

Dudás Levente¹ – Varga Lajos²

MASAT-1 COM – AZ ELSŐ MAGYAR MŰHOLD KOMMUNIKÁCIÓS ALRENDSZERE – PÁLYÁRA ÁLLÁS, MŰHOLD VÉTEL ÉS VEZÉRLÉS, ÜZEMSZERŰ MŰKÖDÉS ³

A Masat-1-et, az első magyar műholdat a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán fejlesztették ki. Előadásunkat a kommunikációs rendszer repülő példányának elkészítésével és a kommunikációs tesztekkel kezdjük. Ezt követően ismertetjük a műholdintegráció főbb lépéseit, és a műhold illesztését a felbocsátószerkezethez. Előadásunk harmadik szakaszában a műhold felbocsátást, a műhold vételét és vezérlését ismertetjük, valamint kitérünk az első mérési eredményekre.

MASAT-1 – THE COMMUNICATION SUBSYSTEM OF THE FIRST HUNGARIAN SATELLITE – LAUNCH, SATELLITE RECEPTION AND COMMANDING, OPERATION

Masat-1, the First Hungarian Satellite was developed at the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Budapest University of Technology and Economics. In the first section we deal with the production of the flight model of the communication subsystem, and with communication test procedures. Then the satellite integration, and the satellite's integration to the launch vehicle are introduced. The third section deals with the launch, reception and commanding of the satellite, altogether with the introduction of the first measurement data.

BEVEZETÉS

2007-ben kezdődött a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karán a Masat-1 kisműhold fejlesztése. A hallgatói kezdeményezést az Elektronikus Eszközök valamint a Szélessávú Hírközlés és Villamosságatan Tanszék karolta fel. A tervezési munkákat magyar mérnökök és mérnökhallgatók végezték, így a Masat-1 Magyarország első önálló űreszköze. Míg a Cubesatok tervezői sokszor alkalmaznak piacon hozzáférhető komplett megoldásokat, a Masat-1 esetében a fejlesztő csapat nem használt fel felhasználásra előre elkészített (ún. „off-the-shelf”) alrendszert, így a Masat-1 ebből a szempontból (is) unikálisnak tekinthető. 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.

2 évvel ezelőtti cikkünkben beszámoltunk a projekt akkori állásáról. Jelen cikkünkben a legfontosabb alapvetések ismertetését követően összefoglaljuk a 2010 óta eltelt időszak eseményeit és a projekt jelenlegi állását.

¹ BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, dudas@mht.bme.hu

² BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar

³ Lektorálta: Dr. Ludányi Lajos ny. okl. mk. alez; főiskolai tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, ludanyi.lajos@uni-nke.hu

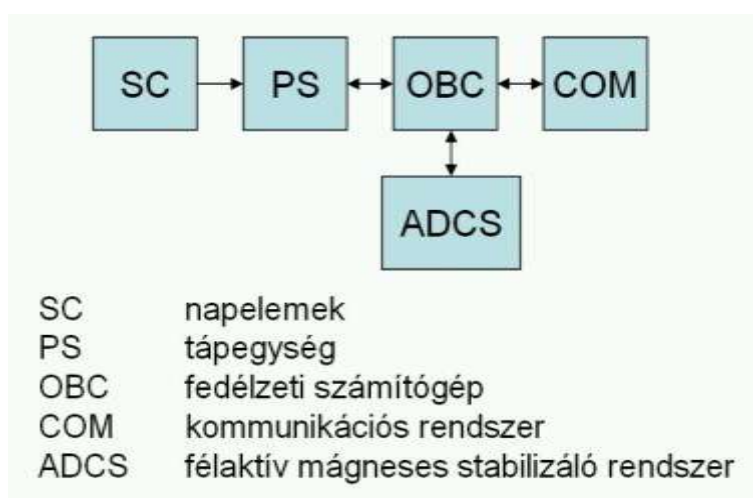
Az ún. Cubesat szabványt 1999-ben alakították ki a CalPoly és a Stanford egyetemek együttműködésében. A szabványban rögzítésre kerültek a műholdak főbb mechanikai paraméterei, valamint a műhold és a rakéta közötti illesztőfelület. A szabványosítás célja, hogy a szabványnak megfelelő műholdak gyorsabban és olcsóbban rakétába integrálhatók legyenek. A Cubesat szabványnak megfelelő műholdak tömege 1 kg (megj.: 2012-ben már 1,33 kg-os tömeg is megengedett, de ez a Masat-1 kisműhold fejlesztési fázisában még nem volt elfogadott), befoglaló mérete 10x10x10 cm. A Cubesat szabvány megenged a 10x10x10 cm-es (ún. 1 unit, 1U) egységnyi méret többszöröseinek megfelelő méretű holdakat, ezeket (10x10x20, 10x10x30) rendre 2U és 3U műholdaknak jelölik. A szabványnak megfelelő műholdak korlátozott tömege ráadásul segít a felbocsátás költségeinek relatíve alacsonyan tartásában.

A Masat-1 pikoműhold az 1U osztályba tartozó Cubesat. A tervezés megkezdésekor még nem volt lehetőség 1,33 kg-os 1U pikoműholdak felbocsátására, így a Masat-1 az 1 kg-os felső tömeghatárnak megfelelően készült.

A szabványban meghatározott, valamint az űrbeli körülmények által adott határparaméterek mellett olyan komplex rendszert kellett összeállítani, amely architektúrájában hasonló a nagy kereskedelmi és katonai műholdakhoz. Ez a felépítés – a kis tömeggel természetesen 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,

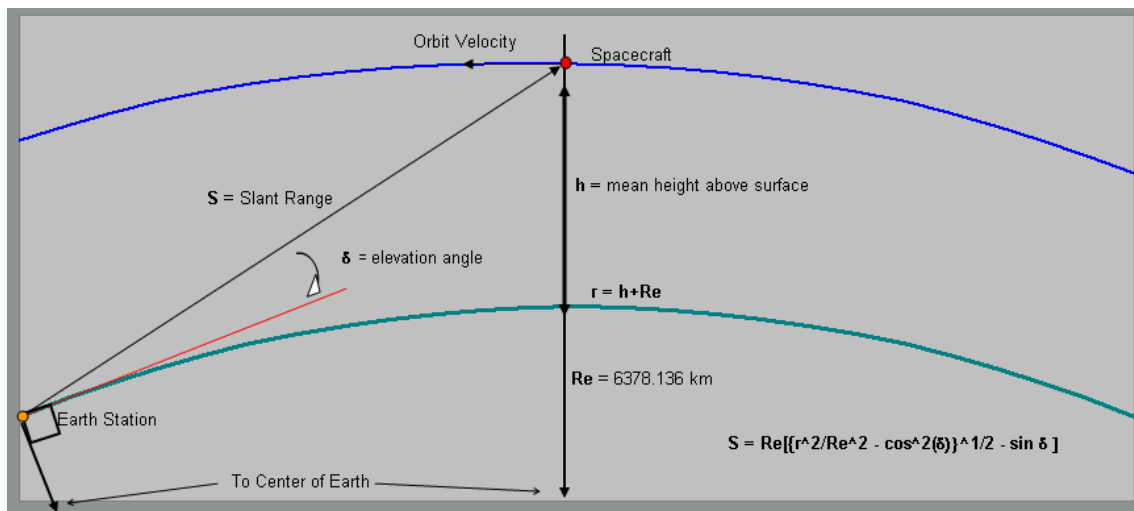
ami komoly kihívást jelent. A napelemek optimális kihasználását maximális munkapont-követő áramkör (MPPT – Maximal Power Point Tracker) biztosítja, amihez egy DC-DC konverter (EPS – Electrical Power System) kapcsolódik, biztosítva az egyes részekységek számára szükséges tápfeszültséget. A földárnyékban 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.

TERVEZÉSI PARAMÉTEREK

Műholdpálya

A műhold alacsony Föld körüli pályán (LEO – Low Earth Orbit) kering, a pályamagasság megközelítőleg 350/1450 km (elliptikus pálya). A pálya geometriájából adódóan a legnagyobb áthidalandó távolság a horizont. Ez magyarországi viszonylatban 4500 km-t jelent, amely a gyakorlatban kisebb lesz, ugyanis a helyi domborzati viszonyok miatt nem látható a 0°-os elevációhoz tartozó horizont – 2. ábra.



2. ábra A műholdpálya

A rádióösszeköttetés méretezésénél a pályaadatokból számított következő adatokat vettük figyelembe:

- maximális pályamagasság: 1450 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 sáv szélességet választottunk:

- működési frekvenciasáv: 145 és 437 MHz;
- maximális sáv szélesség: 12,5 kHz.

Rádió link

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

távolság (horizont)	d	4500	km
frekvencia	f	437.345	MHz
hullámhossz	lambda	0.69	m
szabadtéri szakaszcsillapítás	a0	158	dB
adóteljesítmény	Pa	20	dBm
adóantenna nyereség	Ga	0	dBi
vevőantenna nyereség	Gv	12	dBi
vett jelszint	Pv	-128	dBm
sáv szélesség	B	3000	Hz
zajtelszint	Pz	2.484E-17	W
zajtelszint	Pz	-138	dBm
jel-zaj viszony	SNR	10	dB
rádió érzékenység	Us	1.00E-07	V
	Ps	2E-16	W
	Ps	-157	dBW
	Ps	-127	dBm
tartalék		1	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.



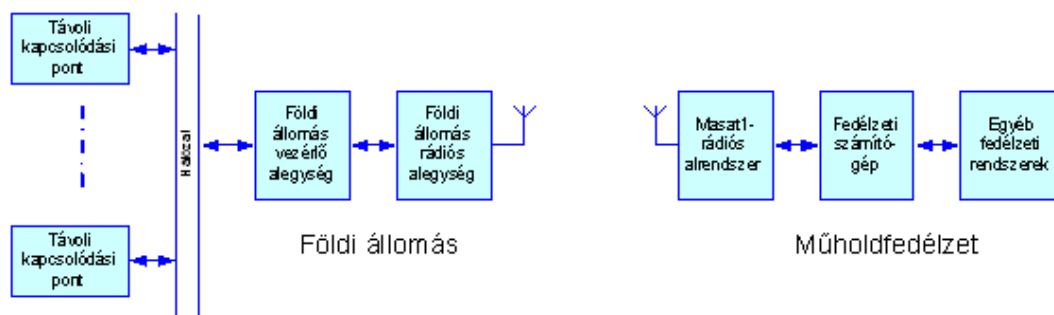
3. ábra A földi állomás adó-vevője

A rádiólink számításnál az antenna nyereségeket és a vevő érzékenységeket szándékosan alulról, a sávzsélességeket 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 (3. ábra), és az adott frekvenciasávra méretezett 10-12 dBi nyereségű irányított antenna, a műhold vételéhez pedig egy $0,1 \mu\text{V} @ 50 \Omega$ érzékenységű rádióvevő (3. ábra), a hozzá tartozó minimum 12 dBi nyereségű antennával szükséges.

A műholdoldali kommunikációs rendszer rádiós linkre vonatkozó minimális határparamétere a 20 dBm-es adóteljesítmény, valamint a -108 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 4. ábrán.



4. 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:

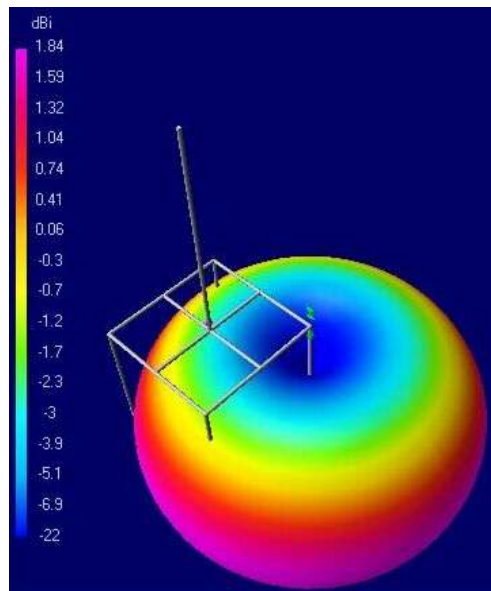
- bemeneti maximális tápteljesítmény (tápteljesítmény-felvétel adásban) 1000 mW;
- adóteljesítmény: 100 / 400 mWerp;
- vételi érzékenység: min. -108 dBm @ BER = 0,001;
- tápfeszültség 3,3 V ($\pm 5\%$);
- méret: 90x90 mm bruttó méretű nyomtatott áramköri lemez, a rögzítéséből adódó mechanikai megkötésekkel;

- tömeg: max. 75 g;
- működési hőmérséklet tartomány: $-40..+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- adási frekvencia: 437,345 MHz;
- vételi frekvencia: 145,980 MHz;
- antenna: monopól;
- adásmód: 2 Gaussi FSK;
- adatsebesség: 625 / 1250 bit/s;
- sávszélesség: 3000 Hz.

Egyes paramétereket a műholddal szemben támasztott követelmények, továbbiakat a fentebb részletezett rádiós linkparaméterek tettek 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 analizált iránykarakterisztikája a 5. ábrán látható.



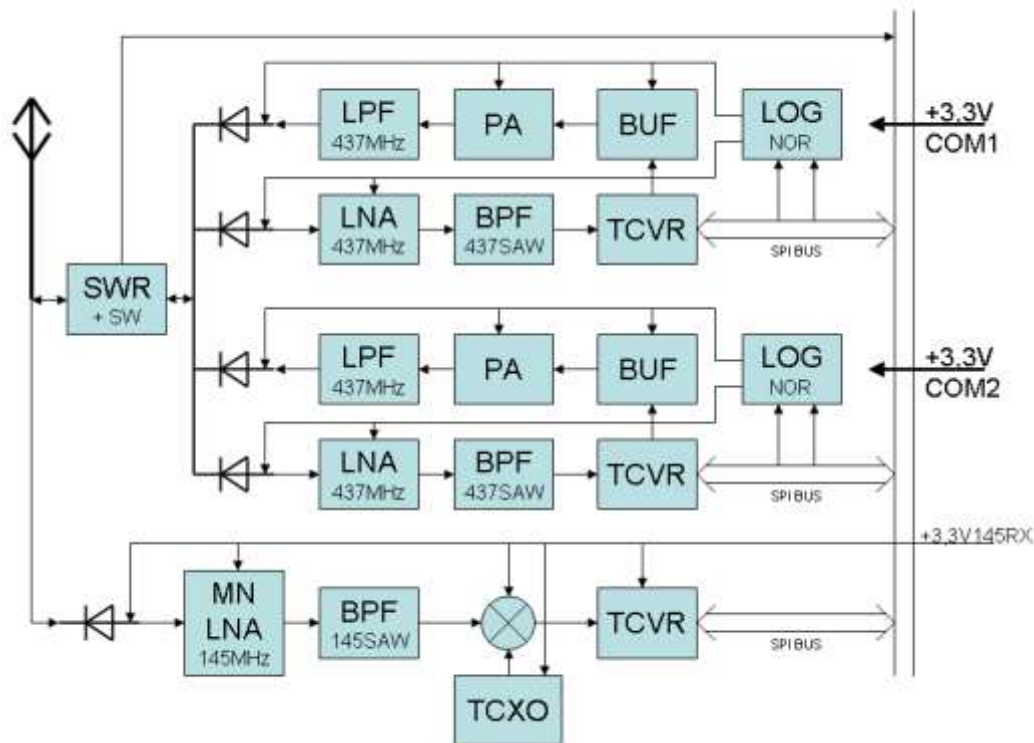
5. ábra A műhold antennájának sugárzási diagramja

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 ($10\times 10\times 10\text{ cm}$ -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 relative 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 -30 dBi , kb. ugyanolyan kardioid jellegű iránydiagram mellett.

Műholdfedélzeti adó-vevő

A műholdon levő digitális adó-vevő felépítése a 6. ábrán látható.



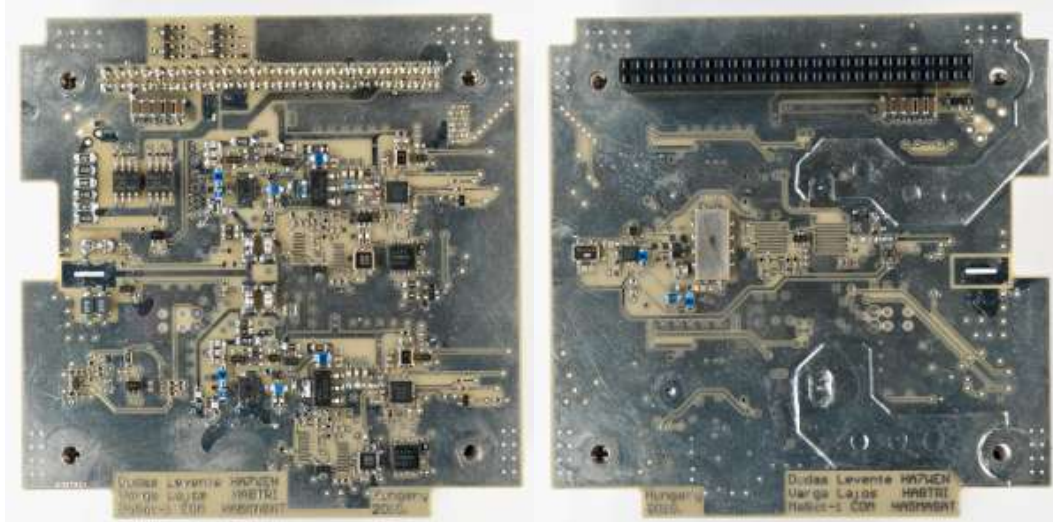
6. ábra A műholdfedélzeti adó-vevő felépítése

A rádió alapja egy integrált áramkörön megvalósított FSK adó-vevő, amely a 437 MHz-es sávon üzemel (TCVR). Adásirányban a kimeneti jele egy UHF teljesítményerősítőre kapcsolódik (PA). Ezután a jel egy hatékony harmonikus elnyomást megvalósító szűrőn keresztül csatlakozik egy diódás RF kapcsolóra és kerül az antennára.

Vételirányban az antennáról jövő 145 MHz-es jel a diódás RF kapcsolón, impedancia illesztő hálózaton (MN), sávszűrőn (BPF) és RF kiszájú előerősítőn (LNA) keresztül egy keverőre kapcsolódik. Ott egy helyi oszcillátor (TCXO) rezgésével keveredve egy középfrekvenciás erősítőn keresztül kapcsolódik az adó-vevő IC vevőbemenetéhez.

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 repülő példánya látható a 7. ábrán.

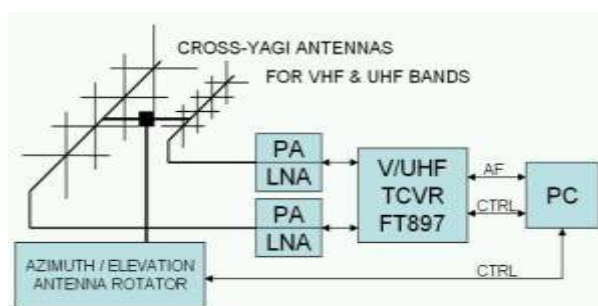


7. ábra A repülő példány

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 8. ábrán.



8. 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.

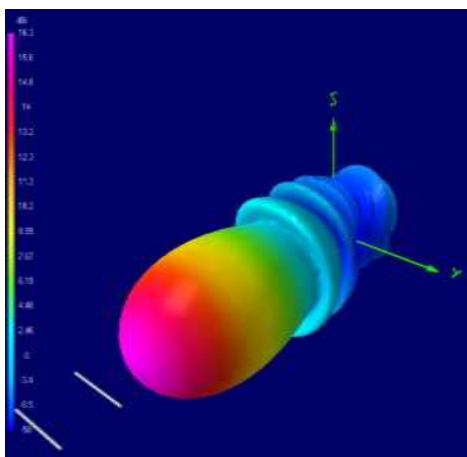
A rádióhoz természetesen tartozik frekvencia sávonként egy-egy nagyteljesítményű végfokozat (PA – Power Amplifier), illetve kiszájú előerősítő (LNA). Ez utóbbi a minél kisebb eredő zajtényező elérése érdekében az antennához a lehető legközelebb került elhelyezésre.

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

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 állandómágnesese 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 körpolarizáltnak kell lenniük, hiszen a körpolarizált antenna bármely lineárisan polarizált jelet azonos érzékenységgel vesz.

A földi állomás kereszt-Yagi antennáinak sugárzási karakterisztikája látható a 9. ábrán.



9. ábra Földi állomás antenna iránykarakterisztika – kereszt-Yagi

Az elsődleges földi állomás antennarendszeréről készült felvétel látható a 10. ábrán.



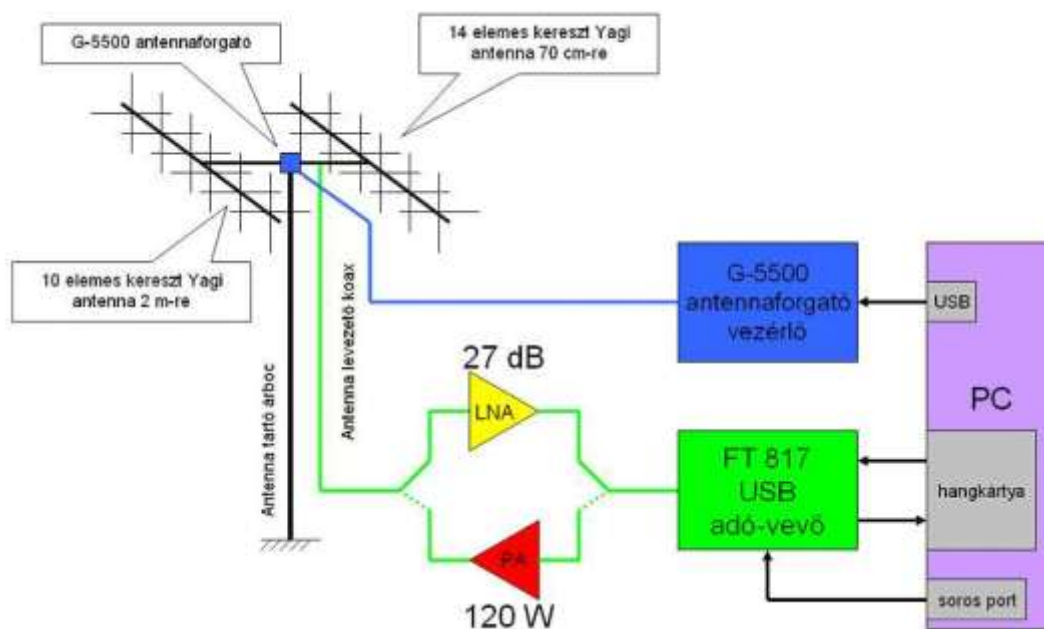
10. ábra Az elsődleges földi állomás antennarendszere

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 antennarendszerének egy 70 cm-es kereszt-Yagi antennája a 11. ábrán látható.



11. ábra 70 cm-es kereszt-Yagi antenna

A tartalékolás nemcsak a műholdon található alrendszerekre érvényes, hanem a földi állomásokra is: az érdei másodlagos földi állomás felépítése a 12. ábrán, az antennarendszere pedig a 13. ábrán látható.



12. ábra Másodlagos földi állomás



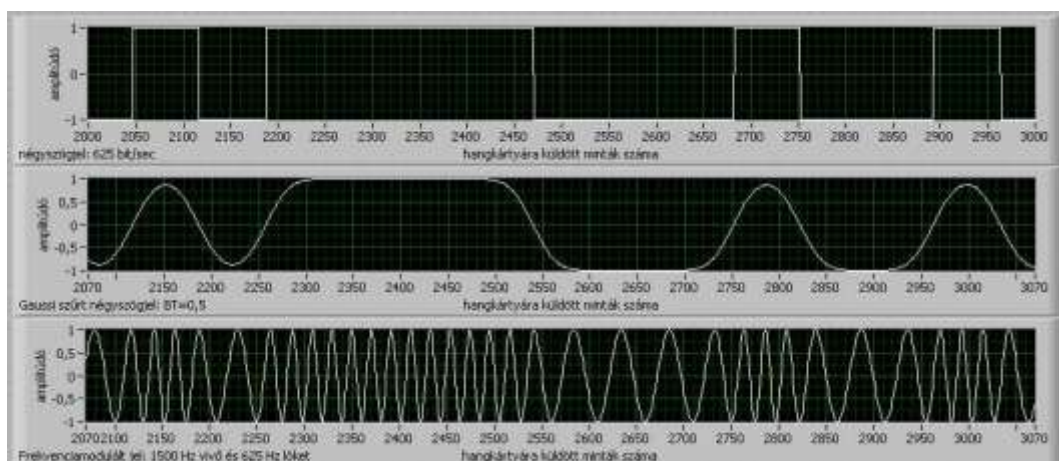
13. ábra Másodlagos földi állomás antennarendszere

Moduláció [1,2]

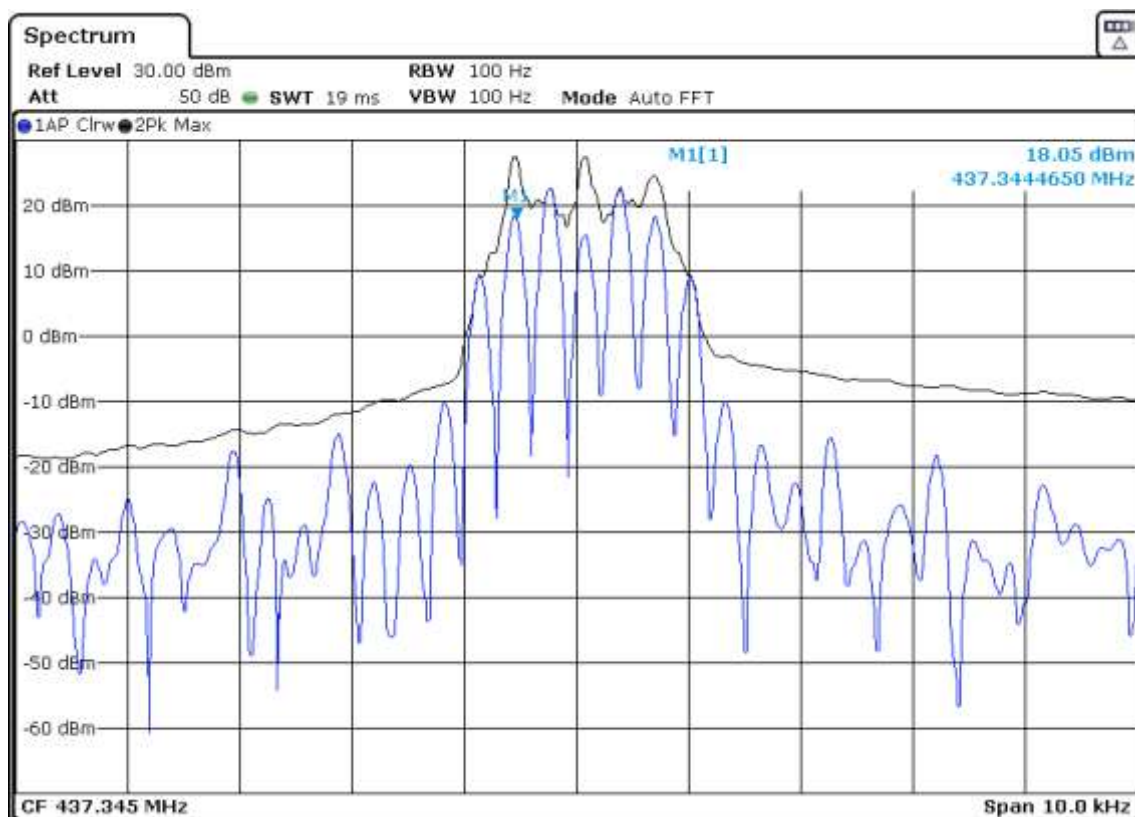
A telemetria és a telecommand adatok továbbítása adatcsomagok révén történik. Egy csomag nyers adathossza 32 bájt. Az eddig megismert feltételek alapján (távolság, antennák, frekvenciasáv, stb.) csak egyszerű digitális moduláció használható, amely jelen esetben a 2FSK (energetikailag hatékony – mindkét 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 1250 bit/s illetve az FSK jel sávszélessége 3000 Hz körüli. Ez a sávszélesség jól illeszkedik egy amatőr rádió adó-vevő SSB sávszélességéhez.

A küldött adatbitekhez az adott bitsebességnek megfelelően egy adott hosszúságú négyyszögjel tartozik, amely mind adás, mind vétel oldalon áthalad egy Gaussi szűrőn a spektrális hatékonyság növelése érdekében, és ez a szűrt adatbiteknek megfelelő négyyszögjel modulálja frekvenciában az 1500 Hz-es segédvivőt – 14. ábra.



Ez a frekvenciamodulált hangfrekvenciás jel kerül a földi állomás adó-vevőjének mikrofon bemenetére és keveredik fel a 145/437 MHz-es RF sávba. A kisugárzott jel mért spektruma látható a 15. ábrán. Jól látható, hogy a Gaussi szűrésnek köszönhetően a tényleges RF sávszélesség 2..2,2 kHz nagyságú, amely jól illeszkedik az SSB adó-vevő 3000 Hz körüli sávszélességéhez.



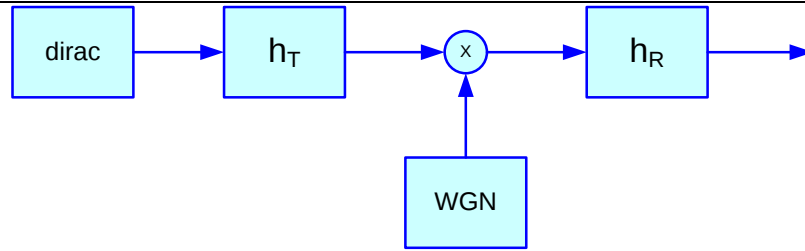
15. ábra A GFSK jel spektruma

Zajszint alatti detektálás [1,2]

A műholdról a telemetriaadatok vétele a fent részletezett számítások és szimulációk alapján nagy nyereségű földi állomás antennák és antennaforgató 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 kézirádió használata esetén az összegzett szakaszcsillapítás az irányított antenna 12 dB-es nyereségét elveszti. Amennyiben sikerül találni egy olyan eljárást, amellyel ezt a kb. 12 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 12 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 16. ábrán.



16. 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).

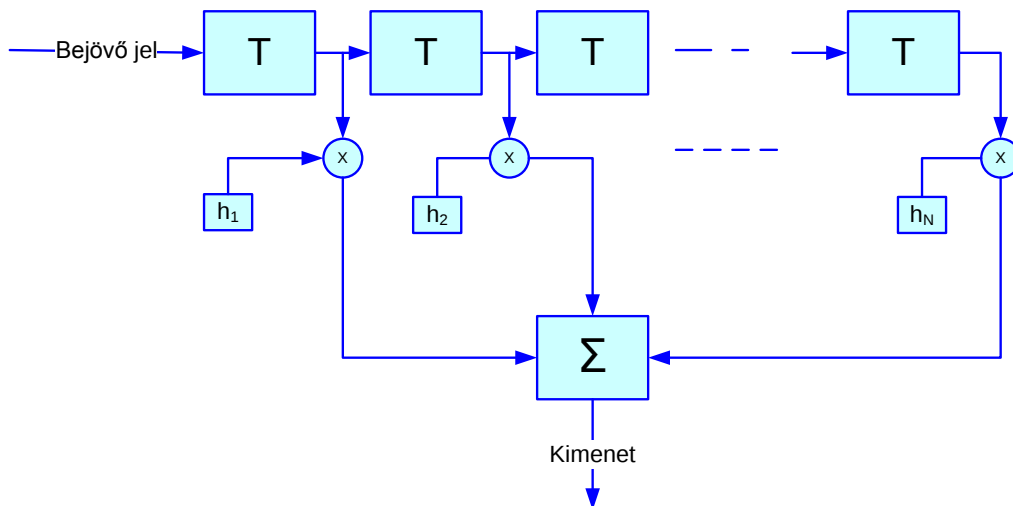
$$SNR_{\max} = \frac{2 \cdot E}{N_0} \quad (4)$$

Ahol a jelenergia (5).

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

A 17. ábrán látható egy illesztett szűrő digitális reprezentációja (egy FIR szűrő). Ennek matematikai leírása a következő (6).

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



17. ábra Illesztett digitális szűrő blokkdiagrammja

Az illesztett szűrős detektálás lényege, hogy a detektálni kívánt jelalaknak megfelelő mintákat állítunk be a $\mathbf{h}$ szűrővektorban, majd folyamatosan kiszámítjuk a beérkező jel és a keresett jel-forma korrelációját. Amennyiben a beérkező jel pont az általunk a szűrővektorban elhelyezett jelalak, akkor a szűrő kimenete a választott „kód” autokorrelációjával arányosan nagy érték lesz.

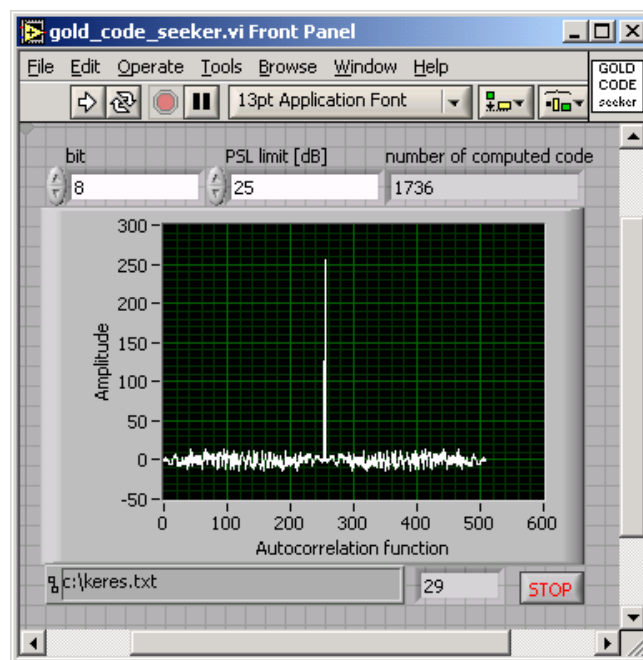
Zajszerű bemenet esetén a szűrő kimenete nulla várható értékű zajszerű kimeneti értéket ad. Egy ilyen szűrős megoldással, egy sok szimbólumból álló kódsorozatot alkalmazva – az adatsebesség csökkentése árán – jelentősen növelhető a helyes döntés valószínűsége (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – 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).

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

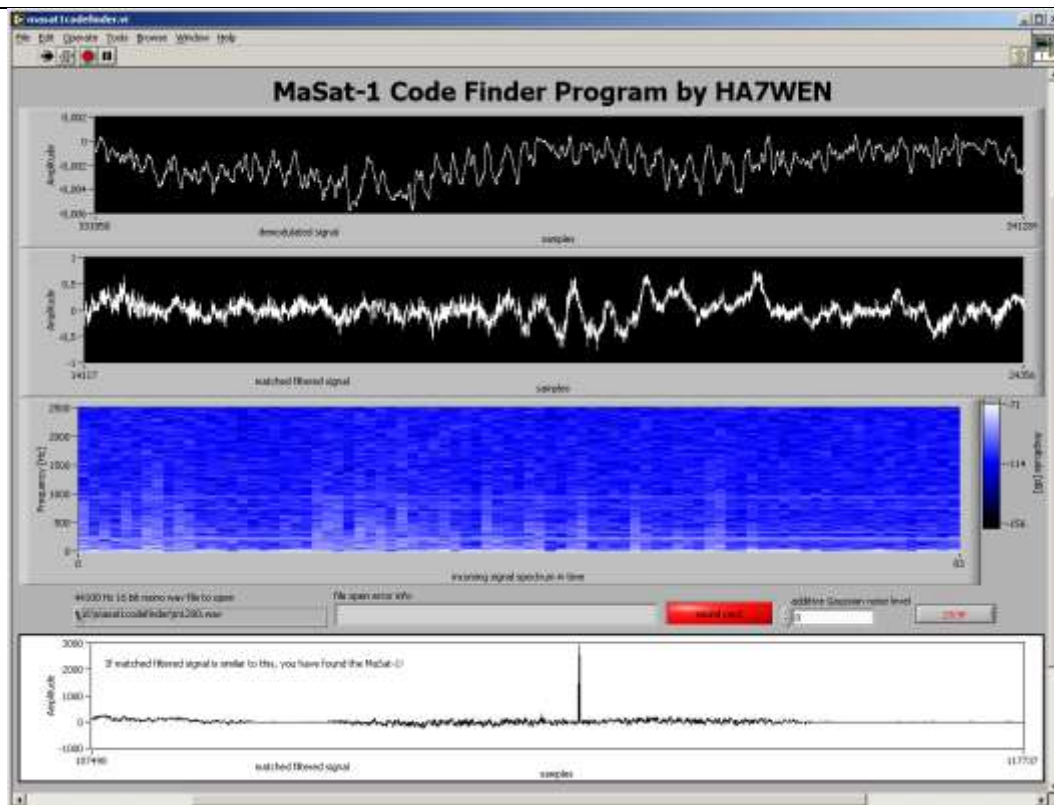
A továbbiakban egy optimális kód megkeresését tűztük ki célul. Egy bizonyos kódméret alatt a kódkeresésre jó megoldást jelent az adott hosszúságú összes kód esetében a PSL kiszámítása. Ugyanakkor a lehetőségek száma a kódhossz függvényében exponenciálisan növekszik, így 50-60 bites kódhossz felett már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

LabView környezetben elkészült egy, a kódkereső algoritmust megvalósító program. A program felhasználói felülete a 18. ábrán látható.



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

A műholdról lesugárzott telemetria csomagok között van egy olyan csomag, amely egy 512 bit hosszúságú kódot tartalmaz. Az ehhez tartozó detektáló program a 19. ábrán látható.



19. ábra Masat-1 zajszint alatti detektáló program

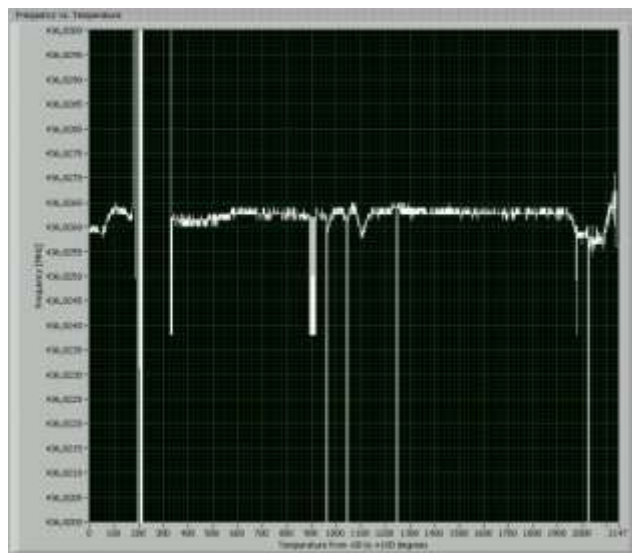
RÉSZEGYSÉGEK TESZTELÉSE

A teljes rendszer megépítése előtt a főbb részegységeket (keverő, teljesítményerősítő, RF kapcsoló, stb.) külön-külön vizsgálatoknak kellett alávetni. A tesztpaneelen 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.



20. ábra A hőkamra

A tesztpanelet a továbbiakban különböző kísérleteknek vetettük alá. Különösen fontos volt az, hogy az alkatrészek az ürbeli 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 (20. ábra). Minden tesztpanelt -40 és $+80$ °C hőmérséklettartományban vizsgáltunk.



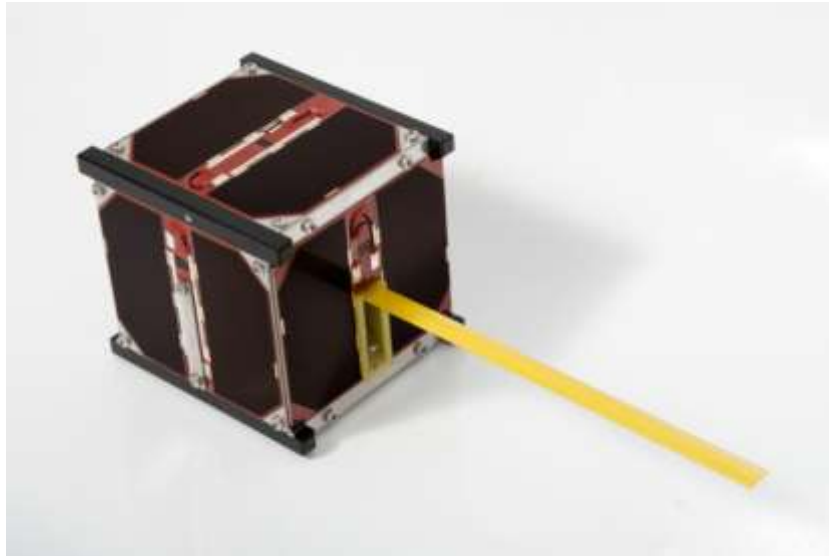
21. ábra Az adó 435MHz-es adófrekvenciája a hőmérséklet függvényében

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 21. ábrán láthatóan alakult.

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 70 G ütősszerű, és 28 G szinuszos terhelést kellett elviselni. A rázástesztetekhez saját tervezésű nyomtatott áramkör készült, melyen a műhold fő egységeinek mechanikai szempontból érzékeny alkotóelemei kaptak helyet. A rázási tesztek sikeresen zárultak, a választott alkatrészek mindegyike megfelelően viselte a terhelést.

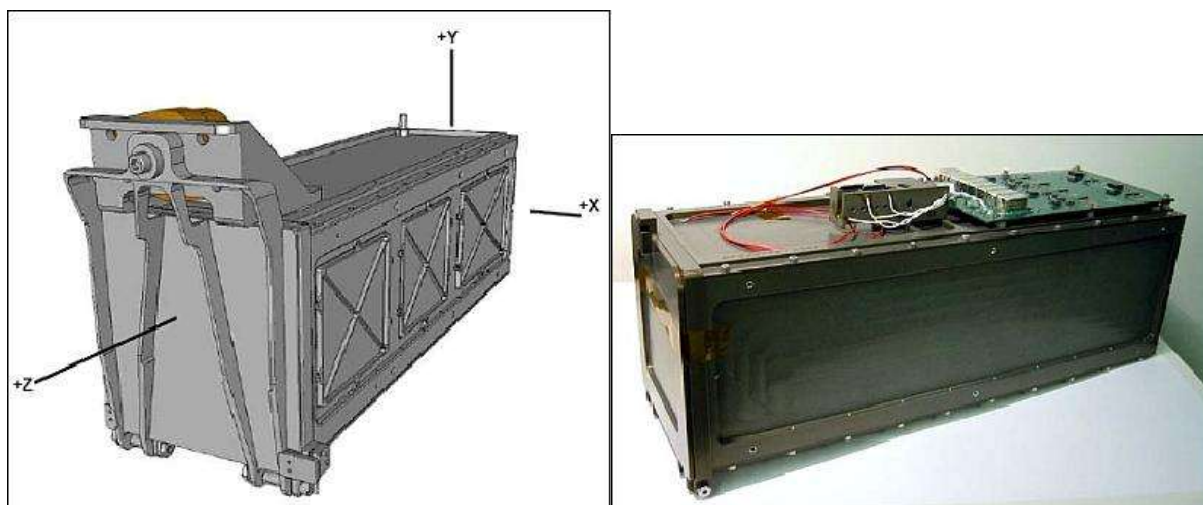
Integrálásról szólva két integrálási szakaszt különböztetünk meg. Elsőként a kommunikációs rendszer került beillesztésre a műhold szerkezetébe. A kommunikációs rendszer integrációjáról és a vonatkozó tesztekéről egy következő cikkben számolunk be. Az integrált műhold fotója látható az alábbi ábrán.



22. ábra A műhold integrált repülő példánya Magyarországon (fenn) és közvetlenül a kibocsátószervezetbe integrálás előtt (lenn)

Egy második integrációs szakaszt jelentett a műhold elhelyezése a rakétára rögzített kibocsátószervezetben. Az alrendszerek integrálásával előálló kész műhold integrációjára 2011 novemberében került sor a Franciaországbeli Toulouse-ban.

Ekkor egy speciálisan Cubesat műholdakhoz tervezett kibocsátószervezetbe, egy ún. P-POD-ba (Poly Picosatellite Orbital Deployer - 23. ábra) kerül elhelyezésre a műhold.



23. ábra P-POD

A P-POD-ba integrálást követően meg kellett győződni arról, hogy a műhold nemcsak önmagában, hanem más műholdakkal és a P-POD-dal összezárván sem kelt olyan zavaró mechanikai rezgéseket, amelyek rezonanciákat okozhatnak a fedélzeten. A tesztek sikerrel zárultak, a 2. számú P-POD megkapta a szükséges minősítéseket.

FELBOCSÁTÁS

A pályára állító rakéta az ESA új, kis és közepes méretű hasznos terheket földközeli pályára állítani képes hordozója, a Vega. Az ESA hordozórakéta-családja az alábbi ábrán látható. A Vega az ábra bal oldalán látható.

A Vega fejlesztését 1998-ban kezdte meg az Olasz űrügynökség (ASI) és az ESA. A rakéta menetkésztömege 127000 kg, hossza 30 méter feletti. A hordozórakéta 4 fokozatból épül fel, amelyek az alábbiak:

	Méret	Hajtóanyag tömege	Hajtóanyag típusa	üzemidő	Tolóerő
1. Fokozat: P80	10,5x3 m	88 tonna	Szilárd	110 s	3,040 kN
2. Fokozat: Zefiro 23	7,5x1.9 m	24 tonna	Szilárd	77 s	1,200 kN
3. Fokozat: Zefiro 9	3,8x1.9 m	10 tonna	Szilárd	117 s	213 kN
4. Fokozat: AVUM	1,7x1,9	0.55 tonna	Folyékony	317 s (spec.)	2.45 kN

2. táblázat Vega rakétafokozatok

Az első három fokozat elsősorban a rakéta gyorsítását szolgálja, míg az utolsó fokozat a precíz pályára állítás érdekében többször újraindítható, folyékony hajtóanyagú tolómű.



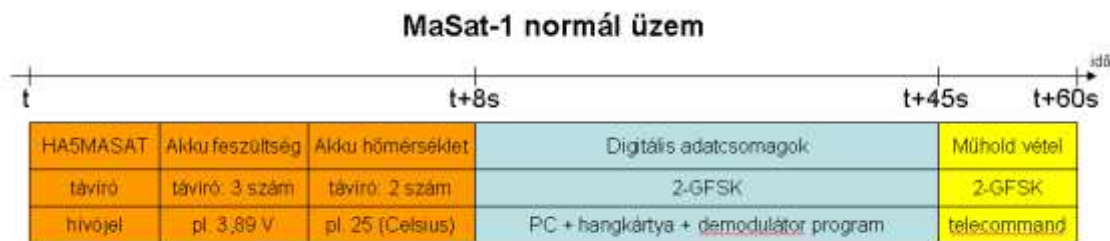
24. ábra ESA hordozórakéták (balról): Vega, Soyuz, Ariane5 ATV, Ariane5

A Masat-1 kisműhold pályára állítására 2012. február 13-án került sor, a Vega hordozórakéta első repülésén. A felbocsátás kezdete magyar idő szerint délelőtt 11:00. 85 perccel később már minden, a Vega által szállított űreszköz pályára állt. A kisműholdak ettől a pillanattól kezdve még 30 percig inaktív állapotban voltak, ezután kezdődött a normál üzem.



25. ábra A Vega felbocsátás közben (VV01 misszió)

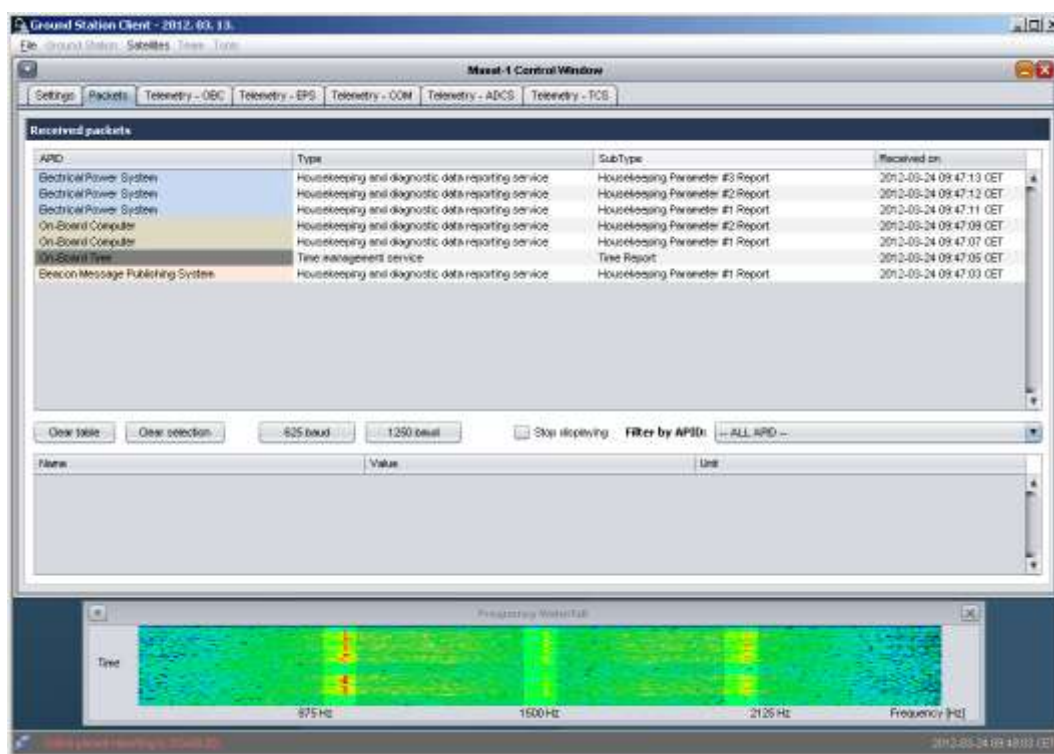
A sikeres pályára állítás után a műhold megkezdte normál üzemét – 26. ábra.



26. ábra Masat-1 normál üzemű időzítés diagramja

Normál üzemben a műhold ideje háromnegyedét telemetriaadatok sugárzásával tölti. Külön parancs kiküldésével lehetséges a műhold működését és méréseit befolyásolni, valamint a normál adatokon túlmutató paramétereket lekérni. A vezérlő állomások tartalékolt elrendezésben működnek, az elsődleges állomás Budapesten, a tartalék állomás Érden található.

A földi állomáson futó vezérlő és jelfeldolgozó szoftver egy pillanatfelvétele látható a 27. ábrán.



27. ábra Masat-1 földi állomás vezérlő szoftver

A földi állomások teljes rendszeréhez tartoznak a világon elszórtan található rádióamatőrök, akik folyamatosan figyelik a műholdat, és rendszeresen küldenek vett adatcsomagokat. A Masat-1 honlapja (cubesat.bme.hu) alapján a rádióamatőr vételi statisztika látható a 28. ábrán.

Vételi statisztika

A küldetés naponta összesített állapotát és a jövőbeni működési módokat foglaljuk össze az érdeklődőknek.

Műhold vételi statisztika (2012. 03. 12.)

A statisztikát naponta frissítjük, igyekszünk mindig pontos adatokat közölni, ha valaki mégis kimaradt volna, kérem jelezzel! A csapat nagyon hálás minden közreműködőnek!

Beérkezett csomagok száma:	271.264
Résztevő rádióamatőrök száma:	133

Ez a statisztika nem tartalmazza a BME elsődleges és tartalék állomás által vett csomagok számát, tisztán a rádióamatőrök által összegyűjtött adatcsomagok. Egy adatcsomag mérete 84 Byte.

Top 5 rádióamatőr

- ▶ ZL2BX – 43.379 csomag – Új-Zéland
- ▶ VE6AXL – 38.013 csomag – Kanada
- ▶ OM3BC – 26.438 csomag – Szlovákia
- ▶ W8KRF – 18.232 csomag – Amerikai Egyesült Államok
- ▶ VK5HI – 15.846 csomag – Ausztrália

28. ábra Vételi statisztika

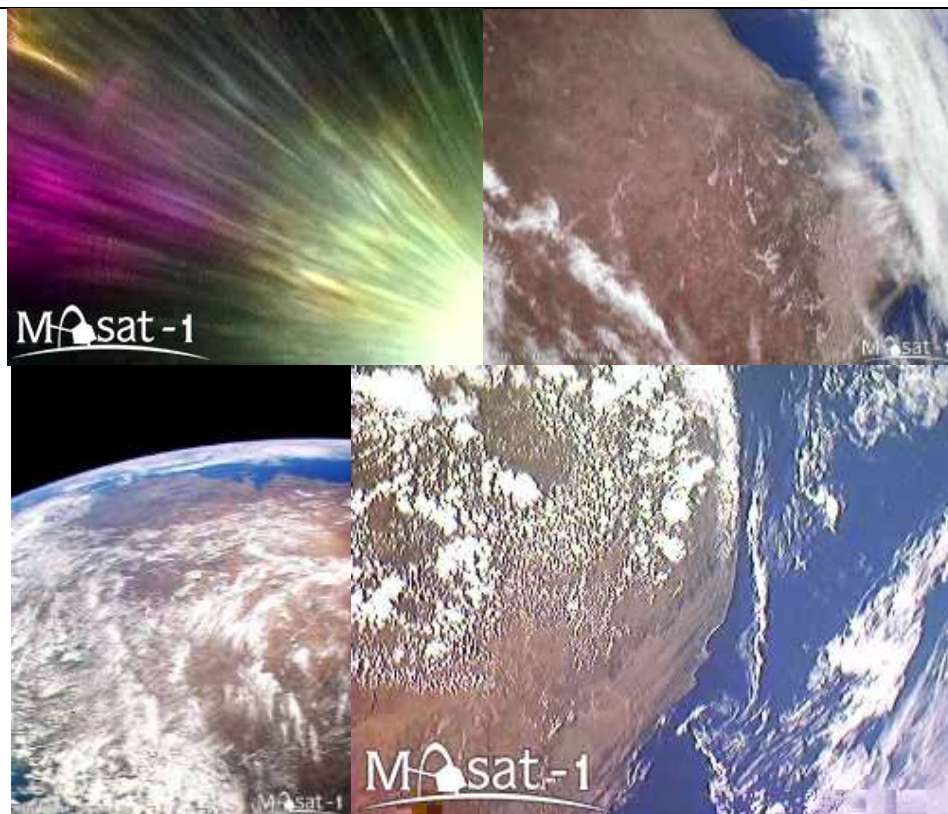
KAMERA

A műholdon elhelyezésre került egy kis felbontású kamera, amely segítségével a Földről fényképfelvétel készíthető – 29. ábra. A kamera tömege kevesebb, mint 20 gramm, az elkészített színes képek felbontása 640x480 pixel. A Cubesat műholdak kategóriájában a Masat-1 által elkészített felvételek minősége kiemelkedő.



29. ábra Masat-1 kamera

Az alábbiakban bemutatunk néhányat a Masat-1 által elkészített fotók közül – 30. ábra:



30. ábra Fotómontázs a Masat-1 felvételeiből

ÖSSZEFOGLALÁS

A Masat-1 kisműhold egy hónapja üzemel a világűrben. Az üzemeltetés kezdete óta nem tapasztaltunk említést érdemlő hibát, az egyes alrendszerek a tervezési paraméterekkel összhangban működnek. A műhold hőmérséklet-egyensúlya megfelelő, az akkumulátor – a fűtésnek köszönhetően – mindig az ideális üzemi hőmérséklet-tartományán belül marad. A Vega hordozórakéta első felbocsátásán részt vevő további csapatok műholdjai kevésbé hozzáférhetők a rádióamatőröknek, míg a Masat-1 már működése első hetében OSCAR minősítést, és MO-72 nevet kapott.

A műhold űrbéli viselkedését leíró adatsorok letöltése és feldolgozása cikkünk leadásának időpontjában is zajlik, így részletesebb adatokról előadásunkban szeretnénk beszámolni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ESA VEGA VV01 LAUCH CAMPAIGN, http://www.esa.int/SPECIALS/Vega/SEMY64BX9WG_mg_1.html 2012. 03. 25. szerinti állapot
- [2] Survey of CubeSat Communication Systems, BRYAN KLOFAS AND JASON ANDERSON, California Polytechnic State University, 2008. november AMSAT, www.amsat.org, 2012. 03. 25. szerinti állapot
- [3] AMSAT - MO-72 STATUS, <http://www.amsat.org/amsat-new/satellites/satInfo.php?satID=149&retURL=/satellites/status.php>, 2012. 03. 25.
- [4] CUBESAT DESIGN SPECIFICATION (CDS) REV. 12. California Polytechnic State University, 2009.
- [5] CPX: Design of a Standard Cubesat Software Bus, JACOB FARKAS, California Polytechnic State University, 2005.
- [6] Development of a Family of Picosatellite Deployers Based on the Cubesat Standard Nason, Puig-Suari, California Polytechnic State University, Twiggs, Director Space Systems Development Laboratory, Stanford University IEEE, 2002