

Dudás Levente¹ – Szűcs László² – Gschwindt András³

A SMOG-1 KISMŰHOLD SPEKTRUMMONITOROZÓ RENDSZERE⁴

A Masat-1, mint első magyar műhold fejlesztésének és majdnem 3 évnyi üzemeltetésének egyik lehetséges oktatási vonalon történő folytatásaként a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen belekezdünk egy merőben új műhold fejlesztésébe. Ez a műhold 5 cm-es kocka alakú műhold (un. pocketcube), amely maximálisan 175 gramm össztömeggel rendelkezhet. Ilyen kis tömegben illetve térfogatban szeretnénk megvalósítani az egy-pont meghibásodásra méretezett fedélzeti rendszereket, úgy, mint az energiaellátó rendszer, a fedélzeti számítógép, a mérőrendszer és a kommunikációs rendszer. Hasznos teherként a fedélzetre egy UHF (430–860 MHz) sávban működő spektrum analízátort teszünk, amellyel a digitális földfelszíni TV adók jelének szintjét szeretnénk monitorozni a Föld körüli pályán való keringés során, amely segítségével RF (rádiófrekvenciás) szennyezettségi térképet szeretnénk készíteni a Föld körüli térségről (innen a műhold neve: RF smog → Smog-1).

THE SPECTRUM MONITORING SYSTEM OF THE SMOG-1 SATELLITE

As a possible continuation (educational way) of the development of Masat-1, the first Hungarian satellite, we have decided to develop a pocketcube-class satellite called Smog-1 at Budapest University of Technology and Economics. The maximal mass of the 5 cm-pocketcube is 175 g. The main task is to develop and realize the single-point failure tolerant subsystems of the satellite as electrical power system, on-board computer, measurement system and radio-communication system. The payload of the Smog-1 will be a spectrum monitoring system, which is able to measure the RF signal level between 430 and 860 MHz frequency range, where the digital terrestrial TV transmitters are working on. These TV transmitters cause RF smog because of the radiation pattern of its antenna (some part of the transmitted power is going to the space, so it is lost).

BEVEZETÉS

A Smog-1 kisműhold fejlesztésének előkészületeként a Nemzeti Média és Hírközlési Hatósággal együttműködve a tervezett mérőrendszer fejlesztését, kivitelezését illetve tesztelését kezdtük meg. Maga a mérőrendszer egy spektrum analízátorként használt mérővevő, amely a digitális földfelszíni TV adók sávjában, az adók kisugárzott jelszintjét méri a magas légkörben, a későbbiekben pedig a Smog-1 hasznos terheként Föld körüli pályán való keringés során.

Ebben az UHF sávban az elektromágneses hullámok terjedése a fényéhez hasonló és a jelek áthatolnak az ionoszférán. Igazolni szeretnénk volna azt a feltételezést, hogy ezen adók jelentős teljesítmény szintet juttatnak a világűrbe, vagyis ezen teljesítmény nem jut el a TV nézőig, nem hasznosul a vevőkészülékükben, vagyis RF szennyezettséget okoz.

Mivel előzetes kísérletről volt szó, így csupán a magas légköri ballonos reptetés jöhetett szóba, amely során a mérőrendszer (a majdani Smog-1 fedélzeti rendszerének egy butított változata) csupán 20–30 km-es földfelszínhez képesti magasságig emelkedett.

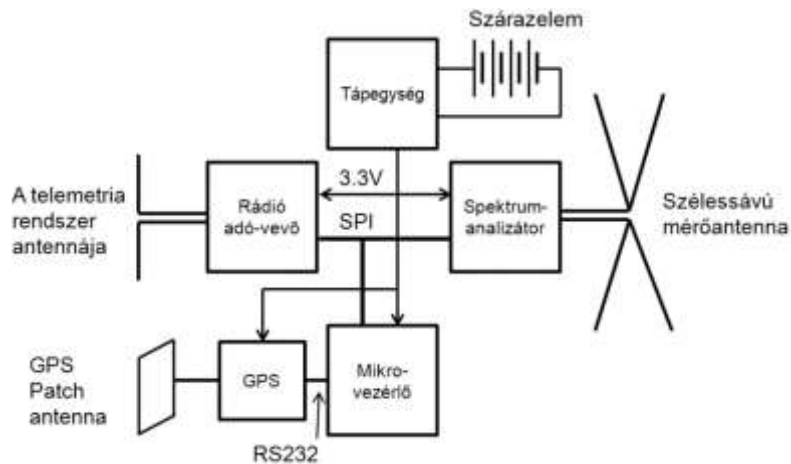
¹ egyetemi tanársegéd, BME – Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, dudas@mht.bme.hu

² tanszéki mérnök, BME – Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, szucs@mht.bme.hu

³ egyetemi adjunktus, BME – Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, gschwindt@mht.bme.hu

⁴ Lektorálta: Dr. Ludányi Lajos NKE Katonai Repülő Tanszék, ludanyi.lajos@gmail.com

A MÉRŐRENDSZER FELÉPÍTÉSE



1. ábra

A mérőrendszer felépítését mutatja az 1. ábra. A mérőrendszert egy normál AA méretű cellából álló 6 V-os tartós szárazelem pakk táplálja. A nyers tápfeszültség egy lineáris feszültség stabilizátor áramkörre kerül, ez biztosítja a fedélzeti elektronika számára a stabil 3,3 V-os tápfeszültséget. A viszonylag rossz hatásfokú lineáris stabilizátor többek között azért is szükséges, mert a magas légkörben a hőmérséklet $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ fok körüli, a mérőrendszer illetve a szárazelemek ezen a hőmérsékleten nem működnek. Mivel a lineáris stabilizátor működése során hőt termel, így fűteni képes a fedélzeti rendszereket, megakadályozva ezzel a szárazelemekben levő elektrolit megfagyását, vagyis a mérőrendszer energiaforrásának ellehetetlenülését.

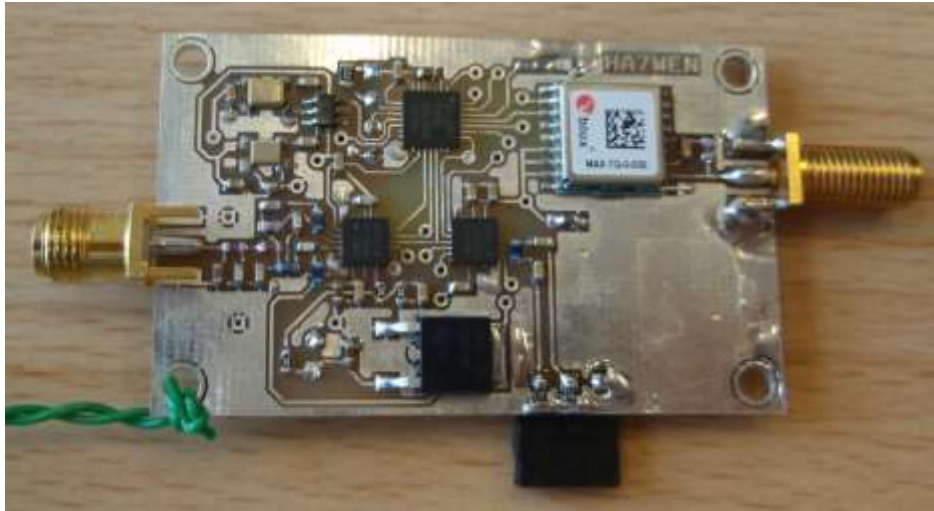
A már stabil 3,3 V-os tápfeszültségre több alrendszer csatlakozik:

- a fedélzeti elektronika működését vezérlő mikroszámítógép;
- a telemetriaadatok Földre juttatásához szükséges digitális adó-vevő;
- a spektrum analízátorként használt mérővevő;
- illetve a ballon pozíció adatait szolgáltató (szélesség, hosszúság, magasság) fedélzeti GPS.

Mindösszesen 4 ballonos spektrum monitorozó rendszer reptetést végeztünk. Az első két alkalommal olyan GPS-t használtunk, amely adatlap szerint ugyan tudja, de a gyakorlatban mégsem tudta a magas légkörben szolgáltatni a megfelelő GPS adatokat (az első alkalommal 18 km-ig, a második alkalommal 12 km-ig volt megfelelő GPS adatunk, ezek felett a pozíciómérés összeomlott). Az utolsó két alkalommal egy merőben új, „flight” módba konfigurált GPS már tökéletes pozíció adatokat szolgáltatott, így hiteles mérési eredményeink vannak 30 illetve 34 km-es magasságig.

A spektrum analízátorként használt rádióvevő

A mérőrendszerrel készült fotó alább látható: 2. ábra



2. ábra

Jobbra fent a GPS modul, jobbra a GPS antenna csatlakozója, középen fent a mikrokontroller, középen alul a lineáris feszültség stabilizátor, középen a spektrum analízátorként használt mérővevő, középen alul a mérőantenna csatlakozója, balra középen a digitális adó-vevő, balra az adó-vevő antenna csatlakozója, balra fent a referenciafrekvencia forrásként használt TCXO-k (hőmérséklet kompenzált kvarc oszcillátorok).

A magas légkörben tapasztalható alacsony hőmérséklet miatt a mérőrendszer egy Hungarocell gömbbe került.

A hungarocell félgömb a GPS antennával a következő: 3. ábra.



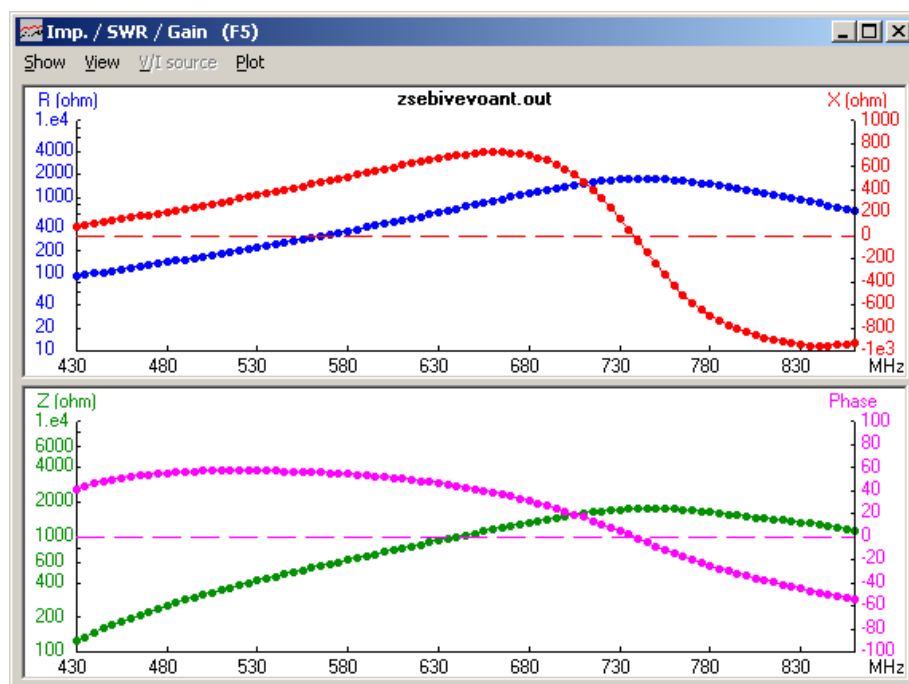
3. ábra

A mérőrendszer illetve az adó-vevő antennája a másik félgömbben látható (4. ábra) (baloldalon a mérőrendszer, jobb oldalon az adó-vevő antennája).



4. ábra

A mérőrendszer antennája egy szimmetrikus táplálású dipól, amely széles sávban dolgozik: 430–860 MHz. A vevőantenna talpponti impedanciája a frekvencia függvényében a következő: 5. ábra.



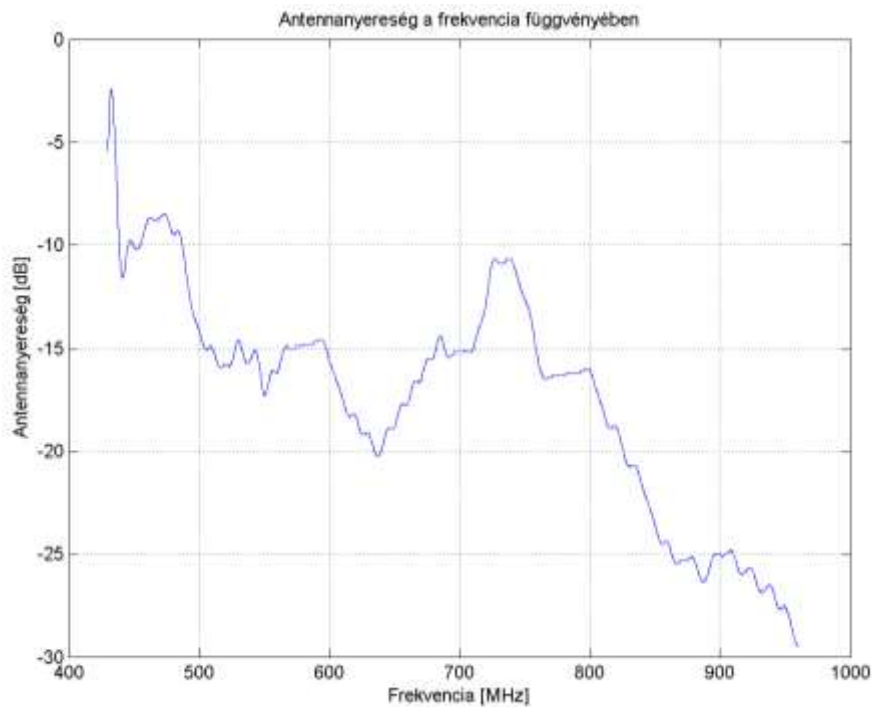
5. ábra

A teljes frekvencia tartományban 100 és 2000 Ω közötti impedanciával rendelkezik, amely szimmetrikusan jól illeszthető a spektrum analizátorként használt rádiós IC bemeneti 450 Ω -os impedanciájához.

Az antennát a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságatan Tanszéken található árnyékolt mérőszobában kikalibráltuk. A kalibrációs mérés lényege, hogy adott távolságról, egy szélessávú

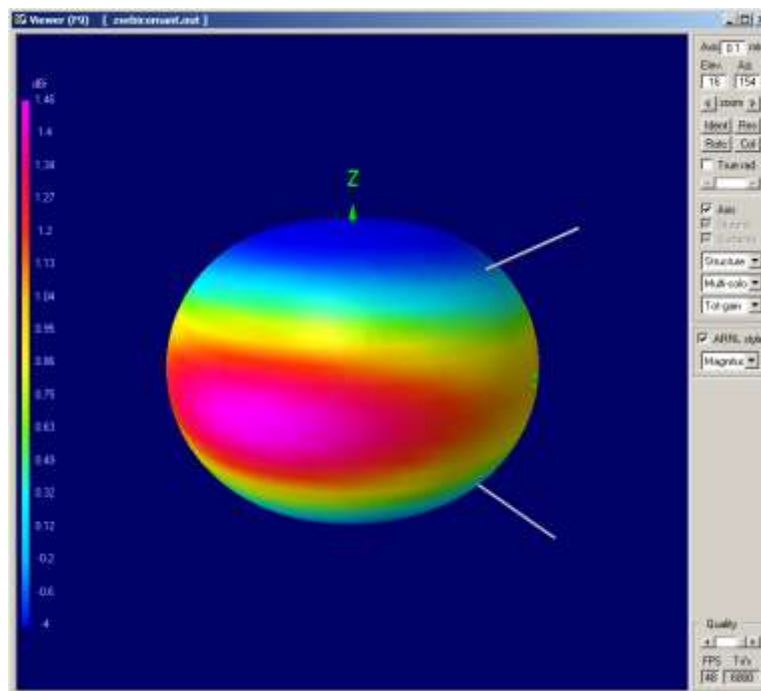
log-per antennát használva adott konstans teljesítménnyel adva mértük, hogy a mérőrendszer mekkora teljesítményt regisztrál a frekvencia függvényében.

Ezen kalibrációs mérés eredménye a következő: 6. ábra.



6. ábra

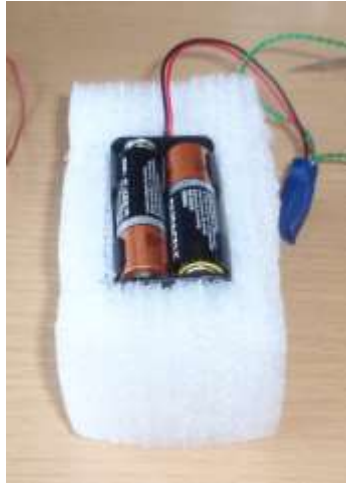
A kalibrációs mérés eredményeivel korrigáltan kerül a későbbiekben ábrázolásra a vett spektrum. A kommunikációs antenna 3D iránykarakterisztikája a következő: 7. ábra.



7. ábra

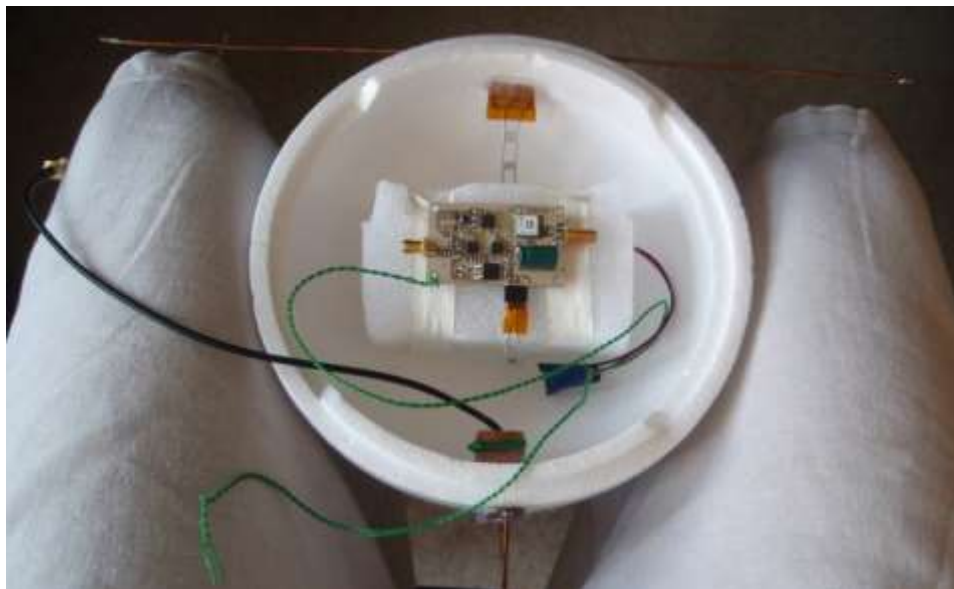
A kommunikációs antenna vonatkozásában a fő cél az volt, hogy minél egyenletesebb legyen a sugárzási karakterisztika, hogy az esetleges mozgásból adódó fading minimális lehessen (ne lehetetlenüljön el a jelek vétele) – ez az 5 cm-es kocka műhold esetében is fontos szempont (5 cm-es méretben gyakorlatilag lehetetlen bármilyen aktív stabilizáló rendszert megvalósítani, amely a fedélzeti antenna fő sugárzási irányát tudná a földi állomás irányába állítani).

A mérőrendszer energiaforrása a hőszigetelő burkolattal a következő: 8. ábra.



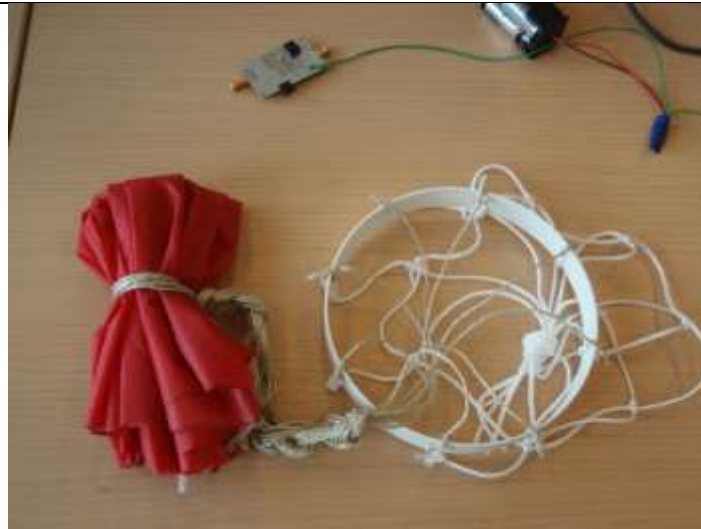
8. ábra

A teljes mérőrendszer összerakás közben: 9. ábra: felül a szélessávú mérőantenna, alul a kommunikációs rendszer antennája, középen a mérőrendszer, alatta pedig az energiaforrás.



9. ábra

A gömbbe szerelt mérőrendszerhez tartozó megfelelő méretű ejtőernyőt mutatja a 10. ábra (az ejtőernyő azért szükséges, mert a magas légkörben a gázzal töltött ballon a csökkent légköri nyomás hatására többszörös átmérőre tágul, és a környezeti hőmérsékletnek köszönhetően a ballon latex anyaga felkeményedik és egy idő után kidurran, vagyis utána a mérőrendszer visszazuhan a Föld felszínére).



10. ábra

A magas légköri ballonok reptetése 1 kg alatti tömeg esetén csak bejelentés kötelezett a légügyi hatóság irányába. A mi esetünkben a mérőrendszer teljes tömege az első repülésnél (ekkor volt a legnehezebb) 240 g volt – 11. ábra.



11. ábra

Kommunikáció a mérőrendszerrel

A feladat első közelítésben az volt, hogy a spektrum mérés eredményeit valamint a ballon GPS alapú pozícióját egy megfelelő RF csatornán a földi állomásra vezeték nélkül lejtassuk.

A mérőrendszer oldaláról nézve ez a következőt jelentette:

- áthangolandó frekvencia tartomány 430–860 MHz;
- frekvencialépés 200 kHz;
- a mérővevő maximális sávszélessége 800 kHz.

A venni kívánt analóg és digitális TV adók jelének sávszélessége 8 MHz körüli. Ezzel szemben a spektrum analízátorként használt vevő sávszélessége maximum 800 kHz. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a vett jel szintje tized része a ténylegesen egy adott frekvencián sugárzó TV adó jelszintjének, mert tízszer kisebb sávszélességgel mérünk. Tehát a mért értékekhez minden esetben 10 dB-t hozzá kell adni (amplitúdó ofszet).



Ha a hangolási tartomány és a frekvencialépés ismert, akkor adódik $(860-430)/0,2 = 2150$ mérési pont, vagyis a használt mérőrendszer esetében 2150 bájt adatot jelent egy teljes scan.

A mérővevő fizikai felépítése, a szintézerének hangolhatósága illetve a középfrekvenciás sáv szélességből adódik, hogy a 430–860 MHz-es tartomány mérése 20 s időt vesz igénybe.

Az ballonok reptetése alkalmával 5 kbit/s rádiócsatornán definiált adatátviteli sebességet használtunk, 60 bájtos pakett méret mellett, amely a gyakorlatban $2150/60 = 36$ csomag adását jelentette egy scan során (ilyen adatsebesség a későbbiekben az 5 cm-es kockaműhold esetében is realizálható).

Ez az adatsebesség, és a GMSK moduláció alkalmazása eredményezte, hogy a felhasznált sáv szélességünk 7,5 kHz volt, amely teljesíti a 70 cm-es rádióamatőr frekvenciasávhoz tartozó maximális 12,5 kHz-es sáv szélesség korlátot, azonban normál rádióamatőr készülékkel nem vehető sem SSB, sem pedig FM üzemmódban.

SSB-ben azért nem, mert egy átlagos rádióamatőr vevőkészülék sáv szélessége 2400 Hz, az 5 kbit/s GMSK jel pedig 7500 Hz; FM-ben pedig azért nem, mert az egy csomagra vonatkoztatott logikai nullák és egyesek száma nem egyezik meg, vagyis DC tartalma van a vett jelnek, amit az AC csatolt hangfrekvenciás fokozata egy normál FM vevőnek nem enged át (nem Manchester kódolt a bitsorozat).

Azért, hogy a lesugárzott jel a rádióamatőrök számára is elérhető, és a magas légköri ballon általuk is követhető legyen, plusz egy üzemmód használata volt szükséges. Ez a DL-FLDIGI program által is használt alacsony adatsebességű (az esetünkben 100 bit/s) kis löketű AFSK. Ezen adatcsomagok küldése során lesugárzásra kerültek a pontos GPS koordináták (szélesség, hosszúság, magasság), az időbélyeg, a tápfeszültség, a ballon fedélzeti rendszerének hőmérséklete illetve a hívójel, vagyis a HA5MRC/AM, mint Műegyetemi Rádió Klub / Air Mobile.

A ballonos reptetések során a Masat-1, mint első magyar műhold, automatizált és távvezérelt elsődleges műholdvezérlő állomását használtuk, ahogy az a későbbiekben az 5 cm-es kocka műhold esetében is történni fog.

A földi állomás vonatkozásában a kommunikáció megvalósítása során a feladat konkrétan a ballon követése volt az általa lesugárzott koordináták alapján, vagyis nem TLE alapján műhold követés, hanem GPS koordináták alapján ballon követés (azimut és elevációs szögre való szabályozás, mindez automatikusan).

A spektrummonitorozó rendszer első reptetése

A spektrummonitorozó rendszert elsőként a BME Q épület mellől 2014. június 13-án repítettük. A reptetésről készült képek a következők: 12. ábra – a ballon töltés, 13. ábra a mérőrendszer bekapcsolása, 14. ábra – a feleresztés pillanata.



12. ábra

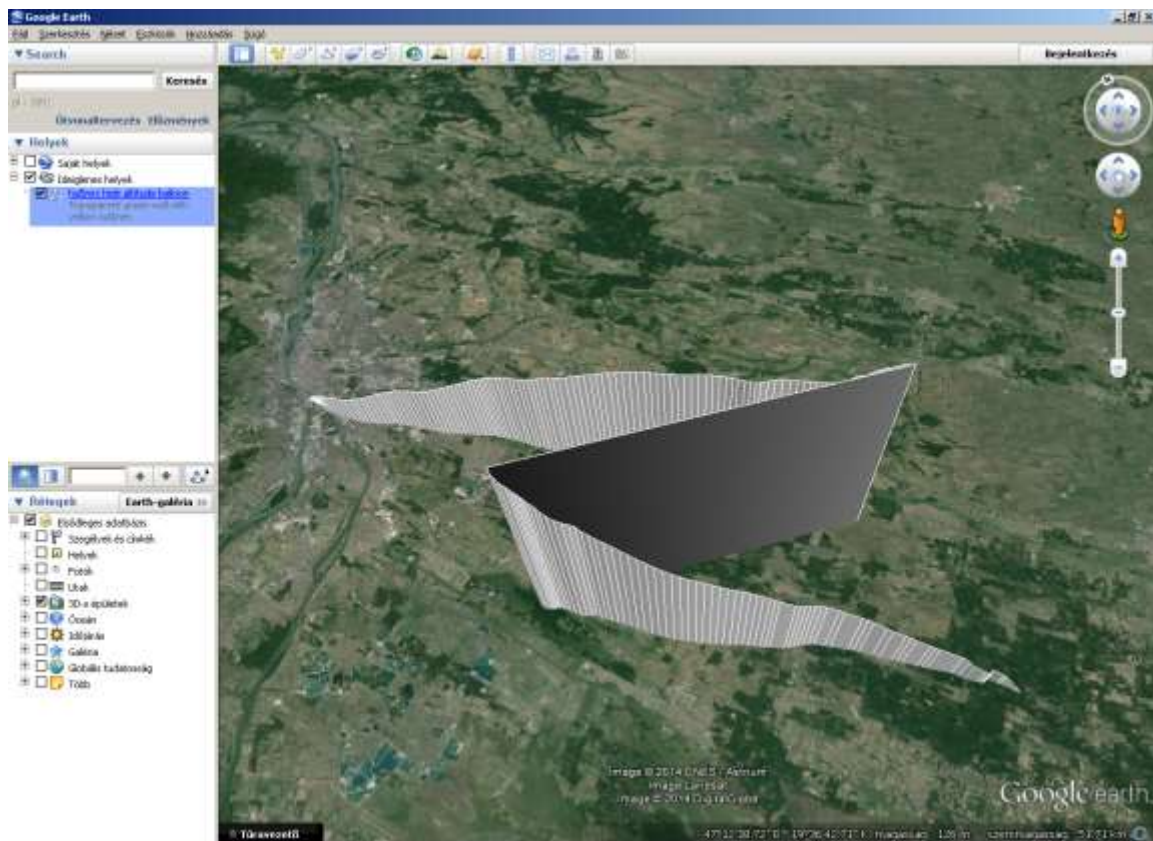


13. ábra



14. ábra

Az első ballon útvonala a következő: 15. ábra.

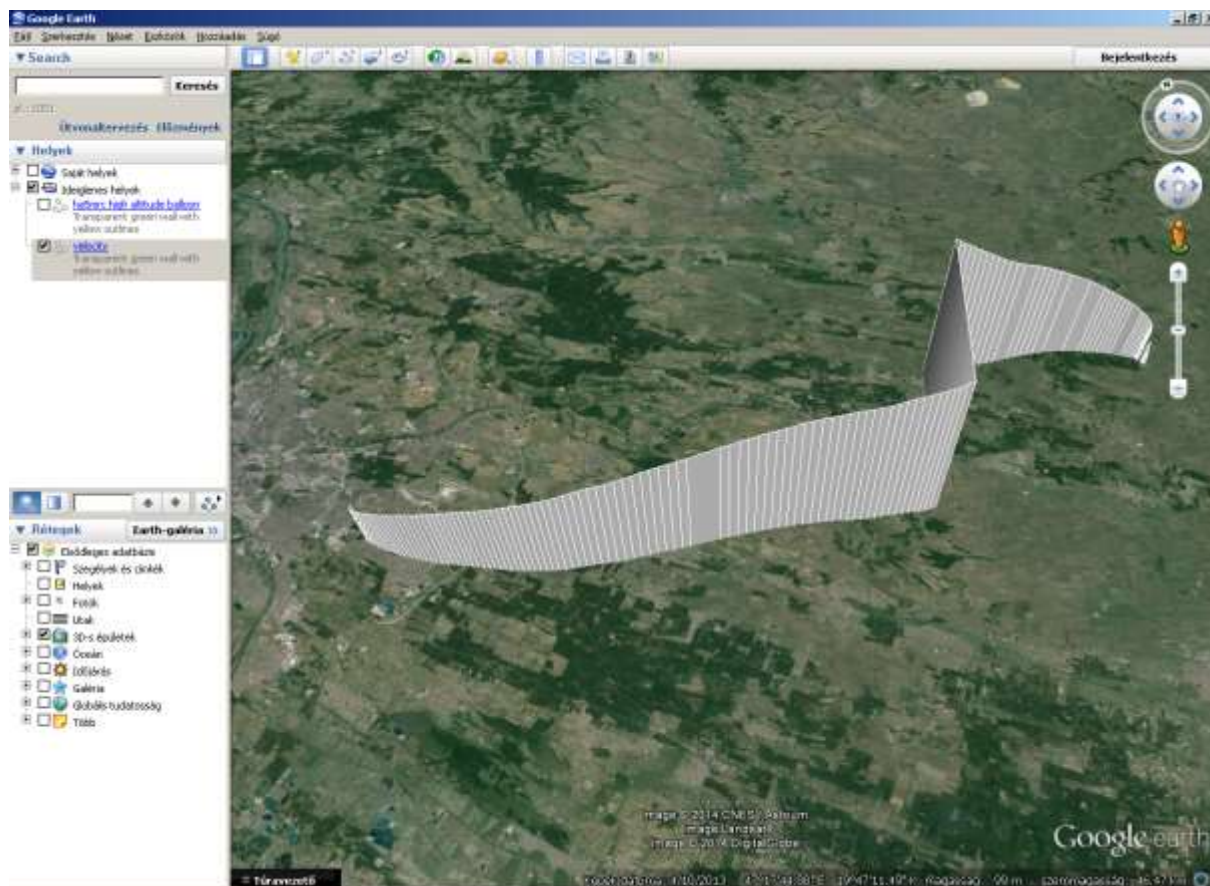


15. ábra

Jól megfigyelhető az a bizonyos vízszintes vonal, amely 18 km-es magasságot jelent. Ezen magasság felett a GPS vevő nem szolgáltatott megfelelő GPS adatot, így a pontos pozíció illetve magasság érték nem volt ismert.

A spektrummonitorozó rendszer második reptetése

A második alkalomtól kezdődően segítségünkre volt a Gilice-téri Meteorológiai Állomás, illetve az állomás munkatársai, akik a ballont, a hidrogént illetve a felbocsátási lehetőséget biztosították számunkra, támogatva ezzel az 5 cm-es kockaműhold előzetes kísérleteit: 2014. június 27. A ballon útvonala a következő: 16. ábra.



16. ábra

Hasonlóan az első méréshez, hiába ígérnek a GPS adatlapok magas légköri mérési lehetőséget, 12 km felett nincs megfelelő pozíció adat. A 17. ábra a ballon töltés utáni percekét mutatja a felbocsátó helyről.



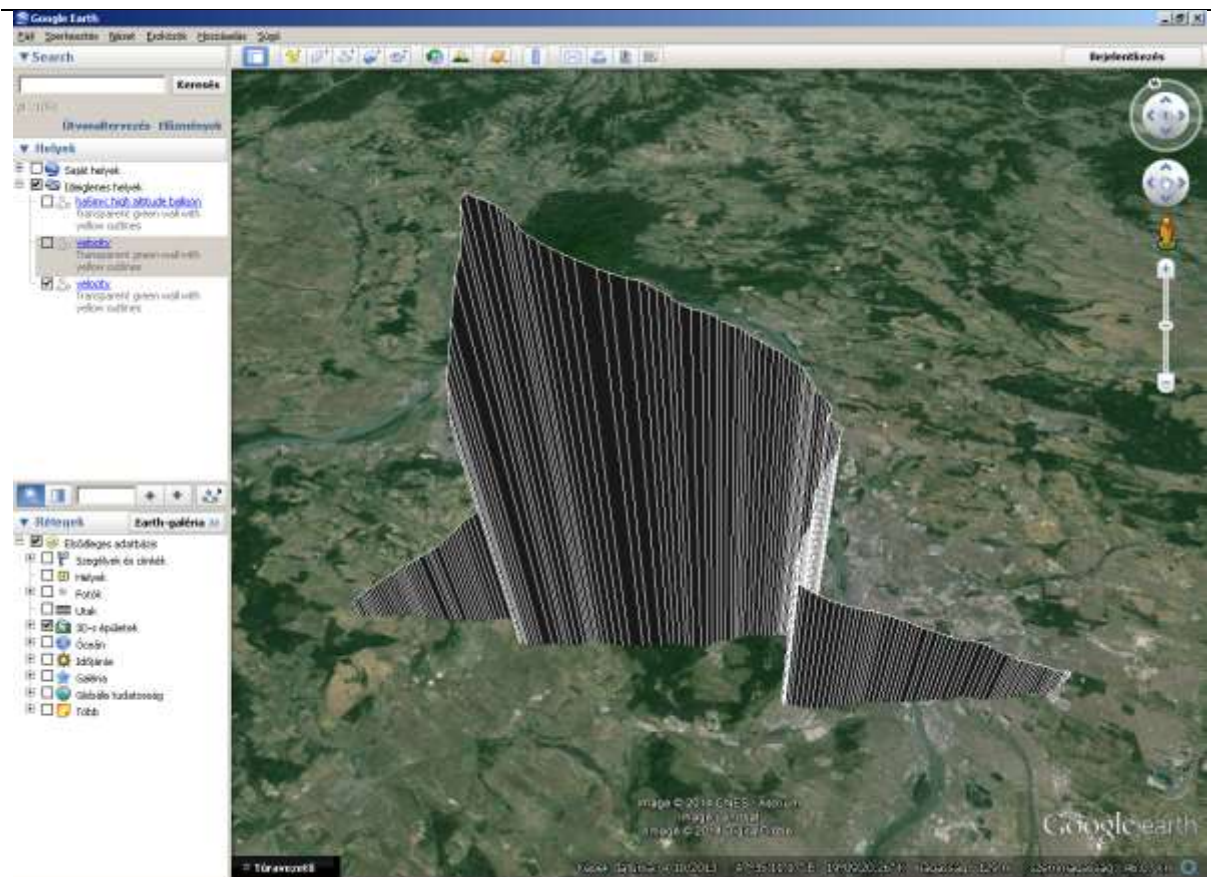
17. ábra

A spektrummonitorozó rendszer harmadik reptetése

Okulva az első két mérés tapasztalataiból, a harmadik alkalommal egy teljesen új GPS-t alkalmaztunk (a spektrummonitorozó illetve a kommunikációs rendszer működött, csak bizonyos magasság felett nincsen pozíció adat).

A harmadik alkalommal – a megújult mérőrendszerrel illetve GPS-sel – szintén Gilice térről emelkedtünk a magasba 2014. augusztus 1-jén.

A ballon útvonalát mutatja a 18. ábra.



A maximális magasság 30724 méter, ahol a ballon kidurrant és a mérőrendszer elkezdett viszázuhanu a Földre.

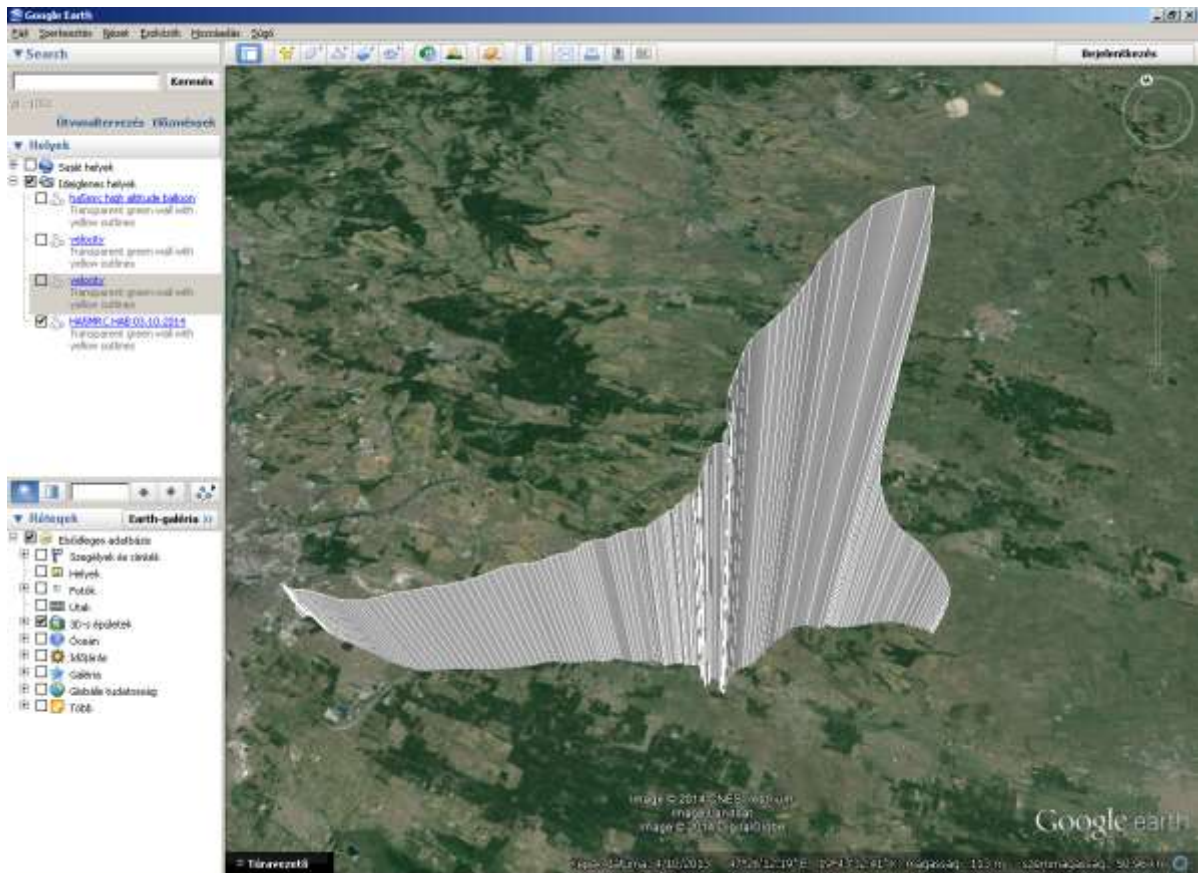
A spektrummonitorozó rendszer negyedik reptetése

A negyedik reptetésre 2014. október 3-án került sor szintén a Gilice térről – 19. ábra.



19. ábra

A ballon útvonala a következő: 20. ábra. A maximális magasság 34265 méter.

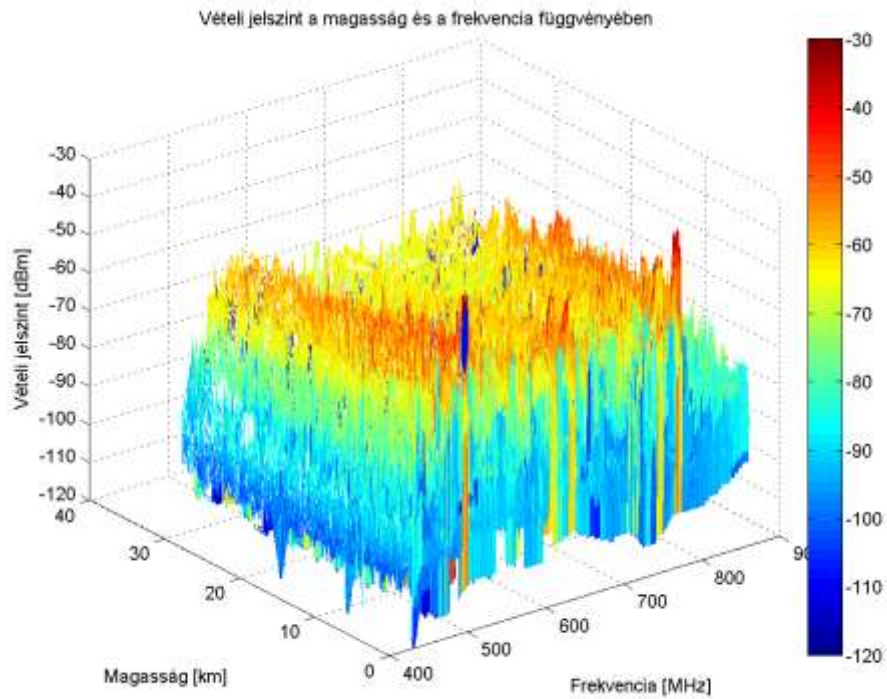


20. ábra

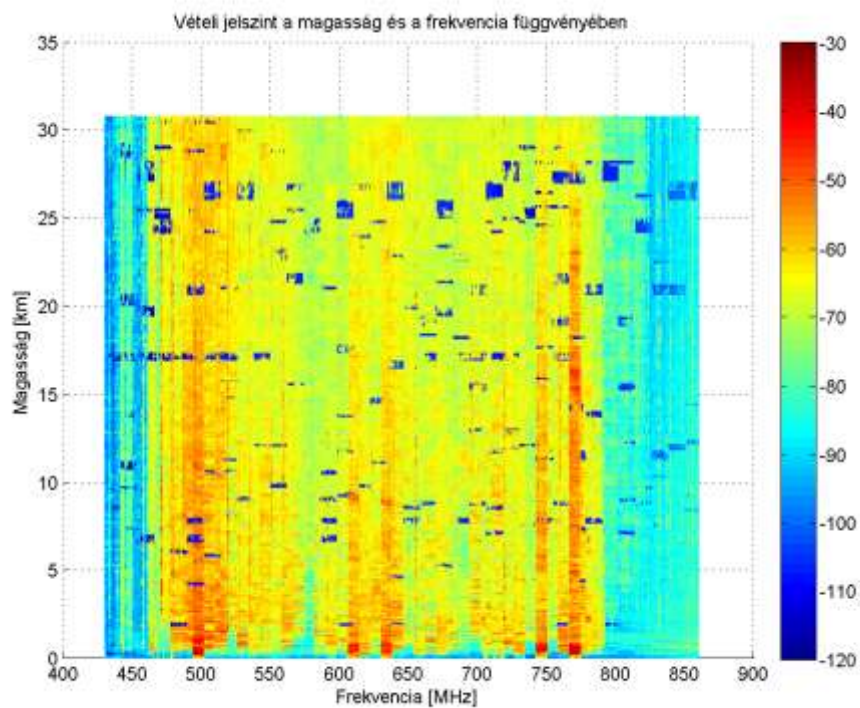
A spektrummonitorozó rendszer ballonos reptetésének mérési eredményei

Az egyes ballon reptetések során mért jelszinteket a frekvencia és a magasság függvényében ábrázoltuk, valamint a 3D ábrák két merőleges irányú metszetét is kirajzoltuk. A jelszint mérési eredmények abszolút RSSI értékeket takarnak dBm-ben, amely tartalmazza a sávszélességből adódó 10 dB kompenzációt illetve az antenna frekvenciafüggő tulajdonságát.

A harmadik reptetés alkalmával készült spektrumkép a következő ábrákon látható: 21–22. ábra.

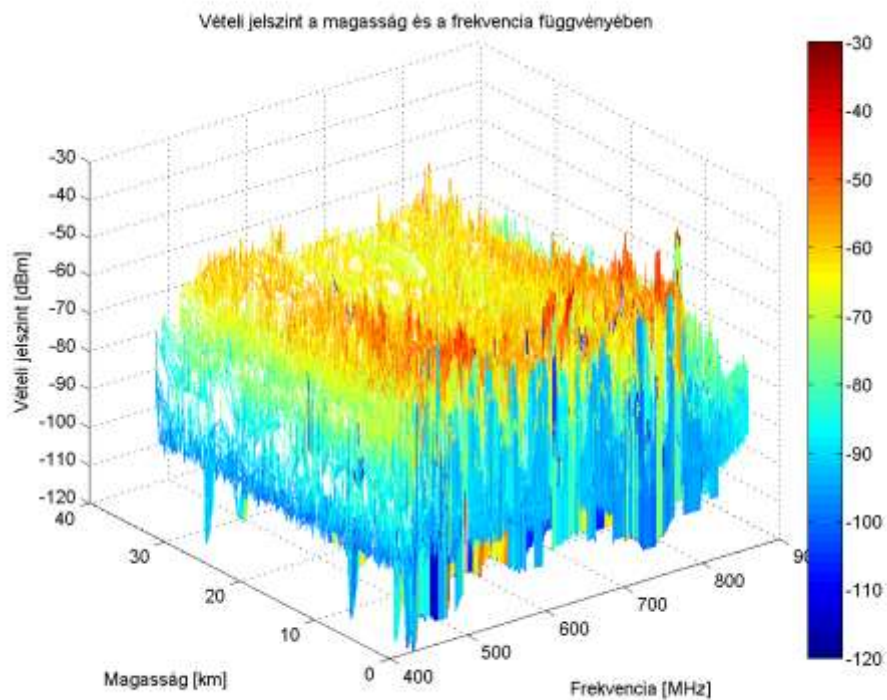


21. ábra

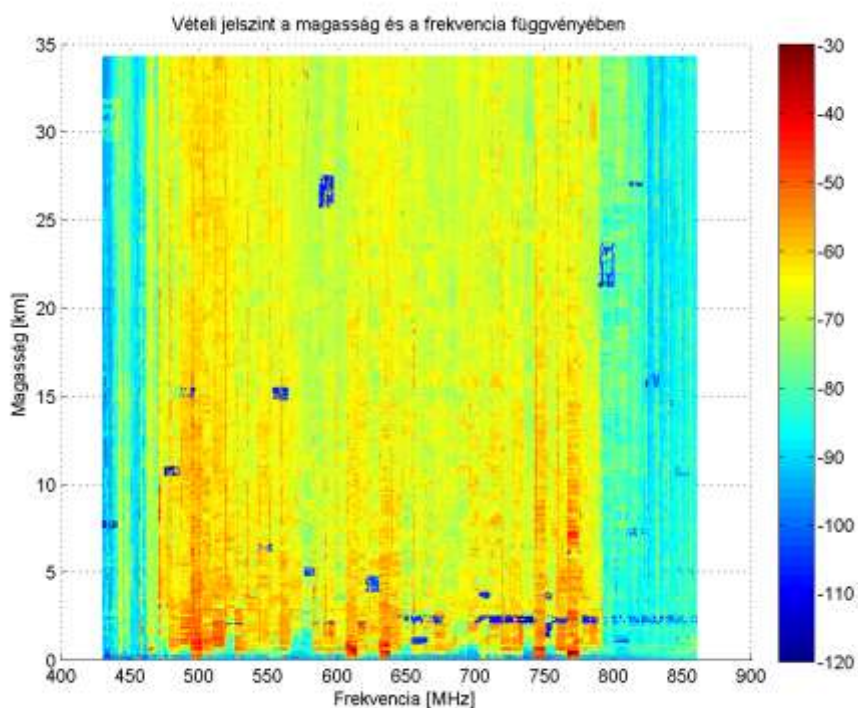


22. ábra

A negyedik reptetés alkalmával készült spektrumkép a következő ábrákon látható: 23–24. ábra.



23. ábra



24. ábra

A mérési eredmények értékelése

A 21–24. ábrák alapján általánosságban elmondható, hogy a digitális földfelszíni TV adók jelentős teljesítményt sugároznak felfelé – ebből adódóan beigazolódott az a sejtésünk, hogy ténylegesen ebben a frekvenciatartományban jelentős jelszint kerül ki a világűrbe is, vagyis van értelme az 5 cm-es kockaműhold elkészültének és Föld körüli pályán keringve a rádiófrekvenciás spektrum mérésének.

Néhány 100 méteres magasságtól kezdődően, ahogy a rádiófrekvenciás horizont kiterjed, egyre több és több külföldi eredetű TV adó jele is láthatóvá válik számunkra (megszűnik a Föld görbületéből adódó árnyékoló hatás), vagyis gyakorlatilag a TV spektrum megtelik adókkal és nemcsak a helyi nagy jelszinttel jelen levő TV adók jelei látszódnak, hanem más, a mérés helyétől viszonylag távoli adók jelei is.

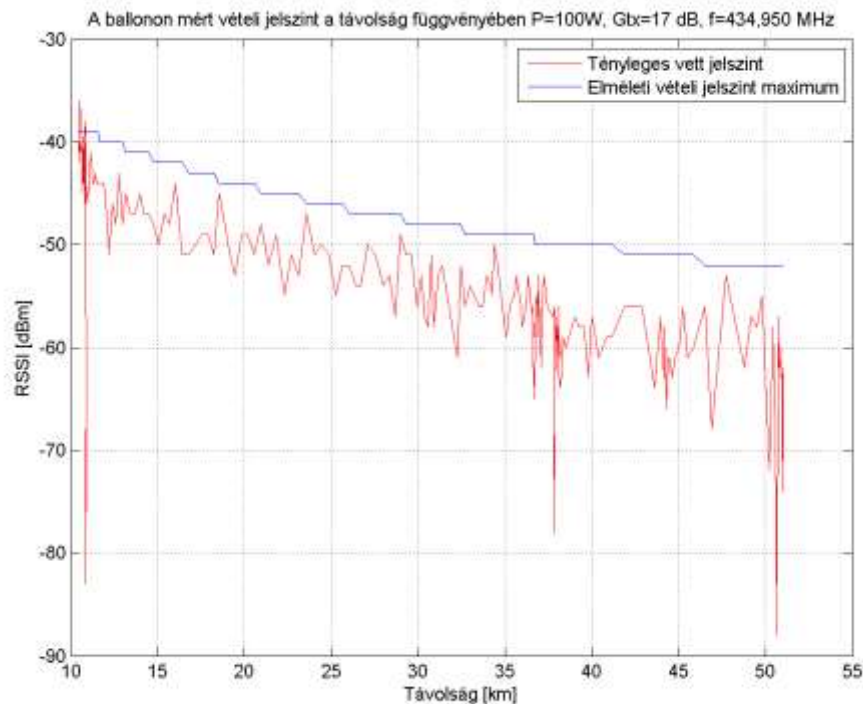
Parancsküldés a ballon részére

A negyedik ballonos reptetés alkalmával egy másféle kísérletet is beiktattunk a mérőrendszerbe.

Ez a kísérlet azt jelentette, hogy az egyes spektrumképek lesugárzása után a ballon a digitális rádió vevőjével vételi üzemmódra kapcsol és a földi állomástól várt egy parancsot, aminek hatására megmérte az aktuális pozíció esetén a parancs által produkált jelszintet, és ezt telemetria adatként visszasugározta a földi állomásra.

Ezzel az eljárással, lényegében a tényleges szabadtéri terjedést feltételezve képet kaptunk arról, hogy a későbbiekben mekkora jelszint lesz majd szükséges az 5 cm-es kockaműhold vezérléséhez.

A vételi jelszint értéke a ballon és a földi állomás távolságának függvényében a következő: 25. ábra.



25. ábra

A parancsküldés mérési eredményének értékelése

A mérési eredmény a ballon oldalon a már bemutatott szimulált (7. ábra) karakterisztikával rendelkező antennára, a földi állomás oldalán egy 17 dB nyereségű kereszt Yagi antenna rendszerre (azimutális és eleváló forgatóval) illetve 100 W adóteljesítmény esetére vonatkozik (Masat-1 elsődleges automatizált és távvezérelt földi állomása). Ezen paraméterek mellett a 25. ábrán feltüntettük az elméletileg várható jel nagyságát késsel, illetve a tényleges mért jelszintet pirossal.

A piros görbe vonatkozásában egy jelentős mértékű fluktuáció látható az ábrán, amely a ballon fizikai mozgásából, forgásából, imbolygásából adódik. Ez a fluktuáció – néhány kivételtől eltekintve – gyakorlatilag egy 10 dB-es sávot jelent. Ez fizikailag azt jelenti, hogy az antenna iránykarakterisztikájának tényleges fluktuációja a szimulált értékhez képest nem 5, hanem 10 dB. Ezt a 10 dB többletszűrés mind lejtő mind pedig felmenő oldalon figyelembe kell venni az 5 cm-es kockaműhold rádiójának esetében is.



A Smog-1 kockaműhold rádiókommunikációs rendszerének link számítását az 1. táblázat tartalmazza:

Frekvencia	437	MHz
Hullámhossz	0,69	m
Föld sugár	6370	km
Pályamagasság	400	km
Horizont távolság	2293	km
Szabadtéri szakaszcsillapítás	152	dB
Műholdfedélzeti adóteljesítmény	20	dBm
Adóantenna nyereség	0	dBi
Vevőantenna nyereség	10	dBi
Vételi RF teljesítmény szint	-122	dBm
2-GMSK adatsebesség	5000	bit/s
RF sávszélesség	7500	Hz
Vételi zajteljesítmény szint	-133	dBm
Vételi jel-zaj viszony	10	dB

1. táblázat

Pesszimista feltételezéssel éltünk a vevőantenna nyereségére vonatkozóan, amely egy horizont kommunikációra vonatkoztatott 10 dBi-t jelentett, ami a gyakorlatban 17 dBi. Így a mérésünk alapján van még 7 dB fading tartalék a rendszerben, vagyis a megcélzott 5 kbit/s adatsebesség a gyakorlatban az 5 cm-es kocka műhold esetében is realizálható lesz.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] RODDY, D., "Satellite Communications" Fourth Edition, McGraw Hill Higher Education, 2006
- [2] BALANIS, C. A., "Antenna Theory: Analysis and Design", Wiley-Interscience, 2005
- [3] Levente DUDÁS, Lajos VARGA, Rudolf SELLER, "The Communication Subsystem of Masat-1, the First Hungarian Satellite", Signal Processing, Symposium. Jachranka, Poland, 2009, pp. 1-4.
- [4] Levente DUDÁS, Lajos VARGA, "Masat-1 COM", Antenna Systems & Sensors for Information Society Technologies COST Action IC0603, Dubrovnik, 2010
- [5] Levente DUDÁS, Levente PÁPAY, Rudolf SELLER, "Automated and Remote Controlled Ground Station of Masat-1, the First Hungarian Satellite", International Conference Radioelektronika 2014, Pozsony, Slovakia, 2014
- [6] <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4464-63-61-60.pdf>
- [7] <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F326.pdf>
- [8] http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/MAX-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-10106%29.pdf