



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

TDK dolgozat

Adaptív moduláció Q/V sávú műholdas összeköttetésen

Hegedűs Gábor

KONZULENS:

Dr. Csurgai-Horváth László

(BME HVT)

BUDAPEST, 2016

Tartalomjegyzék

1. Tartalomjegyzék

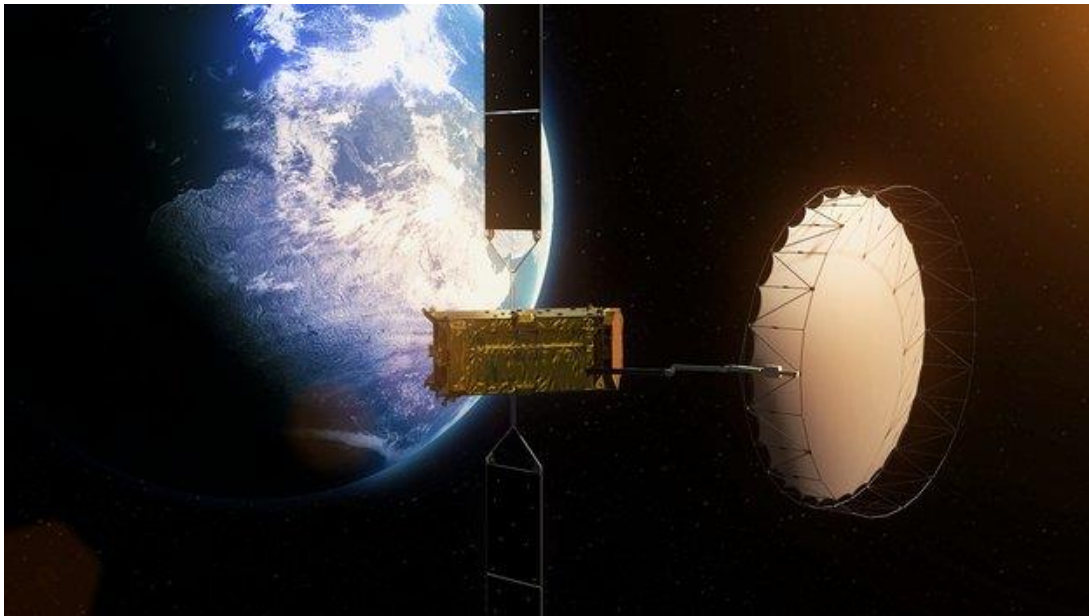
1	Bevezetés.....	3
1.1	Egy emeletes busz az úrben	3
1.2	A kísérlet résztvevői	4
1.3	A probléma	6
2	DVB-S (-DSNG) és DVB-S2 szabványok áttekintése	7
2.1	A régi és új szabvány konstellációs ábrái.....	9
3	Légköri csillapítás.....	11
3.1	Légköri gázok csillapítása	11
3.2	Esőcsillapítás.....	11
3.2.1	Szakaszcsillapítás számítása	12
3.2.2	Az esőintenzitás figyelembevétele	13
3.2.3	Eredmények.....	16
4	Mérési eredmények	19
4.1	Próbaadás.....	19
4.2	A csomaghiba analizátor	21
5	Az eredmények kiértékelése	22
6	Összegzés.....	25
7	Irodalomjegyzék	26
8	Melléklet.....	28
8.1	ITU-R P.839 esőmagassági térkép (az adatbázis mellé) [8]	28
8.2	ITU-R P.838 esőintenzitás térkép [12]	29
8.3	Egységnyi úthosszra eső esőcsillapítás kiszámításához szükséges k és α paraméterek meghatározása 1-1000GHz-ig [11]	30
8.4	Atmoszferikus gázok eredő csillapítása [13]	32
8.5	Esőintenzitásokhoz tartozó csillapítás számításának részeredményei	33

1 Bevezetés

1.1 Egy emeletes busz az űrben

Az Alphasat jelenleg az Európában valaha épített legnagyobb telekommunikációs célú műhold. Fő célja nagysebességű kommunikáció biztosítása a kiterjesztett L sávban (1-2 GHz) szárazföldi és tengeri végpontok között (INMARSAT rendszer támogatása) több mint 750 csatornán.

A 6,65 tonna össztömegű műholdat 2013 július 25-én indították Francia Guyanából. Tervezett élettartama 15 év, amihez 3,17 tonna üzemanyagra van szüksége.



1. ábra: Az ALPHASAT látványterve a 11 méteres reflektorral [1.]

Az új double decker fantázianevű Alhabus platform 4 további tudományos kísérleti eszközt (payload) is hordoz, melyek közül a TDP5 (Technology Demonstration Program) vagy Aldo Paraboni Q/V band payload új kereskedelmi kommunikációs frekvenciák használatának lehetőségeit vizsgálja.



2. ábra: A TDP5 payload [1.]

Mivel a földi és műholdas frekvenciasávok egyre telítettebbek és elégtelen kapacitást is nyújtanak a mai igényekhez mérten, a jelenleg zajló fejlesztések során a felső frekvenciahatárokat minél inkább kitolni igyekeznek.

A fenti payload Q/V sávban (36-46, 46-56 GHz) biztosít kommunikációt a kísérletben részt vevő földi vevőállomások között. Ezzel párhuzamosan Ka (20-36 GHz) és Q (36-46 GHz) sávi beacon jelekkel (modulálatlan vivő kisugárzásával) vizsgálja, hogyan hat a Föld légköre e frekvenciatartományokra. Érdeemes továbbá megemlíteni, hogy ez a frekvenciatartomány az antennák mérete révén lehetővé teszi repülőgépek földi összekötését is azzal a fontos előnnyel, hogy a felhők feletti csillapítás elhanyagolhatóan kicsi.

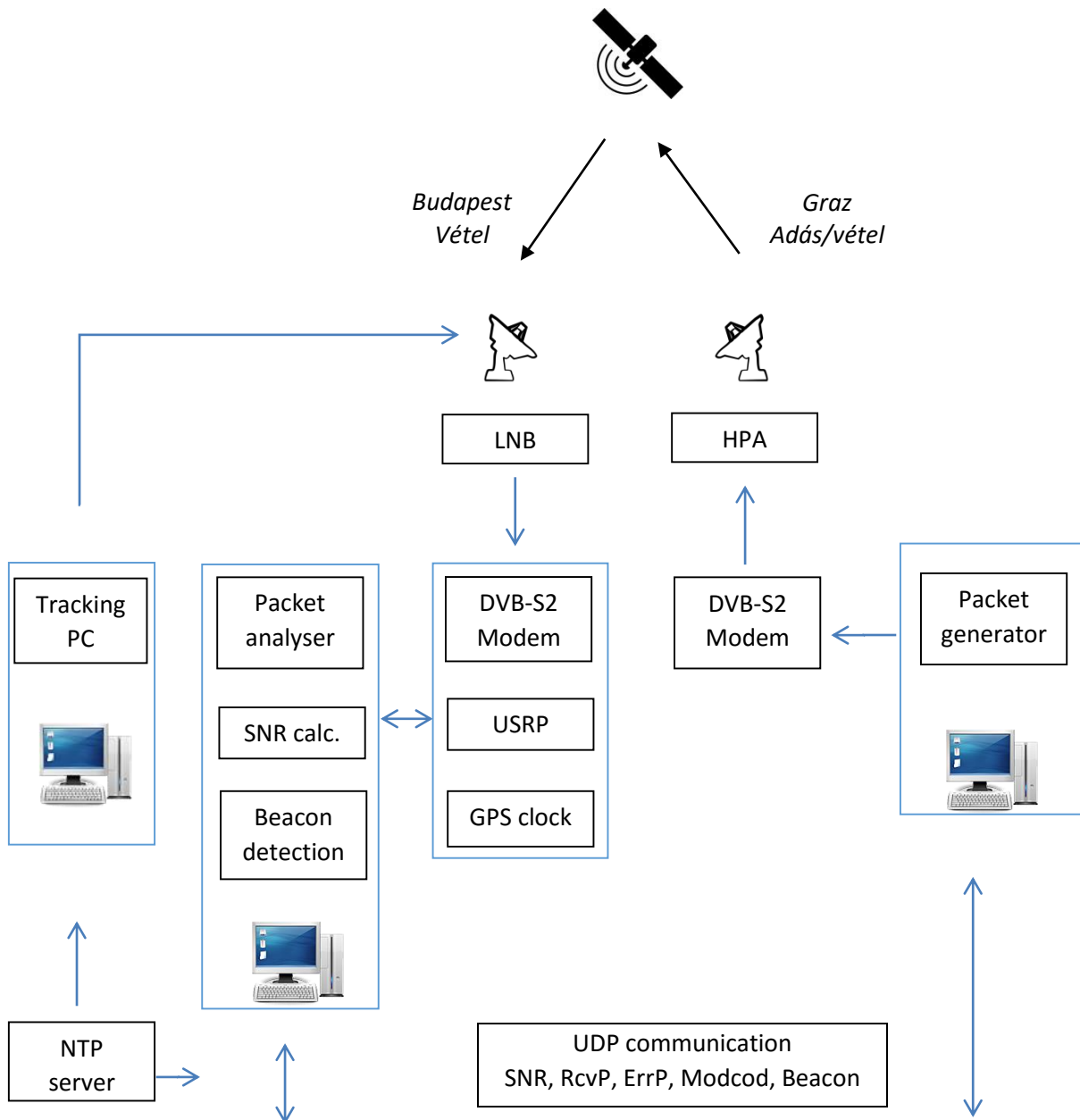
1.2 A kísérlet résztvevői

Az Alphasat Aldo Paraboni űrkutatási programja Olaszországban indult az ASI (Italian Space Agency) támogatásával 2003-ban.

Olaszországban 3 állomás van (Tito - adó/vevő, Spino d'Adda - adó/vevő, Monza - vevő), Ausztriában, Grazban található még egy kétirányú és Magyarországon, Budapesten a BME V1 épületében egy csak vételre alkalmas állomás.

A pontos sávközépi vételi frekvenciák: 37,85 – 38,15GHz, a műholdra irányuló uplink frekvenciák pedig 47,85 és 48,15GHz.

A kísérlet magyar vonatkozása az adaptív moduláció támogatása az osztrák DVB-S2 adás műholdról visszasugárzott vételével és annak elemzésével, majd a minőségre vonatkozó paraméterek eljuttatásával a grazi feladóállomásra. Ennek vázlatát alább látható.



3. ábra: A kísérleti összeállítás szerkezetének áttekintése

A fenti ábra a BME-HVT és a grazi Joanneum Research kutatóintézet által közösen végzett kísérletet mutatja be. A kísérlet lényege, hogy a grazi feladóállomásról DVB-S2 adatcsomagokat juttatnak fel a műholdra, amely azokat módosítás nélkül relézi a budapesti vevőállomás felé. A vett adatcsomagokat analizálva megállapítható a DVB-S2 csomag-hibaarány, továbbá jel/zaj viszony mérésre is van lehetőség.

A vételi minőségre jellemző adatokat a budapesti állomás TCP/IP kapcsolaton keresztül visszajuttatja a grazi állomásra, ahol lehetőség van a műholdas átvitel során használt modulációs mód megváltoztatására. Így romló időjárási viszonyok között is lehetővé válik az adatátvitel, esetenként természetesen kisebb átviteli sebességgel. A fentiekre a DVB-S2 szabvány nyújt lehetőséget.

A vevőállomás része egy Newtec EL-470 műholdas modem[3.], amely DVB-S és DVB-S2 modulációra illetve demodulációra képes. A később bemutatásra kerülő vett jel csomag-hibaaarány mérése a fenti modem által szolgáltatott adatfolyam alapján működik.

A következő ábrán a BME-HVT vevőállomásának antennája látható.



4. ábra: A BME-HVT vevőantennája

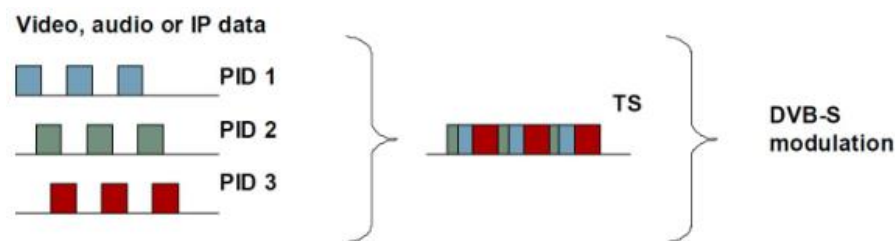
1.3 A probléma

Mivel az ilyen összeköttetéseknel fontos a nagy megbízhatóság, különös tekintettel kell lenni a csatorna jelcsillapító hatásaira. Elsősorban az eső okozhat nagy problémát, esetenként akár a kapcsolat megszakadáshoz is vezethet.

A tervezés terjedési modellek és statisztikai, illetve mérési adatok vizsgálatával történik. Így kidolgozható olyan eljárás, amikor a modulációs mód időjáráshoz (vételi minőséghez) igazított változtatásával a rendszer mindig optimalizálja az adást a megbízható működés érdekében.

2 DVB-S (-DSNG) és DVB-S2 szabványok áttekintése

A DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite) az első generációja a digitális műholdas adás szabványosításának (1997). Ez még csak MPEG-2 átvitelre volt tervezve, így általános adat átvitelére Multi Protocol Encapsulation-t kell alkalmazni, ami MPEG formátumba csomagolja az adatot. A DVB-S QPSK modulációt használ konvolúciós Viterbi és Reed Solomon hibajavító kódolással.



5. ábra: DVB-S MPEG adatfolyam –Transport Stream- előállítás tetszőleges bemenő adatból [3.]

A DVB-DSNG (Digital Satellite News Gathering – pl. autóra szerelt műholdas adóállomástól műholdon keresztül a stúdióba) a 8PSK és 16QAM modulációkkal kibővített változata a DVB-S-nek.

A DVB-S2 fejlesztésének fő oka a piaci igények követése (2005):

- UHDTV/3DTV (nagy sávszélesség) és IPTV (nagy forgalom) gyors terjedése a hétköznapokban
- Jobb tömörítési algoritmusok szükségessége (MPEG)
- Hatékonyabb adattovábbítás elérése

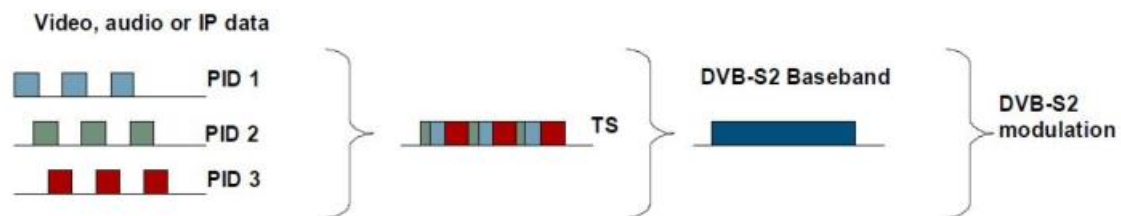
Ez utóbbi különösen fontos az űrszektorban, az eleve nagy költségek és a rendelkezésre álló energia kritikus volta miatt. A műhold- Föld kapcsolatokat tovább bonyolítja a folyamatosan változó időjárás (különösen az eső, mivel a ~10GHz-es tartományban a hullámhossz az esőcseppek méretével összemérhető, így jelentős az abszorpció és a reflexió), amely jelentős fading eseményeket okozhat.

A további gazdasági nehézségekről, mint a nagy pénzvesztésekkel járó sikertelen indítások vagy a földi konkurenciák jelenlétéről nem is beszélve.

Az új szabvány több mint 30%-os sávszélesség megtakarítást jelent (a frekvenciasávok bérlése nagyon drága!). Továbbá folyamatosan változtatható kódolást és modulációt tesz lehetővé a Shannon-határ extrém megközelítésével (valószínűleg emiatt nem is lesz több DVB-S szabvány).

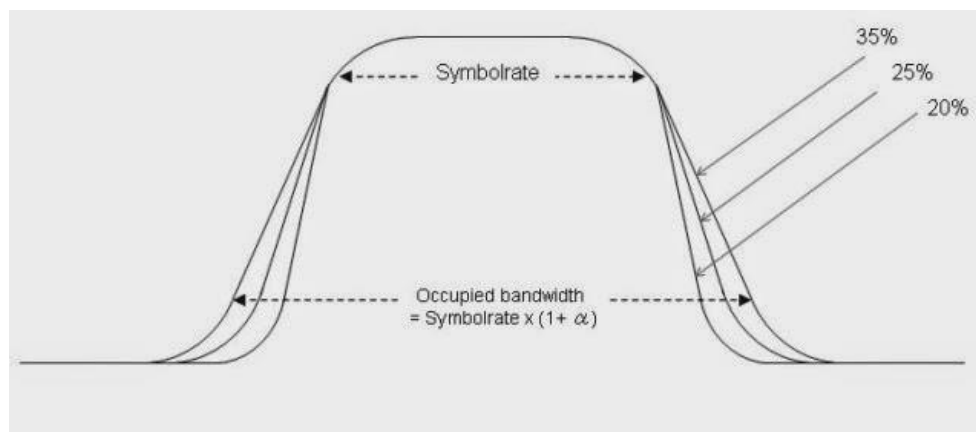
Az új hibajavító kódolásnak (Read Solomon helyett BCH külső kódolás + LDPC belső kódolás [Viterbi helyett]) és élesebb 20%-25%-35%-os Roll-off faktornak köszönhetően 40%-al nagyobb kapacitás érhető el.

Új keretkezési struktúra: „Baseband”



6. ábra: DVB-S2 Baseband keretkezés [3.]

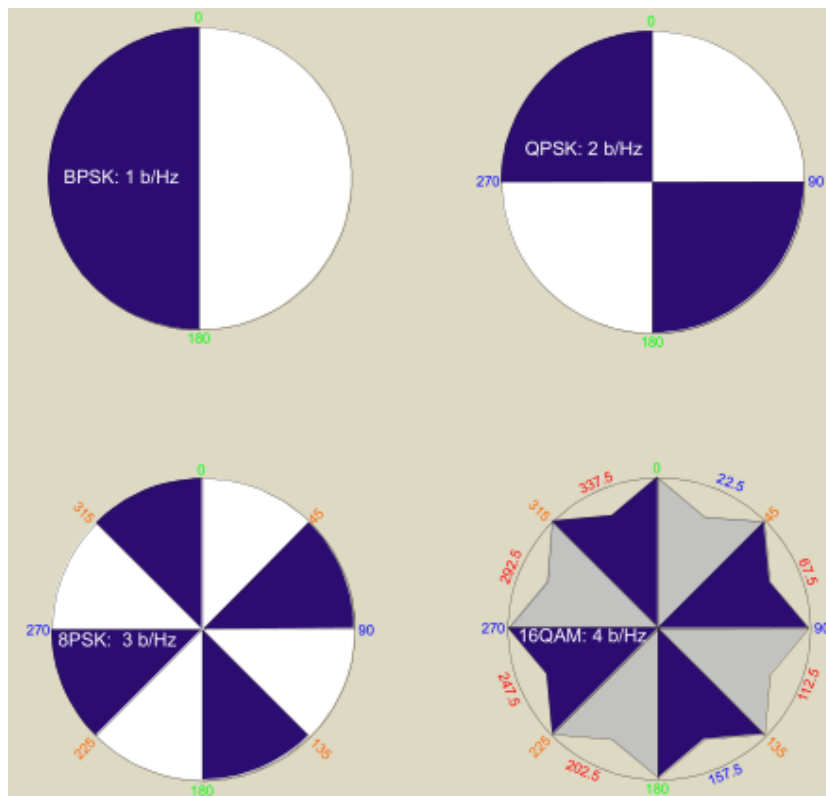
Roll-off faktor: A tökéletes négyzetjel által elfoglalt sávszélesség végtelen. Ahhoz, hogy képesek legyünk ezt a jelet (gazdaságosan) továbbítani, csökkenteni kell az elfoglalt sávszélességet. Ezt egy „emelt koszinuszos szűrővel” érhetjük el. Így a négyzetjel időtartományban lekerekedik és a spektrumának burkolóját az alábbi ábra szemlélteti. A meredekség és az elfoglalt sávszélesség a roll-off paraméterrel állítható be.
 $BW = \text{symbol-rate} \cdot (1 + \text{roll-off-factor})$



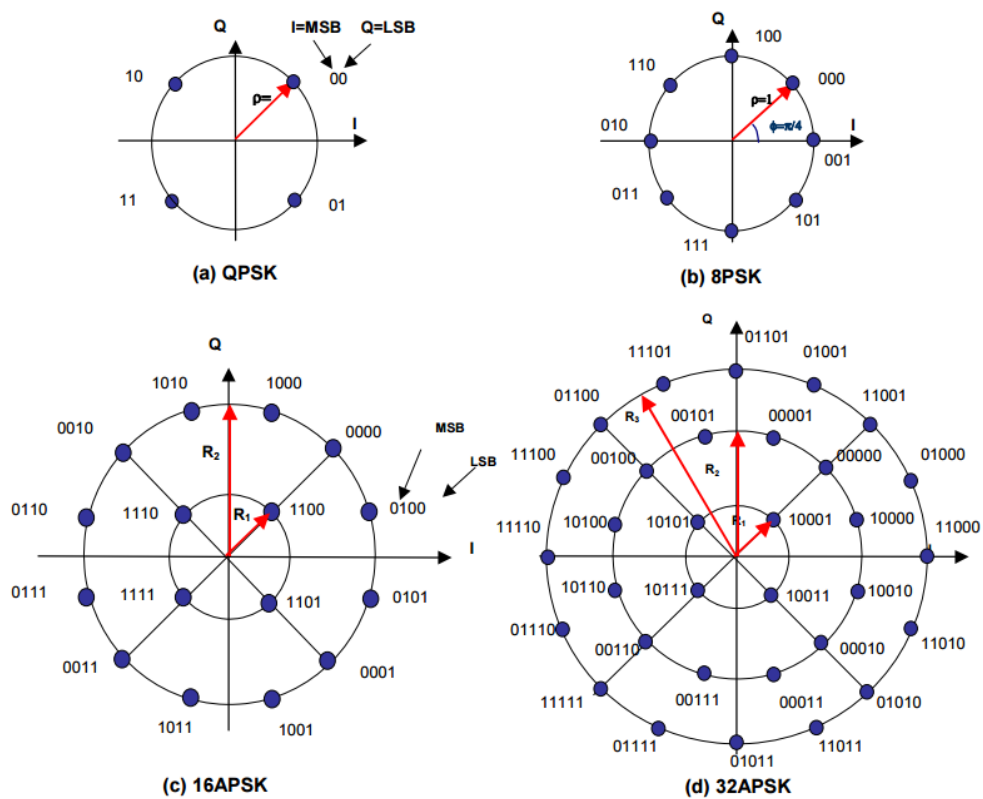
7. ábra: emelt koszinuszos szűrő karakterisztikája a Roll-off faktor függvényében [4.]

- vízszintes tengely: frekvencia
- függőleges tengely: Szűrő átvitele (amplitúdó válasz)

2.1 A régi és új szabvány konstellációs ábrái



8. ábra: DVB-S konstellációs ábrái [5.]



9. ábra: DVB-S2 konstellációs ábrái [6.]

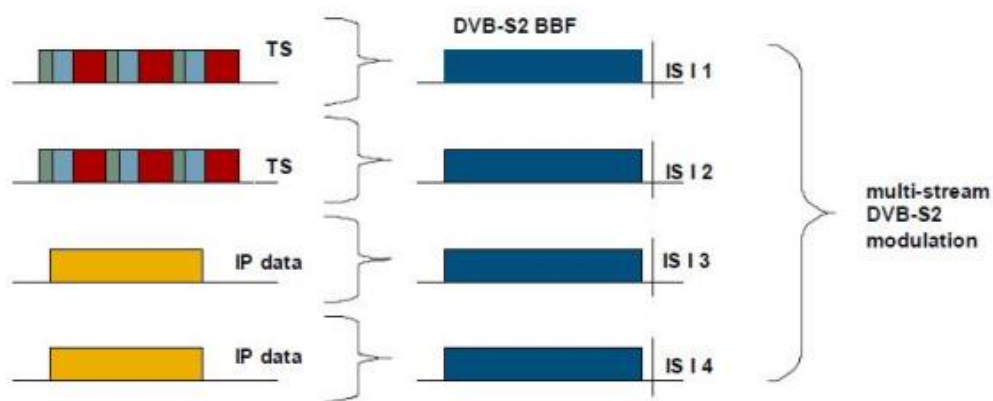
Az ábrákon látható, hogy olyan új modulációk, mint a 16APSK, illetve már a 32APSK is támogatott.

„Generic” mód: folyamatos vagy adatcsomagok továbbítására (IP, ATM... és nem csak MPEG4), valamint a 4-15%-os fejléc 2%-ra csökkent.

Akár minden adat frame saját paraméterekkel kódolható és ezek dinamikusan változtathatók a vételi viszonyoknak megfelelően.

DVB-S2 általános továbbítási modell: encapsulation → framing → transport

Multi-Stream: A DVB-S2 alkalmas különböző stream-ek sugárzására ugyanazon a vivőn eltérő baseband keretkezéssel, melyek Input Stream Identifier (ISI) címkékkel vannak megkülönböztetve.



10. ábra: DVB-S2 Multi-Stream előállítása tetszőleges adatbemenetből [3.]

3 Léggöri csillapítás

Egy Föld-műhold kapcsolat esetén a teljesítményveszteség sok komponensből tevődik össze:

- léggöri gázok által okozott csillapítás
- eső és egyéb csapadékok, illetve felhők
- szcintilláció és több utas terjedés
- egyéb léggöri események, mint például por- vagy homokvihár
- fókuszáltság és egyéb beállításokból eredő hibák
- a polarizáció változása a terjedés során

A fenti természeti hatásoknak mind megvan a maga karakterisztikája a jelszintre, de általános szabályként elmondható, hogy 10° -os elevációs szög felett csak a fentebb felsorolt első 2 (esetleg a 3.) hatást célszerű figyelembe venni. A mi esetünkben ez $35,2^\circ$, így élhetünk az említett elhanyagolásokkal.

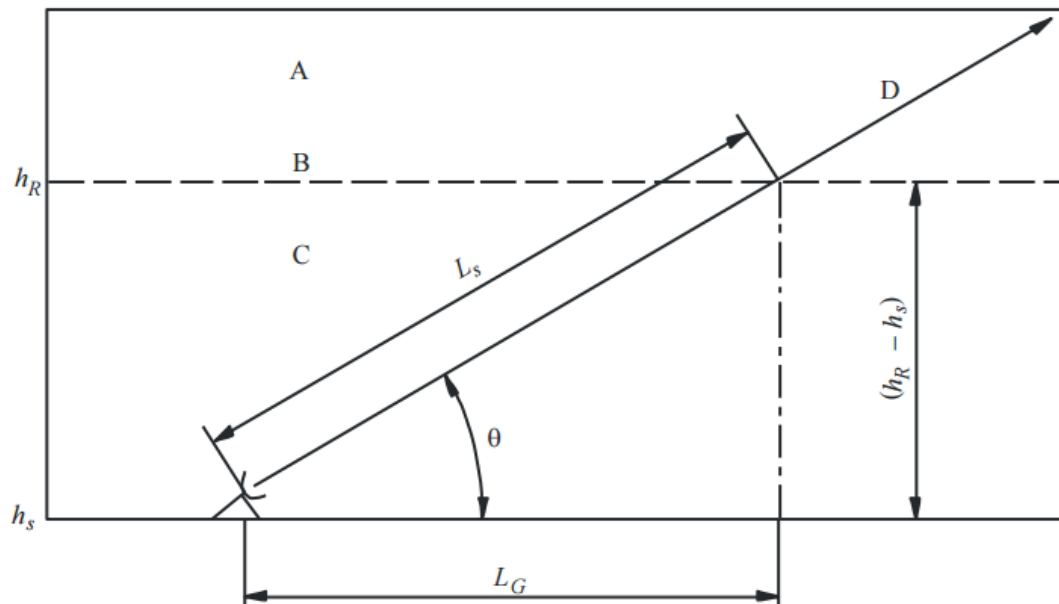
3.1 Léggöri gázok csillapítása

A gázok csillapítására az ITU-R P.676 ad becslést (10GHz alatt elhanyagolható). Valamint a fő léggöri gázok (nitrogén, oxigén, vízgőz, széndioxid) az adott kísérleti frekvenciákon nem okoznak számottevő fadinget (lásd melléklet 8.4).

A fenti hatások közül tehát az eső a domináns ezért ebben a dolgozatban ezzel foglalkozok részletesebben.

3.2 Esőcsillapítás

Mivel a műhold nem pontosan a vevőantenna felett van, a rádióhullámok útja ferdén szeli át a léggöret. Így az esőcsillapítás szempontjából fontos úthossz az ITU-R P618 ajánlás alapján számítható.



11. ábra: A kommunikációs csatorna szemléltetése [7.]

A: fagyott csapadék

B: esőmagasság

C: folyadék halmazállapotú csapadék

D: Föld-műhold szakasz

Az ITU-R P839 ajánlásból számítással közelíthető az éves átlagos esőmagasság (átlagos tengerszint feletti magassághoz képest) adott földrajzi koordinátákhoz [8.]

A BME vevőállomás pozíciója: 47,4777°; 19,0575° (északi szélesség, keleti hosszúság).

3.2.1 Szakaszcsillapítás számítása

$$h_R = h_0 + 0,36 \text{ km} \quad (1)$$

Ahol h_0 egy ITU által kiadott adathalmazból a koordináták alapján meghatározható: 2,704km.

$$\text{Így } h_R = 2,704 \text{ km} + 0,36 \text{ km} = 3,064 \text{ km} \quad (2)$$

Az Alphasat műhold elevációs szöge Budapestről nézve $\Theta=35,2^\circ$ [10].

A vevőantenna tengerszint feletti magassága $h_S = 120\text{m}$.

(V1 épület + épület magassága=104m+16m=120m)

$\Theta>5^\circ$ esetén a ferde szakasz hossza az esőmagasságig:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \Theta} = \frac{2,944\text{km}}{\sin (35,2^\circ)} = 5,107\text{km} \quad (3)$$

Megjegyzés:

- ha $\Theta < 5^\circ$: $L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin \theta} \text{ km}$ (4)

- ha $(h_R - h_S) \leq 0$, akkor az esőcsillapítás is 0.

L_G a ferde úthossz vízszintes vetülete:

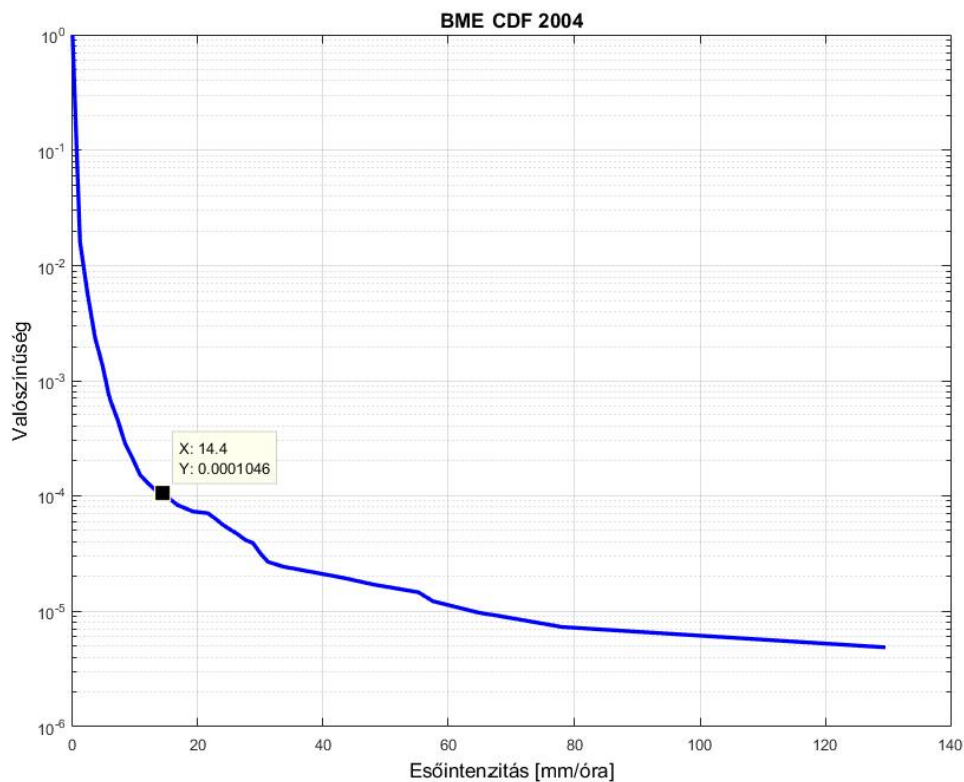
$$L_G = L_S * \cos \theta = 5,107 * \cos (35,2^\circ) = 4,173\text{km} \quad (5)$$

3.2.2 Az esőintenzitás figyelembevétele

Az esőintenzitás meghatározható az ITU-R P.838 ajánlás alapján is, de rendelkezésre állnak korábbi egyetemi mérési eredmények is, amik alapján a becslés pontosabb lehet, illetve figyelembe veszi az esetleges lokális hatásokat is.

R_{001} : az az esőintenzitás, ami egy évben 0,01% valószínűségű az adott területen (vagyis $(365*24*60)/10000 = 53$ perc évente).

A következő ábra az éves mért esőintenzitás komplementens eloszlásfüggvénye (CCDF), amely a 2004 évben a BME V2 épületének tetején elhelyezett mérőállomás adataiból származik.



12. ábra: A BME meteorológiai állomásának esőintenzitásra vonatkozó adatai 2004 évben [10.]

Az ábráról leolvasható

$$R_{001}=14,4\text{mm/óra.}$$

A mellékletben található esőintenzitási térkép alapján Magyarországra 42mm/h óra az R_{001} becslése. A viszonylag nagy eltérést az ajánlás és mért érték között a térkép felbontása indokolja, illetve a mérések ideje is eltérést okoz. A további számítások célszerűen a helyi, pontos eredményen alapulnak. Az egységnyi hosszra eső csillapítás a következő módon számítható:

$$\gamma_R = k(R_{001})^\alpha \text{ dB/km} \quad (6)$$

Ahol k és α értéke ITU-R P.838-ból meghatározható frekvenciafüggő együtthatók.

Ezen együtthatók többféleképpen is megállapíthatók, az ajánlásban lévő táblázatból, illetve a megadott képletek segítségével (lásd melléklet).

Egy megadott táblázatból az alkalmazott frekvenciákra:

1. táblázat: a kiolvasott α és k paraméterek [11.]

paraméter/frekvencia	38GHz	48GHz
α_{vertical} :	0,8552	0,7967
k_{vertical} :	0,3844	0,6037

A vízszintes redukálási faktor:

$$r_{001} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G Y_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (7)$$

A vertikális redukálási faktor:

$$v_{001} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \sqrt{\frac{L_G Y_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (8)$$

Az effektív úthossz:

$$L_E = L_R v_{001} \text{ km} \quad (9)$$

Ahol

$$L_R = \frac{L_G r_{001}}{\cos \theta} \text{ km} \quad (10)$$

Ha

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{001}} \right)^\circ > \Theta \quad (11)$$

Ellenkező esetben

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ km} \quad (12)$$

Valamint

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad (13)$$

Ha

$$|\varphi| < 36^\circ \quad (\text{nem teljesül})$$

Egyébként

$$\chi = 0^\circ.$$

φ a vevőállomás szélességi koordinátája: 47,4777 °.

Az eső által okozott addicionális szakaszcsillapítás tehát:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E [dB]. \quad (14)$$

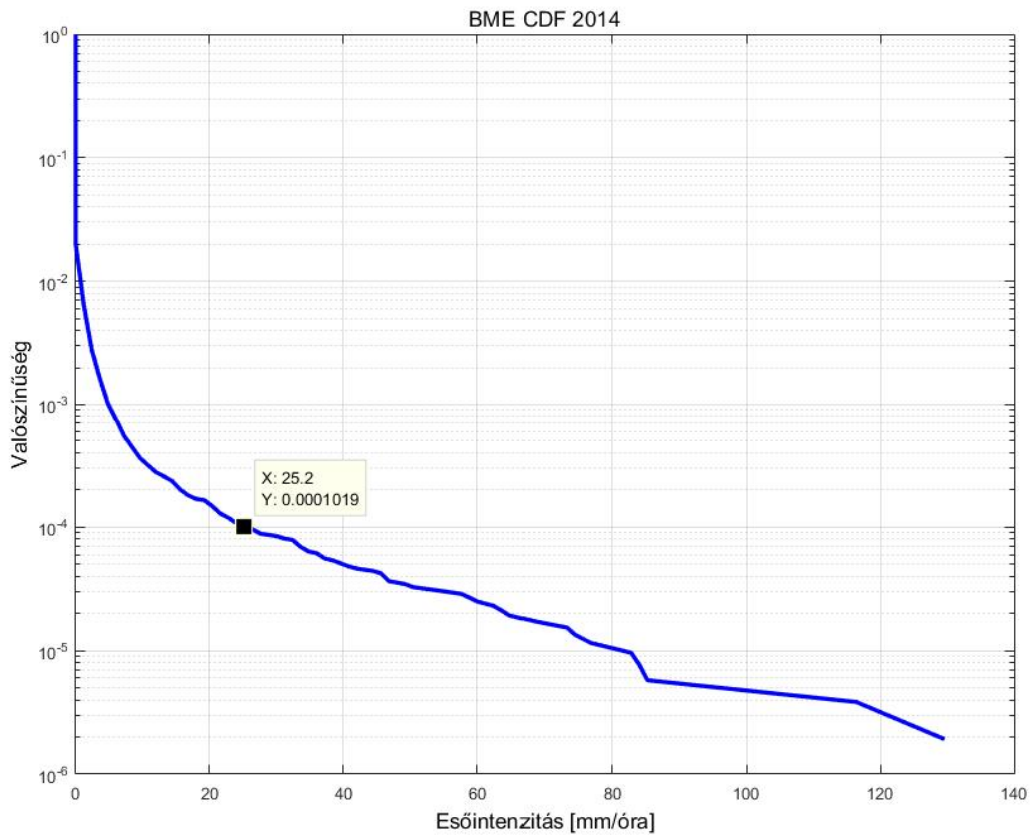
A fenti egyenleteket felhasználva kiszámítható az egyes esőintenzitások hoz tartozó éves előfordulás valószínűsége és az általa okozott csillapítás. Ezeket az adatokat a következő szakaszban láthatjuk.

3.2.3 Eredmények

2. táblázat: Esőintenzitások által okozott csillapítás

Esőintenzitás [mm/h]	Valószínűség	Éves előfordulás [perc:mp]	γ_R [dB/km]	A [dB]
1.2	0.01607	8446	0.4493	3.4854
2.4	0.00574	3017	0.8127	6.3050
3.6	0.002388	1255	1.1496	8.9183
4.8	0.001364	717	1.4702	11.4059
6	0.0006786	357	1.7793	13.8040
7.2	0.0004548	239	2.0796	16.1332
8.4	0.0002821	148	2.3726	18.4066
9.6	0.0002092	110	2.6596	20.6333
10	0.0001508	79:16	2.7541	21.3664
20	0.00007054	37:04	4.9822	38.6520
30	0.00003162	16:37	7.0472	54.6720
40	0.00001946	10:13	9.0129	69.9218
50	0.00001459	7:40	10.9079	84.6233
60	0.00000973	5:06	12.7485	98.9021
70	0.0000073	3:50	14.5449	112.8388
80	0.00000729	3:49	16.3044	126.4891
90	0.00000487	2:34	18.0323	139.8939
100	0.00000486	2:3	19.7326	153.0843

A jelenlegi vevőállomás helyén a V1 épület tetején jelenleg is folyamatosan rögzítésre kerül a pillanatnyi esőintenzitás értéke. A következőkben ezért az előző, 2004-es adatsorhoz képes 10 évvel később, 2014-ben mért éves esőintenzitás eloszlást mutatom be, továbbá az ebből származtatható számításokat.



13. ábra: A BME-HVT meteorológiai állomásának esőintenzitás méréseinek 2014-es kumulatív eloszlás függvénye

Ábráról leolvasva

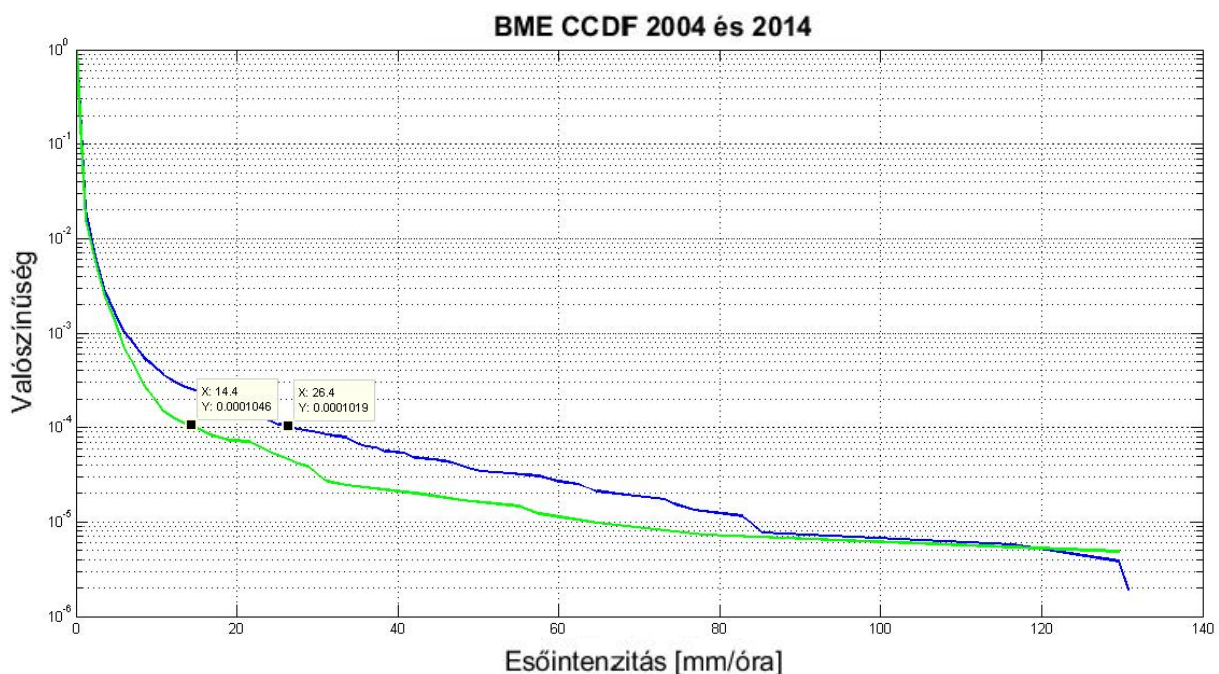
$$R_{001}=26,4\text{mm/óra}$$

Táblázatos formában pedig az egyes intenzitásértékekhez tartozó valószínűség, előfordulás időtartama és a csillapítás a következőkben látható.

3. táblázat: Esőintenzitások által okozott csillapítás

Esőintenzitás [mm/h]	Valószínűség	Éves előfordulás [perc]	γ_R [dB/km]	A [dB]
1.2	0.0201	10535	0.4493	3.4854
2.4	0.006459	3386	0.8127	6.3050
3.6	0.00278	1457	1.1496	8.9183
4.8	0.001632	855	1.4702	11.4059
6	0.001021	535	1.7793	13.8040
7.2	0.0007594	398	2.0796	16.1332
8.4	0.0005517	289	2.3726	18.4066
9.6	0.0004479	235	2.6596	20.6333
10	0.0003633	190	2.7541	21.3664
20	0.0003172	166	4.9822	38.6520
30	0.000148	77	7.0472	54.6720
40	0.00008459	44	9.0129	69.9218
50	0.00004806	25	10.9079	84.6233
60	0.00003268	17	12.7485	98.9021
70	0.00002499	13	14.5449	112.8388
80	0.0000173	9	16.3044	126.4891
90	0.000009612	5	18.0323	139.8939
100	0.000005767	3	19.7326	153.0843

A BME időjárás állomásának 2004-es és 2014-es esőintenzitás mérései szemléletesen összehasonlíthatók az alábbi ábrán.



14. ábra: 2004-es (zöld) és 2014-es (kék) esőintenzitás-adatok CCDF görbéi a BME meteorológiai állomás mérései alapján

4 Mérési eredmények

4.1 Próbaadás

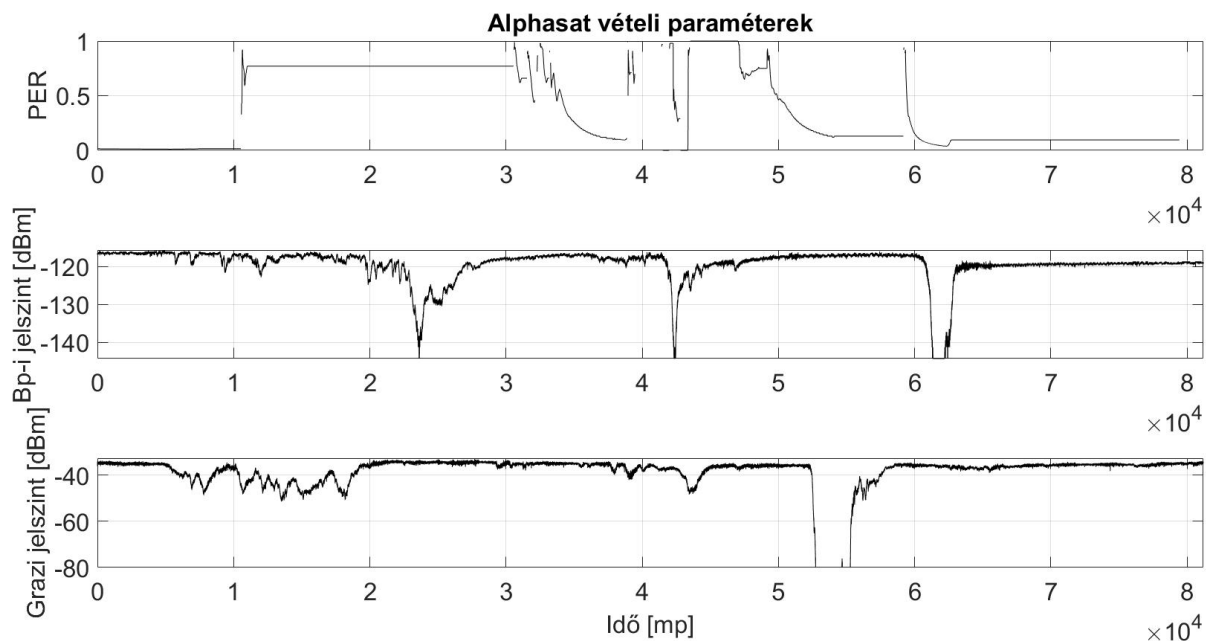
Ebben a szakaszban a BME-HVT műholdas vevőállomása és a grazi állomás által közösen végrehajtott több napos kísérleti DVB-S2 adás eredményeit ismertetem. Ez volt a BME vevőállomás első DVB-S2 vételi kísérlete, így az adatok kísérleti jellegét is ki kell hangsúlyozni. A kísérletben QPSK1/2 modulációval történt az adatcsomagok továbbítása a grazi feladóállomásról, amelyet a budapesti vevőállomás rögzített. Ezeknek az adatsoroknak az analízisét végeztem el a dolgozatomban, amelynek az eredményét az alábbiakban mutatom be.

Állandó QPSK1/2 moduláció mellett az alábbi eredmények szemléltetik a kapcsolat minőségét a három napos próba során (2016. szeptember 17-19). Az egyes blokkok 1-1 napi mérést reprezentálnak 0-24 óráig.

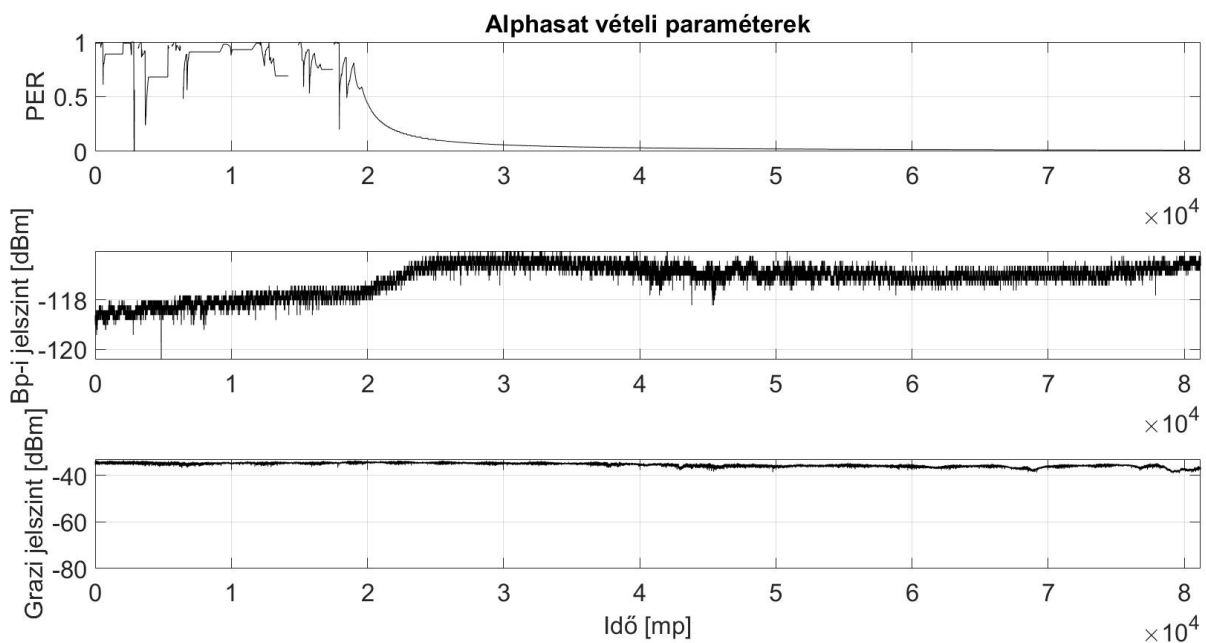
A legfelső idősor a Budapesten vett csomaghibaarány (Packet Error Rate), középen a budapesti (BME-HVT) vevőállomás beacon vételi jelszintje, alul pedig az osztrák állomáson rögzített beacon vételi szint látható.

A képeken jól látható, hogy amikor Budapesten romlott a vétel, mert esett az eső, akkor növekedett a hibásan vett csomagok aránya. Ez a 18-ai mérésen különösen szemléletes, mert akkor Ausztriában jó idő volt, Magyarországon viszont esett néhány órán keresztül, aminek hatása egyértelműen látszik a hibás csomagok arányán.

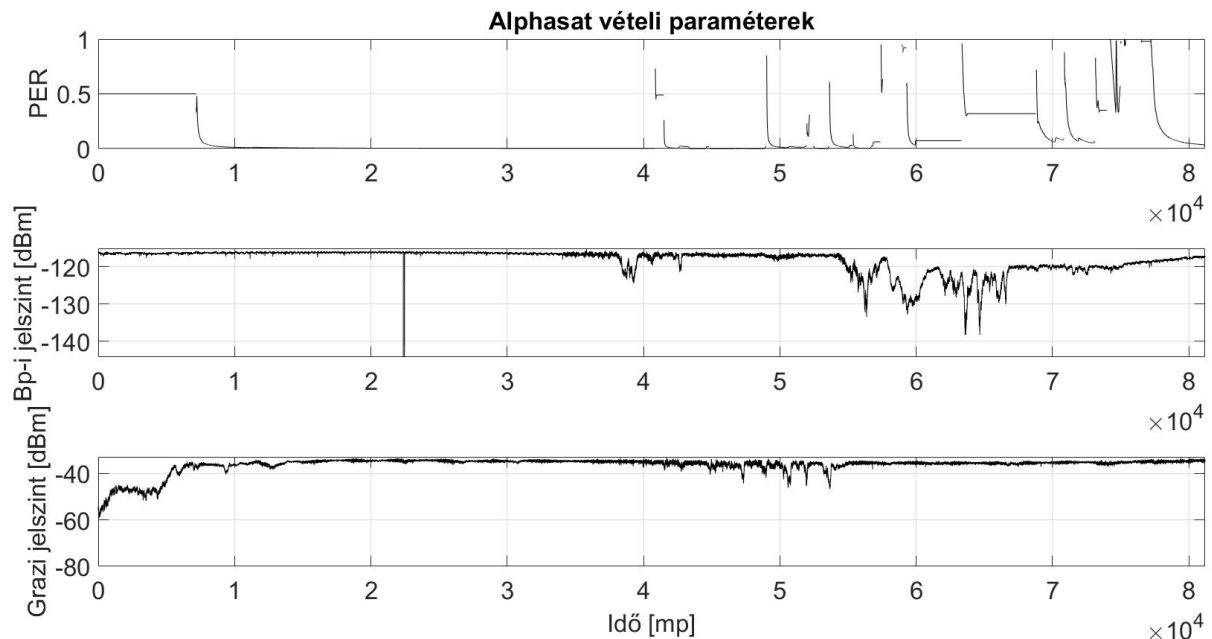
A PER értékeket az állomás Newtec EL-470 modemje szolgáltatja, az adatokat a következő fejezetben ismertetésre kerülő csomaghiba analízátor segítségével nyertük ki.



15. ábra: 2016.szeptember 17-i mérési eredmények fix QPSK1/2 moduláció mellett



16. ábra: 2016.szeptember 18-i mérési eredmények fix QPSK1/2 moduláció mellett



17. ábra: 2016.szeptember 19-i mérési eredmények fix QPSK1/2 moduláció mellett

4.2 A csomaghiba analízátor

A csomaghiba analízátor a grazi Joanneum Research intézet adó/vevőállomásában üzemelő szoftver egyszerűsített változata, amely közvetlenül éri el a modem adatkimenetét így a DVB-S2 csomagokat, és megállapítja az adatsebességet valamint a hibás és jó csomagok számát. Ehhez a modemen ki kell kapcsolni a CRC (ellenőrzőösszeg) számítását, hogy az minden csomagot továbbítson, ne szórja ki a hibásokat. Ezt a funkciót a program látja el. Hasonlóképpen, a grazi feladóállomáson üzemelő ugyanilyen EL-470 típusú modemben is ki van kapcsolva a CRC generálás.

Az SNR és beacon teljesítmény szint meghatározását a telepített infrastruktúra egyéb eszközei látják el (melynek központi eleme egy Linux alapú számítógép), de az ezekre vonatkozó információkat átadják az analízatornak is, ami végül egységes struktúrába szedve továbbítja a fenti adatokat a grazi állomásnak. Helyi adattároló funkciót viszont nem valósít meg.

5 Az eredmények kiértékelése

4. táblázat: Az egyes modulációs módokhoz tartozó elméleti és mért SNR határértékek [15]

MODCOD	Specified SNR threshold [dB]	Measured SNR threshold [dB]
QPSK-1/2	1.4	1.7
QPSK-3/5	2.8	3.2
QPSK-2/3	3.6	4.0
QPSK-3/4	4.3	4.6
QPSK-5/6	5.5	5.9
QPSK-8/9	6.6	7.0
8PSK-2/3	7.1	7.4
8PSK-3/4	8.4	8.8
16APSK-2/3	9.6	9.9
16APSK-3/4	10.5	11.0
16APSK-5/6	12.1	12.6
16APSK-8/9	13.3	14.0

5. táblázat: BME vevőállomásra vonatkozó link budget értékek [16]

MODCOD	SNR küszöbszint [dB]	BME-HVT veőállomás fade margin [dB]
QPSK 1/2	1,46	8,68
QPSK 3/5	2,86	7,28
QPSK 2/3	3,66	6,48
QPSK 3/4	4,36	5,78
QPSK 4/5	5,16	4,98
QPSK 5/6	5,56	4,58
QPSK 8/9	6,66	3,48
8PSK 2/3	7,16	2,98
8PSK 3/4	8,46	1,68
16APSK 2/3	9,66	0,48
16APSK 3/4	10,56	-0,42
16APSK 5/6	12,16	-2,02
16APSK 8/9	13,36	-3,22

Az 5. táblázat megadja a 10^{-5} PER-hez és 1Msymbol/s adatsebességhez tartozó elméleti SNR határértékeket az egyes modulációkhoz (3-as táblázat szerint) valamint a BME vevő állomás által megengedett addicionális fadinget.

A 12-es ábrából meghatározható, hogy évente átlagosan 8446 percig esik az eső valamilyen intenzitással Budapesten, a BME környékén. Vagyis (a 3-as táblázat alapján), ha a tiszta időben megengedhető legnagyobb sebességet biztosító modulációs módot használnánk (16APSK-2/3) akkor évente ennyi ideig szakadna meg a vétel az eső miatt.

A mérésekben szereplő legkisebb esőintenzitáshoz tartozó (1,2mm/h \rightarrow A=3,48dB) legnagyobb adatsebességet biztosító moduláció a QPSK-8/9. Ha nem alkalmaznánk adaptív modulációt, az éves várható kiesés még így is mintegy 3017 perc, azaz ~ 50 óra lenne (az adatsebesség kárára).

Vagy ugyanez a kondíció elérhető a jel erősítésével is. Ekkor 3,48 dB \rightarrow ($10^{0,348}$) 2,22-szeres állandó teljesítményre lenne szükség.

Határhelyzetben, QPSK-1/2-t használva körülbelül 3,5mm/h-ig tartható fent a kommunikáció. Azaz 717 percre, vagyis kb. 12 órára csökkenthető az éves kiesés.

2014-ben 10535 perc lett volna a kiesés, ha a tiszta időben megengedett legnagyobb modulációt használjuk. 1,2mm/órás esőintenzitásnál a megengedhető legnagyobb modulációs mód mellett 3386 perc veszteség lenne. QPSK-1/2 használatával körülbelül 3,5mm/óraig tudjuk fenntartani a kapcsolatot, ezzel évi 855 percre csökkentve a megszakadási időt.

Konklúzióként elmondhatjuk, hogy 2014 esősebb év volt, mint 2004, így egyrészt ez a mérés nem támasztja alá a klímaváltozás aktuálisan vitatott tényét, másrészt bebizonyosodott, hogy adaptív modulációval számottevően többet lehet profitálni, mint nélküle.

Minél többet esik az eső (aminek intenzitás eloszlását a fixnek tekinthető éghajlat meghatározza [görbe lejtése]) annál többet lehet nyerni adaptív moduláció alkalmazásával.

A moduláció folyamatos változtatásával energia takarítható meg, így pénz spórolható (műholdon kritikus pont az energia), valamint éves szinten több ideig tartható fent a kapcsolat, ami több profitot jelent. Mindez úgy, hogy az átviteli sebesség folyamatosan optimalizálva van.

A mérési eredményeknél a korreláció jól megfigyelhető az időjárás (vételi jelszintből következően) és a PER között.

Például a 19-i mérésnél Grazban hajnalban esett az eső, ami az ottani vételi szinten meg is látszik, de ez szükségképpen az adás minőségét is rontotta (mivel a vevő és adó állomás ugyan az), ami viszont a budapesti PER adatokon vehető észre, hiszen ekkor nálunk jó idő volt.

6 Összegzés

A dolgozatban bemutatásra került az európai és olasz űrügynökségek közös projektje, azaz az Alphasat szolgáltató és kísérleti műhold, amelynek a fedélzetén elhelyezett Aldo Paraboni kísérletéhez a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszéke is csatlakozott.

A kutatás célja, hogy új, a jelenleg használt frekvenciáknál magasabb tartományokban működő kommunikációs rendszert teszteljenek és ez alapján később világméretű szolgáltatást építsenek ki az új technológiára.

Az elméleti modellekből és kezdeti mérési eredményekből le lehet vonni azt a következtetést, hogy a tervezett rendszer a specifikációnak megfelelően működik, valamint bebizonyosodott, hogy a már földi linkeken alkalmazott adaptív modulációs technika műholdas csatornákon is eredményesen működik. Ennek jelentős gazdasági vonzata is van, hiszen nem csak az adatsebességet lehet folyamatosan optimalizálni az időjárási körülményeknek megfelelően és tovább fenntartani a kapcsolatot a végpontok között, hanem a működéshez elhasznált energia is csökkenthető, ami műholdak esetében kritikus jelentőségű.

A rendszer elterjedéséhez, illetve ipari alkalmazásához azonban további mérésekre és tesztekre van szükség, melyekben a BME HVT továbbra is partnere lesz az olasz és osztrák állomásoknak.

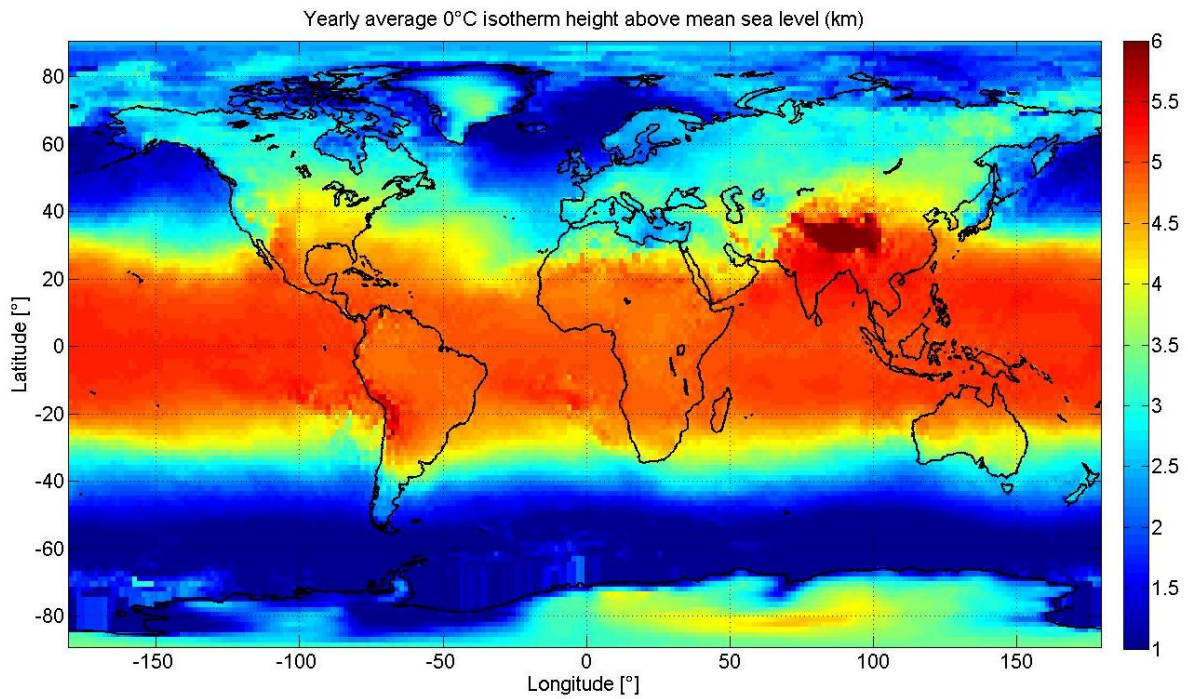
7 Irodalomjegyzék

- [1.] European Space Agency: Alphasat project overview
http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Alphasat/Overview
http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Alphasat/Alphasat_Paraboli_Q_V_Band_Payload
- [2.] GRANTE Antenna Development and Production Corporation: 3D drawing of the BME Alphasat COMEX receiver antenna, 2016.
- [3.] Newtec Cy N.V.: User Manual for EL170/970/470 IP Satellite Modulator/Demodulator/Modem version 4.2 Sint-Niklaas, Belgium, 2011
- [4.] Satellite TV Engineering: Bit error rate and roll off factor
<http://www.sattvengg.com/2014/06/bit-error-rate-and-roll-off-factor.html>
- [5.] Advantech Wireless: DVB-S2 Technical Presentation
<http://www.advantechwireless.com/wp-content/uploads/DVB-S2-theory.pdf>
- [6.] ETSI TR 102 376-1 V1.2.1 (2015-11):
Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2
http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/10237601/01.02.01_60/tr_10237601v010201p.pdf
- [7.] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R P.618-12 (07/2015)
Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-12-201507-1!!PDF-E.pdf
- [8.] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R P.839-4 (09/2013)
Rain height model for prediction methods
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.839-4-201309-1!!PDF-E.pdf
- [9.] Jens T. Satre: Satellite Look Angle Calculator, 2016
<http://www.satellite-calculations.com/Satellite/lookangles.htm>

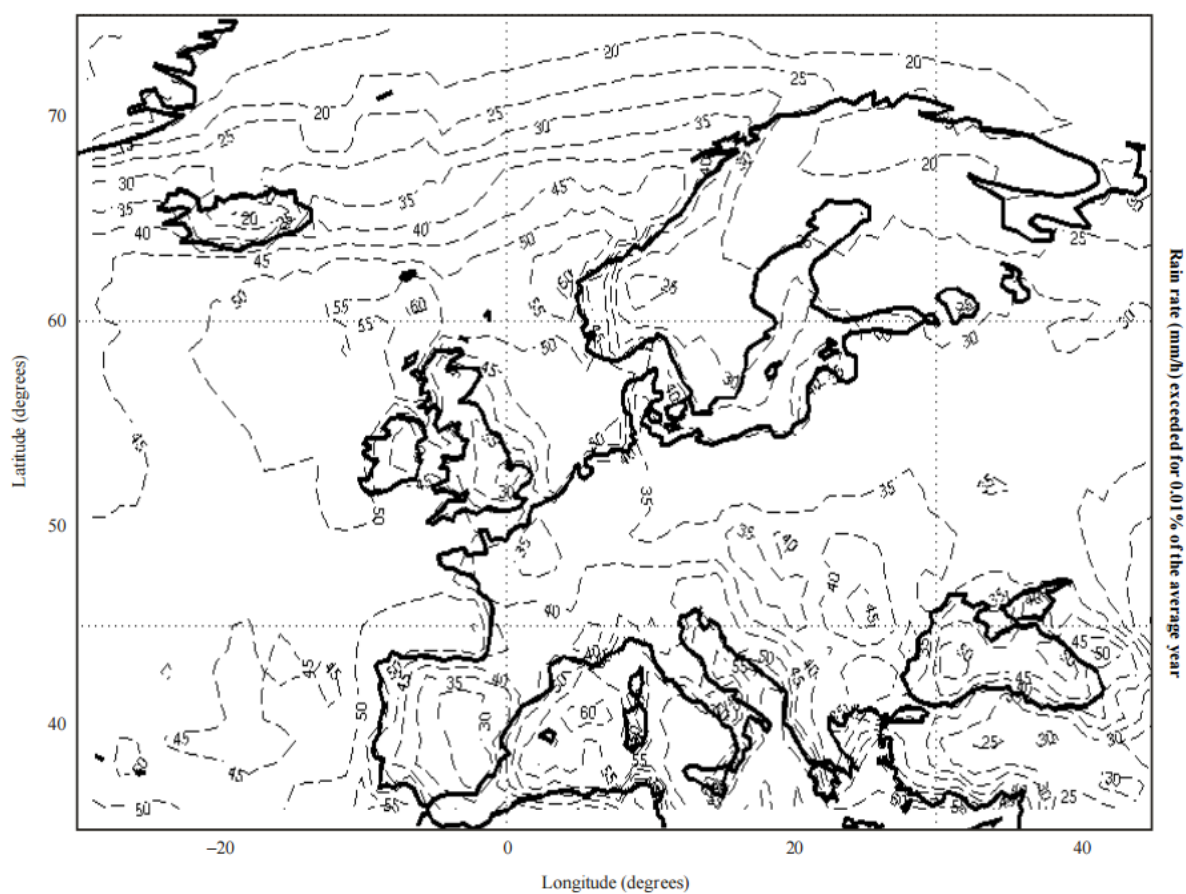
- [10.] Bitó János, Carlo Capsoni, Csurgai-Horváth László, Lorenzo Luini: Modeling of Coherent Rain Cells Movement Affecting Terrestrial Radio Links, 2nd JA 2310 Workshop, München, Germany, 2008.04.17-2008.04.18. Paper 15.
- [11.] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods (1992-1999-2003-2005) https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!!PDF-E.pdf
- [12.] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R P.837-6 (02/2012) Characteristics of precipitation for propagation modelling https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-6-201202-!!PDF-E.pdf
- [13.] International Telecommunication Union: Recommendation ITU-R P.676-10 (09/2013) Attenuation by atmospheric gases http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-!!PDF-E.pdf
- [14.] Johannes Ebert, Michael Schmidt, Sabine Kastner-Puschl, Juan Rivera Castro ACM (Adaptive coding and modulation) Strategies for the high fade dynamics in Q/V-band, Graz, 2014
- [15.] L. Csurgai-Horvath, P. Horvath, I. Rieger, J. Kertesz: Ground Station for the Alphasat Q/V Band Communications Experiment, Deliverable D1, 2016.

8 Melléklet

8.1 ITU-R P.839 esőmagassági térkép (az adatbázis mellé) [8]



8.2 ITU-R P.838 esőintenzitás térkép [12]



8.3 Egységnyi úthosszra eső esőcsillapítás kiszámításához szükséges k és α paraméterek meghatározása 1-1000GHz-ig [11]

1. Képlettel (vertikális és horizontális polarizációra is):

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha$$

Ahol f a frekvencia és a konstansok:

kh-ra:

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

kv-re:

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

ah-ra:

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

av-re:

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

2. Képlettel (lineáris és cirkuláris polarizációra):

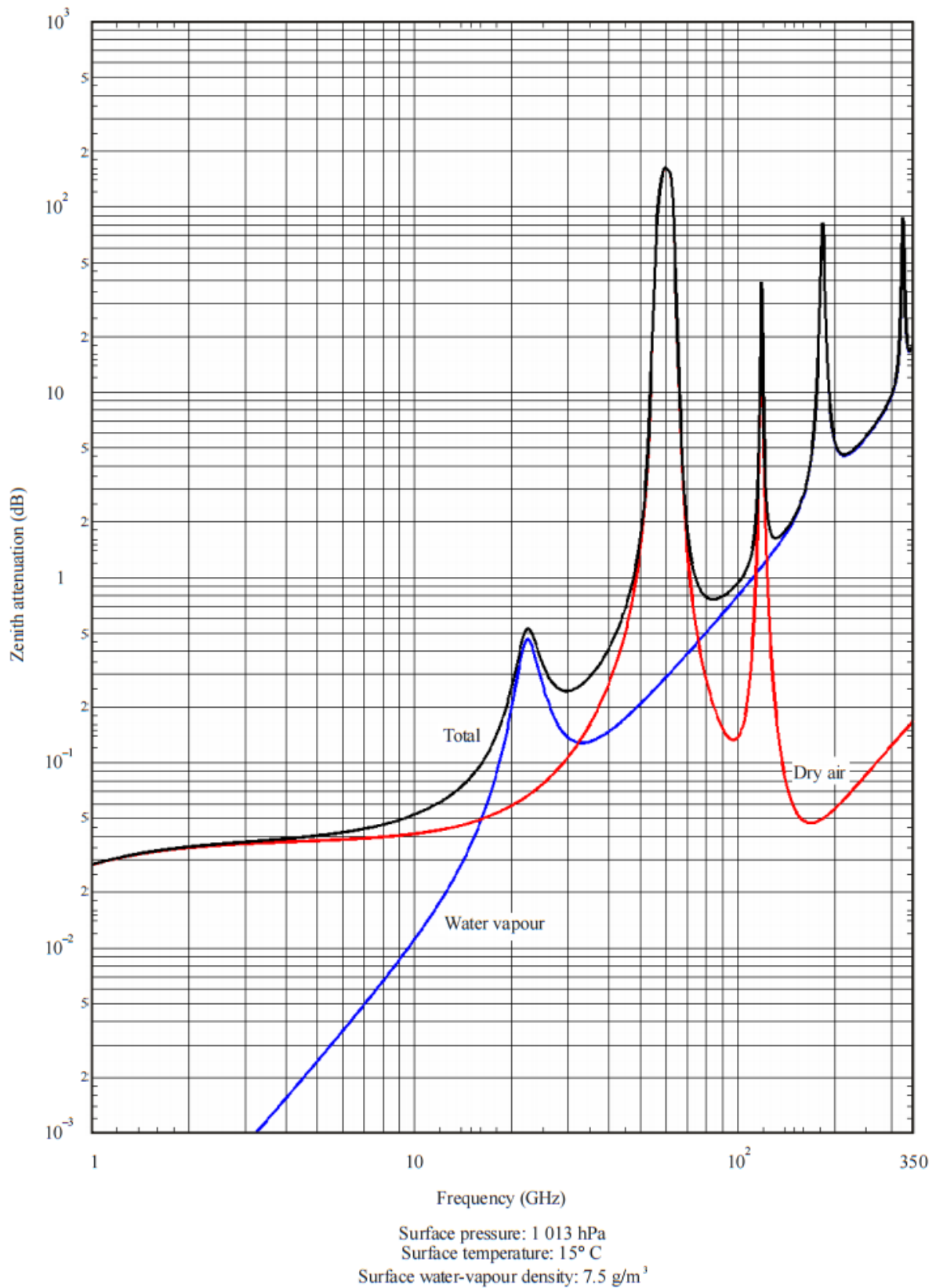
$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k$$

Ahol θ az elevációs szög és τ a vízszinteshez viszonyított polarizáció szöge (cirkuláris esetben 45°).

Ezen képletekkel van meghatározva az ajánlásban lévő táblázat és grafikus ábrázolás is.

8.4 Atmoszferikus gázok eredő csillapítása [13]



Látható, hogy 38 GHz-en a légköri gázok csillapítása 10^{-1} nagyságrend alatt van, így ténylegesen elhanyagolhatók.

8.5 Esőintenzitásokhoz tartozó csillapítás számításának részeredményei

Esőintenzitás [mm/h]	r_{001}	v_{001}	ζ [°]	L_R [km]	L_E [km]
1.2	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
2.4	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
3.6	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
4.8	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
6	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
7.2	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
8.4	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
9.6	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
10	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
20	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
30	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
40	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
50	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
60	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
70	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
80	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
90	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580
100	1.6126	1.5190	23.6288	5.1073	7.7580

Az egyes esőintenzitásokhoz tartozó részeredmények megegyeznek. Ennek oka, hogy a használt formula igen széles frekvenciatartományra van definiálva (1-55GHz-ig) és ilyen magas frekvencián (38GHz) már csak 10^{-12} nagyságrendűek vagy még kisebbek az eltérések.