

Vezeték nélküli megoldások a távközlésben

Szakmai segédlet

MMK HiT továbbképzés

V1.1

2012

A segédletet a Magyar Mérnöki Kamara Hírközlési és informatikai Tagozata megbízásából
összeállította Kund Csaba.

Az anyagot lektorálta Gallyas András

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	6
Vezeték nélküli megoldások alkalmazása.....	7
1. Elvárások a vezeték nélküli kommunikációs technikákkal szemben.....	8
2. A kommunikációs igények legfontosabb műszaki paraméterei.....	8
3. A vezeték nélküli kommunikációra vonatkozó előírások.....	8
3.1. Nemzetközi koordináció.....	8
3.2. Hazai szabályozás.....	8
4. A vezeték nélküli rendszerek főbb alkalmazási területei.....	9
4.1. Hagyományos gerinchálózati alkalmazások.....	9
4.2. Felhordó hálózatok, körzethálózatok.....	9
4.3. Elérési hálózatok:.....	9
4.4. Műholdas kommunikáció:.....	9
4.5. „Personal communications”.....	9
4.6. Egyéb vezeték nélküli alkalmazások:.....	9
5. Vezeték nélküli technológia választás szempontjai.....	9
6. A vezetékes és vezeték nélküli technológiák összehasonlítása.....	10
6.1. Mikor előnyös a vezeték nélküli megoldás?.....	10
7. Vezeték nélküli összeköttetések költségelemzése.....	11
7.1. A költségelemzés (Business Case) készítés főbb szempontjai:.....	11
7.2. Kockázatelemzés főbb szempontjai:.....	11
8. Környezetvédelmi megfontolások.....	12
9. Ellenőrző kérdések.....	12
Mikrohullámú pont –pont összeköttetések.....	14
10. Frekvenciasávok, hullámterjedési tulajdonságaik és azokat leíró terjedési modellek .	15
10.1. Frekvenciasávok.....	15
10.2. Terjedési módok.....	16
10.2.1. Szabadtéri terjedés.....	16
10.2.2. Többutas terjedés.....	17
10.2.3. Fresnel zónák.....	18
10.2.4. Késél diffrakció.....	19
10.2.5. A hullámterjedést befolyásoló tényezők.....	20
10.3. Fading fogalma, fajtái.....	20
10.4. Fading hatásai elleni védekezés.....	21
10.5. Diversity.....	22
10.6. Esőcsillapítás.....	22
10.7. Line of Sight (LOS), Non Line of Sight (NLOS)terjedés.....	23
10.8. Ellenőrző kérdések.....	23
11. Mikrohullámú P-P összeköttetések tervezése.....	25
11.1. Telephelyek (antenna elhelyezés) kiválasztása.....	25
11.2. Frekvencia választás.....	25
11.2.1. Frekvenciasáv választás.....	25
11.2.2. Csatorna választás.....	25
11.2.3. Polarizáció választás:.....	26
11.3. Berendezés, antenna választás.....	26
11.4. Antennamagasság meghatározása.....	26
11.5. Speciális antenna elrendezés.....	26
11.6. Mikrohullámú antennák.....	27

11.6.1.	Antenna polarizáció.....	29
11.6.2.	Antenna paraméterek.....	31
11.6.3.	Antenna nyereség	31
11.6.4.	Szélterhelés hatása.....	31
11.7.	Metszet készítés.....	31
11.8.	Ellenőrző kérdések	32
12.	Szakasz számítás (Teljesítmény mérleg, Link Budget)	34
12.1.	Szakasz számítás menete.....	34
12.2.	Szakasz számítás elemei.....	35
12.3.	Részben takart Fresnel zóna többletszillapítása	36
12.4.	Esőcsillapítás	36
12.5.	Interferencia analízis	38
12.6.	Fadingtartalék meghatározása	41
12.7.	Fading és a kiesés valószínűsége	41
12.8.	Megbízhatóság	44
12.9.	Sugáregészségügyi vizsgálat	45
12.10.	Ellenőrző kérdések	45
13.	P-P mikrohullámú összeköttetések kialakítása	47
13.1.	Legfontosabb P-P mikrohullámú rendszerek	47
13.2.	Frekvencia engedélyezési terv	50
13.3.	Ellenőrző kérdések	51
14.	A technológia korlátai, a jövő lehetséges útjai.....	52
	Vezeték nélküli hozzáférési rendszerek	53
15.	Vezeték nélküli hozzáférési rendszerek (WAS) felosztása.....	54
15.1.	P-P rendszerek.....	54
15.2.	P-MP rendszerek	54
15.3.	Ellenőrző kérdések	56
16.	Követelmények a P-MP rendszerekkel szemben	57
16.1.	Sebesség	57
16.2.	Területi lefedettség – nagy előfizetői sűrűség.....	60
16.3.	Minőségi igények a P-MP rendszerekkel szemben (QoS)	65
16.4.	Gazdaságosság	65
16.5.	Ellenőrző kérdések	66
17.	A modern vezetékek nélküli hozzáférési rendszerekben alkalmazott megoldások (technológiák).....	67
17.1.	Moduláció és kódolás.....	67
17.2.	OFDM, OFDMA	68
17.3.	SMART antenna rendszerek	72
17.4.	Internet protokoll.....	80
17.5.	Ellenőrző kérdések	80
18.	A P-MP rendszerek kialakítása, tervezési szempontok.....	82
18.1.	P-MP rendszerek kialakítása	82
18.2.	Tervezési szempontok	82
18.3.	Ellenőrző kérdések	83
19.	Hozzáférési technológiák	85
19.1.	Hagyományos P-MP rendszerek	85
19.2.	WLAN (Wi-Fi).....	88
19.3.	WiMAX.....	89
19.4.	GSM család	90
19.5.	WiMAX kontra LTE	90

19.6.	Egyéb mikrohullámú kommunikációs rendszerek	91
19.7.	Ellenőrző kérdések	91
Mellékletek.....		93
20.	Rövidítések.....	94
21.	Ajánlott irodalom	97

Bevezetés

Ez a tervezési segédlet segítséget kíván nyújtani azoknak a távközlési hálózattervezőknek, akik az átviteli és hozzáférési rendszerek vezetékek nélküli (vagyis rádiós) részét tervezik. Az átviteli és hozzáférési hálózatok nagyobb része vezetékes megoldással valósul meg, és ezekre vonatkozóan elegendő tájékoztató és segédanyag áll a tervezők rendelkezésére. A jelen segédlet hiányt pótol azzal, hogy a hálózat tervezéshez az alapvető vezetékek nélküli szempontokat, illetve tudnivalókat összefoglalja. Ezzel támogatni kívánja a rádiós tervezők munkáját, hogy minél magasabb színvonalú műszaki tervek készülhessenek a vezetékek nélküli területen. Természetesen a gyakorlatban adódhatnak olyan feladatok, amelyek megoldásához nem elegendők az itt leírtak, hanem további ismeretekre van szükség. Ebben segíthet a csatolt irodalomjegyzék.

A tervező ebben a segédletben megtalálhatja a pont-pont közötti mikrohullámú összeköttetések és a pont-multipont elérési hálózatok működésére és tervezésére vonatkozó alapvető tudnivalókat. Nem tartalmazza azonban a segédlet a területi besugárzásszámítás témakörét, így nem foglalkozik a műsorszóró adóállomások és a mobil hálózatok bázisállomásainak (illetve az ehhez hasonló egyéb rendszereknek) besugárzás számítási módszereivel. A műholdas kommunikáció sem része jelen tervezési segédletnek. A frekvenciagazdálkodás, ill. a frekvenciasávok hatósági szabályozása és egyéb hatósági előírások ugyancsak kívül esnek a tárgyalt területen.

Vezeték nélküli megoldások alkalmazása

1. Elvárások a vezeték nélküli kommunikációs technikákkal szemben

- Az igényekhez illeszkedő sebesség
- Igény szerinti mobilitás
- Megbízhatóság
- Biztonságos adatátvitel
- Költséghatékony működés
- Környezetvédelmi megfontolások

2. A kommunikációs igények legfontosabb műszaki paraméterei

- Az átviendő információ mennyisége, átviteli sebesség
- Az információtovábbítás távolsága
- Két pont közötti kommunikáció (P-P)
- Több pont közötti kommunikáció (P-MP)
- Fix pontok közötti kommunikáció
- A végpontok egy része, vagy valamennyi mobil
- Az átviendő információ fajtája (késleltetésre érzékeny, ill. kevésbé érzékeny információ)

3. A vezeték nélküli kommunikációra vonatkozó előírások

3.1. Nemzetközi koordináció

- Rádiószabályzat: ITU, WARC (World Administrative Radio Conference), WRC (World Radiocommunication Conference)
- ITU-R
- CEPT, ECC/DEC, ECC/REC



European Conference of Postal
and Telecommunications Administrations
- 48 European countries cooperating to regulate posts, radio
spectrum and communications networks

3.2. Hazai szabályozás

- FNFT (Frekvenciasávok Nemzeti Felosztási Táblázata)
- RAT (Rádió Alkalmazási Táblázat)

4. A vezetékek nélküli rendszerek főbb alkalmazási területei

4.1. Hagyományos gerinchálózati alkalmazások

Szerepe Magyarországon egyre csökken, de még használják, (mobil szolgáltatók, AH Rt., stb)

4.2. Felhordó hálózatok, körzethálózatok

Jelentős hálózat működik, alapvetően a mobil szolgáltatók üzemeltetik a bázisállomások és kapcsoló központok között

4.3. Elérési hálózatok:

- Fix telepítésű rendszerek: bérelt vonali alkalmazások
- Nomadikus rendszerek: viszonylag kis számban
- Mobil rendszerek: GSM, UMTS, EDR, stb.
- Helyi hálózatok: WLAN (Wi-Fi)

4.4. Műholdas kommunikáció:

- Adatátvitel (kép, hang, egyéb adat)
- VSAT
- DSB (közvetlen műholdas műsorszórás)
- Műholdas mobil rendszerek (INMARSAT, Iridium, Global Star)
- GPS

4.5. „Personal communications”:

- BlueTooth
- DECT

4.6. Egyéb vezetékek nélküli alkalmazások:

SRD (RFID, NFC, orvosi, tudományos, stb. felhasználás)

5. Vezeték nélküli technológia választás szempontjai

- Van-e kiépített infrastruktúra a végpontoknál?
 - A meglévő rendszer bővíthetősége?
 - Hosszú távú, a jövőben esetleg bővülő igényről van szó?
 - Milyen gyorsan kell kielégíteni az igényt?
- Részletes költségelemzés (BC) szükséges az egyes alternatívák között!

6. A vezetékes és vezeték nélküli technológiák összehasonlítása

	Vezeték nélküli (földi)	Vezetékes (opt.)
<i>Átviendő információ nagysága</i>	< 600 Mb/s	≥Tb/s
<i>Bővíthetőség</i>	~ ✓	✓
<i>Mobilitás</i>	✓	—
<i>Rugalmasság</i>	✓	<i>merev</i>
<i>Telepítési idő</i>	<i>rövid</i>	<i>hosszú</i>
<i>Megbízhatóság</i>	≥ 99,99 (csak a tervezéstől függ)	≥ 99,99 (gyakori kábelelvágások)
<i>Biztonság</i>	✓	✓
<i>Költségek</i>	változó	magas/alacsony
<i>Jövőállóság</i>	a technológia változik	a technológia változik

6.1. Mikor előnyös a vezeték nélküli megoldás?

- Mobil terminálok esetén
- Az előfizetői igényt gyorsan kell kielégíteni
- Viszonylag alacsony a sebesség igény (< 400 Mb/s)
- Az építési engedélyek beszerzése gondot okoz (pl. útfelbontás egy történelmi belvárosban)
- Az egyik, vagy mindkét végpont ritkán lakott területre esik
- P-MP típusú szolgáltatásoknál
- Ideiglenes (rövid távú) az ügyfél igénye
- Részben, vagy egészben rendelkezünk kiépített infrastruktúrával (torony, maghálózati elérés, stb.)
- Ha a költségek alacsonyabbak, mint a vezetékes költségek

7. Vezeték nélküli összeköttetések költségelemzése

Egyszeri költségek (beruházás)	Rendszeres költségek (üzemeltetés)
<ul style="list-style-type: none"> – <i>Infrastruktúra (torony, konténer, energiaellátás, klíma, stb.)</i> – <i>Hardver (berendezés, antenna, stb.)</i> – <i>Tervezés</i> – <i>Telepítés, installálás</i> – <i>Mag hálózat elérése</i> – <i>Hálózatfelügyelet integrálása saját rendszerbe</i> – <i>Frekvencia lekötési díj</i> – <i>Egyéb hatósági eljárási költségek</i> 	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Energia</i> – <i>Infrastruktúra</i> – <i>Személyzet</i> – <i>Hálózatfelügyelet</i> – <i>Javítás, karbantartás</i> – <i>Ügyfélszolgálat</i> – <i>Frekvencia használati díj</i> – <i>Amortizáció</i> – <i>Infláció</i> – <i>Bérleti díjak (társszolgáltatók felé)</i> – <i>Általános működési költségek</i>

7.1. A költségelemzés (Business Case) készítés főbb szempontjai:

- Hány éves megtérülést tervezünk
- Valós piaci ismeretek szükségesek a leendő ügyfelekről
- Rendelkezésre áll-e megfelelő forrás a beruházás finanszírozására (saját, állami vagy EU-s pályázati pénz)
- Szükséges-e a hitelfelvétel
- A vállalkozást terhelő külső költségek (adók, járulékok, frekvencia díjak, stb.) reális tervezése
- Infláció figyelembevétele
- Devizaárfolyamok várható alakulása
- Bérköltségek várható alakulása
- Kockázat elemzés

7.2. Kockázatelemzés főbb szempontjai:

- A piacelemzés eredményei és a tények közötti korreláció
- A figyelembe vett költségtételek mennyire reálisak
- Jól prognosztizáltuk-e a piaci mozgásokat
- A konkurens társszolgáltatók hatása az ügyfélszámra
- Egy megjelenő modernebb technológia nem csábítja-e el az ügyfelek egy részét
- Elég tartalékot vettünk figyelembe a gazdasági szabályozórendszer nyereség csökkentő hatásának fedezésére
- Mekkora tartalékot szánunk a különböző, tőlünk független, negatív külső tényezők kivédésére
- A választott technológia jövőállósága, legalábbis a megtérülési időtartamig, biztosított-e

8. Környezetvédelmi megfontolások

Az elektromágneses sugárzás hatása az élő szervezetre régóta kutatás és nem utolsósorban viták tárgya. A cél, hogy minimalizáljuk ezt a sugár-terhelést. Ennek érdekében hatósági előírás szabályozza az elektromos, mágneses és elektromágneses terek lakosságra vonatkozó egészségügyi határértékeit. A 2-300 GHz frekvenciatartományban az ekvivalens síkhullám teljesítménysűrűsége nem lehet nagyobb, mint 10W/m^2 . Minden frekvencia tervben számítással kell igazolni a fenti követelmény betartását.

Hordozható eszközöknél (mobil telefon) ahol elkerülhetetlen, hogy az adóantenna a felhasználó személy közvetlen közelében legyen, egy fontos paraméter határozza meg a lehetséges sugárterhelést, SAR – Specific Absorption Rate:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma(E_{\text{rms}})^2}{\rho} \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right]$$

Ahol

σ [S/m] = a test vezetőképessége

E_{rms} [V/m] = elektromos térerősség

ρ [kg/m^3] = test tömeg sűrűség

9. Ellenőrző kérdések

- 1) Milyen összefüggés van a felhasználói igények és a szolgáltató által nyújtott sebesség között?
 - a) Minél nagyobb sebességet kell biztosítani, mert az igények úgyis csak nőnek.
 - b) Csak a szolgáltató gazdasági lehetőségei által korlátozott sebességet kell biztosítani.
 - c) A pillanatnyi felhasználói igényeket kielégítő sebességnél valamivel magasabbat célszerű biztosítani, mert a piac nem fizeti meg a hatalmas kihasználatlan kapacitások kiépítését.
- 2) Mi a különbség a „megbízhatóság” és a „biztonság” fogalmak között?
- 3) Van-e speciális környezetvédelmi követelmény a vezeték nélküli technológiákkal szemben az általános igényeken (hulladékgazdálkodás, veszélyes anyagok kezelése, stb.) túl?
- 4) Milyen technológia független műszaki paraméterekkel lehet jellemezni egy kommunikációs igényt?
- 5) Egy átvitel során a különböző fajtájú információt (kép, hang, adat, stb.) lehet-e egységesen kezelni?
- 6) Melyik a vezeték nélküli távközlés legmagasabb szintű nemzetközi fóruma?
- 7) Hol (milyen nemzetközi dokumentumban) található a legfontosabb előírások a vezeték nélküli távközlési rendszerekre?
- 8) Mi a különbség az „ECC/DEC” és az „ECC/REC” között?
- 9) A frekvencia használat hatósági szabályozását melyik magyar törvény írja elő?
- 10) Mi az előző pontban említett törvény „végrehajtási utasítása”?
- 11) Hol perspektivikusak a vezeték nélküli hálózatok?
 - a) Gerinchálózatoknál
 - b) Körzethálózatoknál

c) Elérési hálózatoknál

- 12) Sorolja fel a jelenlegi vezeték nélküli rendszerek főbb alkalmazási területeit!
- 13) Mik a legfontosabb előnyei a vezeték nélküli rendszereknek a vezetékeskel szemben?
- 14) Mely paraméter tekintetében maradnak alul a vezeték nélküli megoldások a vezetékeskel szemben?
- 15) Melyek azok a költségtételek, amelyek infrastruktúrától függetlenül csak vezeték nélküli rendszerek esetében lépnek fel?
- 16) Mennyi a 2-300 GHz frekvenciatartományban a maximálisan megengedett ekvivalens síkhullám teljesítménysűrűsége?
- 17) Hogyan számoljuk ki az „SAR” értékét?

Mikrohullámú pont –pont össze- kötetések

10. Frekvenciasávok, hullámterjedési tulajdonságaik és azokat leíró terjedési modellek

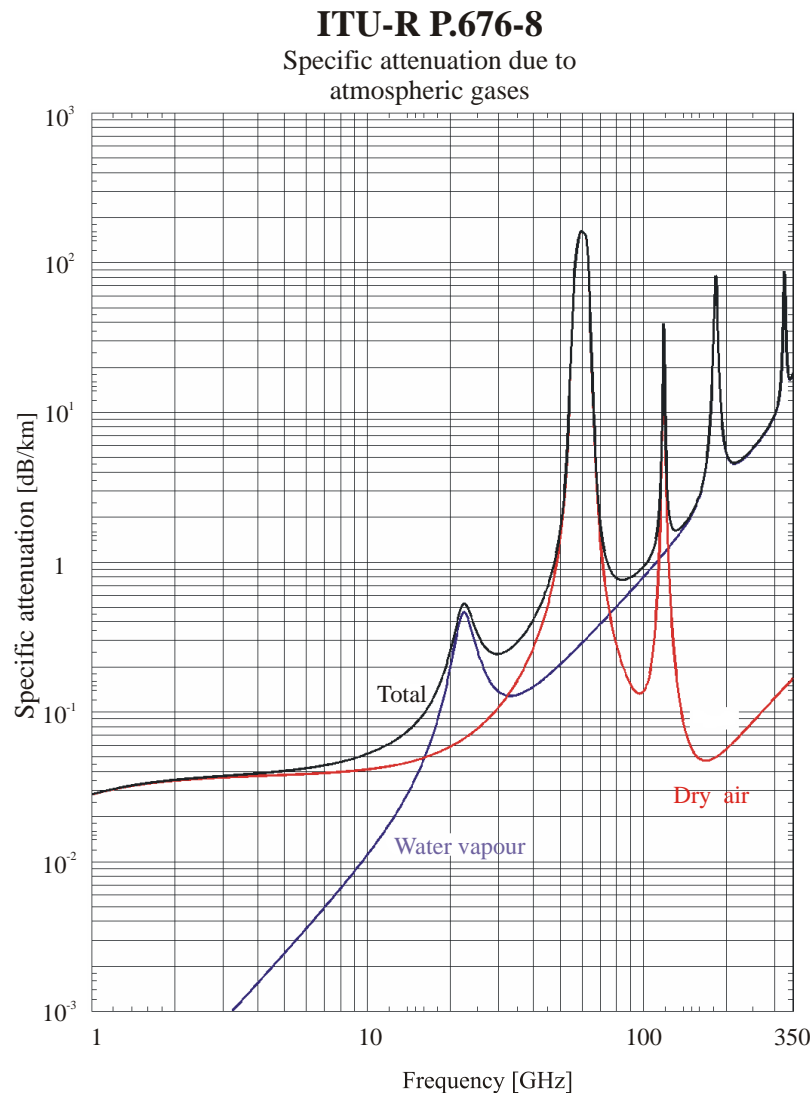
Minden villamosmérnök a tanulmányai során találkozott a vezeték nélküli kommunikáció alapfogalmaival, azért nem haszontalan ezeket az ismereteket egy kicsit feleleveníteni, felfrissíteni. A témánk a „Mikrohullámú pont –pont összeköttetések”, ezért csak a mikrohullámú sávokkal foglalkozunk a továbbiakban.

10.1. Frekvenciasávok

Mikrohullámnak legáltalánosabban az 1 GHz feletti frekvenciatartományt nevezzük. A felső határ ~ 300 GHz-ig terjed. Jelenleg kommunikációs szempontból ez a határ. A 300 GHz-nél magasabb frekvenciákon történő kommunikációt már más elnevezéssel illetjük: infravörös tartományú átvitel, vagy optikai átvitel.

Az első fontos kérdés: hogyan viselkedik a légkör a különböző frekvenciájú mikrohullámú jelek esetén.

A légkört alkotó atmoszférikus gázok csillapítása a frekvencia növelésével növekszik. (Lásd az 1. ábrát)



1. ábra. Az atmoszférikus gázok csillapítása a frekvencia függvényében

Az atmoszférikus gázok csillapítása két részből tevődik össze:

- száraz levegő csillapító hatása
- a levegőben lévő víz csillapítása

A görbét megvizsgálva mindjárt szembetűnik, hogy az 1 és ~ 10 GHz közötti tartományban viszonylag alacsony a csillapítás. Ezért régebben ezt a tartományt „rádió ablaknak” nevezték. A kisebb frekvenciákon (ami nem mikrohullám) nagyobb a rádiócsatornában megjelenő zaj nagysága. Ezek légköri, termikus, ipari eredetűek lehetnek. A 10 GHz felett viszont a csillapítás növekszik meg. Mindkét hatás (nagyobb légköri zaj, vagy megnövekedett csillapítás) azt eredményezi, hogy ugyanolyan vételi jel/zaj esetén nagyobb kisugárzott teljesítményre van szükség, mint a rádió ablakhoz tartozó frekvenciasávban.

A levegőben lévő vízgőz molekulák csillapítása a 26 GHz-es frekvencián ad egy helyi maximumot. A következő maximum az oxigén molekulák elnyelő hatására jelentkezik ~ 60 GHz-en. Éppen ezt a tulajdonságot használják ki bizonyos katonai alkalmazásoknál, ahol szándékosan használják kommunikációs célokra, pl. a 60 GHz-es tartományt, hogy a lehallgatás valószínűségét minimalizálják.

A frekvenciasávok felosztása és a sávhasználat hatósági szabályozása nem tartozik a most tárgyalandó témáink közé. Annyit azonban célszerű megjegyezni, hogy nagyon szigorú hatósági előírások vonatkoznak a sávhasználat céljaira és a megvalósítandó összeköttetés műszaki paramétereire.

10.2. Terjedési módok

10.2.1. Szabadtéri terjedés

1 GHz felett az elektromágneses hullámok gyakorlatilag egyenes vonalban terjednek. A földfelszíni sugár a levegő változó törésmutatója következtében a földfelszín irányába elhajlik. Ezt úgy tudjuk figyelembe venni, hogy a geometriai fűldsugár helyett egy, úgynevezett „effektív földszugárral” számolunk. Effektív földszugár: $R_{\text{eff}} = kR_f$. Mivel az elhajlás földrajzi koordináta függő, ezért a „k” is függ a koordinátáktól. A mi szélességi fokunknál $k=4/3$.

Az elektromágneses tér (vákuumban), a forrástól kellő távolságra, gömbhullámként terjed, a szabadtéri csillapítás:

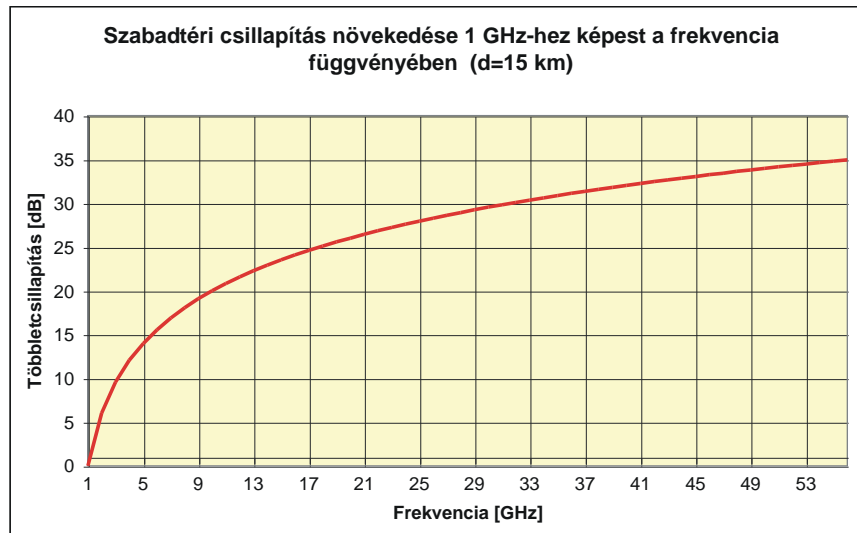
$$A_{sz} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ [dB]}$$

ahol λ = hullámhossz, d = távolság (m, km)

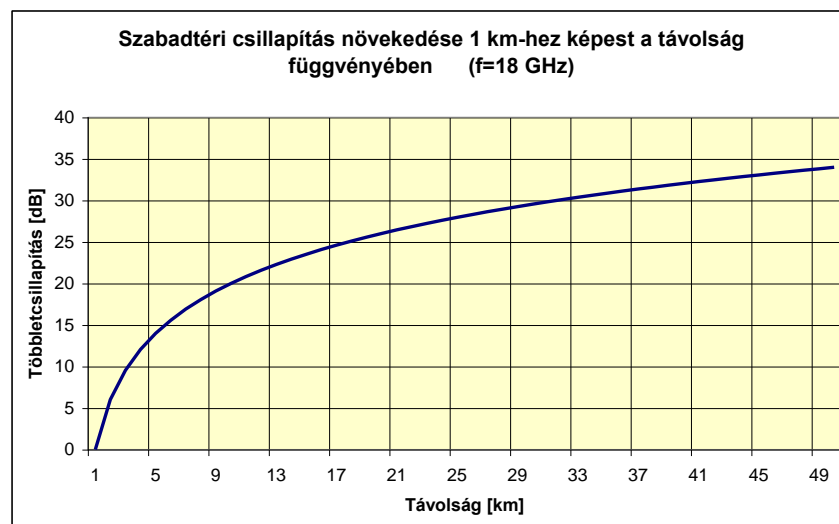
A szabadtéri csillapítás (összevonás és frekvencia behelyettesítésével):

$$A_{sz} = 32,44 + 20 \log f [\text{MHz}] + 20 \log d [\text{km}] \text{ [dB]}$$

Mint látható a szabadtéri csillapítás a frekvencia és a távolság négyzetével arányos. Ebből következik, hogy alacsonyabb frekvenciákon kisebb a csillapítás, azaz nagyobb szakasztávolság hidalható át. Ezt szemléltetik az alábbi ábrák



2. ábra. Szabadtéri csillapítás a frekvencia függvényében

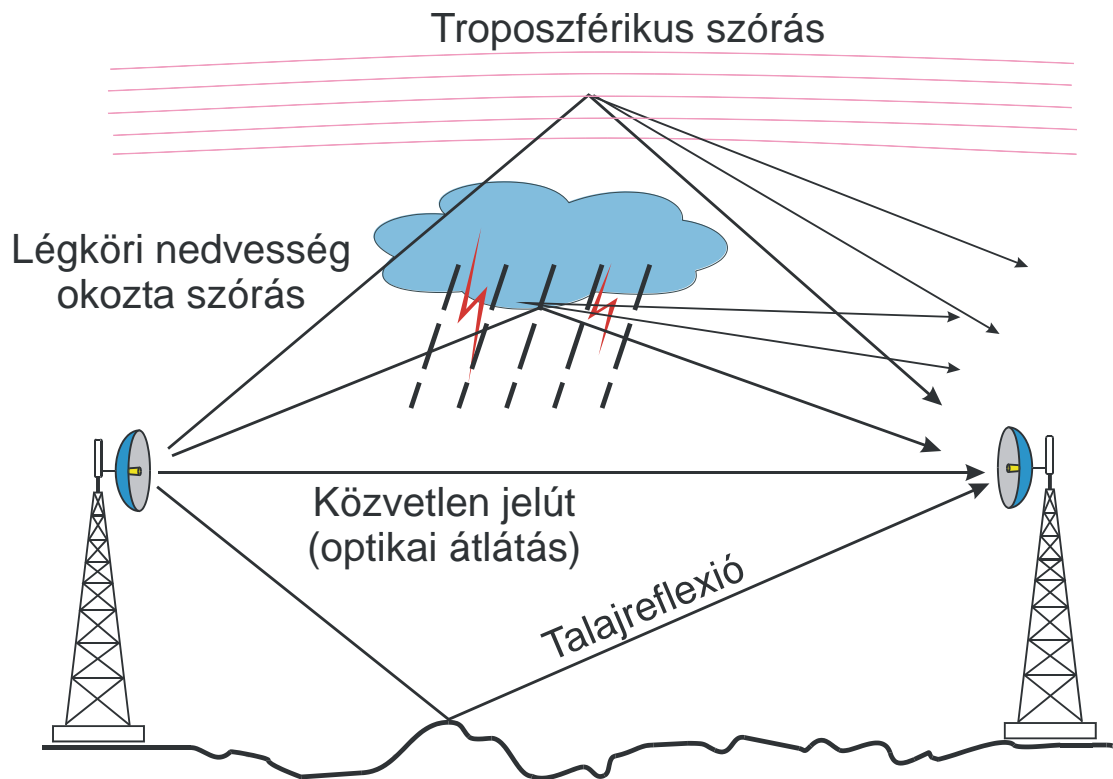


3. ábra. Szabadtéri csillapítás a távolság függvényében

Mint látható 2. ábrán, és a 3. ábrán a szabadtéri csillapítás mind a frekvencia, mind, pedig a távolság négyzetével arányosan növekszik.

10.2.2. Többutas terjedés

Az egyik antennáról a jel a másik antennára alapvetően egyenes vonalban terjed, ha van optikai átlátás a két antenna között. Ezt a terjedési módot nevezzük „Line of Sight”, LOS terjedésnek. Mivel az antenna nyalábszöge nem nulla, hanem valamilyen véges érték, a jel nemcsak a másik antennához jut, hanem pl. ütközik a talajba, mindenféle tereptárgyba, vagy növényzetbe, ahonnan reflektálódni fog. Hasonló reflexió lép fel, pl. a troposzféránál, vagy felhőknél. A jel nemcsak egyenes úton, hanem sok egyéb módon is eljut az egyik állomásról a másikra. A 4. ábrán látható mechanizmusok mellett, pl. diffrakció, inhomogén rétegekről reflexió és más hatások is felléphetnek. A lényeg, hogy több úton jut el a jel az egyik állomásról a másikra.



4. ábra. Hullámterjedési utak

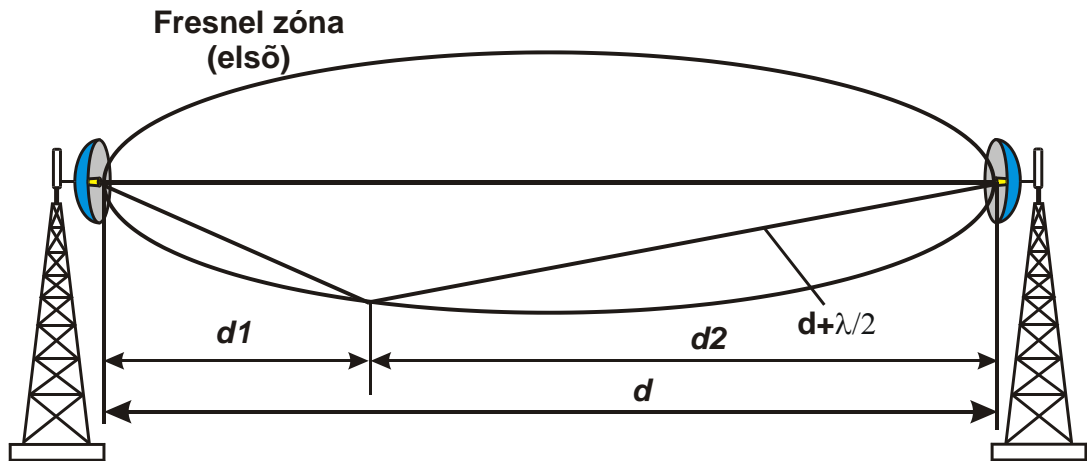
Mindezek hatására a jel a különböző utakon, különböző amplitúdóval és fázissal és különböző időpillanatokban érkezik a vevőantennára. Az egyes reflektáló felületek különböző csillapítással verik vissza beeső jeleket. Ezek a felületek nem „jó antennák”, tehát a reflektált jelek szintje minden esetben alacsonyabb, mint a fő jel (LOS) szintje. Egy háromszög átfogója minden esetben kisebb, mint a két befogó összege, azaz a reflektált jel késve érkezik a vevőantennára, valamint az úthossz különbség miatt eltérő fázissal is.

A vevőkészülék demodulátora ugyanazt a jelet kapja egymás után. Amennyiben nincs kellő szintkülönbség a fő és egyéb úton érkező jelek között, akkor zavar támad a vételben.

10.2.3. Fresnel zónák

Az adó és a vevő antenna között „ d ” távolság van. A tér azon pontjait összegezve, amelyekről reflektált, vagy szóródott jel ugyanolyan úthosszon – szükségszerűen „ d ”-nél nagyobb – érkezik a vevőantennára, egy ellipszoidot kapunk. Ilyenből kvázi végtelen számút képezhetünk. Ezek között kiemelkedő helyet foglalnak el azok az ellipszoidok, ahol az útkülönbség éppen $n \cdot \lambda / 2$, ezeket nevezzük „Fresnel” ellipszoidoknak. (5. ábra)

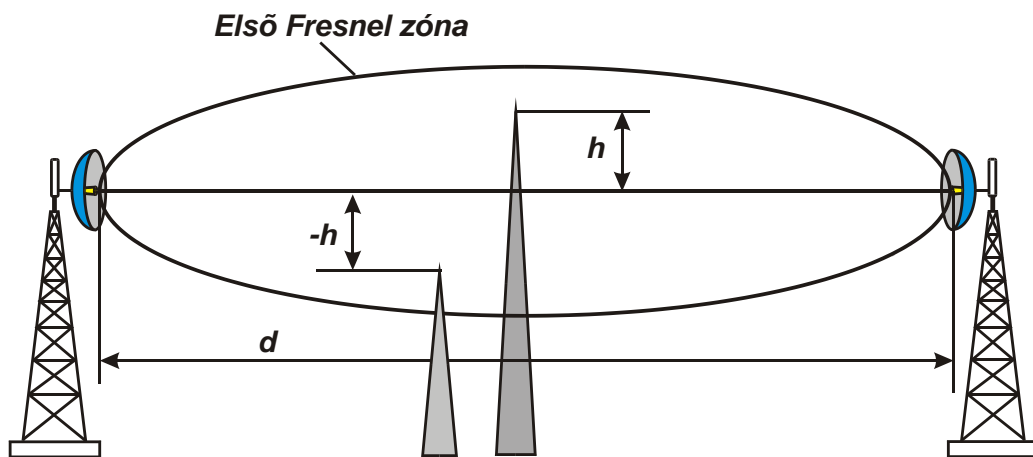
A Fresnel ellipszoidon belül lévő minden akadály Huygens elve szerint egy-egy elemi sugárforrásként szerepel, mégpedig gömbsugárzóként. Az egyenes úton terjedő jelhez képest a reflektált jel $n \cdot \lambda / 2$ -vel hosszabb utat tesz meg. Amennyiben $n < 1$ -nél, akkor a reflektált jel éppen ellenfázisban lesz az egyenes úton terjedő jelhez képest. Az $n=1$ és $n=2$ -höz tartozó Fresnel ellipszoid közötti térrészben lévő akadályról „szóródott” jel viszont ugyanolyan fázisban érkezik, mint az egyenes jel, ezért azt növeli. Az egymás után következő Fresnel zónák hatása gyakorlatilag egymást semlegesíti, emiatt elegendő csak az elsőre koncentrálnunk.



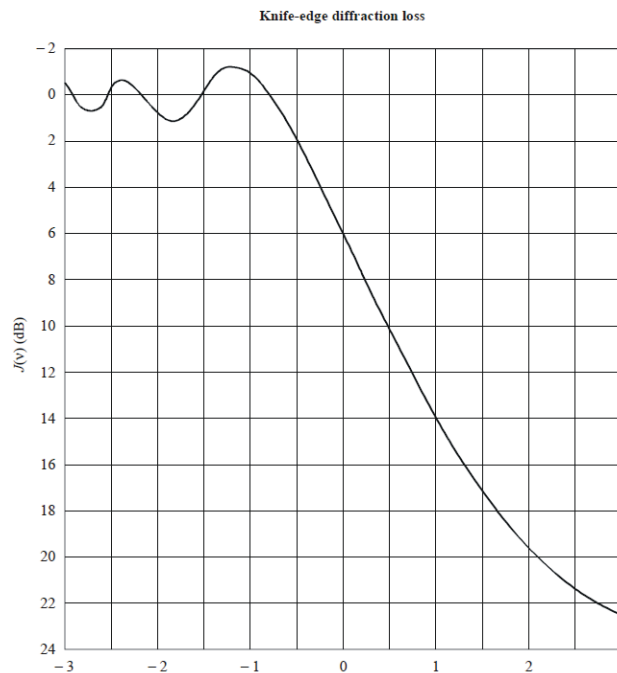
5. ábra. Fresnel zóna

10.2.4. Késél diffrakció

A késél-szerű akadály (az akadály kiterjedése a szakasztávolsághoz képest elhanyagolható), (6. ábra) esetén járulékos csillapítás lép fel. A csillapításmenetet mutatja az 7. ábra. A vízszintes tengely h/R_{Fm} -ben van skálázva. A h értéke pozitív, ha a LOS vonal fölé, negatív, ha az alá ér. $h=0$ esetén a csillapítás éppen 6 dB.



6. ábra. Késél akadályok



7. ábra. Késél akadály csillapító hatása

10.2.5. A hullámterjedést befolyásoló tényezők

- Talajreflexió (reflection)
- Többutas terjedés (multipath)
- Atmoszférikus gázok csillapítása (absorption)
- Esőcsillapítás
- „Defókuszálás”
- Troposzférikus szórás (scattering)
- Sugárelhajlás (diffraction)
- Sugártörés (refraction)
- Inhomogén rétegek hatása a sugártörésre
- Az antennáról induló és oda érkező elektromágneses hullámok beesési szögének változása
- Polarizáció elfordulás, a keresztpolarizációs csillapítás csökkenése

10.3. *Fading fogalma, fajtái*

A légkör és a környezet nagyon sok fizikai paramétere befolyásolja a benne haladó mikrohullámú jelet. Ezek a fizikai paraméterek időben folytonosan változnak, függenek:

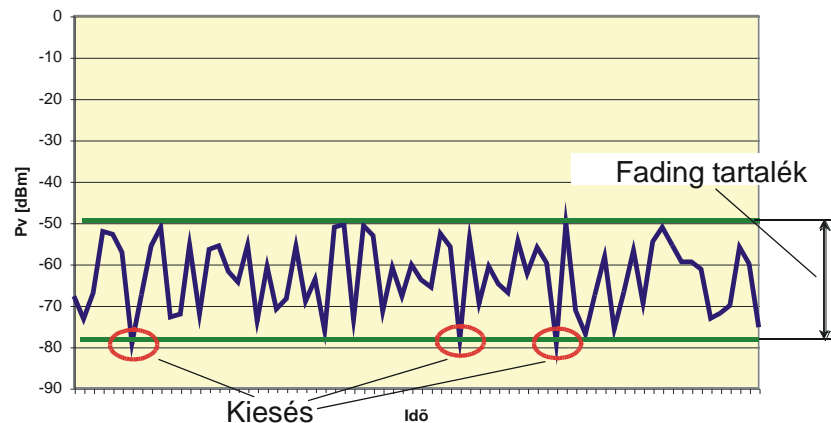
- A légkör hőmérsékletétől
- Nedvességtartamától
- Légköri áramlásoktól
- A légkörben kialakuló különböző rétegek egymáshoz képesti viszonyától
- Napszaktól
- Évszaktól
- Földrajzi koordinátáktól
- Napfolttevékenység intenzitásától
- Talajfelszín nedvességtartamától

- Növényzettől (pl. lomblevelű fák nyáron és télen)

Mindezen hatások következtében a jelszint állandóan ingadozik, amit FADING-nek nevezünk. A fading két fő fajtáját különböztetjük meg:

- Flat (lapos) fading → széles tartományban ható
- Szelektív fading → frekvencia függő

A vételi szint, normál esetben nagyobb, mint a vevő küszöbszintje. A fading hatására a vételi szint ingadozik. Abban az esetben, amikor a vételi szint a küszöbszint alá csökken, kiesés lép fel, megszakad az összeköttetés (8. ábra). A vételi szint és a vevő küszöbszintje közötti különbséget nevezzük „fadingtartaléknak”.



8. ábra. Fadingtartalék, küszöbszint

Az ITU-R P.530-12 ajánlás foglalkozik részletesen ezzel a témával: „Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”

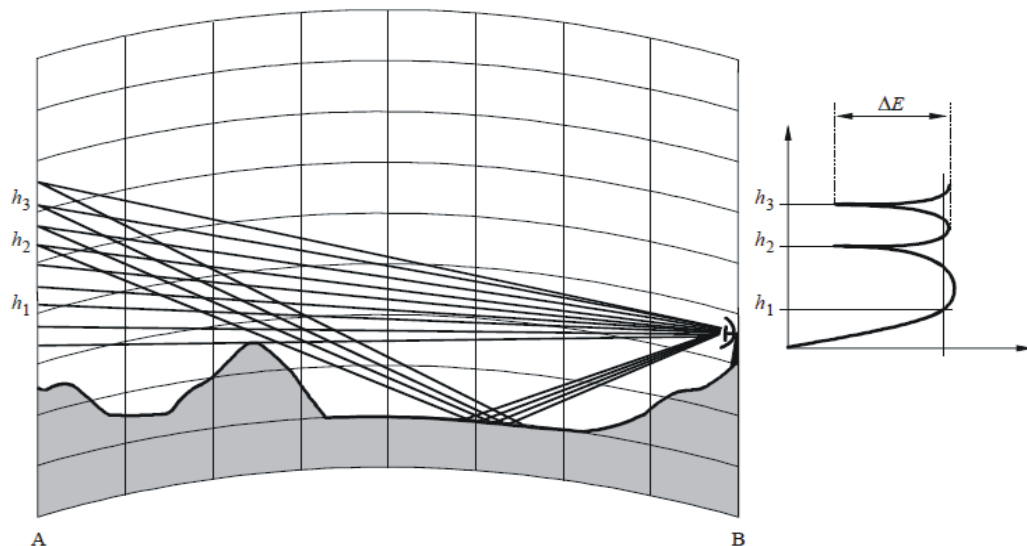
A feladat meghatározni a kiesés valószínűségét (az idő hány százalékában haladja meg a fellépő fading a tervezett fadingtartalék mértékét).

10.4. Fading hatásai elleni védekezés

- Elegendően nagy kisugárzott teljesítmény (EIRP): Költséges, interferenciás zavarokat okozhat, sugáregészségügyi gondok.

$$\text{EIRP}[\text{dBW}] = P_{\text{ki}}[\text{dBW}] + G[\text{dBi}]$$

- Az antenmagasság megfelelő megválasztása. A vételi jelszint periodikusan változik, annak függvényében, hogy a reflektált jelek a közvetlen jelhez képest fázisban, vagy ellenfázisban érkeznek (9. ábra)
- Szelektív fading ellen diversity használata
- Lehetőség szerint vertikális polarizáció választása
- Modern rendszerekben „Smart” antennák használata



9. ábra. Az antennamagasság és a jelszint kapcsolata

10.5. Diversity

A diversity lényege, hogy az adó- és vevőantenna között a normál úton kívül egy alternatív utat is kiépítünk. Mindkét csatornát figyeljük és ahol jobb a jel/zaj (S/N), azt választjuk.

Az alternatív út fajtájától függően beszélünk:

- Frekvencia diversity → frequency hopping
- Tér diversity → legáltalánosabban alkalmazott módszer, a két antenna magassága közötti különbség $\geq 100 \lambda$
- Fázis diversity → ritkábban használt módszer
- Polarizáció diversity → ritkábban használt módszer
- Idő diversity → adatcsomagok újraküldése

10.6. Esőcsillapítás

A levegő víztartalma frekvenciafüggő csillapítást okoz. Mint az 1. ábrán már láttuk, 10 GHz felett alapvetően az esőcsillapítás dominál. Az esőcsillapítás értéke:

- függ az esőintenzitástól
- függ a földrajzi helytől
- a különböző klímakategóriák szerint változik
- valószínűségi változó

A számítás során:

- alap az idő 0,01%-ban fellépő esőintenzitás $R_{0,01}$, ami Magyarországon $R_{0,01}=42 \text{ mm/ó}$
- homogén esőtávolsággal számolunk
- az eső okozta fading értékét kell számolni
- részben empirikus, illetve statisztikai valószínűségi modellek (Markov lánc használatával készített) léteznek

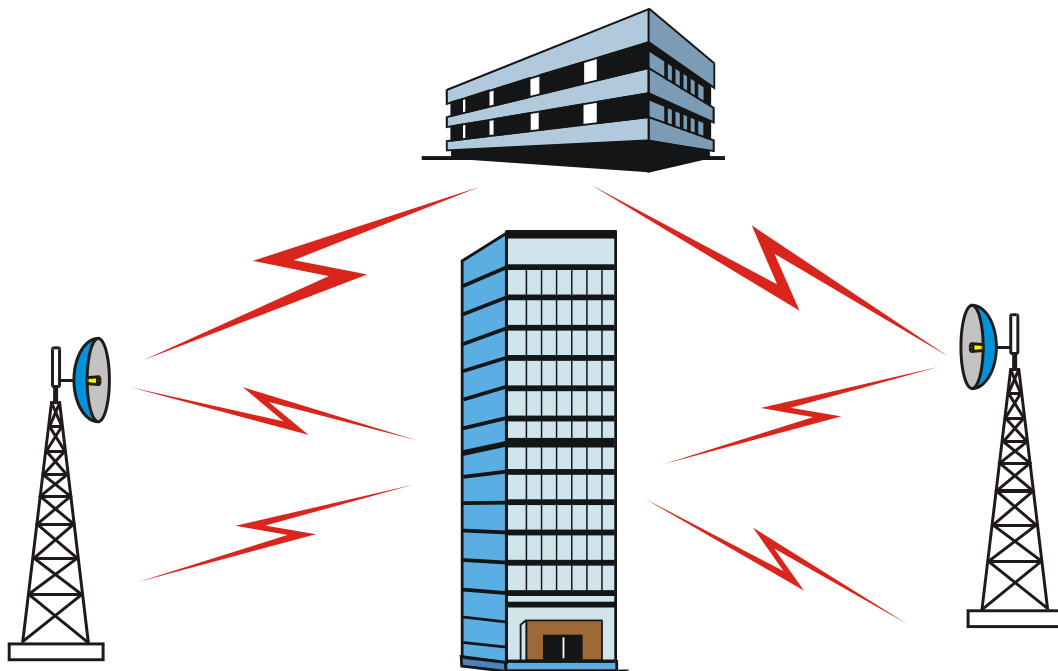
Az ITU-R Rec. ITU-R P.838-2 ajánlása szerinti modellel számolva $\sim 6 \text{ GHz}$ -tól kezd megjelenni az esőcsillapítás

10.7. Line of Sight (LOS), Non Line of Sight (NLOS)terjedés

A P-P mikrohullámú összeköttetéseknel a működés feltétele az optikai átlátás (LOS). Ellenkező esetben (10. ábra), a többutas terjedés következtében ugyanaz a jel, különböző amplitúdóval és fázissal egymás után többször érkezik a vevőbe. Ma már léteznek olyan modern technológiák, amelyek megoldották ezt a problémát (NLOS vétel). Ezeket többnyire pont-multipont rendszereknél használják.

A példa esetén a jel útjában álló akadály miatt nincs optikai átlátás, a jel részben a környezetről reflektálódva, részben, pedig diffrakció útján kerül az ellenállomáshoz.

Természetesen LOS vétel esetén is létezhet többutas terjedés. Ekkor a jel nemcsak a közvetlen úton, hanem egyéb, a közvetlenél hosszabb úton is eljut a vevőantennára. Normál esetben ez nem okoz vételi zavart, mert a közvetlen jel szintje jelentősen meghaladja a többutas (reflektált, diffrakció útján) terjedéssel a vevőantennára kerülő jelek szintjét. A vevőkészülék demodulátora ezt már kezelni tudja. (A vevő azonos csatornás interferencia elnyomása elegendő nagyságú) Ha nincs közvetlen jel, csak reflektált (10. ábra), akkor már más a helyzet. A valóságban persze nemcsak egy közvetett jel létezhet, hanem több. Az egyes jelek között már nincsen olyan nagy szintkülönbség, hogy a demodulátor egyet „ki tudjon választani”, az eredmény az, hogy zavar támad a vételben („szimbolumok közötti” áthallás – Intersymbol Interference - jön létre).



10. ábra. Non Line of Sight vétel

10.8. Ellenőrző kérdések

- 1) Milyen frekvencián válik a levegőben lévő víz csillapítása nagyobbá, mint a száraz levegő csillapítása?
- 2) A szabadtéri csillapítás gyakorlati képletében ($ASZ=32,44+20\log f+20\log d$ [dB]), szereplő konstans (32,44), miből adódik?
- 3) Számolja ki a második Fresnel zóna legnagyobb sugarát egy 13 GHz-en létesített 15 km-es szakasztávolságú összeköttetés esetén.

- 4) Mi a „diffrakció”?
- 5) Mi a különbség a „LOS” és „NLOS” terjedési módok között?
- 6) Mit nevezünk „flat fading”-nek?
- 7) Mi a fading számítás célja? Milyen paraméterre vagyunk kíváncsiak?
- 8) Sorolja fel a fading elleni védekezés lehetőségeit!
- 9) Mi a „diversity” vétel alapelve?
- 10) Van-e a „tér diversity-nek” frekvencia korlátja? A válaszát indokolja!
- 11) Mit jelent az az állítás, hogy Magyarországon az $R_{0,01}=42$ mm/ó?
- 12) Becsülje meg, hogy mekkora kiesést okozhat egy felhőszakadás a mobil (GSM) vételben?

11. Mikrohullámú P-P összeköttetések tervezése

A mikrohullámú P-P összeköttetések tervezése egy összetett feladat, mely sokszor nem végezhető el közvetlen egymás utáni tervezési lépésekkel. Gyakran van szükség a szabadon választható paraméterek módosítása után új tervezési ciklusokra. Természetesen az egyes lépések ettől függően logikai sorrendbe állíthatók.

11.1. Telephelyek (antenna elhelyezés) kiválasztása

Az összeköttetés két végponti telephelyének ismeretében lehet dönteni az antennák elhelyezéséről. Az alapkövetelmény, hogy az összeköttetés megvalósítható legyen, természetesen minimális költségszinten. Legfontosabb szempontok:

- Optikai átlátás biztosítása a két antenna között (tisztan 1. Fresnel zóna)
- Az antennák megfelelő magasságú elhelyezése tornyon, vagy épületen, úgy, hogy az idővel felnövekvő növényzet, később se takarjon.
- Minél kisebb távolság a kültéri és beltéri egységek között.
- Létező saját ingatlan használata, vagy betelepülés más tulajdonú létesítménybe
- Rendelkezésre áll-e megfelelő energiaellátás?
- A telephely és a felszerelendő antennák biztonságos és gyors megközelíthetősége
- Szükség esetén alkalmas hely a kültéri konténer elhelyezésére
- Az antennák, kültéri egységek védelmének lehetősége időjárás, rongálás, eltulajdonítás ellen

11.2. Frekvencia választás

A frekvencia kiválasztása három fő lépésből áll: a frekvenciasáv kiválasztásából, csatorna kiválasztásából, majd a polarizáció megválasztásából

11.2.1. Frekvenciasáv választás

- A mikrohullámú összeköttetés jellege szerint
 - Városi környezetben kis szakasztávolság → magasabb frekvencia (nagyobb a sávtelítettség → nagyobb csillapítás → kisebb interferencia)
 - Rural környezetben nagyobb szakasztávolság → alacsonyabb frekvencia (kisebb sávtelítettség → kisebb interferencia)
- A megvalósítandó szakasztávolság függvényében
- A sáv telítettségét figyelembe véve
- Hatósági szabályozásnak megfelelően

A szabadtéri csillapítás:

$$A_{sz}=32,44+20\log f+20\log d \text{ [dB]}$$

11.2.2. Csatorna választás

- Alapkövetelmény az interferenciamentes vétel
- Hatósági előírás szerint
- Ha van saját blokk, akkor abból célszerű választani

11.2.3. Polarizáció választás:

- Környezettől függően, általában a talajreflexiók okozta fading miatt előnyösebb a vertikális polarizáció
- Az esetek jelentős részében az interferencia viszonyok döntik el, hogy milyen polarizációt lehet használni

Megjegyzés: A polarizáció fogalmáról később lesz szó

11.3. Berendezés, antenna választás

A kiválasztás szempontjai:

- Az összeköttetés kapacitásigénye
- A későbbi bővítés lehetősége
- Ismert, széles körben alkalmazott gyártmány legyen
- Lehetőleg magyar képvisellel rendelkezzen a szállító
- Jó spektrum kihasználás
- A hálózatzelvezési rendszerbe integrálható legyen
- Olyan rendszer, amely rendelkezik nxE1 és IP-s interfésszel is
- Meglévő hálózat bővítésénél illeszkedjen a már üzemelőkhöz
- Optimum keresés az antenna nyereség és a használható antenna méret között
- Hazai ipar preferálása (hasonló paraméterek esetén)

11.4. Antennamagasság meghatározása

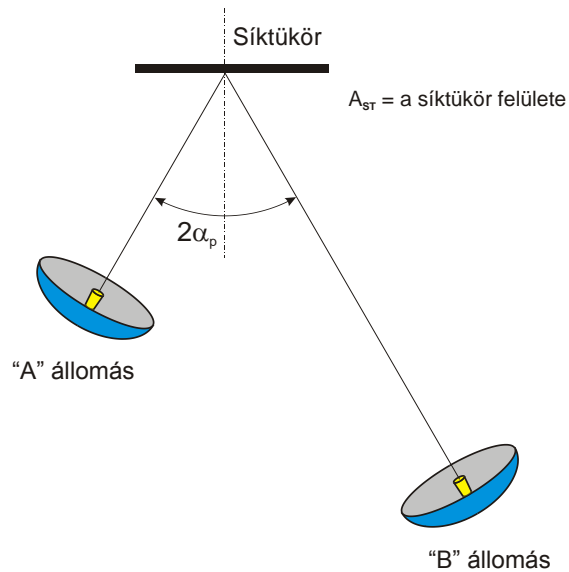
Az antennamagasság meghatározásánál a következőket kell figyelembe venni:

- Az első Fresnel zóna akadálymentességének biztosítása
- Minimális reflektált jel vétele
- Tornyon, vagy épületet lévő szabad hely
- Zavarjelek árnyékolása
- Sugáregészségügyi megfontolások
- Eszközvédelem (rongálás, eltulajdonítás ellen)

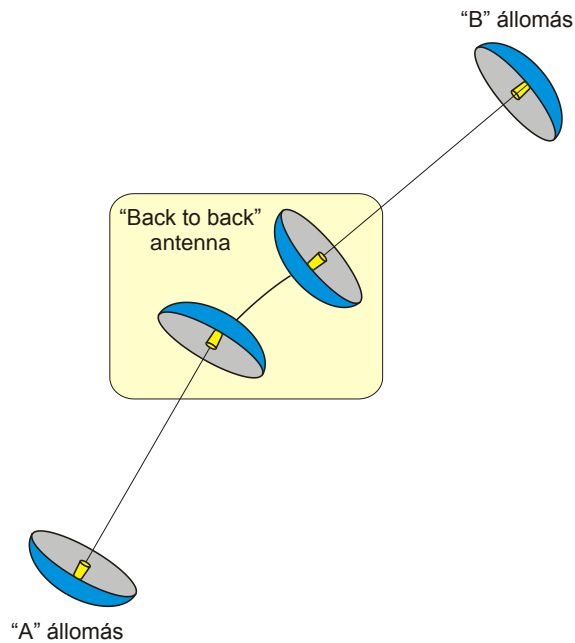
A fentiek teljesítéséhez szükséges az előzetes helyszíni szemle, valamint a két végpont közötti terepszakasz metszetének elkészítése (szükség esetén geodéziai felmérés).

11.5. Speciális antenna elrendezés

A gyakorlatban sokszor előfordul, hogy az összeköttetés szakasztávolsága az adott frekvencián megfelelő, de nincs lehetőség az antennákat úgy elhelyezni, hogy meglegyen az optikai átlátás. Ezen a helyzeten segít a passzív ismétlő állomások használata. A passzív állomások alkalmazásakor a szakasz két részből tevődik össze, amelyek közül az egyik általában nagyon rövid, jellemzően kisebb, mint 100 m. Két megoldás lehetséges: síktükör alkalmazása és az ún. back-to-back, ami két mikrohullámú antenna egymással háttal történő elhelyezését jelenti. A megoldások az alábbi ábrákon láthatók. (11. ábra 12. ábra)



11. ábra. Síktükör használata



12. ábra. Back to back antenna

Kis szögek esetén (a két irány által bezárt szögről van szó) a síktükör használata a célszerű, mivel egy sík reflektáló felület kisebb költséget jelent, mint két antenna. Nagyobb szögeknél a back to back antenna elrendezés az előnyösebb, mivel a síktükörnek csak a terjedés irányára merőleges vetülete jelent hatásos felületet. Megfelelő antenna nyereséghez aránytalanul nagyobb felületű síktükörre volna szükség, ami a költségeken kívül statikai (szélterhelés) és elhelyezési problémákat is felvet.

11.6. Mikrohullámú antennák

Fontosabb típusok:

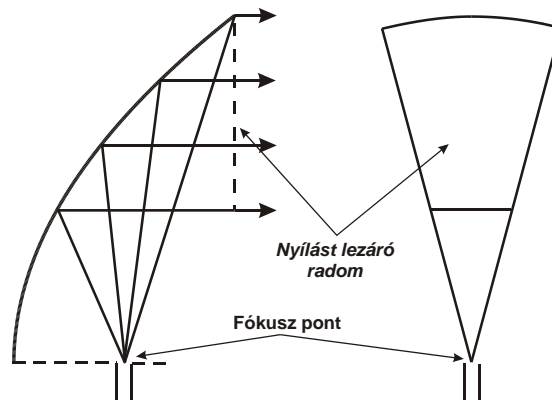
- Parabola
- Tölcsér parabola
- Offset parabola

- Cassegrain antenna
- Tölcsér
- Panel (microstrip) antenna

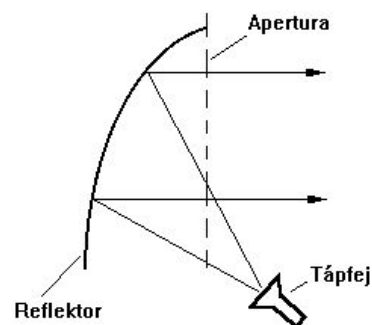
A következő ábrákon (13. ábra, 14. ábra, 15. ábra, 16. ábra, 17. ábra, 18. ábra), különböző mikrohullámú antenna megoldások láthatók.



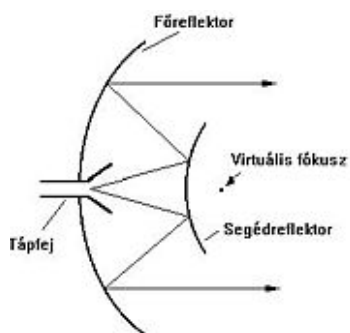
13. ábra. Parabola antenna



14. ábra. Tölcsér parabola antenna



15. ábra. Offset parabola antenna



16. ábra. Cassegrain antenna



17. ábra. Grid antenna

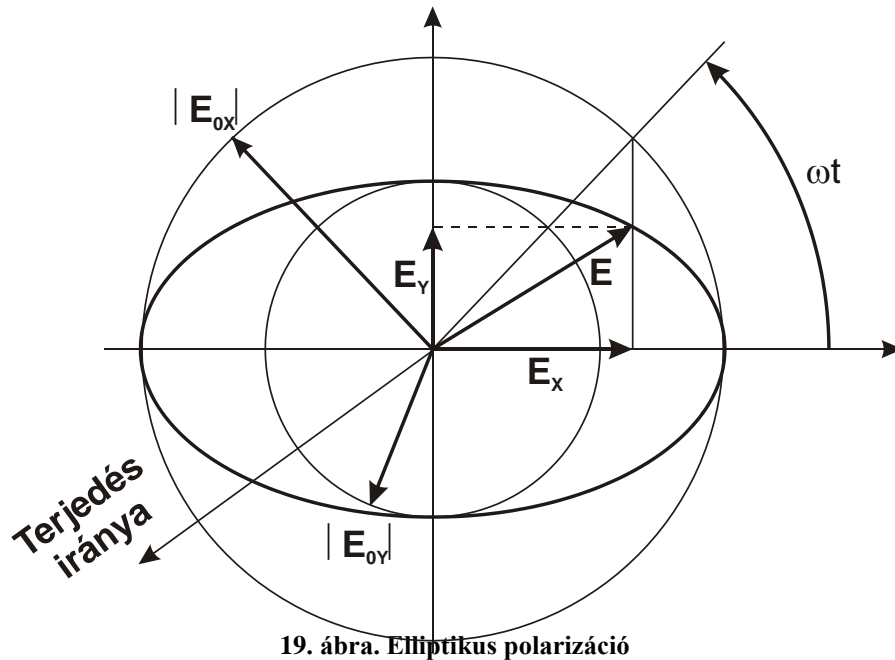


18. ábra. Fresnel gyűrű antenna

11.6.1. Antenna polarizáció

Tétel:

A polarizáció irányának az E vektor irányát tekintjük.



19. ábra. Elliptikus polarizáció

Általános esetben:

$$E_x = i|E_{0x}| \cos \omega t$$

$$E_y = j|E_{0y}| \cos(\omega t + \varphi)$$

Elliptikus polarizációnál (19. ábra):

$$\varphi = \pm 90^\circ$$

$$\vec{E} = i|E_{0x}| \cos \omega t \pm j|E_{0y}| \sin \omega t$$

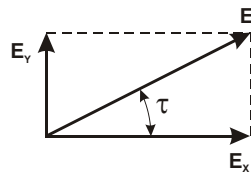
Kör polarizáció esetén:

$$|E_{0x}| = |E_{0y}| = |E_0|$$

$$\varphi = \pm 90^\circ$$

$$\vec{E} = i|E_0| \cos \omega t \pm j|E_0| \sin \omega t$$

Lineáris polarizációnál:



$$\varphi = 0 \text{ vagy } 180^\circ$$

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$\tan \tau = \frac{E_y}{E_x}$$

Ahol φ az E_x és E_y közötti (időbeli) fáziskülönbséget jelöli.

11.6.2. Antenna paraméterek

- $G \rightarrow$ nyereség [dBi]
- $F/B \rightarrow$ Előre – hátra viszony [dB]
- $XPD \rightarrow$ Keresztpolarizációs csillapítás [dB]
- Sugárnyaláb szélesség (-3 dB-es pontok között [fok])
- $D \rightarrow$ antenna átmérő
- $G/T \rightarrow$ antenna jósági tényező
- $f/D \rightarrow$ parabola tükör „mélységére” jellemző tényező
- Polarizáció, lehet egyszeres, vagy duál

11.6.3. Antenna nyereség

$$G = 20 \log \frac{\pi * D * \sqrt{\eta}}{\lambda} \quad [\text{dBi}]$$

Ahol „ η ” az apertúra hatásfok, értéke $0,4 \sim 0,5$.

11.6.4. Szélterhelés hatása

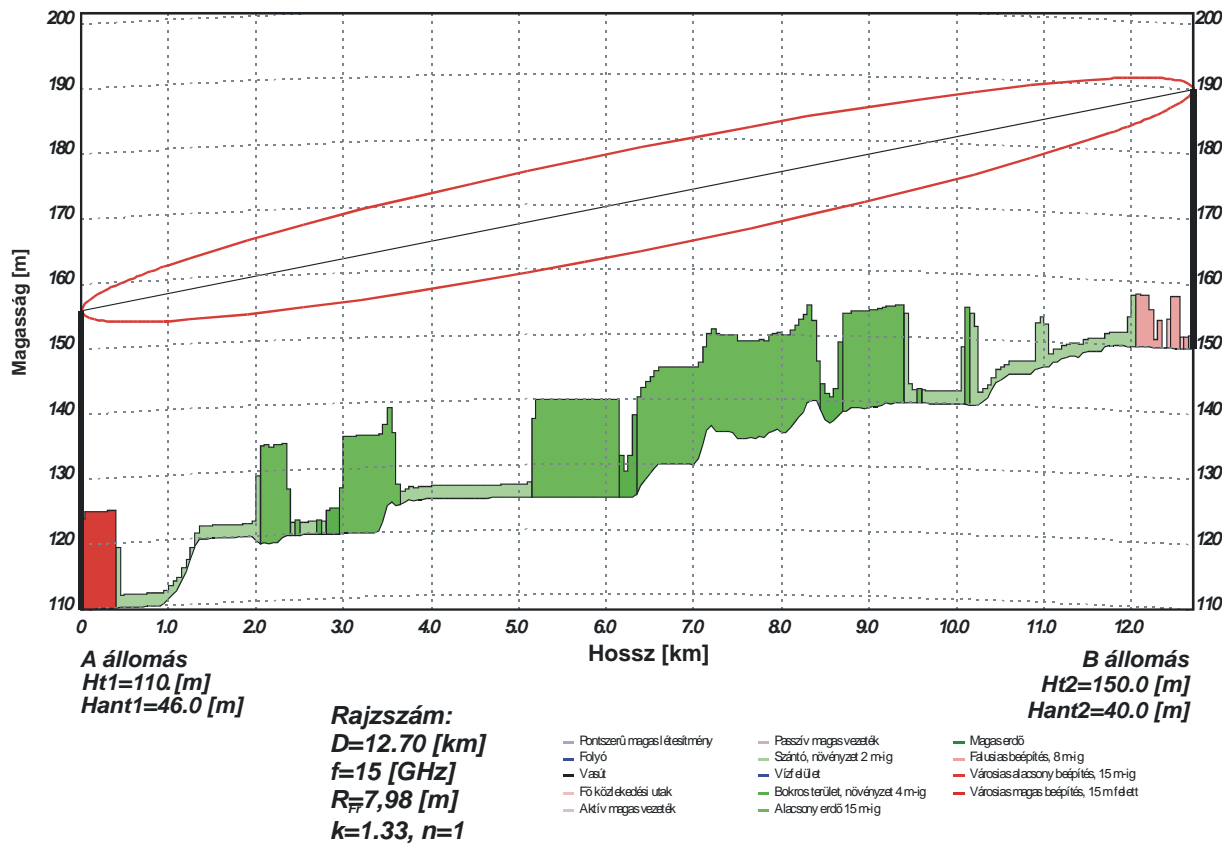
Nagyon fontos szempont, hogy az antennát (és az antenna rögzítést) úgy kell méretezni, hogy a megengedett legnagyobb szél (a szokásos értéke Magyarországon 150 km./ó) esetén is az antenna elfordulása kisebb legyen, mint a nyalábszélesség 1/3-ad része.

11.7. Metszet készítés

A tervezendő összeköttetés optikai átlátásának (LOS) vizsgálatát minden esetben el kell végezni. Ennek az eszköze a metszetkészítés. Alapfeltétel, hogy kellően finom felbontású és naprakész digitális terepmodellel rendelkezünk. A rural területeken ehhez elegendő az 50 x 50 m-es alaprasterű modell. Városi környezetben viszont sok esetben ennél jobb felbontásra van szükség.

A digitális terepmodell egy adott földrajzi koordináta-hoz rendel terepszint magasságot (Magyarországon a Balti tenger feletti magasságot) és a fedettség nagyságát. Manapság már az Internetről le lehet tölteni különböző felbontású digitális terepmodelleket. A közös jellemzőjük ezeknek, hogy vagy nem tartalmazzák a fedettséget, vagy a talajszint magasságát a fedettség nagyságával növelik, de nem adják meg külön a fedettség fajtáját (épület, erdő, stb.). Az esetek jelentős részében kevésbé érdekes, hogy milyen típusú a fedettség, mivel az mindenképpen akadályként jelentkezik, ha az átlátási útvonalba (illetve az 1. Fresnel zónába) esik. A helyzet azért nem ilyen egyszerű. Amennyiben egy interferencia vizsgálatnál azt állapítjuk meg, hogy nincs átlátás a vevőnk és a potenciális zavaró állomás között, mert egy erdő „takar”, (amiről a helyszíni szemlén magunk is meggyőződünk), könnyen bajba kerülhetünk télen, amikor a fák lehullatják a leveleiket és megszűnik az erdő csillapító hatása (pontosabban jelentősen csökken) és megjelenik a nem kívánt interferencia.

Egy általános metszet kialakítását a 20. ábrán tanulmányozhatjuk. A vízszintes tengely a távolságot mutatja [km]-ben, a függőleges tengelyek pedig a magasságot jelentik [m]-ben. Az ábra bal szélén található az egyik állomás, ez a szakasz kezdőpontja, a jobb szélén a másik végpont, a kettő között meghúzható egyenes a szakasz-távolság. A két állomás antennamagassága azonnal leolvasható, de az aktuális érték külön is fel van tüntetve.



20. ábra. Terepmetszet

Az alsó burkoló vonal jelenti a talajfelszínt, aminek tengerszint feletti magasságát leolvashatjuk az ábráról. A fedettség nagysága és fajtája szintén látható. Az átlátszási vonal, ill. az első Fresnel ellipszoid függőleges metszete is fel van tüntetve. Az összeköttetés legfontosabb paraméterei közvetlenül is leolvashatók az ábráról.

11.8. Ellenőrző kérdések

- 1) Egy telephely kiválasztásánál mi az alapkövetelmény?
- 2) Városi környezetben működő mikrohullámú összeköttetésekhez milyen frekvenciasávot célszerű használni és miért?
- 3) A rural környezetben létesítendő összeköttetéseknel mi a helyzet? Indokolja a célszerű frekvenciaválasztást!
- 4) Egy új összeköttetés tervezésénél milyen berendezést választana:
 - a. A legújabb és ezért a legmodernebb technológiát alkalmazó berendezést
 - b. A nagynevű, régóta piacon lévő cég széles körben használt berendezését
 - c. Olyan cég gyártmányát, amelyik cégnek van magyarországi képviselője
 Indokolja a választát!
- 5) Egy ideális antennamagasság meghatározásánál az alább felsorolt különböző szempontokat állítsa fontossági sorrendbe (előre a legfontosabbat, végére a legkevésbé fontosat!):
 - Tornyon, vagy épületet lévő szabad hely
 - Minimális reflektált jel vétele
 - Az első Fresnel zóna akadálymentességét biztosító magasság

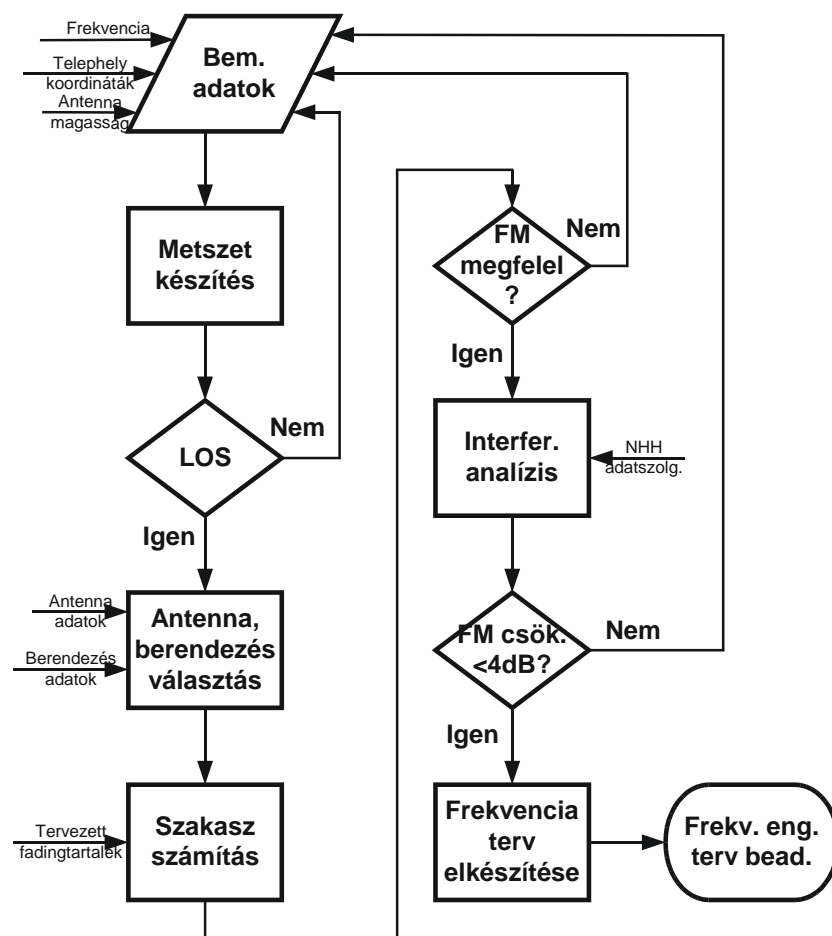
- Optikai átlátás
 - Zavarjelek árnyékolása
- 6) Passzív ismétlő állomásoknál mikor használunk síktüköröt és mikor „back to back” antennát?
Indokolja a választást!
- 7) Mit nevezünk „Cassegrain” antennának?
- 8) Miért használnak „offset” parabola antennát?
- 9) Polarizált antennáknál mi a „ ϕ ” paraméter?
- 10) Mi az előnye a lineáris polarizációnak?
- 11) Számolja ki, hogyan változik egy 1,2 m átmérőjű parabola antenna nyeresége, ha 13 GHz helyett 38 GHz-en használjuk!
- 12) Egy metszeten található három paraméter: „ R_F ”, „ k ” és „ n ”. Mit jelentenek ezek?
- 13) A metszet elkészítése eredményezhet-e olyan döntést, hogy változtatni kéne az összeköttetés frekvenciasávján?

12. Szakasz számítás (Teljesítmény mérleg, Link Budget)

Egy mikrohullámú összeköttetés tervezésének a legösszetettebb része a szakasz számítás. Ezt szokás még „Teljesítmény mérlegnek”, angolul „Link Budget”-nek nevezni.

12.1. Szakasz számítás menete

A tervezés kezdetén bizonyos adatok rendelkezésre állnak, míg másokat a tervező dönthet el. Természetesen nagyon ritka az az eset, amikor az összeköttetés célján és a végpontokon kívül szabadon lehet minden paramétert megválasztani. Minden tervezés általában több iterációs ciklus végeredménye. A tervezés menetének nagyon leegyszerűsített folyamatábráját mutatja a 21. ábra.



21. ábra. Egy mikrohullámú szakasz tervezésének erősen leegyszerűsített folyamatábrája

A tervezés minden esetben a bemenő adatok meghatározásával kezdődik. A két állomás helyszíne általában adott. A következő lépés a metszet elkészítése. Itt derül ki, hogy van-e optikai átlátás a két végpont között, vagy sem. Amennyiben nincs, akkor természetesen változtatni kell a bemenő adatokon. LOS fennállása esetén választhatunk antennát és berendezést. Ezek ismeretében már neki lehet fogni a szakasz számításnak. A számítás eredménye a fadingtartalék számszerűsítése. Az összeköttetés jellegének megfelelő érték esetén következhet az interferencia analízis. Ellenkező esetben a szakasz számítást módosított paraméterekkel meg kell ismételni, mindaddig, amíg megfelelő eredményt nem kapunk.

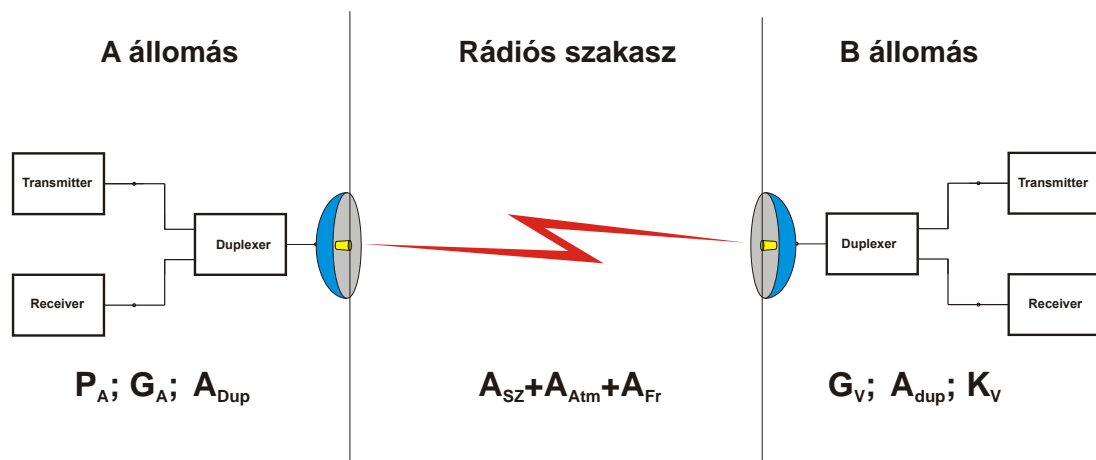
Nagyon fontos, hogy az interferencia analízist két irányban kell elvégezni: egyrészt meg kell vizsgálni, hogy a már üzemelő állomások nem zavarják-e az újonnan létesítendő állomást, másrészt, pedig azt is kell vizsgálni, hogy az új állomás nem okoz-e interferenciás zavart a meglévő állomásoknál.

A meglévő állomások listáját az analízishez szükséges adatokkal együtt a Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság (NMHH) biztosítja. Az interferencia analízis elvégzésével kiderül, hogy nem csökkent-e az előírt mértéknél jobban a fadingtartalék.

Ezek után már csak egy fontos lépés van hátra a tervezési folyamatban: el kell készíteni a „Frekvencia engedélyezési tervet és beadni a Hírközlési Hatósághoz.

12.2. Szakasz számítás elemei

A szakasz számítás elemei a 22. ábrán láthatók.



22. ábra. A szakasz számítás elemei

Az egyes paraméterek jelentése:

P_A = az „A” állomás kimenő teljesítménye

G_A = az adóantenna nyeresége

A_{DUPA} = az adóoldali duplexer csillapítása (amennyiben külön van paraméterezve)

A_{SZ} = szabadtéri csillapítás

A_{Atm} = atmoszférikus gázok csillapítása

A_{Fr} = részben takart Fresnel zóna többletcsillapítása

G_V = vevőantenna nyeresége

A_{DupV} = vevőoldali duplexer csillapítása

K_V = vevő küszöbszint

Általános esetben az adó és vevő paramétereit mellett megadják a duplexer jellemzőit is. A mai modern mikrohullámú rendszereknél viszont már az antenna bemeneti pontjára vonatkoztatva adják meg a kimenő teljesítményt, illetve a zajtényezőt és érzékenységet. Még léteznek olyan régi rendszerek, ahol a duplexer kimenete és az antenna között még egy tápvonalszakasz is található. A 22. ábra tömbvázlatán eltekintettünk ezektől a korszerűtlen megoldásoktól.

A szakaszcsillapítást a következőképpen kapjuk:

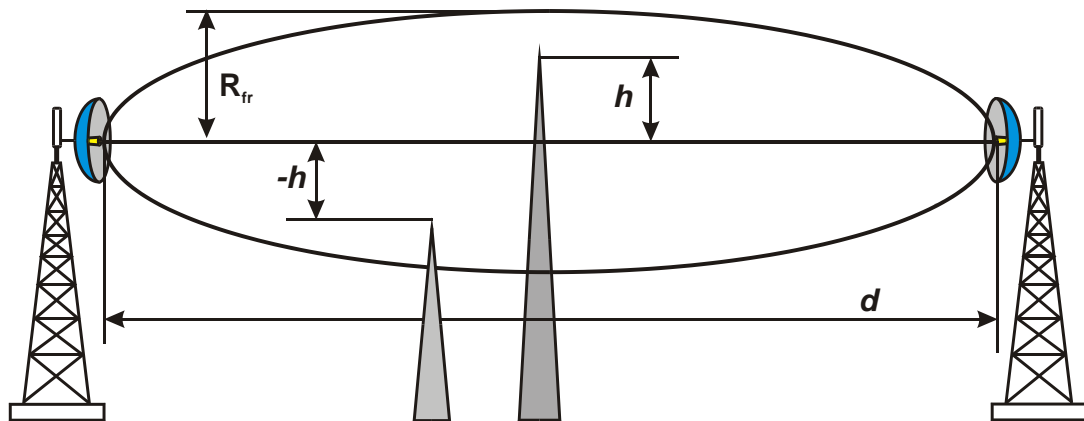
$$A_{\text{szak}} = A_{\text{SZ}} + A_{\text{Atm}} + A_{\text{Fr}} - G_A + A_{\text{DupA}} - G_V + A_{\text{DupV}} \text{ [dB]}$$

A vételi teljesítmény innen már egyszerűen adódik:

$$P_V = P_A - A_{\text{szak}} \text{ [dBm]}$$

12.3. Részben takart Fresnel zóna többletsillapítása

Amennyiben az első Fresnel zóna részben, vagy egészben takart (23. ábra), akkor többletsillapítás lép fel, melyet a szakasz számításnál figyelembe kell venni.



23. ábra. Késél akadályok az első Fresnel zónában

A többletsillapítás mértéke:

$$A_{\text{Fr}} = 20 \log(0,5 - 0,62v), \quad \text{ha } -0,8 < v < 0$$

$$A_{\text{Fr}} = 20 \log(0,5e^{(-0,95v)}) \quad \text{ha } 0 \leq v < 1$$

$$A_{\text{Fr}} = 20 \log \left\{ 0,4 - \left[0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2 \right]^{0,5} \right\} \quad \text{ha } 1 \leq v < 2,4$$

$$A_{\text{Fr}} = 20 \log \left(\frac{0,225}{v} \right) \quad \text{ha } v \geq 2,4$$

Ahol

$$v = \sqrt{2} \frac{h}{R_{\text{Fr1}}} \quad \text{Ha az akadály a Line of Sight egyenes fölé nyúlik}$$

$$v = \sqrt{2} \frac{-h}{R_{\text{Fr1}}} \quad \text{Ha az akadály nem éri el a Line of Sight vonalat}$$

12.4. Esőcsillapítás

10 GHz frekvencia fölött az esőcsillapítás válik döntővé, a terjedést befolyásoló különböző tényezők közül. Ez az érték függ a frekvenciától, a szakasztávolságtól, a homogén esőtávolságtól és a földrajzi elhelyezkedéstől függő esőintenzitástól. A képletekben szereplő egyes paraméterek táblázatosan, vagy diagramon vannak megadva. Az idő 0,01 %-ában fellépő esőcsillapítás mértéke a Rec. ITU-R P.838-3 szerint:

$$A_{00,1} = \gamma_R dr$$

$$\gamma_R = kR^\alpha$$

$$k = 10^{\sum_{j=1}^3 \left\{ a_j \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right) \right] \right\} + m \log f + g_{kk}}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 \left\{ a_i \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right\} + m_\alpha \log f + c_\alpha$$

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \Theta \cos 2\tau]}{2}$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \Theta \cos 2\tau]}{2k}$$

$$r_{ITU-R} = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}}$$

$$r_{NHH} = \frac{1}{1 + 0,045d}$$

$$d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}}$$

Ahol

$A_{0,01} \rightarrow$ az idő 0,01%-ban fellépő esőcsillapítás

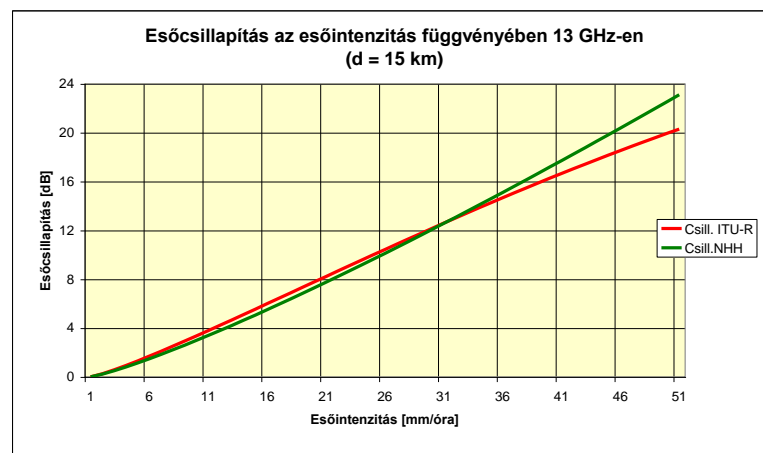
$\gamma_R \rightarrow$ fajlagos esőcsillapítás

$d \rightarrow$ szakasztávolság

$r \rightarrow$ homogén esőtávolság

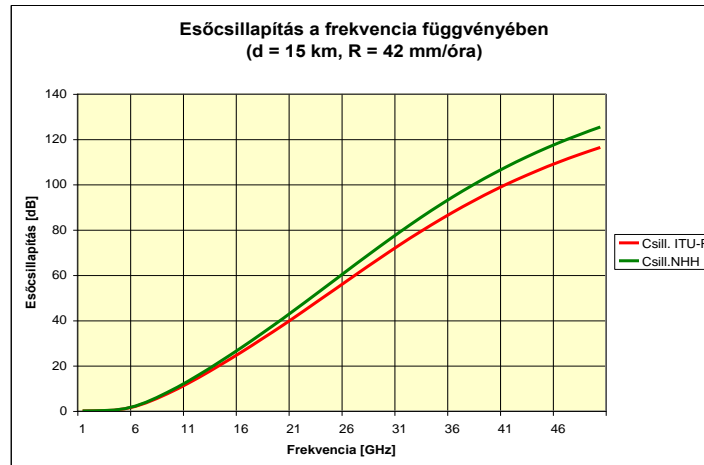
$R_{0,01} \rightarrow$ az idő 0,01%-ban fellépő esőintenzitás

Megjegyezzük, hogy eltérően számolja a magyar hatáság (NMHH) és az ITU a homogén esőtávolságot, ezért adtuk meg kétféleképpen. A különbség nem túl nagy, célszerű mindig a nagyobb csillapítást adó homogén esőtávolsággal számolni, mert legrosszabb esetben kicsit nagyobb lesz a fadingtartalékunk, mint, az szükséges lenne.

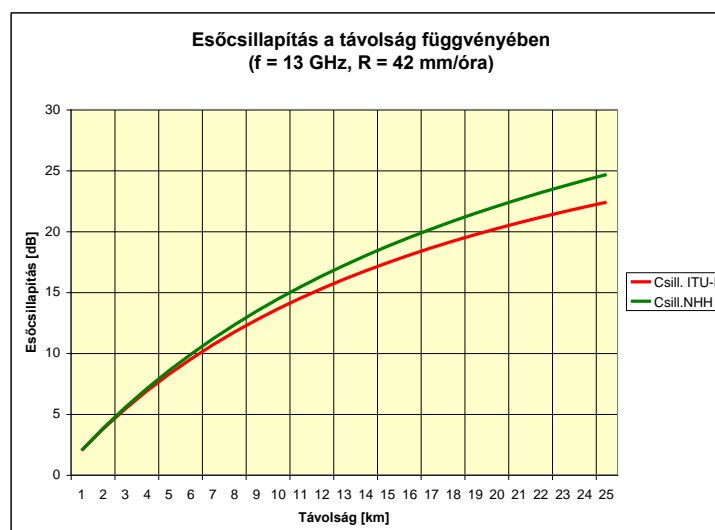


24. ábra. Esőcsillapítás az esőintenzitás függvényében

Mint a 24. ábrán is látható, hogy nincs jelentős különbség a homogén esőtávolság NMHH-s és ITU-s meghatározásából számított esőcsillapítás között. ~ 32 mm/ó alatti esőintenzitásnál az ITU-féle számítás ad nagyobb csillapítás értéket, felette viszont az NMHH szerinti közelítés. Mivel Magyarországon a $R_{0,01} = 42$ mm/ó, ezért az NMHH módszerével számolunk.



25. ábra. Esőcsillapítás a frekvencia függvényében



26. ábra. Esőcsillapítás a távolság függvényében

12.5. Interferencia analízis

Definíció: interferenciának nevezzük a vételi sávba eső, más állomásoktól származó, nemkívánatos zavaró jeleket. Számolás szempontjából két esetet különböztetünk meg:

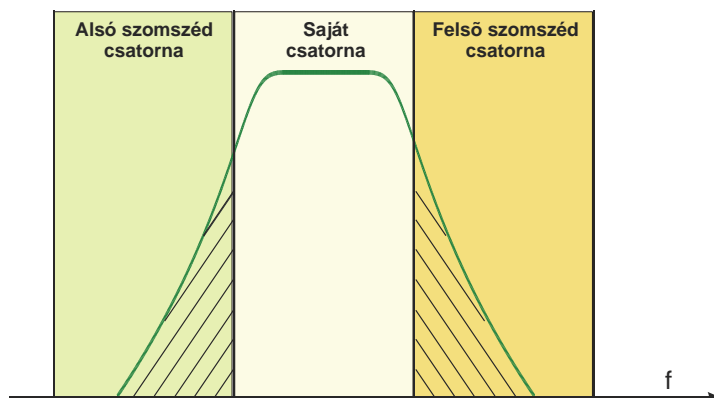
- Az új állomást a környezetében már üzemelő állomások zavarhatják
- A már üzemelő állomásokat zavarhatja az új állomás

Szigorú hatósági előírás létezik a zavarmentes működés garantálása érdekében:

- Egy állomástól származó zavarjel által okozott fadingtartalék csökkenés nem lehet nagyobb, mint 0,4 dB.

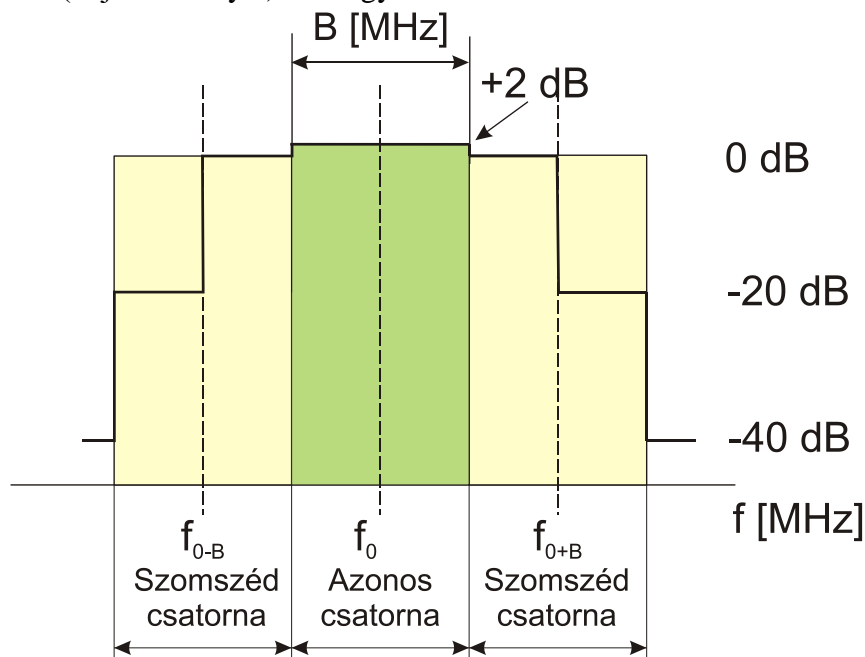
- Az összes zavarjel együttes hatására a fadingtartalék csökkenés maximum 4 dB lehet.

Interferenciát nemcsak a saját csatornában üzemelő más állomás okozhat, hanem a szomszéd csatornában üzemelő is. Ennek oka, hogy a vevők szűrőkarakterisztikája nem ideális téglalap alakú, hanem véges meredekségű. Ugyanez mondható el az adók spektrumáról is. A spektrum burkolója nem ideális téglalap, hanem a saját sávon kívül is sugároz valamennyi teljesítményt. A viszonyokat a 27. ábra szemlélteti. A két vonalkázott terület jelenti az interferencia fellépésének a lehetőségét, ha a szomszéd csatornában működik állomás.



27. ábra. Csatorna elhelyezkedés és szűrő karakterisztika

A pontos számolás érdekében szükséges a szűrő karakterisztika tényleges menete, ill. az adó spektrumának ismerete. Az esetek döntő részében ezek nem állnak a tervező rendelkezésére. Ebben az esetben közelítő megoldásokat kell használni. A 28. ábrán látható a Hírközlési Hatóság ajánlása az interferenciás zavarok számításához. A diagram azt mutatja, hogy az adott frekvenciasávba eső zavarjeleket milyen amplitúdóval (teljesítménnyel) kell figyelembe venni.



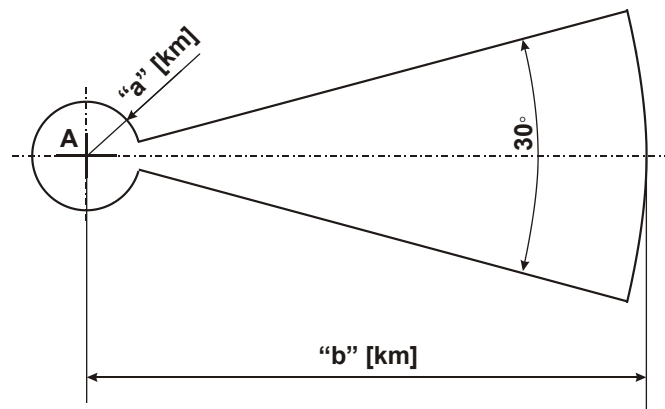
28. ábra. A Hírközlési hatóság ajánlása interferencia számításához

Az interferencia analízis folyamata:

- Interferenciás zavar szempontjából szóba jöhető állomások kiválasztása (térben és frekvenciában)
- Az új állomás és a potenciális zavaróállomások egymáshoz képesti pozícióinak kiszámítása
- Adó és vevő szögvédelmek meghatározása
- Polarizációs védelmek meghatározása
- Minden egyes zavaró adó által keltett interferenciás jel nagyságának kiszámítása
- Ha valamelyik zavarjel az eredeti fadingtartalékot 0,4 dB-nél nagyobb mértékben csökkenti, akkor további részletes analízis következik
- Az összes zavarjel teljesítményét összegezve az eredmény nem lehet 4 dB-nél nagyobb fadingtartalék csökkenés
- A vizsgálatot mindkét irányban, új állomás → üzemelő állomások és üzemelő állomások → új állomás irányban is el kell végezni.
- Szükség esetén nemcsak az első, hanem a második szomszéd csatornával is számolni kell

A hatósági ajánlás szerint azok az állomások tekinthetők potenciálisan zavaró, ill. zavart állomásnak, amelyek az új állomás szempontjából az ún. „kulcslyuk ábra” területére esnek (Lásd a 29. ábrát és a 30. ábrát). A betűkkel jelzett „a”, „b” és „c” paraméterek frekvencia függőek.

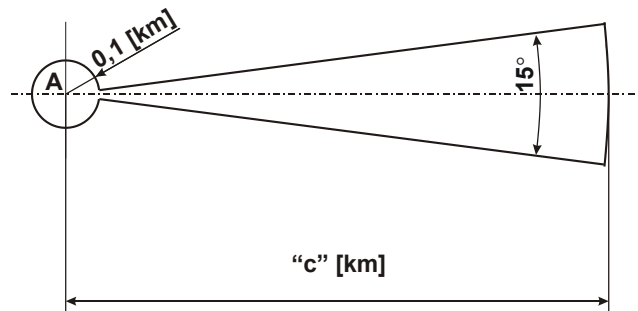
**Kulcslyuk ábra
azonos csatornás
zavaró adókhoz**



29. ábra. Kulcslyuk ábra azonos csatornás zavaró adókhoz

A kiválasztási eljárást egyszerűsíti, ha az állomás köré rajzolható „b” és „c” sugarú körökön belüli állomásokkal számolunk. Természetesen ez csak gépi számolás esetén járható út, mivel ilyenkor jelentősen megnövekszik a figyelembe veendő állomások száma, pl. Budapesten több ezer is lehet.

Kulcslyuk ábra
szomszéd csatornás
zavaró adókhöz



30. ábra. Kulcslyuk ábra szomszéd csatornás zavaró adókhöz

12.6. Fadingtartalék meghatározása

A fadingtartalék meghatározása a következőképpen történik:

- A szakaszcsillapítás (A_{szak}) kiszámítása
- Vételi jelszint meghatározása:

$$P_v = P_A - A_{\text{szak}} \text{ [dBm]}$$

- Bruttó fadingtartalék a vételi szint mínusz küszöbszint:

$$FM_{\text{Br}} = P_v - K \text{ [dB]}$$

Ahol K = vevő küszöbszint [dBm]-ben

- Nettó fadingtartalék: a bruttó fadingtartalék mínusz az interferencia okozta fadingtartalék csökkenés

$$FM_{\text{Net}} = FM_{\text{Br}} - \Sigma FM_{\text{Loss}} \text{ [dB]}$$

Ahol ΣFM_{Loss} = Az összes zavaróadó okozta fadingtartalék csökkenés dB-ben

A szakaszunk akkor működik jól, ha a gyakorlatban fellépő fading nem éri el a fent kiszámolt nettó fadingtartalék értékét. Ennek biztosítása minden körülmények között igen költséges és nem is szükséges. Ehelyett a QoS-ben arra vállalunk garanciát, hogy adott időszak (egy év, egy hónap) alatt a kiesési idő egy előre meghatározott érték alatt marad.

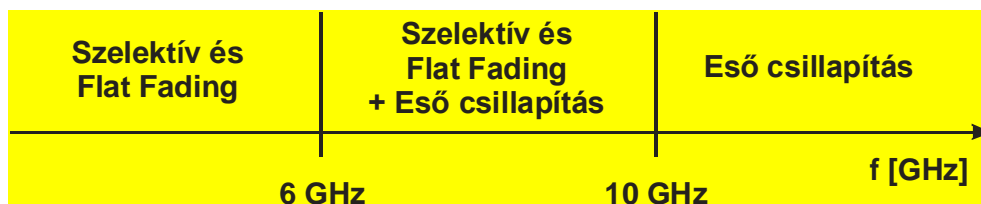
12.7. Fading és a kiesés valószínűsége

A nettó fadingtartalék ismeretében kerülhet sor a kiesés valószínűségének kiszámítására. Akkor következik be kiesés (terjedési okokból), ha a fellépő fading meghaladja az előzőekben meghatározott fadingtartalékot. A számolás két lépésben történik:

- Az idő 0,01%-ban várható fading nagyságának meghatározása
- Annak kiszámolása, hogy a várható fading az idő mekkora %-ban okoz kiesést

A várható fading meghatározásánál elvileg minden fajta fading mechanizmussal számolni kellene. A gyakorlat azt mutatja, hogy 6 GHz alatt a szelektív és a Flat (lapos) fading a meghatározó, mellette az esőcsillapítás elhanyagolható. 10 GHz fe-

lett pedig az esőcsillapítás válik dominánssá. A két frekvencia között érdemes mindkét lehetőséggel számolni (31. ábra).



31. ábra. Domináns fadingfajták a frekvencia függvényében

A várható fading pontos kiszámolása Rec. ITU-R P530-13, vagy más, hasonlóan bonyolult modell alapján meglehetősen számításigényes feladat. A gyakorlatban közelítő megoldások terjedtek el, amelyeket kellő körültekintéssel alkalmazva az átlagos összeköttetéseknel megbízható eredményeket kapunk. A szokásostól eltérő viszonyok fennállása esetén, pl. extrém nagy szakasztávolság, már mindenképpen indokolt elvégezni a részletesebb analízist.

Említésre érdemes két sokat használt, közelítő modell:

„Morita modell”

$$p = 1,4 * 10^{-8} * f * d^{3,5} * 10^{\frac{-FM_{Net}}{10}}$$

Mely a kiesés valószínűségét adja, FM_{Net} fadingtartalék esetén.

f = frekvencia

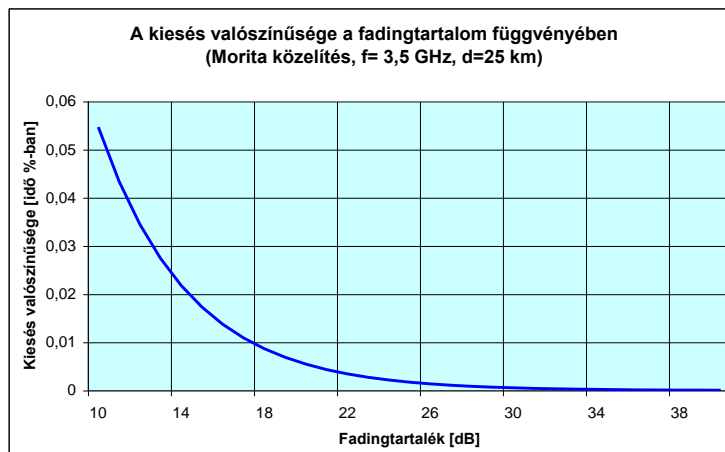
d = szakasztávolság

„Barnett – Vigants modell”

$$p = 1,5 * 10^{-7} * f * d^3 * 10^{\frac{-FM_{Net}}{10}}$$

A két modell között nem jelentős a különbség, Morita esetén a fading valószínűség erősebben függ a szakasztávolságtól.

A fadingtartalék függvényében a kiesés valószínűségének menetét a láthatjuk a 32. ábrán.



32. ábra. A kiesés valószínűsége a fadingtartalék függvényében

A pontosabb modell felettébb bonyolult. Szemléltetésképpen a többutas terjedés hatására bekövetkező kiesés az ITU-R modell alapján történő számítás egy részletét mutatjuk meg.

$$p_w = K d^{3,2} \left(1 + |\varepsilon_p|\right)^{-0,97} * 10^{0,032f - 0,0008h_L - \frac{A}{10}} [\%]$$

$$K = 10^{-4,4 - 0,0027dN_i} (10 + s_a)^{-0,46}$$

$$|\varepsilon_p| = \frac{|h_r - h_e|}{d}$$

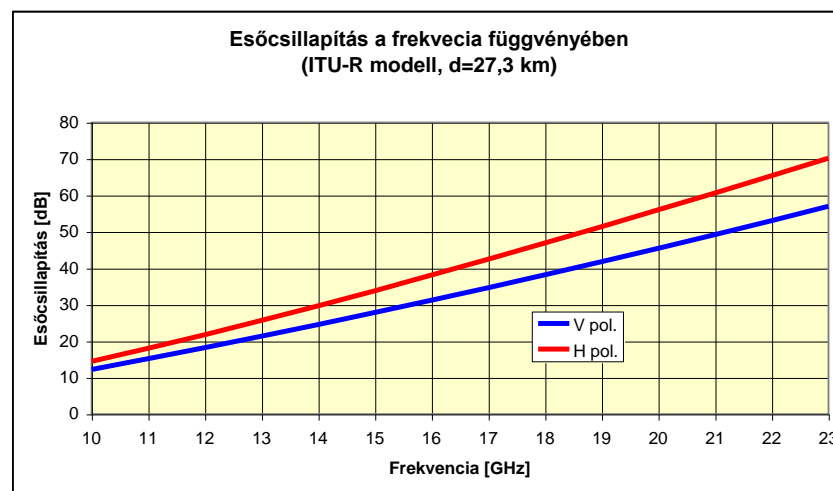
Az alábbi feltételek fennállása esetén:

$$7,5 \text{ km} < d < 185 \text{ km}$$

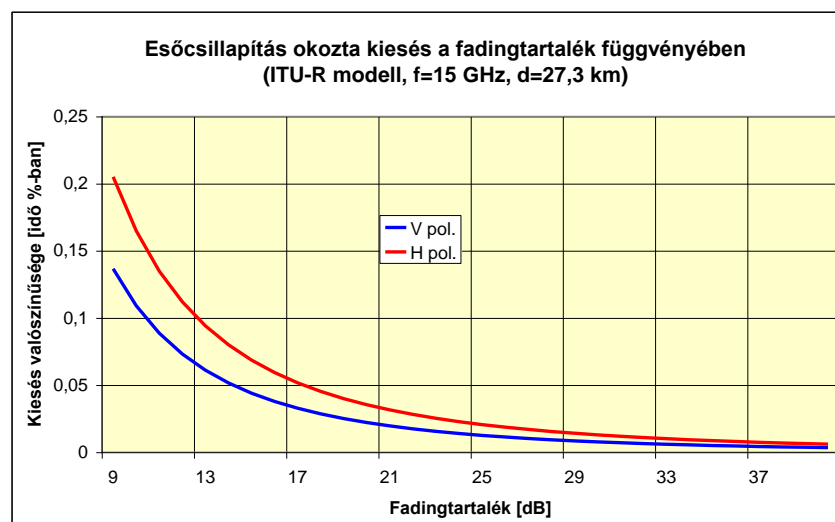
$$450 \text{ MHz} < f < 37 \text{ GHz}$$

$$17 \text{ m} < h_L < 2300 \text{ m}$$

Az ITU-R modell alapján az esőcsillapítás hatását a vételi viszonyokra mutatja a 33. ábra és a 34. ábra.



33. ábra. Esőcsillapítás a frekvencia függvényében



34. ábra. Esőcsillapítás okozta kiesés a fadingtartalék függvényében

Két fontos következtetést lehet levonni:

- A vertikális polarizáció használata előnyösebb
- Minél magasabb a frekvencia, annál rövidebb szakasztávolság valósítható meg

12.8. Megbízhatóság

Egy összeköttetés jóságát alapvetően a megbízhatósága határozza meg. A megbízhatóság számszerűsítésére szolgáló legfontosabb fogalmak:

- Használhatóság (A, rendelkezésre állás, Availability)
- Használhatatlanság (U, Unavailability)
- Hibamentes működés valószínűsége (Reliability)
- MTBF (Mean Time Between Failures: két meghibásodás között eltelt átlag idő)
- MTTR (Mean Time to Recovery: átlagos javítási idő)
- DTR (Down Time Ratio, kiesési időarány)

A rendelkezésre állás:

$$A = \left(1 - \frac{T_1 + T_2 - T_b}{T_e} \right) 100 \text{ [\%]}$$

Ahol

- A: rendelkezésre állás (%-ban)
- T_1 : teljes kiesési idő az egyik irányban [perc]
- T_2 : teljes kiesési idő a másik irányban [perc]
- T_b : kétirányú kiesési idő [perc]
- T_e : a vizsgált időtartam [perc]

Kiesés két okból fordul elő:

- Terjedési okokból
- Berendezés meghibásodásából (ide soroljuk az áramellátási problémákat is)

A berendezés meghibásodására jellemző mennyiség az MTBF

A javítási idő alatt nincs működés → MTTR

Amennyiben az MTBF berendezésekre külön van megadva:

$$\frac{1}{\text{MTBF}_{\text{eredő}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{MTBF}_i}$$

Terjedés miatti kiesési idő egy évben:

$$T_{\text{terj}} = 60 \frac{8760p}{100} \text{ [perc]}$$

Ahol

p = kiesési valószínűség

Berendezés meghibásodásból adódó kiesési idő egy évben:

$$T_{\text{ber}} = 60 \frac{8760 \text{ MTTR}}{\text{MTBF}} \text{ [perc]}$$

Az eredő rendelkezésre állás:

$$A = 100 \left(1 - \frac{T_{\text{terj}} + T_{\text{ber}}}{60 * 8760} \right) \text{ [idő \%]}$$

A berendezés megbízhatóság növelése:

A berendezés megbízhatóság növelésének a leghatásosabb eszköze a tartalékolás. A tartalékolás elve a következő: két berendezést használunk, az egyik az üzemi, a másik a tartalék berendezés. Amennyiben az üzemi berendezés meghibásodik, akkor a tartalék veszi át a szerepét. Ekkor a rendelkezésre állás közel 100 %-os.

Tétel: Független valószínűségek együttes bekövetkezésének a valószínűsége a két valószínűség szorzata. Ez azt jelenti, hogyha pl. a berendezés kiesési időaránya 0,1%, akkor a rendelkezésreállítás éppen 99,9 %. Két egyforma berendezés használatakor a kiesési időarány $\rightarrow 0,1 * 0,1 = 0,01$, az eredő rendelkezésreállítás pedig $A_{\text{eredő}} = 99,99$ [%]. Tartalékolással tehát egy nagyságrendet javítottunk a megbízhatóságon.

A terjedés okozta kiesés csökkentése

Szelektív fading ellen a diversity használata a legmegfelelőbb eszköz

Esőcsillapításnál az EIRP növelése, vagy a frekvencia csökkentése jöhet szóba.

12.9. Sugáregészségügyi vizsgálat

Minden frekvenciatervben igazolni kell, hogy a telepítendő állomás azon körzetében, ahol személyek a normál életvitel során tartózkodhatnak, az ekvivalens síkhullám teljesítménysűrűsége nem éri el a rendeletben rögzített 10 W/m^2 értéket.

Ki kell számolni, hogy az antenna primer sugárzójától milyen távolságban csökken a teljesítménysűrűség a 10 W/m^2 érték alá.

A számítás módja a következő:

$$d_m = \sqrt{\frac{\text{EIRP}}{4 * \pi * s_{\text{meg}}}} \text{ [m]}$$

Ahol:

d_m = ilyen távolságon kívül $s < s_{\text{meg}}$.

$s_{\text{meg}} = 10 \text{ [W/m}^2]$

$\text{EIRP} = P_{\text{Ki}}[\text{dBW}] + G_A[\text{dBi}] \text{ [dBW]}$

Biztosítani kell, hogy senki se kerülhessen d_m -nél közelebb a működő antenna primer sugárzójához!

12.10. Ellenőrző kérdések

- 1) A metszetkészítés milyen alapvető követelmény teljesítését igazolhatja?

- 2) A szakasz számítás elvégzése után melyik fontos paraméter teljesítésére kapunk választ:
 - LOS
 - Fadingtartalék csökkenés
 - Fadingtartalék (FM)
 - Vételi jelszint
- 3) Mit jelentenek az „A_{DupA}” és az „A_{DupV}” paraméterek?
- 4) Hogyan számoljuk ki a vételi teljesítményt?
- 5) Üzembiztosan működhet-e egy olyan összeköttetés, ahol a Fresnel zóna részben takart?
- 6) Elegendő-e a helyszíni optikai átlátás vizsgálat pozitív eredménye (a berendezés adatok és frekvenciasáv ismeretében, fading mentes esetben), hogy pontosan tudjuk számolni a szakaszunkat?
- 7) Hogyan változik az esőcsillapítás a frekvencia növekedésével?
- 8) Mi a különbség az ITU-R és az NHH homogén esőtávolság számolási módszere között?
- 9) Melyik módszert célszerű használni a homogén esőtávolság kiszámítására?
- 10) Mekkora zavarást köteles elviselni egy már üzemelő állomás az újonnan telepített állomástól?
- 11) Miért kell figyelembe venni a szomszéd csatornában működő állomás jelét az interferencia számításnál?
- 12) A vevőantennánkra a szomszéd csatornában működő adóból 12 dBm érkezik. Milyen teljesítményt kell figyelembe venni az interferencia számításnál?
- 13) Mire használható a „kulcslyuk ábra”
- 14) Miben különbözik a bruttó és nettó fadingtartalék?
- 15) Elképzelhető-e olyan helyzet, amikor megegyezik a bruttó és nettó fadingtartalék?
- 16) Mi az összefüggés a várható fading és a kiesés valószínűsége között?
- 17) Milyen frekvencia tartomány felett nem hanyagolható el az esőcsillapítás okozta fading?
- 18) Milyen frekvencia tartományban érdemes számolni a „flat” fadinggel?
- 19) Ugyanolyan vételi viszonyok esetén a vízszintes, vagy a függőleges polarizáció eredményez kisebb kiesést?
- 20) Egy mikrohullámú berendezés eredő MTBF-je 500 000 óra. Az MTTR 6 óra. Az ilyen berendezésekből álló szakasznál mennyi lesz az éves várható kiesés, ha a terjedésből adódó kieséseket most elhanyagoljuk?
- 21) Miért mondjuk, hogy a tartalékolt rendszerek rendelkezésre állása közel 100%?
- 22) Számolja ki, hogy az antennától milyen távolságra csökken az ekvivalens síkhullám teljesítménysűrűsége a megengedett 10 W/m² érték alá.

$$P_{Ki} = 1 \text{ W}$$

$$G = 17 \text{ dBi}$$

$$f = 18 \text{ GHz}$$

13. P-P mikrohullámú összeköttetések kialakítása

13.1. Legfontosabb P-P mikrohullámú rendszerek

A digitális mikrohullámú kommunikációs rendszerek először a sokcsatornás beszéd és fax átvitelére lettek kifejlesztve. Ennek, a ma már csak elvétve használt rendszernek „kvázi szinkron” működése volt. Ezeket nevezték PDH mikróknak. Egy rendszer logikai felépítését a 35. ábrán láthatjuk.

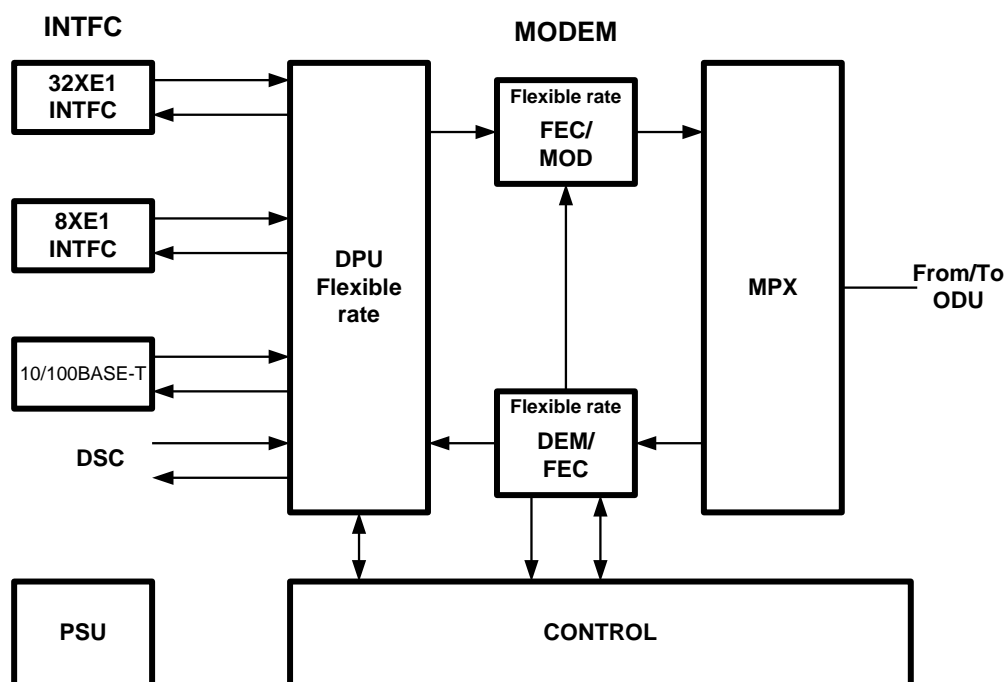
PDH (Pleziokron Digitális Hierarchia)

A PDH-nál fejlettebb rendszer az SDH (36. ábra). Az SDH rendszereknél a szinkron működés következtében csak meghatározott időpillanatokban lehet átviteli kéréssel fordulni a rendszerhez, ezért sokkal kisebb az ütközés valószínűsége. A rendszer kapacitása is nagyobb, 155 Mb/s, (STM-1). Négy darab STM-1 multiplexálásával kapjuk az STM-4-et. Az optikai rendszerekben létezik ennél magasabb hierarchia is, de a mikrohullámú rendszereknél csak STM-4 fordul elő.

Az SDH (Synchronous Digital Hierarchy) rugalmasságát jól szemlélteti az ITU-T G.707 ajánlás ábrája, (Lásd a 36. ábrát), mely a különböző bitsebességű jelekkel történő becsatlakozást mutatja.

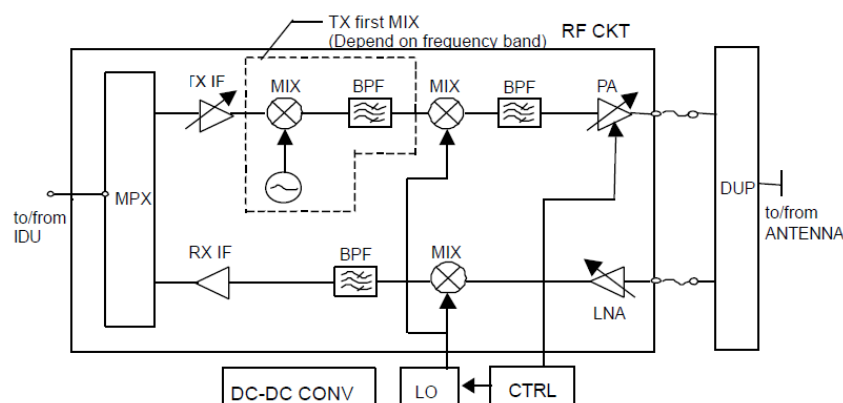
Az IP-s mikrohullámú P-P rendszerek rádiós szempontból alapvetően nem különböznek az előbbieken ismertetett SDH és PDH rendszerektől. A kültéri egység teljesen hasonló felépítésű, mint a hagyományos rendszereké (38. ábra), csak a beltéri egységben lévő interfésznél van eltérés (37. ábra). A kültéri egységtől érkező jel a multiplexerbe jut, ill. a multiplexerből a kimenő jel a front endre kerül. A demodulátor fokozatok is megegyeznek, a különbség a „Digital Processing Unit”-ban és az eltérő interfészekben található. Fontos és hasznos tulajdonsága az ilyen felépítésű berendezéseknek, hogy az igényekhez lehet igazítani a rendszert: a forgalmat tetszőlegesen meg lehet osztani az nxE1 és Ethernet interfészek között.

Basic Block diagram of IDU

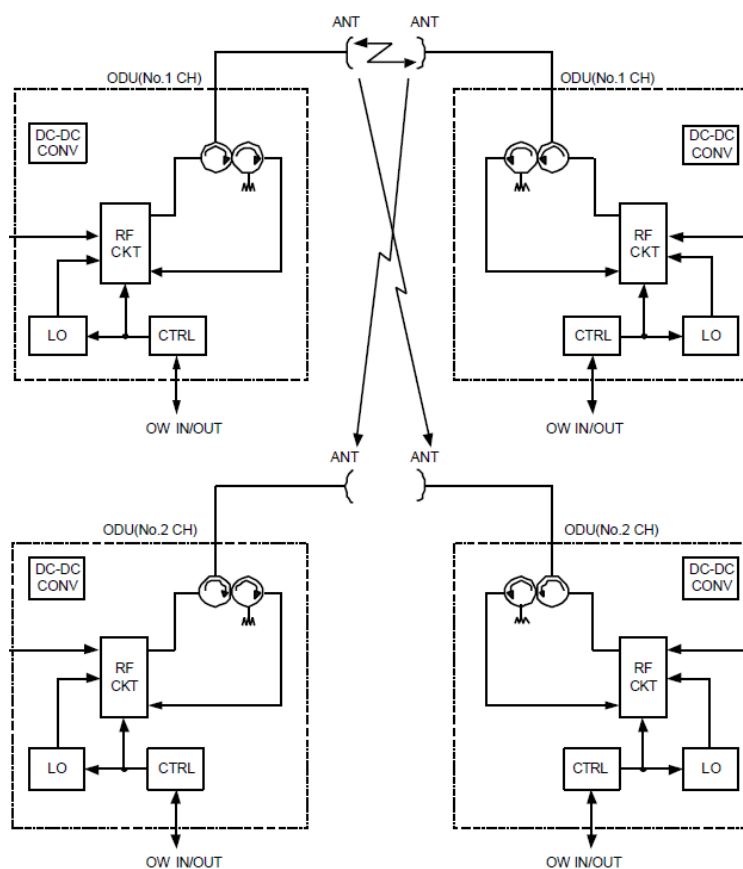


37. ábra. IP-s beltéri egység tömbvázlata

Rádiós szempontból nagyon fontos egy mikrohullámú berendezés kialakítása, különös tekintettel a nagyfrekvenciás részekre. Egy tipikus „front end”-et (kültéri egység, Outdoor Unit, ODU) láthatunk a 38. ábrán.



Minden mikrohullámú berendezés, adó- és vevő ágból tevődik össze. A beltéri egységtől (Indoor Unit, IDU) érkező, vagy oda menő jel a multiplexer egységbe kerül. Ennek egy (középfrekvenciás) bemenete és egy kimenete van. Az adóági jel egy szabályozható középfrekvenciás (IF) erősítőn, többszörös keverésen és szűrőkön keresztül jut a mikrohullámú teljesítményerősítőbe, mely a duplexerhez csatlakozik. Ennek a feladata az adó és vevő ág közösítése, mivel csak egy antenna van, ez egyben adó és vevő antenna is. A duplexerből a vett jel egy kiszajú előerősítőre kerül, ami egy keverőhöz csatlakozik. A keverő kimenetén szűrő és középfrekvenciás erősítő található. Ez utóbbi csatlakozik a multiplexerhez. A front end-hez további egységek csatlakoznak: lokál oszcillátor, vezérlő fokozat és tápegység.



39. ábra. Hot-standby / Space Diversity System tömbvázlata

Egy tartalékolts rendszer felépítését a 39. ábrán vizsgálhatjuk. Alaphelyzetben mindkét állomáson csak az egyik adó működik, de a vevők mindegyike üzemben van. A két vevő által vett jelet összehasonlítják, és a magasabb jel/zaj-t adóét használják továbbá. Adó hiba esetén átkapcsolnak az eddig tartalékban lévő adóra.

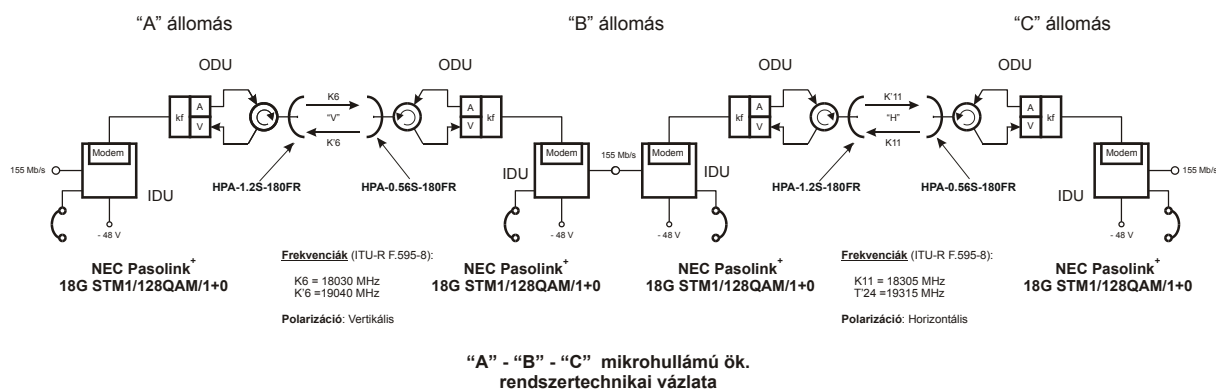
13.2. Frekvencia engedélyezési terv

A Hírközlési Hatósághoz benyújtandó Frekvencia engedélyezési tervnek tartalmazni kell:

- A létesítendő összeköttetés célját, a tervezendő hálózat állomásainak adatait, a feladat leírását, a műszaki megoldások indoklását
- Az összeköttetés nyomvonaltervét, telephelyek adatait
- Antennamagasságokat és sugárzási szögeket
- Az alkalmazott berendezések ismertetését
- Frekvenciatervet
- Rendszertechnikát
- Interferenciás zavarvizsgálatot
- Az összeköttetés minőségének vizsgálatát
- Az összeköttetés megbízhatósági vizsgálatát
- A sugáregészségügyi követelmények betartásának igazolását
- Rendszertechnikai vázlatot
- Nyomvonal vázlatot
- Terepmetszetet
- Vázlatot az interferáló hálózatról
- Elektronikus adatszolgáltatást

A mikrohullámú összeköttetés legfontosabb rendszertechnikai adatait tartalmazza a rendszertechnikai vázlat (40. ábra):

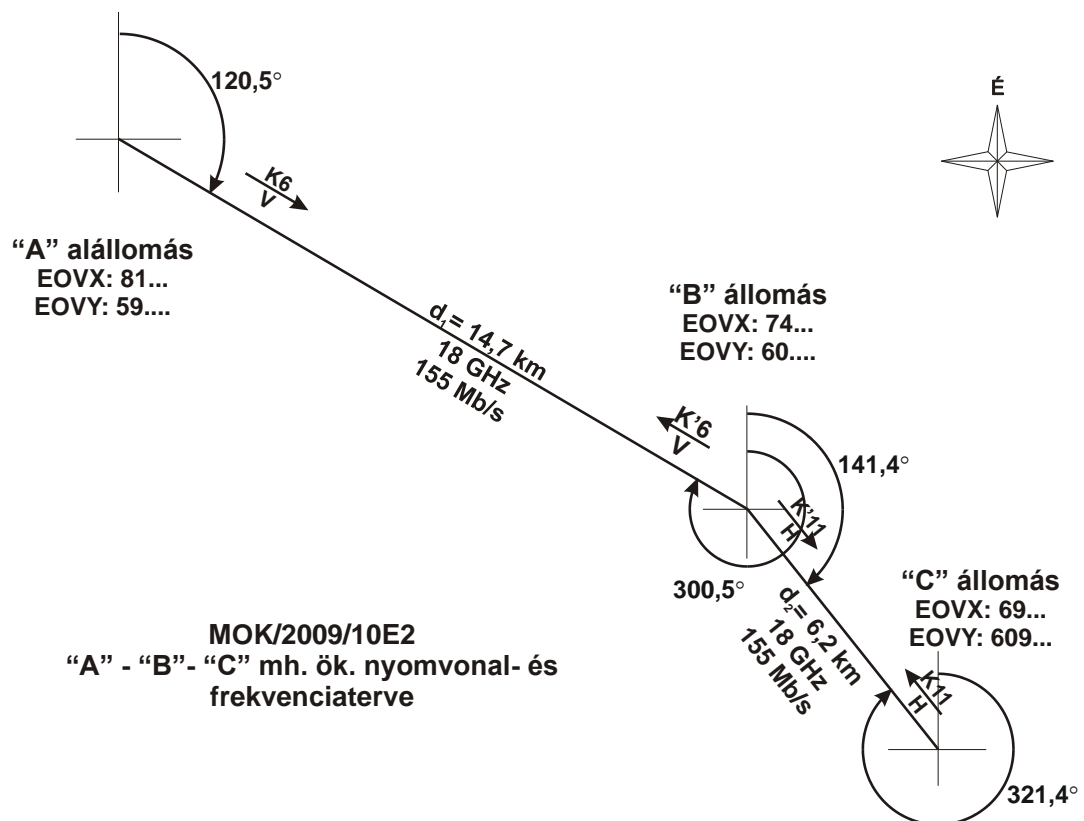
- frekvenciákat (adás – vétel)
- antenna polarizációkat
- berendezés és antenna típusokat
- kapacitásokat.



40. ábra. Egy mikrohullámú összeköttetés rendszertechnikai vázlata

Egy mikrohullámú összeköttetés következő fontos dokumentuma a nyomvonal vázlat és frekvencia terv (41. ábra). Ezen a következő adatoknak kell szerepelni:

- állomások megnevezése
- nyomvonal feltüntetése a tényleges szögekkel
- telephelyek koordinátái
- a fősugárzás irányszögek
- frekvencia sáv
- rendszer kapacitása
- szakasz távolság(ok)
- használt rádió csatornák
- az egyes állomásokhoz tartozó fekvések
- északi irány



41. ábra. Nyomvonal vázlat és frekvencia terv

13.3. Ellenőrző kérdések

- 1) Mi az alapvető különbség az SDH és a PDH rendszerek között?
- 2) Milyen duplexer megoldások léteznek? Melyik a leggyakrabban használt módszer és miért?
- 3) A „duplexer” és „diplexer” kifejezések ugyanazt a fogalmat takarják, vagy nem? Indokolja!
- 4) Milyen fontos adatokat kell tartalmaznia egy frekvencia és nyomvonal vázlatnak?

14. A technológia korlátai, a jövő lehetséges útjai

Milyen szerep vár a P-P mikró összeköttetésekre?

- A nagysebességű SDH mikrohullámú összeköttetések jelentősége erősen csökken Magyarországon
- A világ más, kevésbé fejlett, ill. gyéren lakott részein továbbra is fontos eleme a távközlésnek
- A nagysebességű összeköttetés fogalma is megváltozott. A legújabb negyedik generációs mobil rendszer, az LTE, vagy a WiMAX (802.16m), már STM1-et meghaladó sebességre képesek
- A P-P mikróknak, ezen belül is az IP alapú rendszereknek, alapvetően az elérési hálózatokban van és a továbbiakban is lesz komoly szerepe
- A mobil rendszerek teljesen átveszik a személyek és a nagy szolgáltató hálózatok közötti „interfész” szerepét
- A műholdas távközlés továbbra is fő felhasználója lesz a mikrohullámú, P-P és P-MP rendszereknek (műsor elosztás, DBS, stb.)
- A közlekedésben a navigációs rendszerek mellett a fedélzeti lokátorok használata válik mindennapossá

Vezeték nélküli hozzáférési rend- szerek

15. Vezeték nélküli hozzáférési rendszerek (WAS) felosztása

15.1. P-P rendszerek

A vezeték nélküli hozzáférési rendszerek, angol szóval „Wireless Access Systems” (WAS), egyik nagy csoportját a bérelt vonali alkalmazások (MLLN) teszik ki. Alapvetően nem különböznek az előzőekben megismert P-P rendszerektől.

Legfontosabb jellemzőik:

- Csak fix, vagy „nomadikus” telepítésű állomásokat használnak
- A kapacitás nem haladja meg az STM1 (155 Mb/s) értéket. Általában $n \times 2$ Mb/s sebességűek
- Rövidebb szakasztávolság (≤ 25 km)
- A szakasztávolságtól függően magasabb frekvenciasávok használhatók: 13-; 15-; 23-; 26-; 31-; 38-; 49-; 52-; 56- és 58 GHz-es sávok.
- Csak kis részük tartalékolt (a költségek csökkentés miatt)
- Alacsonyabb minőségi osztályba sorolhatók

15.2. P-MP rendszerek

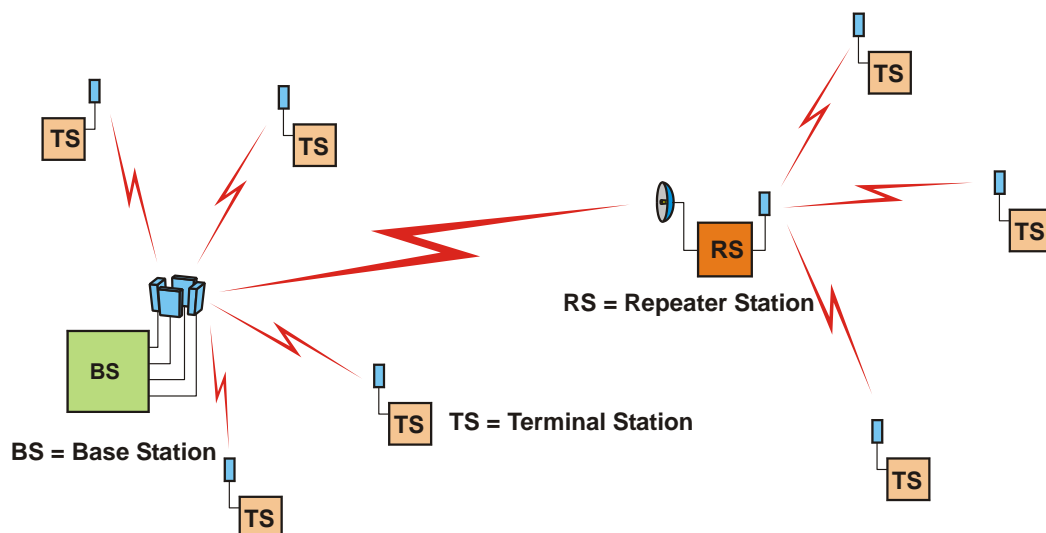
A P-MP (pont – multipont, másképpen pont – többpont) rendszerek többféle topológiát használnak:

P-MP → Csillagpontos kialakítás: az egyes végpontok csak a központi állomáson keresztül kommunikálnak egymással

Mesh → A hálózat egyes állomásai közvetlenül is kapcsolódnak egymáshoz

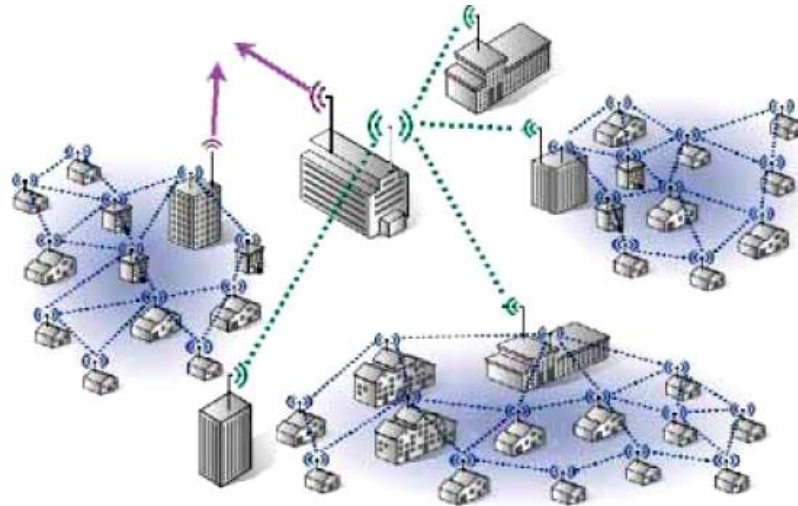
Backhaul → A felhordóhálózati célra történő alkalmazás. Gyakorlati jelentősége az un. „self back-hauling”-nak van, amikor a kapacitás felét backhaul, másik felét P-MP célra használjuk.

Egy csillagpontos P-MP rendszer általános elvi kialakítása látható a 42. ábrán. A BS bázisállomás (BS) tartja a kapcsolatot a terminálokkal (TS) és az ismétlő állomással (RS). Az ismétlő állomás a bázisállomás felé, mint terminál látszik, de a saját termináljai számára bázisállomásként funkcionál.



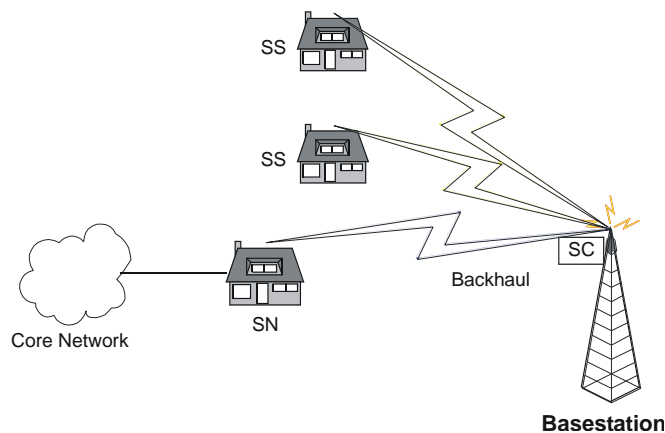
42. ábra. Csillagpontos P-MP rendszer topológiája

Mesh topológia elrendezése látható a 43. ábrán. Ennek a kialakításnak a lényege, hogy az egyes terminálok nemcsak a bázisállomással, hanem egymással is kommunikálnak. Lehet, pl. egyes terminálokból külön csoportokat képezni. Ennek a struktúrának az előnye, hogy adott esetben olyan területeken is képesek működni, ahol eredetileg nem volt lefedettség. Tipikus példa egy katasztrófa helyzet ember nem lakta területen. A készenléti szolgálatok használják az ilyen típusú P-MP rendszereket.



43. ábra. Mesh elrendezésű P-MP rendszer vázlat

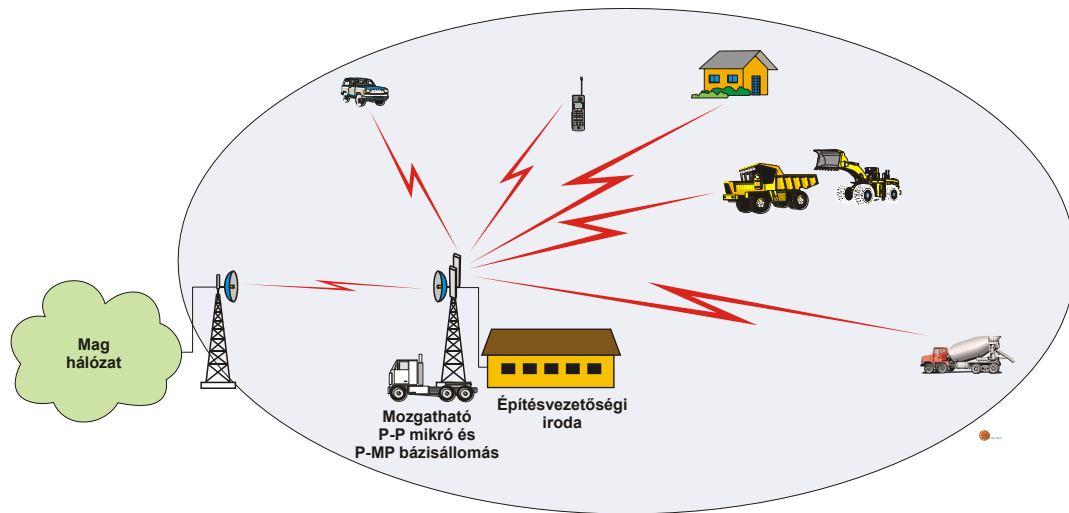
Self backhauling olyan P-MP rendszer (lásd a 44. ábrát) ahol a bázisállomás kapacitásának a fele a terminálokat szolgálja ki, a másik fele pedig „felhordó hálózatként” szerepel.



44. ábra. Self backhauling

A P-MP rendszereket az állomások fix, vagy változó telepítési helyszínei szerint három csoportba sorolhatjuk:

- Fix telepítésű
- „Nomadikus” (45. ábra)
- Mobil rendszerek



45. ábra. Példa nomadikus P-MP alkalmazásra

15.3. Ellenőrző kérdések

- 1) Mi a különbség egy mikrohullámú P-P összeköttetés és az elérési hálózatoknál használt P-P rendszerek között?
- 2) Milyen célra használják az elérési hálózatoknál a P-P rendszereket?
- 3) Mi a lényege a csillagpontos topológiának?
- 4) Milyen előnye van a „mash” hálózat kialakításnak?
- 5) Mi az a „backhaul”?
- 6) Egy P-MP rendszernél mikor lehet hasznos a „backhaul”?
- 7) Mit nevezünk „nomadikus” felhasználásnak?

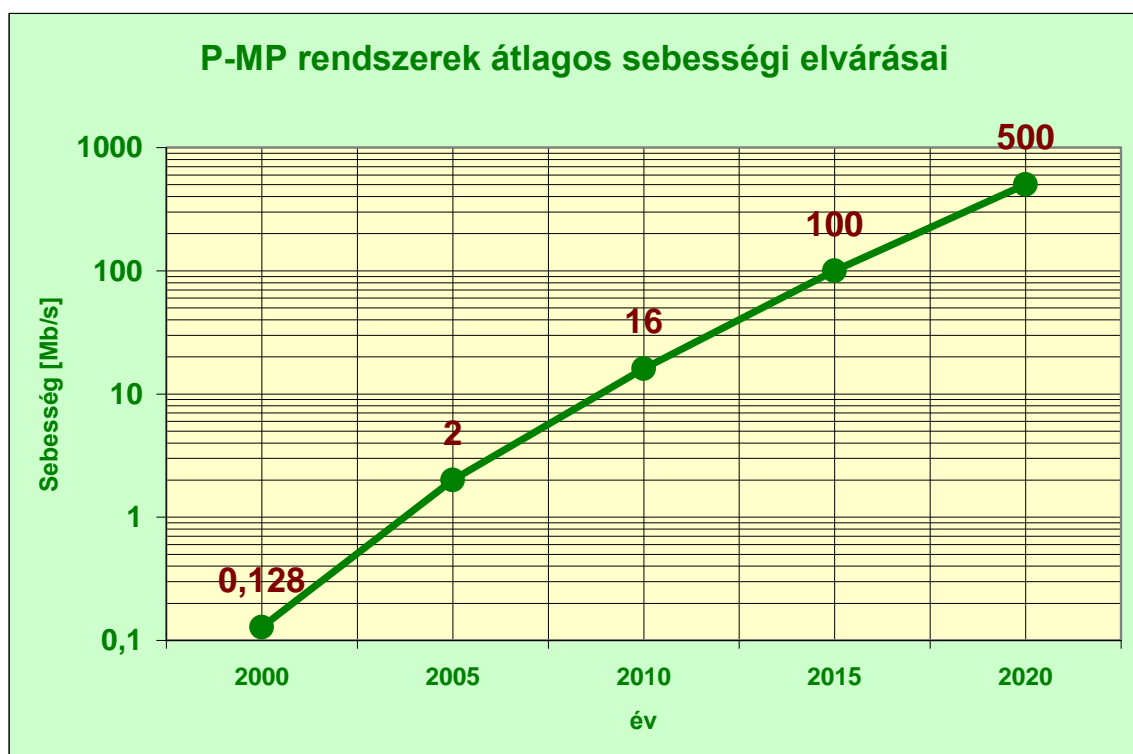
16. Követelmények a P-MP rendszerekkel szemben

A pont – multipont rendszerekkel szemben a követelmények részben hasonlóak, mint a P-P rendszerekénél, részben viszont a speciális alkalmazások miatt azoktól eltérő.

16.1. Sebesség

A kommunikációs sebességigények folyamatosan nőnek, az egységnyi információ továbbításának költségei, pedig még gyorsabban csökkennek. Ez utóbbi teszi lehetővé az igények kielégítését.

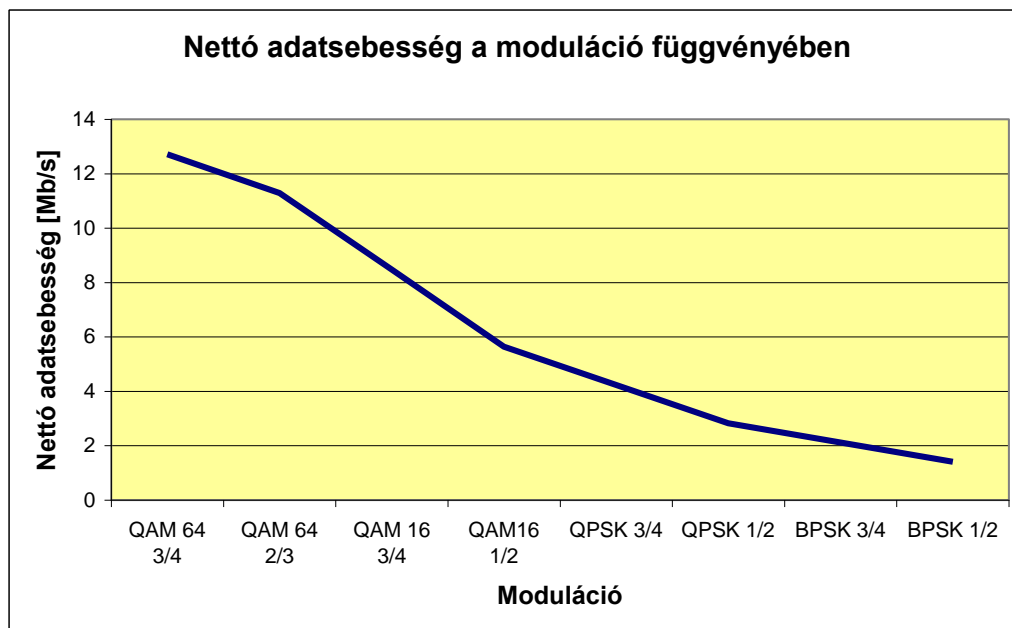
A P-MP rendszerekkel szembeni sebességigények változását láthatjuk a 46. ábrán. 2000-ben még a GSM-en kívül csak fix telepítésű P-MP rendszerekről beszélhettünk, 2005-től viszont már egyre inkább a mobil rendszerek vették át a főszerepet.



46. ábra. A P-MP rendszerekkel szembeni sebességigények változása

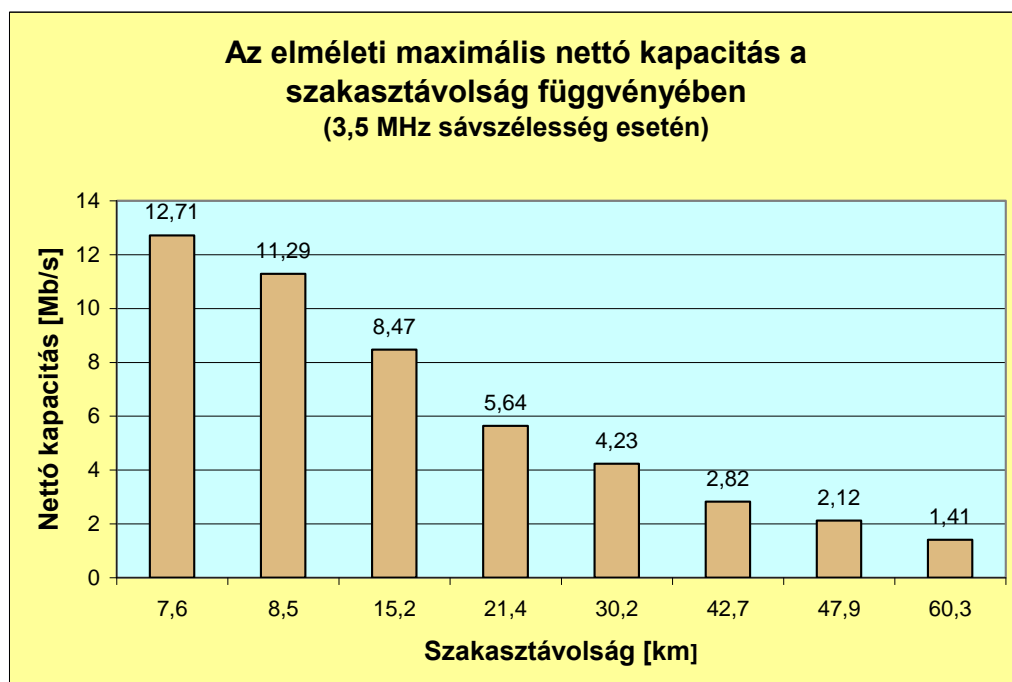
A feladat tehát a növekvő sebesség igények egyre alacsonyabb költség szinten történő kielégítése. A sebesség növelésének erős korlátot szab a rendelkezésre álló véges sávszélesség. A megoldás: olyan modulációt kell választani, amelynél magas az egységnyi sávszélességre eső továbbítható információ mennyisége [bit/s/Hz]. Minél több „állapotú” a moduláció, annál nagyobb az egységnyi sávszélességen átvihető információ mennyisége. A 47. ábrán egy példát láthatunk egy P-MP rendszer esetén, hogyan függ a nettó adatsebesség a moduláció fajtájától, ill. a hibajavító kódolástól. A vevőkészülék demodulátorának van egy küszöbszintje, ami felett már meg tudja különböztetni a „0”-t az „1”-től. Azoknál a modulációknál, ahol több állapot van, pl. 16QAM, az egyes állapotok között nemcsak fázis, de amplitúdó eltérés is van. Ez azt jelenti, hogy nem két amplitúdó, hanem több között kell különbséget tenni. A legkisebb, még hibátlan döntést eredményező, amplitúdó különbség a demodulátor fizikai kialakításától függő, fix érték. Ha nem két szint létezik, hanem

pl. három, akkor az „1”-es és „2”-es amplitúdó között és a „2”-es és „3”-as amplitúdó között is különbséget kell tenni.



47. ábra. Egy P-MP rendszer nettó adatsebessége a moduláció függvényében

A több állapotú modulációval tehát növelhetjük az adott sávszélességen átvihető információ mennyiségét, cserébe viszont a demodulátorunk érzékenysége csökken, azaz a hatótávolság is csökkenni fog. (48. ábra) Ez a példa egy IEEE 802.16d szabványnak megfelelő WiMAX rendszerre jellemző adatsebességeket és a hozzá tartozó szakasztávolságokat mutatja..



48. ábra. A nettó kapacitás és a szakasztávolság kapcsolata egy P-MP rendszernél

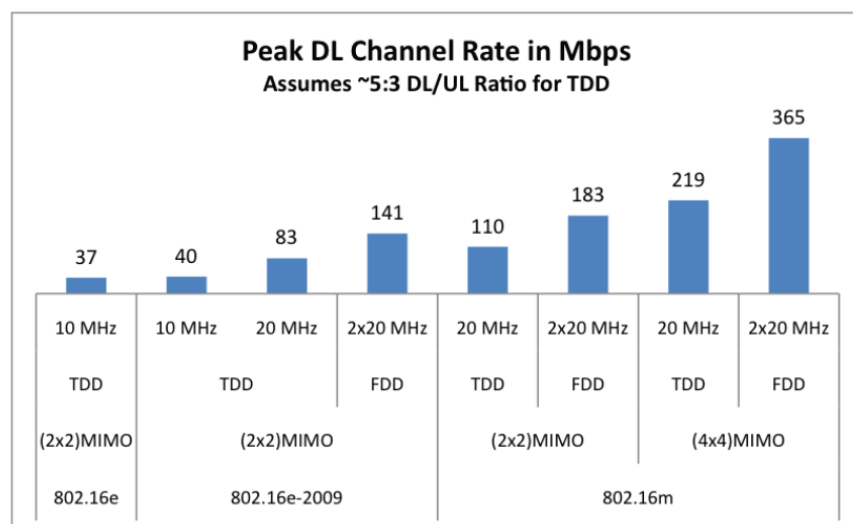
A digitális rendszerek működésére jellemző, hogy a küszöbszint felett, a bejövő jel nagyságától függetlenül, van vétel, míg a küszöbszint alatt azonnal megszűnik. Ez utóbbi nagyon sok esetben nem engedhető meg. Általában sokkal kisebb problémát okoz, ha a sebesség lecsökken, de az összeköttetés nem szakad meg. Erre jelent megoldást a „dinamikus moduláció váltás”. A rendszer figyeli a bejövő jelet, és ha egy adott érték alá esik, de még magasabb a küszöbszintnél, akkor modulációt vált.

Minden digitális rendszerben szükség van valamilyen hibajavító mechanizmusra, hogy az átvitel során elkerülhetetlen bit tévesztések hatását ki lehessen küszöbölni. A gyakorlatban a „Forward Error Correction” vált általánossá. A „FEC” egy hibajavító kódolás, amellyel gyakorlatilag redundanciát viszünk a jelsorozatba. Az átvitel során mindenképpen fellép valamilyen hiba (a BER nem nulla), a redundancia segít visszaállítani az eredeti jelsorozatot.

A sebesség növelhető a redundancia csökkentésével is, ha a kódarányt¹ megváltoztatjuk (1/2; 2/3; 3/4 ; 5/6; 7/8; stb.). Természetesen ennek ára van: a kisebb redundancia nagyobb vételi szintet von maga után, azaz csökken az elérhető szakasz-távolság (ugyanolyan adatsebességet és rendelkezésreállást feltételezve).

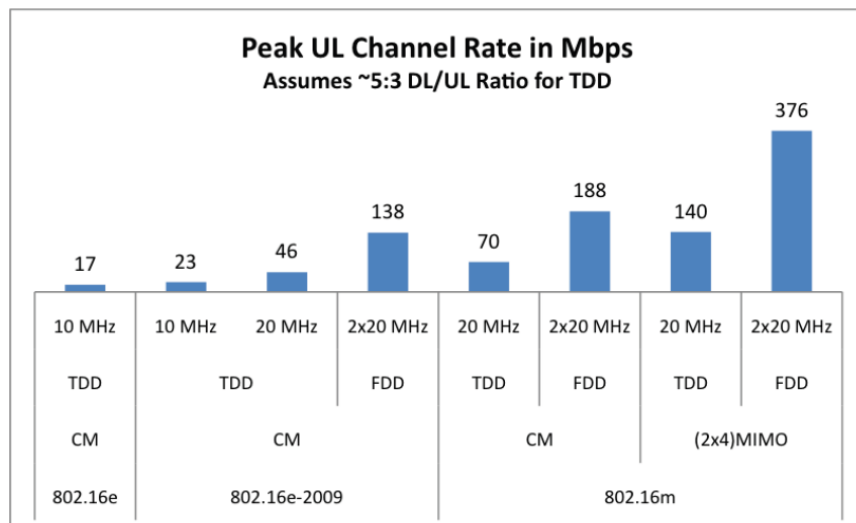
Az átvendő adatmennyiség növelésére további lehetőség a rádiócsatorna jobb kihasználásával adódik. Általában nem szimmetrikus a kétirányú adatforgalom. TDD duplexálás esetén a kétirányú adatforgalomnak megfelelően lehet az időréseket beállítani. A modern rendszerekben ezt adaptívan, a forgalomnak megfelelően lehet változtatni.

A mai korszerű P-MP rendszerekben még egy újabb lehetőség kínálkozik az átvendő adatmennyiség növelésére: ez a „Smart” („intelligens”) antennarendszerek használata. A 49. ábrán és a 50. ábrán látható példa a WiMAX technológia lehetőségeit mutatja, a DL/UL arány = 5/3, és kétféle duplexálás (TDD, FDD) esetén. FDD duplexálásnál a sáv szélesség ebben a példában kétszer akkora, mint TDD esetén.



49. ábra. Az átvendő adatmennyiség változása különböző "Smart antenna" rendszerek esetén DL irányban

¹ A kódarány azt mutatja, hogy hány adat bitre jut egy redundáns bit. Pl. 3/4 esetén 3 adat bitre egy redundáns bit esik.



50. ábra. Az átvitendő adatmennyiség változása különböző "Smart antenna" rendszerek esetén UL irányban

16.2. Területi lefedettség – nagy előfizetői sűrűség

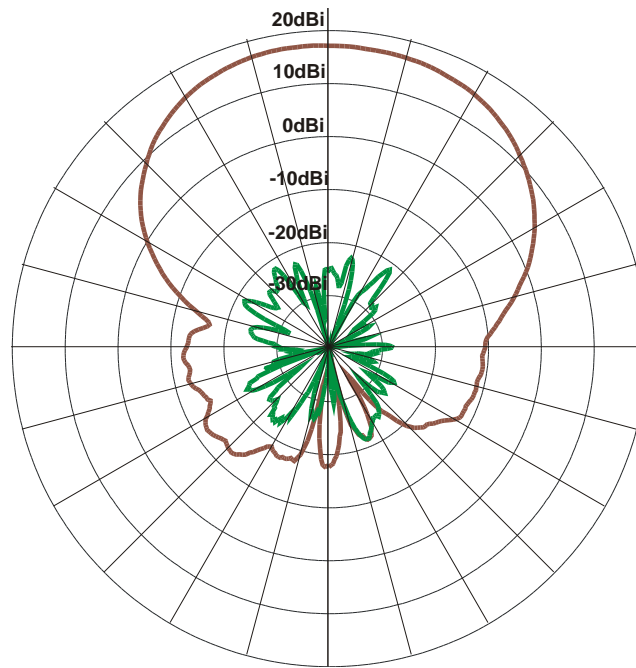
Az előfizetői sűrűség erősen függ a település jellegétől. A nagyvárosokban nagyon magas, míg a rural területeken igen alacsony. Az ellátás biztosítása is ennek megfelelő kell legyen. A nagyvárosokban kis területen kell nagyon sok előfizetőt kiszolgálni, ezzel szemben a rural területeken kevés előfizető található és azok is viszonylag távol vannak egymástól.

A helyzetet nehezíti, hogy a P-MP rendszerek részére fenntartott frekvenciasáv véges, melyet több szolgáltató között kell megosztani. Nincs más megoldás, mint-hogy ugyanazt a frekvenciát (rádió csatornát) többször kell használni, hogy az összes előfizetőt ki lehessen szolgálni.

Ezt csak jól átgondolt struktúrában lehet megvalósítani! A megoldás: cellás rendszerek alkalmazása. Az egyes cellák egymáshoz kapcsolódnak, együtt fedik le az ellátandó területet. Attól függően, hogy milyen „sűrűn” vannak az előfizetők, lehet körsugárzó, vagy több szektorból álló cellákat létrehozni.

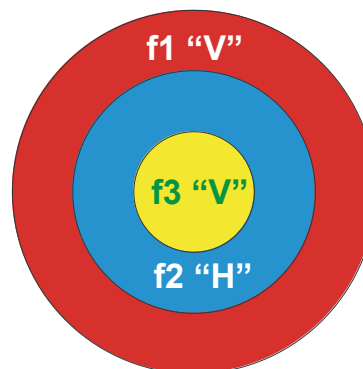
A fix telepítésű P-MP rendszereknél kihasználhatjuk a kétféle antenna polarizáció előnyeit. Amennyiben több szektort használunk, akkor az egymással 180 fokos szögben (egymásnak háttal) álló szektorok ugyanazt a frekvenciát használhatják, csak ellentétes polarizációval.

Az 51. ábrán látható (egyébként létező) antenna un. „előre-háttra” viszonya 37~40 dB. Ez már nem okoz interferenciát. A polarizáció és az antenna síkja nem tévesztendő össze!



51. ábra. Egy antenna sugárzási és keresztpolarizációs diagramja („H” síkban)

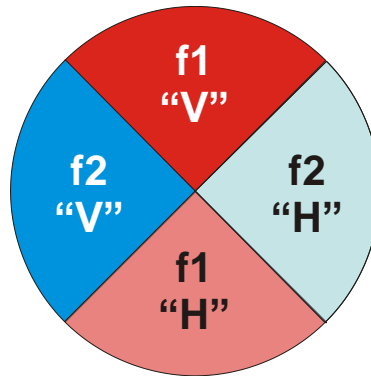
A 52. ábrán három rádiócsatornát - f1, f2 és f3 - használó, körsugárzó szektort láthatunk. Célszerű ebben az esetben a polarizációkat úgy megválasztani, hogy a (frekvenciában) szomszédos csatornák ellentétes polarizációt használjanak.



52. ábra. Körsugárzó cella elrendezés

A 53. ábrán egy négy szektorból álló cellát mutat. Figyeljük meg, hogy bár egyharmaddal kisebb sáv szélességet használ (csak két csatornát az előző hárommal szemben), az eredő kapacitás pontosan egyharmaddal nagyobb, mint a körsugárzó antennákat használó celláé. Az egymáshoz képest 180°-al eltérő szektorok ugyanazt a frekvenciát (csatornát) használják, csak a polarizáció ellentétes.

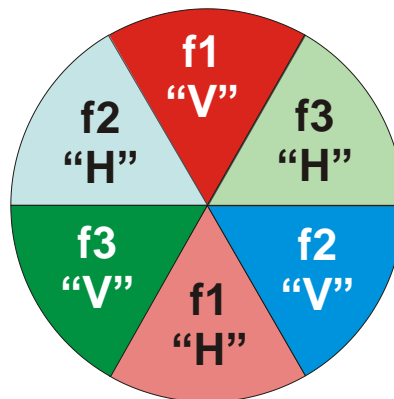
A nagyobb kapacitás mellett még egy előnye is van ennek az elrendezésnek. A körsugárzó antennák nyeresége jóval kisebb, mint a szektorsugárzóé, ezért a szektorsugárzókat használó cellák hatótávolsága, ugyanolyan kimenő teljesítmény esetén nagyobb, mint azoké a celláké, amelyek körsugárzót használnak.



53. ábra. Négy szektoros cella elrendezés

Tovább növelhetjük a cellánk kapacitását – és egyúttal a hatótávolságát – ha nem két, hanem három rádió csatornát használunk, miáltal a szektorok száma hatra növekszik. (Lásd az 54. ábrát). Ennél az elrendezésnél megfigyelhető, hogy az egymás melletti cellák polarizációja, ugyanúgy ahogy a 180° -al eltérőeknél, ellentétes. Ez tovább csökkenti az esetlegesen fellépő interferenciás zavar valószínűségét.

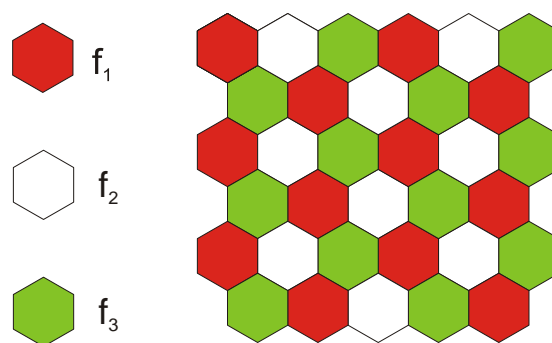
A gyakorlatban ritkán használnak hat szektornál többet tartalmazó cellát. A mobil rendszereknél értelemszerűen nem lehet kétféle polarizációt használni (nem írhatjuk elő a felhasználóknak, hogy milyen szögben és irányban tartsák a készülékét), ezért ott általában három szektoros cellákat használnak.



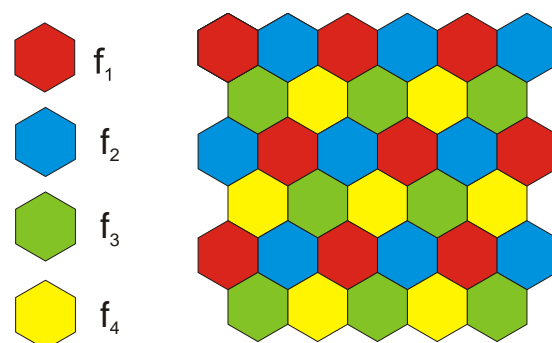
54. ábra. Hat szektoros interferenciamentes cella

A következő feladat, hogy a fentebb bemutatott cellákból hogyan lehet egy adott területet lefedni úgy, hogy az egymás mellett lévő cellák, ill. az azok részét képező szektorok között ne lépjen fel interferencia. Az alapelv természetesen itt is az, hogy az azonos csatornák minél messzebb kerüljenek egymástól, ill. az egymás melletti szektorok polarizációja ellentétes legyen. Mivel a mobil rendszerek ismertetése nem feladatunk, ezért P-MP rendszerek esetén mindig fix rendszereket értünk. Ahol viszont mindenképpen szükséges a mobil rendszerek megemlítése, ott azt külön jelezzük.

Körsugárzó cellás rendszereket láthatunk a 55. ábrán és a 56. ábrán.



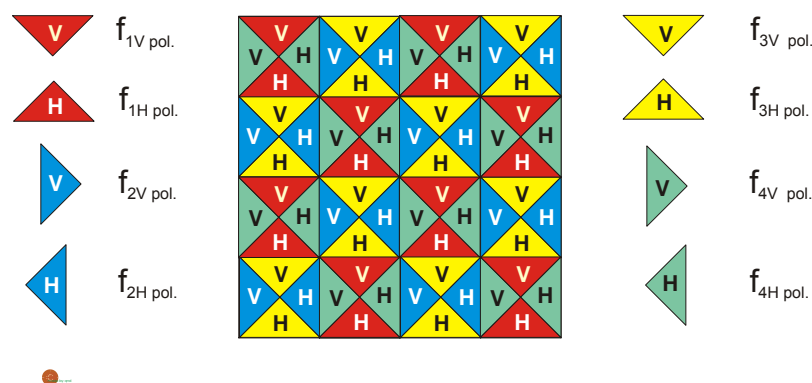
55. ábra. Interferencia-mentes cellaelrendezés három csatorna használatakor



56. ábra. Interferencia-mentes cellaelrendezés négy csatorna használatakor

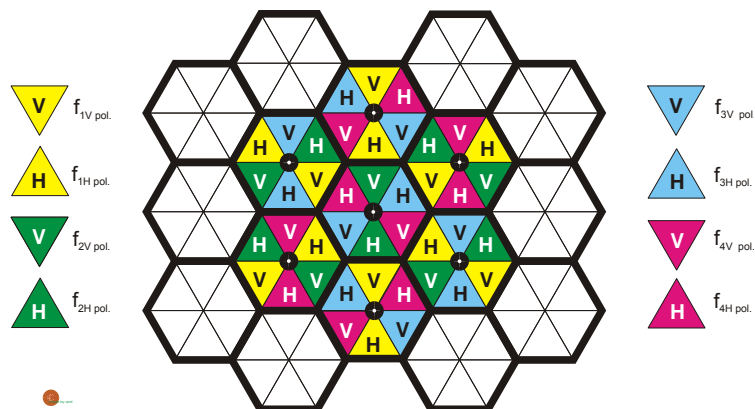
Természetesen minél több csatorna használatára van lehetőség, annál kisebb az interferencia fellépésének az elvi esélye. Azért csak elvi, mert gyakorlatban nem létezhet olyan cellás rendszer, ahol saját magán belül is interferencia képződik.

Amennyiben egy cella több szektort tartalmaz, akkor tovább lehet növelni a cella kapacitását. A 57. ábrán egy olyan interferencia-mentes cellás rendszert láthatunk, ahol négy szektor alkot egy cellát. Az egyes cellák találkozásánál minden esetben ellentétes a polarizáció és sehol sem találkozik két azonos csatorna.



57. ábra. Négy szektoros cellákból álló rendszer

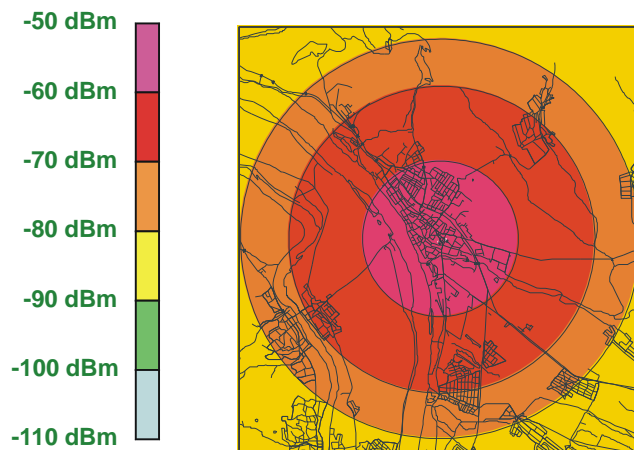
Hat szektorból álló cellák esetén még jobb a helyzet. (58. ábra) Itt nemcsak a különböző cellák esetén, de cellán belül is fennáll, hogy minden szektor szomszédja más csatornán üzemel és ellentétes a polarizációja. Itt még kisebb az interferencia fellépésének az esélye. A 60°-os antennák ($6 \times 60^\circ = 360^\circ$) használata miatt a hatótávolság is növekedett a négyszektoros megoldáshoz képest. A gyakorlatban használt cellás rendszereknél ez a maximális kapacitású.



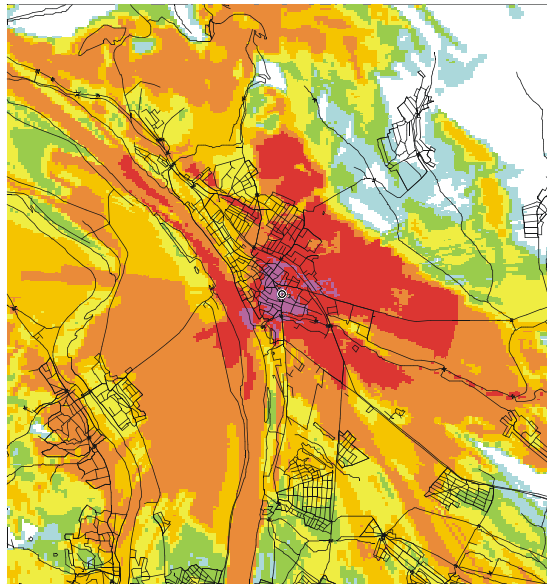
58. ábra. Hat szektoros cellákból álló P-MP rendszer

Egy cellás rendszer megtervezésekor a valóságban természetesen nem ilyen egyszerű a helyzet. Nagyon sokszor nem sík vidéken létesül a cellás rendszer, nem lehet ilyen szabályosan lefedni a kívánt területet. Az adott hely domborzati viszonyai erősen beleszólnak, hogy minden előfizetői telephelyet el tudunk-e látni egy bázisállomással, vagy sem.

Az 59. ábrán egy terület besugárzási térképét láthatjuk, körsugárzó cella esetén. A terület teljesen síknak lett feltételezve, ahol az antennatorony kellően kiemelkedik a környezetéből, hogy egyenletesen lehessen bevilágítani a területet. Ugyanazon műszaki paraméterekkel rendelkező bázisállomással megvalósított cellás rendszer besugárzási térképét mutatja a 60. ábra. A település fekvése, a környező dombok, ill. hegyek igen erősen befolyásolják az eredményeket. Jól látható, hogy egy bázisállomással nem lehet lefedni a kívánt területet.



59. ábra. Besugárzási térkép ideális esetben



60. ábra. A terepviszonyoknak megfelelő tényleges besugárzási térkép

16.3. Minőségi igények a P-MP rendszerekkel szemben (QoS)

A P-MP rendszerekkel szembeni minőségi igényeket egy fontos jellemző mutatja meg: ez a QoS (Quality of Service).

Rendelkezésreállítás

- Fixen telepített P-MP rendszereknél hasonló, mint a P-P mikrónál, avval a különbséggel, hogy itt a terminálok többnyire „1+0” kiépítésűek, nincs tartalékolás

Adatpriorizálás

- Ne szakadjon meg az összeköttetés, fading, vagy a kapacitást meghaladó adatátviteli igény fellépésekor, inkább csökkenjen le a sebesség
- A sebességcsökkenés először a késleltetésre kevésbé érzékeny adatátvitelt (pl. Internet böngészés) érintse, csak legvégső esetben a késleltetésre érzékeny adatfajtát (pl. beszédet)

Adatvesztés nélküli átvitel

- Hibás csomagok újraküldése

16.4. Gazdaságosság

Mint minden műszaki feladatnál, itt is alapvető szempont a gazdaságosság. A célt a következőképpen lehet megfogalmazni: „A P-MP rendszerek létesítése és üzemeltetése a lehető legalacsonyabb költségekkel legyen megvalósítható”

Az alacsony költségek elérése lehetséges:

- A vezeték nélküli technológia lehetőségeinek kihasználásával
- Költséghatékony P-MP hálózat kialakításával

A vezeték nélküli technológia lehetőségeinek kihasználása:

- Megfelelő moduláció használata
- Dinamikus moduláció váltás
- Az adatforgalom típusától függően FDD, vagy TDD duplexálás

- Adatforgalomtól függő időrés- megosztás az adás és vétel között
- Adatforgalom priorizálás
- SMART antennarendszerek használata

Költséghatékony P-MP hálózat kialakítása:

- Szabványos, széles körben elterjedt rendszerek alkalmazása
- Eszközbeszerzés pályázat útján
- Meglévő infrastruktúra használata
- Nagyon alapos forgalmi előrejelzés
- Elégséges megbízhatóságra méretezés

16.5. Ellenőrző kérdések

- 1) Hogyan változott a P-MP rendszerekkel szemben támasztott sebességigény az utóbbi tíz évben?
- 2) A korlátozott spektrumkészletet figyelembe véve milyen módszerrel lehet a P-MP rendszerek sebességét növelni?
- 3) Mi alapján lehet összehasonlítani az egyes P-MP rendszerek spektrum hatékonyságát, mivel ahány rendszer, annyi sáv szélesség és sebesség?
- 4) Mi az összefüggés a sebesség és a szakasztávolság között egy P-MP rendszer-nél?
- 5) Mi a „FEC” lényege?
- 6) Mit nevezünk kódarányoknak?
- 7) A gyakorlatban az FDD, vagy a TDD duplexálás esetén lehet több információt átvinni egy csatornán?
- 8) Mikor előnyösebb az FDD és mikor a TDD duplexálás?
- 9) Milyen hálózatkialakítási elvet használnak terület lefedésére?
- 10) Egy antennának elvileg hány karakterisztikája lehet?
- 11) A P-MP rendszerünk kapacitását szeretnénk növelni. Az antennának milyen tulajdonságát kell kihasználni?
- 12) Hogyan lehet egy cella kapacitását növelni?
- 13) Egy adott cellaelrendezés kialakításánál mi a két alapkövetelmény?
- 14) Mikor lehet (és mikor nem) a gyakorlatban lefedni a cella teljes területét?
- 15) Mit jelent a „QoS”?
- 16) Sorolja fel a minőségi igényeket egy P-MP rendszer-nél!
- 17) Mi az alapvető tervezési szempont egy P-MP rendszer esetén?
- 18) A hatékony rendszer tervezésének szempontjait hogyan csoportosíthatjuk?
- 19) Mi az a „dinamikus moduláció váltás”?
- 20) Egy, az igényeket kielégítő hatékony P-MP rendszer-nél milyen technológiát célszerű választani:
 - A legújabbat?
 - A már általánosan elterjedt, szabványos, de nem a legújabb technológiát?
- 21) A mai modern IP alapú rendszerekben kell-e különbséget tenni az egyes adat-fajták között?

17. A modern vezeték nélküli hozzáférési rendszerekben alkalmazott megoldások (technológiák)

A mai, modern vezeték nélküli rendszerek olyan speciális technológiákat használnak, amelyek segítségével a feladataikat sokkal hatékonyabban tudják ellátni, egyáltalán lehetővé váltak olyan szolgáltatások, melyek ezelőtt elképzelhetetlenek voltak.

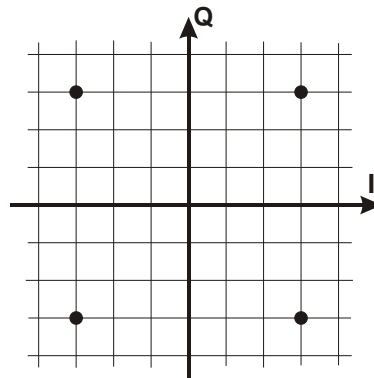
17.1. Moduláció és kódolás

A korszerű rendszerekben már csak digitális modulációt használnak. A legfontosabbak:

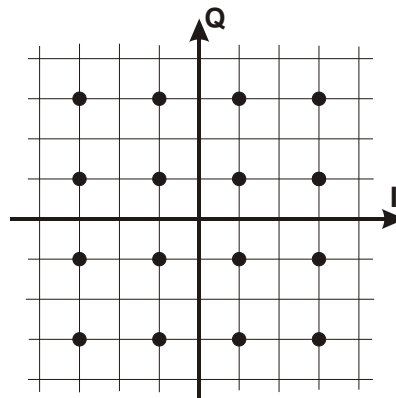
- BPSK
- QPSK
- 4QAM; 8QAM; 16QAM; 32QAM; 64QAM; 128QAM; 256QAM

Mint már említettük, jelen Szakmai segédletnek nem témája a mobil kommunikáció, ezért nem részletezzük azok speciális vonatkozásait, pl. a GSM technikában alkalmazott GMSK modulációt sem.

A konstellációs diagram (61. ábra, 62. ábra) jól szemlélteti a többállapotú modulációk lényegét: az egyes modulációs állapotok között nemcsak fázis, hanem amplitúdó különbség is van.



61. ábra. 4 QAM konstellációs diagramja



62. ábra. 16 QAM konstellációs diagramja

Annak érdekében, hogy az átvitel során keletkezett bármilyen zavar, vagy zaj ne módosítsa az adatfolyamot, hibajavítást kell végezni. A lényeg, hogy redundanciát

viszünk az adatfolyamatba. Ennek eszköze a kódolás, melyet FEC-nek, Forward Error Correction-nek nevezünk.

A Forward Error Correction-nek különböző fajtái használatosak:

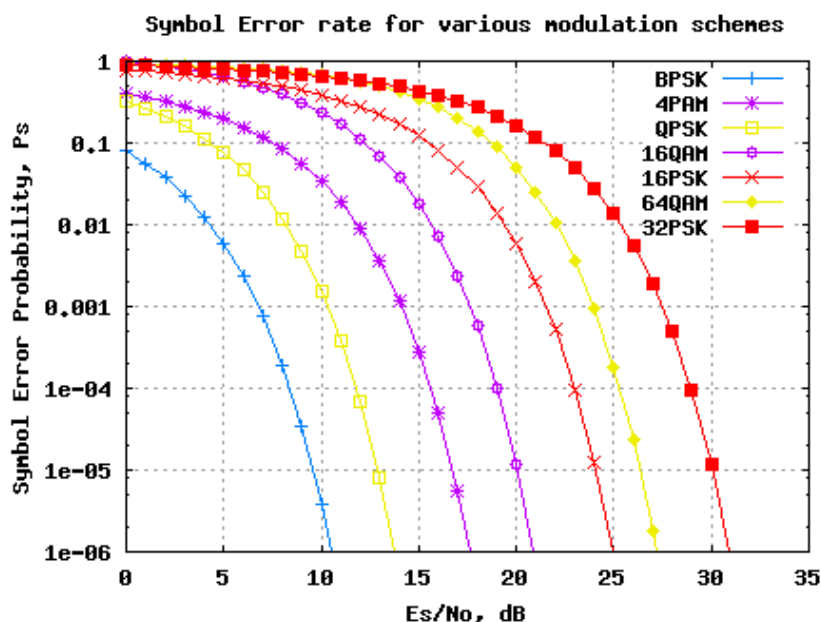
- Reed-Solomon
- Convolutional
- Turbo

Minél nagyobb „állapotszámú” egy moduláció, annál nagyobb az egységnyi sáv-szélesség alatt átvihető bitek száma, amit az alábbi táblázat mutat:

Moduláció	Kódarány	Sebesség [Mb/s]
BPSK	1/2	2,03
QPSK	1/2	4,07
QPSK	3/4	6,1
16QAM	1/2	8,13
16QAM	3/4	12,2
64QAM	2/3	16,26
64QAM	3/4	18,3

Megjegyzés: sebesség alatt az elméleti bruttó sebességet értjük, BW=5 MHz esetén

Minél nagyobb „állapotszámú” egy moduláció, annál nagyobb E_s/N_0 -ra van szükség a demoduláláshoz! (63. ábra)



63. ábra. A demodulátor küszöbszintje a moduláció függvényében

17.2. OFDM, OFDMA

A modern vezeték nélküli rendszerek egyik alapvető és nélkülözhetetlen technikája az OFDM, ami Orthogonal Frequency Division Multiplexing-et, magyarul orthogonális frekvenciaosztásos multiplexálást jelent. Ennek az alapvető oka, hogy a

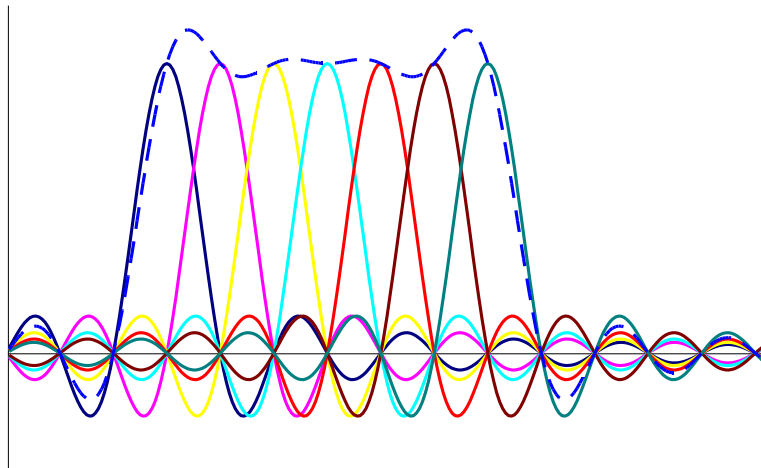
többutas terjedéssel szemben a legjobb védelmet adja, összehasonlítva bármelyik hagyományos, pl. TDM vagy CDMA rendszerrel. Az OFDM-nek több fajtája használatos:

OFDMA → Orthogonal Frequency Division Multiple Access

SOFDMA → Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access

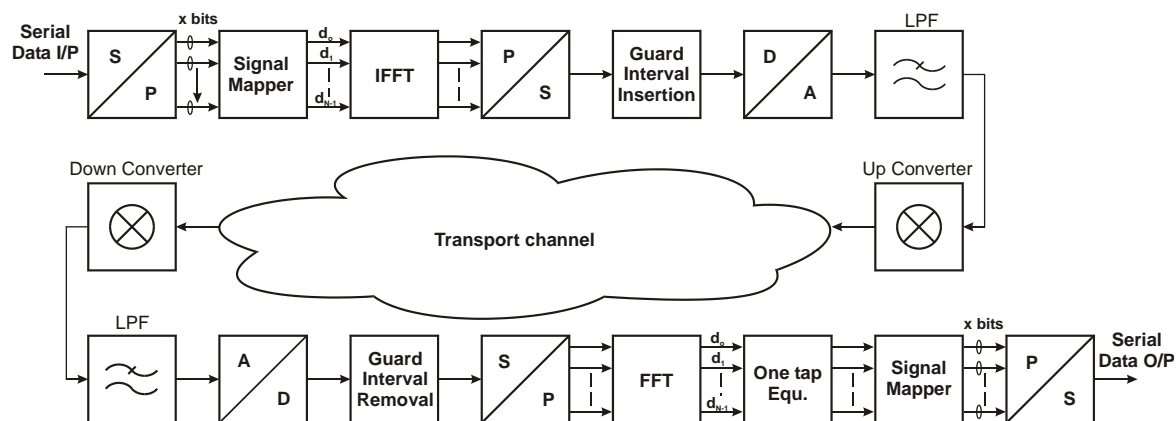
FLASH OFDMA → Flash Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Az OFDM alapelve: a jelet párhuzamosan sok, kis sávszélességű vivővel továbbítják. A vivők közötti frekvenciakülönbség a szimbólum periódus reciproka, miáltal biztosított az orthogonalitás.



64. ábra. Az OFDM vivők fázisviszonyai

Az orthogonalitás miatt, ahol egy vivőnek maximuma van, ott a többi vivőnek „null helye” van (64. ábra). Egy OFDM átvitel egyszerűsített tömbvázlatát látjuk a 65. ábrán.



65. ábra. Egy általános OFDM átvitel tömbvázlata

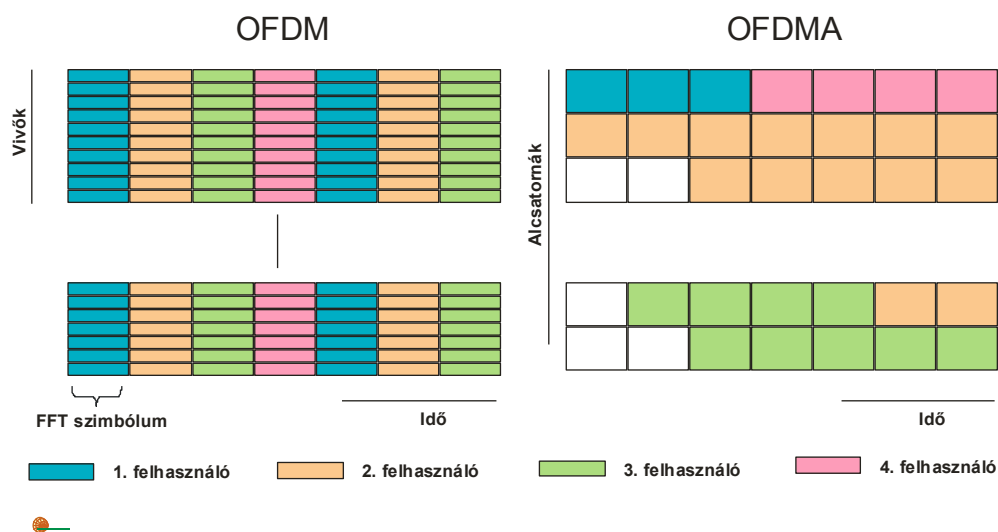
A jel útja a következő: a bemenő jelet egy soros – párhuzamos átalakítás után egyenlő méretű („x” bit-es) csoportokká alakítjuk. Az így kapott „komplex számokat” IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation) segítségével „moduláljuk”. (Ezért szokták az OFDM-et „modulációnak” is nevezni.) Egy „párhuzamos – soros” átalakítás után a jelhez adunk egy „védősávot”, hogy elkerüljük az „Intersymbol

Interference"-et (ISI). Ez adja a többutas terjedésből adódó, időkésések okozta zavarokkal szembeni „immunitását” az OFDM-nek. (Ez akkor igaz, ha az időkésés kisebb, mint a „védősáv”. A rendszer elvileg még 30 km úthossz-különbséget is tolerálni tud, ami 100 μ s késleltetésnek felel meg). A következő lépés a digitális jelből analóg jel képzése, melyet egy aluláteresztő szűrő követ. Ezután csak egy „Up Converter” (felkeverés) és teljesítményerősítés következik. Az átvivő csatorna (mi esetünkben rádiócsatorna) másik végén az ellenkező folyamat zajlik le.

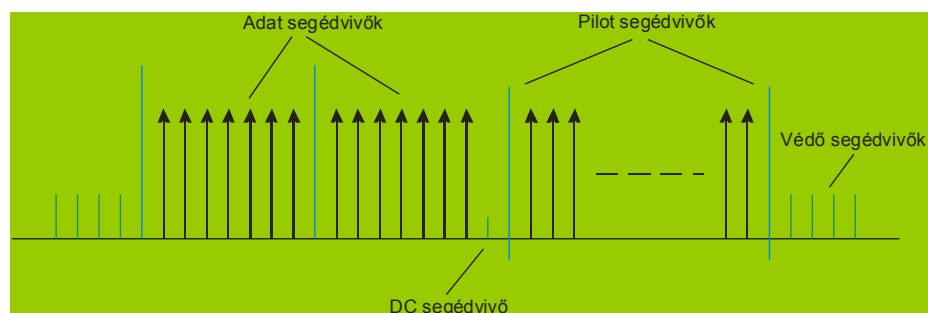
Mi a különbség az OFDM és az OFDMA között?

- OFDM: egy időzés – egy felhasználó
- OFDMA: felhasználó – alcsatorna összerendelés

A viszonyokat jól mutatja a 66. ábra. A csatornák alaosztásával jobban ki tudjuk használni a rendszer kapacitását.



66. ábra. Az OFDM és az OFDMA csatorna - felhasználó összerendelése



67. ábra. OFDM vívőelrendezés

A 67. ábra az OFDM vívőelrendezését mutatja. Az adat segédvívök mellett pilot „védő” és „DC” segédvívöket is használ a rendszer.

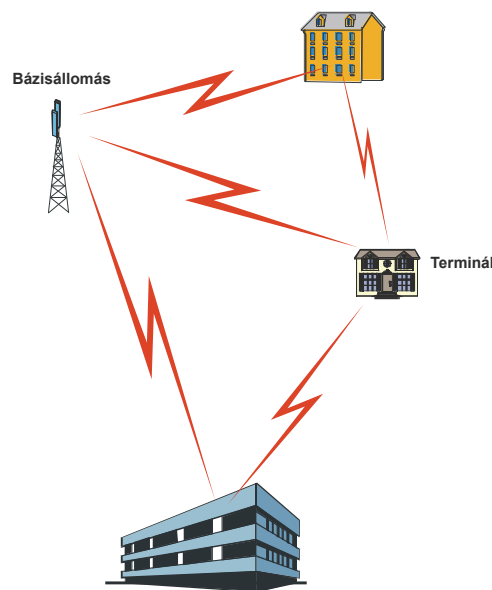
Az OFDM család egy igen érdekes tagja a Flash OFDM, mely pár igen előnyös tulajdonsággal rendelkezik:

- Az OFDM előnyeit egyesíti a „Spread Spectrum” előnyeivel.
- Az OFDM egy olyan változata, ahol az egyes összeköttetésekhez (előfizetőkhez) tartozó csomagok egy álvéletlen kódnak megfelelő sor-

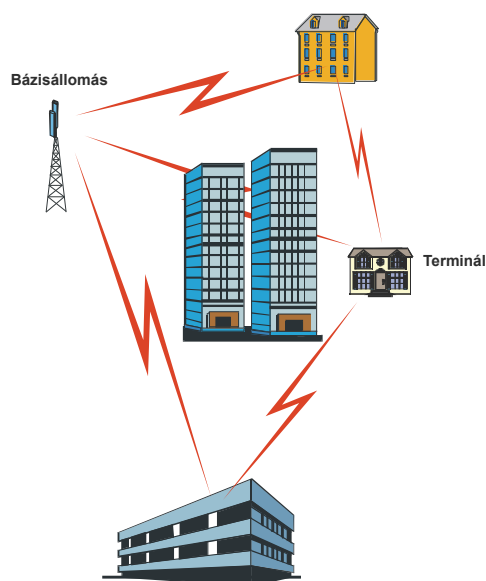
rendben más-más OFDM segédvivővel kerülnek továbbításra az egymás után következő periódusokban. A szelektív fading ellen igen hatásos védelmet nyújt.

- A Flash OFDM kontroll rétege (MAC) sokkal jobb hatásfokú, mint az egyéb technológiáké. Lehetséges egészen rövid, (szélső esetben egy bit információt is továbbítani, úgy hogy virtuálisan nincs „overhead”. Evvel szemben, pl. a TDMA rendszereknél, egy bit adattovábbítása is egy egész keretet igényel, ami rendkívül lerontja a nettó – bruttó sebességek arányát. (Nagyobb adatmennyiség esetén már természetesen nem ilyen rossz a helyzet.)
- Az alacsony késleltetés miatt jól használható, pl. beszédátvitelre

Az OFDM talán legnagyobb előnye, hogy a többutas terjedésből eredő késleltetésekre immúnis. A viszonyokat a 68. ábra és a 69. ábra mutatja.



68. ábra. Többutas terjedés, ha van közvetlen jel is



69. ábra. Többutas terjedés, ha nincs közvetlen jel

Hagyományos rendszereknél, ha olyan a többutas terjedés, hogy van közvetlen jel is, akkor nincs gond, mert a vevők azonos csatornás interferencia elnyomása elegendő, hogy a közvetlen jelnél kisebb szintű reflektált jelek ne okozzanak zavart. A 69. ábra szerinti esetről, amikor nincs közvetlen jel, a vevő nem tudja megkülönböztetni az egyes jeleket. Ugyanaz a jel többször érkezik, különböző fázissal és amplitúdóval, ISI (Intersymbol Interference) keletkezik. OFDM esetén nincs probléma, mivel az OFDM rendszer – egy adott késleltetésen belül – minden jelet ugyanannak fog értelmezni.

17.3. SMART antenna rendszerek

A diversity-től az intelligens antennákig

A diversity elvet már régóta alkalmazzák, különösen a szelektív fading ellen. Ezek fajtái:

- Frekvencia diversity → Frequency hopping → Pl. rövidhullámú rádiózás, vagy Flasch OFDM
- Tér diversity → Szokásos megoldás → Két antennát használ, melyek egymástól $d \geq 100 \cdot \lambda$ távolságra helyezkednek el
- Idő diversity → Többszörös átvitel → Úrkutatás, nagytávolságú képtovábbítás
- Polarizáció diversity → Ritkábban használt megoldás → Mindkét polarizáció kiépítve

Az ötlet: Miért ne lehetne a diversity alternatív útvonalait egyszerre használni? A smart, magyarul intelligens, antenna rendszerek elve a következő: a kiépített alternatív csatornákat (utakat) nem felváltva használjuk, mint a diversitynél, hanem párhuzamosan.

A Smart antenna rendszereknek két alaptípusa létezik:

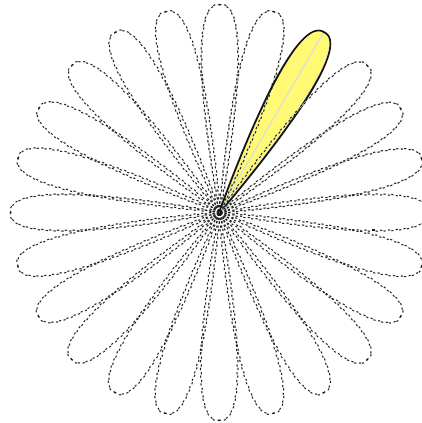
- Kapcsolt nyalábú
- Adaptív antenna rendszerek

Elnevezésük, kialakításuk többféle lehet, közös jellemzőjük, hogy több antennát használnak:

- Vezérelt fázisrács antennák (phased arrays)
- Digitális sugárformálás (digital beam forming)
- MIMO (Multiple Input - Multiple Output)
- MISO (Multiple Input - Single Output)
- Adaptív antenna rendszerek (adaptive antenna systems)
- Térbeli jelfeldolgozás (spatial processing)

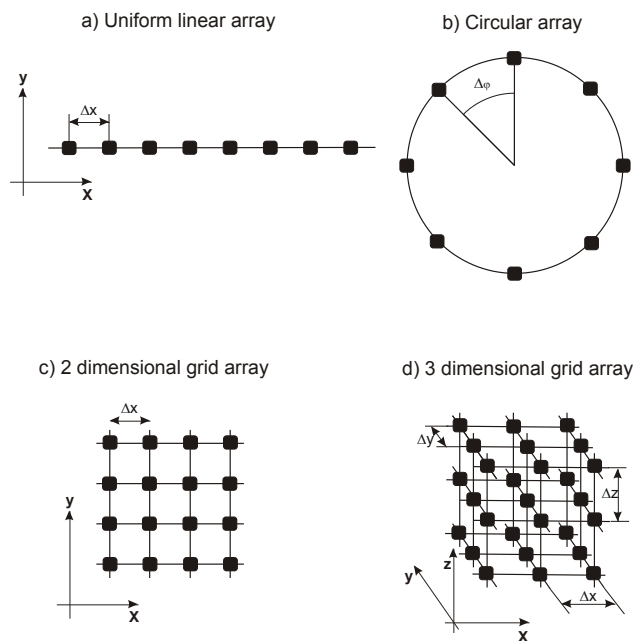
Kapcsolt nyalábú, vezérelt fázisrács antennák lényege, hogy az antenna rendszer egyes elemeit a kívánt iránykarakterisztikának megfelelően vezéreljük. Ezek egyik fajtája, amikor egy szektort (vagy a teljes 360° -os teret) nem egy nyalábbal, hanem tűnyalábok sorozatával világítunk meg. (70. ábra) Mindig csak az éppen aktuális irányban néző tűnyaláb él, az aktuális terminállal történik a kommunikáció. TDD rendszerben működik ez a megoldás, ahol egy időpillanatban csak egy állomás csatlakozik a bázisállomáshoz. Nagy előnye ennek a megoldásnak, hogy a tűnyaláb miatt kisebb kimenő teljesítmény szükséges, vagy ami ezzel egyenértékű, ugyanolyan

kimenő teljesítmény esetén jelentősen nagyobb hatótávolság érhető el. További előny a jelentősen lecsökkent interferenciás zavar lehetőség.



70. ábra. Kapcsolt nyalábú antenna rendszer

A kapcsolt nyalábú rendszereket szokás még vezérelt fázisrács antennáknak is nevezni. Néhány példa a fázisrács antennák kialakítására a 71. ábrán látható.

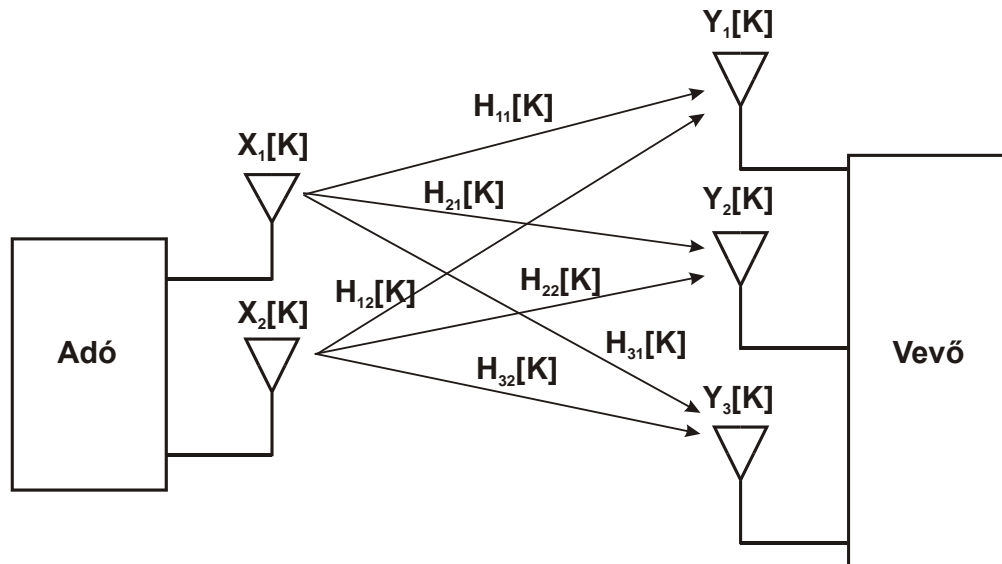


71. ábra. Fázisrács antennák

A vezérelt fázisrács antennák használatára egy tipikus példa a távolfelderítő lokátorok esete. Már a hetvenes évek végén használtak olyan vezérelt fázisrács antennát, amely egyszerre, egy időben kettőszáz célt tudott bemérni és követni. Nyilván itt egyszerre kettőszáz nyalábot kellett egymástól függetlenül vezérelni.

Az adaptív antenna rendszerek egy tipikus, ma már széles körben használt fajtája a MIMO antenna rendszerek. A "MIMO" típusú antennák lehetnek:

- Multiple-Input Multiple Output (MIMO)
- Multiple-Input Single-Output (MISO)
- Single-Input Multiple-Output (SIMO)



72. ábra. MIMO modell vázlata

A 72. ábrán egy egyszerű MIMO modell látható. Ennek a MIMO modellnek az átviteli függvénye:

$$\begin{bmatrix} Y_1[k] \\ Y_2[k] \\ Y_3[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}[k] & H_{12}[k] \\ H_{21}[k] & H_{22}[k] \\ H_{31}[k] & H_{32}[k] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1[k] \\ X_2[k] \end{bmatrix}$$

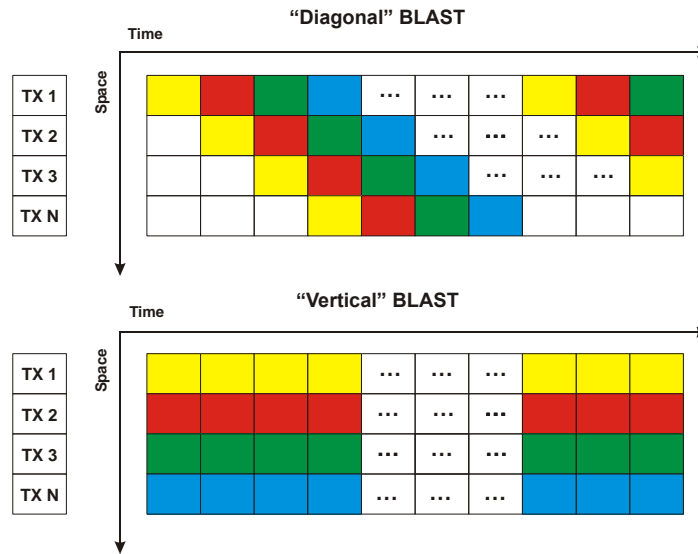
A "Space-Time Coding" nemcsak az antennák térbeli helyzetét, hanem az időtényezőt is kihasználja. A "tér-idő" kódolás (Space-Time Coding) néhány variánsa:

- Space-Time Block Code
- Alamouti Space Time Block Code
- Lapped Space-Time Block Code
- Orthogonal Space Time Block Code
- Space-Time Trellis Code (STTC)
- Random Layered Space Time Code (RLST)
- Bell Laboratories Layered Space Time Block Coding (BLAST)

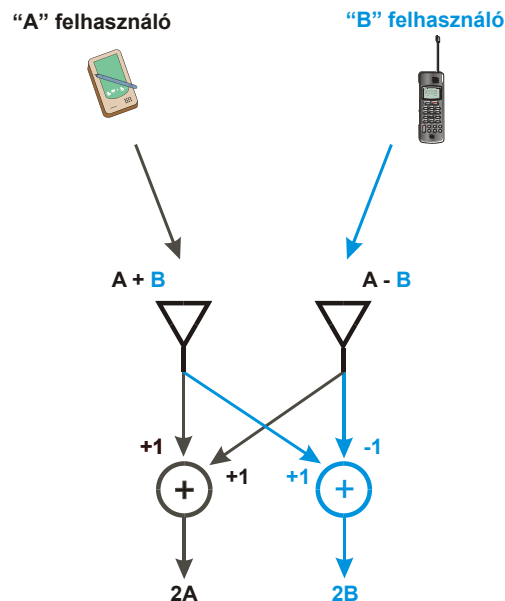
A Bell Laboratórium által kifejlesztett BLAST két megvalósítási módja látható a 73. ábrán.

A SMART antenna rendszerek következő nagy csoportja az AAS (Adaptive Antenna System), típusú rendszerek. A bázisállomás néhány, (többnyire 4 ~ 12 db.), normál, (off the shelf), antennát használ, melyhez egy bonyolult jelfeldolgozó folyamat kapcsolódik. Az eredmény: megnövekedett lefedési sugár, javított átviteli minőség és az interferenciák csökkenése mind a „downlink”, (bázisállomástól a terminálok felé), mind az „uplink”, (a termináloktól a bázisállomás felé), irányban. A bázisállomás térben elkülönülten elhelyezkedő antennáitól érkező jeleket megszorozzuk egy „súlyozó” tényezővel, miáltal az amplitúdó és a fázis komplex beállítása megtörténik. Ezen jelek kombinációja jelenik meg az antennarendszer kimenetén. Egy adaptív algoritmus gondoskodik az előre definiált feladathoz illeszkedő „súlyozásról”, ami biztosítja a megfelelő terminál vételét és elnyomja a nem kívánt interfe-

renciás jelet. A súlyozás és a vételi helyen lévő fázisviszonyok miatt a hasznos jel-összetevők erősítik, a nem kívánt komponensek, pedig kioltják egymást. A működési elvet a 74. ábra mutatja.

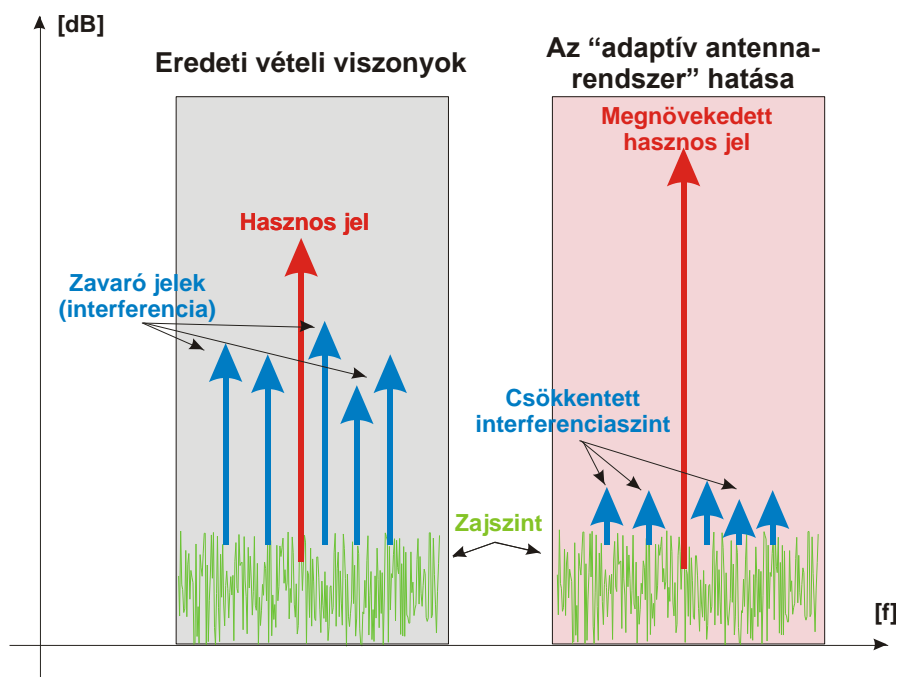


73. ábra. Bell Laboratory féle BLAST



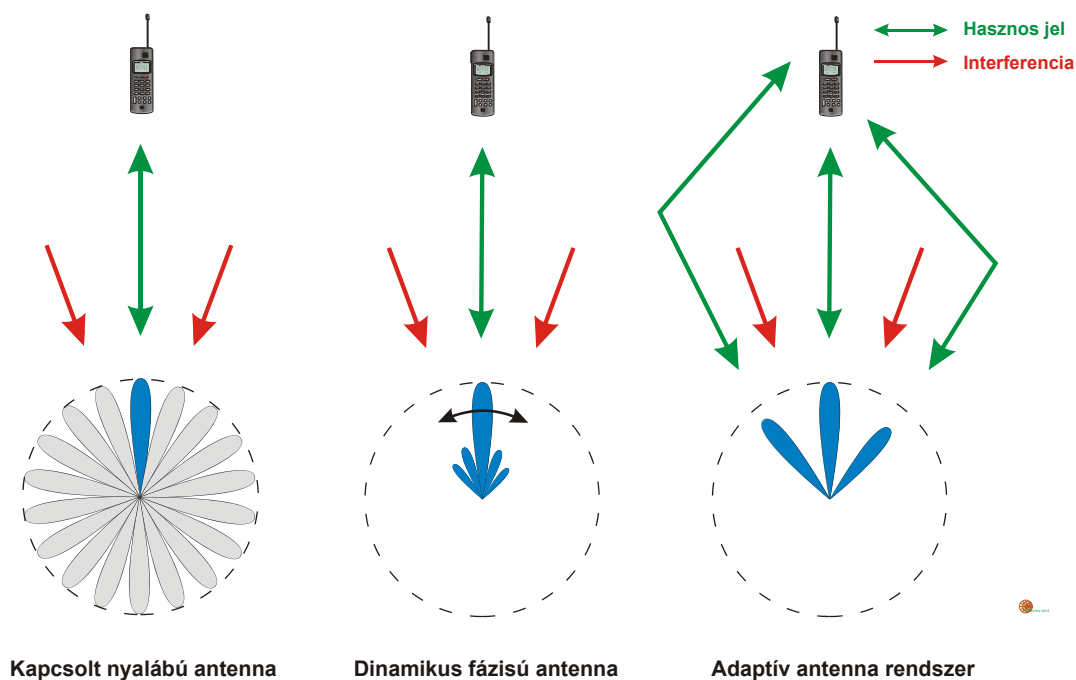
74. ábra. AAS antenna rendszer működési elve

Az adaptív antenna rendszerek hatására a hasznos jel vételi szintje megnövekszik, a nemkívánatos zavaró jeleké, viszont lecsökken. Az eredmény: megnövekedett jel/zaj lesz. Ezt szemlélteti a 75. ábra.



75. ábra. AAS hatása a vételi viszonyokra

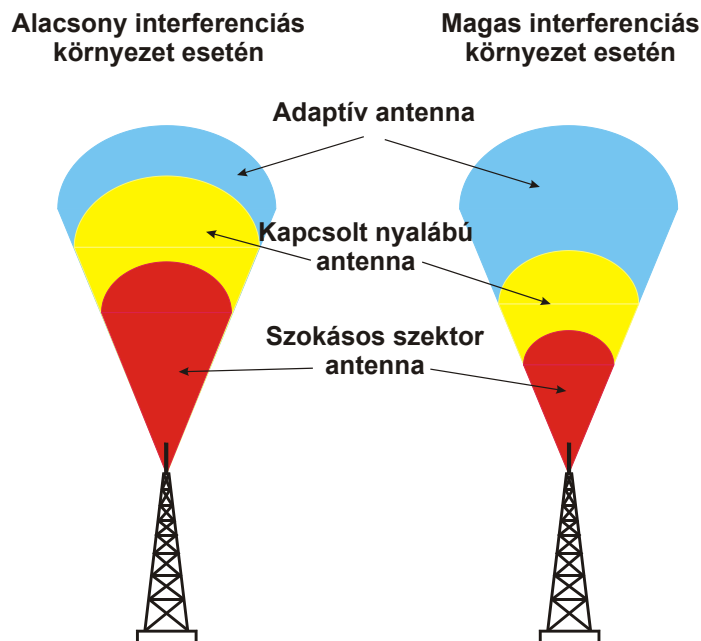
Érdeemes összehasonlítani a kapcsolt nyalábú, „dinamikus fázisú” és AAS antenna rendszerek működési elvét. A 76. ábra mutatja a három megoldás elvét.



76. ábra. Antenna rendszerek összehasonlítása

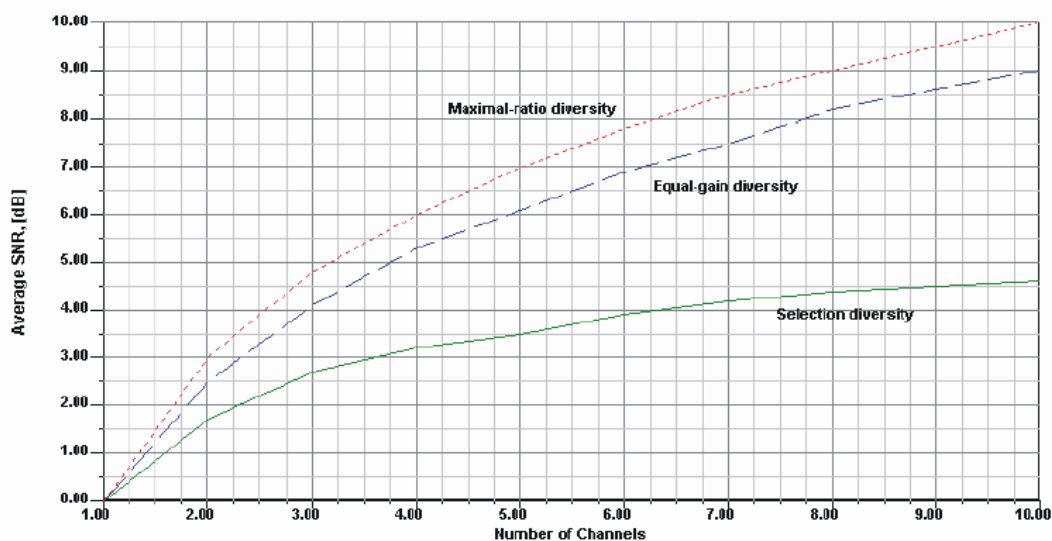
A kapcsolt nyalábú antenna rendszerek előnyeiről már volt szó az előzőekben. Ehhez annyit érdemes hozzátenni, hogy a zavarjel elnyomás az antenna karakteristikából adódik. A dinamikus fázisú antenna rendszereknél a főnyalábot nem pontosan a kívánt cél felé fordítjuk, hanem olyan pozícióba vezéreljük a rendszert, hogy maximális legyen a hasznos jel/interferencia viszony. Az AAS-nél viszont az antenna rendszer olyan karakterisztikájú, hogy a hasznos jelek irányában maximuma van, míg az interferenciás zavarok irányában minimuma.

Ha összehasonlítjuk az egyes antenna rendszereket zavarmentes és erősen interferenciás környezetben, még szembetűnőbb a SMART antenna rendszerek előnye.



77. ábra. Az ellátott területek különböző antenna rendszerek esetén

Az ellátott területek alakulását látjuk különböző interferenciás viszonyok között a 77. ábrán változatlan adó-vevő paramétereket feltételezve. Normál viszonyok esetén is a hagyományos antennával lehet a legkisebb területet ellátni. Ennél nagyobb a kapcsolt nyalábúval és a legnagyobb az AAS-el. Erősen interferenciás környezetben, ha az egyéb paramétereket változatlanak tételezzük fel, a normál antenna esetén jelentősen csökken az ellátható terület. A demodulátor megfelelő működéséhez adott jel/zaj szükséges. Ha megnövekszik a zaj (ez most az interferenciás jel), akkor csak nagyobb jel – rövidebb távolság – esetén lesz elegendő a jel/zaj. Kapcsolt nyaláb esetén is csökken az ellátott terület. Természetesen ez most is nagyobb, mint a normál antenna esetén. Az AAS rendszernél gyakorlatilag nem tapasztalunk változást.

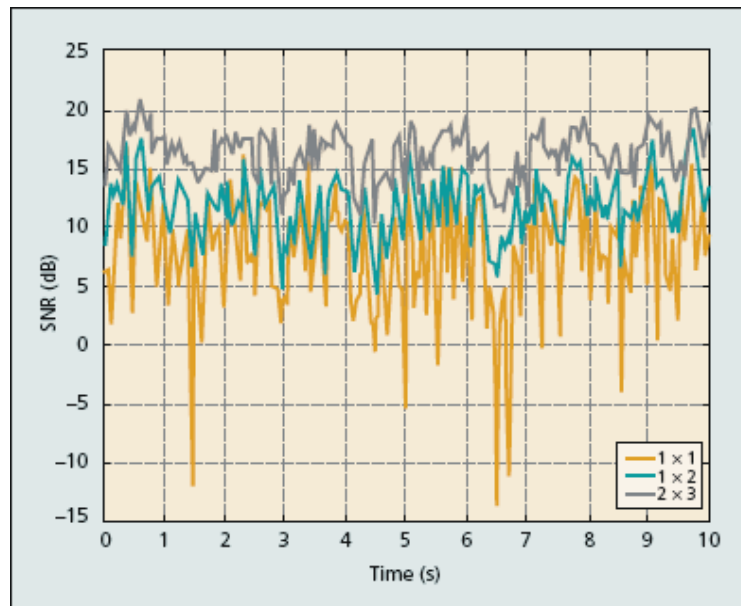


78. ábra. Jel/zaj alakulása különböző antenna rendszerek esetén

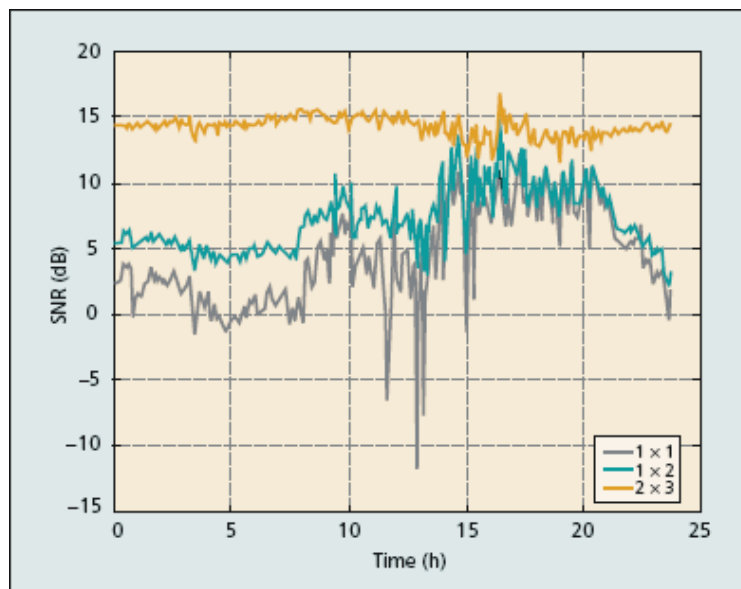
Az elérhető jel/zaj javulás adaptív antenna rendszerek használatakor a 78. ábrán² láthatjuk. Ahol

- Selection diversity = "klasszikus" diversity
- Equal Gain Diversity = az egyes antennákról érkező jeleket összegezzük
- Maximal Ratio Diversity = a bemeneteket nemcsak összeadjuk, hanem egy megfelelő súlyozó tényezővel is megszorozzuk

A SMART antenna rendszerek között a MIMO a legelterjedtebb. A jel/zaj javulás mértékét két diagram szemlélteti: (79. ábra és a 80. ábra)



79. ábra. MIMO antenna rendszerek jel/zaj értékei rövid távú mérésel³

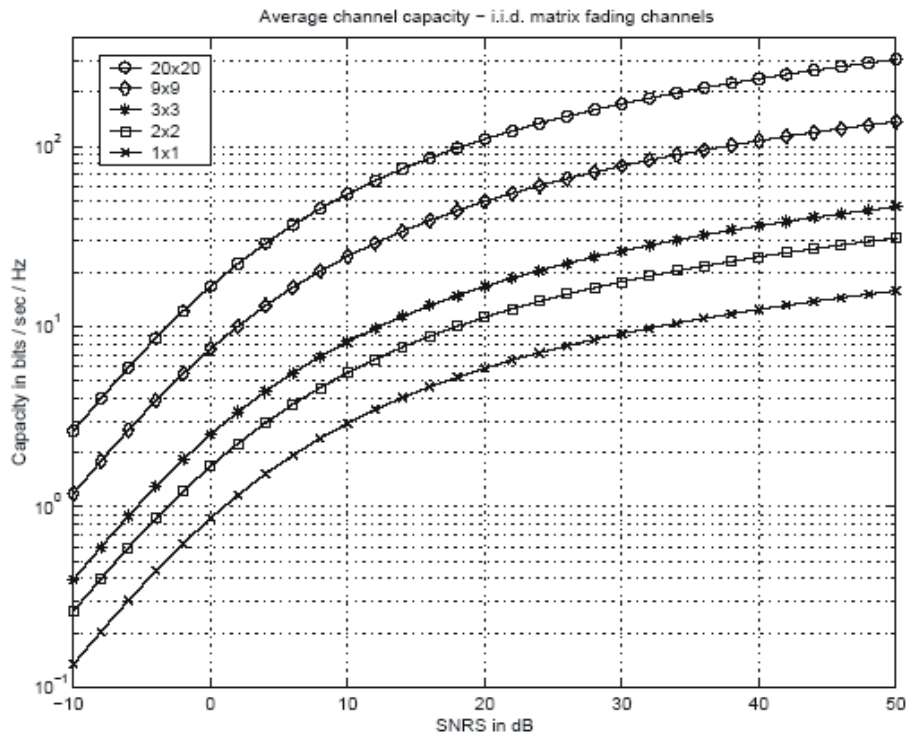


80. ábra. MIMO antenna rendszerek jel/zaj értékei hosszú távú mérésel²

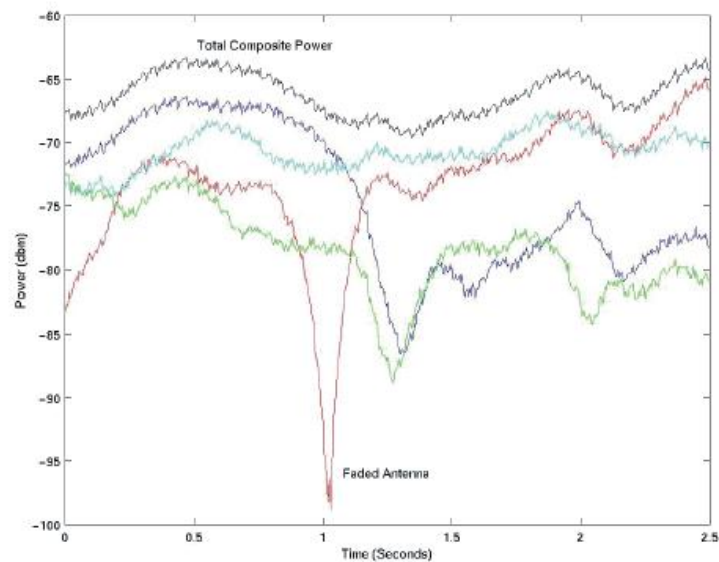
² Forrás: ANSOFT, Smart Antenna Design

³ Forrás: "A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results, IEEE Communications Magazine, September 2002

A MIMO rendszerek nemcsak a jel/zaj javításában jeleskednek, hanem jelentősen növelik a csatorna kapacitását is. Erre láthatunk példát a 81. ábrán.



81. ábra. Különböző elemszámú MIMO rendszerek hatása a csatornkapacitásra⁴



82. ábra. Négy antennát tartalmazó AAS hatása a vett jelre⁵

A 82. ábra az AAS rendszerre mutat egy mérési példát. A négy alsó görbe az egyes antennák jelét ábrázolja, míg a legfelső az összegzett jelet mutatja. A mérési eredményekből jól látható, hogy van olyan antenna, ahol már a megszakadásig

⁴ "A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results, IEEE Communications Magazine, September 2002

⁵ ArrayCom, IntelliCell ® System

csökkent a jel a fading hatására. Az összegzett jelben viszont csak ~ 5 dB ingadozás tapasztalható.

A SMART antennarendszereknek számos előnyük van a hagyományos egyedi antennákhoz képest. Természetesen ezt a sok előnyt valahol meg kell fizetni, mégpedig a jelentős költségnövekedés miatt. Egy bázisállomás beruházási költsége $\sim 40\%$ -al is nőhet SMART antennarendszer használatakor. Az üzemeltetési és karbantartási költségek valamelyest szintén nőnek.

17.4. Internet protokoll

Hagyományos mikrohullámú P-MP rendszerek „történelmi okokból” (a régi analóg világ hagyatékaként) $n \times E1$ kapacitással ($n \times 1920$ kb/s) rendelkeztek. Az E1 általában $n \times 64$ kb/s-os csatornák multiplexálásával jött létre. A mag hálózat felé többnyire G.703-as interfész volt az átdó felület, de létezett X.21, vagy V.35 is. Ezekben a rendszerekben külön oldották meg a beszéd (POTS, vagy ISDN) és az adatátvitelt.

Az Internet térhódításának és az adatfajták sokszínűségének köszönhetően mára már szinte teljesen egyeduralkodóvá vált az IP (Internet Protocol), ami rugalmasságával képes bármilyen adatfajta továbbítására. Nem szabad összekeverni viszont az IP-t az Interneten zajló forgalommal. Az egyes adatfajták nem egyformán kényesek a jeltovábbítás késleltetésére. A beszéd, vagy a „real time video” átvitel nem visel el számottevő késleltetést. Ezeket a problémákat a P-MP rendszereknek kell megoldaniuk. Ezt az eljárást „adatpriorizálásnak” nevezzük.

Az IP-s adatátvitelnek egyik fontos előnye a hagyományos megoldásokkal szemben, hogy a felhasználó nem folyamatosan használja a csatornát, hanem az adatfajtatól függően, kisebb-nagyobb megszakításokkal. Ebből mind a szolgáltatónak, mind az előfizetőnek haszna származik. Csak az átvitt adatmennyiség után kell fizetni, másrészt a szabad csatornaidőben más előfizetőket is ki lehet szolgálni. Az elérhető árbevétel, ezáltal magasabb lehet a hálózat jobb kihasználása következtében.

17.5. Ellenőrző kérdések

- 1) Milyen modulációt használnak a korszerű rendszerekben?
- 2) Soroljon fel pár általánosan használt moduláció fajtát! Indokolja, hogy melyik a legelterjedtebb és miért?
- 3) Mi a konstellációs diagram?
- 4) A következő kifejezések mit takarnak:
 - Turbo
 - Reed-Solomon
 - Convolutional
- 5) Hogyan függ egymástól a moduláció fajtája és a rendszer kapacitása?
- 6) A nagyobb kapacitású rendszerekkel elérhető szakasztávolság miért kisebb, mint a kiskapacitásúaké?
- 7) Mit jelent az „ E_b/N_0 ”?
- 8) Mi a különbség az „OFDM” és az „OFDMA” között?
- 9) Mi az előnye a „Flash OFDM”-nek?
- 10) Ismertesse az OFDM alapelvét!

- 11) Miért csak az elvének megalkotása után közel harminc évvel vált az OFDM mindennapos technológiává?
- 12) Mit csinál az FFT és az IFFT?
- 13) Mi biztosítja az interferenciamentes vételt egy OFDM rendszernél?
- 14) Lehet-e „egyfrekvenciás” hálózatot építeni?
- 15) Milyen vételi viszonyok esetén jobb az OFDM rendszer, mint a hagyományos P-P mikrohullámú rendszerek?
- 16) Magyarázza el a „LOS” és „NLOS” terjedés közötti különbséget!
- 17) Milyen diversity rendszereket használnak?
- 18) Mi a „Smart antenna” alapötlete?
- 19) Milyen csoportokba sorolhatjuk a smart antennákat?
- 20) A nagyon sokféle smart antenna rendszerben mi a közös?
- 21) A fázisrács antenna melyik smart antenna csoportba sorolható?
- 22) Mi a különbség a „MISO” és a „SIMO” között?
- 23) Írja fel egy egyszerű MIMO modell átviteli függvényét!
- 24) A Space-Time kódolásnak mi az elve?
- 25) Hogyan működnek az adaptív antenna rendszerek?
- 26) Milyen protokollt használnak a modern P-MP rendszerek?
- 27) Mi a nagy előnye az IP protokollnak?

18. A P-MP rendszerek kialakítása, tervezési szempontok

A P-MP rendszerek tervezése a P-P mikrohullámú összeköttetésekhez részben hasonló, részben a speciális kialakításuk miatt eltérő szempontok figyelembevételével történik. Egy elérési hálózatként használható, általános P-MP rendszer felépítését és a mag hálózathoz való csatlakozási lehetőségeit mutatja a 83. ábra.

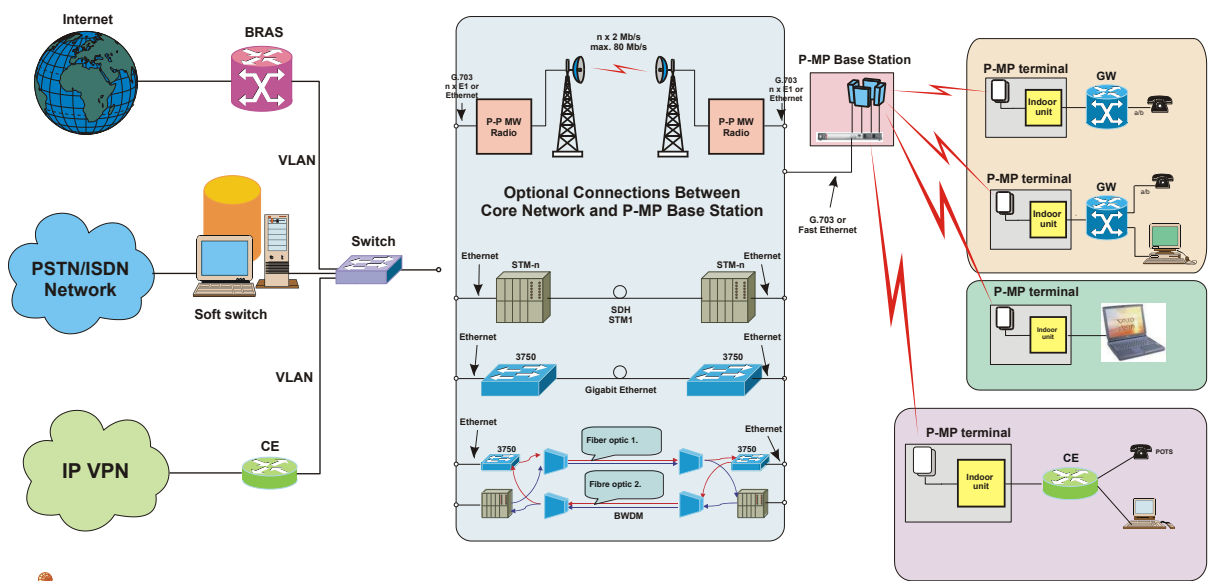
18.1. P-MP rendszerek kialakítása

A rádiós tervezés részei:

- P-MP rendszer választás
- Cellastruktúra meghatározása
- Bázisállomások kialakítása (szektorszám, frekvencia, polarizáció)
- Maghálózathoz való csatlakozás (P-P mikró, optika)
- Kapcsolódás a hálózat-felügyeleti rendszerhez

Infrastruktúrával kapcsolatos feladatok:

- Antenna elhelyezés (torony, épület)
- Energia ellátás (erősáramú hálózat kiépítése, szünetmentes tápellátás biztosítása)
- A maghálózathoz való csatlakozás infrastrukturális vonzatai
- Szükség esetén klímatisztált helyiség (konténer) kialakítása
- Objektum védelem



83. ábra. Általános P-MP topológia

18.2. Tervezési szempontok

Műszaki tervezés:

- A P-MP rendszer célja
- Nyilvános, vagy magánhálózatot kell megvalósítani
- Mekkora területet kell lefedni
- Milyen az előfizetői sűrűség

- Fix, nomadikus vagy mobil lesz a rendszer
- Átviendő adatok jellege
- Mi a QoS követelmény
- Milyen mértékű igénynövekedés várható
- Megfelelő technológia választás
- Eszköz választás

Gazdasági

- Van-e megfelelően kiépített infrastruktúra
- Eszközbeszerzési megfontolások
- Szükséges-e hitel felvétel
- Pályázat vagy belső döntés
- Külső támogatásra (EU-s, állami) lehet-e számítani
- Frekvenciasáv választás (fizetős, szabad)
- BC (NPV, PBP)
- Egyszeri árbevétel (belépési díj)
- Havi díj
- Szolgáltatási csomagok lehetősége

Egy mikrohullámú P-MP rendszer tervezési folyamata

- Frekvencia (technológia) választás
- Berendezés és antenna választás
- Bázis állomás (állomások) helyszínének a kiválasztása
- Besugárzási térkép készítése
- Szükség esetén módosítás
- Kritikus helyeken próbamérés
- Elvi építési engedély kérelem elkészítése és beadása
- Frekvenciakijelölési határozat kérelem beadása
- Rádióengedély kérelem beadása
- A rádiós tervezéssel párhuzamosan további engedélyek beszerzése válhat szükségessé, pl.:
 - Betelepülési engedély
 - Egyéb ingatlannal kapcsolatos kérelmek, ill. szerződések
 - Szükség esetén a sugáregészségügyi követelmények teljesítésének hatósági igazolása

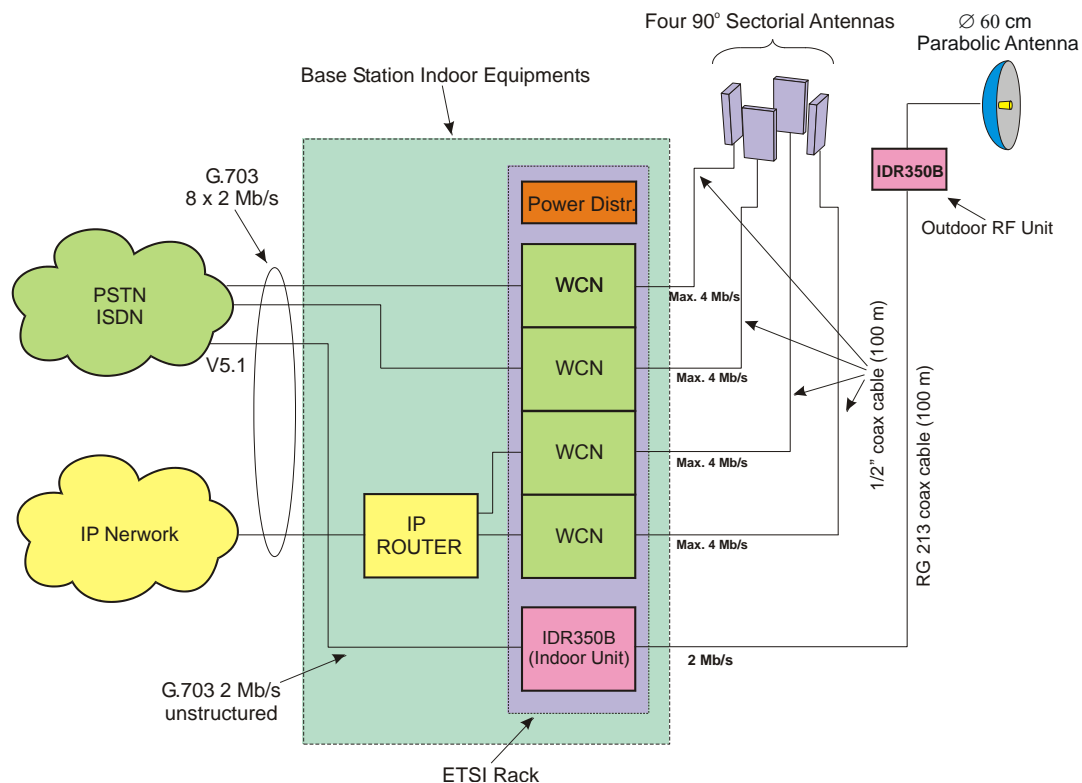
18.3. Ellenőrző kérdések

- 1) Egy P-MP rendszer milyen fő részekből áll?
- 2) Sorolja fel egy P-MP rendszer tervezésének lépéseit (logikai sorrendben)!
- 3) Mitől függ, hogy egy cella hány szektort tartalmazzon?
- 4) Készítsen vázlatot, egy négy csatornát használó interferenciamentes cellás rendszerről! (Egy cella és a szomszédos cellák megrajzolása elegendő)
- 5) Milyen infrastrukturális lehetőség van egy P-MP állomás megbízhatóságának növelésére?

- 6) A P-MP rendszerünkhöz a QoS biztosítása milyen nélkülözhetetlen elemet (kapcsolatot) igényel?
- 7) Vázolja fel egy általános P-MP rendszer topológiáját!
- 8) Sorolja fel a P-MP rendszer tervezés főbb szempontjait!
- 9) Mi az a „BC”?
- 10) Van-e egy általános szabály a P-MP rendszerek beruházásának a megtérülési idejére? Létezik a PBP-re felső korlát?
- 11) A P-MP rendszereknél milyen tervezési lépés szükséges annak igazolására, hogy a tervezett területen elérhető lesz a szolgáltatás?
- 12) Milyen dokumentumok elkészítése (és beadása) kötelező egy P-MP rendszer létesítéséhez?
- 13) A P-MP rendszer tervezése során milyen speciális környezetvédelmi szempontot kell figyelembe venni és számítással bizonyítani a megfelelőséget?

19. Hozzáférési technológiák

19.1. Hagyományos P-MP rendszerek



84. ábra. Egy P-MP rendszer bázisállomása (BS)

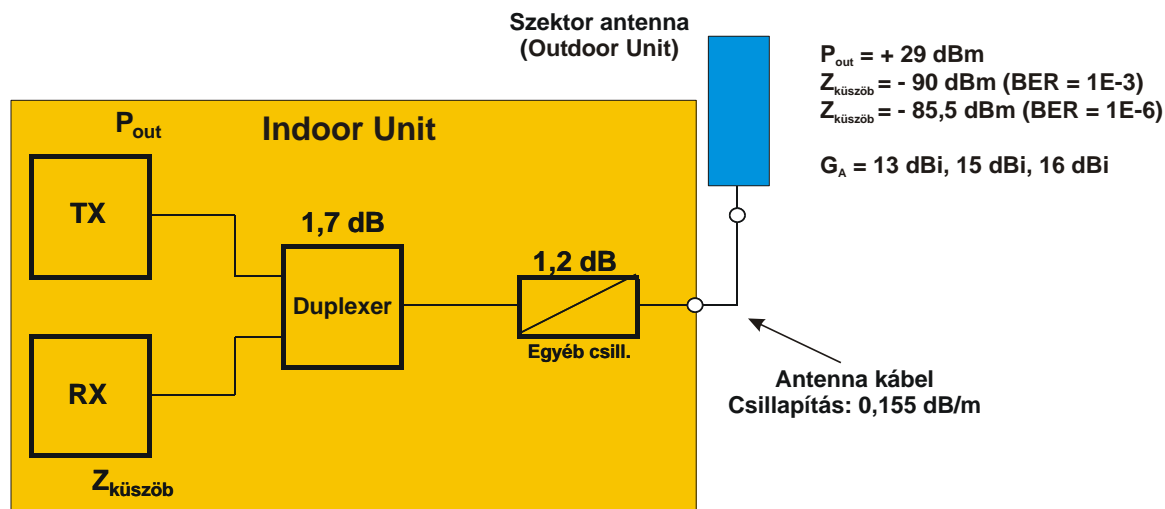
A bázisállomás (BS) többnyire két nagy részből tevődik össze:

- Beltéri egység (IDU, Indoor Unit)
- Kültéri egység (ODU, Outdoor Unit)

A beltéri egység csatlakozik egyrészt a kültéri egységhez. A régebbi, elavult típusoknál ez mikrohullámú szinten történt, mivel a kültéri egységet az antenna jelentette. A 84. ábra szerinti rendszer részben ilyen kialakítású. Másrészt a távközlési hálózat (mag hálózat) megfelelő pontjaihoz. A csatlakozó interfész többnyire G703 protokoll szerinti. Ezeknél a rendszereknél alapvetően a csatlakozás a PSTN/ISDN hálózathoz történt, de már megjelent az IP-s hálózat is. Még egy fontos kapcsolatot kell megemlíteni, a hálózatfelügyeleti rendszerhez való csatlakozást. Az említett ábrán ez nem szerepel.

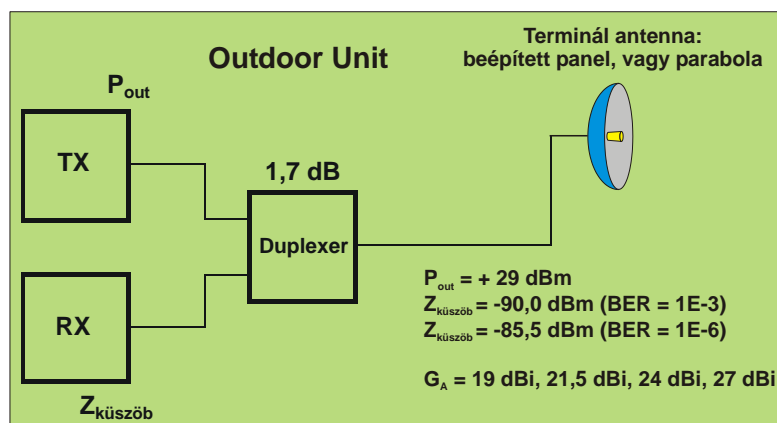
A hagyományos, ma már elavult kialakítású front end tömbvázlatát mutatja a 85. ábra. Ezen egy terminál felépítését tekinthetjük meg. A mikrohullámú P-MP rendszerek első generációjánál még nem minden esetben alkalmazták az antennával egybeépített kültéri egységeket, hanem az antenna egy tápvonalon keresztül csatlakozott a beltéri rádiós egységhez. Ennek egyértelmű technológiai okai voltak. A kültéri egységek szélsőséges hőmérsékleti viszonyok között kénytelenek működni. Európában ez a hőmérséklet tartomány -25°C –tól $+50^{\circ}\text{C}$ ig tart. A sarki vidékeken a minimális hőmérséklet ennél jóval alacsonyabb, a mediterrán részeken pedig a felső hőmérséklet határ lehet magasabb. Az elrendezés egyértelmű hátránya, hogy a duplexer és az antenna közötti kábel csillapítása egyrészt csökkenti a kimenő teljesítményt,

ezáltal a hatótávolságot, másrészt a kábelcsillapítás növeli a vevő zajtényezőjét, ezáltal a küszöbszintet is. Ennek ugyancsak hatótávolság csökkentő hatása van.



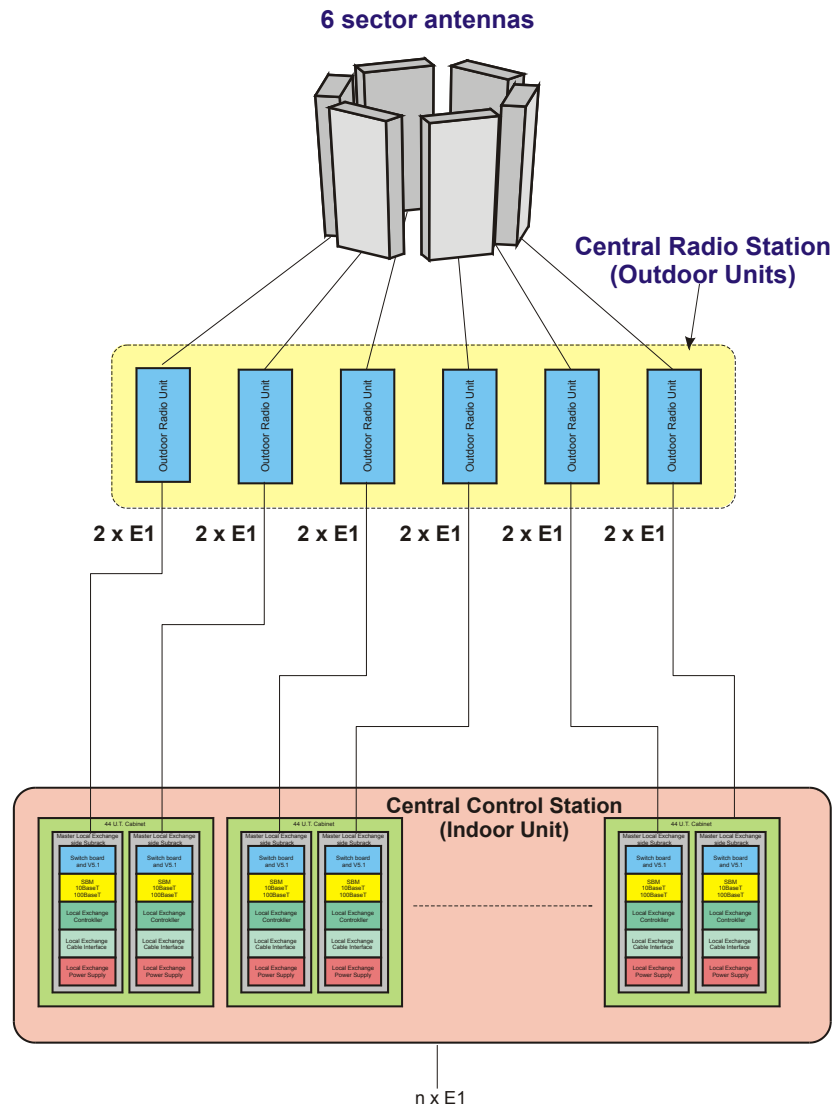
85. ábra. Hagyományos kialakítású front end

A mai korszerű terminál front end-ek már mind kivétel nélkül antennával egybeépített formában készülnek. Ilyen megoldást látunk a 86. ábra A teljes mikrohullámú rész lokál oszcillátorral, teljesítményerősítővel, kis zajú bemeneti erősítővel, duplexerrel és antennával egy kompakt egységet képez. A kapcsolat a beltéri egységgel vagy kf szinten történik, de sok esetben alapsávi, vagy még inkább digitális módon van kialakítva. Ismert olyan megoldás is, ahol a tápellátást leszámítva, optikai kapcsolat van a beltéri és kültéri egység között.



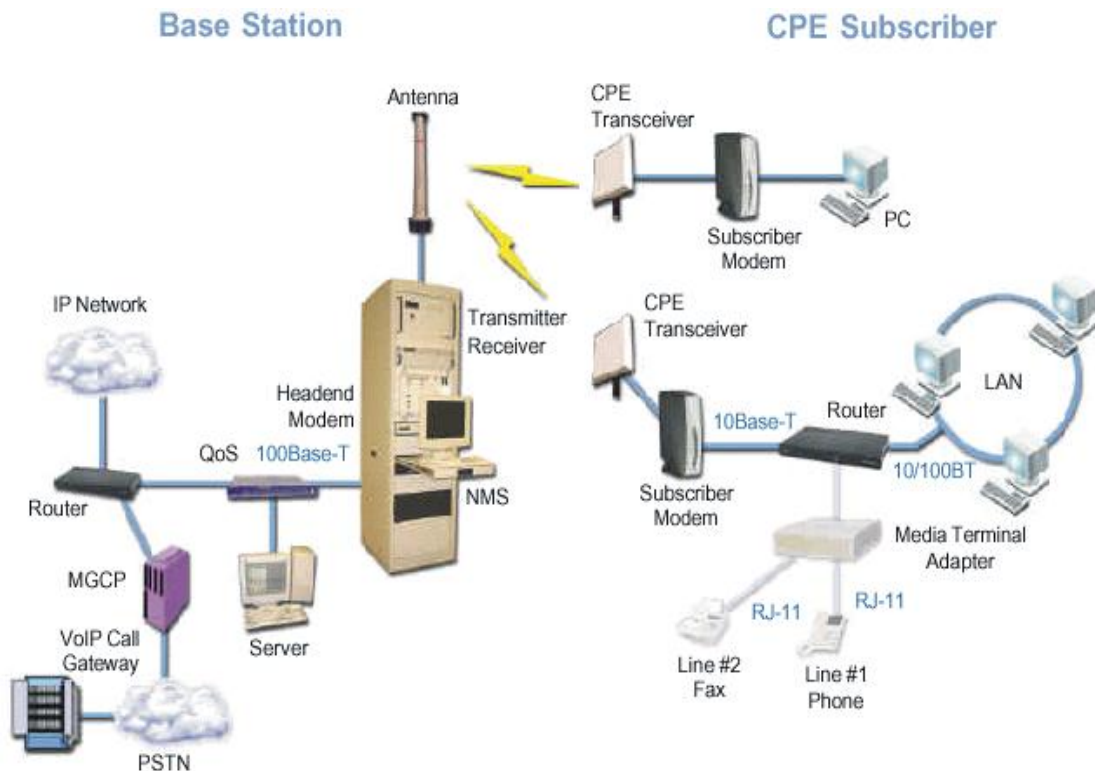
86. ábra. Korszerű felépítési front end

A fenti elveket megvalósító bázis állomást láthatunk a 87. ábra. Ennél a 6 szektoros BS-nél már a front-end egységek a panel antennákkal egy mechanikus blokkot alkotnak, így a duplexer és az antenna között elhanyagolható a kábelhossz, ami jelentős szakasztávolság növekedést eredményez. Ez a rendszer „szektoronként” bővíthető, tehát egy szektor – egy antenna és egy kültéri egységet jelent. (Az ábrán csak a szemléletesség kedvéért van külön rajzolva az antenna és RF blokk. A valóságban ezek egy mechanikus egységet képeznek, az antenna és a duplexer közötti kábel hossza minimális.)



87. ábra. Egy BS front end kialakítása

Egy jellemző példát mutat az IP-s P-MP rendszerre a 88. ábra. Ezek egy átmeneti állapotot képviseltek: hagyományos P-MP rendszerek, de már IP alapúak. Itt még csak részben, vagy egyáltalán nem használták a ma korszerűnek tekintett technológiákat.



88. ábra. Egy IP-s 3,5 GHz-es P-MP rendszer

19.2. WLAN (Wi-Fi)

A WLAN-t eredetileg épületen belüli vezeték nélküli helyi hálózatok céljára fejlesztették ki. Olyan sikeresen szerepelt, hogy ma már minden számítógép, vagy mobil telefon szerves részévé vált.

A WLAN legfontosabb ismérvei:

- Szabad frekvenciasávokban működik.
- Nincs frekvencia díj
- Nincs QoS
- Korlátozott EIRP
- Olcsó eszközök
- Alapszolgáltatás PC-nél, okos telefonnál
- Ingyenes hot-spot-ok
- Nagyvárosokban telítettek a sávok
- Nagy biztonsági kockázat

A WLAN részére fenntartott szabad frekvenciasávok

- a) 2400 – 2483,5 MHz, $EIRP_{MAX} = 100$ [mW], kül- és beltérre
- b) 5150 – 5350 MHz, $EIRP_{MAX} = 200$ [mW], csak beltérre
- c) 5470 – 5725 MHz, $EIRP_{MAX} = 1$ [W],
- d) 5725 – 5875 MHz, csak P-P összeköttetésekre, $EIRP_{MAX} = (6 + 0,5L)$ [dBW], ahol L = szakasztávolság [km]., csak P-P összeköttetésekre

A WLAN kapcsán nagyon fontos megjegyezni, hogy korlátozva van az $EIRP_{MAX}$. Tehát nem a kimenő teljesítmény, hanem az EIRP!

Csak emlékeztetőül:

$$\text{EIRP[dBm]} = \text{P}_{\text{Ki}}[\text{dBm}] + \text{G[dB]}$$

Ez azt jelenti, hogy nem lehet az antennanyereség emelésével a hatótávolságot növelni, ha már eredetileg is a rendszer elérte az EIRP_{MAX} -ot.

A WLAN szabványok rendszere:

IEEE Szabvány	Frekvencia [GHz]	Bruttó sebesség [Mb/s]	Nettó sebesség [Mb/s]	Megjegyzés
802.11	2,4	2	0,9 ~ 1	FHSS
802.11a	5	54	22 ~ 24	OFDM
802.11b	2,4	11	4,2 ~ 4,5	DSSS
802.11g	2,4	54	18 ~ 20	OFDM
802.11n	2,4; 5	600	72 ~ 78	OFDM, MIMO

A beltéri lefedettség tervezésekor két alapvető szempontot kell figyelembe venni:

- Megfelelő térerőtség biztosítása
- Az elektromágneses környezetszennyezés minimalizálása

19.3. WiMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access. Ez volt az első olyan P-MP rendszer, ahol minden modern, az előzőekben már ismertetett, technológiát alkalmaztak. A fejlődés során a felhasznált frekvenciasáv a technológia fejlődésével, ill. az igények alakulásával együtt változott. Ma már egyértelműen mobil technológiáról van szó. Mivel technológiailag megelőzte az egyéb, rivális technológiákat, ezért pillanatnyilag még mindig a leghatékonyabban tudja kihasználni a rádiócsatornát. A frekvenciasávok szűkössége és az exponenciálisan növekvő igények miatt ez igen lényeges előny. Érdekes módon egyéb megfontolások miatt mégsem olyan sikeres, mint a műszaki paramétereiből következne.

A WiMAX legfontosabb tulajdonságai:

- 802.16x szabványokon alapuló technológia
- WiMAX Forum
- Elvileg állandóhelyű alkalmazás is lehetséges, de ma már alapvetően mobil rendszer
- OFDM, SOFDMA
- TDM/FDM
- IP alapú
- MIMO, MU MIMO (Multi-User MIMO: 8 streams DL, 4 streams UL)
- Dinamikus moduláció váltás
- NLOS
- QoS
- Szolgáltatási osztályok
- Magas a spektrum-kihasználási tényező

Spektrális hatások IEEE 802.16m szabvány szerint⁶:

Parameter	Antenna Configuration	Performance
Peak DL Spectral Efficiency	(2x2) MIMO	8.5 bps/Hz
	(4x4) MIMO	17.0 bps/Hz
Average DL Spectral Efficiency	(4x2) MIMO	3.2 bps/Hz
		0.32 bps/Hz/User
DL Cell-Edge User Throughput	(4x2) MIMO	0.09 bps/Hz
Peak UL Spectral Efficiency	(1x2) SIMO	4.6 bps/Hz
	(2x4) MIMO	9.3 bps/Hz
Average UL Spectral Efficiency	(2x4) MIMO	2.6 bps/Hz
		0.26 bps/Hz/User
UL Cell-Edge User Throughput	(2x4) MIMO	0.11 bps/Hz/User

19.4. GSM család

A mobil távközlés ismertetése nem része az anyagunknak, de felsorolás szinten mindenképpen meg kell említeni a világ legerjedtebb mobil technológiáját a GSM-et. A GSM család:

- 1G → NMT 450 analóg rendszer
- 2G → GSM első digitális rendszer (Global System for Mobile)
- 2,5G → GPRS, EDGE, HSCSD, csomagkapcsolt adatátvitel
- 3G → UMTS (IMT2000) – max. 384 kb/s
- 3,5G → HSPA (HSDPA/HSUPA), max. 28/22 Mb/s (újabbán már 56 Mb/s)
- 4G → LTE (Long Term Evolution), max. 600 Mb/s

19.5. WiMAX kontra LTE

A WiMAX és az LTE lényegében ugyanazon technológiai megoldásokat használja. Ebből az következne, hogy egyforma eredményekre képes. Ennek ellenére van némi különbség (89. ábra).

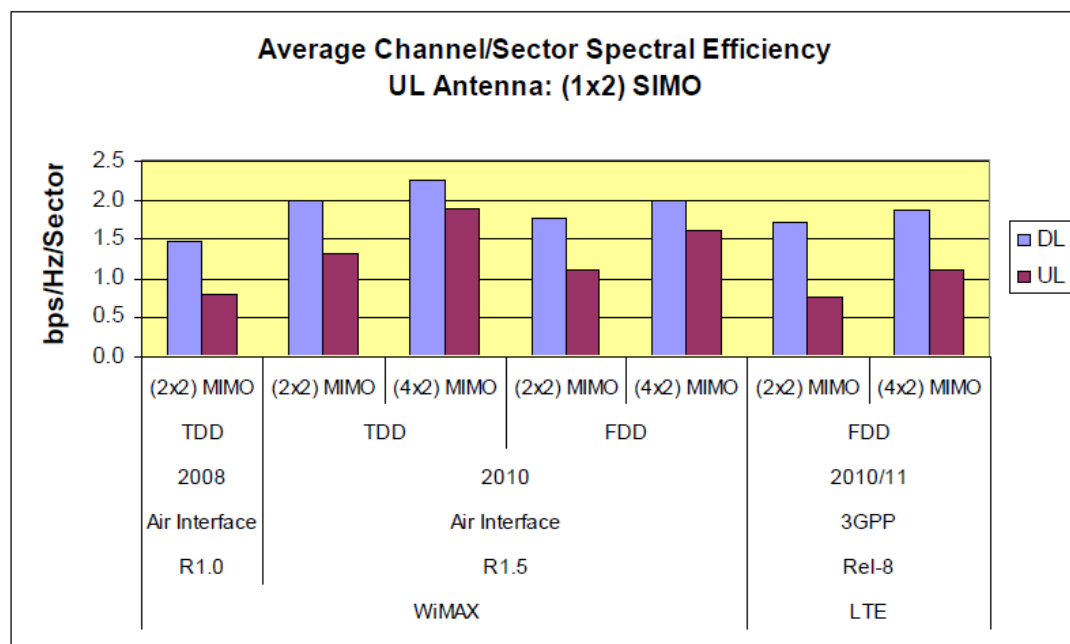
Az LTE technológia legnagyobb előnye természetesen a GSM családdhoz való tartozás. Továbbá az alacsonyabb frekvenciasáv miatti jobb terjedési viszonyok jobb területi lefedettséget jelent rural területeken.

A WiMAX jobban használja ki a rádió csatornát és most már az UMTS frekvenciasávjához közeli 2,3- ill. 2,5 GHz-es tartományban is használható, ezáltal minimálisan csökkent a terjedésből adódó előnye az LTE-nek.

A verseny még nem dőlt el, de nagy valószínűséggel azokon a területeken, ahol a GSM rendszert használják, ott az LTE lesz a nagysebességű mobil rendszer. Egyéb területeken, ill. alternatív megoldásként a WiMAX tovább fog terjedni.

A következő években mindkét technológia megmarad, de előbb-utóbb le fogja ezeket váltani a még újabb 5G technológia.

⁶ *Forrás: WiMAX Forum, WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard – April 2010



89. ábra. Spektrális hatások WiMAX és LTE technológiáknál⁷

19.6. Egyéb mikrohullámú kommunikációs rendszerek

A hozzáférési technológiák közé tartozó rendszerek:

- Tetra → Terrestrial Trunked Radio (Hivatalos magyar elnevezés EDR) (Nem a mikrohullámú sávban használják)
- Bluetooth V3.0 +HS → max. 24 Mb/s, 2,4 GHz-es sávban, 1 MHz-es csatorna
- DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) 1880 – 1900 MHz között
- Az UWB (Ultra Wide Band), elve a következő: a kisugárzott teljesítmény megegyezik, ha keskeny sávban, de nagy amplitúdóval sugárunk, vagy nagyon kis amplitúdóval, de igen nagy sávszélességgel. Ez utóbbi megoldásnak van egy igen vonzó tulajdonsága: a keskenysávú rendszereket gyakorlatilag nem zavarják, azok csak egy minimális (hatóságilag korlátozott) zajszint emelkedést tapasztalnak, amit a rendszer fading tartaléka bőven fedez. Lehetséges az UWB rendszerek beltéri és kültéri használata is. Ez utóbbi esetben csak mozgó állomások engedélyezettek, a maximális átlagos EIRP-sűrűség korlátozva van, a frekvencia függvényében csökkenő értékekkel
- Szoftver rádió → cél a berendezés minél nagyobb részét digitalizáljuk. Jelenleg alapvetően katonai és amatőr célokra használják, még nem érte el a mikrohullámú sávot

19.7. Ellenőrző kérdések

- 1) Sorolja fel a legfontosabb hozzáférési technológiákat!
- 2) Milyen front-end kialakításúak a modern P-MP rendszerek?

⁷ Megjegyzés: 2009 évi összehasonlítás, ma már mindkét technológia előrébb tart.

- 3) Hogyan jellemezné röviden az IP alapú P-MP rendszereket?
- 4) Hasonlítsa össze a 802.11b szabvány szerinti és a 802.11a szabványnak megfelelő WLAN rendszereket!
- 5) Minek köszönhető a legújabb, 802.11n szabványú WLAN nagy sebessége?
- 6) Mekkora lehet maximálisan egy 50 mW-os, 2,4 GHz-es Wi-Fi adó antennájának a nyeresége? (Mint ismeretes a 2,4 GHz-es sávban a megengedett maximális EIRP = 20 dBm)
- 7) Sorolja fel azokat a megoldásokat, amelyek használatával a WiMAX technológia pillanatnyilag a leghatékonyabb csatorna-kihasználást teszi lehetővé a mobil rendszerek terén!
- 8) A WiMAX technológia miért használ „szolgáltatási osztályokat”?
- 9) A GSM rendszer milyen adatátviteli lehetőséget biztosít?
- 10) A HSPA (HSDPA/HSUPA) miben haladta meg a GSM technológiát?
- 11) Mi az UWB rendszerek lényege?

Mellékletek

20. Rövidítések

BC	Business Case (Költségelemzés)
BER	Bit Error Rate (bit hiba arány)
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CSI	Channel State Information (csatorna állapot információ)
DAB	Digital Audio Broadcasting (digitális hang műsorszórás)
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DSB	Direct Satellite Broadcasting (Distributed Satellite Broadband)
DSB	Double Side Band
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
DTR	Down Time Ratio (kiesési időarány)
DVB	Digital Video Broadcasting (digitális televízió műsorszórás)
ECC	Electronic Communications Committee
ECC/DEC	Electronic Communications Committee Decision
ECC/REC	Electronic Communications Committee Recommendations
EDR	Egységes Digitális Rádiórendszer
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (Effective Isotropic Radiated Power)
ERP	Equivalent Radiated Power
F/B	Front to Back ratio (előre – hátra viszony)
FDD	Frequency Division Duplexing (frekvencia osztásos duplexálás)
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transformation (gyors Fourier transzformáció)
FM	Fading Margin (fadingtartalék)
FNFT	Frekvenciasávok Nemzeti Felosztási Táblázata
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IDU	Indoor Unit (Beltéri egység)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation (inverz gyors Fourier transzformáció)
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization
IP	Internet Protocol
ISI	Intersymbol Interference (szimbólumok közötti interferencia)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (ipari, tudományos és orvosi)
ITU	International Telecommunications Union (Nemzetközi Távközlési Unió)
ITU-R	International Telecommunications Union Radiocommunication Sector
ITU-T	International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector

LOS	Line of Sight (van optikai átlátás)
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control (közeg hozzáférés vezérlés)
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (többszörös bemenet – többszörös kimenet)
MISO	Multiple-Input Single-Output (többszörös bemenet – egy kimenet)
MLLN	Managed Leased Line Network
MTBF	Mean Time Between Failures (két meghibásodás közötti átlagos idő)
MTTR	Mean Time to Recovery (átlagos javítási idő)
MU MIMO	Multi-User MIMO
NFC	Near Field Communication
NLOS	Non Line of Sight, or Near Line of Sight (nincs optikai átlátás, vagy csak részben van optikai átlátás)
NPV	Net Present Value (Nettó jelenérték)
ODU	Outdoor Unit (Kültéri egység)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (orthogonális frekvencia osztásos multiplexálás)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (orthogonális frekvencia osztásos többszörös hozzáférés)
PAPR	Peak to Average Power Ratio (a csúcs- és az átlagteljesítmény aránya)
PBP	Pay Back Period (Megtérülési idő)
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
P-MP	Point to Multipoint (pont – többpont)
P-P	Point to Point (pont – pont)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (négyállapotú amplitúdó moduláció)
QoS	Quality of Service (szolgáltatás minősége)
RAT	Rádió Alkalmazási Táblázat
RFID	Radio Frequency Identification
S/N	Signal-to-Noise Ratio (Jel – zaj viszony)
SAR	Specific Absorption Rate
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDMA	Space Division Multiple Access (tér osztásos többszörös hozzáférés)
SIMO	Single-Input Multiple-Output (egy bemenet – többszörös kimenet)
SRD	Short Range Devices
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
STBCs	Space-Time Block Codes (tér-idő blokk kódok)
STC	Space-Time Coding (tér-idő kódolás)
STTCs	Space-Time Trellis Codes (tér-idő Trellis kódok)

TDD	Time Division Duplexing (idő osztásos duplexálás)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra Wide Band
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WARC	World Administrative Radio Conference
WAS	Wireless Access Systems
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN (Wi-Fi)	Wireless Local Area Network (Wireless Fidelity)
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network (vezeték nélküli nagyvárosi hálózat)
WRC	World Radiocommunication Conference
XPD	Cross Polar Discrimination (keresztpolarizációs csillapítás)

21. Ajánlott irodalom

- [1.] World Radiocommunication Conference 2007 (WRC-07), „Radio Regulations” Edition of 2008
- [2.] ITU-R, “F Fixed service”, “P Radiowave propagation”, “SM Spectrum management”
- [3.] 346/2004. (XII. 22.) Korm. Rendelete a frekvenciasávok nemzeti felosztásának megállapításáról (A 167/2005. (VIII. 24.) Korm. rendelettel, a 19/2006. (I. 31.) Korm. rendelettel, az 59/2006. (III. 21.) Korm. rendelettel, a 295/2007. (XI. 9.) Korm. rendelettel, a 118/2008. (V. 8.) Korm. rendelettel, a 254/2008. (X. 18.) Korm. rendelettel, a 182/2009. (IX. 10.) Korm. rendelettel a 264/2009. (XI. 27.) Korm. rendelettel és a 162/2010. (V. 7.) Korm. rendelettel 2010. május 22-i hatállyal módosított, egybeszerkesztett változat)
- [4.] 35/2004. (XII. 28.) IHM rendelete a frekvenciasávok felhasználási szabályainak megállapításáról (A 10/2005. (VIII. 24.) IHM rendelettel, a 2/2006. (III. 21.) IHM rendelettel, a 6/2006. (V. 17.) IHM rendelettel, a 94/2007. (XI. 23.) GKM rendelettel, a 118/2008. (V. 8.) Korm. rendelettel, a 28/2008. (X. 21.) KHEM rendelettel, a 33/2008. (XI. 27.) KHEM rendelettel, a 10/2009. (XI. 27.) MeHVM rendelettel és a 11/2010. (V. 7.) MeHVM rendelettel 2011. január 1-jei hatállyal módosított, egybeszerkesztett változat)
- [5.] Steve Gardner, “An Overview of Turbo Decoding for IS-2000”, 3 June 1999, Istari Design, Inc. Technical Note
- [6.] Dr. Istvánffy Edvin, „Tápvonalok, antennák, hullámterjedés”, Tankönyvkiadó, Budapest, 1967
- [7.] Dr. Almásy György, „Mikrohullámú kézikönyv”, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973
- [8.] Szekeres Béla, Nagy Lajos, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszék: „Antennák és hullámterjedés Jegyzet”, 2002
- [9.] Géher Károly, Híradástechnika, Műszaki Könyvkiadó, 1993
- [10.] Dr. Kenderessy Miklós, „Mikrohullámú vételtechnika és vevőberendezések”, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1992
- [11.] International Radio Consultative Committee, „Satellite Communications handbook”, International Telecommunication Union, Geneva, 1988
- [12.] Per H. Lehne and Magne Pettersen, “An overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems”, IEEE Communications Surveys, Fourth Quarter 1999, vol. 2 no. 4
- [13.] Angeliki Alexiou, Martin Haardt, “Smart Antenna Technologies for Future Wireless Systems: Trend and Challenges”, IEEE Communications Magazine, September, 2004
- [14.] “IntelliCell®: A Full Adaptive Approach to Smart Antennas”, ArrayComm White Paper, 2002
- [15.] George Jöngren, Mikael Skoglund, “Combining Beamforming and Orthogonal Space-Time Block Coding”, signal Processing, Signals, Sensors and Systems, Royal Institute of Technology, February 21, 2001
- [16.] Dr. T. Aaron Gulliver, “Space Time Block Coding for Wireless Communication System”, Presentation on Dept. of Electrical and Computer Engineering University of Victoria, October 12, 2004
- [17.] Dr. Imre Sándor, Fazekas Péter, Szabó Sándor, “3GPP Long Term Evolution (LTE) hálózatok gerinchálózati kérdései: Service Architecture Evolution

- (SAE)”, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék, ea. július, 2010
- [18.] Gérard Barué, “Microwave Engineering Land & Space Radiocommunications”, a John Wiley & Sons, Inc., Publication 2008
 - [19.] IEEE Std 802.16-2001: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 6 December 2001
 - [20.] IEEE Std 802.16a™-2003 (Amendment to IEEE Std 802.16™ -2001), IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz
 - [21.] IEEE Std 802.16e™-2005: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems
 - [22.] Doug Gray, “Comparison Between Time Division Duplex and Frequency Division Duplex in Fixed Wireless Access Point-to-Multipoint Systems”, Ensemble Communications, White Paper, July 30. 2002
 - [23.] David Gesbert, Member, IEEE, Helmut Bölcskei, Member, IEEE, Dhananjay A. Gore, and Arogyaswami J. Paulraj, Fellow, IEEE, “Outdoor MIMO Wireless Channels: Models and Performance Prediction”, IEEE Transactions On Communications, Vol. 50, No. 12, December 2002
 - [24.] Helmut Bölcskei, Senior Member, IEEE, Moritz Borgmann, Student Member, IEEE, and Arogyaswami J. Paulraj, Fellow, IEEE, “Impact of the Propagation Environment on the Performance of Space-Frequency Coded MIMO-OFDM”, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. 21, No. 3, April 2003
 - [25.] Claude Oestges, Vinko Erceg, Senior Member, IEEE, and Arogyaswami J. Paulraj, Fellow, IEEE, “A Physical Scattering Model for MIMO Macrocellular Broadband Wireless Channels”, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. 21, No. 5, June 2003
 - [26.] Robert W. Heath, Jr., Member, IEEE, and Arogyaswami J. Paulraj, Fellow, IEEE, “Linear Dispersion Codes for MIMO Systems Based on Frame Theory”, IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 50, No. 10, October 2002
 - [27.] Ed Agis, Henry Mitchel, Shlomo Ovadia, Selim Aissi, Sanjay Bakshi, Prakash Iyer, Masud Kibria, Christopher Rogers, James Tsai, “Global, Interoperable Broadband Wireless Networks: Extending WiMAX Technology to Mobility”, Intel® Technology Journal, August 20, 2004
 - [28.] WiMAX Forum: WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard - April 2010
 - [29.] L. Hanzo, University of Southampton, UK, J. S. Blogh, Anritsu, UK, S. Ni, Panasonic Mobile Communication, UK: “3G, HSPA and FDD versus TDD Networking Smart Antennas and Adaptive Modulation, Second Edition”, IEEE Communications Society, Sponsor, John Wiley & Sons, Ltd. Copyright c 2008 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
 - [30.] Ramakrishna Janaswamy, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, U.S.A.: „Radiowave Propagation And Smart Antennas For Wireless Communications”, Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2002

- [31.] Mindel De La Torre, Chief, International Bureau, Federal Communications Commission: ““All for Broadband – Broadband for All” The U.S. National Broadband Plan, presentation in Budapest, Hungary March 3, 2011
- [32.] Dr. Mike Willis: “Fixed Systems” Course Notes, <http://www.mike-willis.com/>
- [33.] Mehrbod Mohajer, Ramin Khosravi, Mehrnoosh Khabiri: “Flat Fading Modeling in Fixed Microwave Radio Links Based on ITU-R P.530-11”, Iran Telecommunication Research Center (ITRC), 2006
- [34.] Bakki Péter: “A troposzférikus szcintilláció hatása a műholdas távközlésre” BME Villamosmérnöki és Informatika Kar, Szélessávú Hírközlő rendszerek és Villamosságtan tanszék, Híradástechnika, 2004. 04.
- [35.] Steve Ellingson: “Smart Antenna Technologies”, IEEE Workshop on New & Emerging Technologies Rutgers University • January 18, 2001
- [36.] Ed Agis, Intel Communications Group, Intel Corporation, Henry Mitchel, Intel Communications Group, Intel Corporation, Shlomo Ovadia, Intel Communications Group, Intel Corporation, Selim Aissi, Corporate Technology Group, Intel Corporation, Sanjay Bakshi, Corporate Technology Group, Intel Corporation, Prakash Iyer, Corporate Technology Group, Intel Corporation, Masud Kibria, Corporate Technology Group, Intel Corporation, Christopher Rogers, Corporate Technology Group, Intel Corporation, James Tsai, Corporate Technology Group, Intel Corporation: “Global, Interoperable Broadband Wireless Networks: Extending WiMAX Technology to Mobility”, Intel® Technology Journal, Volume 08 Issue 03 Published, August 20, 2004
- [37.] Hassan Yaghoobi, Intel Communications Group, Intel Corporation, “Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 WirelessMAN”, Intel® Technology Journal, Volume 08 Issue 03 Published, August 20, 2004
- [38.] Trevor Manning: “Microwave Radio Transmission Design Guide”, ARTECH HOUSE, 685 Canton Street Norwood, MA 02062, 2009