, mégpedig technológia-független módon. A rendszereket nagyon sokfajta módon lehetne megvalósítani, a gyakorlati megvalósítás azonban nagyon leszűkül. A megvalósított rendszerek kivétel nélkül OFDMA hozzáférések (OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplex Access, ortogonális frekvenciaosztásos többszörös hozzáférés). Erre a hozzáférési módra jellemző a külső zavarokkal szembeni jó ellenállóképesség (immunitás).

Az 5 GHz-es sávban a duplexitás módja TDD (Time Division Duplex, időosztásos duplex). Ez azt jelenti, hogy a kétirányú (oda-vissza) kommunikáció ugyanazon a frekvencia csatornán bonyolódik le, az oda- és visszirányú átvitel időben válik szét. A másik duplexitási formát az FDD-t, (Frequency Division Duplex, időosztásos duplex) 5 GHz-en nem használják.

Az RLAN-ok gyakorlatára az IEEE 802.11 szabvány szerinti megvalósítás ad példát. RLAN-ok elterjedten működnek a 2,4 GHz-es sávban, főképpen az IEEE 802.11 szabvány alapján, de kevésbé elterjedt módon léteznek más szabványok is. Ezzel szemben az 5 GHz-es sávban az IEEE 802.11 szabvány hatálya kizárólagos. Történtek ugyan kísérletek európai szabvány bevezetésére (ETSI HiperLAN), de eredménytelenül. Az ETSI HiperLAN szabvány alapján soha nem készült berendezés és valószínűleg nem is fog.

WMAN rendszereknél jelenleg kettős szabványosítás van, az IEEE 802.16 és az ETSI HiperMAN. Realizálás mindaddig csak az IEEE 802.16a (úgynevezett pre-WiMAX) szabványváltozat szerint valósult meg.

## 6. WMAN és WiMAX

A WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, világméretben csereszabatos mikrohullámú hozzáférés) olyan WMAN, amire teljesülnek az úgynevezett WiMAX-profil követelmények (és ezt egy kijelölt laboratórium tanúsítvánnyal alátámasztja). A profil-követelmények (a frekvenciasáv esetleges kivételével) teljesülnek az olyan WiMAX-támogató szabványokban, mint az IEEE 802.16d, az IEEE 802.16-2004 és az ETSI HiperMAN. Más irányú továbbfejlesztést jelent az IEEE 802.16e szabványváltozat, ami már mobilitást is biztosít a terminál állomásoknak.

A WiMAX-profil követelményei között a frekvenciasáv az egyik meghatározó elem. A 3. táblázat a WiMAX-sávokat és a duplexitást mutatja. A táblázatba foglaltak Európára érvényesek.

3. táblázat A WiMAX-profil szerinti követelmények

	Frekvenciasáv	Duplex mód
3,5 GHz	3410 – 3600 MHz	TDD vagy FDD
5,8 GHz	5725 – 5850 MHz	TDD

A táblázatból látható, hogy az 5150–5725 MHz-es sáv nincs a WiMAX-profil által meghatározott frekvenciasávok között. Az itt működő WMAN berendezések tehát nem tartoznak a WiMAX kategóriába.

A köznapi szóhasználat gyakran összemosza a WMAN és WiMAX fogalmát. Szokásosan, a WMAN minden fajtáját WiMAX-nak nevezik. Habár ez ellen nem sokat tehetünk, azzal tisztában kell lenni, hogy a WiMAX a regisztrált és védett megnevezés. Pontos értelemben egy WMAN rendszer akkor viselheti a WiMAX megnevezést, ha erre feljogosító tanúsítványa van.

Jelenleg a világon egyetlen olyan laboratórium van, amelyik felhatalmazással rendelkezik arra, hogy WiMAX tanúsítványokat kibocsásson, ez a spanyolországi Cenelec. Tanúsítványok kibocsátása 2005. júniusa óta lehetséges.

## 7. 5,8 GHz-es WiMAX sáv

Amint azt a 3. táblázat is mutatja, az 5725–5850 MHz-es frekvenciatartomány WiMAX céljára (is) azonosítva van. A frekvenciasáv nemzetközileg az engedélymentes WiMAX-működés sávja lesz. A sáv jelenleg más típusú eszközök céljára van hasznosítva.

A WiMAX használat előfeltétele, hogy megtörténjen a különféle rádióalkalmazások együttélési lehetőségének és feltételeinek vizsgálata, az úgynevezett kompatibilitási vizsgálat. Erre azután kerülhet majd sor, miután a világpiacon már megjelennek az első 5,8 GHz-es WiMAX eszközök.

Mindemellett már folyik a felkészülés az 5,8 GHz-es sáv WiMAX célú megnyitására. Előreláthatólag az alábbi szabályrendszer lesz érvényben:

- Kül- és beltéri telepítés egyaránt lehetséges lesz.
- Duplex mód: TDD.
- A kisugárzott teljesítmény (EIRP) lényegesen nagyobb lesz, mint az 5470–5725 MHz-es általános WMAN sávban.
- Ez a teljesítményérték valószínűleg nemzetközi egyeztetés tárgya lesz. Amíg nincs nemzetközi ajánlás, addig az EIRP = max. 4 W értéket tekintjük iránymutatónak.
- A sávban csakis WiMAX profillal rendelkező WMAN eszközök lesznek használhatók (általános WMAN eszközökre az 5470–5725 MHz-es sáv bőséges lehetőséget kínál).
- A berendezések egyedi engedélyezéstől mentesek lesznek.
- Frekvenciadíj nem lesz.
- A WiMAX rendszerek struktúrájára nem lesz megkötés, az lehet pont-pont, pont-multipont, vagy akár tisztán multipont (ú.n. mesh) struktúra.
- A WiMAX rendszerek felhasználási céljára nem lesz korlátozás, ez lehet többek között internet hozzáférés, távbeszélő szolgáltatás, általános adat hozzáférés, műsoros program átvitele, RLAN bázisállomások kiszolgálása stb.

## 8. 3,5 GHz-es sáv

A 3. táblázat szerint nem csak az 5,8 GHz-es sávban lehet WiMAX rendszereket használni, hanem a 3,5 GHz-es sávban is. A frekvenciasáv ténylegesen használható alsávjai a következők: 3410–3494 MHz és 3510–3594 MHz. A frekvenciasáv eredetileg – már a WMAN/WiMAX technika létrejötte előtt – állandóhelyű rádiós hozzáférési hálózatok (FWA) részére volt kijelölve, mégpedig engedély-köteles módon. Magyarországon 2001-ben frekvencia árverésen öt távközlési szolgáltató nyert 15 éves frekvenciahasználati jogosultságot, mindegyikük egy-egy 2x14 MHz sáv szélességű duplex blokkpárra, országos kiterjedésű hatáskörrel. A blokk kiosztást és a 3,5 GHz-ben szolgáltatásra jogosult vállalatok nevét a 4. táblázat mutatja.

	Frekvenciasávok	Jogosult
1 blokk	3410 – 3424 MHz 3510 – 3524 MHz	Invitel
2 blokk	3427,5 – 3441,5 MHz 3527,5 – 3541,5 MHz	GTS Magyarország
3 blokk	3445 – 3459 MHz 3545 – 3559 MHz	Antenna Hungária
4 blokk	3462,5 – 3476,5 MHz 3562,5 – 3576,5 MHz	Magyar Telekom
5 blokk	3480 – 3494 MHz 3580 – 3594 MHz	Pantel

4. táblázat  
3,5 GHz-es blokkok és a sávhasználat jogosultjai

A duplex sávhasználathoz illeszkedik az FDD hozzáférési mód, amelynél a blokkpárnak mindig a magasabb frekvenciájú (felső) tagjában kell létrehozni a központi állomástól a terminálokra irányuló adatforgalmat (downlink), míg az ellentétes irányú adatforgalom (uplink) a blokkpár kisebb frekvenciájú (alsó) blokkjában megy végbe.

A blokk-kiosztás és a szolgáltatási jogosultság megadásának során az alkalmazandó technika nincs meg szabva. Mindaddig az operátorok csakis rádiórelé technikát alkalmaztak a pont-multipont struktúrájú FWA rendszerek kiépítésénél, más észszerű megoldás nem is állt rendelkezésre. A WMAN/WiMAX technika azonban a korábbtól eltérő újabb technológiai megoldást biztosít. A 3,5 GHz-es szolgáltatóknak tehát a korábbi frekvencia árverés során jogosultságot szereztek arra, hogy tetszőleges technikát – ezek között akár WMAN/WiMAX technikát is – felhasználjanak.

A 3,5 GHz-es sávhasználat előírásai között fontos helyet foglal el az engedély-kötelezettség. Nyomatékosan fel kell hívni a figyelmet arra, hogy rádióátvitelnél minőségi garanciát adni csak engedély-kötelezettség mellett lehetséges. Éppen abban van a 3,5 GHz-es WMAN/WiMAX használat legfőbb jelentősége, hogy ez az egyetlen minőség-biztosítási lehetőséget nyújtó sáv a WMAN/WiMAX lehetőségeket nyújtó sávok között.

A 3. táblázat a 3,5 GHz-es sávot WiMAX használatra jelöli, de a táblázat hatálya csak Európára terjed ki.

Számos országban (például USA, Kanada) a 3,5 GHz sávot nem fogják kiosztani sem WMAN-ra, sem WiMAX céljára. Sajnálattal kell megállapítani, hogy frekvenciasáv szempontjából a WiMAX névbe is belefoglalt 'világ-méret' csak korlátozottan lesz érvényesíthető.

## 9. Összefoglalás

Az 5,8 GHz-es sávban a WiMAX használatot összeférhetőségi (kompatibilitási) vizsgálatnak kell megelőznie, amint ezt a 6. pontban részletesen kifejtjük. Erre természetesen csak a WiMAX berendezések tényleges megjelenése után kerülhet sor. Amennyiben a gyakorlatban is bebizonyosodik, hogy a sávban működő különféle rádióalkalmazások közt nincsenek összeférhetőségi problémák – amit elméleti megfontolások valószínűsítenek – akkor minden bizonnyal a frekvenciasáv megnyitható lesz WiMAX-ra. Ennek nagyon nagy a fontossága, mint-hogy az 5,8 GHz az egyetlen sáv, ami valamennyi kontinensen egységesen felhasználható lesz WiMAX-hoz (habár néhány európai országban nagy problémát jelent majd a bevezetés).

A 3,5 GHz-es sávban a hatékonyság komoly akadályát jelenti, hogy a duplex mód korlátozva van FDD-re. Internet átvitelnél a TDD duplexitás sokkal megfelelőbb. Ugyanakkor a TDD duplexitás interferenciás szempontból sokkal kritikusabb és kifejezetten zavaró hatással lehet a szomszédos országok FDD rendszereire. A jövőben kívánatos lesz megvizsgálni, milyen lehetősége van a hatékony TDD rendszerek hazai bevezetésének.

A 3,5 GHz-es duplex sáv középrésze, az úgynevezett duplex rés a 3494–3510 MHz-es tartomány. Ez a sáv rész jelenleg üres, de kínálkozó felhasználás lehet egy TDD duplexitású sáv kiosztás.

A 3600–3800 MHz-es (az úgynevezett 3,7 GHz-es) sáv kiosztása Magyarországon még nem történt meg (akárcsak Európa legtöbb országában). Jelenleg ezen sávra a berendezés-ellátás még csekély, viszont lehetséges, hogy a jövőben itt is lehetségessé válik a WiMAX használat. Ha ez megtörténik, a berendezés-hátter nagyon megjavul és a sáv használati értéke megnövekszik. Várható tehát, hogy – összhangban az európai folyamatokkal – a 3,7 GHz-es sávot Magyarországon is megnyitják általános FWA használatra és ezen belül WMAN és WiMAX alkalmazásokra.

## Hírek

Világszerte minden műszaki egyetem és főiskola szembesül azzal a problémával, hogy a jelen és a jövő technológiai rendkívüli gyorsasággal fejlődnek, és ezekkel az oktatási intézményekben is lépést kell tartani ahhoz, hogy az ott képzett szakemberek versenyképesek maradhassanak a munkaerőpiacon. Az Intel többek között ezért dolgozta ki a műszaki felsőoktatás terén kiemelkedő oktatási tantervét, az **Intel Higher Education** programot. Az Intel és az Oktatási Minisztérium most bejelentette, hogy szeptembertől a magyarországi műszaki felsőoktatási intézmények számára is elérhetővé válnak az Intel felsőoktatási tananyagainak egyes moduljai. Ezen modulok közé tartoznak a mikroelektronikai technológiák, a hálózati processzorokkal kapcsolatos tananyag, a beágyazott számítástechnika, vagy a vezeték nélküli számítástechnikai részleteit bemutató tantervek.

Magyarországon jelenleg 78 **Cisco Hálózati Akadémia** működik, ahol a diákok e-learning alapú, magas színvonalú elméleti és gyakorlati képzés keretében sajátíthatják el a legújabb informatikai, hálózati ismereteket. A programban részt vevő diákok összlétszáma közel 2400 fő. A Cisco Hálózati Akadémia Programban az idei tanévben 18 oktatási intézményben újabb 204 diák fejezi be tanulmányait, 1300 főre növelve az eddig végzett hallgatók összlétszámát.

A 2004/2005-es tanév során – a hálózati technológiák folyamatos innovációját tükrözve – bevezetésre került a Cisco Hálózati Akadémiai Program megújult, magyar nyelvű tananyaga (3.1-es verzió). Ezzel egyidőben a képzés kibővült a Wireless és Security specializációkkal. A vezeték nélküli (Wireless) technológiákkal foglalkozó modul keretében a diákok elsajátíthatják a vezeték nélküli hálózatok tervezését és telepítését, a Security kurzus pedig a hardveres és szoftveres hálózatbiztonsági megoldásokkal, a számítógépes hálózatok biztonsági igényeinek és kockázatainak feltérképezésével, és az ezek ellen való védekezési lehetőségekkel ismerteti meg a diákokat.

A program a 2005/2006-os tanévben tovább bővül. Ennek anyagi hátterét jelentős részben a Cisco és a program mecénásai által nyújtott támogatás biztosítja. A Cisco Systems az 1999-es indulás óta összességében több mint 250 millió forintot fordított a hálózati akadémiákra. A támogatók az eddigiekben több mint 100 millió forintot ajánlottak fel, amely a 2005/2006-os tanévben további 36,6 millió forinttal nő. A program fő támogatói; az Accenture Kft. 11 millió forint, az AES Magyarország csoport 8 millió forint, a T-Online Magyarország Rt. pedig 6 millió forint támogatást ajánlottak fel az új tanévben az akadémiai közösség számára.

# Tájékoztatás a Híradástechnika szerzőinek

A Híradástechnika szerkesztőbizottsága szeretné, ha egyre több szerzője lenne különböző területekről, így tovább bővülne az újságban megjelenő témák köre, és változatosabbá válna az eltérő szemléletű szerzők gondolatvilágától. Leendő szerzőink számára a cikkírással kapcsolatban szeretnénk néhány tájékoztató gondolatot közölni:

- **Témák:** A lap profilja egyfelől felöleli a távközlés „klasszikus” műszaki témaköreit, továbbá az informatika távközléshez, kommunikációhoz kapcsolódó vonatkozásait, a média-technológiák és média-kommunikáció kérdéseit, ezzel is elősegítve a távközlés-informatika-média konvergenciájának folyamatát. Másfelől helyet adunk a távközléshez és média-kommunikációhoz kapcsolódó gazdasági, szabályozási, marketing, menedzsment témáknak és a távközlés-informatika-média társadalmi vonatkozásainak is.

- **Terjedelem:** A szakmai cikkek az újságban általában 4-8 oldal terjedelemben jelennek meg. Ennél rövidebbek inkább csak a hírek vagy beszámolók lehetnek. 8-10 oldalnál hosszabban pedig csak olyan alapvető újdonságok írhatók le, ahol a megértéshez az elméleti alapok és a gyakorlati megvalósítás egyaránt szükséges. Ez azt jelenti, hogy ábrák nélkül 12-20 ezer karakter lehet egy cikk szövege. Nyomtatott oldalanként kb. 1-3 ábra elhelyezése teszi az olvasó számára áttekinthetővé, vonzóvá az ismertetést.

- **Forma:** Sem betűtípus, sem rajzkivitel nem köti a szerzőket. Az újság egységessége kedvéért ugyanis az elektronikusan érkező szövegeket a layoutban használt betűtípusban dolgozzuk fel. A cikkeket minden esetben elektronikus formában is kérjük, tehát e-mailen, vagy lemezen. A szövegeket *word formátumban* kérjük elkészíteni. Az ábrák megrajzolásánál egyetlen kötöttség, hogy az újság *fekete-fehér kivitelben* jelenik meg, tehát a színes ábrák is fekete-szürke-fehér képként láthatók az oldalakon. Ennek megfelelően kérjük a szerzőket, hogy lényeges dolgokra ne hivatkozzanak úgy, hogy a piros vonal, vagy a kék alapterületű rész, ehelyett szaggatott, pontozott, vastag és vékony vonalak legyenek megkülönböztethetők, a területnél sraffozással lehet különbséget tenni. Fotóillusztrációk esetén lehetőség szerint nagyfelbontású, külön képfájlokat is kérünk.

- **Szerkezeti elvárások:** A cikk kötelező részei a bevezetés (első fejezet) és az összefoglalás (utolsó fejezet). A bevezetésben a szerzők röviden ismertessék a téma háttérét, a cikk fő mondanivalóját és azt, hogy a további részekben miről lesz szó. A cikkhez csatolni kell egy rövid, néhány mondatos tartalmi összefoglalót magyar és angol nyelven, továbbá meg kell adni néhány jellemző kulcsszót is, szintén magyarul és angolul. A cikk

végén kérjük a kapcsolatos, vagy előzményként felhasznált cikkeket megadni. A hivatkozásokat szögletes zárójelben számozzuk, amely után következik a szerző, majd a cikk vagy a könyv címe, a megjelenés helye és időpontja.

- **Lektorálás:** A cikkek különböző minősítési folyamatoknál értékes pontokat jelenthetnek. Az új eredményeket tartalmazó cikkeket a szerkesztőség bíraltatja. A bírálók véleménye alapján a cikket visszaadhatjuk a szerzőnek javításra, esetleg átdolgozásra. Minden félév végén az azt megelőző öt számból kiválogatjuk azokat a cikkeket, melyek a külföldi, nem magyar anyanyelvű olvasók számára is érdekesek lehetnek. Ezeket angolra fordítva a 6. és 12. számban „Selected Papers” címen jelentetjük meg. Ez idegen nyelvű publikációnak számít.

- **Megjelenés:** A folyóirat minden hónap végén jelenik meg. A pontos időpont függ az ünnepektől és a hétfőgék helyzetétől. Mindig az előző hónap utolsó napjáig végleges változatban beérkezett cikkeket vesszük számításba. Tematikus megfontolásokból előfordulhat, hogy egy későbbi számban előnyösebbnek látszik az adott téma tárgyalása. Általában a beküldést követő negyedévben helyet kap a munka az újságban. Kérés esetén az átnézés vagy lektorálás után a beküldéstől számított két héten belül a szerző visszaigazolást kaphat a cikk elfogadásáról.

- **Szerzői adatok:** Annak érdekében, hogy az olvasók problémáikkal, véleményükkel közvetlenül kapcsolatba léphessenek a szerzőkkel, a cikk előtt lévő szürke részben (a cím alatt) szerepel nevük, munkahelyük és e-mail címük. Célszerű tehát, hogy a cikkeket úgy küldjék be, hogy a felsorolt adatokat, valamint a szerzők telefonos elérhetőségét tartalmazzák. Ez utóbbi a szerkesztés, illetve a lektorálás közbeni esetleges kérdések tisztázásához elengedhetetlen.

## • A beküldés módja:

A cikkek eljuttathatók a főszerkesztőhöz:

*Szabó Csaba Attila*

(BME, Híradástechnikai Tanszék, szabo@hit.bme.hu)

vagy a HTE titkárságára:

*Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület*  
(Bp., Kossuth L. tér 6-8. IV.emelet, info@hte.hu).

Reméljük, hogy ezen ismeretek segítik kollégáinkat, hogy gondolataikat, új eredményeiket, műszaki megoldásaikat, számítási módszereiket közkinccsé tegyék. Várjuk tehát a cikkeket oktatási intézményekből, fejlesztőhelyekről, gyártóktól, üzemeltetőktől, tanulóktól, szakértőktől, oktatóktól és mindenkitől, akinek mondanivalója van a közösség számára.

A Szerkesztőbizottság

# Szoftverrádió-rendszerek: új trendek

ERDEI MÁRK, WAGNER MARGIT KATALIN

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék  
{merdei, kwagner}@hit.bme.hu

**Kulcsszavak:** szoftverrádió, SDR, GSM

*A szoftverrádió a vezeték nélküli távközlésen belül a kutatások egyik kulcsterülete. Röviddel az elméleti eredmények publikálását követően megjelentek az első prototípusok is, elsősorban katonai alkalmazásokra. A fejlesztés két fő irányban folyik. Az egyik irányra univerzális hardverek alkalmazása jellemző, ahol egy hardver-absztrakciós réteg elfedi a hardver változtatásait. A másik megközelítés általános célú PC-n és operációs rendszeren alapszik, az RF-rész PC-kártyán történő megvalósításával. A jelfeldolgozó kód egy közismert programnyelven (főleg C/C++/on) megírt alkalmazás. A cikk bemutatja a két megközelítést és illusztrálja az utóbbit egy kísérleti GSM rendszerrel.*

## 1. Bevezetés

A vezeték nélküli technológiák terén jelenleg sokféle szabvány létezik. Ezek egyaránt használatosak különféle célokra: például a Bluetooth – PAN-ok közötti és PAN-okon belüli kommunikációra; WLAN – irodai és otthoni használatra; GSM, WCDMA – mobil távközlési hálózatokban. A jelenleg használatos digitális rádiótechnológia minden egyes kommunikációs technológiához külön-külön specifikus hardver megvalósítást igényel. A szoftverrádió célja, hogy a rádiót megvalósító hardverek sokféleségét csökkentse, lehetővé téve, hogy egyetlen hardver használatával lehessen elérni a különböző kommunikációs technológiákat alkalmazó hálózatokat.

Joseph Mitola definíciója [1,2] alapján szoftver rádióknak nevezzük az olyan rendszereket, melyek működése szoftverrel újradefiniálható. Az ilyen rendszerek legtöbbször többcsatornás adatfeldolgozó rendszereként működnek.

A közös hardver használata kedvez mind a felhasználóknak, mind pedig a készülégyártóknak. A felhasználók előnye nyilvánvaló: Nem kell különféle eszközöket hordozniuk magukkal, hanem elég egy általános célú berendezést használni, és ha újabb funkciókat szeretnének használni, akkor elegendő a hardvert vezérlő szoftvert frissíteni. A készülégyártók számára az jelent előnyt, hogy nem kell különböző készülékeket gyártaniuk, hanem egy alaphardvert gyárthatnak sokkal nagyobb mennyiségben, ennek következtében a gyártási költség jelentősen leszorítható.

A szoftverrádió-konceptió alkalmazható a hozzáférési hálózatok és mobil végberendezések területén is. A hozzáférési hálózatokban a távközlési szolgáltatók ugyanazon bázisállomásokkal nyújthatnak például GSM, WLAN és WCDMA lefedettséget, valamint a közeljövőben megjelenő módosításokat, illetve újabb rádió technológiákat is támogathatják meglévő bázisállomásaikkal. Egyedüli korlátot az eszközök feldolgozási kapacitása jelent, és a hardverfrissítésekre is csak ez szolgál-

tat okot. Mobil végberendezések területén pedig akár egy PC-kártya segítségével elérhetik a felhasználók ugyanezen technológiákat. Az egységes hardverből eredő nyereség a hálózati oldalon szembeötlőbb, hiszen a felhasználók már ma is vásárolhatnak olyan bővítő kártyákat a számítógépeikbe, melyek több technológiát is támogatnak (ezek azonban nem egységes hardvert használnak, hanem integrálják a különböző technológiákat külön-külön megvalósító alkalmazás-specifikus áramköröket, ASIC-okat).

A szoftverrádió a vezeték nélküli távközlési technológia fejlődését is felgyorsíthatja, mivel használatával a jelenleg még csak hardverfrissítéssel megoldható technológiai váltások egyszerű szoftverfrissítéssel is elérhetőek. Ez jelentős gazdasági előnyt jelenthet a vezeték nélküli távközlés területén kutatás-fejlesztéssel foglalkozó vállalatok számára is, mivel jelentősen lecsökkentheti ROI-jukat.

### Rövidítések

<b>WLAN</b>	– Wireless Local Area Network
<b>WCDMA</b>	– Wideband Code Division Multiplex Access
<b>ASIC</b>	– Application Specific Integrated Circuit
<b>ROI</b>	– Return Of Investment
<b>SDR</b>	– Software Defined Radio
<b>ADC</b>	– Analog-to-Digital Converter
<b>DAC</b>	– Digital-to-Analog Converter
<b>DUC</b>	– Digital Up Conversion
<b>DDC</b>	– Digital Down Conversion
<b>FPGA</b>	– Field Programmable Gate Array
<b>DSP</b>	– Digital Signal Processor
<b>BTS</b>	– Base Transceiver Station
<b>BSC</b>	– Base Station Controller
<b>MSC</b>	– Mobile Switching Center

## 2. Újrakonfigurálható SDR

A rádiófrekvenciás modul (1. ábra, baloldali blokk) az antennából csatolókon keresztül veszi (illetve adja) a rádiófrekvenciás jelet, és azt demodulálja középfrekvenciára. Vevőoldalon az RF modul analóg rádiófrekvenciás erősítést és RF-KF keverést végez, míg adóoldalon először KF jelet RF-ra transzformálja, majd RF tartományban teljesítményerősítést végez [3].

Az ADC/DAC blokkok (1. ábra, középső blokk) analóg-digitális átalakítók. A vevőoldalon analóg jelből digitális jelet, adóoldalon digitális jelből analóg jelet hoznak létre. Ezen blokkok határolják a rendszer analóg és a digitális részeit [4].

A DUC illetve DDC blokkok (1. ábra, középső blokk) modulációt végeznek az adó, demodulációt a vevő oldalon (digitális tunereknek is hívjuk őket).

Az alapsávi rész (1. ábra, jobboldali blokk) ennek megfelelően alapsávi műveletekért felelős: kapcsolatfelvétel, teljesítménykiegyenlítés, frekvenciaugratás, időzítés, korreláció stb. Ebben a részben van megvalósítva az adatkapcsolati protokoll is.

A DDC/DUC blokkok, illetve az alapsávi feldolgozás igen nagy számítási kapacitást igényel, ezért hagyományos digitális eszközökben ASIC eszközöket használnak erre a célra. Az SDR rendszerekben mind az alapsávi feldolgozás, mind a DDC/DUC modulok megvalósítása programozható eszközök felhasználásával történik.

A programozhatóság kiterjeszhető lenne az RF részre is (pl. ha az analóg-digitális konverziót már az antennában megoldanánk). Ilyenkor az RF frekvenciasávok programozható váltását is meg kellene oldani. Ilyen széles frekvenciasávban történő átalakításra még a jelenleg legfejlettebb ADC/DAC eszközök sem alkalmasak.

## 3. Vanu Szoftverrádió

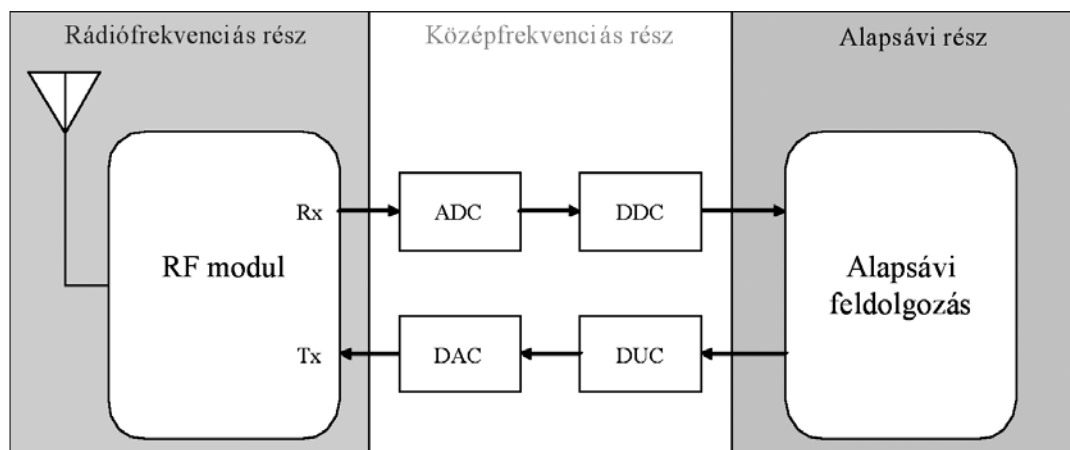
A Vanu Szoftverrádiót a Vanu Inc. (Cambridge, MA, USA) dolgozta ki és valósította meg. Ez az új koncepció nem a szoftverrádió megvalósításának elvi vonatkozásában tér el a korábban alkalmazott módszerektől, hanem sokkal inkább a megvalósítás módjában [5,6].

A Vanu elsősorban abban különbözik a hagyományos szoftverrádió megoldásoktól, hogy nem speciális SDR hardver platformot és hozzá tartozó nyelvet használ, hanem kereskedelmi forgalomban kapható, általános PC-t, mint hardware-t – egy RF funkciókat megvalósító PCI kártyával bővítve – valamint általános operációs rendszert (Linux), és széles körben használt programozási nyelvet (C, C++). A teljes jelfeldolgozás az operációs rendszeren kívül, felhasználói alkalmazásként fut, csak a bővítőkártva meghajtó programja kötődik szorosan az operációs rendszerhez.

A Vanu által alkalmazott módszer számos előnyt rejt magában. Nyilvánvaló előny, hogy a hétköznapi forgalomban is elérhető eszközök alkalmazása további költségcsökkentést tesz lehetővé. Ennél azonban fontosabb, hogy az általános célú eszközök alkalmazásával az SWR rendszerek is kihasználhatják a Moore-törvényt. A feldolgozási kapacitás növekedését tehát nem befolyásolják egy speciális SWR platform esetén fellépő, újratervezésből eredő késleltetések.

A hagyományos SDR koncepcióban egy generikus, de kifejezetten SDR célokra fejlesztett hardware platformot alkalmaznak. Ez FPGA-kból, DSP-kból és mikroprocesszorokból, az azokat összekötő kommunikációs csatornákból, valamint közös erőforrásokból (például memória) áll. A generikus hardver lehetővé teszi a szoftverrádió koncepció teljes körű megvalósítását, a jelfeldolgozás hardvertől való teljes függetlenítését egy absztrakciós réteg bevezetésével. A Vanu Szoftverrádió azonban még nagyobb függetlenséget eredményez, mivel a PC és az általános célú operációs rendszer használata lehetővé teszi, hogy a szoftverrádió alkalmazást hagyományos PC-n üzemeltessük, csak a feldolgozási kapacitás jelent korlátozást a futtatható rádiós technológia bonyolultságára nézve.

A következőkben bemutatunk egy kísérleti rendszert, melyet a Vanu Inc. 2003 júniusában állított üzembe egy közép-texas-i cellás rádiós hozzáférési hálózat (Mid-Tex Cellular) részeként. A bázisállomás két 2.8 GHz-es Intel processzorral felszerelt HP ProLiant szerverből áll. A szerveren Linux rendszer fut, és egy ADC Digivance rádió-adóvevőhöz csatlakozik. Minden jelfeldolgozás, protokollhoz kapcsolódó feldolgozás, illetve a GSM BSC funkcionalitás alkalmazásként fut ezen a szerveren.



1. ábra  
Az újrakonfigurálható  
SDR  
architektúrája

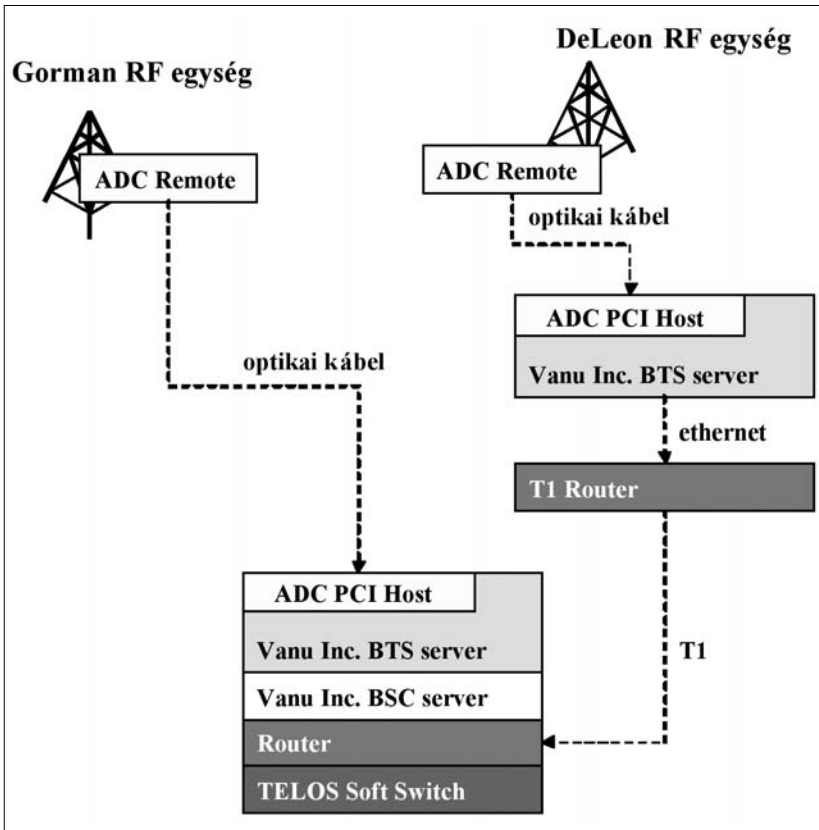
A kísérleti konstrukció két bázisállomásból (BTS) és egy bázisállomás-vezérlőből (BSC) áll. A konstrukció architektúráját a 2. ábra szemlélteti.

Mindegyik egy kereskedelmi forgalomban kapható 2 db 2.8 GHz-es Intel Xeon processzorral ellátott HP ProLiant DL380-as szerverből áll. Mind a jelfeldolgozást, mind a protokollokat Linux operációs rendszer fölött futó alkalmazások valósítják meg. A bázisállomások szektoronként két vivőt használnak (GSM szabvány szerint, tehát 8 időrésszel vivőnként). BTS-enként két időrést vezérlőcsatornának részére tartottak fenn. Az egyik bázisállomást DeLeonban, a másikat egy szomszédos városban, Gormanben telepítették. A kísérlet egyik célja a két bázisállomás közötti handover megfigyelése volt, ezért körsugárzó antennákkal biztosították a két bázisállomás által lefedett terület átlapolódását.

Az ADC Digivance rendszer a távoli antenna és a helyi feldolgozó egység közötti optikai összeköttetést biztosítja. Ezt a rendszert elsősorban a Gormanben elhelyezett BTS esetében használták, mivel a DeLeon-i központban lévő HP szerver futtatta a gorman BTS programját, melynek antenna egysége mintegy 20 km-re volt.

A DeLeoni bázisállomás esetében a BTS szerver az antenna mellett, az épület tetején került elhelyezésre. A BTS szerver és a BSC szerver között T1 összeköttetés biztosította az adatátvitelt. A DeLeon-i központban a BSC szerver, a Gorman BSC szerver és a Cisco router gigabit ethernet hálózatra csatlakoztak. A jelzés és

2. ábra A kísérleti rendszer architektúrája



A Vanu Inc. honlapja

a forgalom (beszéd) IP hálózaton keresztül került átvitelre. Az MSC funkcionalitást (kapcsolást) egy TELOS soft-switch biztosította. A TELOS a fent említett gigabit ethernet hálózatra csatlakozott.

A tesztelés hagyományos GSM telefonokkal történt (850 MHz-es tartományban). A legtöbb esetben a tesztelő személyautóban, vezetés közben használta a telefonját. A tesztelés során az alábbi funkciókat vizsgálták:

- handover,
- teljesítményszabályozás (power control),
- timing advance számítása,
- lefedési terület meghatározása.

Az első héten a mobil-mobil hívásokat vizsgálták. Kezdetben nagyon sokszor szakadt meg a kapcsolat, mivel a rossz vételi körülmények miatt a rendszer sokszor bontotta a vonalat. Ennek korrigálása megtörtént: megnövelték a rendszer várakozási idejét. A következő probléma is ezzel a jelenséggel volt kapcsolatos: Azokat a csatornákat, melyeket a bázisállomás felszabadított, de a rossz vételi körülmények miatt a mobil erről nem tudott, később nem lehetett használni (egy ideig, amíg a telefon nem bontotta a vonalat).

Ezen felül még több területen jelentkeztek problémák, például a VoIP nem megfelelő konfigurációja okozott érezhető extra késleltetést, a teljesítményszabályozáson kellett finomítani, hogy a telep lehető legalacsonyabb fogyasztása mellett lehessen maximalizálni a beszedminőséget.



A handover kapcsán is merültek fel problémák. Az első változatban a mobilok túl gyorsan váltottak bázisállomást. Így azok a mobil egységek, melyek a közös lefedési területen voltak, össze-vissza kapcsolak a két bázisállomás között.

A háromhetes próbaüzem alatt a bázisállomás szoftverét 12-szer kellett jelentősen módosítani (12 verziót adtak ki). Az új változatokat mindig az Interneten keresztül töltötték le, és néhány másodperc alatt telepítették. A fent felsorolt esetek csak kiragadott példák az előforduló problémákból.

Mint az a fenti példában is látható, a problémák egytől-egyig konfigurációs és paraméter-optimalizálási hiányosságokból adódtak melyeket a tisztán szoftveres megvalósításnak köszönhetően gyorsan és egyszerűen korrigálni lehetett. A módosításokat azonnal ki lehetett próbálni. E kulcsfontosságú kísérlet egyértelműen bizonyította a szoftverrádió koncepció életképességét, valamint a használatából eredő előnyöket.

A Vanu Inc. jelenleg dolgozza ki az Egyesült Államokban széles körben alkalmazott CDMA szabványt támogató szoftverfrissítését. Partnerük a Mid-Tex Cellular így pusztán a szoftverfrissítés telepítésével képes lesz egyidejűleg GSM-et és CDMA-t szolgáltatni.

#### 4. GNU Radio

A GNU Radio egy, a Vanu Szoftverrádió elvi koncepcióját alkalmazó szabad-szoftver platform. A Vanu rendszeréhez hasonlóan egy általános célú PC-t használ, Linux operációs rendszerrel és a rádiós modult megvalósító PCI kártyával [7].

A GNU egy úgynevezett univerzális szoftverrádió perifériát definiál (Universal Software Radio Peripheral) azok számára, akik nem rendelkeznek számítási kapacitásban és memóriában elegendően erős hardverrel. Ez az eszköz biztosítja a rádiófrekvenciás modult (lásd 1. ábra).

Az USRP alaplapja négy 12 bites 64 minta/s AD átalakítóból, négy 14 bites 128 minta/s DA átalakítóból, egy FPGA-ból, illetve egy programozható 2.0-s USB vezérlőből áll. Az USRP alaplaphoz 4 további hardver egység csatlakoztatható: kettő a vételhez, kettő az adáshoz. Ezek a hardver egységek különböző frekvencia-tartományokban működnek. Az USRP rugalmasságát a programozható USB 2.0 vezérlő és az FPGA-k adják.

A GNU Radio jelenlegi verziója már rendelkezik HDTV dekódolást megvalósító alkalmazással, szoftveres spektrum analízátorral, oszcilloszkóppal. Jelenleg megvalósítás alatt állnak többek között a TDMA, GPS, TETRA technológiák is.

#### 5. Összefoglalás

A szoftverrádióval már sok éve foglalkoznak a vezeték nélküli távközlés területén működő vállalatok és egyetemi laborok. Az elvi alapok kezdeti lefektetését köve-

tően készültek is már prototípus rendszerek, elsősorban katonai célokra.

A szoftverrádió architektúráját illetően két megközelítés versenyzik egymással. Az egyik megközelítés FPGA-ból és DSP-kből álló univerzális célhardvert használ, hardver absztrakciós réteget (a hardverben fellépő változások elfedésére). A másik általános célú PC-t, általános célú operációs rendszerrel, valamint egy bővíthető kártyaként megvalósított rádiófrekvenciás egységet. Az utóbbi megközelítésben a jelfeldolgozó kód magas szintű, széles körben elterjedt programozási nyelven készül és felhasználói alkalmazásként fut.

Az utóbbi megközelítés a 3. pontban bemutatott kísérletnek köszönhetően jelentős lépéselőnybe került, hiszen éles körülmények között bizonyította működőképességét és létjogosultságát. Azt, hogy a két megközelítés küzdelméből melyik kerül ki győztesen, majd az elkövetkező esztendőök fogják eldönteni.

#### Irodalom

- [1] Joseph Mitola,  
"Software Radio Architecture",  
Object-Oriented Approaches to  
Wireless Systems Engineering, Wireless Architectures  
for the 21st Century, Fairfax, Virginia, USA, Oct. 2000,  
ISBN 0-471-38492-5
- [2] Gyula Rábai, Sándor Imre, József Kovács,  
Péter Kacsuk,  
„Resource Manag. in Software Radio Architectures”,  
2nd Karlsruhe Workshop on Software Radios, 2002.
- [3] Alok Shah,  
„An introduction to Software Radio”,  
Vanu Inc. 2002,  
<http://www.vanu.com/resources/intro/SWRprimer.pdf>
- [4] WIPRO Technologies,  
„Software-Defined Radio”, 2002 August,  
<http://www.wipro.com/shortcuts/downloads.htm>
- [5] Jeffrey Steinheider, Victor Lum, Jonathan Santos,  
„Field Trials Of An All-Software GSM Basestation”,  
Proceedings of the Software Defined Radio Forum  
Technical Conference, Orlando, FL, November 2003,  
[http://www.vanu.com/resources/publications/  
basestation\\_SDRFpaper.pdf](http://www.vanu.com/resources/publications/basestation_SDRFpaper.pdf)
- [6] Alok Shah, Jeremy Nimmer, David Franklin,  
„A Prototype All-Software Public Safety  
Interoperability System”,  
[http://www.vanu.com/resources/publications/  
shahA\\_SDR04.pdf](http://www.vanu.com/resources/publications/shahA_SDR04.pdf)
- [7] <http://www.gnu.org/software/gnuradio/>

# TCP-ELN: hatékony kommunikáció rádiós csatornák felett

Buchholcz Gergő, Do Van Tien  
BME Híradástechnikai Tanszék, {buchholcz,do}@hit.bme.hu

Thomas Ziegler  
Telecommunications Research Center Vienna, ziegler@ftw.at

**Kulcsszavak:** vezeték nélküli távközlés, bithibák és csomagvesztés kezelése, TCP protokoll

A vezeték nélküli hálózatok térhódításával egyre nagyobb jelentőséget nyer a rádiós csatornák feletti hatékony kommunikáció. A jelenleg uralkodó TCP verziók nem veszik figyelembe a vezeték nélküli csatornák sajátosságait, így teljesítményük messze elmaradhat a kihasználható kapacitástól. Cikkünkben összefoglaljuk a probléma megoldására tett eddigi javaslatokat és bemutatunk egy új TCP variánst, amely – a megvalósíthatóságot is figyelembe véve – jelentősen javíthatja az adatátvitel sebességét. Megoldásunk hatékonyságát szimulációk felhasználásával mutatjuk be.

## 1. Bevezetés

A TCP protokollt a 80-as években fejlesztették ki azzal a céllal, hogy megbízható adatátvitelt nyújtson úgy, hogy hatékonyan és fair módon használja ki a kommunikáló felek között levő szabad sáv szélességet. A megbízható adatátvitelt nyugták használatával valószínűsítették meg, a hatékony és fair sáv szélesség kihasználást pedig az egyre újabb folyamszabályozási algoritmusokkal igyekeztek elérni. Ezek az algoritmusok jól teljesítenek vezeték nélküli hálózatokban, azonban fejlesztésük során nem vették figyelembe a vezeték nélküli csatornák sajátosságait. Így a Tahoe, Reno, NewReno, vagy Westwood [5] TCP verziók ugyan kielégítő megoldást jelentenek vezeték nélküli környezetben, a rádiós hálózatokban teljesítményük jelentősen kisebb az elvárnál a rádiós csatornákon tapasztalható magas bithiba-arány miatt.

A probléma bemutatásához tételezzünk fel egy TCP folyamatot, amely 2 peert egy rádiós linket is tartalmazó hálózat felett köt össze. A rádiós bithibák miatt elvesztett csomagokra a folyamszabályozó algoritmus a küldési ablak méretének csökkentésével, azaz a küldési sebesség mérséklésével reagál, annak ellenére, hogy adott esetben nincs torlódás a hálózatban. Ennek következtében a hálózat kihasználtsága messze elmaradhat az optimálistól.

Több javaslat is született a TCP hatékonyságának növelésére. A javaslatok egyik főbb csoportja az IP alatti adatkapcsolati rétegben alkalmazott ARQ módszerre épül (például 802.11, UMTS nyugtázott mód). Az újraküldés hathatós és skálázható megoldást jelenthet, azonban ahhoz, hogy a késleltetés és a buffer méret ne legyen túl nagy, korlátozzák az újraküldések maximális számát. Így elképzelhető, hogy az ARQ alkalmazásával sem szűnik meg a csomagvesztés. A visszamaradó csomagvesztés mértéke [1] alapján akár 6% is lehet egy ipari környezetben alkalmazott WLAN kapcsolat esetén. Ez is azt igazolja, hogy szükség van olyan kiegészítő mechanizmusokra, melyek képesek fokozni a TCP protokoll teljesítményét, akár ARQ alkalmazása

mellett is, kritikus állapotú rádiós csatornák felett. Természetesen az ARQ, illetve a FEC rádiós csatorna feletti alkalmazása nélkül (például UMTS transzparens mód) a TCP folyam még kevésbé védett a rádiós bithiba okozta csomagvesztésekkel szemben, így ekkor az új eljárások alkalmazása még indokoltabbá válik.

A javaslatok egy másik nagy csoportja közvetlenül a transzport rétegben történő módosításokra épül. Ezen módosítások célja, hogy a TCP képes legyen a csomagvesztés okai, a torlódás és a rádiós bithiba (a továbbiakban csak bithiba) között különbséget tenni. Az I-TCP [2] két részre bontja a TCP folyamatokat egy fix és egy mobil peer között úgy, hogy a vezeték nélküli részen egy optimalizált protokollt használ az adatátvitelre. A felbontás elfedi a bithiba okozta csomagvesztéseket a TCP protokoll előtt, így növelve a teljesítményt. A Berkeley SNOOP protokoll [3] a TCP csomagok bázis állapotánál (BS) történő eltárolásával és a visszaérkező nyugták függvényében történő újraküldésükkel próbálja fokozni a TCP teljesítményét. A módszer bonyolultsága és rossz skálázhatósága miatt nem hathatós megoldás, hasonlóan az I-TCP protokollhoz. Bakshi és társai [4] megvizsgálták az MTU méretének hatását a TCP teljesítményére, és javaslatot tettek egy módszerre, mely alapja, hogy a TCP fogadó ICMP csomagok felhasználásával tájékoztatja a TCP forrást a rádiós csatorna állapotáról, és a forrás ezekhez a jelzésekhez igazítja a működését.

Balan és társainak [8] javaslata szerint, a TCP fejléc option mezejébe egy, csak a TCP fejlécét védő ellenőrző összeget kell illeszteni. Ennek felhasználásával ellenőrizni lehet a fejléc épségét, és ha a payload megsérül, de a fejléc ép marad, akkor azonosítani és értesíteni lehet a TCP küldőt, hogy az átviteli ablak méretét ne csökkentse.

Az Explicit Vesztés Jelzés (ELN) [6] alkalmazása lehetővé teszi, hogy a TCP fogadó közvetlen módon értesítse a küldőt a csomagvesztések okáról. A BS a TCP csomagok helyett csupán a sorszámokat tárolja el, majd ezek alapján, az elveszettnek vélt csomagok-

hoz tartozó nyugtáknak (ACK) az ELN bitet átállítja. A módszer hátránya, hogy a BS-nél tárolni és kezelni kell a folyamatokhoz tartozó sorszám listákat, ami IPsec alkalmazása esetén nem lehetséges. További hátrány, hogy a nyugták elvesztése nincs figyelembe véve, és a módszer nem biztosít hatékony átvitelt a jelzés információk számára.

Korábbi munkánk során [7] átértelmeztük az ELN módszert, pusztán az alapelv – a TCP forrás explicit értesítése a rádiós csomagvesztésekről – megtartásával. Javaslatunk a TCP-Reno folyamszabályozási algoritmusára épült, vezeték nélküli hálózatok felett működése megegyezett a TCP-Reno működésével. Vezetéknélküli hálózatokban amennyiben a TCP fogadó képes volt értesíteni a forrást a rádiós linken elvesztett csomagok számáról, jelentős teljesítmény növekedést lehetett elérni alkalmazásával.

Munkánkban vázlatos leírást adunk a veszteségi információ megszerzésének mikéntjéről, amely a protokoll működésének egyik meghatározó eleme. Részletesen leírjuk a veszteségi információ megszerzésének módját, illetve egy olyan folyamszabályozási algoritmust is ismertetünk, mely az előzőleg javasolt protokollnál hatékonyabban használja fel a rendelkezésre álló információkat.

## 2. A TCP-ELN protokoll működése

A protokoll működéséhez elengedhetetlen, hogy a TCP fogadó és küldő képes legyen a veszteségi információkat feldolgozni. Ehhez mind a kliens, mind a szerver oldalon módosításokat kell végrehajtani a transzport rétegben.

### 2.1. Fogadó oldali módosítások

A TCP fogadónak felkészültnek kell lennie, hogy a sértetlen TCP csomagokon kívül, veszteségi információkat (VI) is kaphat az alsóbb rétegektől. Sértetlen TCP csomag érkezése esetén, a fogadó a hagyományos TCP fogadó mintájára viselkedik és generál egy nyugtát. Amennyiben VI érkezik, a fogadó eltárolja, majd a következő nyugtára ráülteve (piggybacking) elküldi a TCP forrásnak. Mivel több csomagvesztés is történhet a rádiós linken, mielőtt egy új nyugta generálna, ezért a VI-eket el kell tárolni, hogy ne vesszenek el.

A protokoll nem használ negatív nyugtákat, így a késleltetett nyugta generálás – bár sok szempontból előnyös lehet –, mégsem ajánlott, mivel túlzottan lecsökkentené a jelzési csatorna sebességét.

Ha egy nyugta elveszik a hálózatban, akkor a ráültetett jelzés sem érkezik meg a TCP forráshoz, ezáltal csökkenhet a folyamszabályozó algoritmus hatékonysága. Ennek elkerülése érdekében a TCP fogadónak redundáns módon kell a jelzéseket továbbítani. Definálni kell, hogy egy nyugtában legfeljebb hány VI-t lehet eltárolni és egy VI hányszor kerül elküldésre. A mi implementációnkban egy nyugta 6 VI eltárolására képes, és minden VI háromszor kerül továbbításra.

A TCP kommunikáció során időzítők járhatnak le a TCP forrásnál. Ekkor a forrás a hálózatban levő nyugtáktól függetlenül újakezdi a csomagok küldését az utolsó nyugtázott csomagtól. A TCP fogadó által eltárolt VI-eket ilyenkor törölni kell, hiszen az általuk hivatkozott veszteségek az időzítő lejáta előtt történtek, így értesítést küldeni róluk fölösleges, sőt inkonzisztens protokoll viselkedést eredményezhet. Ennek elkerülésére a TCP forrás jelzéseket küld a timeout eseményekről a fogadónak. Az időzítőkkal a következő szakasz foglalkozik részletesebben.

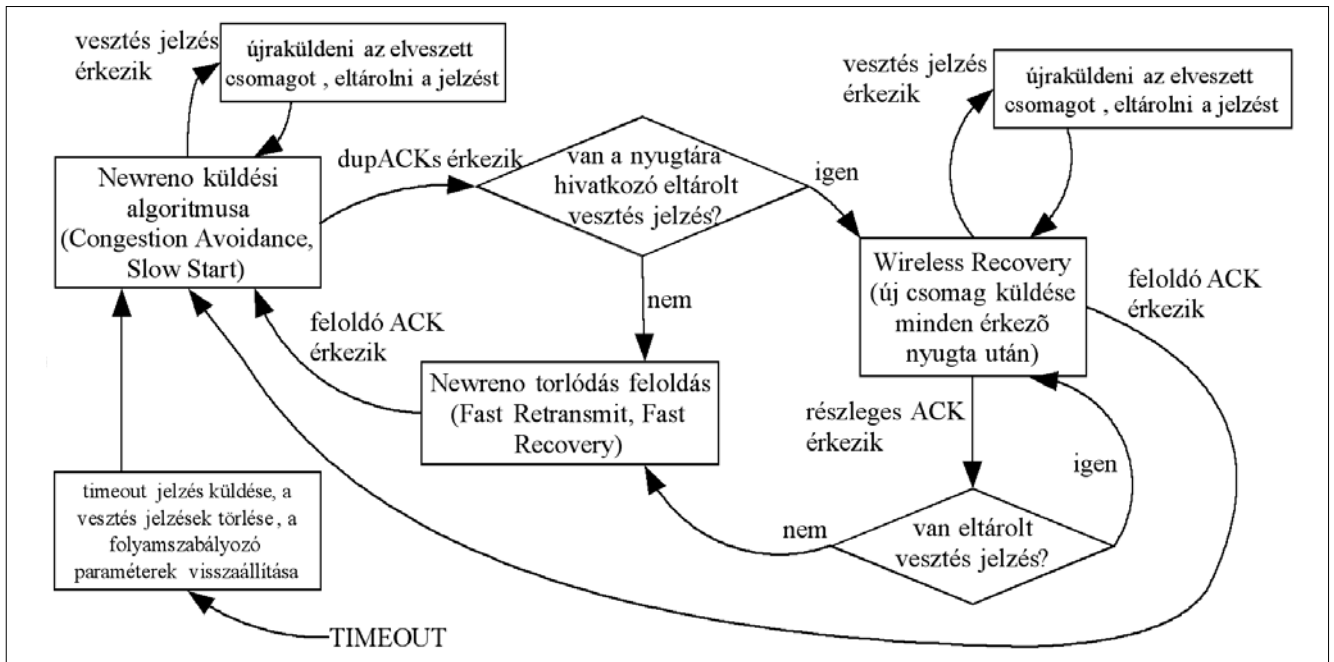
### 2.2. Küldő oldali módosítások

A TCP-ELN működését meghatározó folyamszabályozási algoritmus a TCP-NewReno-ra épül. Amennyiben nem érkezik visszajelzés rádiós csomagvesztésről, a TCP küldő a TCP-NewReno-val megegyező módon viselkedik. Vesztes jelzések (VJ) érkezésének hatására a TCP forrás a bithiba miatt elvesztett csomagokat újraküldi és eltárolja a VJ-eket. A csomagvesztések következményeként érkező harmadik duplikált nyugtáig a forrás a Slow Start vagy a Congestion Avoidance algoritmus szerint működik. A harmadik duplikált nyugtát a forrás a csomagvesztés jelének tekinti. Ilyenkor megvizsgálja a vesztes okát, ami torlódás vagy bithiba lehet, és ennek megfelelően dönt a vesztes feloldás módjáról. Ha az eltárolt VJ-k közt nem szerepel hivatkozás az elvesztett csomagra, akkor a forrás torlódást feltételez, és ennek megfelelően – a NewReno mintájára – meghívja a Fast Retransmit és Fast Recovery algoritmusokat. Ellenkező esetben, azaz ha egy eltárolt VJ hivatkozik az elvesztett csomagra, akkor a TCP küldő egy új állapotba lép (Wireless Recovery) a bithibából eredő csomagvesztés feloldására.

Wireless Recovery állapotban a TCP-ELN forrás a feloldó nyugtára (recovery ACK) vár, ami nyugtázza az összes rádiós csatornán elvesztett csomagot. A feloldó nyugta hatására a folyamszabályozó algoritmus törli a VJ-k listáját, és a harmadik duplikált nyugta érkezése előtti állapottól folytatja a működését. Az állapottól függően a küldési ablak mérete vagy a Congestion Recovery, vagy a Slow Start szerint változik tovább.

A feloldási nyugtára várva további duplikált nyugták is érkehetnek, melyek hatására a folyamszabályozási algoritmus tovább növeli a küldési ablakát egy szegmenssel (a maximális méretig), azaz minden nyugta beérkezésekor egy új szegmenst küld ki, így fenntartva a küldési sebességet. Amennyiben részleges nyugtát (partial ACK) kap a forrás, két lehetőség áll elő attól függően, hogy a nyugtázott TCP csomagot követő szegmensre van-e hivatkozás az eltárolt VJ-k közt. Ha van, akkor a forrás lecsökkenti az adási ablak méretét az újonnan nyugtázott szegmensek össz méretével, és tovább vár a feloldó nyugtára. Ha nincs hivatkozás, a NewReno torlódás feloldó algoritmusával folytatódik a folyamat.

A nyugtákra ültetve új VJ-k is érkehetnek. Ezeket a jelzéseket a TCP küldő eltárolja, és az általuk hivatkozott csomagokat újraküldi.



1. ábra A TCP-ELN forrás folyamatszabályozási algoritmus

Az algoritmus biztosítja, hogy rádiós csomagvesztések esetén a feloldás ideje alatt ne csökkenjen le a küldési sebesség, illetve ha torlódás lépne fel a feloldás alatt, akkor a NewReno algoritmus által biztosított torlódás kezelő algoritmusok lépjenek életbe. A TCP-ELN működése az 1. ábrán látható.

Ha a TCP küldőnél lejár egy időzítő, akkor a paraméterek újra inicializálódnak a TCP-NewReno mintájára, törölődik a VJ-k listája és az eseményről jelzés indul a TCP fogadó felé a TCP szegmensekre ültetve. Mivel a szegmensek elveszhetnek, ezért a forrásnak redundánsan kell elküldenie a jelzéseket. Egy lehetséges – általunk is implementált – megoldás, ha a forrás a folyam keletkezése óta fellépett timeout események számát minden egyes szegmens fejlécébe beilleszti. Ekkor – függetlenül a csomagvesztésektől –, az első TCP fogadóhoz megérkező szegmensből kiolvasható, ha lejárt egy időzítő a küldőnél.

### 3. Veszteségi információk kinyerése

Az ELN módszer működéséhez elengedhetetlen, hogy a rádiós csatornán megsérült csomagokból veszteségi információt lehessen kinyerni. Egy VI-t három adat határoz meg, ami elég egy TCP folyam, illetve szegmens azonosításához. A három adat: a forrás IP címe, a TCP célportja és a szegmens sorszáma.

Az információ megszerzésének több módja is van, de ezek a lehetőségek erősen függenek a hálózat topológiájától, illetve konfigurációjától. A módszerek bemutatására használt topológia egy elterjedt, és a gyakorlati életben is jelentős elrendezés, melyben egy vezeték nélküli link köti össze a hálózat hozzáférési pontját és a klienst.

A topológia a 2. ábrán látható.

A következőkben két módszert ismertetünk ezen adatok kinyerésére olyan csomagokból, melyek megsérültek a rádiós csatornán.

#### 3.1. Módosítás az adatkapsolati rétegben

Az első módszer arra az észrevételre épül, hogy a rádiós linken bekövetkező hibák hatására nem elveszik egy MAC keret, hanem bitek átállítódásával megérkezik a fogadó félhez. Ebből a sérült keretből a TCP/IP fejlécet kiemelve azonosítható a szegmens és a folyam, amihez a szegmens tartozott. A fejléc felhasználásához ellenőrizni kell a fejléc épségét, de ezt a TCP protokoll – az IP-vel ellentétben – alapértelmezett esetben nem támogatja. Így szükséges egy új, dedikált védelem, ami csak a TCP fejlécet védi [8]. Egy alkalmas védelmi eljárás lehet az ellenőrző összeg használata, amit a TCP fejléc „option” mezőjébe lehet elhelyezni.

Ha a kliens MAC rétege egy sérült keretet kap a rádiós csatornán, ahelyett hogy eldobná, kinyeri és továbbítja a felsőbb rétegnek szánt adatokat (payload). A további rétegek hasonló módon ellenőrzik a fejléc épségét, és továbbítják az adatokat. Ha minden alsóbb réteghez tartozó fejléc sértetlen, akkor a csomag eléri a TCP réteget, ahol a VI-k kinyerése megtörténik. A módszer hatékonyságát az biztosítja, hogy a payload mérete sokkal nagyobb, mint a fejléceké, így a bithibák nagyobb valószínűséggel esnek az adat-részbe, mint a fejlécekbe.

2. ábra Tipikus rádiós hálózatelérési topológia



A MAC módosítás módszerének legnagyobb előnye az, hogy csak a TCP folyam két végpontjánál kell átalakításokat végezni, a hálózat belső elemei érintetlenek maradhatnak. Ennek következményeként viszont csak a letöltési irányba lehet az átvitel hatékonyságát növelni, hisz csak a kliens képes monitorozni a rádiós csatornát.

Ha a MAC réteg átalakítása, vagy a sérült MAC csomagokból az adatok kinyerése nem lehetséges, akkor a következőkben ismertetett módszer alkalmazható.

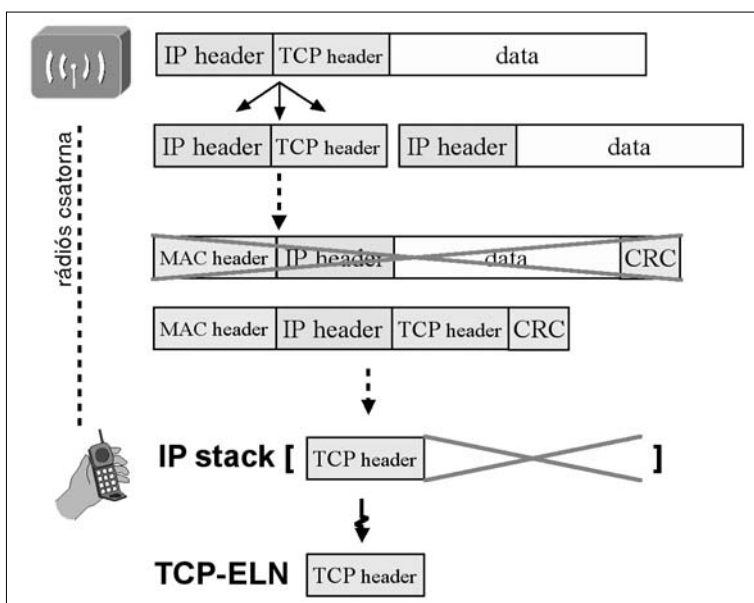
### 3.2. Módosítás az IP rétegben

A módszer arra a tényre épül, hogy a kis méretű csomagok elvesztése kisebb valószínűséggel következik be, mint a nagy méretű csomagok elvesztése. Így ha egy TCP szegmens egy IP csomagba ágyazva éri el a vezeték nélküli routert, akkor az IP csomag két részre bontásával – ahol a kisebb rész a TCP fejléccel, a nagyobb rész a payloadot tartalmazza – a VI-k nagy valószínűséggel épen érik el a kliens.

A módszer alkalmazásának feltétele, hogy a TCP szegmens egy IP csomagba ágyazva haladjon végig a hálózaton egészen a vezeték nélküli routerig. Ekkor ha a kliens IP rétegéhez nem érkezik meg egy a wireless routernél feldarabolt IP csomag valamelyik része, akkor az a rádiós linken történt hiba nyilvánvaló jele. Az IP réteg megvizsgálja a megkapott csomag részleteket, és ha köztük van az első – a TCP fejléccel tartalmazó – részlet, akkor a beágyazott TCP fejléccel megfelelő jelzésekkel továbbítja a TCP rétegnek, ahol a fejléc birtokában a TCP réteg kiolvashatja a veszteségi információt. A módszer nem teszi lehetővé, hogy torlódás miatt elveszett csomagokból VI-t lehessen kinyerni, hiszen torlódás esetén egy egész IP csomag, illetve TCP szegmens elveszik. Az eljárás működése a 3. ábrán látható.

Ha a folyam mentén valamelyik router darabolást végez az IP rétegben, akkor a módszer nem alkalmazható, mivel egy IP részlet elvesztése esetén nem lehet a veszteség okát a kliensnél meghatározni.

3. ábra IP darabolás

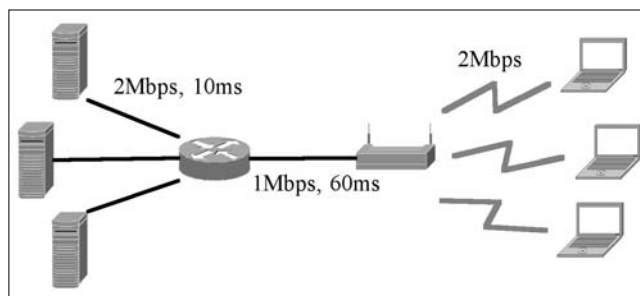


Az IP darabolás módszerének hátránya, hogy nem csak a folyam két végpontját, de a vezeték nélküli routert is módosítani kell. Mindazonáltal a vázolt eljárás egyrészt sokkal hatékonyabb, illetve skálázhatóbb más, a router átalakítását igénylő módszernél (például Snop). Másrészt az átalakítások függetlenek az alkalmazott MAC rétegtől és az IP réteg szolgáltatásainak megfelelően történnek (darabolás).

### 4. Szimulációs környezet

A TCP-ELN protokoll teljesítményét szimulációk futtatásával teszteltük.

A szimulációkhoz felhasznált topológia 8 hálózati berendezést tartalmaz: 3 szervert, 3 mobil klienst, egy vezeték nélküli és egy vezeték nélküli routert, ahogy az a 4. ábrán is látható.



4. ábra Szimulációs topológia

A szerverek és a router között 2 Mbit/s-os, 10 ms késleltetésű linkek vannak. A két routert egy 1 Mbit/s-os, 60 ms késleltetésű link köti össze. A vezeték nélküli router minden mobil állomásnak 2 Mbit/s sávszélességet szolgáltat. Minden kapcsolat full duplex. A wireless routerben nem használtunk semmilyen specifikus MAC réteget, hiszen a bemutatott módszerek általános érvényűek, így sokkal kevésbé függenek a MAC rétegtől, mint a topológiától.

Két különböző forgalom került felhasználásra: FTP és web forgalom. Míg az FTP forgalom a protokoll állandósult állapotbeli viselkedésének, a web forgalom a protokoll dinamikus viselkedésének tanulmányozására megfelelő. A futtatások során minden kliens-szerver pár között egy végtelen FTP letöltést indítottunk a 3 szerveren ugyanazzal a TCP típusal (ELN, NewReno). A két protokoll nyújtotta átviteli sebességet (throughput) hasonlítottuk össze.

Web forgalom esetén minden kliens az egyik szerverhez kapcsolódó, böngésző felhasználót szimulált. A web forgalom paramétereit a SURGE [9] modellből származtattuk, mely valós mérésekre épül és széleskörben alkalmazott realisztikus terhelések generálására. A futtatások során az oldalak letöltésének sebességét (oldal méret/letöltési idő) mértük az egyes TCP verziók felhasználása mellett.

A rádiós linken történő TCP szintű csomagvesztések szimulálására két modellt használtunk: uniform és egy markovi modellt. Az uniform modellnél az egyenletes eloszlás várható értékét 0 és 0,2 között, a Markov-modellnél a paramétereket a [10] tanulmány szerint változtattuk. A Markov-modell előnye, hogy alkalmas a különböző sebességű felhasználók által tapasztalt különböző csomagvesztési valószínűséggel rendelkező rádiós linkek szimulálására (1. táblázat).

Modell szám	Sebesség	Átlagos hiba vsz.	Átlagos börszt hossz
1	gyalogos	0.001	1.4913
2		0.01	4.0701
3		0.1	13.6708
4	közepes	0.001	1.0083
5		0.01	1.0838
6		0.1	1.8629
7	közúti	0.001	1.0024
8		0.01	1.012
9		0.1	1.1317

1. táblázat A Markov-hibamodell paraméterei

Mivel a TCP-ELN folyamatszabályozó algoritmus erősen függ a TCP szegmensek meghibásodásának módjától (a fejléc is megsérül-e, vagy sem), ezért a futtatások során a sikeres VI kinyerésének valószínűségét 95%-ra állítottuk, figyelembe véve a fejlécek és a payload méretének gyakorlatban tapasztalható arányát. A beállítás következménye, hogy a sérült TCP szegmensek 5%-ból nem lehet veszteségi információt kinyerni.

### 5. Eredmények

Az 5. ábrán látható eredmények alapján megállapítható, hogy FTP forgalom mellett a TCP-ELN protokoll teljesítménye jelentősen nagyobb a NewReno-énál. A csomagsérülés valószínűségével nő a javulás mértéke, ami a vizsgált tartomány határánál akár a 400%-ot is elérheti. A rádiós csatorna ideális állapota esetén – nem sérülnek meg csomagok – a TCP-ELN protokoll nyújtotta átviteli sebesség kis mértékben (0,5%) alacsonyabb a NewReno sebességénél. Ennek oka a TCP-ELN által használt fejléc, aminek a mérete nagyobb a NewReno által használt fejlécnél, hogy képes legyen a vesztesé jelek eltárolására. A megnövekedett csomagméret miatt, a csomagok átviteli ideje megnő, de ez nem jelent problémát, hisz más elterjedt és használt TCP verzióknál is fellép ez a jelenség (TCP-SACK).

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a TCP-ELN teljesítménye sokkal finomabban törik le a hibavalószínűség növelésével, mint a NewReno teljesítménye. Míg a TCP-ELN által nyújtott sebesség 14%-os hibavalószínűségnél esik le 90%-ra, addig a NewReno-t használva ugyanez a sebességcsökkenés már 4%-os hibavalószínűség mellett bekövetkezik. A Markov-hibamodell mellett a javulás mértéke elérheti a 185%-ot a nagy hibavalószínűségű esetekben (10%-os hiba valószínűség, 3-as, 6-os, 9-es modell) a börsztösség függvényében. A kis hibavalószínűségű esetekben (1-es, 4-es, 5-

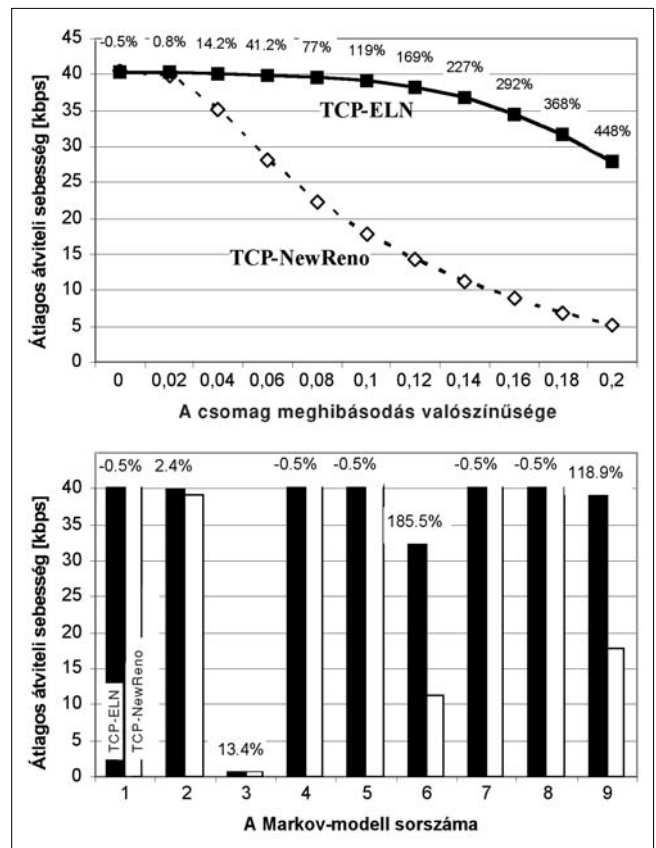
ös, 7-es, 8-as modell) egy kisebb sebességcsökkenés tapasztalható az előbb részletezett ok miatt. A 2-es modell esetén a javulás 2%-os.

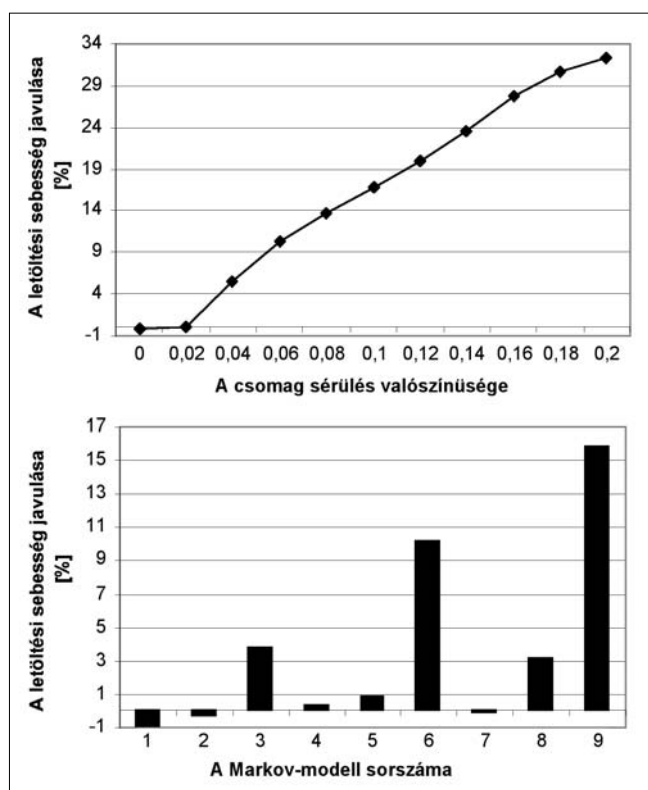
Az uniform és a Markov-modell melletti relatív javulás értékeit összehasonlítva fontos összefüggés állapítható meg. A Markov-modell sebesség paraméterének megnövelése lecsökkenti a hibabörsztök hosszát. Így ezekben az esetekben, ahogy a csomagvesztések közt csökken a korreláció, a Markov-modell szolgáltatja eredmények az uniform modell eredményeihez konvergálnak.

Ahogy a 6. ábrán látható, web forgalom esetén az eredmények kevésbé kiugróak, de még így is jelentősek. Uniform hibamodell esetén a TCP-ELN teljesítménye közel azonos a NewReno-éval 2%-os hibavalószínűségig, majd a javulás mértéke 33%-ig fut fel nagyobb hibavalószínűségekre. Ha nincs csomag sérülés a rádiós csatornán, a TCP-ELN teljesítménye 1%-ot esik a fejléc mérete miatt. Markov-modell esetén a javulás mértéke 4% és 16% közé esik a nagy hibavalószínűségű modellekre, a kis hibavalószínűségű modelleknél a relatív javulás kevesebb.

Összehasonlítva a web és az FTP forgalom által szolgáltatott eredményeket, megfigyelhető, hogy FTP forgalom esetén a TCP-ELN relatív teljesítménye jóval nagyobb. Ennek oka az, hogy a felhasznált HTTP-szerű web forgalom esetén a TCP folyamat többségének mérete kicsi, csak pár csomag. A kis folyamat pedig nem teszik lehetővé, hogy a küldési ablak mérete

5. ábra Az adatátviteli sebesség és a TCP-ELN által nyújtott relatív javulás mértéke FTP forgalom esetén, uniform és Markov-hibamodell mellett





6. ábra

A TCP-ELN által nyújtott relatív javulás a letöltési sebességben uniform és Markov-hibamodellek mellett

nagyra nyílnon, így az ELN folyamatszabályozási algoritmus nem képes olyan mértékben megnövelni az átviteli sebességet az ablak felezések elkerülésével, mint nagy folyamok, illetve küldési ablakok esetén.

Elmondható, hogy p2p forgalom esetén a TCP-ELN teljesítmény növekedése az FTP és web forgalom nyújtotta eredmények közé várható, az FTP esetét felső, a web esetét alsó korlátnak tekintve.

## 6. Összefoglalás

Cikkünkben bemutatunk egy új módszert, a TCP kapcsolatok rádiós csatornák feletti teljesítményének növelésére. Módszerünket az explicit vesztes jelzés (ELN) technikájára alapoztuk, azzal a céllal, hogy képessé tegyük a TCP forrást a csomagvesztések okainak: a torlódásnak és a rádiós bithibáknak a megkülönböztetésére. Ezáltal a TCP folyamatszabályozó algoritmus képes elkerülni a rádiós csomagvesztésekből eredő fölösleges ablakcsökkentést, aminek következtében a teljesítménye jelentősen jobb lesz összehasonlítva az elterjedt TCP verziókkal.

Két módszert is kidolgoztunk a veszteségi információk megszerzésére, ami elengedhetetlen az ELN működéséhez. Az első módszer a mobil kliens adatkapcsolati rétegének módosítását igényli, a második eljárás egy speciális IP darabolási technikára épül.

Szintén bemutatásra került egy új, általunk fejlesztett TCP variáns, a TCP-ELN, mely integrálja a veszteségi információk megszerzésének módszerét a TCP-New-

Reno folyamatszabályozási algoritmusával. A küldő és fogadó oldali módosítások részletes tárgyalásra kerültek.

A protokollt különböző forgalmak (FTP, web) és rádiós hibamodellek (uniform, Markov) mellett is teszteltük. Szimulációs eredményeink azt mutatták, hogy a TCP-ELN alkalmazása igen hatékony a hálózati környezetek széles spektrumán. Magas csomagvesztési valószínűségű rádiós csatornán, FTP forgalom mellett a relatív javulás mértéke akár a 400%-ot is elérheti, web forgalom mellett a javulás 30%-ot ért el.

## Irodalom

- [1] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, A. Wolisz, Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment Using an IEEE 802.11 – Compliant Physical Layer. IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 49, No.6., December 2002.
- [2] A. Bakre, B. R. Badrinath, I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts. In: Proc. 15th International Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), May 1995.
- [3] H. Balakrishnan, V. N. Padmanabhan, S. Seshan, R.H. Katz, A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links, IEEE/ACM Trans. on Networking, 5(6), December 1997.
- [4] B. Bakshi, P. Krishna, N. H. Vaidya, D. K. Pradhan, Improving Performance of TCP over Wireless Networks, 17th Int. Conf. Distributed Computing Systems, Baltimore, May 1997.
- [5] C. Casetti, M. Gerla, S. Mascolo, M. Y. Sanadidi, R. Wang, TCP Westwood: Bandwidth Estimation for Enhanced Transport over Wireless Links, In: Proc. ACM Mobicom'2001, pp.287–297., Rome, Italy, July 16-21, 2001.
- [6] Hari Balakrishnan, Randy Katz, Explicit Loss Notification and Wireless Web Perform., Proc. IEEE GLOBECOM Global Internet Conf., Sydney, Australia, November 1998.
- [7] G. Buchholz, A. Gricser, T. Ziegler, T. Van Do, Explicit Loss Notification to Improve TCP Performance over Wireless Networks, 6th IEEE High-Speed Networks and Multimedia Communications (HSNMC), 2003.
- [8] R. K. Balan et. al, TCP Hack: TCP Header Checksum Option to Improve Performance over Lossy Links, IEEE Infocom 2001.
- [9] P. Barford, M.E. Crovella, Generating Representative Web Workloads for Network and Server Performance Evaluation, In: Proc. of Performance, ACM SIGMETRICS'98, pp.151–160., Madison WI.
- [10] A. Chockalingam, M. Zorzi, Rames R. Rao, Performance of TCP on Wireless Fading Links with Memory, ICC 1998.

# Albert Einstein intelmei

SIPOS LÁSZLÓ

siposlaj@axelero.hu

*Einstein 1905-ben több fizikatörténeti jelentőségű cikket is közölt az Annalen Physik című folyóiratban. A dolgozatok közül a kvantum-hipotézis, illetve a speciális relativitáselmélet a nem szakemberek számára is a modern fizika szimbólumává vált. Így érthető, hogy 2005-öt, Einstein „csodaévének” centenáriumát választották a fizika ünnepi évének, amely nem telhet el anélkül, hogy meg ne emlékeznénk magáról a tudósról és az emberről.*

## Ki is volt Einstein?

Albert Einstein 1879. március 14-én született Ulmban. Münchenben, Aarauban és a zürichi műszaki egyetemen végezte tanulmányait. 1901-ben felvette a svájci állampolgárságot. A svájci találmányügyi hivatalban dolgozott tisztviselőként (1902-1905). Ekkor publikálta első tanulmányait az elméleti fizika tárgy körében.

Speciális és általános relativitáselmélete (1905 ill. 1916) tette világhírűvé. Einstein speciális relativitáselméletében rögzítette a tömeg és az energia egyenértékűségének elvét, mely szerint a testek kölcsönhatásakor az energiaátadást mindig egy vele arányos tömegátadás kíséri. Közérthetően fogalmazva: a testek nyugalmi tömegéhez is tartozik energia, melyet a közmert Einstein-féle egyenlet, az  $E=mc^2$  képlet határoz meg. Ez az elv egyesíti a tömeg és az energia megmaradásának elvét a legáltalánosabb keretek között. Az elméletből következett az atomenergia felszabadításának elméleti alapja.

Előbb a zürichi és a prágai egyetemek professzoraként dolgozott, majd a berlini Kaiser Wilhelm fizikai kutatóintézet igazgatója lett (1914-1933). 1921-ben fizikai Nobel-díjat kapott a fényelektromos jelenség elméleti magyarázatáért.

Hitler hatalomra kerülése után elhagyta Németországot, Oxfordban és Cambridge-ben adott elő, majd 1934-től az USA-ban, a Princeton Egyetemen dolgozott.

Az atomenergia felszabadításának beláthatatlan távlatait az 30-as évek végén ismerte fel, és azt az ember szolgálatába szeretne volna állítani. Tudóstársai

val együtt azonban számoltak felfedezésük pusztításra alkalmas erejével is, és rádöbbentek iszonyú felelősségükre. A második világháború küszöbén Einstein – Szilárd Leó és Wigner Jenő ösztönzésére – Roosevelthez, az USA akkori elnökéhez címzett levelében hívta fel a figyelmet az új energia veszélyeire, aminek nyomán beindult az amerikai atomprogram:

*„Mi tudósok szabadítottuk fel ezt a szörnyű erőt. Rajtunk áll, parancsolóan minket terhel a felelősség az atomenergia irányításáért. Hogy ne megsemmisülést idézzen elő, hanem az emberiség jólétét szolgálja.”*

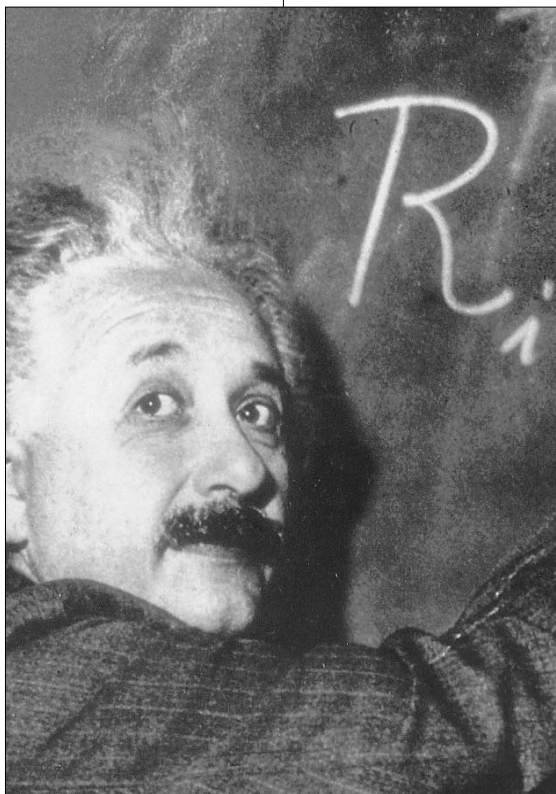
1940-ben felvette az amerikai állampolgárságot és a Princeton Egyetem professzora lett. Élete hátralévő részében saját egységes térelméletét felhasználva próbálta meg a kvantum- és az általános relativitáselméletet egyesíteni. A háború után az atomfegyverek nemzetközi ellenőrzésének megszervezését sürgette.

1955. április 18-án Princetonban (New Jersey) halt meg.

## Einstein üzenete

Az alábbiakban a Nobel-díjas fizikus, az Olaszországi Tudományfejlesztő Társaság 1950. évi kongresszusára küldött üzenetének rövidített, de tanulságokban bővelkedő változatát ajánlom az olvasóink figyelmébe:

*„Ma olyan belső s külső bizonytalanság idejében élünk, s a változatlan dolgok oly ritkák, hogy meggyőződésünk bevallásának pusztá tényét is értéknek kell tekintenünk, noha meggyőződésünk, akár a többi értékítélet, logikai úton nem igazolható.”*





Felvetődik a kérdés: A tudós munkásságának önálló céljául az igazság megismerését tűzze-e ki, logikus gondolkodással kísérelje meg megérteni a megismerhető világot? Igazságkeresésünknek más céloknak kell engedelmessé válni, például 'gyakorlati' céloknak?

A logikából kiindulva e kérdésre nem adhatunk feleletet. A válasz mélységes hatással lesz gondolkodásunkra, az erkölcsi értékekről vallott felfogásunkra, feltéve, hogy a válasz mélységes és megingathatatlan meggyőződésből születik.

Engedjék meg, hogy elmondjam hitvallásomat: Számomra a világ sokkal mélyebb és jobb megértésére való törekvés egyike ezeknek az önálló céloknak, amelyek nélkül szerintem egyetlen gondolkodó lénynek sem lehet tudatos és konstruktív magatartása az élethez.

A világ megismerésére való törekvésünk lényege az, hogy egyrészt törekszünk az emberi tapasztalatokat egész fenséges bonyolultságukban felölelni, másrészt egyszerű, gazdaságos és alapvető hipotéziseket igyekszünk felfedezni. Az a meggyőződés, hogy ez a két cél összeegyeztethető, az számunkra, a tudományos kutatásnak e primitív szakaszában csupán a hit kérdése. Ilyen hit nélkül nem lehetnének szilárdan és megingathatatlanul meggyőződve a tudás abszolút értékeiben.

A tudományos munkával foglalkozó embernek valóságos pozíciója személyisége egészére alakító hatással van. Hiszen azon a tudáson kívül, amely a tapasztalatok során felhalmozódott, valamint a logikus gondolkodás törvényein kívül elvileg sem létezhetnek számára tudományos tekintélyek, állítások és megítélések, amelyek önmagukban igényt tarthatnának a „helyességre”. Ez paradox helyzethez vezet, amikor is az ember, aki képességeinek legjavát az objektív realitás tanulmányozásának szenteli, társadalmi szempontból rendkívüli mértékben individualista lesz, aki legalábbis elvileg semmi másban nem hisz, csak a saját meggyőződésében. Még azt a véleményt is megkockáztathatjuk, hogy az intellektuális individualizmus és a tudományos megértés szomjazása egyidejűleg tűntek fel a történelemben, és a mindig is elválaszthatatlanul maradtak.

Azonban a tudomány így megrajzolt embere nem más, mint absztrakció, hús-vér alakban nem létezik a földön. Én azonban úgy vélem, hogy az általunk ismert tudomány nem tudott volna megszületni, és életben maradni, ha a századok folyamán az individuumok sokasága meg nem közelítette volna ezt az eszményt.

Milyen helyzetben van a tudós, mint a társadalom tagja?

Szemmel láthatólag nagyon is büszke rá, hogy a tudósok munkálkodása hozzájárult az emberiség gazdasági életének gyökeres átalakításához, a fizikai munka szinte teljes kiküszöböléséhez. Azonban nyugtalanítja az a tény, hogy tudományos tevékenységéből az emberiséget fenyegető veszély született, mivel hogy kutatásainak eredményei erkölcsileg vak politikusok kezébe kerültek. Megérti azt a tényt is, hogy a technológiai módszerek vezettek arra, hogy mind a

gazdasági, mind a politikai hatalom egy parányi kisebbség kezében koncentrálódott, s ezzel képessé váltak arra, hogy az egyre alaktalanabbá váló néptömegek életét teljesen meghatározzák. És ami még ennél is rosszabb: a gazdasági és politikai hatalomnak ez a kisebbség kezében való koncentrációja a tudomány emberét nemcsak gazdaságilag kényszerítette függőségbe, hanem belsőleg is fenyegeti függetlenségét. Az intellektuális és pszichikai ráhatás finom módszerei, amit alkalmaznak, megakadályozhatja a független személyiség kiformalódását.

Igy saját szemünkkel győződünk meg arról, hogy a tudós ember sorsa igazán tragikus. A legőszintébb módon törekedve a világosság és a belső függetlenség felé, ő maga teremtette meg azokat a fegyvereket, amelyek önmaga rabszolgaságba döntéséhez és belső szétrombolásához szükségesek. A politikusok elkerülhetetlenül betömik a száját, s akár csak a katoná, kénytelen életét áldozni, és a másokét elpusztítani, még akkor is, ha meggyőződött arról, hogy az ilyen áldozatok értelmetlenek. Teljesen felfogja azt a tényt is, hogy az általános elpusztulás elkerülhetetlen, mivel a történelmi fejlődés ahhoz vezetett, hogy minden gazdasági, politikai és katonai hatalom nemzeti államok kezében összpontosult. A tudós azt is megérti, hogy az emberiség csakis abban az esetben menekedhet meg, ha olyan nemzetek fölötti rendszert teremtenek, amelyet a törvényekre és arra alapoznak, hogy a nyers erőszakot örökké száműzi a társadalom életéből; azonban a tudós ma már annyira szétzilált, hogy úgy veti magát alá a nemzeti államtól rákényszerítette rabszolgaságnak, mintha az elkerülhetetlen sorsa lenne. Annyira mélyre süllyed, hogy szolgálatkészen segíti az emberiség általános megsemmisítése eszközeinek tökéletesítését.

A tudós számára nincs más kiút? Valóban kénytelen engedelmessé válni és tűrni mindenféle megaláztatást? Vajon örökre elmúltak azok az idők, amikor a belső szabadsága, gondolkodásának függetlensége és munkássága a tudóst magasra emelte, és megvolt az a lehetősége, hogy felvilágosítsa az emberi nem más képviselőit, és gazdagítsa életüket? Mivel túlságos kizárólagossággal támaszkodott munkájában az értelmi alapokra, nem feledkezett-e meg kötelezettségeiről és kötelességeiről?

A válaszom: az embert, aki lélekben szabad és becsületes, megsemmisíteni ugyan lehet, de sohasem válhat rabszolgává, és nem lehet vak eszközként használni.

Ha a tudós napjainkban képes lenne időt és bátorságot találni arra, hogy tisztességesen és kritikusan átgondolja helyzetét és közvetlen feladatait, és úgy döntene, hogy ennek megfelelően cselekszik, akkor jelentősen megjavulhatna annak lehetősége, hogy a jelenlegi veszélyes nemzetközi problémáknak értelmes és kielégítő megoldását megtaláljuk.”

## **BROADBAND WIRELESS ACCESS NETWORKS**

Several technologies compete in the field of access networks, some of them are dying out while new solutions appear.

The question now is not the one which will be the winner but rather if we are able to create systems using available technologies which are ready to provide the most suitable solution to meet the necessary parameters (price, QoS, transmission speed, etc.)...

### **Application Scenarios of WiMAX Systems**

*Key words: WiMAX, UMTS, 4G-systems*

WiMAX is a promising technology for fixed and mobile high-speed access networks. With WiMAX, wired operators may expand the limits and capabilities of their networks, providing new services to customers. Current cellular operators can apply WiMAX to drive off massive data load from their UMTS network. WiMAX promises large bandwidth and range, integrated QoS support, and flexible spectrum allocation. In this paper we investigate the role of WiMAX in 4G networks.

### **Overview of the IEEE 802.16 Standard**

*Key words: WiMAX, IEEE 802.16, IEEE 802.x*

The paper presents the objectives of the IEEE 802.16 standard, its relationship to the 802.x family and the accomplishments already made. Main parts and various amendments of the 802.16 standard are presented. The paper concludes with an overview of the activity within the WiMAX Forum and emphasizes the importance of the interoperability among different vendors' equipment.

### **The Physical Layer of the IEEE 802.16 Standard**

*Key words: IEEE 802.16, HiperMAN, OFDM, WiMAX*

The paper presents the physical layer specification of the IEEE 802.16-2004 standard version. It continues the overview of the broadband wireless access standardization environment in the previous paper and serves as a prerequisite for the discussion of the MAC layer in the subsequent paper.

### **The Medium Access Control (MAC) Layer of the IEEE 802.16 Standard**

*Key words: WiMAX, MAC, medium access control, IEEE 802.16*

This paper covers the Medium Access Control (MAC) layer of the IEEE 802.16 standard. After introducing a reference model, the Service Specific Convergence

Sublayer, the MAC Common Part Sublayer and the Security Sublayer are discussed in detail. The paper is based on IEEE 802.16-2004.

### **Regulatory Environment for Broadband Wireless Access Systems**

*Key words: broadband wireless access, frequency regulation, RLAN, WMAN*

The paper deals with the EU and Hungarian regulatory issues of broadband wireless access. It provides an overview of operational conditions of radio LAN and MAN systems in the 5 GHz band and deals with operation of WiMAX systems in the licensed and unlicensed frequency bands.

\* \* \*

### **New Trends in Software Radio Systems**

*Key words: software radio, SDR, GSM*

Software radio is one of the key areas of research in the field of wireless telecommunications. Shortly after the theoretical papers had been published, the first prototypes were developed – military applications in the first place. There are two main branches of research. One of them uses universal hardware and there is a hardware abstraction layer for hiding the changes in the hardware. The other approach employs an off-the-shelf PC with a general purpose operating system and an RF unit implemented as a PC card. The signal processing code is a user application implemented in a general programming language (mainly C/C++). These two approaches are introduced in this paper, the latter is illustrated by a trial GSM system installed in Mid-Texas cellular radio access network.

### **TCP-ELN:**

#### **Efficient Communications over Radio Channels**

*Key words: TCP protocol, ARQ, explicit loss notification*

As wireless technologies are becoming more widespread, the importance of efficient communications over radio channels increases. TCP versions applied currently do not take into account the special characteristics of radio channels, thus their performance can be significantly lower compared to the available resources. In the paper, solutions proposed so far are summarized and a new TCP variant, TCP-ELN, is introduced which is capable of improving the transfer speed considerably. The performance of the new solution is evaluated using simulations.