

MASAT-1 COM – AZ ELSŐ MAGYAR MŰHOLD KOMMUNIKÁCIÓS ALRENDSZERE

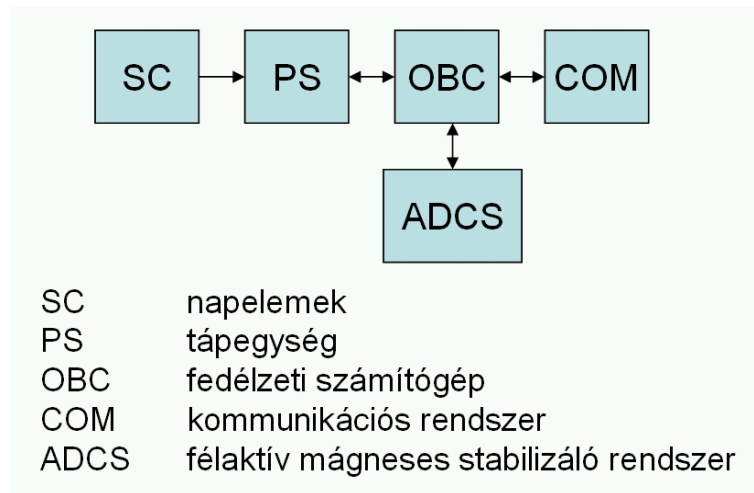
BEVEZETÉS

Az első magyar műhold – MaSat-1 – fejlesztése 2007-ben kezdődött a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karán. A hallgatói kezdeményezést az Elektronikus Eszközök valamint a Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék karolta fel. A MaSat-1 az első olyan önálló űreszköz, amelyet a tervezés első lépéseitől kizárólag magyar mérnökök illetve mérnökhallgatók terveznek és építenek. A műholdküldetés célja egyrészt tudományos-technikai demonstráció, másrészt az űrkutatás népszerűsítése az oktatásban és a kapcsolódó területeken. A projekthez kapcsolódóan több tantárgy is indult az egyetemen (Űreszközök fedélzeti rendszerei és Űrtechnológia), valamint a hallgatók önálló laboratóriumi illetve diplomadolgozatot is készítettek a tárgyban.

A Masat-1 kisműhold a műholdak között az 1 U Cubesat osztályba tartozik. A Cubesat szabvány tartalmazza a műholdra vonatkozó méretkorlátozásokat (10x10x10 cm-es kocka) és tömeghatárokat (maximálisan 1 kg). E határparaméterek mellett kell egy olyan komplex rendszert összeállítani, amely architektúrájában hasonló a nagy kereskedelmi és katonai műholdakhoz. Ez a felépítés – a kis tömeggel természetszerűleg együtt járó alacsonyabb költségekkel karöltve – kiváló lehetőséget biztosít arra, hogy a munka során mindazon fejlesztési fázisokat végigjárjuk, amelyek egy ennél komplexebb műhold fejlesztését jellemzik.

A tervezés során a kis méret és a tömegkorlátozás mellett két jelentős kihívásnak kell megfelelni. Egyrészt minden fedélzeti elektronikának képesnek kell lennie extrém körülmények közötti (vákuum; -40 .. +80 °C hőmérséklet határok) működésre, másrészt a felbocsátás extrém mechanikai igénybevételét is el kell viselni a szerkezetnek és az alrendszereknek egyaránt. A rendszernek minden körülmények között megbízhatóan kell működnie, így célszerű az architektúrát egy pont-meghibásodás ellen védettként felépíteni.

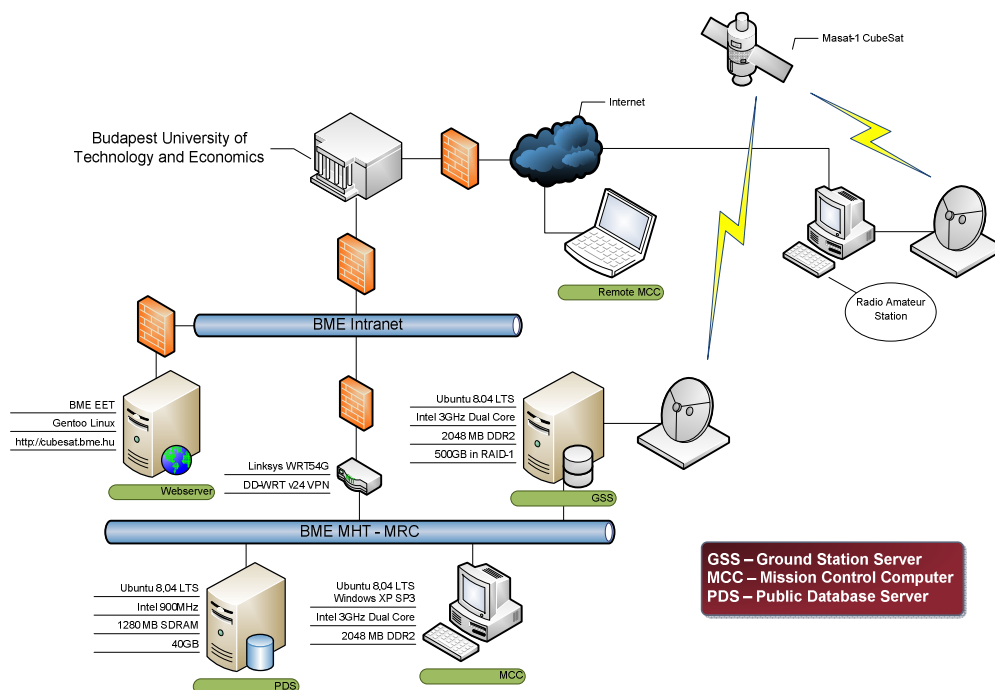
A MaSat-1 kisműhold fedélzeti rendszerének felépítése látható az 1. ábrán.



1. ábra A MaSat-1 kisműhold fedélzeti rendszerei

A műhold energiaellátását napelemek biztosítják. Az ezekből kinyerhető teljesítmény 1-2 W között van. Ebből gazdálkodva kell biztosítani az összes fedélzeti rendszer energiaellátását, ami komoly kihívást jelent. A napelemek optimális kihasználását maximális munkapont-követő áramkör (MPPT – Maximal Power Point Tracker) biztosítja, amihez egy DC-DC konverter (EPS – Electrical Power System) kapcsolódik, biztosítva az egyes részegységek számára szükséges tápfeszültséget. A földárnyékban eltöltött idő alatti működést, és az esetlegesen előforduló nagyobb pillanatnyi teljesítményfelvételt egy lítium-alapú akkumulátor fedezi. A fedélzeti intelligenciát egy mikroprogramozott vezérlőegységen alapuló fedélzeti adatkezelő biztosítja (OBC – On-Board Computer), ezen futnak a szükséges számítások, valamint a rendszer működését összehangoló ütemező. A műholdon kísérleti jelleggel egy félaktív elektromágneses stabilizáló rendszer került elhelyezésre, ezzel várhatóan biztosítható a MaSat-1 pozicionálása, s az aktuális pozíció mérése. Végül, de nem utolsósorban elhelyezésre került egy kommunikációs alrendszer, amely a fedélzeti számítógép és a földi állomás (GS – Ground Station) közötti adatátvitelt biztosítja.

A projektben a szerzők a kommunikációs rendszer fejlesztését végezték. A kommunikációs folyamat két résztvevője tulajdonképpen maga a MaSat-1 műhold, valamint Budapesten, a Műegyetemi Rádió Klubban (MRC) elhelyezett elsődleges illetve egy érdi másodlagos földi vezérlő állomás. A kommunikációs alrendszer kifejlesztése során tehát nemcsak a műholdfedélzeti alrendszer tervezésével és kialakításával kell foglalkozni, hanem a földi állomáson is ki kell alakítani a megfelelő hardver- és szoftverkörnyezetet. Mindkét földi állomás Interneten keresztül távolról elérhető és vezérelhető. Az ehhez szükséges számítógépes infrastruktúra látható a 2. ábrán.

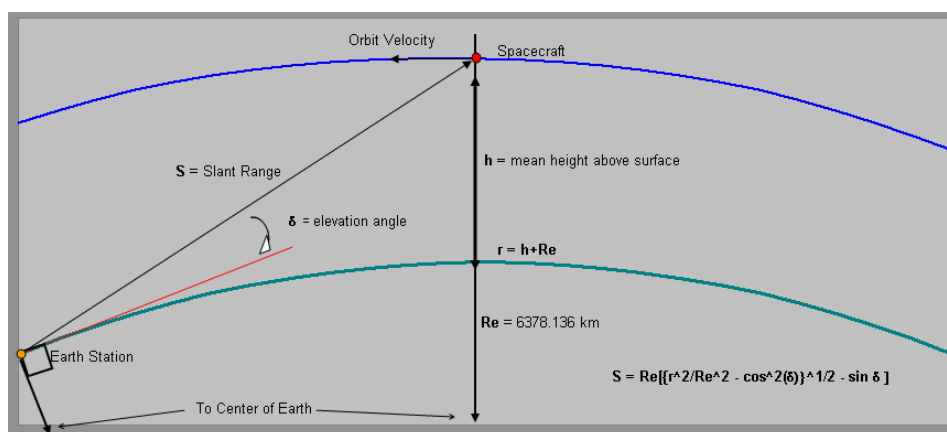


2. ábra A földi állomás felépítése

TERVEZÉSI PARAMÉTEREK

Műholdpálya

A műhold alacsony Föld körüli pályán (LEO – Low Earth Orbit) kering, a pályamagasság megközelítőleg 650-800 km. A pálya geometriájából adódóan a legnagyobb áthidalandó távolság a horizont. Ez magyarországi viszonylatban 3000 km-t jelent 800 km-es pályamagasság esetén, amely a gyakorlatban kisebb lesz, ugyanis a magyarországi domborzati viszonyok miatt nem látható a 0°-os elevációhoz tartozó horizont – 3. ábra.



3. ábra. A műholdpálya

A rádióösszeköttetés méretezésénél a pályaadatokból számított következő adatokat vettük figyelembe:

- Maximális pályamagasság: 800 km.
- Keringési sebesség: >7500 m/s.
- Keringési idő: kb. 100 perc.

A földi vételi oldalon szeretnénk a világ minden táján minél több rádióamatőrt bevonni a vételbe, így a rádióamatőr frekvencia kiosztásnak megfelelő sávokat és sávszélességet választottunk:

- Működési frekvencia sáv: 145 és 437 MHz.
- Maximális sávszélesség: 12,5 kHz.

Rádió link

A fent részletezett paraméterek alapján elkészített, a rádiós összeköttetés teljesítményviszonyaira vonatkozó számítási eredmények az 1. táblázatban találhatók.

MaSat-1 rádió link számítás	downlink	uplink	
frekvencia	437 345 000	145 980 000	Hz
hullámhossz	0,69	2,06	m
távolság	3 000 000	3 000 000	m
szakaszcsillapítás	155	145	dB
adóteljesítmény	20	43	dBm
adóantenna nyereség	0	10	dBi
vevőantenna nyereség	10	-10	dBi
vett teljesítményszint	-125	-102	dBm
vevő érzékenység	-127	-108	dBm
maximális sávszélesség	12 500	12 500	Hz
zajhőmérséklet (vevő bemenet)	500	500	K
vett zajteljesítmény	-131	-131	dBm
jel-zaj viszony (vevő bemenet)	6	28	dB
fading tartalék	2	6	dB

1. táblázat Teljesítményviszonyok

A kommunikáció a 70 cm-es illetve a 2 m-es rádióamatőr frekvenciasávon zajlik, ehhez hatályos frekvenciaengedélyt kértünk és kaptunk a Nemzeti és a Nemzetközi Hírközlési Hatóságtól. A műhold hívójele: HA5MASAT.

A rádiólink számításnál az antenna nyereségeket és a vevő érzékenységeket szándékosan alulról, a sávszélességeket és a távolságot pedig felülről közelítve vettük figyelembe. Az így kapott jel-zaj viszony és fading tartalék értékek azt mutatják (mivel pozitívak), hogy a rádiólink zárul.

Ezek alapján a földi adóoldali vezérléshez egy kb. 20 W RF kimeneti teljesítményű rádióadó (4. ábra), és az adott frekvenciasávra méretezett 10 dBi nyereségű irányított antenna, a műhold vételéhez

pedig egy $0,1 \mu\text{V} @ 50 \Omega$ érzékenységű rádióvevő (4. ábra), a hozzá tartozó minimum 10 dBi nyereségű antennával szükséges.

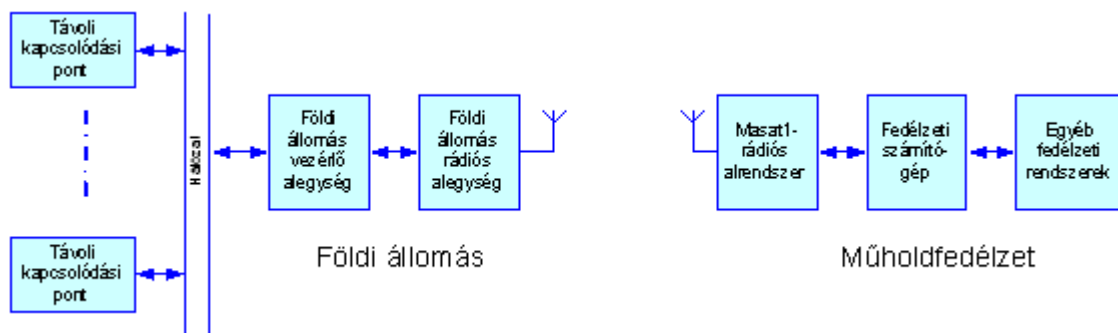


4. ábra. A földi állomás adó-vevője

A műholdoldali kommunikációs rendszer rádiós linkre vonatkozó minimális határparamétere a 10 dBm-es adóteljesítmény, valamint a -105 dBm-es érzékenység.

A KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZER

A műhold és a földi állomás közötti digitális adatkapcsolat a kommunikációs rendszer segítségével valósul meg. A rádiós összeköttetés alapvetően két jól elkülöníthető részből áll: az egyik a műhold, a másik a földi állomás, vagy a földi állomások rendszere. A két részen eltérő fejlesztési irányelveknek kell megfelelni. A teljes kommunikációs architektúra látható az 5. ábrán.



5. ábra. A teljes kommunikációs architektúra

Feladat

A kommunikációs rendszer alapvető feladata műhold – Föld irányban (downlink) a műhold belső paramétereinek (feszültségek, áramok, hőmérsékleti adatok, napelem megvilágítási értékek, giroszkóp és mágneses szenzor értékek, stb.) a földi állomásra továbbítása. Ezt nevezzük **telemetriának**.

Föld – műhold irányban (uplink) a kommunikációs rendszernek a földi állomásról érkező parancsokat kell venni és feldolgozni. Ezt nevezzük **telecommandnak**.

Műholdfedélzeti kommunikációs rendszer

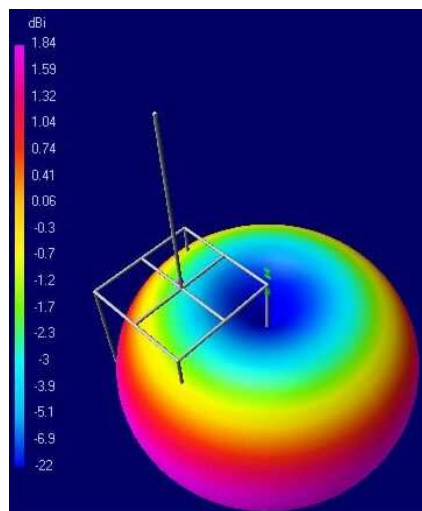
A műholdfedélzeti rádiós adatkapcsolati rendszer a következő paraméterekkel rendelkezik:

- Bemeneti maximális tápteljesítmény (tápteljesítmény-felvétel adásban) 600 mW.
- Adóteljesítmény: 100 mW.
- Vételi érzékenység: min. -105 dBm.
- Tápfeszültség 3,3 V ($\pm 5\%$).
- Méret: 90x90 mm bruttó méretű nyomtatott áramkörti lemez, a rögzítéséből adódó mechanikai megkötésekkel.
- Tömeg: max. 75 g.
- Működési hőmérséklet tartomány: -40..+80 °C
- Adási frekvencia: 437 MHz.
- Vételi frekvencia: 145 MHz.
- Antenna: monopól.
- Adásmód: 2FSK.
- Adatsebesség: 1200 bit/s.
- Sáv szélesség: 3000 Hz.

Egyes paramétereket a műholddal szemben támasztott követelmények, továbbiakat a fentebb részletezett rádiós linkparaméterek tették szükségessé, a felsorolásban szereplő, de korábban nem részletezett paraméterek leírása az alábbiakban olvasható.

Műholdfedélzeti antenna

A műhold antennája a műhold – Föld irányra méretezett egyszerű negyedhullámú sugárzó, melynek analízált iránykarakterisztikája a 6. ábrán látható.



6. ábra. A teljes kommunikációs architektúra

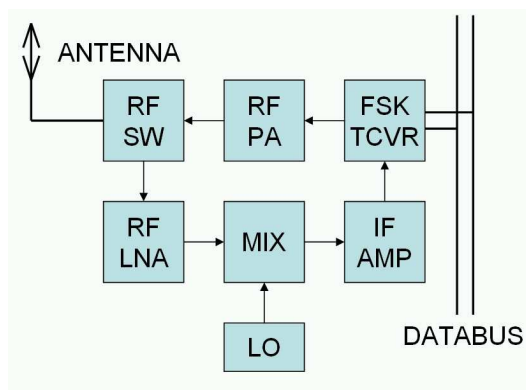
Ennek az antennának a feladata, hogy a 437 MHz-es jeleket a lehető legjobb hatásfokkal sugározza le a Földre, illetve a Földről érkező 145 MHz-es vezérlő jeleket a tőle elvárható legjobb hatásfokkal vegye.

Az antenna hossza úgy lett megválasztva, a 437 MHz-es sávon a lehető legnagyobb hatásfokkal működjön ($50\ \Omega$ körüli sugárzási ellenállás), illeszkedjen a műhold geometriai méreteihez (10x10x10 cm-es kocka), és a kockából nyitható legyen $\rightarrow 17\text{ cm}$.

Ez a hosszúság, a felmenő oldalon – 145 MHz-en – a hullámhossz kb. egy-tizenketted része. A relatíve kis hosszúság miatt a sugárzási ellenállás valós része kb. $2\ \Omega$ körüli, reaktáns része pedig erősen kapacitív jellegű. Ezt a bemeneti impedanciát kell teljesítményben illeszteni a műhold vevőjének $50\ \Omega$ -os bemenetéhez. Ezek miatt lesz az antenna uplink oldali nyeresége -10 dBi, kb. ugyanolyan kardiod jellegű iránydiagram mellett.

Műholdfedélzeti adó-vevő

A műholdon levő digitális adó-vevő felépítése a 7. ábrán látható.



7. ábra. A műholdfedélzeti adó-vevő felépítése

A rádió alapja egy integrált áramkörön megvalósított FSK adó-vevő, amely a 437 MHz-es sávon üzemel.

Adásirányban a kimeneti jele egy UHF teljesítményerősítőre kapcsolódik (RF PA). Ezután a jel egy hatékony harmonikus elnyomást megvalósító szűrőn keresztül csatlakozik egy diódás RF kapcsolóra (RF SW) és kerül az antennára.

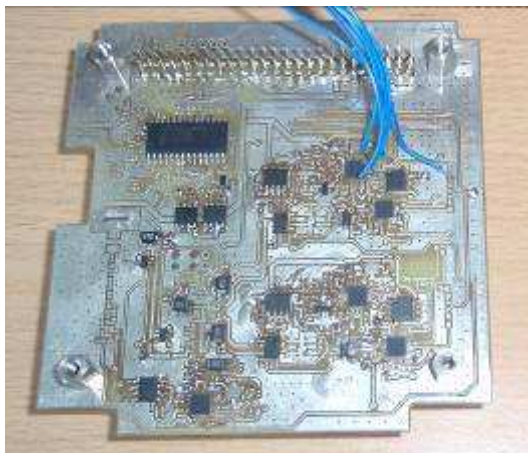
Vételirányban az antennáról jövő 145 MHz-es jel a diódás RF kapcsolón, sávszűrőn és RF előerősítőn (RF LNA) keresztül egy keverőre kapcsolódik (MIX). Ott egy helyi oszcillátor (LO) rezgésével keveredve egy középfrekvenciás erősítőn (IF AMP) keresztül kapcsolódik az adó-vevő IC vevőbemenetéhez (az adó-vevő IC 437 MHz-en üzemel).

A tényleges moduláció illetve demoduláció az adó-vevő IC-n belül történik. Ez a fedélzeti számítógép rendszerbuszára csatlakozik, ahol soros kapcsolaton keresztül vezérelhető. A műholdfedélzeti kommunikációs rendszer a vett csomagok értelmezését nem végzi, a vett adatokat

továbbítja a fedélzeti számítógép felé, illetve a fedélzeti számítógép adatait a megfelelő paraméterekkel lesugározza a földi vevőállomásra.

Az adó-vevő – ugyanúgy, mint a műhold működéséhez elengedhetetlenül fontos minden részegység – hidegtartalékolt, vagyis a teljes kommunikációs rendszer (hasonlóan a tápegységhez, fedélzeti számítógéphez) duplikált.

A műholdfedélzeti kommunikációs rendszer paneljének mérnöki példánya látható a 8. ábrán.

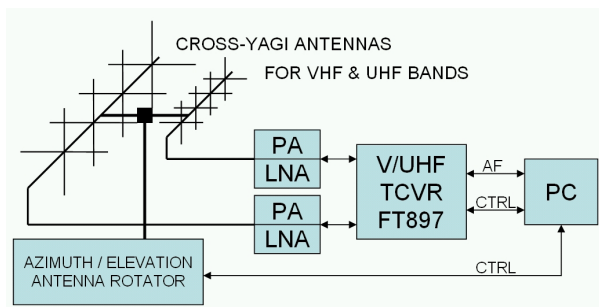


8. ábra. A mérnöki modell

A földi állomás

A földi állomás feladata a műhold jelének vétele, valamint parancsok továbbítása a műhold fedélzetére.

Mivel a kommunikáció digitális, ezért az átviteli láncban valahol szükséges digitalizálni mind adás, mind pedig vétel irányban. Ez a gyakorlatban úgy történik, hogy a földi állomás rádió adó-vevőjének hangszóró kimenete illetve mikrofon bemenete egy számítógép hangkártyájára csatlakozik. Az így felépített földi állomás blokkvázlata látható a 9. ábrán.



9. ábra. A földi állomás szerkezete

A rádió adó-vevő nemcsak a hangkártyán keresztül csatlakozik a számítógépre, hanem egy digitális porton is. Ennek oka a műhold keringési sebességében rejlik, mivel a 7500 m/s feletti sebesség esetén, a Doppler-hatásból adódóan a 437 MHz-es sávban több mint 10 kHz a frekvencia elcsúszás.

Ez jelentősen meghaladja a rádió középfrekvenciás sávszélességét, vagyis lehetetlenné teszi a vételt. A pályaadatok ismeretében azonban adott frekvenciasávban minden időpillanatban számítható a Doppler-csúszás mértéke. Az adó-vevő pontos frekvenciája ennek megfelelően állítható. Ezt a frekvencia korrekciót, pedig egyértelműen nem végezheti a műhold, hiszen semmilyen információja nincs az aktuális pozíciójáról, nem beszélve a földi állomásokhoz képesti sebességéről.

A rádióhoz természetesen tartozik frekvencia sávonként egy-egy nagyteljesítményű végfokozat (PA – Power Amplifier), illetve kis zajú előerősítő (LNA). Ez utóbbi a minél kisebb eredő zajtényező elérése érdekében az antennához a lehető legközelebb került elhelyezésre.

Az antenna fogatását illetve döntését is ugyanezen számítógép vezérli (Antenna Rotator).

Az elsődleges földi állomásról készült felvétel látható a 10. ábrán (vezérlő számítógép, tápegységek, rádió adó-vevők, antenna forgató vezérlő).

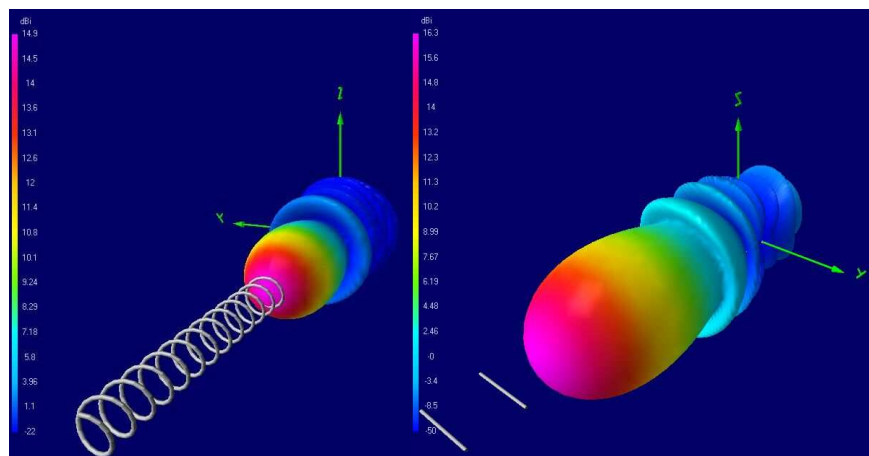


10. ábra. Az elsődleges földi állomás

Földi vevőállomás antenna

A műhold jele mind adás, mind pedig vételi irányban lineárisan polarizált – negyedhullámú monopól antenna. A gyakorlatban azonban – mivel a műhold a pályáján haladva forog, precesszáló mozgást végez, illetve belső állandó mágnes miatt a Föld mágneses terével kölcsönhatásban a mágneses sarkpontok környékén átfordul – nem tudjuk megmondani, hogy a jelének polarizációja adott időpillanatban milyen irányú. Ezek alapján a földi állomás antennáinak körpolarizáltak kell lenniük, hiszen a körpolarizált antenna bármely lineárisan polarizált jelet azonos érzékenységgel vesz.

A földi állomás antennái lehetnek kereszt-Yagi vagy helix típusúak (körpolarizáció) – 11. ábra.



11. ábra. Földi állomás antenna iránykarakteristikák – helix és kereszt-Yagi

Ahhoz, hogy a műholddal való kommunikáció során egy teljes átvonulás alatt minden időpillanatban biztosítsuk a megfelelő jelszinteket, az irányított antennákat a műhold pályadatainak ismeretében rá kell forgatnunk a műholdra mind azimut, mind pedig elevációs szögben (a horizonthoz tartozó félgömb felület bármely pontjára rá kell tudjunk fordulni). Ehhez egy kéttengelyű antennaforgatóra van szükség, valamint a hozzá tartozó vezérlő elektronikára, illetve a vezérlő számítógépre. A földi állomás antennarendszere a kereszt-Yagi antennákkal és az antennaforgatóval a 12. ábrán látható.



12. ábra. Földi állomás antennarendszere

Moduláció [1,2]

A telemetria és a telecommand adatok továbbítása adatcsomagok révén történik. Egy csomag nyers adathossza 32 bájt. Az eddig megismert feltételek alapján (távolság, antennák, frekvenciasáv, stb.) csak egyszerű digitális moduláció használható, amely jelen esetben a 2FSK (energetikailag hatékony – mindkét logikai állapothoz tartozik RF kimeneti teljesítmény; további fontos szempont, hogy a piacon számos gyártónál található FSK adás-vételt megvalósító RF eszköz).

Az FSK-hoz tartozó BER – SNR (bithiba arány – jel-zaj viszony) görbe alapján 6 dB feletti SNR esetén érhető el 1% alatti BER, hogyha az adatsebesség 1200 bit/s illetve az FSK jel sávszélessége 3000 Hz körüli. Ez a sávszélesség jól illeszkedik egy amatőr rádió adó-vevő SSB sávszélességéhez (4. ábra).

Kódolás [1,2]

A műhold-föld irányú kommunikáció kritikus jelentőségű a projekt szempontjából, így a szakaszcsillapítás esetén kiszámított megfelelő tartalékoláson túl megvizsgáltuk, hogyan lehetne tovább növelni az adatátvitel biztonságát.

Zajos csatornán történő átvitel esetén sok esetben alkalmaznak különböző kódolási eljárásokat. Ezek némelyike csak hibadetektálásra, míg mások hibajavításra is alkalmasak. Mivel a célunk a kommunikáció során a megbízhatóság javítása, így kódolástechnikai témakörben tett vizsgálódásunkkor hibajavító képességgel rendelkező kódolásokra szorítkoztunk.

A kódolási eljárás kiválasztása során egy fontos szempont az, hogy (mivel a kódolást elsődlegesen a műhold – Föld irányú adatátvitel során érdemes használni) maga a kódolás a lehető legkevesebb számítási kapacitással kivitelezhető legyen.

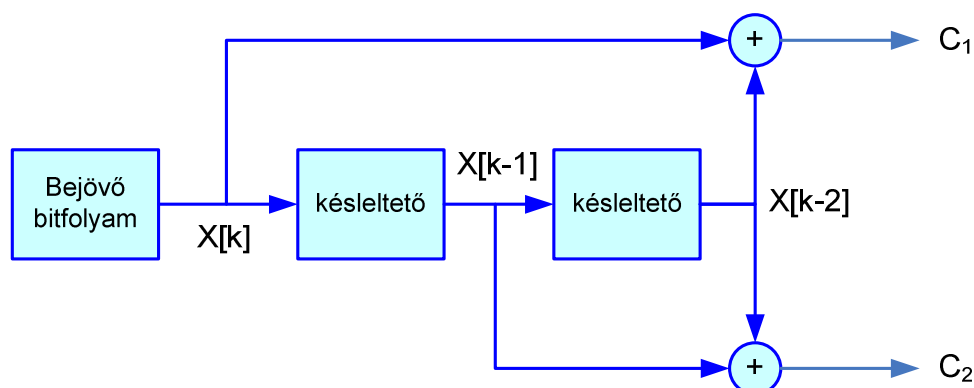
Ha csak a műhold-föld irányú átvitelt kódoljuk, akkor a dekódolás a földi állomáson, számítógép (PC) segítségével történik, így itt nem jelent problémát számítás-intenzív algoritmusok futtatása sem.

Ezzel a jellegzetes tulajdonsággal (egyszerű kódolás, számítás-intenzív dekódolás) rendelkeznek az úgynevezett konvolúciós kódok, trellis-alapú dekódert (Viterbi) alkalmazva. A konvolúciós kódolás lényege, hogy – a lineáris/ciklikus blokk kódolási eljárásoktól eltérően – az aktuális kód kiszámításakor nem egy adott adatblokkban levő biteket vesszük figyelembe, hanem egy csúszóablak alapján mindig az utolsó l kiküldendő bitből számítjuk a kiküldendő kódot.

Ezt a számot a konvolúciós kódoló kényszerhosszának nevezzük. A konvolúciós kódoló a bemenetére adott bitfolyamból egy hosszabb bitfolyamot generál. Ha a bemenetre adott bitek száma k , s a kódoló által generált kimeneti bitek száma n , akkor definiáljuk az ún. kódarányt az átvinni kívánt hasznos bitek és a kiküldött összes bit arányaként (1).

$$kódarány = \frac{k}{n} = \frac{\text{hasznos bitek}}{\text{összes bit}} \quad (1)$$

Egy 3 kényszerhosszú, 1/2 kódarányú konvolúciós kódoló blokkvázlata látható a 13. ábrán. Az összeadók a modulo 2 összeadás műveletét végzik el (XOR kapu).



13. ábra. Egy 1/2-es kódarányú kódolást megvalósító konvolúciós kódoló

A c_1 és c_2 kimenetek kiszámításának hozzárendelési szabálya az ábrából leolvasható (2).

$$\begin{aligned} c_1 &= x[k] + x[k-2] \\ c_2 &= x[k-1] + x[k-2] \end{aligned} \quad (2)$$

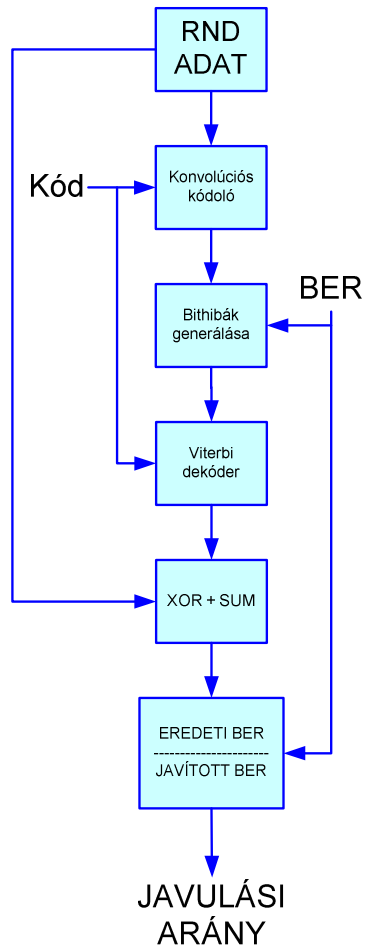
A kódoló által előállított bitsorozat dekódolása a Viterbi algoritmussal történhet. A rendelkezésre álló terjedelem rövidsége miatt a trellis alapú dekódolási folyamatot részletesen nem ismertetjük.

A dekódolási folyamatról annyit érdemes megjegyezni, hogy – mivel hibátlan átvitel esetén nem következhet bármilyen $c_1 c_2$ pár egy adott $c_1 c_2$ után – a dekóder a kapott bitfolyamra kiszámítja az összes lehetséges út költségét, majd végül a legkisebb a-posteriori hiba-valószínűséggel – a legkisebb költséggel – járó úton haladva dekódolja a küldött biteket.

A kódolás hatékonysága nagyban függ a c_1 és c_2 kimenetek kiszámítására alkalmazott hozzárendelési szabálytól, a választott L kényszerhossztól, az aktuális bithiba-aránytól, valamint a hibák eloszlásától.

Az optimális hozzárendelési szabály megtalálása érdekében Matlab környezetben szimulációkat végeztünk (14. ábra). A szimulációt 256 bit hosszú, véletlenszerűen generált adatsoron végeztük, a változó paraméterek a bithiba-arány (BER), a kényszerhossz és a $c_1 c_2$ hozzárendelési szabály voltak.

20 különböző BER-érték mellett az összes lehetséges 2 és 6 közötti kényszerhosszúságú hozzárendelési szabály esetén 1000 véletlenszerű adatsort generálva vizsgáltuk meg azt, hogy hogyan változik a bithibák száma a kódolás előtti állapot és a Viterbi-dekódolást követő állapot között.



14. ábra. A javulási arány kód- és BER-függését vizsgáló algoritmus folyamatábrája

Azt tapasztaltuk, hogy a 13. ábrán látható 3-as kényszerhossz és 1/2-es kódarány esetén a jellemzően előforduló bithiba-valószínűségek esetén megfelelő hozzárendelési szabályt alkalmazva akár két nagyságrenddel is csökkenthető a bithibák száma.

A 2. táblázat első oszlopában a szimuláció során generált bithiba-arány (BER) látható, míg a második oszlopban a kódolás előtti hibás bitek száma elosztva a Viterbi-dekódolást követő bithiba-aránnyal (IR – Improvement Rate – javulási arány).

Látható, hogy 0,1 és 0,2 %-os bithiba-arány esetén minden bithiba kijavítása sikeres volt, míg ennél nagyobb bithiba-arányok esetén is könnyen elérhető az 1-2 nagyságrendnyi hibajavítás. A kódolás még extrém nagy bithiba-arány (10%) esetén is értékelhető mértékben javít a beérkező adatokon.

BER [%]	Javulási arány [eredeti hibaszám/ megmaradt hiba]
0.1069	Inf
0.2147	Inf
0.2789	143.5000
0.4217	31.0000

0.5199	38.2143
0.6238	22.9286
0.6773	26.8077
0.8366	18.7174
0.9251	14.0000
0.9688	13.8472
1.4741	9.8506
1.9803	9.0177
3.0074	5.0407
4.1045	3.9477
5.0334	2.9600
5.8710	2.5821
6.9681	2.3481
7.9427	2.0193
8.9795	1.8077
9.9551	1.6850

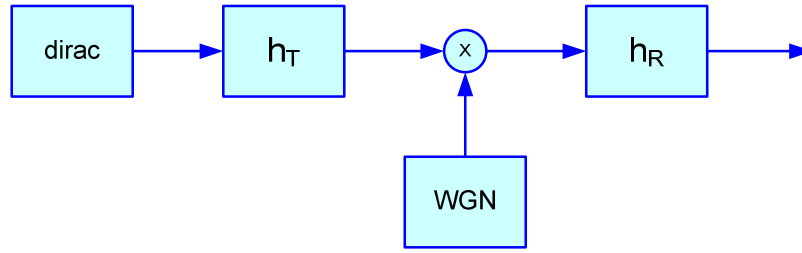
2. táblázat: Egy megfelelő kód javítási képessége a bithibaarány függvényében (szimuláció)

Zajszint alatti detektálás [1,2]

A műholdról a telemetriaadatok vétele a fent részletezett számítások és szimulációk alapján nagy nyereségű földi állomás antennák és antenaforgató berendezés segítségével lehetővé vált. Szeretnénk azonban biztosítani egy olyan működési módot, amellyel a nagy nyereségű antennával nem rendelkező rádióamatőrök számára is lehetséges a MaSat-1 jelenlétének detektálása.

Egy kézi rádió használata esetén az összegzett szakaszcsillapítás az irányított antenna 12..20 dB-es nyereségét elveszti. Amennyiben sikerül találni egy olyan eljárást, amellyel ezt a kb. 20 dB-es nyereséget pótolni lehet, akkor már egy ilyen kezdetleges berendezéssel is lehetővé válna a műhold detektálása. Noha ezzel a megoldással telemetria-adatok vétele nem lehetséges, ugyanakkor adott esetben már a „jelenlét”, mint adat is megfelelő információtartalommal bírhat.

Az irányított antenna 20 dB-es nyereségét elveszítve a beérkező jel már a zajszint alatt van. Szükség van egy olyan eljárásra, amellyel zajszint alól is lehetséges átvitt jelek azonosítása. A zajszint alatti detekcióhoz illesztett szűrős megoldást alkalmazunk. Az illesztett szűrő elvi felépítése látható a 15. ábrán.



15. ábra. Az illesztett szűrő, mint zajszint alatti detektor

Az ideális vevőkészülékben a vevőszűrő a következő megfontolások alapján határozható meg (3).

$$H_{R,opt}(f) = H_T^*(f) \Rightarrow h_{R,opt}(t) = h_T^*(n \cdot T - t) \quad (3)$$

Ekkor a jel-zaj viszony a beérkező jel energiájával arányos (4).

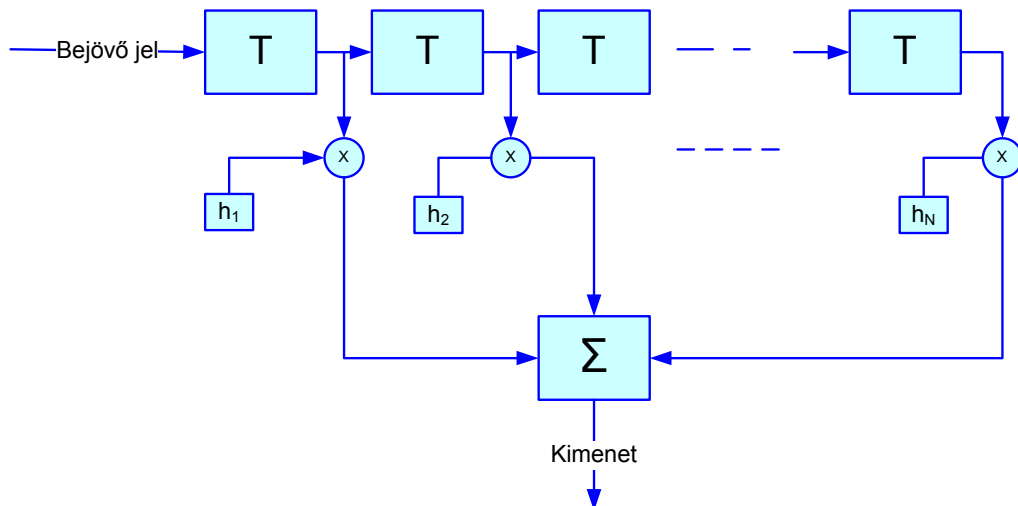
$$SNR_{\max} = \frac{2 \cdot E}{N_0} \quad (4)$$

Ahol a jelenergia (5).

$$E = \int_0^{N \cdot T} x^2(t) dt \quad (5)$$

A 16. ábrán látható egy illesztett szűrő digitális reprezentációja (egy FIR szűrő). Ennek matematikai leírása a következő (6).

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(N - k) \quad (6)$$



16. ábra. Illesztett digitális szűrő blokkdiagrammja

Az illesztett szűrős detektálás lényege, hogy a detektálni kívánt jelalaknak megfelelő mintákat állítunk be a **h** szűrővektorban, majd folyamatosan kiszámítjuk a beérkezett jel és a keresett jelforma korrelációját.

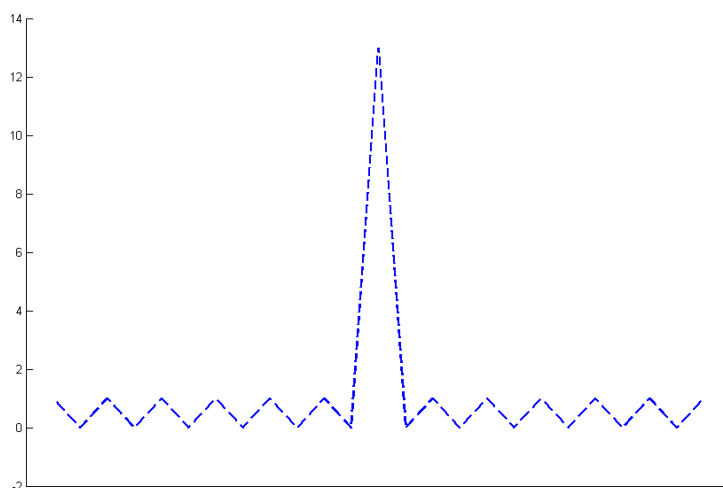
Amennyiben a beérkezett jel pont az általunk a szűrővektorban elhelyezett jelalak, akkor a szűrő kimenete a választott „kód” autokorrelációjával arányosan nagy érték lesz.

Zajszerű bemenet esetén a szűrő kimenete nulla várható értékű zajszerű kimeneti értéket ad. Egy ilyen szűrős megoldással, egy sok szimbólumból álló kódsorozatot alkalmazva – az adatsebesség csökkentése árán – jelentősen növelhető a helyes döntés valószínűsége (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – amely most nem a sávszélességet növeli, hanem az adatsebességet csökkenti). A nyereség a választott kódsorozat hosszától, a „felismerhetőség” az autokorrelációjától függ.

Olyan kódot érdemes választani, amelynek a lehető legnagyobb az ún. PSLS értéke (Peak SideLobe Suppression) – (7).

$$PSLS = 20 \cdot \log \frac{\text{Maximális_érték}}{\text{Második_legnagyobb_érték}} \quad (7)$$

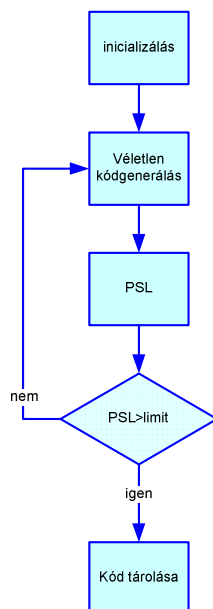
A 17. ábrán látható egy jellegzetes kód, a Barker-13 autokorrelációs függvénye. A középen látható korrelációs csúcs (kiemelés) értéke megegyezik a kód hosszával, így az ilyen kódok vizsgálatánál a továbbiakban elég csak a „második legnagyobb érték” (Peak Sidelobe Level, PSL) minimalizálására törekedni.



17. ábra. A Barker-13 kód autokorrelációs függvényének abszolút értéke

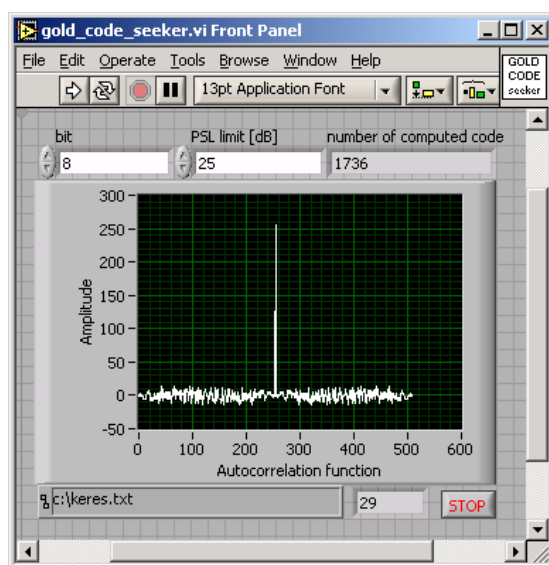
Hosszabb kódok alkalmazásával ennél nagyobb kiemelés is elérhető, ugyanakkor érdemes megjegyezni azt, hogy a 13-nál hosszabb kódok között nem létezik olyan, ahol a korrelációs csúcson kívül a korrelációs összeg csak 0 és 1 között változik.

A továbbiakban egy optimális kód megkeresését tűztük ki célul. Egy bizonyos kódméret alatt a kódkeresésre jó megoldást jelent az adott hosszúságú összes kód esetében a PSL kiszámítása. Ugyanakkor a lehetőségek száma a kódhossz függvényében exponenciálisan növekszik, így 50-60 bites kódhossz felett már érdemes véletlenszerű eljárással kódokat keresni. A kódkeresés algoritmus a 18. ábrán látható.



18. ábra. Kódkereső algoritmus

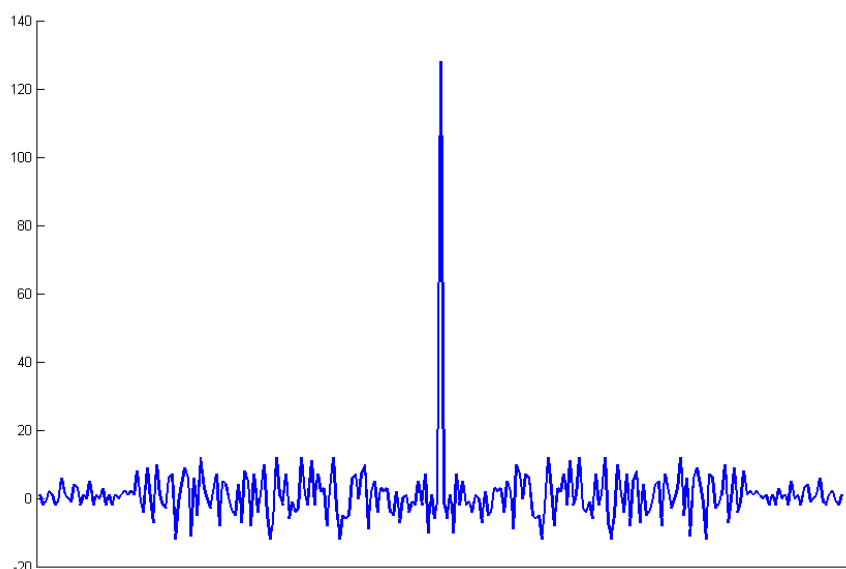
LabView környezetben elkészült egy, a kódkereső algoritmust megvalósító program. A program felhasználói felülete a 19. ábrán látható.



19. ábra. Adott PSL-nél jobb kódokat eltároló kódkereső program

A 18. ábrán látható kódkereső algoritmus futásának felgyorsítására a következő eljárás került implementálásra: az autokorreláció kiszámításakor minden egyes léptetéskor kiszámításra kerül az aktuális érték, s ha ez egy bizonyos határnál magasabb (azaz a PSL nem lehet kellően alacsony), akkor a program abbahagyja az aktuális kód kiszámítását, és új kóddal kezd számolni.

A tesztelés során a 128 bit hosszúságú sorozatokra koncentráltunk, itt sikerült néhány 23 dB-nél nagyobb kiemeléssel rendelkező kódot előállítani (20. ábra).



20. ábra. 128 bit hosszú generált kódsorozat autokorrelációs függvénye

A generált kódok ismeretében – mivel a vevő is ismeri az adott kódot – a 20 dB-nél nagyobb PSL miatt gyakorlatilag lehetővé válik a zajszint alatti jelek detekciója, vagyis nagynyereségű antenna hiányában is detektálhatóvá válik a műhold.

RÉSZEGYSÉGEK TESZTELÉSE

A teljes rendszer megépítése előtt a főbb részegységeket (keverő, teljesítményerősítő, RF kapcsoló, stb.) külön-külön vizsgálatoknak kellett alávetni. A tesztpaneleken meghatároztuk az analóg elemek szükséges paramétereit, valamint elkészült egy, a rádiós adó-vevő IC-t tesztelő, a kommunikációs rendszer tesztelése során a fedélzeti számítógép szerepét betöltő hardver és szoftver is.

A tesztpaneleket a továbbiakban különböző kísérleteknek vetettük alá. Különösen fontos volt az, hogy az alkatrészek az űrbeli körülmények között is megállják helyüket. Minden beépített alkatrész teljesíti a megadott hőmérséklet specifikációt, de szerettünk volna meggyőződni arról, hogy a kommunikációs rendszer fent említett egységeibe beépítve is megfelelően működnek-e.

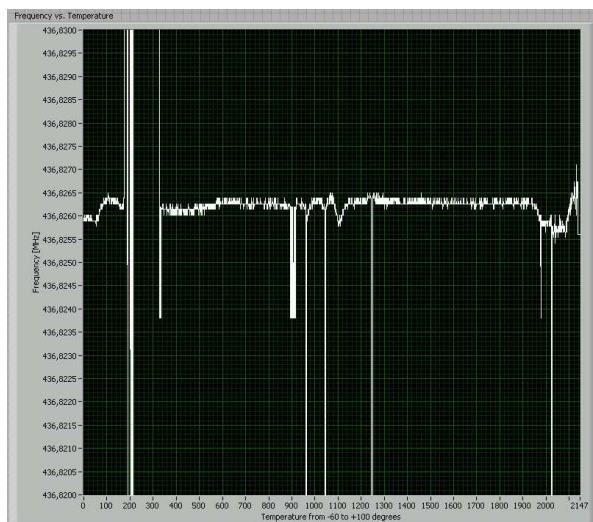
A tesztelési fázis legnagyobb részét a hőmérsékleti tesztek tették ki. Ezekhez a Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszéken rendelkezésre álló hőkamrát használtuk (21. ábra). Minden tesztpanel -40 és +80 °C hőmérséklettartományban vizsgáltunk.



21. ábra. A hőkamra

A működés hőmérsékletfüggésének vizsgálatakor a legfontosabb kérdést a kommunikáció referenciáját biztosító órajelgenerátor stabilitása jelentette. Az adó-vevő IC ennek a generátornak az órajelét használja referenciaként, a 437 MHz-es jelet a néhányszor 10 MHz-es referencia PLL-es sokszorozásával állítja elő. Ennek következtében a referencia-órajelben jelentkező kismértékű hiba is nagy frekvencia elcsúszást eredményezhet, ami az adás és a vétel során is hibát okoz.

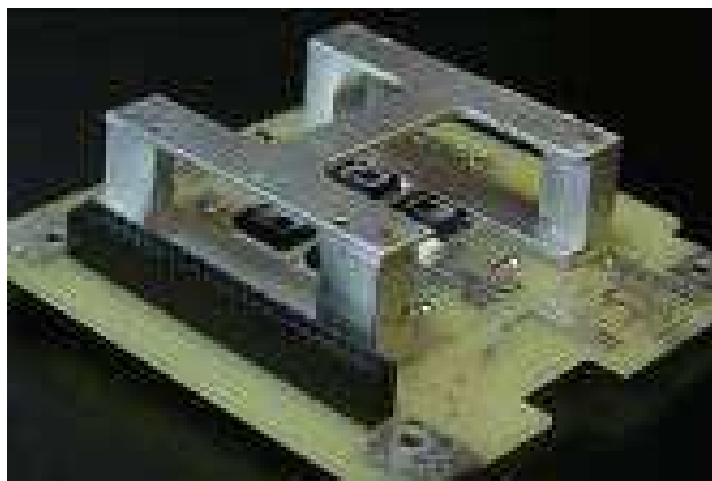
A normál kvarckristályok alkalmazása esetén a hiba már kis hőmérsékletváltozások esetén is a megengedett határnál több volt (20-50 ppm), így TCXO (Hőmérsékletkompenzált Kristályoszillátor) alkalmazása mellett döntöttünk. A -40 - +80 °C hőmérséklettartományban a TCXO alkalmazásával a kimenő frekvencia a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** ábrán láthatóan alakult.



22. ábra. Az adó 435MHz-es adófrekvenciája a hőmérséklet függvényében

Az ábrán látható hirtelen frekvenciaváltozások a mérési elrendezés módosítása miatt adódtak. Az ábrán a folytonos szakaszok jelentik a releváns mérési eredményeket. Látható, hogy a középponti frekvenciához képest maximálisan 500 Hz-es ingadozás lépett fel, ez a 3 kHz-es sávszélesség mellett megfelelő.

A tesztelések következő fázisát a rázópados tesztek jelentették. E tesztek során az egységeknek 40 G ütésszerű, és 10 G szinuszos terhelést kellett elviselni. A rázástesztekhez saját tervezésű nyomtatott áramkör készült, melyen a műhold fő egységeinek mechanikai szempontból érzékeny alkotóelemei kaptak helyet. A teszteléshez használt nyomtatott áramkör fotója a 23. ábrán látható.



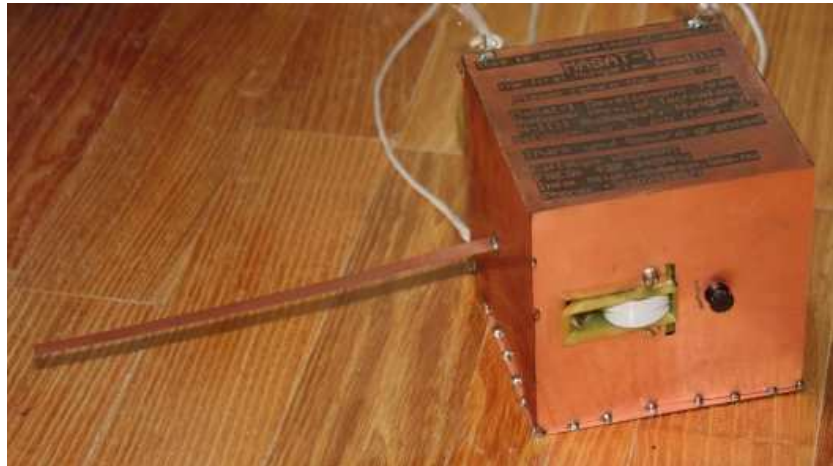
23. ábra. A rázástesztek próbadarabja

A rázási tesztek sikeresen zárultak, a választott alkatrészek mindegyike megfelelően viselte a terhelést.

A részegységek mérése során több problémába ütköztünk, emiatt pl. az RF kapcsolók esetén egy másik gyártótól kellett alkatrészeket rendelnünk, mivel az eredetileg kiválasztott IC nem teljesítette az adatlapjában megadott specifikációkat (1 dB-es kompressziós pont és beiktatási csillapítás). Ezek a problémák sok esetben hátráltatták a fejlesztési folyamatot, így kisebb csúszásokat voltunk kénytelenek elkönyvelni.

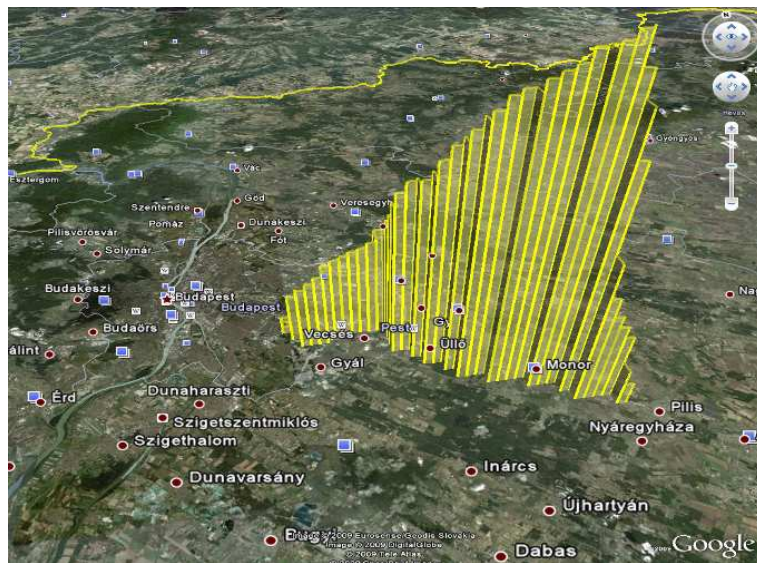
Éles teszt – Meteorológiai ballon

Az Országos Meteorológiai Szolgálat jóvoltából lehetőségünk nyílt egy meteorológiai ballonos kísérletben való részvételre, ami jó alkalom volt arra, hogy a kommunikációt rendszerszinten tesztelhessük. Meteorológiai ballonokat naponta kétszer, az ország két pontjáról bocsátanak fel, mérési célból. Ezek a ballonok akár 20-30 km-es magasságig is felemelkedhetnek, ahol a hőmérséklet nagyrészt -60 °C körül van. Erre a repülésre készítettük el a kisműhold M1:1 méretarányú modelljét, amely tartalmazta a fedélzeti rendszerek egyszerűsített változatát, így a kommunikációs egységet is. Az elkészített műhold modell látható a 24. ábrán.



24. ábra. A meteorológiai tesztnél használt műhold modell

A meteorológiai ballonos kísérlet során a modell $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on antennát nyitott valamint a kommunikációs rendszer a zord körülmények között is megfelelően vizsgázott. A ballon útvonala a 25. ábrán látható.



25. ábra. A meteorológiai ballon útvonala

A repülés során a következő terhelések érték a műhold modellt:

- Maximális magasság: 31 km
- Termikus terhelés: $+20\text{..}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Nyomás: 1000..7 hPa
- Maximális sebesség: 20 m/s

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GÉHER Károly: Híradástechnika, Műszaki Könyvkiadó, 2000
 [2] PROAKIS J. G. Digital Communication, McGraw-Hill Higher Education, 2005