

SZAKDOLGOZAT

Balogh György

Debrecen
2009

Debreceni Egyetem
Informatika Kar

WiMAX és 3G technológiák műszaki összehasonlítása,
gazdasági elemzése

Belső konzulens:

Gál Zoltán
*DE TEK Információtechnológiai
Központ igazgató*

Készítette:

Balogh György
Programtervező Informatikus (Bsc)

Külső konzulens:

Korsós András
SCI-Network műszaki igazgató

Debrecen
2009

Tartalomjegyzék

Tartalom

Tartalomjegyzék.....	4
Tartalom.....	4
Táblázatok, ábrák jegyzéke.....	5
Bevezetés.....	7
Témaválasztás indoklása.....	7
Célkitűzések.....	7
Mobile WiMAX.....	9
1. Mobile WiMAX technológia áttekintése.....	9
1.1 IEEE 802.16 - WiMAX szabvány.....	9
1.2 A Mobile WiMAX főbb tulajdonságai.....	10
2. Fizikai réteg.....	11
2.1 OFDMA.....	11
2.2 OFDMA Szimbólum felépítése és alvivő-csatornabontás.....	12
2.3 OFDMA skálázhatósága.....	13
2.4 TDD keretstruktúra:.....	14
2.5 Egyéb fejlett fizikai rétegbeli szolgáltatások.....	15
QAM:.....	15
3. MAC réteg leírás.....	18
3.1 QoS támogatás.....	19
3.2 MAC Időzítő szolgáltatás.....	21
3.3 Mobilitás menedzselés.....	22
Teljesítmény menedzsment.....	22
Handoff- handover- cellaváltás.....	23
3.4 Biztonság.....	23
4. További funkciók a Mobile WiMAX-nál.....	24
4.1 Smart (intelligens) antennák:.....	24
A Smart antenna technológia főbb tulajdonságai:.....	24
4.2 Frekvencia újrafelhasználás.....	26
4.3 Multicast és Broadcast Szolgáltatás (MBS).....	28
5. Mobile WiMAX rendszer teljesítményének értékelése.....	29
5.1 Mobile WiMAX MAP megbízhatóság és áttekintés.....	29
5.2 WiMAX szimulált rendszer teljesítménye.....	31
6. WiMAX End-to-End architektúrája.....	33
Néhány WiMAX architektúra fejlesztési alapelv:.....	34
Támogatott end-to-end architektúra szolgáltatások és kiszolgálói alkalmazások:.....	35
NRM.....	35
7. Más megközelítés.....	38

7.1 Mobile WiMAX nyílt szabványok és ökoszisztéma.....	38
7.2 Mobile WiMAX Alkalmazások.....	39
7.3 Mobile WiMAX spektrum.....	39
7.4 Roadmap WiMAX termékekhez.....	40
3G mobil technológia.....	41
3G-s rendszerek fejlődése:.....	41
Evolution Data-Optimized (1xEVDO) rövid technikai ismertetése.....	42
HSDPA/HSUPA rövid technikai ismertetése.....	43
3G összehasonlítása a Mobile WiMAX rendszerrel.....	44
Összefoglalás.....	48
Szakmai összegzés és konklúzió levonása.....	48
Személyes tapasztalat, élmény összegzése.....	49
Irodalomjegyzék.....	50
Függelék.....	51
Rövidítések.....	51
Tesztelt WiMAX rendszer leírása.....	55
3G-WiMAX teszt rendszerek részletes leírása.....	56
Állandó helyű WiMAX rendszerek berendezései.....	59
Köszönetnyilvánítás.....	60

Táblázatok, ábrák jegyzéke

1. ábra: Mobile WiMAX rendszer profil.....	10
2. ábra: Az OFDMA rendszer alap felépítése.....	12
3. ábra: OFDMA alvivő felépítése.....	12
1. táblázat: S-OFDMA skálázhatósági paraméterei.....	13
4. ábra: WiMAX OFDMA keretszerkezete.....	14
2/a. táblázat: QAM kódolás.....	16
2/b. táblázat: A QAM kódolás vizuálisan megjelenítve.....	16
3. táblázat: Támogatott kódolások, modulációk.....	17
4. táblázat: Mobile WiMAX fizikai adatátvitel.....	18
5. ábra: Mobile WiMAX QoS támogatás.....	19
5. táblázat: Mobile WiMAX alkalmazásai és a szolgáltatások minősége.....	20
6. táblázat: Különböző antenna beállítások.....	25
7. táblázat: SIMO/MIMO adatátviteli konfigurációk.....	26
6. ábra: Multi-Zone keret felépítése.....	27
7. ábra: Frekvencia újrafelhasználás.....	27
8. ábra: MBS Zónák.....	28
9. ábra: Ellenőrző csatorna lefedettségének szimulált teljesítménye.....	30
8. táblázat: Mobile WiMAX teszt konfiguráció.....	32
9. táblázat: Mobile WiMAX rendszer teljesítménye.....	32
10. ábra: Spektrális hatékonyság javulása optimalizált rendszer esetén.....	32

11. ábra: Átvitel optimalizált, változó DL / UL arányú rendszeren	33
12. ábra: WiMAX Hálózati Referencia Modell	36
13. ábra 18: WiMAX Hálózat IP alapú felépítése.....	37
10. táblázat: WiMAX Alkalmazási osztályok.....	39
14. ábra: WiMAX Technológia kilátásai (2006).....	40
11. táblázat: WiMAX/3G Technológiai lehetőségei	41
15. ábra: 3G CDMA rendszer evolúciója.....	43
12. táblázat: Egyszerűsített rendszer összehasonlítás	44
13. táblázat: AMC lehetőségek összegzése.....	45
14. táblázat: Teljesítmény összehasonlítás.....	46
16. ábra: Csatorna/ szektor átvitel összehasonlítása	46
17. ábra: Spektrális hatékonyság összehasonlítása	47
15. táblázat: Mobile WiMAX SIMO/MIMO összehasonlítás	47
I. táblázat: WiMAX rendszer paraméterei	55
II. táblázat: OFDMA paraméterek	56
III. táblázat: Terjedési Modell.....	56
A. táblázat: Mobile WiMAX és 3G rendszer paraméterei	57
B. táblázat: Mobile WiMAX OFDMA paraméterei.....	57
C. táblázat: Terjedési modell.....	58
D. táblázat: Többszörös hozzáférési modell a teljesítmény szimulációhoz.....	58
18. ábra: WiMAX CPE képei	59
19. ábra: WiMAX BS képei	59

Bevezetés

Témaválasztás indoklása

A Debreceni Egyetemen eltöltött évek alatt, nem teljesen az én akaratom szerint, de úgy alakult és most már cseppet sem bánom, hogy lehetőségem nyílt jobban elmélyedni a számítógépes hálózatok felépítését, működését taglaló tárgyak mondanivalójában. Onnantól kezdve, ahogy időm engedte igyekeztem mindig valami plusz hálózati területet érintő tárgyat is hallgatni az egyetemen. Így sikerült a Cisco Academy programmal valamennyire elsajátítanom a jelenleg is működő IP hálózat alapvető működési mechanizmusát. Majd egy másik tárgy keretein belül: „Nagy sebességű és városi hálózatok” néven ahol megláthattam, hogy milyen rejtett, fel nem használt, működő technikák is léteznek a világon, amik különböző okok miatt nem használatosak, pedig a jelenlegi technológiáknál jóval meggyőzőbb paraméterekkel rendelkeznek. 2007 nyarán egy kis betekintést is nyertem a hálózati világ gyakorlati oldalába, számomra ekkor tűnt fel a WiMAX, mint újnak számító technológia. A szakdolgozat megírásával remélem, nagyobb rálátásom lesz a rendszer működésére, felhasználhatóságára. Valamint az egyetem elvégzése után szeretnék ezen a szakterületen elhelyezkedni. Napjainkban az internet már-már minden háztartásban, illetve minden iparágazatban jelen van, a folyamatosan növekvő sávszélesség igényen, és a tán még régebben és erősebben fennálló költséghatékony hozzáféréseken túl egyre nagyobb a kereslet a mobilitást növelő megoldások iránt.

Célkitűzések

A Mobile WiMAX megalkotásával, fejlesztésével szabványosításával foglalkozó csoportok, cégek ismertetése, gyors kronológiai áttekintése a szabványok létrejöttének, majd WiMAX Fórum Release-1 rendszer alap konfigurációjának bemutatása, teszteredményeinek ismertetése a fő célom. Megmutatni, hogy tud csatornánként, minden egyes bázis állomáson (BS) másodpercenkénti több tíz megabit átviteli sebességet elérni az alap rendszer. Majd az egyéb technológiákat hozzáadva miként lehet ezt az értéket jelentősen növelni, pl.: speciális antenna rendszerrel (AAS). A nagy adatátviteli sebesség lehetővé teszi az adatok kódolását, alacsony késleltetést. Paramétereit alapján lehetőség nyílik szélessávú adatátvitelre mind adat-

folyamok és a minőségi szolgáltatás révén (QoS) mind videó, hanganyag (VoIP) átvitelére. Majd szó esik a mobil internet alkalmazások és a Mobile WiMAX kapcsolatáról.

A rendszer skálázhatósága, nagy adatátviteli kapacitása, és alacsony költsége, IEEE által elismert 802.16-os alapszabványa, és ebből kiindulva létrejött több nyílt szabványú, egyre hatékonyabb változatai energiatakarékos, ezáltal környezetbarát felépítése, mögötte álló több száz csoportokba szerveződött fejlesztői cég révén szó esik a lehetőségről, hogy uralkodóvá válhasson a piacon. Néhány nagyobb, a technológiát támogató, fejlesztő cég, mint pl. az Alvarion, ATT, Motorola, Nortel és az Intel, aki ráállt a WiMAX chipek gyártására, ezáltal jóformán szinte biztossá vált, hogy pár éven belül a fogyasztók kezébe kerülő valamennyi informatikai eszközbe integrálva lesz a WiMAX. Majd rövid kitekintést adok a konkrét mai világ- és hazai piacra.

Ezután röviden bemutatom a 3G-t, mint jelenleg a piacon leginkább elterjedt, uralkodó rivális technológiát. Nagyobb hangsúlyt fektetve a két technológia teljesítmény, és szolgáltatás minőségének összehasonlítására.

Mobile WiMAX

1. Mobile WiMAX technológia áttekintése

1.1 IEEE 802.16 - WiMAX szabvány

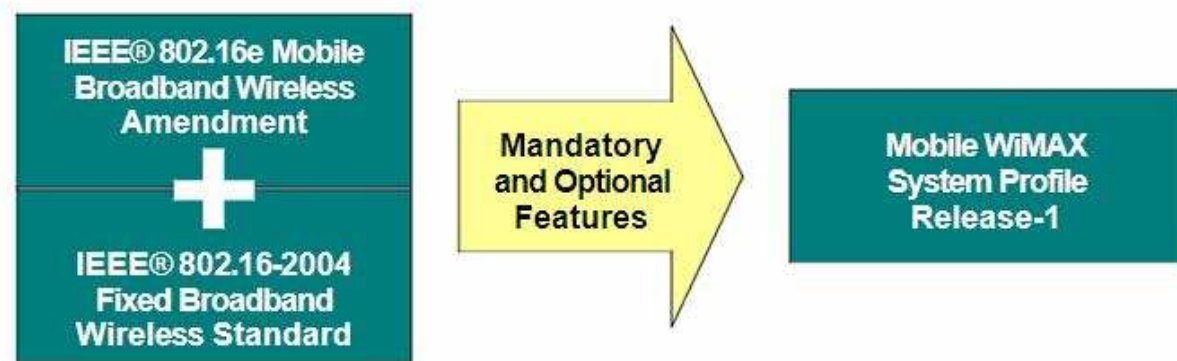
A WiMAX technológia alapja az IEEE 802.16-2004 Air Interface szabvány. Feltűnésekor szinte berobbant a piacra, ideális megoldást nyújtva az állandó helyű szélessávú városi vezeték nélküli hálózat létesítésére. Ezzel vitathatatlanul egy költséghatékony alternatív megoldást biztosít a DSL vezetékes technológiával szemben olyan területeken, ahol a kábeles kiépítés nem lehetséges, vagy túlságosan költséges lenne. Emlékeztetőül jegyezném meg, hogy azokban az években (2003-2004) a DSL technológia maximum 4 Mbps letöltési és igen csekély felirányú sebességet tudott nyújtani a felhasználók számára.

2005-ben az IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers azaz villamosmérnököket egyesítő nemzetközi szervezet) elfogadta a fenti szabványból származtatott, jó néhány módosításon átesett, mobilitást és a hordozhatóságot támogató Mobile WiMAX -ként ismertté vált 802.16e szabványt. A továbbiakban, ha csak külön nem utalok az állandó helyű (fix) változatra, ezt a szabványt értem WiMAX rendszer alatt. 2006-ban a WiMAX Fórum létrehozta a rendszer architektúráját, és a végponttól végpontig (end-to-end) Mobile WiMAX Release-1 –et is kibocsátotta.

A Mobile WiMAX egy olyan szélessávú vezeték nélküli megoldás, ami lehetővé teszi a mobil, ezáltal rugalmas architektúrával rendelkező, szélessávú vezeték nélküli hálózati hozzáférést. A Mobile WiMAX rádió interfésze (air interface) ortogonális frekvenciaosztásos többszörös hozzáférési (OFDMA) technológiával interferencia mentes átvitelt tesz lehetővé akár NLOS környezetben is. Tehát olyan terepviszonyok esetén, amikor az adóállomásra (BS), közvetlenül nincs rálátási lehetőség. A skálázható OFDMA (SOFDMA) technológia az IEEE 802.16e szabványban került bevezetésre, amikor is az átviteli csatorna sávzélessége skálázható 1.25- 20 MHz-ig.

A WiMAX Fórumon egyik csoportjának, a Mobile Technical Group (MTG) -nak az volt a feladata, hogy kidolgozza a Mobile WiMAX rendszer profiljait, és meghatározza a kötelező, valamint opcionális tulajdonságait. A bázisállomás néhány tulajdonságát meghagyták opcionális lehetőségnek, hogy még személyre szabhatóbb legyen a rendszer. Fontos lehet a

kapacitás, vagy a lefedett terület nagysága. A Mobile WiMAX Release-1 profil az 5, 7, 8.75, 10 MHz-es csatorna sávszélességet támogatja az engedélyköteles 2.3, 2.5, 3.3 és 3.5 GHz-es frekvenciákon.



Forrás: WiMAX Fórum

1. ábra: Mobile WiMAX rendszer profil

A WiMAX Fórum egy másik csoportja, a Network Working Group (NWG) dolgozta ki a magasabb rétegbeli elemeket, mint pl. a címzési rendszert. Az IEEE és a WiMAX Fórum közös fejlesztései alapján létrejött a végleges end-to-end Mobile WiMAX technológia.

1.2 A Mobile WiMAX főbb tulajdonságai

- **Magas adatátviteli sebesség:** A rendszer a MIMO antenna technikát alkalmazva rugalmasabb alvivő-csatorna bontást tesz lehetővé, a speciális kódolási és modulációs eljárás pedig biztosítja, hogy a maximális adatátviteli sebesség akár 63 Mbps legyen letöltési irányba (DL) és akár 28 Mbps feltöltési irányba (UL) egy 10 MHz-es csatornán.
- **Szolgáltatás minőség (QoS):** Az alapvető előfeltétele az IEEE 802.16 MAC architektúrának a QoS. DiffServ használatával prioritizálhatóak a különböző forgalom típusok, és így biztosított a végponttól végpontig tartó IP alapú QoS. Továbbá az alvivő-csatorna bontást és a MAP alapú jelzésrendszer egy rugalmas eljárást biztosít az rádió interfész keretenkénti optimális tér, frekvencia és idő kihasználására.
- **Skálázhatóság:** Annak ellenére, hogy a gazdaság egyre inkább globalizálódik, a vezeték nélküli szélessávú hálózatok kiosztott, illetve kiosztható frekvencia spektrum világszerte még mindig igen eltérő. A Mobil WiMAX technológiát ezért úgy tervezték,

hogy képes legyen működni különböző frekvencia csatornákon 1,25-20 MHz –ig és így megfeleljen a legkülönbözőbb követelményeknek a világon. Megvalósíthatóvá teszi a különféle gazdaságok számára, hogy a sokoldalú Mobil WiMAX technológia előnyeit kihasználva szélessávú internet hozzáférésük legyen. Így lehetőség nyílik megfizethető internet hozzáférésre az egyedi földrajzi körülményekkel rendelkező pl. vidéki felhasználók számára, vagy szélessávú internet hozzáférésre pl. metrón és külvárosi területeken.

- Biztonság: A Mobile WiMAX számára előírt biztonsági szempontok alapján az EAP alapú hitelesítéssel, AES-CCM alapú hitelesítés titkosítással, CMAC és HMAC ellenőrző üzenet alapú védelmi rendszerével a legmagasabb szintű biztonságot nyújtja. Támogatja valamennyi létező felhasználói hitelesítést úgy mint: SIM / USIM kártyák, Smart Cards intelligens kártyák, digitális tanúsítványokat és a felhasználói név / jelszó rendszerek alapjául szolgáló megbízás típusú EAP módszert.
- A mobilitás: Mobile WiMAX támogatja az optimalizált hívásátadási rendszert, ennek köszönhetően késleltetése kevesebb, mint 50 ms. Így biztosított a valós idejű alkalmazások, pl. a VoIP szolgáltatás minőségének romlás nélküli működése. Rugalmas titkosítási rendszer biztosítja, a megbízható működés fenntartását a hívásátadás során.

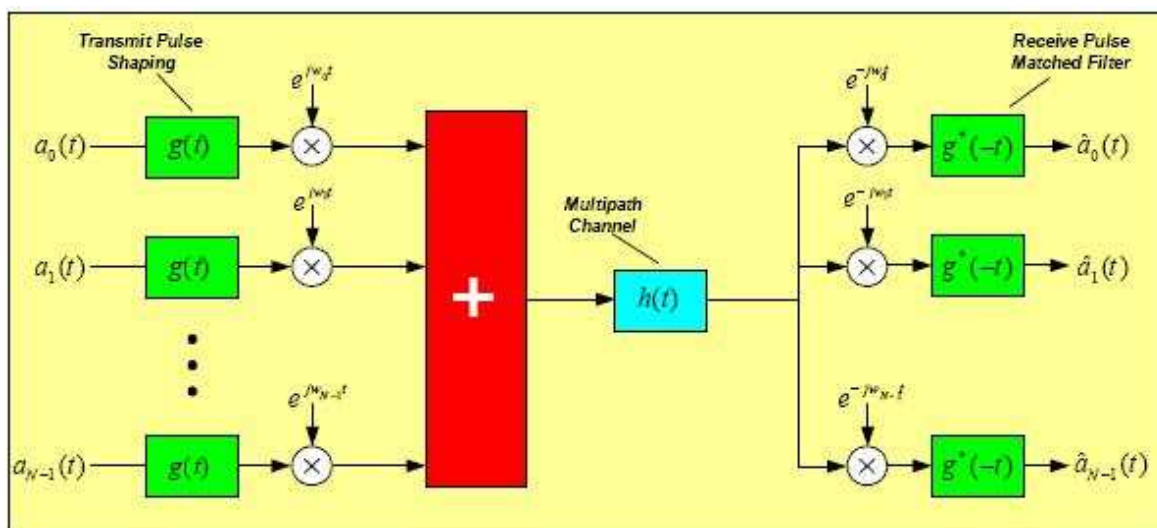
Napjainkra már teljes, a hétköznapi életben, gyakorlatban is igénybe vett és működő WiMAX hálózatok jöttek létre. Első volt a sorban a 2006-ban WiBro néven üzembe helyezett Koreai rendszer. Ma már a világ minden pontján vannak működő Mobile WiMAX hálózatok.

2. Fizikai réteg

2.1 OFDMA

Az OFDMA segítségével a rádiós hozzáférés adatsebessége nagymértékben növelhető az információ párhuzamos csatornákon történő átvitelével, ezen kívül robusztus megoldást jelent a szimbólumközi áthallás, valamint a frekvencia szelektív fading csökkentésére. Az OFDM egy speciális modulációs technika, melynél az adatfolyamot több párhuzamos adatfolyamra osztják fel majd több vivőfrekvenciára felkeverve sugározzák ki. Ezáltal a csatorna több, egymástól független, nem szelektív fadinges alcsatornára van felosztva. A csatornában való többszörös hozzáférés OFDMA rendszerű, az erőforrásokat időrések és csatornasávok

jelentik. Egy felhasználó több időrést és/vagy több csatornasávot használhat egyszerre. A szimbólum fogalma: Olyan szinuszos jel (vivő), aminek bizonyos paramétereit az adat bitek szabják meg és véges időtartamig tart, a vivő paramétereit nem változnak a szimbólum időtartama alatt. A Mobile WiMAX fel illetve a le irányba töltő felhasználókat UL (UpLink) és DL (DownLink) aloszámokba csoportosítja.

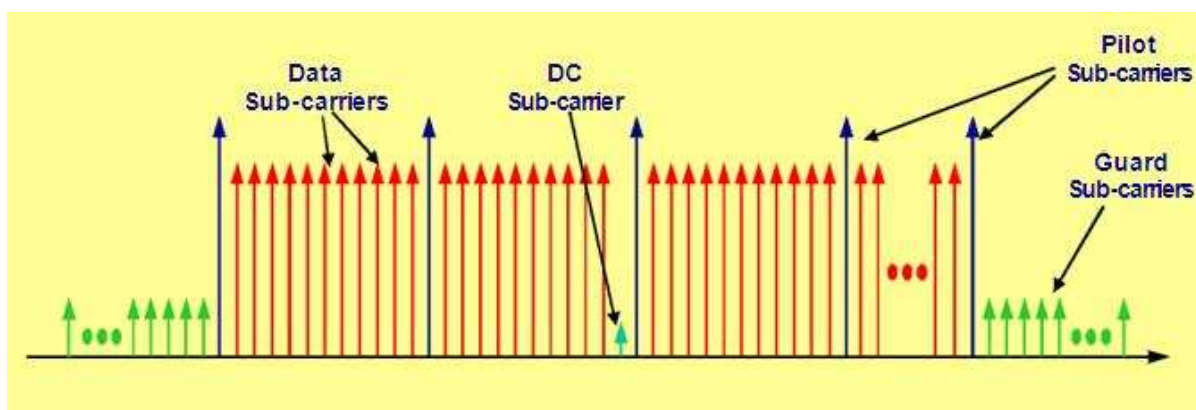


Forrás: WiMAX Fórum

2. ábra: Az OFDMA rendszer alap felépítése

2.2 OFDMA Szimbólum felépítése és alvivő-csatornabontás

Három féle OFDMA szimbólum alvivő típust különböztetünk meg:



Forrás: WiMAX Fórum

3. ábra: OFDMA alvivő felépítése

- Data sub-carriers, adat alvivő az adatátvitelre
- Pilot sub-carriers, pilot alvivő becslésre és szinkronizálásra
- Null sub-carriers, védősáv alvivők, amik nem adatátvitelre, hanem védő sáv a DC-vivőknek.

Az aktív alvivők (data és pilot), melyek egy részhalmazzt, alcsatornát alkotnak A WiMAX OFDMA fizikai rétege (PHY) támogatja az alvivőkre bontást, mind le és fel irányban (DL, UL). Ehhez szükséges minimum frekvencia-idő egység egy slot (időrés), ami 48 alvivőt jelent.

2.3 OFDMA skálázhatósága

Az IEEE 802.16e-2005 Wireless MAN OFDMA mód alapja a skálázható OFDMA (S-OFDMA). Az S-OFDMA sáv szélességek széles skáláját támogatja, hogy rugalmasan kielégítse a különböző spektrum kiosztási igényeket. A skálázhatóság megvalósítását két dolog szolgálja: az FFT (Fast Fourier Transformation) méretének változtatása, miközben az alvivőfrekvencia mérete állandó 10,94 kHz-en. Az S-OFDMA paramétereit az 1-es táblázat írja le:

Parameters	Values			
System Channel Bandwidth (MHz)	1.25	5	10	20
Sampling Frequency (F_p in MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
FFT Size (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Number of Sub-Channels	2	8	16	32
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz			
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)	91.4 microseconds			
Parameters	Values			
Guard Time ($T_g = T_b/8$)	11.4 microseconds			
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 microseconds			
Number of OFDMA Symbols (5 ms Frame)	48			

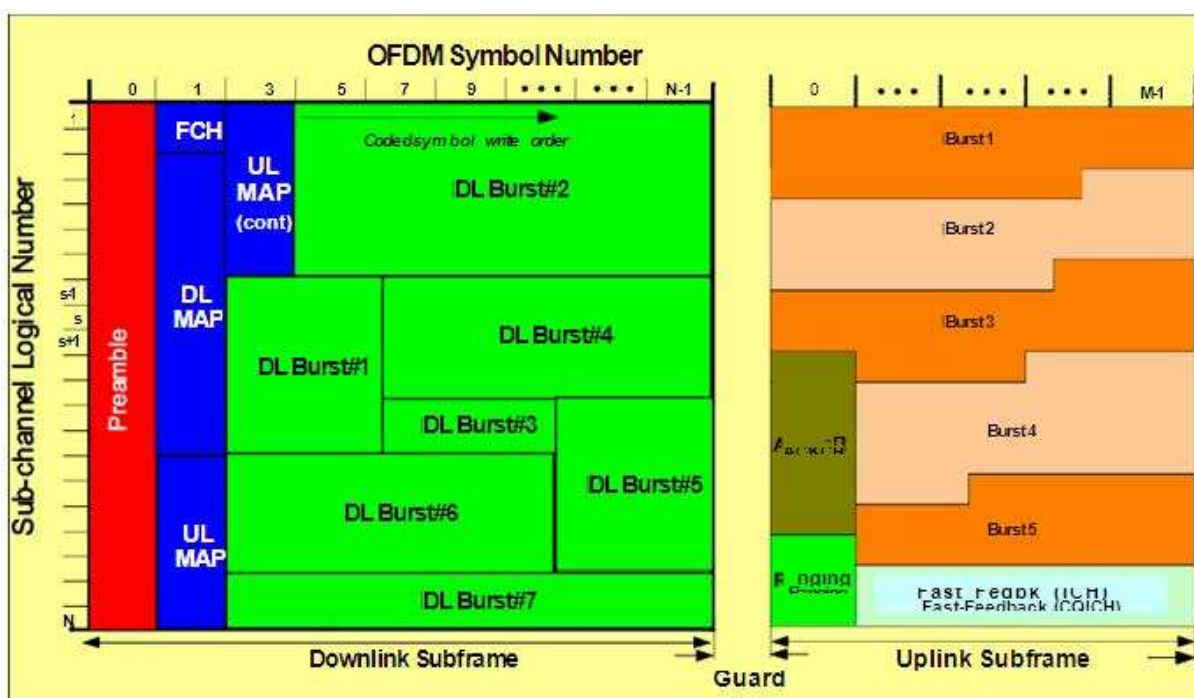
Forrás: WiMAX Fórum

1. táblázat: S-OFDMA skálázhatósági paramétereit

2.4 TDD keretstruktúra:

A 802.16e PHY támogatja a TDD, Full és Half-Duplex FDD átvitelt, amíg az eredeti Mobile WiMAX csak a TDD-t támogatta. Igaz a TDD-nek a teljes rendszerre kiterjedően szinkronizálva kell lennie, de az alábbi tulajdonságai miatt mégis előnyben lett részesítve:

- Változtatható, aszimmetrikus fel/le töltési arány, miközben az FDD-nél, ez az arány állandó, szimmetrikus.
- TDD biztosítja a csatorna reciprocitást a jobb spektrum kihasználás érdekében, a MIMO -t és más fejlett nyálábolt antenna technológiát
- Míg az FDD-nek kettő a TDD-nek elég egyetlen frekvencia csatorna a DL és UL –nek, ezzel is növelve az erőforrások kedvezőbb kihasználásának lehetőségét
- a TDD tervezése és megvalósítása egyszerűbb, és olcsóbb.



Forrás: WiMAX Fórum

4. ábra: WiMAX OFDMA keretszerkezete

Minden keret alkeretekre bontható (DL és UL) és ezek elválasztó közzel (Gap) vannak elkülönítve, hogy elkerülhető legyen le, fel irány átfedése. A keret, a következő ellenőrzési információkat használja a rendszer optimális működéséhez:

- Preamble: A bevezető a szinkronizálásra használt első OFDM szimbólum keret.
- Frame Control Header (FCH): a preamble-t követi, ez tartalmazza a keretekre vonatkozó információkat, mint pl. a MAP üzenet hossza, kódolási séma, és használt alcsatornák.
- DL-MAP és UL-MAP: ezek szolgáltatnak információt az alcsatornák elosztásáról és egyéb ellenőrző információkról, valamint a DL és UL alkeretekről.
- UL Ranging: ezen alcsatornán a mobil állomások (MS) idő, frekvencia, teljesítmény beállítására szolgálnak szükséges sáv szélesség függvényében.
- UL CQICH: MS-ek állapot információit visszajelző csatorna
- UL ACK: MS-eknek fenntartott DL HARQ visszajelzés megerősítésére szolgáló csatorna

2.5 Egyéb fejlett fizikai rétegbeli szolgáltatások

Azon fő technikák, amik bevezetése a WiMAX hálózat kapacitásának növelését és nagyobb lefedettséget biztosít a különböző alkalmazások számára.

- Adaptív moduláció és kódolás (AMC),
- Hibrid automata ismétléskérés (HARQ)
- Gyors csatorna visszajelzés (CQICH)

QAM:

Quadrature Amplitude Modulation, azaz kvadratúra amplitúdómoduláció. A digitális adatátvitel kulcsfontosságú modulációs technikája. Használják mind a WiFi, DRM, HamDRM, kábel TV-s internet, ADSL internet, NTSC és PAL televíziós rendszerekben, valamint a rádiózásban. Tehát a QAM egy modulációs eljárás, ahol az információt részben a vivőhullám amplitúdójának változtatásával, részben annak fázisváltoztatásával („kvadratúra”) kódoljuk. Az eljárás értelmezhető a komplex számok segítségével úgy is, hogy ez a két jellemző egy komplex értékkel jellemzett amplitúdómodulációt határoz meg. A fázis moduláció tekinthető a QAM egy speciális esetének, ahol az amplitúdó állandó, és csak a fázis változik. Ugyanez kiterjeszhető a frekvenciamodulációs eljárásra, ahol a fázis állandó. A digitális alkalmazások esetén mind az amplitúdó, mind a fázis kvantált, és így ábrázolható

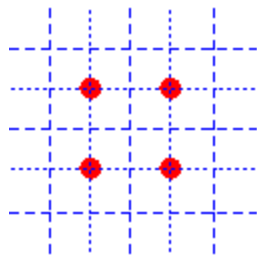
egy x-y koordináta-rendszerben, ami egy pontokból álló mintázatot, a „QAM képet” eredményezi. Ez a kép, és így az egyszerre átvitt bitek mennyisége növelhető a nagyobb átviteli sebesség érdekében, vagy csökkenthető a megbízhatóbb átvitelért cserébe. A pontok száma a QAM képen mindig kettő egész hatványa: 2^1 -től (2-QAM) 2^{12} -ig (4096-QAM). A leggyakrabban használt eljárások a 16-QAM, 64-QAM és 256-QAM, melyek 4, 6 illetve 8 bitet kódolnak egyetlen jelváltozással. Az alábbi táblázatból könnyen leolvasható a kódolások paraméterei:

QAM	bit/ szimbólum	Szimbólum felvehető értékei
4	2	0-3
8	3	0-7
16	4	0-15
32	5	0-31
64	6	0-63
128	7	0-127
256	8	0-255

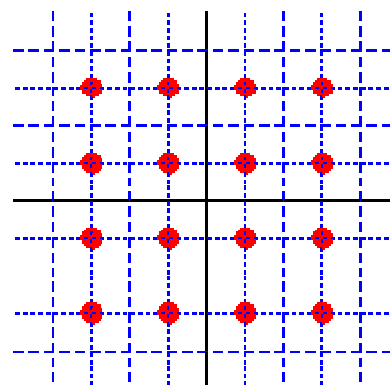
2/a. táblázat: QAM kódolás

0	1
3	2

00 01	08 09
02 03	10 11
04 05	12 13
06 07	14 15



4QAM,



16QAM

2/b. táblázat: A QAM kódolás vizuálisan megjelenítve

A 4QAM, amely gyakorlatilag a QPSK szinonimája 2 bit/ baud, 16QAM 4 bit/ baud és a 64QAM 6 bit/ baud hatékonyságú. A Mobile WiMAX -nál DL esetén kötelezően támogatott technika a QPSK, 16QAM és a 64QAM, UL -nél pedig a 64QAM opcionális. A Block Turbo Code és Low Density Parity Check Code (LDPC) támogatja az opcionális funkciókat. A kódolási és modulációs sémákat az alábbi tábla foglalja össze.

		DL	UL
Modulation		QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Code Rate	CC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	CTC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	Repetition	x2, x4, x6	x2, x4, x6

Forrás: WiMAX Fórum

3. táblázat: Támogatott kódolások, modulációk

A következő táblázat az adatátviteli sebességet mutatja 5, 10 MHz-es csatornákon. A keretek időtartama 5 milliszekundum, 48 OFDM jelből állnak, amiből 44 az adatátvitelre szolgál.

Parameter		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
System Bandwidth		5 MHz		10 MHz	
FFT Size		512		1024	
Null Sub-Carriers		92	104	184	184
Pilot Sub-Carriers		60	136	120	280
Data Sub-Carriers		360	272	720	560
Sub-Channels		15	17	30	35
Symbol Period, TS		102.9 microseconds			
Frame Duration		5 milliseconds			
OFDM Symbols/Frame		48			
Data OFDM Symbols		44			
Mod.	Code Rate	5 MHz Channel		10 MHz Channel	
		Downlink Rate, Mbps	Uplink Rate, Mbps	Downlink Rate, Mbps	Uplink Rate, Mbps
QPSK	1/2 CTC, 6x	0.53	0.38	1.06	0.78
	1/2 CTC, 4x	0.79	0.57	1.58	1.18
	1/2 CTC, 2x	1.58	1.14	3.17	2.35
	1/2 CTC, 1x	3.17	2.28	6.34	4.70
	3/4 CTC	4.75	3.43	9.50	7.06

Mod.	Code Rate	5 MHz Channel		10 MHz Channel	
		Downlink Rate, Mbps	Uplink Rate, Mbps	Downlink Rate, Mbps	Uplink Rate, Mbps
16QAM	1/2 CTC	6.34	4.57	12.67	9.41
	3/4 CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
64QAM	1/2 CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
	2/3 CTC	12.67	9.14	25.34	18.82
	3/4 CTC	14.26	10.28	28.51	21.17
	5/6 CTC	15.84	11.42	31.68	23.52

Forrás: WiMAX Fórum

4. táblázat: Mobile WiMAX fizikai adatátviteli

A bázisállomás időzítő határozza meg a megfelelő adatátviteli sebességet minden burst számára a puffer mérete alapján, csatorna terjedési viszonyait a vevőnél. A Channel Quality Indicator (CQI) csatornán a terminál és a központi időzítő közti csatorna állapotát leíró információk áramolnak. A csatorna állapot információkra a CQICH-n lehet visszajelezni, azon belül fizikai CINR, effective CINR, MIMO mód választható és a frekvencia szelektív alcsatorna. Hybrid Auto Repeat Request (HARQ) használja az N csatorna “Stop and Wait” protokollját, ami javítja a cellahatár menti lefedettséget. A növekményes redundancia javítja a megbízhatóságot. Egy dedikált uplink ACK csatorna van biztosítva a HARQ ACK/NACK jelnek (UL nyugtázás). Többcsatornás HARQ művelet is lehetséges. A többcsatornás stop-and-wait ARQ a kisszámú csatornáikkal egy hatékony, egyszerű protokollt valósít meg, amely minimalizálja a HARQ memória szükségletét. A Mobile WiMAX teljesen aszinkron átvitelt is biztosít. Az aszinkron működés lehetővé teszi változó késleltetést az újraadások között, amely nagyobb rugalmasságot ad az időzítőnek. A HARQ-t CQICH-al, és ACM együttes használatával egy igen megbízható, robusztus kapcsolatot kapunk, ami mobil környezetben akár közúti sebesség mellett (120 km / óra) is megbízható.

3. MAC réteg leírás

Kezdetől fogva a 802,16 szabvány úgy került kifejlesztésre, hogy a MAC réteg támogassa a szélessávú szolgáltatásokat, ilyenek a hang-, adat-és videó átvitel. A MAC réteg az időosztásos DOCSIS szabványon alapul és képes burst-ös adatforgalom bonyolítására magas maximális átviteli sebességgel, miközben támogatja a videó- streaming-et és a késleltetésre

Az ábrán látható folyamat egy egyirányú csomagáramlás, ami a QoS paramétereit is tartalmazza. Mielőtt a bázisállomás és a terminál között adatszolgáltatás történne, ki kell alakítani egy egyirányú logikai linket, kapcsolatot a MAC rétegek között. A kimenő MAC a csomagjait az interfészen egy szolgáltatás folyamattá konvertálja, és ezt küldi át a kapcsolaton. Átviteli közegként rendelkezésre áll a levegő, ami biztonság szempontjából a szűk keresztmetszet szokott lenni. A kapcsolat orientált QoS hatékonyan tudja lekövetni és kontrollálni a teljes kapcsolatot az End-to-end QoS ellenőrzéssel. A szolgáltatás áramlás paramétereit dinamikusan menedzselhetők MAC üzenetekkel, ezzel kielégítve a dinamikus szolgáltatás igényt. A QoS természetesen mind DL, mind UL oldalon alkalmazható. A Mobile WiMAX széles körű támogatást nyújt a szolgáltatások és alkalmazások változatos QoS követelményeinek megfelelően.

QoS Category	Applications	QoS Specifications
UGS Unsolicited Grant Service	VoIP	Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance
rtPS Real-Time Polling Service	Streaming Audio or Video	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Traffic Priority
ErtPS Extended Real-Time Polling Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Maximum Latency Tolerance Jitter Tolerance Traffic Priority
nrtPS Non-Real-Time Polling Service	File Transfer Protocol (FTP)	Minimum Reserved Rate Maximum Sustained Rate Traffic Priority
BE Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing, etc.	Maximum Sustained Rate Traffic Priority

Forrás: WiMAX Fórum

5. táblázat: Mobile WiMAX alkalmazásai és a szolgáltatások minősége

3.2 MAC Időzítő szolgáltatás

A Mobile WiMAX MAC időzítő szolgáltatás célja hatékonyan teljesíteni a szélessávú adatátviteli szolgáltatásokat, beleértve hang, adat, és videó egy időben változó, szélessávú vezeték nélküli csatornán. A MAC időzítési szolgáltatás a következő tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek lehetővé teszik a széles sávú adatszolgáltatást:

- **Gyors adat_időzítő:** a MAC időzítőnek hatékonyan kell kezelnie a rendelkezésre álló erőforrásokat, hogy eleget tegyen a burst-ös adatforgalom és az időben változó igények kielégítésének. A gyors reagálás érdekében ez az időzítő megtalálható valamennyi bázisállomáson. Tehát a fizikai rétegben QoS paramétereivel együtt, jól meghatározott szolgáltatás-folyamokba tömörült adatsomagokban küldi át a levegő interfészen. A CQICH csatorna gyors csatorna információs visszajelzést nyújt, hogy az időzítő minden esetben ki tudja választani a megfelelő kódolást és modulációt. Az adaptív moduláció HARQ kódolással kombinálva megbízható, robosztus időben is változtatható csatornákon keresztüli adatátvitelt biztosít.
- **Időzítés DL és UL -en:** Ez az időzítés működőképes mind DL -en, mind UL -en. Annak érdekében, hogy a MAC időzítő hatékony erőforrás elosztást, és a kívánt QoS-t nyújtani tudja az UL -en, tudnia kell a pontos visszajelzéseket és időszerű információkat, a csatorna terheltségi viszonyait, és a QoS követelményeket. Az összetett UL sáv szélesség kérés mechanizmus, mint például a csatorna sáv szélesség kérés és lekérdezés, célja, hogy támogassák az UL sáv szélesség kérelmek hatékony működését. Az UL szolgáltatás-folyam képezi a visszacsatolási mechanizmust minden UL kapcsolatnál, ezekkel számol az UL időzítő. Továbbá meggátolja az ortogonális UL alcsatornákon keresztül, hogy cellák közti interferenciák jöjjenek létre.
- **Dinamikus erőforrás foglalás:** Az MAC támogatja a frekvencia-idő forrás keretenkénti elosztását mind UL és DL irányba. Az erőforrás-elosztás minden keret elején MAP üzenetek formájában található meg. Ezért az erőforrás elosztása keretenként megváltoztatható az éppen aktuális forgalom és a csatorna feltételeknek megfelelően. Továbbá az egész lefoglalt erőforrás készlet szabadon állítható egy slot-tól akár az egész keretre. A gyors és finom felbontású forráselosztás lehetővé teszi a kiváló QoS adatforgalmat.
- **QoS-orientált:** A MAC időzítővel kezelt adat átvitel kapcsolat alapon történik. Minden

kapcsolat egy adatszolgáltatásból és egy sor QoS paraméterből áll, ami leírja annak viselkedését. Azzal a képességgel, hogy dinamikusan foglalható erőforrás mind DL, mind UL -eknek, az időzítő kiváló QoS átvitelt tesz lehetővé. Különös jelentősége van ennek az UL -ek hatékonyság kihasználásának területén.

- Frekvencia kiválasztásos időzítés: az időzítő több típusú alcsatornán tud működni. A frekvenciaosztásos alcsatorna, mint pl. a PUSC változat, ahol alvívők az alcsatornákon ál-véletlenszerűen osztják el a sáv szélességet. Frekvenciaosztásos időzítés nagy felbontású és rugalmas idő-frekvencia erőforrás időzítésű QoS-t biztosít. Folyamatos felcseréléssel, mint az ACM permutáció az alcsatornákon különböző csillapítás érhető el. A frekvencia szelektív ütemezés a mobil felhasználók számára a nekik legmegfelelőbb rendelkezésre álló legerősebb alcsatornát adják. A frekvencia szelektív időzítés javíthatja a rendszer kapacitását egy mérsékelt UL irányú CQI overhead túlméretezéssel.

3.3 Mobilitás menedzselés

Az akkumulátor élettartama és a cellaváltás a két legkritikusabb kérdés a mobil alkalmazásoknál. Mobile WiMAX két üzemmódot támogat sleep (alvó), és Idle (készenléti), amelyek lehetővé teszik a mobil állomások (MS) hatékony működését. A Mobile WiMAX biztosítja a szakadás mentes cellaváltást, hogy a felhasználók számára lehetővé tegye a bázisállomás váltást utazási sebesség mellett is kapcsolat megszakadása nélkül.

Teljesítmény menedzsment

Mobile WiMAX az alvó és a készenléti üzemmóddal a teljesítmény hatékony, energiatakarékos kihasználását teszi lehetővé. Sleep módban a felhasználói állomások minimalizálják az energiaszükségletüket, erőforrásigényüket, de aktívak maradnak. Míg az Idle mód előnye, hogy a mobil állomás nincs egyetlen konkrét BS-re sem bejelentkezve, csak periódikusan elérhetővé válik a DL broadcast üzenetek vételére. Ezáltal kiküszöböli a handover mehanizmust és egyéb normál működéssel felmerülő plusz energia igényt.

Handoff- handover- cellaváltás

Három fajtáját különböztetjük meg:

- Hard Handoff (HHO)
- Fast Base Station Switching (FBSS)
- Macro Diversity Handover (MDHO)

Ezek közül a HHO kötelező, míg FBSS és MDHO két választható üzemmód. A WiMAX Fórum kidolgozott több technológiát, hogy optimalizálva tudja beleépíteni a 802.16e szabvány keretrendszerébe. Ezen fejlesztések eredménye, hogy a második rétegbeli handoff késleltetése kisebb mint 50 milliszekundum.

3.4 Biztonság

A Mobile WiMAX első osztályú, jelenleg elérhető legjobb, már bevált biztonsági technológiákat használja. Támogatja az osztott eszköz / felhasználói hitelesítést, rugalmas kódolási kulcs irányítási (Key Management) protokollt, erős adatforgalom titkosítást, a védelmi célú ellenőrzési és irányítási üzenetek használatát. Mindezt optimalizálva a gyors hívásátadás érdekében. Használati szinten ezen elemek a következők:

- Key Management Protocol: A 802.16e szabványban a Privacy and Key Management Protokoll kettős verziója (PKMv2) van definiálva a Mobile WiMAX alap védelmi rendszereként. Ez a protokoll irányítja a MAC védelmet PKM-REQ/RSP üzenetek használatával. PKM EAP autentikáció, adatforgalom titkosítás, Handover Key Exchange és Multicast/Broadcast védelmi üzenetek is ebben vannak leírva.
- Eszköz/Felhasználó hitelesítés: IETF EAP protokoll SIM, USIM - Digitális aláírás vagy Felhasználónév/jelszó alapú azonosítás használatával valósul meg a felhasználó, ill. eszközazonosítás. Megfelelő EAP-SIM, EAP-AKA, EAP-TLS vagy az EAP-MSCHAPv2 hitelesítési eljárásokat is rendelkezésünkre bocsátja az EAP protokoll.
- Traffic Encryption:(adatforgalom titkosítás) AES-CCM védi a felhasználói adatait a MAC interfészen (adatátvitel közben). A titkosításhoz használt kulcs az EAP autentikációból származik. Traffic Encryption Key (TEK) periodikus kulcs használatával növelhető a védelem.

- Control Message Protection: az ellenőrzési adatokat vagy a CMAC-on alapuló AES-el, vagy a HMAC alapú MD5 -el védik.
- Fast Handover Support: (gyors átadás támogatás) a hármas kézfogás módszerét alkalmazza a Mobile WiMAX is a hatékony újrathitelesítéshez, a gyors hívásátadáshoz. Ez a mechanizmus hasznos, hogy megakadályozzák a man-in-the-middle-támadásokat.

4. További funkciók a Mobile WiMAX-nál

4.1 Smart (intelligens) antennák:

Ez a technológia összetett vektor, vagy mátrix műveleteket végez a jeleken. Komplex equalézer nem szükséges, hogy kompenzálja a frekvencia szelektív fading. OFDMA ezért nagyon jól megfelel, hogy támogassa a smart antenna technológiákat. Valójában a MIMO-OFDM/OFDMA mérföldkövet jelent a következő generációs szélessávú kommunikációs rendszereknél úgy a WiMAX technológiánál, mint a 4G-nél. Mobile WiMAX teljes körben támogatja a Smart antenna technológiát, ezzel megnövelve a rendszer teljesítményét.

A Smart antenna technológia főbb tulajdonságai:

- Beamforming (nyalábformálás): A nyalábformálási rendszer több antennát használ a súlyozott jelek továbbítására, hogy javítsa a lefedettséget, rendszerkapacitást és csökkentse a leszakadás valószínűségét.
- Space-Time Code (STC), tér-idő kódolás: Változatos átvitel, mint pl. az Alamouti kód is támogatja a területi diverzitit, és csökkenti cellahatárok menti fading-et. A rendelkezésre álló véges frekvenciasáv és a rádiós átviteli közeg tulajdonsága határt szabnak a hagyományos módszerekkel elérhető adatátviteli sebesség növelésének, ezért nagy a jelentőségük azon eljárásoknak, amelyek további frekvenciasáv elfoglalása nélkül lehetővé teszik ezt.
- Spatial multiplex (SM): a térbeli multiplexálás a magasabb maximális átviteli sebesség és megnövelt átviteli kapacitás elérésére jó. A térbeli multiplexerek több jelet továbbítanak, több antenna felhasználásával. Ha a vevő is több antennával rendelkezik, akkor a jelek csoportosíthatóak és így nagyobb teljesítményt képesek elérni, mint az egyantennás rendszerek. A 2x2 MIMO (Multiple-Input, Multiple-

Output) két jel együttes használata esetén a maximális átviteli sebessége akár a duplája is lehet. UL célra minden felhasználónak csak egy antenna áll rendelkezésére, két felhasználó természetesen tud egyszerre küldeni ugyanazon felhasználónak, csak ekkor a két adó jeleit, antennáit egybe kell kódolni, ezt UL együttműködési multiplexelésnek hívjuk.

Link	Beamforming	Space Time Coding	Spatial Multiplexing
DL	$N_t=2, N_r=1$ ⁵	$N_t=2, N_r=1$ Matrix A	$N_t=2, N_r=2$ Matrix B, vertical encoding
UL	$N_t=1, N_r=2$	N/A	$N_t=1, N_r=2$ Two-user collaborative SM

Forrás: WiMAX Fórum

6. táblázat: Különböző antenna beállítások

N_t = küldő antennák száma, N_r = vevő antennák száma

Mobile WiMAX támogatja adaptív kapcsolási lehetőségeket, amik maximalizálják a Smart antenna technológia előnyeit a különböző csatorna feltételeknek megfelelően. Például az SM javítja a maximális átviteli sebességet, ha azonban a csatorna feltételek gyengék, a csomag hiba arány - Packet Error Rate_(PER) magas lesz, és így a cél korlátozott. (Lassú lesz a átvitel, ha egyáltalán működő kapcsolat létre tud jönni). STC másrészt nagy lefedettséggel rendelkezik függetlenül a csatorna feltételektől, de mégsem érhető el a maximális adatátviteli sebesség. A Mobile WiMAX támogatja a MIMO-k közti Adaptív MIMO kapcsolást (AMS), hogy maximalizálja a spektrális hatékonyságot. A következő táblázat összefoglalja az elméleti maximális átviteli sebességeket különböző DL / UL arányokat feltételezve egy 10 MHz-es csatorna sáv szélességnél, 5 ms keret időtartammal, 44 OFDM adat szimbólummal (összesen 48 OFDM szimbólum).

DL/UL Ratio			1:0	3:1	2:1	3:2	1:1	0:1
User Peak Rate (Mbps)	SIMO (1x2)	DL	31.68	23.04	20.16	18.72	15.84	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11
	MIMO (2x2)	DL	63.36	46.08	40.32	37.44	31.68	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11

Sector Peak Rate (Mbps)	SIMO (1x2)	DL	31.68	23.04	20.16	18.72	15.84	0
		UL	0	4.03	5.04	6.05	7.06	14.11
	MIMO (2x2)	DL	63.36	46.08	40.32	37.44	31.68	0
		UL	0	8.06	10.08	12.10	14.12	28.22

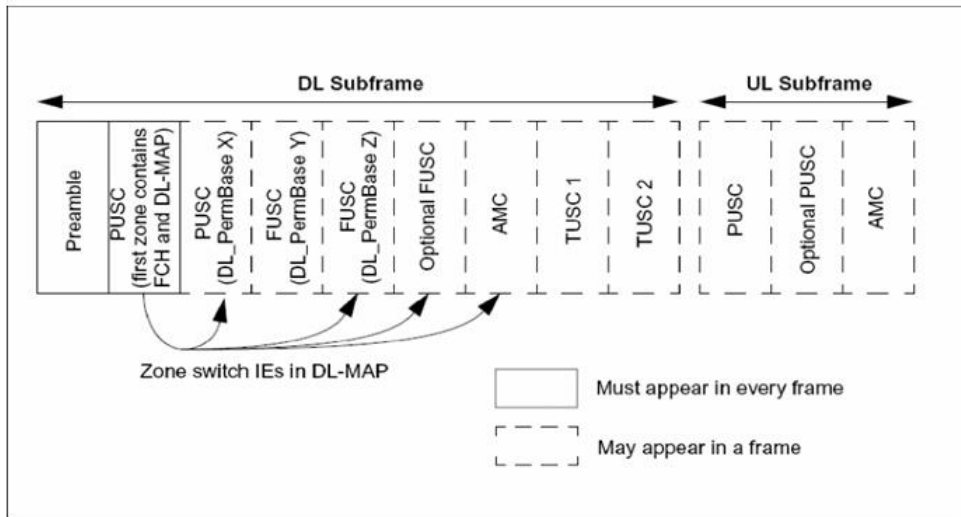
Forrás: WiMAX Fórum

7. táblázat: SIMO/MIMO adatátviteli konfigurációk

A Peak Rate a csatorna kapacitás mérésére, összehasonlításokra is alkalmas eredményt szolgáltató metrika.

4.2 Frekvencia újrafelhasználás

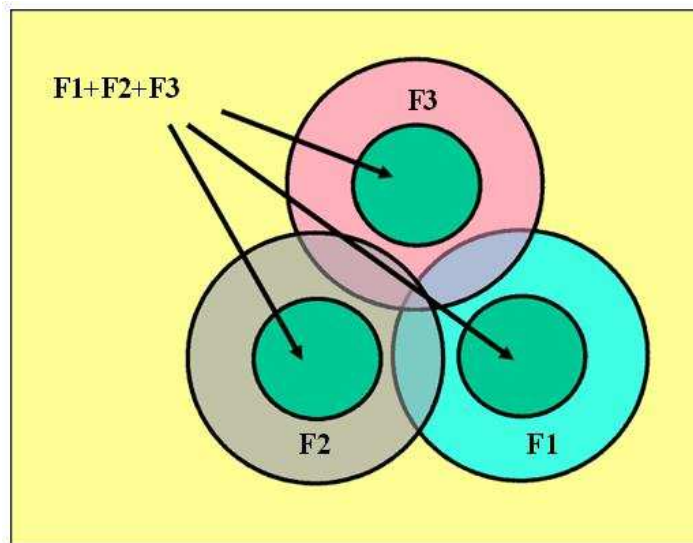
A Mobile WiMAX támogatja az egyszeres frekvencia újrafelhasználást, minden egyes cella és szektor ugyanazon a frekvencia csatornán tud működni, így maximalizálva a spektrális hatékonyságot. Azonban az erős közöscsatornás interferencia (CCI) miatt az egyszeres frekvencia újrafelhasználásos rendszer telepítése esetén a felhasználók a cella határon az összeköttetés minőségének romlását érzékelik. A Mobile WiMAX esetén a felhasználók alcsatornákon működnek, ami csak egy kis darabját foglalja el a teljes csatornának, így a cella határ interferencia problémát könnyen lecsökkenthetjük egy megfelelő alcsatorna használat konfigurációval. A Mobile WiMAX rugalmas alcsatorna újrafelhasználását elősegítik az alcsatorna szegmentációs és permutációs zónák. A szegmens a rendelkezésre álló OFDMA alcsatornák gyűjteménye (egy szegmens magában foglalja valamennyi sub-channel-t). Egy szegmenst használunk egy MAC -hez. Ugyanazon OFDMA szimbólumot használó UL és DL -eket azonosító száma megegyezik, ezzel egy permutációs zónát alkotnak. A DL vagy UL alkeret tartalmazhatnak több permutáció zóna számot, ezt mutatja a következő ábra:



Forrás: WiMAX Fórum

6. ábra: Multi-Zone keret felépítése

Míg a bázis állomásokhoz közeli felhasználók valamennyi sub-channel-t használni tudják, addig a hatóságok szélén elhelyezkedő felhasználóknak már csak néhány csatorna áll rendelkezésükre.



Forrás: WiMAX Fórum

7. ábra: Frekvencia újrafelhasználás

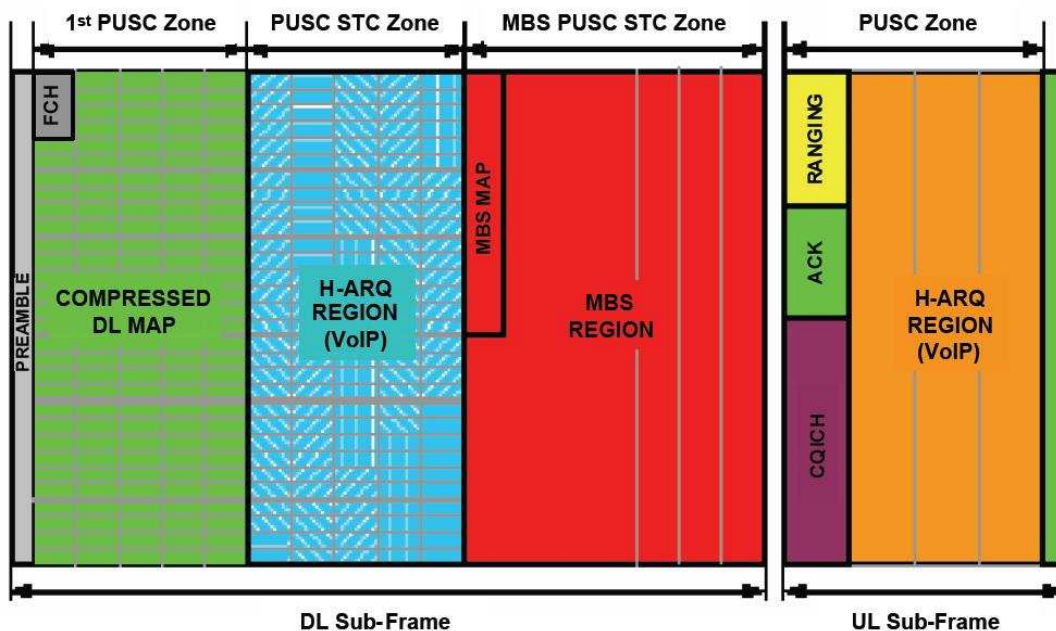
Az alcsatornák újra használatának tervezése, akár "frame by frame" keretként dinamikusan optimalizálható a különböző szektorok, cellák hálózati terheltsége és jel erősségét befolyásoló tényezők alapján. Ezért képes valamennyi cella/szektor azonos frekvencián működni, frekvenciatervezés nélkül

4.3 Multicast és Broadcast Szolgáltatás (MBS)

A Mobile WiMAX által támogatott MBS a DVB-H, MediaFLO és 3GPP E-UTRA legjobb tulajdonságait ötvözi, és eleget tesz az alábbi követelményeknek:

- nagy adatátviteli sebesség és lefedettség- Single Frequency Network (SFN) segítségével
- rendelkezésre álló rádiós források rugalmas kihasználása
- alacsony MS energiafogyasztás
- támogatja az adatfolyam átvitelt a hang és videó anyagok mellett
- alacsony csatornaváltási idő

A Mobile WiMAX Release-1 profil definiál egy eszközkészletet az MBS kezdeti beállításához. unicast szolgáltatással, DL kerettel (beágyazott MBS-ekkel) akár egy külön MBS, vagy dedikált MBS (csak DL) övezetet kiépítésére is alkalmas, önálló műsor szolgáltatáshoz. 12. ábra mutatja az UL/DL zónák szolgáltatásonként támogatott konstrukcióikat:



Forrás: WiMAX Fórum

8. ábra: MBS Zónák

Az MBS zónák támogatják a multi-BS MBS módot, több MBS övezet is létrehozható Single

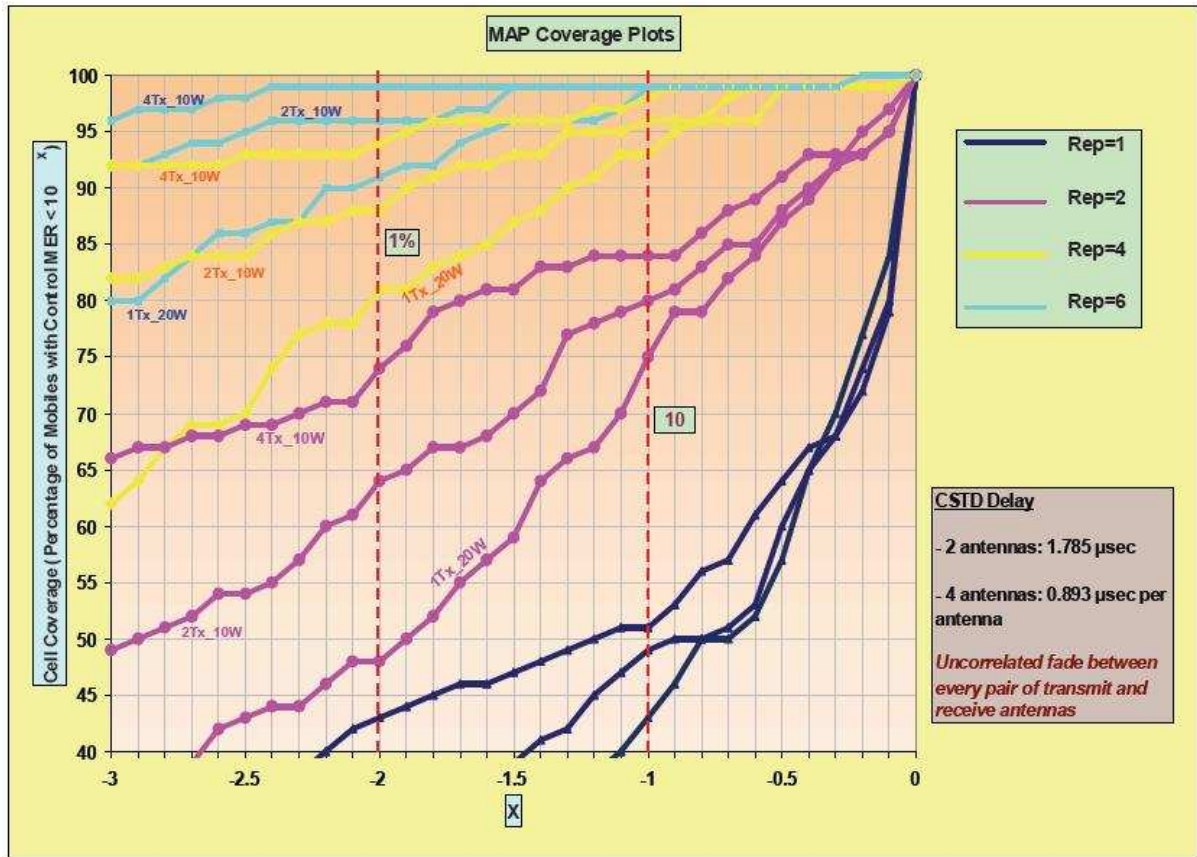
Frequency Network (SFN) -t használva. Minden MBS zóna rendelkezik egy MAP IE leíró zónával. Az MS a DL MAP -hez hozzáférve ellenőrzi az MBS zónákat és helyszínekhez kapcsolódó MBS MAP -eket. A MBS MAP IE meghatározza az MBS zónák PHY beállításait, és definiálja az elhelyezkedését az OFDMA szimbólum készlete alapján. A MBS MAP az MBS zóna első sub-channel első OFDMA szimbóluma. A multi-BS MBS-t nem kell az MS-nek egyetlen állomáson sem regisztrálnia. Amikor az MS készenléti állapotban van az MBS még elérhető, így energia takarítható meg. A rugalmasságot, szélesebb körű alkalmazás felhasználást a Mobile WiMAX által támogatott integrált MBS és az uni-cast szolgáltatás teszi lehetővé.

5. Mobile WiMAX rendszer teljesítményének értékelése

Mivel a Mobile WiMAX skálázható OFDMA-n alapul, rugalmasan konfigurálható a különböző rendszerek sávszélesség igényének megfelelően. A WiMAX Fórum készített egy esettanulmányt, amelyben leírja az általuk összeállított rendszerjellemzőket, mért rendszer teljesítményét. Ezeket az eredményeket a függelékek közt megtalálható I, II és III-as táblázat tartalmazza.

5.1 Mobile WiMAX MAP megbízhatóság és áttekintés

Mobile WiMAX ellenőrzési információkat MAP üzenetek formájában a keretek elején továbbítja. A MAP üzenettel ellenőrzik a DL és UL eloszlását (foglaltságát). A MAP üzenetek teszik lehetővé a rugalmas ellenőrzését a forráselosztásnak mind a DL és UL hatékonyságának javítását, és a QoS-t. Mivel a MAP üzenetek információkat tartalmaznak az egész keretről megbízhatósága létfontosságú a rendszer teljesítménye, működése szempontjából. A következő diagram egy szimulációt ír le amin, jól látható, hogy miként befolyásol egy DL-t, miként hat a rendszerre, hogy Cyclic Shift Transmit Diversity (CSTD)-t használunk vagy nem. A CSTD az OFDM rendszer késleltetett, többszöröződés ötletén alapul, miszerint a rendszer minden antennáján az eredeti OFDM domain szimbólum időben ciklikusan eltolva küldi. (domain szimbólum b), $x(n,b)$ és $(0 \leq n \leq N-1)$, ahol N a rendszer FFT méretével). P . M_b = küldő antennák száma a bázis állomáson (BS), ha az antenna elküld 1 módosítatlan OFDM szimbólumot, majd az m -edik antenna is elküldi ezt a szimbólumot, csak ciklikusan $(m-1)D$ -el eltolva.



Forrás: WiMAX Fórum

9. ábra: Ellenőrző csatorna lefedettségének szimulált teljesítménye

A fenti ábra kumulatív eloszlásfüggvény- Cumulative Distribution Function (CDF) a III-as táblázat adatai alapján készült. Az ábrán jól kivehető, hogy CSTD-t használva, 2 vevő- 2 adó antennával, R=1/2 CTC kódot 6 ismétléssel kb. 95% -os cella lefedettséget lehet elérni a PER munkapont pont 1%-án.

A MAP teljesítményt tovább lehetne fokozni a mobil egységekbe elhelyezhető interferencia törlő segítségével. A MAP üzenet mérete változtatható. Ezt a keretenkénti felhasználók száma befolyásolja. Ha a hálózaton főként burst-ös adatforgalom uralkodik, mint például az FTP és HTTP, akkor a frame-enkénti felhasználók tervezett száma jellemzően alacsony (kevesebb, mint 10). Ez esetben a forráselosztás a leghatékonyabban és a MAP üzenetek főként a változatlan MAP hívásátadásokat tartalmazzák. A MAP overhead ebben az esetben jellemzően körülbelül 10%-a egy 10 MHz-es csatornának, 5 milliszekundumos frame mérettel. Ha a hálózatot VoIP forgalom uralja, a keretenkénti tervezett felhasználók száma nagy. A MAP

hívásátadás egyenletesen növekszik a felhasználók számával. Hogy a MAP overhead kezelhető legyen a Mobile WiMAX bevezeti a multicast al-MAP-eket, ami lehetővé teszi több al-MAP üzenet küldését különböző adatátviteli sebességgel, SINR-el. Ezért, miközben a broadcast üzeneteket a legmagasabb megbízhatósággal szükséges küldeni, a megfelelő cella széli lefedettség érdekében, addig a közös ellenőrző üzeneteket, mint például az adatforgalomhoz használt csatornák foglalása, SINR állapotú felhasználóknál maga a forgalom is hatékonyan végrehajtható. Mint ahogy azt láttuk a 13-as ábrán a lefedett terület igen nagy százaléka nagyobb adatátviteli sebességet biztosít, mint a QPSK 1/12- 1% PER mellett (közel 60%-a QPSK 1 / 4). Ezért, a multi-cast sub-MAP üzenetek is jelentősen csökkennek. Míg az egy kereten belüli nagyszámú felhasználók esetén (20 DL és 20 UL) a MAP overhead kevesebb, mint 20%. Ezért a mobil WiMAX ellenőrző üzenetei nagyon rugalmasan alkalmazkodnak az adatok kommunikációhoz. Ez elegendő megbízhatóságot, és alacsony-közepes terhelést okozva segíti a hálózati terhelhetőségét, és alkalmazásokat.

5.2 WiMAX szimulált rendszer teljesítménye

Szektoronként 10 heterogén felhasználó, feltételezve hogy mind a 10 FTP forgalmat akar bonyolítani és minden bázisállomás 3 szektorból- 3 cellából áll, ideális csatornabecslést, reális link alkalmazkodást és szektor újrafelhasználást egynek feltételezve, 2,5 GHz vivőfrekvencián. 7 DL és 3 UL OFDMA szimbólum van, 1 szimbólum TTG összesen 11 overhead szimbólumot és 37 adat szimbólumot tartalmaz, mind DL, mind UL esetén.

Parameters		Value
Cell Configuration		3 Sectors/Cell
Frequency Reuse		1, 1, 3
Users/Sector		10
Traffic Type		Full Buffer
Channel Estimation		Ideal
PHY Abstraction		EESM [21]
Scheduler		Proprietary Proportional Fair
Link Adaptation		Realistic with delay feedback
Antenna Configuration		1x2, 2x2
MIMO Support	DL	Alamouti STC, VSM
	UL	Collaborative SM
MIMO Switch		Adaptive STC/VSM switch

Parameters		Value
HARQ		CC, 3 Retransmissions
Coding		CTC
Frame Overhead		11 OFDM Symbols (7 DL, 3 UL, 1 TTG)
Data Symbols per Frame		37
DL/UL Partition	A	28:9
	B	22:15

Forrás: WiMAX Fórum

8. táblázat: Mobile WiMAX teszt konfiguráció

A mért eredmények pedig a következők:

Cases		DL: 28 data symbols UL: 9 data symbols		DL: 22 data symbols UL: 15 data symbols	
Antenna	Link	Sector Throughput	Spectral Efficiency	Sector Throughput	Spectral Efficiency
SIMO	DL	8.8Mbps	1.19 bps/Hz	6.6Mbps	1.07 bps/Hz
	UL	1.38 Mbps	0.53 bps/Hz	2.20 Mbps	0.57 bps/Hz
MIMO	DL	13.60Mbps	1.84bps/Hz	10.63Mbps	1.73 bps/Hz
	UL	1.83 Mbps	0.70 bps/Hz	3.05 Mbps	0.79 bps/Hz

Forrás: WiMAX Fórum

9. táblázat: Mobile WiMAX rendszer teljesítménye

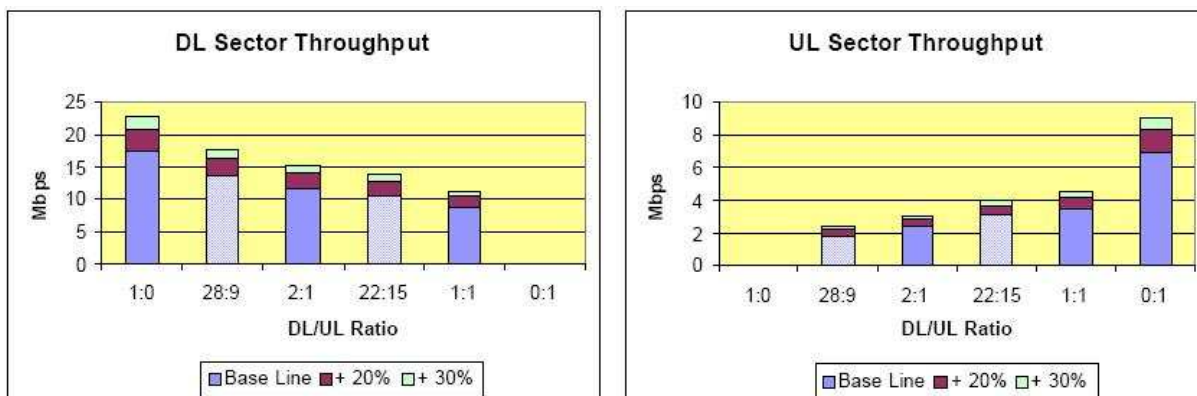


Forrás: WiMAX Fórum

10. ábra: Spektrális hatékonyság javulása optimalizált rendszer esetén

A rendszer másik előnye, hogy a dinamikusan újrakonfigurálja a DL / UL arányt

megfelelően a hálózati profilt, hogy maximalizálja frekvencia kihasználtságot.



Forrás: WiMAX Fórum

11. ábra: Átvitel optimalizált, változó DL / UL arányú rendszeren

6. WiMAX End-to-End architektúrája

Az IEEE csak a fizikai (PHY) és a Media Access Control (MAC) rétegeket definiálja a 802,16 szabványban. Ez a megközelítés jól működött azon technológiáknál, mint például az Ethernet és WiFi, amik más szervezetekre támaszkodnak pl.: IETF (Internet Engineering Task Force), hogy megalkossák a magasabb rétegbeli protokolljait, mint pl.: TCP/IP, SIP, VoIP és IPSec. A mobil vezeték nélküli világ szabványügyi testületei, mint a 3GPP és 3GPP2 széles körű előírásokkal meghatározzák az interfészeket, protokollokat, mert nem csak együtt kell működniük az AIRLINK kapcsolatoknak, hanem inter-vendor inter-network együttműködésre is szükség van az átjárhatóság miatt, továbbá több értékesítési hálózat hozzáférésére, cégek közti számlázási rendszer működtetésére is szükség van. Eladók és a szolgáltatók is felismerték ezt a problémát, és további munkacsoportok alakultak, hogy kialakítsanak egy szabványos hálózati referencia modellt a nyílt inter-network érdekében. Kettő ezek közül a WiMAX Fórum hálózati munkacsoportjai, amelynek középpontjában a magasabb szintű hálózati előírások létrehozása, rögzítése valamint a hordozhatóság, hordozható ~ Mobile WiMAX rendszerek meghatározása, IEEE 802.16 szabvány szerinti elfogadtatás a feladata. A másik a Service Provider munkacsoport, ami segít leírnia a követelményeket, és rendszerezik azokat, ezzel is támogatva a Network WG munkálatait. A Mobile WiMAX End-to-end hálózati architektúrában minden IP alapú (ALL-IP). Ennek előnye a teljes életciklus alatti csökkentett költség, amivel olcsó WiMAX-hálózat kiépítést

tesz lehetővé. Az ALL-IP alapú architektúra további előnyöket rejt magában. Használható egy megosztott, már kiépített hálózat gerinc hálózatnak, nem kell külön kiépíteni, fenntartani egy saját hálózatot. Továbbá a hálózati terület eleget tesz a teljesítmény növekedési görbe általános céljainak, amit a processzorokkal és a számítástechnikai eszközökkel szemben támasztanak, és gyakran csak "Moore-törvény"-nek neveznek. A számítógépek feldolgozási sebessége sokkal gyorsabb tud lenni, mint a távközlési terület, mert a használt hardvernek nem szabnak határt a távközlési berendezések, már meglévő, igen nehezen és költségesen fejleszhető kiépített infrastruktúrái. A végeredmény egy olyan hálózat lenne, ami folyamatosan, eddigieknél magasabb tőke, működési teljesítményt lenne képes felmutatni, internet hálózat fejlesztés előnyeit is kihasználja. Ennek eredménye egy első sorban szoftver alapú, alacsonyabb költségű, nagy skálázhatóságú és gyorsan fejlődő hálózat. Annak érdekében, hogy sikeres és működőképes, elfogadott, kereskedelemben használható rendszer lehessen, szükség van a 802,16 (PHY / Mac) rádió interfész előírások betartására. A legfontosabb az alapvető hálózati funkciók támogatására, és az általános End-to-end WiMAX rendszerfelépítés megkövetelése.

Néhány WiMAX architektúra fejlesztési alapelv:

1. Az architektúra alapja egy csomagkapcsolt keretrendszer, beleértve az IEEE 802.16 szabványon alapuló eljárások és annak módosításainak megfelelő IETF RFC és Ethernet szabványai.
2. Az architektúra lehetővé teszi a hálózati architektúrát (támogatott topológiák) elválasztását hozzáféréstől, a kapcsolási IP szolgáltatástól.
3. Az architektúra lehetővé teszi a modularitást és a rugalmasságot, hogy alkalmazkodni tudjon a széleskörű telepítési lehetőségekhez, mint például:
 - kis és nagyméretű WiMAX hálózatok (gyenge és erős rádió lefedettség, kapacitás)
 - a városi, külvárosi és vidéki fejlesztés
 - engedély köteles és / vagy szabadon használható frekvenciasávokat használ
 - hierarchikus, sík, hálós topológiát vagy ezek valamely keverékének alkalmazását
 - párhuzamosan kötött, hordozható, mobil modell használatát

Támogatott end-to-end architektúra szolgáltatások és kiszolgálói alkalmazások:

- hang, multimédiás szolgáltatások és egyéb pl.: vészhelyzeti szolgálatok és jogszerű lehallgatás
- a különböző, független Application Service Provider (ASP) hálózatok agnosztikus felhasználása
- mobiltelefonos kommunikáció lebonyolítása VoIP használatával
- különböző interworking interfészekkel és média átjárókkal lehetőség nyílik a hagyományos átvitel és megszűnő szolgáltatások átalakítására a WiMAX-on használt IP alapúra (például IP- SMS, MMS, WAP)
- egyéb az IP Broadcast, Multicast címezhetőségéből származó szolgáltatások

Interworking és roaming az End-to-end hálózati architektúra másik fő erőssége, ami tervezésnél felhasználható számos már meglévő telepítési forgatókönyv felhasználhatóságában rejlik.

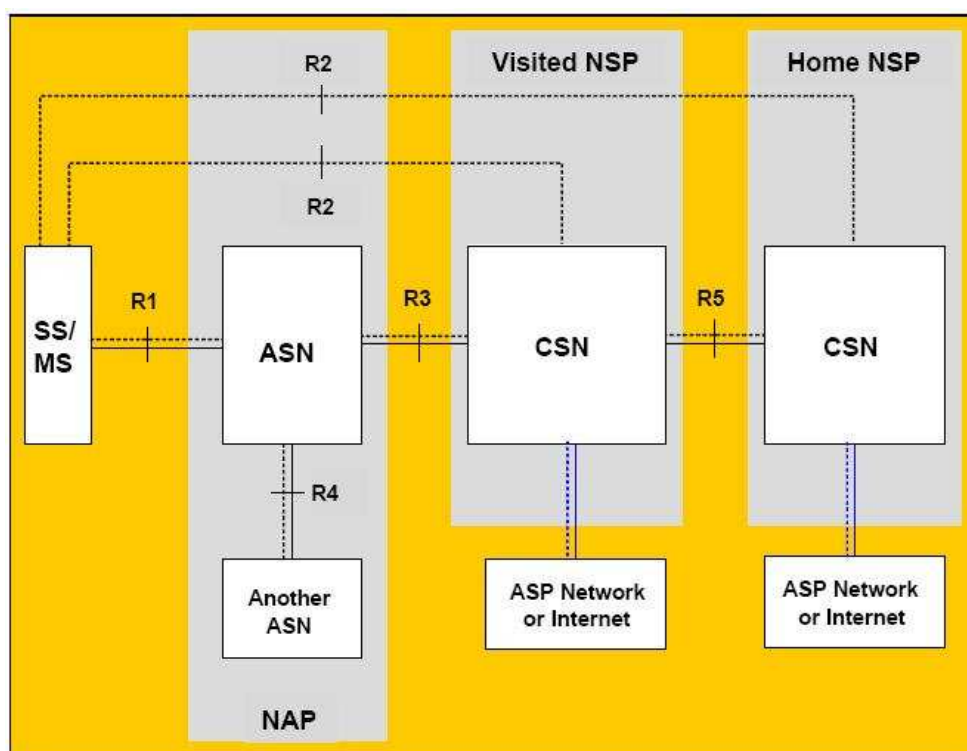
Különösen támogatható

- Lazán csatolt interworking a meglévő vezeték nélküli hálózatok, mint például a 3GPP és 3GPP2 vagy meglévő vezetékes hálózatok, mint például az IETF protokollt használó DSL és MSO interworking interfészek.
- Global roaming WiMAX hálózatokon az AAA következetes használatát a számvitel és a számlázás, elszámolási területeken.
- A különböző felhasználói hitelesítési formátumok támogatása, mint a felhasználói név / jelszó, digitális bizonyítványok, aláírás, Subscriber Identify Module (SIM), Egyetemes SIM (USIM-kártya), és a Removable User Identify Module (RUIM).

NRM

WiMAX Fórum ipari résztvevői létrehozták a WiMAX hálózat referencia modellt- Network Reference Model (NRM), ami logikailag modellezi a hálózati architektúrát. A NRM azonosítja a funkcionális egységeket és hivatkozási pontokat, amelyek között kölcsönös

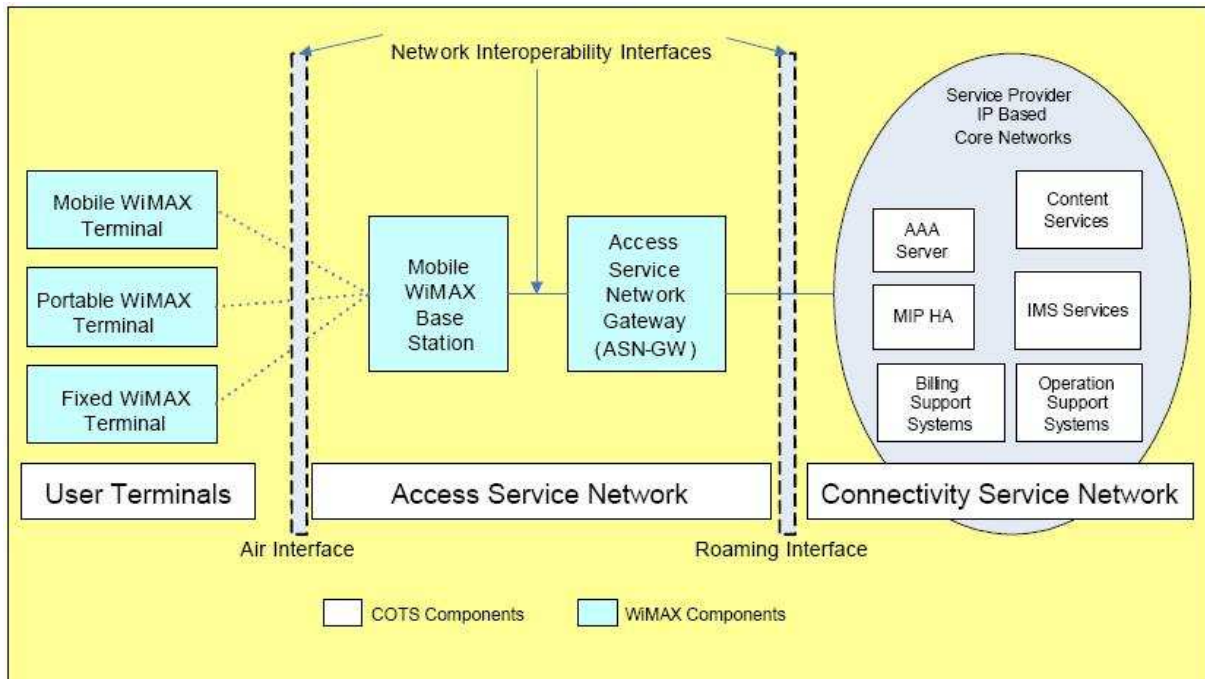
átjárhatóság lehetséges. A hálózatok kiépítésére használt számos modellt, forgatókönyvet egységesen leírja. Rögzítse a fix kiépítésű, nomadikus, hordozható, egyszerű mobil, teljesen mobil egységeket az előfizetők számára. 17. ábra szemlélteti a NRM -t, amely a következő egyértelműen azonosítható referenciapontokként szolgáló logikai egységeket tartalmazza: MS, ASN, és CSN. Az ábrán megtalálható legfontosabb normatív referenciapontok R1-R5. MS, ASN és CSN a funkcionális egységek.



Forrás: WiMAX Fórum

12. ábra: WiMAX Hálózati Referencia Modell

Az ASN határozza meg a logikai határt, az összefüggő üzenetek egységes áramlásának hozzáférési szolgáltatásait, valamint képviseli a funkcionális WiMAX ügyfeleket, WiMAX kapcsolatszolgáltatási funkcióit és a különböző értékesítőket. Connectivity Service Network (CSN) egy hálózati funkciók definícióinak halmaza, amelyek IP kapcsolaton szolgáltatást nyújtanak a WiMAX előfizetőknek. A CSN ábrázolhat a hálózaton olyan elemeket, mint routerek, AAA proxy / szerverek, felhasználói adatbázisok és interworking átjáró berendezéseket. Ezeket láthatjuk a a következő ábrán.



Forrás: WiMAX Fórum

13. ábra 18: WiMAX Hálózat IP alapú felépítése

A WiMAX alapú hálózat rendszer előírások alapjait képező hálózati architektúra elvei:

- eljárásokat és IP címzés, routing és kapcsolódás kezelési eljárások, protokollok logikus szétválasztása, amik lehetővé teszik az önálló, egyszerű architektúrák, telepítési forgatókönyvek használatát.
- Az ASN-ek megosztása a NAP és több NSP között.
- Támogatni egy NSP nyújtotta szolgáltatást több ASN-en keresztül egy vagy több NAP vezérlésével.
- Hozzáférhető NSP-k megtalálása, és kiválasztása MS- vagy SS-el.
- NAP-ok által biztosított ASN topológiák támogatása.
- szükség szerinti internetworking funkciók üzemeltetői támogatása
- hivatkozási pontok, csoportok és egyéb hálózati entitások (ASN-ek, CSN-es) egyértelműen meghatározása, jól elkülönülése, különös tekintettel az MS, ASN és CSN-ek esetén.
- a legalapvetőbb funkciók forgatókönyveiből, CSN-ek limitált halmazaként ASN -eket hoz létre, hogy a telefonszolgáltató alap internet hozzáférési szolgáltatást is képes legyen nyújtani roaming vagy interworking nélkül.

7. Más megközelítés

7.1 Mobile WiMAX nyílt szabványok és ökoszisztéma

A technológia végső sikere nagyban függ, hogy a rendszer egy nyílt szabványnak megfeleljenek. Ezzel minimalizálható, hogy a berendezések gyártónként nagyban elkülönüljenek, ezáltal kompatibilitási problémát okozzanak a rendszerben. Továbbá gyártási költségek csökkentését is eredményezi, ami a szolgáltatókon keresztül a végfelhasználókra is pozitívan hat. WiMAX rendszerek alapja a levegő interfész IEEE 802.16 szabványa. Ez a szabvány évek alatt, széleskörű ipari résztvevőkkel fejlődött, viszont nem garantálja, hogy két különböző gyártótól származó készülék zökkenésmentesen együtt fog működni. Ezen hiányosságok kiküszöbölésére jött létre a több mint 1000 taggal rendelkező WiMAX Fórum. A WiMAX Fórum is együttműködik a HiperMAN csoportjával az ETSI BRAN Műszaki Bizottsággal. Ebből a sikeres együttműködésből született a 802.16e és a többi szabvány is: PHY (TS 102 177v.1.3.1) és DLC (TS 102 178v.1.3.1). A WiMAX hitelesítési címke továbbá garanciát nyújt tényleges átjárhatóságra. Az első tanúsítvány tesztelési létesítmény 2005 júliusában jött létre a Malagai CETECOM LABS, Spanyolországban. Az általuk hitelesített berendezések 802.16-2004 minősítéssel már a piacon is megtalálhatók.

A Mobile WiMAX működő hálózatok száma 2008-tól kezdve folyamatosan bővül. Újabb és újabb rendszer szállítók kapcsolódnak be az értékesítésbe.

7.2 Mobile WiMAX Alkalmazások

A WiMAX Fórum megalkotott számos alkalmazását, fejlesztési forgalom és használati modellt a 802.16e alapú rendszerekhez. Az alkalmazások 5 csoportra bonthatók ezeket ábrázolja az alábbi táblázat.

Class	Application	Bandwidth Guideline		Latency Guideline		Jitter Guideline	
1	Multiplayer Interactive Gaming	Low	50 kbps	Low	<25 msec	N/A	
2	VoIP & Video Conference	Low	32 to 64 kbps	Low	<160 msec	Low	<50 msec
3	Streaming Media	Low to High	5 kbps to 2Mbps	N/A		Low	<100 msec
4	Web Browsing & Instant Messaging	Moderate	10 kbps to 2 Mbps	N/A		N/A	
5	Media Content Downloads	High	>2 Mbps	N/A		N/A	

Forrás: WiMAX Fórum

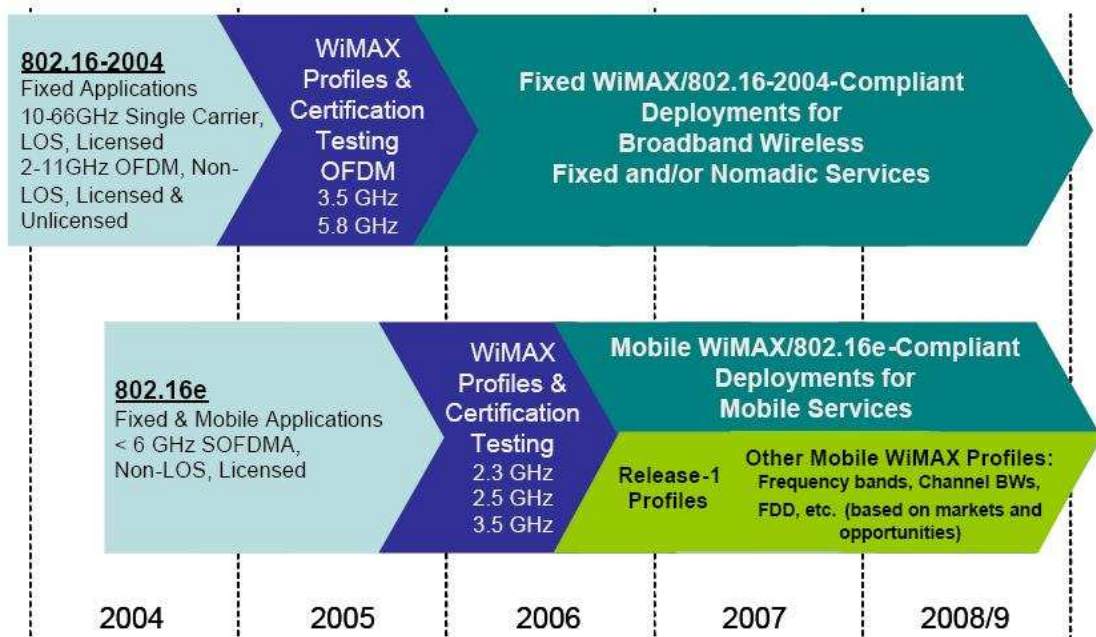
10. táblázat: WiMAX Alkalmazási osztályok

7.3 Mobile WiMAX spektrum

A 802.16e-2005 air interfész szabvány a 2.3, 2.5, 3.3, 3.5 GHz frekvencia sávokat támogatja. Egyébként Koreában a 2.3GHz-en a WiBro néven már évek óta (2006) működő hálózat. A szolgáltatók 27 Mhz-es frekvencia blokkokkal rendelkeznek, három csatornás TDD bázisállomásokat telepítettek, 8,75 Mhz-es névleges csatorna kiosztással. Amerikában a 2.5 és 2.7 GHz frekvencia már rendelkezésre áll a mobil és fix vezeték nélküli szolgáltatások WiMAX számára. A 3.3 és 3.5 Ghz –es sávban többnyire az állandó helyű WiMAX rendszerek üzemelnek.

7.4 Roadmap WiMAX termékekhez

A Malagai Cetecom Labs 2005 júliusában hitelesítette a Fix WiMAX rendszert. Erre a célra használható termékek már a piacon vannak és működnek a 3.5 Ghz-es engedélyköteles, valamint az 5.8-as szabadon használható frekvenciákon. A második tanúsító laboratórium a TTA, Koreában alakult és a Cetecommal együttműködve 2006 végére kidolgozták a Mobile WiMAX hitelesítési és tanúsító eljárását. Napjainkban már több 10 gyártó rendelkezik un. WiMAX certifikációval.



Forrás: WiMAX Fórum

14. ábra: WiMAX Technológia kilátásai (2006)

3G mobil technológia

3G-s rendszerek fejlődése:

Hogy javítsák a 3G (UMTS) rendszer DL kapacitását a 3GPP szabványosító testület kifejlesztette a WCDMA-t használó HSDPA technológiát. Ez a változás gyakorlatilag annyit jelentett, hogy a letöltési irány kódolási technikáját az adaptív moduláció használhatósága és kódolási, spektrális hatékonyság javulása érdekében lecserélték CDM-ről TDM-CDM-re. Egy további javulás a HSUPA, ami előírja, hogy az uplinken is jobb kódolást, kedvezőbb modulációt kell használni. Ezek a fejlesztések jelentősen megnövelték az UMTS hálózatok uplink és downlink irányú átviteli sebességét. Hasonló változtatásokat alkalmaztak a 3GPP2-nél, amikor létrehozták Amerikában a CDMA2000-et. 1xEVDO-Rev 0-nál egyszerűen a DL-ben kicserélték a CDM-et TDM-re, ilyen rendszert elsőnek Kóréban és Japánban indították 2003-ban. Az 1xEVDO-Rev A változatnál 2004 és 2005-ben tovább fejleszti a DL teljesítményének javítását, valamint bevonja az UL-eket is a fejlesztésbe. 1xEVDO-Rev B hozzáveszi a többvívős képességet. Európa első kereskedelmi HSDPA hálózatának kiépítésére 2005 decemberében került sor, amikor a japán üzemeltetők bejelentették terveiket: HSDPA kiépítésébe kezdenek 2006-ban. Ekkoriban, 2006 végén és 2007 elején volt várható a Mobile WiMAX bevezetése, elterjedésének kezdete. Majd a továbbiakban, mint pl.: a 3GPP/3GPP2 Long Term Evolution (LTE) felhasználják az OFDM alapú technológiát, hogy növelni tudják az adatátvitelt.

<u>System</u>	<u>Enhancements</u>	<u>First Commercial Availability</u>
<u>1xEVDO, CDMA2000</u>		
Rev 0	DL Enhancements	2003
Rev A	Add UL Enhancements	2005
Rev B	Add Multi-Carrier	2008
<u>HSPA, WCDMA</u>		
HSDPA	DL Enhancements	2005/2006
HSUPA	Add UL Enhancements	2007/8
<u>WiMAX</u>		
Mobile WiMAX	Mobility	2006/7

Forrás: WiMAX Fórum

11. táblázat: WiMAX/3G Technológiai lehetőségei

A 3GPP és 3GPP2 létrehozta és kifejlesztette a napjainkban használatos 3G-s rendszer szabványait. A fejlesztések célja mind a WCDMA, mind a CDMA2000-nél a már meglévő rendszer további kapacitásának elérése volt, illetve ahhoz hozzáépíthetőnek kellett lennie.

Ezek a fejlesztések a következők voltak:

- Evolution Data-Optimized (1xEVDO)- eredeti elnevezése (Evolution Data Only), másként pedig High Rate Packet Data (HRPD) ismert, egy 3GPP2 által fejlesztett, CDMA2000 adatokra optimalizált változata. 1.25 MHz-es csatornán az 1xEVDO maximális adatátviteli sebessége 2.4Mbps (Rev 0), 3.1 Mbps (Rev A) DL irányban, és 153.6 Kbps (Rev 0), 1.8 Mbps (Rev A) UL irányban. Az EVDO-Rev B, amely még a szabványosítás során további kapacitásnövelő technikákat is hozzátesz, a DL maximális adatátviteli sebességét 4,9 Mbps-re tudja feltornászni egy 1,25 MHz-es csatornán. 1xEVDO-Rev 0 kezdetek óta siker aratott Dél-Koreában, ma már széles körben alkalmazzák.
- High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA): 3GPP definiálta, a WCDMA R'99 DL fejlesztéseit használja. Ezekkel ér el DL ágon maximális 14 Mbps átvitelt egy 5 MHz-es csatornán, valamint a High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA) a kapacitás fokozását írja elő, az UL-eken is.

Evolution Data-Optimized (1xEVDO) rövid technikai ismertetése

1xEV-DO egy nagy sebességű adatátviteli rendszer, 1.25 MHz-es FDD csatornákat használ. Az eredeti 1xEV-DO előírások szerint képes elérni a 2,4 Mbps adatátviteli sebességet DL-en. Az átlagos DL igénybevétel lényegesen magasabb, mint a kiindulási CDMA2000-1x rendszerénél. Összehasonlítva CDMA2000-1x-t és az 1xEV-DO Rev 0 -t jelentős változások az adat átviteli teljesítmény elérése érdekében történtek. Ezek a következők.

Az 1xEVDO főbb paraméterei:

- DL csatorna kódolása CDM-ről TDM-re váltott, hogy a teljes átviteli kapacitás akár egy embernek is kiosztható legyen
- DL teljesítmény ellenőrzés lecserélése nyálábolt downlink alapura
- Adaptív kódoló (Turbo-kód) / moduláció

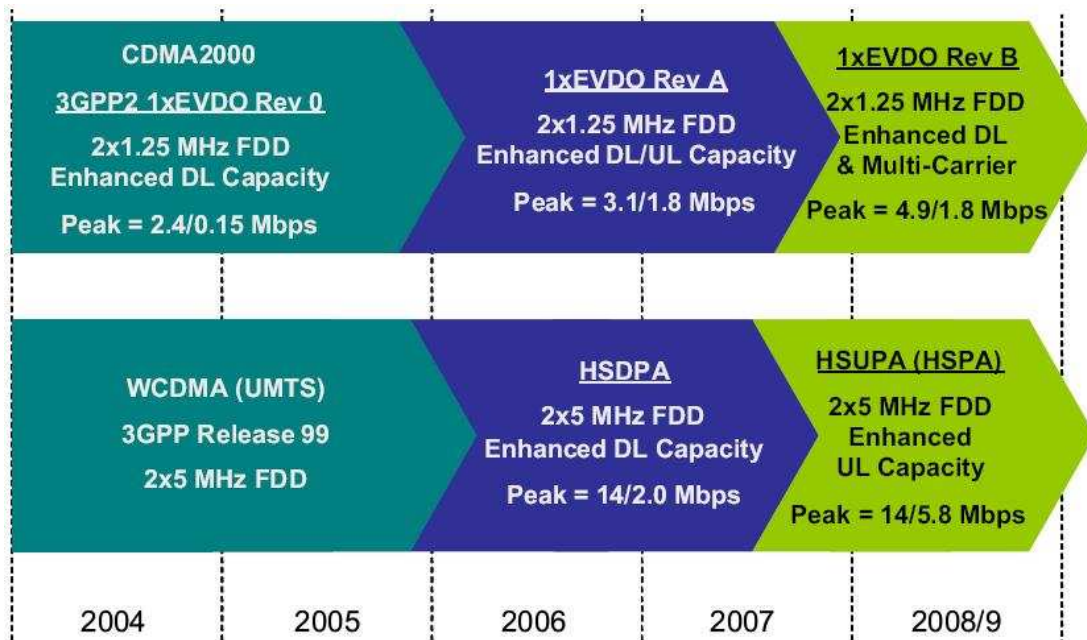
- HARQ
- gyors DL ütemező
- soft handoff lecserélése sávszélesség kímélőbb „virtuális” soft handoff-ra

HSDPA/HSUPA rövid technikai ismertetése

3GPP Release 5 megvalósítja WCDMA-ban leírtakat a High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) segítségével.

HSDPA főbb tulajdonságai:

- Adaptív moduláció és kódolás (AMC)
- Multi-kód műveletek
- HARQ
- több központú, decentralizált architektúra, ahol az ütemezési feladatokat nem a Radio Network Controller (RNC) végzi, így csökkenthető a késleltetés, gyorsabb az időzítés



Forrás: WiMAX Fórum

15. ábra: 3G CDMA rendszer evolúciója

3G összehasonlítása a Mobile WiMAX rendszerrel

Attribute		1xEVDO Rev A	HSDPA/HSUPA (HSPA)	Mobile WiMAX
Base Standard		CDMA2000/IS-95	WCDMA	IEEE 802.16e-2005
Duplex Method		FDD	FDD	TDD ³
Downlink		TDM	CDM-TDM	OFDMA
Uplink Multiple Access		CDMA	CDMA	
Channel BW		1.25 MHz	5.0 MHz	Scalable: 5, 7, 8.75, 10MHz
Frame Size	DL	1.67 milliseconds	2 milliseconds	5 milliseconds TDD
	UL	6.67 milliseconds	2, 10 milliseconds	
Modulation DL		QPSK/8PSK/16QAM	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM/64QAM
Modulation UL		BPSK,QPSK/8PSK	BPSK/QPSK	QPSK/16QAM
Coding		Turbo	CC, Turbo	CC, Turbo
DL Peak Over the Air Data Rate		3.1 Mbps	14 Mbps	46 Mbps, DL/UL=3 ⁴ 32 Mbps, DL/UL=1 (10 MHz BW)
UL Peak Over the Air Data Rate		1.8 Mbps	5.8 Mbps	7 Mbps, DL/UL=1 ⁵ 4 Mbps, DL/UL=3 (10 MHz BW)
H-ARQ		Fast 4-Channel Synchronous IR	Fast 6-Channel Asynchronous CC	Multi-Channel Asynchronous CC
Scheduling		Fast Scheduling in the DL	Fast Scheduling in the DL	Fast Scheduling in DL and UL
Handoff		Virtual Soft Handoff	Network Initiated Hard Handoff	Network Optimized Hard Handoff
Tx Diversity and MIMO		Simple Open Loop Diversity	Simple Open & Closed Loop Diversity	STBC, SM
Beamforming		No	Yes (Dedicated Pilots)	Yes

Forrás: WiMAX Fórum

12. táblázat: Egyszerűsített rendszer összehasonlítás

A elemzésnél használt rendszerek részletes konfigurációja megtalálható a függelékeken belül „3G-WiMAX teszt rendszerek részletes leírása” cím alatti A,B,C és D táblázatban.

Technology	DL Modulation	DL Code Rate	UL Modulation	UL Code Rate
1xEVDO-Rev 0	16QAM, 8PSK,	Turbo: 1/3, 1/5	Fixed (BPSK)	Fixed
1xEVDO-Rev A	QPSK		BPSK, QPSK, 8PSK	Turbo: 1/2, 1/4
1xEVDO-Rev B	64QAM*, 16QAM, 8PSK, QPSK			
HSDPA	16QAM, QPSK	Turbo, CC: 1/4, 2/4, 3/4, 4/4	Fixed (BPSK)	Fixed
HSPA (HSDPA+HSUPA)			BPSK, QPSK	Turbo, CC: 2/3, 3/4, 4/4
Mobile WiMAX	64QAM, 16QAM, QPSK	Turbo, CC, Repetition: 1/12, 1/8, 1/4, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6	16QAM, QPSK, <i>64QAM</i> <i>Optional</i>	Turbo, CC, Repetition: 1/12, 1/8, 1/4, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 <i>Optional</i>

Forrás: WiMAX Fórum

13. táblázat: AMC lehetőségek összegzése

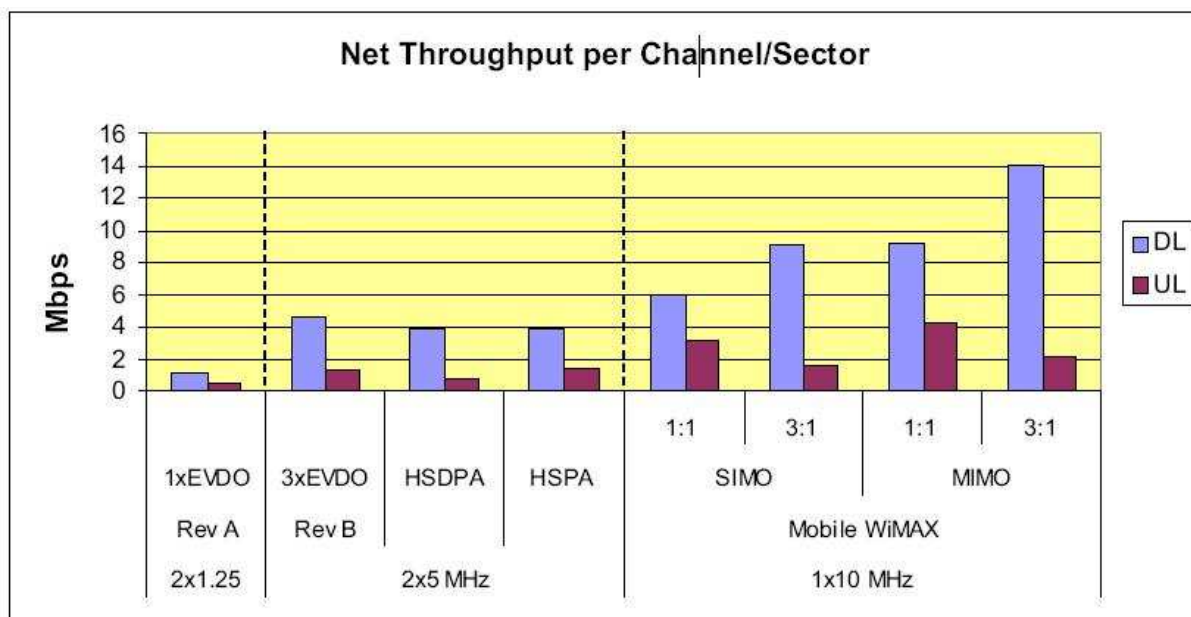
* a Rev B-nél a 64QAM hardveres támogatással érhető el, míg szoftveresen csak a 16QAM használható

A WiMAX Fórum tíz felhasználót feltételezve, leelemzett rendszerek eredményeinek összefoglalását az alábbi táblázat tartalmazza.

Parameter		1x EVDO Rev A	3x EVDO Rev B	HSDPA	HSPA	Mobile WiMAX
Duplex		FDD	FDD	FDD	FDD	TDD
Occupied Spectrum (MHz)		2.5	10	10	10	10
Channel BW (MHz)	DL	1.25	5	5	5	DL/UL= 3
	UL	1.25	5	5	5	
Spectral Efficiency (bps/Hz)	DL	0.85	0.93	0.78	0.78	1.91
	UL	0.36	0.28	0.14	0.30	0.84
Net Information Through-put per Channel/ Sector (Mbps)	DL	1.06	4.65	3.91	3.91	14.1
	UL	0.45	1.39	0.70	1.50	2.2

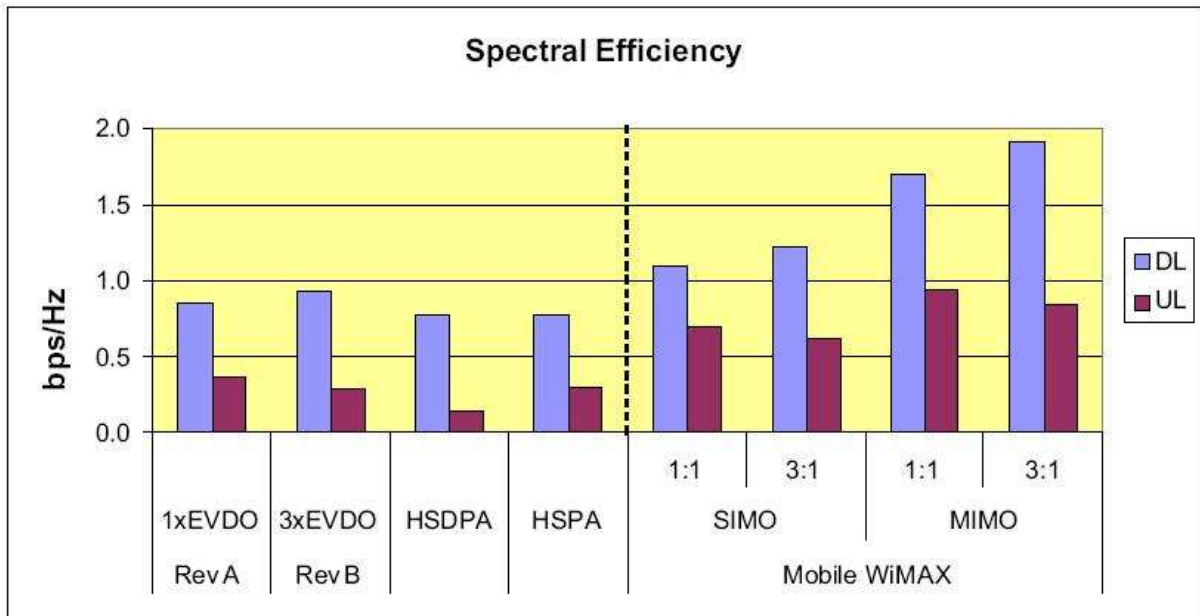
Forrás: WiMAX Fórum

14. táblázat: Teljesítmény összehasonlítás



Forrás: WiMAX Fórum

16. ábra: Csatorna/ szektor átvitel összehasonlítása



Forrás: WiMAX Fórum

17. ábra: Spektrális hatékonyság összehasonlítása

Parameter		SIMO		MIMO	
		DL/UL = 1	DL/UL=3	DL/UL= 1	DL/UL=3
Spectral Efficiency (bps/Hz)	DL	1.10	1.23	1.71	1.91
	UL	0.69	0.61	0.94	0.84
Net Information Through-put per Channel/ Sector (Mbps)	DL	5.9	9.1	9.2	14.1
	UL	3.1	1.6	4.2	2.2

Forrás: WiMAX Fórum

15. táblázat: Mobile WiMAX SIMO/MIMO összehasonlítás

Összefoglalás

Szakmai összegzés és konklúzió levonása

A Mobile WiMAX tulajdonságai és teljesítménye alkalmassá teszi a már szükségessé vált: nagy teljesítményű, alacsony költségű, szélessávú vezeték nélküli szolgáltatások megoldására, jó úton halad, hogy egy teljes világot lefedő globális szélessávú vezeték nélküli hálózatot lehessen vele létrehozni, köszönhetően a rugalmas architektúrájának. A technológia alapját egy nyílt szabvány képezi. Közel 1000 cég szoros, összehangolt fejlesztése révén megalkotható a világon mindenhol elfogadott szabvány és ezáltal lehetőség nyílik a teljesen kompatibilitásra, amikor is bármely cég által gyártott eszköz a világ bármely pontján képes közel ugyanazt a szolgáltatást nyújtani, igénybe venni. Jelen technológia is igen erősen, jó esélyekkel indult, hogy az IEEE szabványként elfogadta, és hogy igen nagy cégek is komoly összegeket fektettek a fejlesztésébe, terjesztésébe, hogy csak egyet mondjak az Intel. A rendszer már pár éve teljes egészébe készen áll a használatra, a tervezések, fejlesztések befejeződtek, „csak” el kellett volna kezdeni időben használni. Azonban a jelenlegi, kiépített rendszerek szolgáltatói időben észrevették a WiMAX –ban rejtőző veszélyt, és ők is elkezdtek a fejlesztést sürgetni. Mivel az ő antennáik mindenhol ott voltak, nagyobb tőkével rendelkeztek ezért igen nagy lépéselőnyvel indítottak. Azt viszont ne felejtjük el, hogy míg a mobil hálózatot elsősorban hanganyag átvitelére tervezték, méretezték és most megpróbálják azon az adatátvitelt is lebonyolítani, addig a WiMAX-ot a kezdetektől fogva az adatátvitelre fejlesztették, aminek csak egy szolgáltatása lett volna a VoIP alapú hangátvitel. Az egyébként 2010-re tervezett rendszer fejlesztésének elkezdését az LTE –t jóval előbbre hozták, napjainkban már javában tartanak a munkálatok.

A WiMAX rendszer nagy esélye akkor volt, amikor Amerika bejelentette, hogy WiMAX hálózat kiépítésébe kezd. Ez azonban kb. egy éve leállt, és rendszert támogató cégek is visszább vettek a ráfordításból. Tehát valószínű, hogy a WiMAX megmarad, mint kiegészítő technológia lokális hálózatok létesítésének lehetőségeként, mint pl. Magyarországon a Vértesben kitelepített rendszer. Illetve egy, a Cisco jövőbeli elképzelését tükröző cikkből idéznék pár sort, magát az irányelvet Cisco Motion -nek hívják, az alap gondolata a következő:

„A felhasználókat kevésbé érdekli a technológia, ők azt szeretnék, ha bárhol is lennének és bármilyen eszközt is tartanak kezükben, ugyanazt az alkalmazást érik el, ugyanazt a munkát legyenek képesek elvégezni. A Cisco azt ígéri, hogy ezek a technológiák megbújnak majd a háttérben, nem fognak zavarni, a munka folytonosságát viszont mindenképpen lehetővé fogják tenni. A konvergencia és az IP a kulcsszavak. A Cisco-nál ugyanis azt gondolják, hogy az Internet Protocoll lesz majd az a technológia, amely a különböző - létező vagy nem, elterjedt vagy sem - kommunikációs módozatokat összefogja és egységesíti. Az elmúlt időben ugyanis egyre több vezeték nélküli hálózat létesül, terjednek az RFID-megoldások, a nagy hatósugarú WiMAX megoldások is népszerűek. Becslések szerint a mobilitás piacán a legtöbb adatátvitel nem a GSM vagy az UMTS hálózatokon történik manapság, hanem az IP-ből kiinduló vezeték nélküli rendszereken. „

(COMPUTERWORLD, 2008)

Személyes tapasztalat, élmény összegzése

Egy évvel ezelőtt úgy látszott, hogy a WiMAX hálózatok elterjednek országszerte. A közelmúltban történt gazdasági változások, valamint a rivális technológiát támogató cégek fejlesztései azonban nem tették lehetővé, hogy ez végbemenjen. Ezáltal a dolgozat címe és tartalma közt egy kis eltérés mutatkozik, most így utólag szerencsésebbnek látnám inkább a „gazdaságossági” jelzöt a „gazdasági” helyett, mivel gazdasági elemzéshez szükség lett volna kiépített rendszerre. A szakdolgozat elkezdése előtt, azt a célt tűztem ki magam elé, hogy megpróbáljak betekintést nyerni a szélessávú vezeték nélküli technológiák világába. A szakdolgozat, úgy gondolom, hogy többé-kevésbé elérte célját, szert tettem olyan tudásokra, amiknek később talán hasznát vehetem, valamint tovább erősítették bennem azt a nyugtalanító érzést, hogy a világot sokkal inkább a pénz irányítja, mint a közös cél. Ez a pazarló, teljes világháló méretéhez, értékéhez, működési hatékonyságához viszonyított kicsinyes, pillanatnyi gazdasági előnyök megszerzése érdekében hozott, hosszútávon az emberiségnek (végfelhasználóknak) igenis nagyon drága döntések elszomorítóak. Tudom ez egyébként nem sokat számít, de figyelemfelhívásként is írtam volna meg ezt a szakdolgozatot, nehogy, mint oly sok másik technológia a WiMAX is alul maradjon és esetleg pár példányt hátrahagyva az utókornak, nyomtalanul eltűnjön.

Irodalomjegyzék

WiMAX FORUM [2006]:

Letöltés helye:

http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf

Letöltés ideje: 2009.04.27.

WiMAX FORUM [2006]:

Letöltés helye:

http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part2_Comparative_Analysis.pdf

Letöltés ideje: 2009.04.27.

WiMAX FORUM [2006]:

Letöltés helye:

http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/mobile_wimax_performance_and_comparative_summary.pdf

Letöltés ideje: 2009.04.27.

COMPUTERWORLD [2008]: Játék vagy verseny? 2008. június 3

Elérhető: <http://computerworld.hu/jatek-vagy-verseny.html>

Letöltés ideje: 2009.04.27.

HORVÁTH PÉTER [2003]: A tér-idő kódolás

Letöltés helye: <http://mycite.omikk.bme.hu/doc/20362.pdf>

Letöltés ideje: 2009.04.27.

Függelék

Rövidítések

3GPP	3G Partnership projekt
3GPP2	3G Partnership Project 2
AAS	Adaptive Antenna System also Advanced Antenna System
ACK	Acknowledge
AES	Advanced Encryption Standard
AG	Absolute Grant
AMC	Adaptive Modulation and Coding
A-MIMO	Adaptive Multiple Input Multiple Output (Antenna)
AMS	Adaptive MIMO Switching
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ASN	Access Service Network
ASP	Application Service Provider
BE	Best Effort
BRAN	Broadband Radio Access Network
CC	Chase Combining (also Convolutional Code)
CCI	Co-Channel Interference
CCM	Counter with Cipher-block chaining Message authentication code
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CINR	Carrier to Interference + Noise Ratio
CMAC	block Cipher-based Message Authentication Code
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CSN	Connectivity Service Network
CSTD	Cyclic Shift Transmit Diversity
CTC	Convolutional Turbo Code
CWTS	China Wireless Telecommunications Standards group
DL	Downlink
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DPCCH	Downlink Physical Control Channel
DRC	Data Rate Control
DSC	Data Source Control
DSL	Digital Subscriber Line
DVB	Digital Video Broadcast
E-AGCH	E-DCH Absolute Grant Channel
EAP	Extensible Authentication Protocol

EESM	Exponential Effective SIR Mapping
E-DCH	Enhanced Data Channel
E-DPCCH	E-DCH Dedicated Physical Control Channel
E-DPDCH	E-DCH Dedicated Physical Data Control Channel
E-HICH	E DCH HARQ Acknowledgement Indicator Channel
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
E-RGCH	E-DCH Relative Grant Channel
ErtPS	Extended Real-Time Polling Service
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVDO	Evolution Data Optimized or Evolution Data Only
E-UTRA	Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access
EVDO	Evolution Data-Voice
FBSS	Fast Base Station Switching
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
FUSC	Fully Used Sub-Carrier
FTP	File Transfer Protocol
FUSC	Fully Used Sub-Carrier
GPRS	General Packet Radio Service
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HHO	Hard Hand-Off
HiperMAN	High Performance Metropolitan Area Network
HMAC	keyed Hash Message Authentication Code
HO	Hand-Off or Hand Over
HRPD	High Rate Packet Data
HSPA	High Speed Packet Access
HSDPA	High Speed Downlink Data Packet Access
HS-DPCCH	High-Speed Dedicated Physical Control Channel
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel
HS-SCCH	High-Speed Shared Control Channel
HSUPA	High-Speed Uplink Data Packet Access
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
IE	Information Element
IETF	Internet Engineering Task Force
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IR	Incremental Redundancy
ISI	Inter-Symbol Interference
LDPC	Low-Density-Parity-Check
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAI	Multiple Access Interference

MAN	Metropolitan Area Network
MAP	Media Access Protocol
MBS	Multicast and Broadcast Service
MDHO	Macro Diversity Hand Over
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLD	Maximum Likely-hood symbol Detection
MMS	Multimedia Message Service
MMSE	Minimum Mean Squared Error
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MS	Mobile Station
MSO	Multi-Services Operator
NACK	Not Acknowledge
NAP	Network Access Provider
NLOS	Non Line-of-Sight
NRM	Network Reference Model
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
NSP	Network Service Provider
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PER	Packet Error Rate
PF	Proportional Fair (Scheduler)
PKM	Public Key Management
PSK	Phase Shift Keying
PUSC	Partially Used Sub-Carrier
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RA	Reverse Activity
RAB	Reverse-Link Activity Bit
RG	Relative Grant
RNC	Radio Network Controller
RPC	Reverse Power Control
RR	Round Robin (Scheduler)
RRI	Reverse Rate Indicator
RTG	Receive/transmit Transition Gap
rtPS	Real-Time Polling Service
RUIM	Removable User Identity Module
SDMA	Space (or Spatial) Division (or Diversity) Multiple Access
SF	Spreading Factor
SFN	Single Frequency Network
SGSN	Serving GPRS Support Node
SHO	Soft Hand-Off

SIM	Subscriber Identify Module
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal to Interference + Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output (Antenna)
SLA	Service Level Agreement
SM	Spatial Multiplexing
SMS	Short Message Service
SNIR	Signal to Noise + Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
S-OFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SS	Subscriber Station
STBC	Space Time Block Code
STC	Space Time Coding
TD-CDMA	Time Division Code Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplex
TEK	Traffic Encryption Key
TFRI	Transport Format Related Information
TTG	Transmit/receive Transition Gap
TTI	Transmission Time Interval
TU	Typical Urban (as in channel model)
UE	User Equipment
UGS	Unsolicited Grant Service
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telephone System
USIM	Universal Subscriber Identify Module
UTRAN LTE	UMTS Terrestrial Radio Access Network Long Term Evolution
V-MIMO	Virtual Multiple Input Multiple Output (Antenna)
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network
VSF	Variable Spreading Factor
VSM	Vertical Spatial Multiplexing
WiFi	Wireless Fidelity
WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiBro	Wireless Broadband (Service)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Tesztelt WiMAX rendszer leírása

Parameters	Value
Number of 3-Sector Cells	19
Operating Frequency	2500 MHz
Duplex	TDD
Channel Bandwidth	10 MHz
BS-to-BS Distance	2.8 kilometers
Minimum Mobile-to-BS Distance	36 meters
Antenna Pattern	70° (-3 dB) with 20 dB front-to-back ratio
BS Height	32 meters
Mobile Terminal Height	1.5 meters
BS Antenna Gain	15 dBi
MS Antenna Gain	-1 dBi
BS Maximum Power Amplifier Power	43 dBm
Mobile Terminal Maximum PA Power	23 dBm
#ofBSTx/RxAntenna	Tx: 2or4;Rx:2or4
#ofMS Tx/Rx Antenna	Tx: 1;Rx:2
BS Noise Figure	4 dB
MSNoiseFigure	7dB

Forrás: WiMAX Fórum

I. táblázat: WiMAX rendszer paramétereit

Parameters	Values
System Channel Bandwidth (MHz)	10
Sampling Frequency(F_p in MHz)	11.2
FFT Size (N_{FFT})	1024
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)	91.4 microseconds
Guard Time ($T_g = T_b/8$)	11.4 microseconds
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 microseconds
Frame duration	5 milliseconds
Number of OFDMA Symbols	48

Parameters		Values
DL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	120
	Data Sub-carriers	720
	Sub-channels	30
UL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	280
	Data Sub-carriers	560
	Sub-channels	35

Forrás: WiMAX Fórum

II. táblázat: OFDMA paraméterek

Parameters	Value
Propagation Model	COST 231 Suburban
Log-Normal Shadowing SD (σ)	8 dB
BS Shadowing Correlation	0.5
Penetration Loss	10 dB

Forrás: WiMAX Fórum

III. táblázat: Terjedési Modell

3G-WiMAX tesztszerek részletes leírása

Parameters	Values		
	Mobile WiMAX	1xEVDO	HSPA
Number of 3-Sector Cells	19		
Operating Frequency	2500 MHz	2000 MHz	
Duplex	TDD	FDD	
Channel Bandwidth	10 MHz	2 x 1.25 MHz	2 x 5 MHz
BS-to-BS Distance	2.8 kilometers		
Minimum Mobile-to-BS Distance	36 meters		
Antenna Pattern	70° (-3 dB) with 20 dB front-to-back ratio		
BS Height	32 meters		
Mobile Terminal Height	1.5 meters		
BSAntennaGain	15dBi		

Parameters	Values		
	Mobile WiMAX	1xEVDO	HSPA
MS Antenna Gain	-1 dBi		
BS Maximum PA Power	43 dBm		
Mobile Terminal Maximum ^{PA} Power	23 dBm		
# of BS Tx/Rx Antenna	Tx: 2; Rx: 2	Tx: 1; Rx: 2	
#ofMSTx/Rx Antenna	Tx: 1;Rx: 2	Tx: 1;Rx: 2	
BS Noise Figure	4 dB		
MS Noise Figure	7 dB		

Forrás: WiMAX Fórum

A. táblázat: Mobile WiMAX és 3G rendszer paramétereit

Parameters		Values
System Channel Bandwidth (MHz)		10
Sampling Frequency (F_p in MHz)		11.2
FFT Size (N_{FFT})		1024
Sub-Carrier Frequency Spacing		10.94 kHz
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)		91.4 microsec
Guard Time ($T_g = T_b/8$)		11.4 microsec
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)		102.9 microsec
Frame duration		5 millisecc
Number of OFDMA Symbols		48
Parameters		Values
DL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	120
	Data Sub-carriers	720
	Sub-Channels	30
UL PUSC	Null Sub-carriers	184
	Pilot Sub-carriers	280
	Data Sub-carriers	560
	Sub-Channels	35

Forrás: WiMAX Fórum

B. táblázat: Mobile WiMAX OFDMA paramétereit

Parameters	Value
Propagation Model	COST 231 Suburban
Log-Normal Shadowing SD (σ_s)	8 dB
BS shadowing correlation	0.5
Penetration Loss	10 dB

Forrás: WiMAX Fórum

C. táblázat: Terjedési modell

Channel Model	Multi-path Model	# of Fingers	Speed	Fading	Assignment Probability
Model A	Pedestrian A	1	3 km/hr	Jakes	30%
Model B	Pedestrian B	3	10 km/hr	Jakes	30%
Model C	Vehicular A	2	30 km/hr	Jakes	20%
Model D	Pedestrian A	1	120 km/hr	Jakes	10%
Model E	Single Path	1	0, $f_{\text{Doppler}} = 1.5$ Hz	Rician Factor K = 10 dB	10%

Forrás: WiMAX Fórum

D. táblázat: Többszörös hozzáférési modell a teljesítmény szimulációhoz

Állandó helyű WiMAX rendszerek berendezései

CPE: Alvarion BreezeMAX ODU, IDU + Voice Gateway Intel PRO Wireless 5116 szélessávú interfész chip TDD/FDD/d/e duál üzemmód



18. ábra: WiMAX CPE képei

Bázisállomás: Alvarion BreezeMAX FDD micro BS ODU, IDU



19. ábra: WiMAX BS képei

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítettek a szakdolgozat létrejöttét. Név szerint **Vasné Molnár Ágnes**nek és **Korsós András**nak az SCI-Network munkatársának és műszaki igazgatójának, akik mindig válaszoltak kérdéseimre, valamint **Gál Zoltán**nak a Debreceni Egyetem tanárának, aki nélkül talán még azt se tudnám mi az a WiMAX.